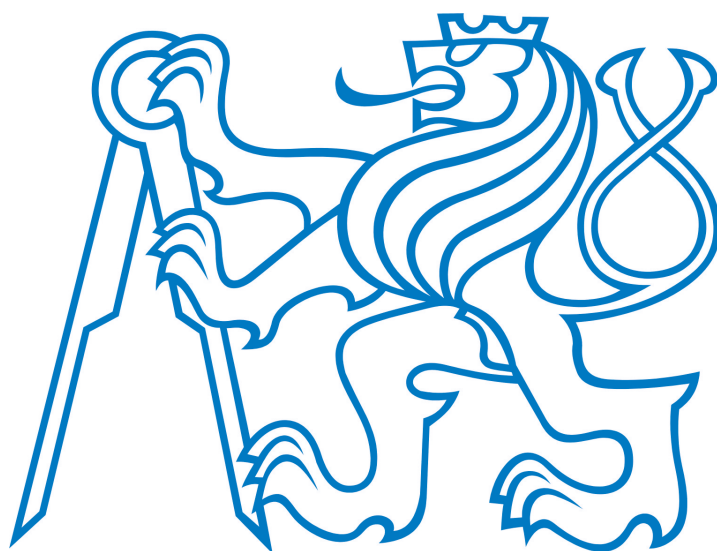


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



DISERTAČNÍ PRÁCE

Srpen 2013

Ing. Jan Kabelák

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIESELGENERÁTOR V ELEKTROENERGETICKÝCH SYSTÉMECH

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Jan Kabelák

Praha, srpen 2013

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektroenergetika

Školitel: Doc. Dr. Ing. Jan Kyncl

ABSTRACT

An increasing number of smart grids and micro grids, stricter requirements on nuclear safety and liberalizations of the electricity market are causing higher deployment of emergency sources such as diesel generators (DG). A detailed dynamic model is essential for proper technical and economical sizing of the DGs and the development of new ways of regulation.

The doctoral thesis is focused on the description and comparison of 3 non-standard modes of electrical power system operation and the development of the DG dynamic model as a convenient source for their power supply.

The first part gives the overview of the operation of a Transmission System during island mode, Smart Grids and emergency power supply of nuclear power plant auxiliaries.

Island Mode is defined by the frequency deviation. Power plants control systems are switched to proportional speed control. In emergency cases load shedding is applied. Operators attempt to reconfigure the power system to normal operation mode.

Smart Grids comprise a high amount of distributed renewable power sources with unpredictable power generation. They deal with them by controlling the electrical energy on both sides – sources and loads.

During loss of power at Nuclear Power Plant auxiliaries the first priority is to restore the power supply of emergency consumers. Automatic Load Shedding is applied. The emergency DG is loaded in several steps by the Emergency Load Sequencer.

The second part of thesis describes the dynamic model of the DG.

A detailed derivation process and description of the crated diesel engine and synchronous generator ABC model are described in the first chapter.

The key chapter concentrates on the dynamic behaviour of both the whole DG model and each part separately. It contains a case study, where the influence of input parameters during transients is evaluated. This chapter concludes with an extensive appendix with graphs of important variables.

The third chapter of this part illustrates the possibility of applying the model to DG sizing. It contains calculation cases from common practice.

The model is ready for the research of DG operation modes and sizing calculations for various sequences of loading. It is utilised for the development of sizing methodology based on a new principle of control on both sides – generation and consumption.

Key words

Diesel Engine, Synchronous Generator – model ABC, Diesel Generator, Island Operation, Smart Grid, Auxiliaries of Nuclear Power Plant Simulation, Computer modelling, Mathematica

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval svému školiteli Doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za odborné vedení práce a podnětné konzultace. Rovněž děkuji Ing. Janu Špetlíkovi, Ph.D, za užitečné rady při vytváření modelu synchronního generátoru.

Slova díků patří také mým nejbližším, především mamince, za duševní a kalorickou podporu ve chvílích největšího pracovního nasazení.

OBSAH

1. Úvod	6
1.1 Nekonenční provoz elektroenergetických systémů	6
1.2 Záměr disertační práce	7
1.3 Obsah a členění práce.....	8
 ČÁST I. Současný stav a trendy rozvoje elektroenergetických systémů se zaměřením na dieselgenerátory	
2. Ostrovní provoz PS	10
2.1 Požadavky na práci v OP	10
2.2 Technické prostředky OP	13
2.3 Práce PPC v OP	19
3. Smart Grids	25
3.1 Koncept a funkce SG	26
3.2 Srovnání funkce SG s konvenční ES	29
3.3 Technické prostředky SG	30
3.4 Provozní zkušenosti.....	35
4. Vlastní spotřeba jaderného bloku	43
4.1 Základní elektrické schéma	43
4.2 Provozní režimy elektrického schématu.....	46
4.3 Dimenzování DG.....	53
 ČÁST II. Dynamický model dieselgenerátoru	
5. Tvorba modelu	59
5.1 Struktura modelu.....	60
5.2 Efektivní řešení	64
5.3 Numerické metody řešení	70
6. Ověření funkce modelu	71
6.1 Analýza vlastností modelu	71
6.2 Parametrizace modelu	86
6.3 Demonstrace funkce modelu	89

7. Zatěžování DG	90
7.1 Postupné zatěžování DG	90
7.2 Mezní skok zatížení DG	92
7.3 Závěr.....	92
8. Závěr	93
9. Literatura	96
10. Seznam zkratk	100
11. Přílohy.....	102

1. KAPITOLA

ÚVOD

V současné spotřební společnosti neustále roste poptávka po různých formách energie. Rozvoj energetiky a energetických nároků společnosti jsou významnými ukazateli, které vypovídají o vyspělosti země. Dostatek energie je hnací silou k vytváření nových technologií, staveb, předmětů, k vytváření pohodlnějšího a hodnotnějšího života.

Rozvoj kvality života významně závisí na spolehlivé dodávce elektrické energie. Vývoj řídicí techniky a současné snižování zásob paliv konvenčních zdrojů pro výrobu elektrické energie vede k nutnosti i možnosti optimalizace výroby a dodávky elektrické energie. Základními požadavky, které musí systém splňovat, jsou pohotovost, dosažitelnost, spolehlivost a hospodárnost.

Elektroenergetika prošla v posledních dvaceti letech v zásadě třemi etapami vývoje:

V devadesátých letech byla elektrizační soustava ČR a SR přepojena ze soustavy Mir do soustavy UCTE. V popředí zájmu se objevily regulační vlastnosti a technický stav zdrojů.

Počátek tohoto století je spojen s liberalizací elektroenergetiky a příchodem trhu s elektrickou energií a podpůrnými službami. Důraz je kladen na ekonomiku výroby.

Dnes, kdy jsme svědky mimořádných událostí v soustavách UCTE, se obnovuje zájem o technický stav zařízení a o potřebu inteligentního řízení zdrojů a soustavy. Apeluje se na stabilní chod zdrojů a splnění smluvních závazků účastníků trhu při současném dosažení co nejlepších ekonomických ukazatelů.

Elektřina je energetickým médiem budoucnosti. Aby mohla hrát dominantní úlohu v nové trvale udržitelné ekonomice, musí být její výroba, distribuce i využití stále modernizovány. Musí být pružnější, propojenější, spolehlivější a efektivnější. Elektřina se zkrátka musí stát inteligentnější.

1.1 Nekonvenční provoz elektroenergetických systémů

V reakci na mimořádné poruchové události v elektrizačních soustavách (ES), vyšší penetraci rozptýlených zdrojů, ale i zvýšení nároků na spolehlivost a bezpečnost technologických celků se stále častěji setkáváme s abnormálním provozem ES, jakožto s elektroenergetickými systémy provozovanými nekonvenčním způsobem.

Z pohledu současného stavu vědy a techniky v elektroenergetickém oboru rozeznáváme:

Ostrovní provoz (OP)

OP, respektive požadavky na funkci bloku v ostrovním režimu, definují kodexy přenosových soustav (PS). Definice je založena na odchylkách frekvence, tedy nejen na fyzickém oddělení části ES. Elektrárenský blok se při přechodu do ostrovního režimu automaticky přepíná na proporcionální otáčkovou regulaci (výkon je regulován v závislosti na odchylce frekvence), v některých případech využívá i funkce „Basic Opening“ (základní otevření regulačních ventilů páry v momentě přepnutí režimu regulace).

Smart Grid (SG)

Sítě SG využívají inovativní přístup k regulaci dodávky a odběru výkonu. Uplatňuje se řízení nejen na straně výroby, ale také na straně spotřeby.

Nouzové napájení vlastní spotřeby (VS) jaderné elektrárny (JE)

Při ztrátě pracovních i rezervních zdrojů bloku je VS převedena na nouzové zdroje. Tento přechod je zajištěn několika vzájemně provázanými automatikami bloku. Jedná se o automatiku podpětového vypínání (APV), které odhazuje méně důležité zátěže; ESFAS – systém pro spouštění bezpečnostních prostředků, jenž v dané situaci vyhodnocuje požadavky technologie a automatiku postupného spouštění (APS), která zatěžuje dieselgenerátor (DG) v předem stanovených krocích tak, aby byly dodrženy požadavky na kvalitu napájení a nedošlo k přetížení zdroje.

Uvedené přístupy lze však i kombinovat, tedy uplatnit jak klasické zásady používané v ostrovních režimech PS, tak zapracovat nové přístupy ze SG. Moderní způsob řízení dodávky a odběru elektrické energie při přechodu VS na nouzové zdroje vychází z optimalizace obou uvedených přístupů. Odpovídajícím způsobem je pak třeba novelizovat i metodiku dimenzování nouzového zdroje.

1.2 Záměr disertační práce

Úkolem disertační práce je na základě dlouhodobých předchozích autorových prací na projektech, studiích a odborných pomocích přehledně shrnout problematiku nekonvečního provozování elektroenergetických systémů. Práce se zaměří na:

- ostrovní provoz PS,
- způsob provozování SG a
- nouzové napájení VS bloku JE.

Tato část popíše funkci, technické prostředky, ale i provozní zkušenosti. Podrobně uvede také současnou metodiku dimenzování nouzového DG pro napájení VS JE.

Cílem disertační práce je naprogramovat a odladit universální model DG.

- Popsat způsob jeho vytvoření.
- Ověřit funkci jednotlivých částí modelu.
- Nasimulovat postupné zatěžování DG.

Očekávaným **výsledkem** disertační práce je mnohostranně použitelný dynamický model DG pracující v rámci odděleného elektroenergetického systému. Tento model

je určen k simulaci elektromechanických přechodových dějů. Najde uplatnění především v následujících aplikacích:

- Dimenzování DG.
- Návrh způsobu, struktury a parametrů regulace DG.
- Zpracování případových studií pro rozhodnutí investora a/nebo zákazníka.

A to vždy podle kritérií respektive potřeb daného elektroenergetického systému.

1.3 Obsah a členění práce

V souladu se stanoveným úkolem a vytýčenými cíli disertační práce je tato rozdělena na dvě základní části:

- ČÁST I. Současný stav a trendy rozvoje elektroenergetických systémů se zaměřením na dieselgenerátory
- ČÁST II. Dynamický model dieselgenerátoru

Část I. obsahuje 3 kapitoly popisující vždy jeden způsob nekonvečního provozování elektroenergetických systémů. Jedná se o OP, SG a nouzové napájení VS. Každá z těchto kapitol je dále členěna na odstavce, které jsou zaměřeny na popis funkcí systémů, technické prostředky zajišťující tyto funkce a příklady ze současné praxe.

Zde je vhodné upozornit na zásadní odstavce uvádějící současný způsob návrhu a dimenzování DG pro napájení VS JE. Tato metodika věrně zobrazuje současnou technickou praxi – 4.3 Dimenzování DG.

Část II. o třech kapitolách se věnuje samotnému dynamickému modelu DG. V první z nich se podrobně seznámíme s jeho postupným vytvářením a použitím některých efektivních řešení usnadňujících výpočet. Kapitola se zabývá popisem a odvozením matematických modelů jednotlivých komponent použitých pro simulaci elektromechanických přechodových dějů. Náleží k ní i dvě obsáhlé přílohy. První obsahuje odvození modelu, v druhé je uveden kompletní zdrojový kód modelu. Zdrojový kód je však bohatě komentovaný a přehledně strukturovaný tak, aby byla zjevná funkce modelu i osobě, která není znalá SW Mathematica®, v kterém je model vytvořen.

Stěžejní kapitolou celé práce je prostřední kapitola této části. Prověřuje, zda chování jak dílčích částí, tak i celého modelu odpovídá očekávaným šablonám. Tato kapitola je doplněna množstvím grafů umožňujícím studovat chování modelu. Dále je zde provedena citlivostní analýza modelu na různé parametry DG. Kapitola obsahuje i nepostradatelnou součást celé práce a to parametrizaci DG podle reálného stroje. Kapitola je završena výpočtovým případem, který dopodrobna prezentuje chování celého modelu. Grafické výsledky jsou shrnuty v samostatné příloze.

Třetí kapitola této části ilustruje možnost použití modelu k dimenzování DG. Obsahuje konkrétní výpočtové případy z praxe. Kapitola je doplněna grafickou přílohou.

Neméně významnou částí disertační práce jsou i závěrečné kapitoly, včetně seznamů použité literatury a zkratk.

Jak již bylo zmíněno, práce je opatřena přílohami, jež obsahují dynamický model, jeho odvození a grafy průběhů zvolených veličin pro jednotlivé výpočtové případy.

ČÁST I.

Současný stav a trendy rozvoje elektroenergetických systémů se zaměřením na dieselgenerátory

Tato část obsahuje shrnutí dnešního stavu studované problematiky. Zabývá se třemi různými pohledy na OP.

První se týká práce PS v OP. Dokumentuje požadavky jak na PS, tak na velké systémové zdroje elektrické energie. Na příkladech jsou zde vysvětleny technické prostředky používané k plnění uvedených požadavků.

Druhá kapitola popisuje SG. Po obecném vyjasnění problematiky se rovněž zaměřuje na chování těchto sítí v OP a takzvanými Micro Grids.

Poslední pohled se orientuje na VS jaderného bloku, zejména na napájení VS z nouzových zdrojů. I tento režim má charakter OP. Kapitola mimo jiné podrobně uvádí současný způsob návrhu a dimenzování DG pro napájení VS jaderného bloku. Metodika vychází z běžné technické praxe, viz projektová dokumentace [EGP97], [EGP99], [UJV08] a [UJV10], na které se doktorand významně podílel.

2. KAPITOLA

OSTROVNÍ PROVOZ PS

Pojmem „ostrovni provoz“ je označován kvazi-stacionární stav elektrizační soustavy (ES), kdy frekvence vybočí z předem stanovených mezí.

2.1 Požadavky na práci v OP

Na práci v OP jsou kladeny požadavky nejen ze strany ES jako celku, ale také ze strany jaderných bloků, u kterých je jaderná bezpečnost na prvním místě.

Kodex PS ČR [KdxCZ] v části I. stanovuje, že v případě vzniku ostrovního provozu (příznakem je vybočení frekvence z mezí 49.8 až 50.2 Hz) musí být blok schopen měnit svůj výkon automaticky v závislosti na odchylce frekvence od jmenovité hodnoty proporcionálním způsobem. Kromě toho bloky poskytující podpůrnou službu „Schopnost ostrovního provozu“ musí být schopny na pokyn dispečera PS měnit svůj výkon tak, aby se podílel na regulaci frekvence ostrova na hodnotu vhodnou pro fázování ostrova.

Opatření, která se přijímají jednak na straně soustavy, ale i na straně zdrojů, jsou dána frekvenčním plánem [FP].

Speciálním případem elektrárenského zdroje pracujícího v OP je jaderný blok. Jaderná bezpečnost prostřednictvím Atomového zákona [Z18/97] a Vyhlášek o zajištění jaderné bezpečnosti [V195/99] – platná verze, [V1/10] – připravovaná verze, respektive modernější Vyhlášky Úřadu jaderného dozoru Slovenské republiky [V50/06SK], diktuje specifické požadavky při práci jaderného bloku v OP.

2.1.1 Požadavky Kodexu PS

Kodex PS [KdxCZ] definuje OP jako stabilní, mimořádný provoz části elektrizační soustavy po jejím oddělení od ostatní soustavy jako důsledek poruchy, do které může pracovat několik zdrojů (bloků, elektráren). Oddělená část soustavy může být (měřeno činným a/nebo jalovým výkonem) přebyteková i nedostatková.

Z hlediska řízení provozu PS patří OP části sítě mezi „havarijní situace“.

„Schopnost ostrovního provozu“ je podpůrnou službou, kterou poskytují uživatelé PS provozovateli přenosové soustavy, který ji využívá zejména pro systémovou službu „Obnovování provozu po úplném nebo částečném rozpadu soustavy (ztrátě napájení)“. Podpůrná služba „Schopnost ostrovního provozu“ je v Kodexu PS definována jako schopnost elektrárenského bloku pracovat do vydělené části vnější

sítě, tzv. ostrova. OP se vyznačuje velkými nároky na regulační schopnosti bloku jak z hlediska regulace U/Q, tak i regulace f/P.

Kodex PS člení požadavky na schopnost bloku pracovat v OP na 3 fáze:

1. Požadavky na přechod bloku do OP
Při přechodu bloku do OP, jehož vznik je indikován vhodným frekvenčním relé nastaveným na hodnotu podle frekvenčního plánu, je nutné okamžitě zajistit především:
 - 1.1. změnu režimu regulace výkonu bloku na proporcionální regulaci otáček,
 - 1.2. vypojení bloku ze sekundární regulace výkonu,
 - 1.3. vypojení bloku ze sekundární regulace U/Q,
 - 1.4. plynulý (a pokud možno aperiodický) a stabilní přechod otáček na novou hodnotu, která je dána aktuálním zatížením turbíny v ostrovu nastavenými parametry regulace otáček (zatížení turbíny se v mezním případě může snížit ze jmenovitého výkonu až k hodnotám VS),
 - 1.5. odepnutí bloku od vnější sítě na VS (i ze jmenovitého zatížení), pokud frekvence vybočí z mezí daných frekvenčním plánem, přechod na otáčky při napájení VS musí být plynulý a stabilní,
 - 1.6. přepnutí potřebných regulací bloku do režimu vhodného pro OP.
2. Požadavky na provoz bloku v OP
Blokové regulace a technologické zařízení musí zajistit:
 - 2.1. stabilní paralelní spolupráci s ostatními bloky zapojenými v ostrovu,
 - 2.2. vhodný a stabilní průběh frekvence a napětí i při náhlých a velkých změnách zatížení, a to i při práci s nenominálními parametry napětí a frekvence,
 - 2.3. pružnou reakci bloku na potřebu výkonu ostrova.
3. Požadavky na opětovné připojení ostrova k soustavě
Blok musí být schopen:
 - 3.1. na žádost dispečera PS měnit dostatečně plynule a jemně otáčky (výkon) soustrojí tak, aby v určeném místě mohlo proběhnout fázování ostrova,
 - 3.2. připojení k vnější síti i při kmitočtu ($47,5 < f < 51,5$) Hz a svorkovém napětí ($0,92 < U < 1,08$) U_n ,
 - 3.3. v případě, že se blok fází v rozvodně PS, musí být schopen přivést napětí po blokovém vedení do této rozvodny.

2.1.2 Požadavky Frekvenčního plánu

Frekvenční plán [FP] je uveden v příloze 3 Vyhlášky MPO 219/2001 Sb.

1. Cílem frekvenčního plánu je omezit vznik velkých systémových poruch ES, udržet frekvenci v mezích, kdy není ohroženo technické zařízení elektráren ani odběratelů elektřiny, a vytvořit podmínky pro návrat kmitočtu do rozmezí 49,8 až 50,2 Hz.
2. V mezních případech, kdy se po vyčerpání opatření na straně zdrojů a omezování zátěží odchylka frekvence nadále zvyšuje, je cílem frekvenčního plánu zachovat rozhodující elektrárenské bloky v provozu na VS pro urychlení obnovy provozu ES.

3. Opatření při snížení kmitočtu sítě.
 - 3.1. V pásmu 49,8 až 49 Hz jsou přijímána opatření na straně zdrojů (stabilní otáčková regulace turbín, zvyšování výkonu zdrojů, fázování dalších zdrojů, ukončení čerpadlového provozu přečerpávacích vodních elektráren).
 - 3.2. V pásmu pod 49 Hz jsou přijímána opatření v oblasti zatížení ES (automatické frekvenční odlehčování v několika stupních).
 - 3.3. V pásmu poklesu kmitočtu na 48Hz a níže jsou vybrané rozhodující zdroje automaticky odepnuty od sítě a převedeny do provozu na VS. Odpojování probíhá při takových kmitočtech, aby nebyla překročena technická omezení zdrojů a přechod na VS byl spolehlivý.
4. Opatření při zvýšení kmitočtu sítě
 - 4.1. V pásmu nad 50,2 Hz jsou přijímána opatření na straně zdrojů (stabilní otáčková regulace turbín, automatické snižování výkonu zdrojů, odpojování zdrojů od sítě a převádění elektráren na VS, zahájení čerpadlového provozu přečerpávacích vodních elektráren).

2.1.3 Požadavky jaderného bloku při OP sítě

Pro provoz JE je důležitá odchylka frekvence $\pm 200\text{mHz}$, kdy se přepínají bloky na otáčkovou proporcionální regulaci. Jaderné bloky se snaží svou regulací výkonu podpořit ES. Při odchylkách frekvence, které by mohly ovlivnit jadernou bezpečnost (danou legislativně především Atomovým zákonem [Z18/97] a Vyhláškou o zajištění jaderné bezpečnosti [V195/99]), se elektrárna odpíná od soustavy, reguluje na VS a je připravena podpořit ES ve chvíli, kdy se její frekvence vrátí do bezpečných mezí. Nastavení parametrů odepnutí jaderného bloku od soustavy musí být selektivní k působení technologických ochranných bloků – [UJV09].

Základním požadavkem vyplývajícím z koncepce bezpečného provozu je:

1. zachování jaderné bezpečnosti ve všech projektem předpokládaných stavech. Klíčovým bezpečnostním systémem je ochrana reaktoru. Je nutné se například v konkrétním případě zabývat koordinací iniciace ochrany reaktoru od poklesu příkonu hlavního cirkulačního čerpadla s dalšími ochranami a automatikami, podrobněji viz [Kbl02].

V oblasti základního elektrického schématu je třeba jako projektem předpokládané stavy uvažovat mimo jiné i následující poruchové stavy a funkce, vyplývající z vazby na vnější sítě:

2. Zachování dynamické stability při poruchách v síti doprovázených prudkými lokálními změnami napětí a frekvence (například zkraty v oblasti vyvedení výkonu). Ochranným opatřením je rychlé a selektivní vypínání poruch ochranami v době nepřekračující critical clearing time, rychlá regulace buzení a výkonu (otáček) TG posílená automatikou rychlého řízení ventilů, viz [Kbl02].
3. Zachování statické stability přenosu je zajištěno prací v dovozených oblastech PQ diagramu spoluprací regulace buzení včetně omezovačů, skupinovým regulátorem napětí, činnostmi obsluhy.
4. Zajištění stability při systémových poruchách spojených s nerovnováhou P a případně Q, vyžadujících schopnost práce s nenominálními hodnotami f a U. Je zajišťováno souborem zařízení umožňujících práci v OP sítě.

5. Schopnost TG zregulovat na VS pokud dojde ve výše uvedených případech ke ztrátě stability.
6. Schopnost schématu VS zajistit automatický záskok rezervy (AZR) na rezervní napájení ze sítě 110kV (RNVS), pokud je zregulování turbogenerátoru na VS neúspěšné.
7. Schopnost systému zajištěného napájení (SZN) přejít na autonomní napájení z nouzových zdrojů, pokud je AZR na RNVS neúspěšný.

2.2 Technické prostředky OP

Chování bloku při vzniku ostrova je dáno elektromechanickými vlastnostmi bloku a jeho regulací výkonu, tlaku, eventuelně reaktivity. Při náhlém odlehčení nebo zatížení bloku se posuzuje především průběh otáček turbosoustrojí a jeho maximální odchylka a následně i možné působení technologických ochran bloku, eventuelně trip reaktoru.

V následujících odstavcích je na konkrétních příkladech objasněna struktura regulátoru ostrovního provozu, způsob regulace napětí v ostrovním provozu, výsledky simulací ostrovního provozu paroplynového cyklu (PPC) vyvedeného do PS 220kV.

2.2.1 Regulátor OP

V tomto odstavci je prezentována struktura a základní funkce regulátoru ostrovního provozu (ROP) – [UJE07]. Pro popis je použit konkrétní ROP pracující na Jaderné elektrárně Dukovany (JEDU). Zjednodušené schéma ROP a jeho začlenění do řídicího systému turbíny (TCS) viz obr. 1.

Struktura

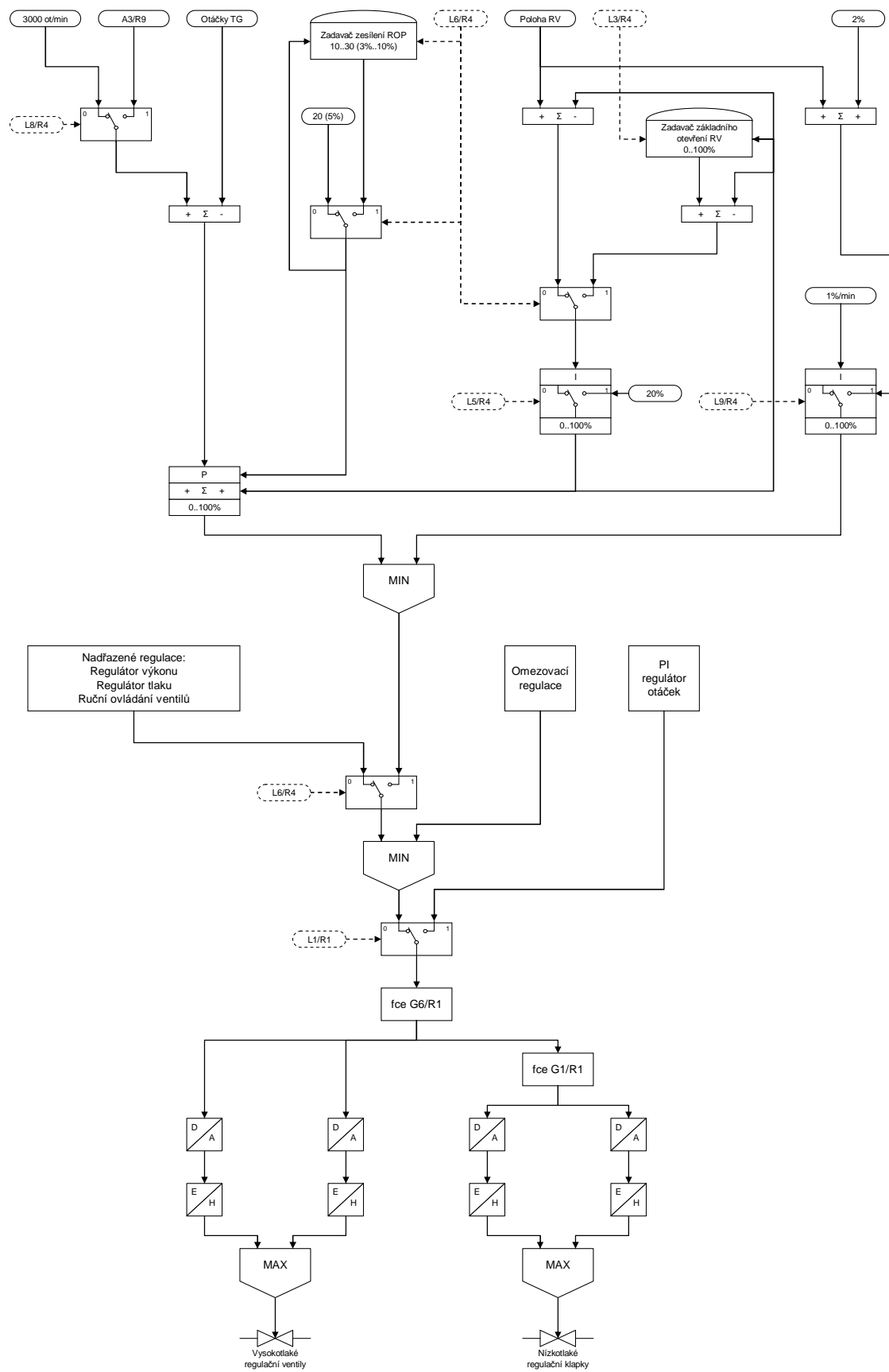
Systém TCS můžeme rozdělit na dvě základní části:

- ochrannou část řešící funkce technologických ochran obou TG jednoho reaktorového bloku a přepouštěcích stanic do kondenzátoru (PSK) a dále
- regulační část řešící regulační funkce pro oba TG a funkce společného řízení.

Tato regulační část obsahuje několik různých regulátorů uspořádaných do hierarchické struktury (PI regulátor otáček, omezovací regulace, ROP, ruční ovládaní ventilů, regulátor tlaku, regulátor výkonu), jak je naznačeno v dolní části schématu.

ROP je vlastně proporcionální regulátor otáček, který umožňuje stabilní paralelní chod i více takto řízených zdrojů elektrické energie, vzájemně kooperujících na zregulování kmitočtu a to bez vyjádřeného signálového propojení. Skládá se z následujících funkčních částí (viz horní část schématu postupně zleva doprava):

- proporcionálního regulátoru otáček,
- automatického a ručního zadávání proporcionálního zesílení,
- nastavení základního otevření ventilů turbíny v ostrovním režimu a
- členu zajišťujícího plynulý přechod při ukončení působení omezující regulace.



obr. 1 Regulátor ostrovního provozu JEDU

Funkce

Při vzniku ostrova (odchylka frekvence $\pm 200\text{mHz}$ a zároveň generátorový vypínač zapnut) dochází k přepnutí struktury regulace na ROP. Signál L6/R4=1. Uplatní se proporcionální regulátor otáček. Regulační odchylka je vypočtena jako rozdíl jmenovitých a skutečných otáček TG. Signál L8/R4 slouží k testování ROP a A3/R9 k nastavení žádané hodnoty testovacích otáček.

Proporcionální zesílení regulátoru otáček se zadává podle stavu signálu vzniku ostrova L6/R4. Před vznikem ostrova je nastaveno na konstantní hodnotu 20 (5%). Po vzniku ostrova je možno toto zesílení měnit zadavačem zesílení ROP, který byl předem vysledován na původní konstantní hodnotu. Změnou proporcionálního zesílení je možné ovlivnit sklon statické charakteristiky bloku, tedy citlivost změny výkonu na odchylku otáček.

Posunutí statické charakteristiky, respektive změna pracovních otáček, je zajištěno změnou základního otevření regulačních ventilů (BO). BO se přičítá k zesílené regulační odchylce v proporcionálním regulátoru. V případě, že nevznikl ostrov (signál L6/R4=0), je BO vysledováno na skutečnou polohu regulačních ventilů (RV) turbíny. Dosáhne se toho tím, že v rozdílovém členu vzniká odchylka mezi skutečnou polohou RV a výstupem z integračního regulátoru. Tato odchylka budí integrátor tak, aby se jeho výstup shodoval se signálem skutečné polohy RV. BO je tak připraveno pro okamžik vstupu do ostrova na aktuální hodnotě otevření RV.

Při vzniku ostrova, který zároveň není „příliš malý“, se signálem L3/R4=1 uvolní operátorovi ruční zadavač BO a tedy i možnost nastavit otáčky TG. („Příliš malým ostrovem“ se rozumí ostrov velikosti VS, který je diagnostikován buď ze stavu generátorového vypínače, nebo pomocí signálu nedovoleného zrychlení.) V rozdílovém členu vzniká odchylka mezi výstupem zadavače a výstupem integrátoru. Tato odchylka budí integrátor tak, aby se jeho výstup shodoval s výstupem zadavače ($T_i=10\text{s}$).

V případě vzniku „příliš malého ostrova“, signál L5/R4=1, se výstup integrátoru sníží na naváděcí konstantu 20%. Vlastností integračního regulátoru je vysledování výstupu integrátoru tak, aby zpětné přepnutí (L5/R4=0) bylo beznárazové.

Do výběru minima spolu s výstupem proporcionálního regulátoru je zaveden i výstup členu zajišťujícího plynulý přechod při ukončení působení omezující regulace. Při působení omezující regulace, signál L9/R4=1, vysledovává polohu RV navýšenou o 2%. Po odeznění signálu omezující regulace, signál L9/R4=0, pomalým trendem ($T_i=60\text{s}$) integruje otevření RV, dokud se neprosadí proporcionální regulace. I tento integrační regulátor má vlastnost beznárazového přepnutí.

Shrnutí

ROP je součástí TCS a je tvořen především proporcionálním regulátorem otáček. Další obvody slouží:

- k přestavení jeho citlivosti, to je sklonu statické charakteristiky, takzvaný zadavač zesílení ROP;
- k přestavení BO, to je pracovního bodu, respektive k nastavení pracovních otáček a
- k beznárazovému přechodu z omezovacích regulací.

2.2.2 Regulace napětí v OP

V tomto odstavci jsou shrnuty principy regulace napětí v PS při normálním provozu a OP – [KdxCZ], [LU00]. Jsou zde popsány provozní režimy samotného turbogenerátoru (TG) a je vysvětlen způsob regulace buzení na konkrétním schématu – [EGP02], [TNL02], [EDU01].

Principy regulace napětí PS

Regulace napětí PS se dělí do 3 skupin:

1. Terciární regulace napětí
koordinuje zadaná napětí v pilotních uzlech PS podle zásad bezpečného a ekonomického provozu v časech kolem 10 až 30 minut. Jedná se o systémovou službu, která je realizována optimalizačním programem pracujícím na dispečinku provozovatele PS.
2. Sekundární regulace napětí (ASRU)
automaticky udržuje napětí v pilotních uzlech PS. Pracuje v časové oblasti sekund až minut. Jedná se o systémovou službu realizovanou automatickým regulátorem napětí (ARN), který je umístěn přímo v pilotním uzlu nebo na elektrárně. Jeho vstupy jsou zadané napětí, které je určeno terciární regulací napětí a skutečné napětí uzlu. Výstupem je potřebný jalový výkon pro odregulování odchylky, který je přenášen na elektrárny poskytující podpůrnou službu sekundární regulace U/Q (SRUQ). V případě, že má elektrárna více bloků, je zařazen skupinový regulátor jalového výkonu, který přerozděluje požadovaný jalový výkon na jednotlivé bloky. Do ASRU jsou zařazeny i hladinové regulátory transformátorů a kompenzační tlumivky, které jsou využívány ještě před úplným vyčerpáním regulačních rezerv alternátorů.
3. Primární regulace napětí bloku
je realizována primárním regulátorem, jenž je součástí regulátoru buzení. Primární regulace napětí řídí jalový výkon bloku dle žádaného napětí. Časová konstanta primárního regulátoru je krátká, obvykle zlomky sekund. V případě, že bloku poskytuje podpůrnou službu SRUQ, je vstupní hodnota žádaného napětí určována ARN.

Regulace napětí v OP PS

V případě přechodu pilotního uzlu do ostrovního provozu se ze vstupu ASRU odpojuje signál terciární regulace napětí a přepojuje se na místní režim zadávání žádané hodnoty napětí. Popudovým signálem je výstup z alespoň ROP, případně je využit přímo výstup z frekvenčního relé, které indikuje vznik ostrovního provozu v dané části PS.

Provozní režimy TG

Z pohledu práce generátoru můžeme definovat následující provozní režimy TG:

- Najíždění TG,
- provoz na výkonu,
- práce TG do ostrovní sítě,
- práce TG na VS,
- provozní odstavování TG,

- havarijní odstavování TG,
- zkoušky TG a jeho ochran.

Funkce budicího systému TG

K zajištění správné práce TG ve všech jeho provozních režimech musí budicí systém umožňovat následující funkce:

- Automatické nabuzení generátoru;
- automatické fázování, které srovná otáčky a napětí generátoru se sítí a ve správném okamžiku přifázuje generátor na síť;
- provozní regulace;
- odbuzení generátoru při jeho odstavení;
- manuální ovládání budicího můstku.

Provozní regulace buzení

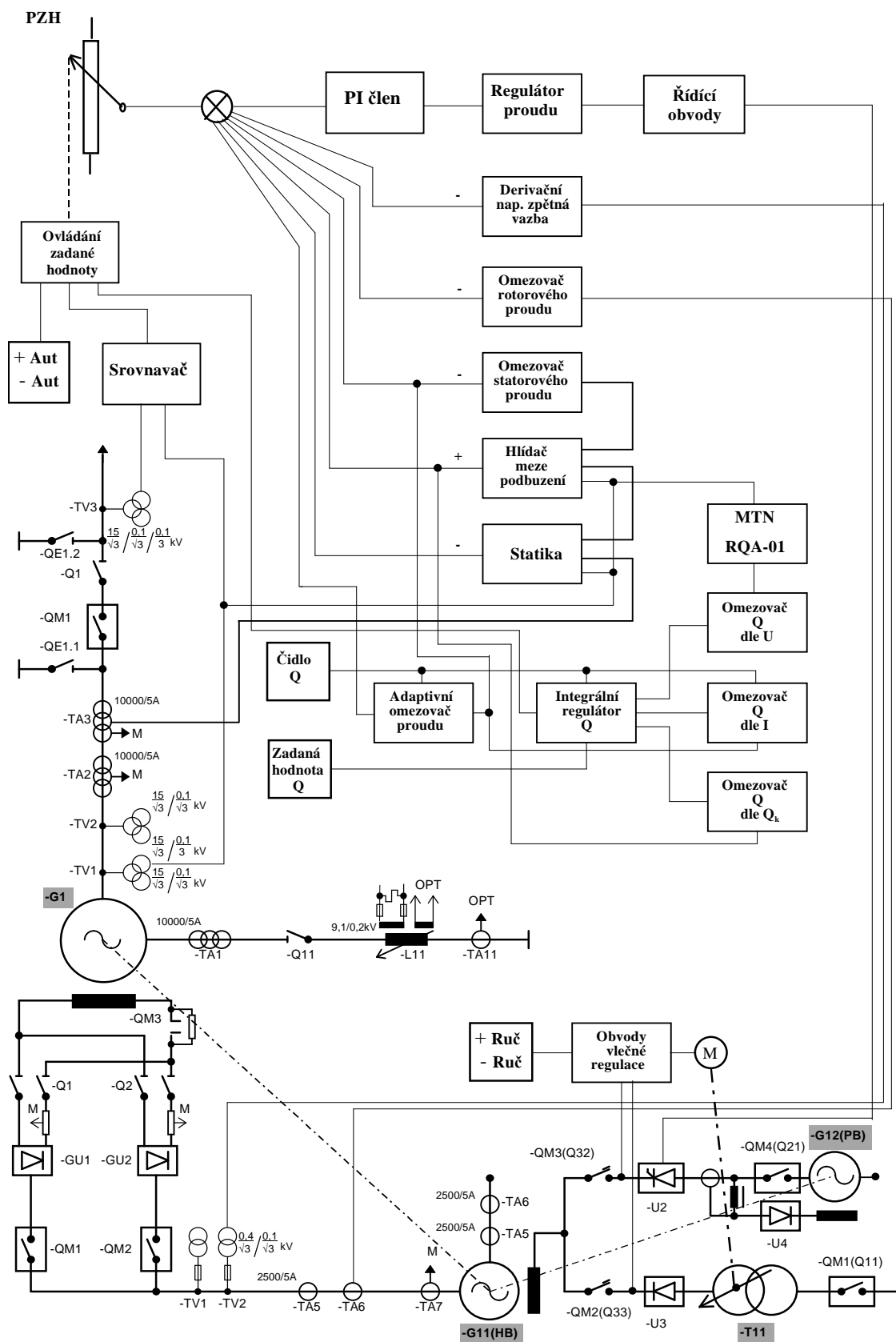
Jednou z funkcí budicího systému je provozní regulace, která umožňuje pracovat v několika volitelných módech.

1. Regulace budicího proudu (ruční řízení)
Umožňuje operátorovi ručně zadávat budicí proud. S ohledem na hladký průběh regulačních veličin jsou do této větve zařazeny obvody vlečné regulace, které zajišťují určitý maximální trend a beznárazovost změny zadané hodnoty. Viz obr. 2 Zásadní schéma buzení.
2. Automatická regulace napětí se statikou
Jedná se o nejběžnější mód regulace, který je v činnosti při sepnutém generátorovém vypínači (GV) a při nepřítomnosti signálu „ostrov“. Zadané napětí z ARN je srovnáváno s naměřeným svorkovým napětím generátoru. Úbytek na blokovém transformátoru je kompenzován pomocí takzvané statiky, do které vstupuje velikost generátorového proudu. Statika dále slouží k rovnoměrnému rozdělení jalového výkonu mezi více bloků.
3. Regulace na konstantní napětí (bez statiky)
se používá při práci TG do ostrova. Tzn. signál „ostrov“ má hodnotu logická 1 (tento je předáván z ROP nebo přímo frekvenčního relé) a zároveň je sepnutý GV. Regulace na konstantní napětí může být použita i při chodu TG naprázdno, to je rozepnutý GV. V těchto režimech je vyřazena z činnosti větve se statikou, a tak je regulováno přímo svorkové napětí na konstantní hodnotu.
4. Regulace $\cos \varphi$
představuje další způsob regulace, který se také kromě výše uvedených módů používá. Velikost účinníku je dána zátěží, konfigurací elektrizační soustavy a způsobem práce ostatních zdrojů. Regulovat účinník při práci na VS nemá smysl, proto je tato regulace podmíněna stavem GV zapnuto.

Shrnutí

Při vzniku ostrova v soustavě detekovaného frekvenčním relé je vyřazena terciární a sekundární regulace napětí. V činnosti zůstává pouze primární regulace napětí na konstantní hodnotu, bez činnosti statiky. Při ostrovním provozu je operátor bloku informován od provozovatele přenosové soustavy o postupu obnovy normálního

provozu a podle jeho pokynů ručně upravuje žádanou hodnotu svorkového napětí generátoru.



obr. 2 Zásadní schéma buzení TG 220MW (RNG26A-03) – [EDU01]

2.3 Práce PPC v OP

Následující odstavce popisují konkrétní projektovou koncepci [UJV05], [Kbl05] a způsob řešení funkce ostrovní provoz na paroplynové (PPC) elektrárně Vřesová. Tato elektrárna s výkonem 360 MW a zapojením do PS 220kV představuje v rámci ČR významný energetický zdroj. Kromě poskytování podpůrné služby „schopnost ostrovního provozu“ je zde požadována i funkce pro zajištění spolehlivého napájení citlivých a drahých technologií zpracovatelského závodu. Aplikace ostrovního provozu ve Vřesové poskytuje ochranu jak proti odchýlkám frekvence, tak i napětí v síti.

Technologie

Elektrárna je dvoubloková. Každý z bloků obsahuje následující komponenty:

- spalovací turbína Alstom 9171E o jmenovitém výkonu 125MW;
- parní turbína ABB-PBS o výkonu cca 60MW se dvěma regulovanými odběry, umožňujícími i čistě kondenzační provoz;
- parní dvojtlaký kotel s možností ohřevu síťové vody.

Plynová část tohoto PPC je navržena tak, že spalovací turbína (GT) umožňuje spalovat energoplyn, vyráběný z uhlí, který je primárním palivem, zemní plyn a jejich směsi. Pro rychlé potřeby regulace výkonu a regulace frekvence slouží zemní plyn.

Parní turbína (ST) je provozována ve vlečné regulaci a odebírá tolik páry, kolik se vyrobí na spalínovém kotli. Tlak vysokotlaké (VT) páry před ST je proměnný podle parního výkonu kotle (regulační ventily jsou v otevřené poloze). Tlak nízkotlaké (NT) páry je udržován na konstantní hodnotě a je buď řízen při odběrovém provozu regulovaným odběrem, nebo při čistě kondenzačním provozu vzdouvací klapkou.

Blok je schopen provozu i bez ST. VT pára je zavedena k přepouštěcím stanicím VT páry. Doplnování vody do okruhu je zajištěno z chemické úpravy vody. VT napájecí čerpadla (1+1) jsou navržena s elektronickou regulací otáček frekvenčními měniči, tím je udržována hladina ve VT bubnu.

Výkon bloků PPC Vřesová je vyveden dvojitou linkou 220kV do rozvodny Vítkov. Blokované vypínače 220kV jsou umístěny v rozvodně Vítkov.

Regulační pružnost

Požadavky na změny výkonu dle potřeb sítě řeší regulátor GT. ST se vzhledem k velkému zpoždění změny parametrů páry těchto procesů prakticky nezúčastňuje.

Z odstaveného stavu bloku má GT schopnost být připojena k síti do osmnácti minut a s elektrickým výkonem najede na základní hladinu v průběhu dalších dvaceti minut. Změna výkonu elektrárny ze základního – 150MW na jmenovitý – 370MW výkon je dosažena během dvanácti minut. Prodleva mezi roztočením GT a fázováním ST je kolem jedné hodiny.

Zregulování bloku na VS je řešeno odstavením ST zásahem na rychlozávěr. Regulace GT je přepnuta na otáčkový proporcionálně-integrační (PI) regulátor a požadovaný výkon VS je kryt výkonem GT. Veškerá vyrobená pára je pak přepouštěna do parních sběrů 3,5 MPa a 0,55 MPa přes redukční stanice. V případech, kdy nelze tuto páru uplatnit do příslušných sběrů, lze dočasně provozovat GT na nízkých výkonech a páru pouštět do atmosféry. Pro tyto abnormální režimy provozu při nízkém výkonu GT je zásoba napájecí vody kryta

z napájecí nádrže, popřípadě je možno uvažovat i o dodávce vody z chemické úpravy vody.

Funkce OP

Doplněním funkce ostrovního provozu se na PPC Vřesová sledují tyto hlavní cíle:

- Plnit funkci „nouzového“ zdroje v souladu s požadavky výrobního závodu. Tato funkce je pokládána za prioritní, protože je potřebná pro zabránění velkým ekonomickým škodám.
- Poskytovat placenou podpůrnou službu „Schopnost ostrovního provozu“ PS podle požadavků v Kodexu PS [KdxCZ].

Doplnění funkce ostrovního provozu představuje provedení úprav v následujících hlavních oblastech:

1. Doplnění ROP

do systému regulace spalovacích turbín. Systém regulací musí zajistit následující módy regulace a přechody mezi nimi:

- Mód 1 – výkonová regulace s korektorem frekvence,
- Mód 2 – ostrovní regulace (proporcionální otáčková regulace),
- Mód 3 – otáčková regulace (proporcionálně integrální regulace),
- Mód 4 – omezovací regulace (otáčková).

2. Doplnění frekvenčního relé FREA16,

připojeného na 220 kV stranu blokového transformátoru. Toto relé iniciuje následující funkce:

- První stupeň $f >$, $f <$
 - přepíná regulaci GT na ROP (Mód 2),
 - odpíná sekundární regulaci f/P ,
 - aktivuje AZR 6kV VS ve směru z rezervního na pracovní napájení (VS je z provozně-ekonomických důvodů při běžném provozu připojena na rezervní napájení tedy k VS sousední teplárny)
 - dává signál do sekundárního regulátoru U/Q ve Vítkově.
- Druhý stupeň $f >$, $f <$
 - odepíná blok od sítě 220kV,
 - odstavuje parní turbínu.
- Třetí stupeň $f >$
 - odstavuje parní turbínu ve výkonově přebytkových ostrovech.

3. Doplnění automatiky vypnutí vypínače 200kV (AVV220),

která kontroluje velikost napětí a při hodnotách ohrožujících funkci bloku (napěťový kolaps) jakožto nouzového zdroje pro výrobní závod odpíná blok od soustavy.

Projektové analýzy

Návrh funkce ostrovní provoz je dnes běžně doprovázen podpůrnými numerickými simulacemi přechodových procesů. S pomocí matematického modelu se ověřují navržené funkce a provedení koordinace nastavení regulací, ochran a automatik.

Dále uvedené výpočtové analýzy byly zpracovány na síťovém simulátoru MODES s použitím základního modelu sítě 400kV, 220kV a 110kV zahrnující oblast ČR. Model

byl v oblasti blízké PPC Vřesová upřesněn bilancí výkonů, modelů bloků elektráren, frekvenčních ochran a automatik. Největší pozornost byla věnována modelu PPC Vřesová.

Při volbě výpočtových případů byly respektovány provozní zkušenosti a informace provozovatelů o možných ohniscích systémových poruch, které by mohly vést na ostrovní režim v oblasti Vítkov. Byly simulovány následující typy událostí:

1. Zkraty v síti 220kV
v různé elektrické vzdálenosti od PPC. PPC a ostatní zdroje pracují před zkratem v normálním režimu, tj. ve výkonové regulaci. Simulace potvrdily potřebu stabilizovat frekvenční ochrany tak, aby nereagovaly na vzniklé kývavé procesy.
2. Ostrovy velkého rozsahu,
ostrovní síť přibližně odpovídající přenosové soustavě ČR. Dominantní roli v tomto ostrově hrají velké systémové elektrárny, pracující převážně do sítě 400kV (JETE, JEDU, uhelné elektrárny ČEZ), které svými ostrovními regulátory vyrovnávají bilanci výkonu, a tím frekvenci. Výpočty ukázaly, že dojde k přepnutí PPC do ostrovní regulace a ke správné spolupráci s ostatními zdroji v ostrovu na stabilizaci frekvence.
3. Deficitní ostrovy v oblasti Vítkova.
Uvažuje se vznik ostrova oddělením části sítě 220kV (a z ní napájených sítí 110kV) od PS 400kV. Byla simulována spolupráce blízkých zdrojů, systémových automatik frekvenčního odlehčování a zátěží. Byly modelovány:
 - Mírně deficitní ostrov. Tento ostrov byl dobře zvládnut spoluprací systémových automatik frekvenčního odlehčování s PPC elektrárnami v elektrickém blízkém okolí.
 - Silně deficitní ostrov, který je klíčový pro ověření koordinace funkce frekvenčního odlehčování s nastavením relé FREA, ROP a elektrických ochran bloků. V simulovaném ostrovu došlo k frekvenčnímu zhroucení i po zapůsobení všech 4 stupňů frekvenčního odlehčování. Blok PPC se od 2. stupně FREA odepnul od sítě a zreguloval na VS. Tím byla zachována prioritní funkce nouzového zdroje pro výrobní závod.
 - Deficitní ostrov s následným nárůstem jalové zátěže. Pokles napětí v důsledku rázu jalového výkonu způsobí odlehčení generátorů, a tím nárůst frekvence, který často vede na odstavení ST, a tím na prohloubení deficitu výkonu. Analýzy těchto případů ukázaly, že pro zabezpečení funkce PPC jakožto zdroje pro výrobní závod, je třeba doplnit AVV220. Tato automatika je klíčová pro zajištění včasného automatického přepnutí VS na napájení z odbočkových transformátorů, které by bylo jinak blokováno nízkým napětím generátoru.
4. Přebytkové ostrovy v oblasti Vítkova.
Uvažuje se vznik ostrova oddělením části sítě 220kV (a z ní napájených sítí 110kV) od PS 400kV. Byly modelovány ostrovy s různou mírou přebytku výkonu zdrojů. Byla ověřena funkce třetího stupně FREA.

Ilustrace výsledků počítačových simulací je na následujících obrázcích:

Deficitní ostrov se zátěží cca 400MW – obr. 3

V čase 1s vznikl silně deficitní ostrov v oblasti Vítkov. Do ostrova pracuje jeden blok PPC a jeden blok elektrárny Tisová. Oba bloky přepínají na ROP. V časech 1,85 až 2,86s působí postupně 4 stupně systémových automatik frekvenčního odlehčování,

které jsou ale nedostatečné. Nedojde k vyrovnání výkonové bilance. Podfrekvenční 2. stupeň FREA odpíná PPC od sítě, blok zreguluje na VS. Tím je zajištěn i zdroj pro napájení výrobního závodu. Podobně je odepnut i blok Tisová.

Zhroucení ostrova po odepnutí bloku PPC a bloku Tisová je v tomto případě do značné míry dáno nedostatečnou koordinací 4. stupně frekvenčního odlehčování (48,1Hz/0,5s) s 2. stupněm FREA na elektrárně Tisová (47,5Hz/0s). V důsledku rychlého trendu poklesu frekvence FREA způsobí odepnutí bloku elektrárny Tisová ze sítě ještě předtím, než se projeví vliv 4. stupně frekvenčního odlehčování.

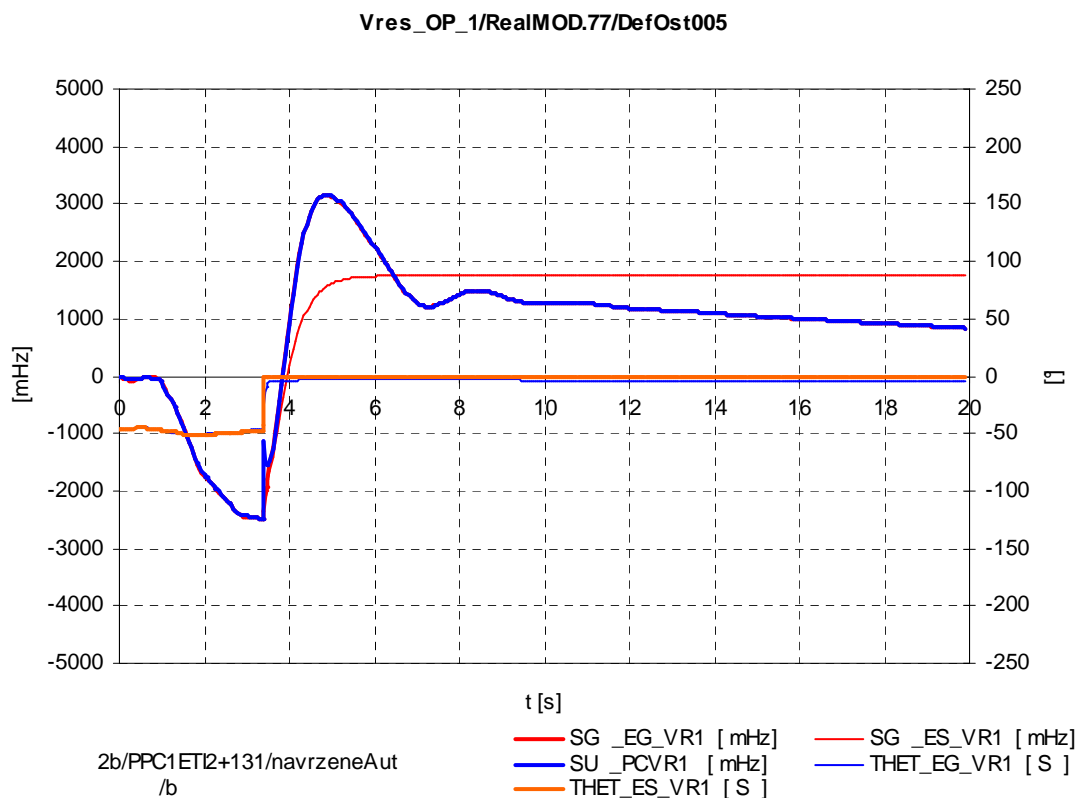
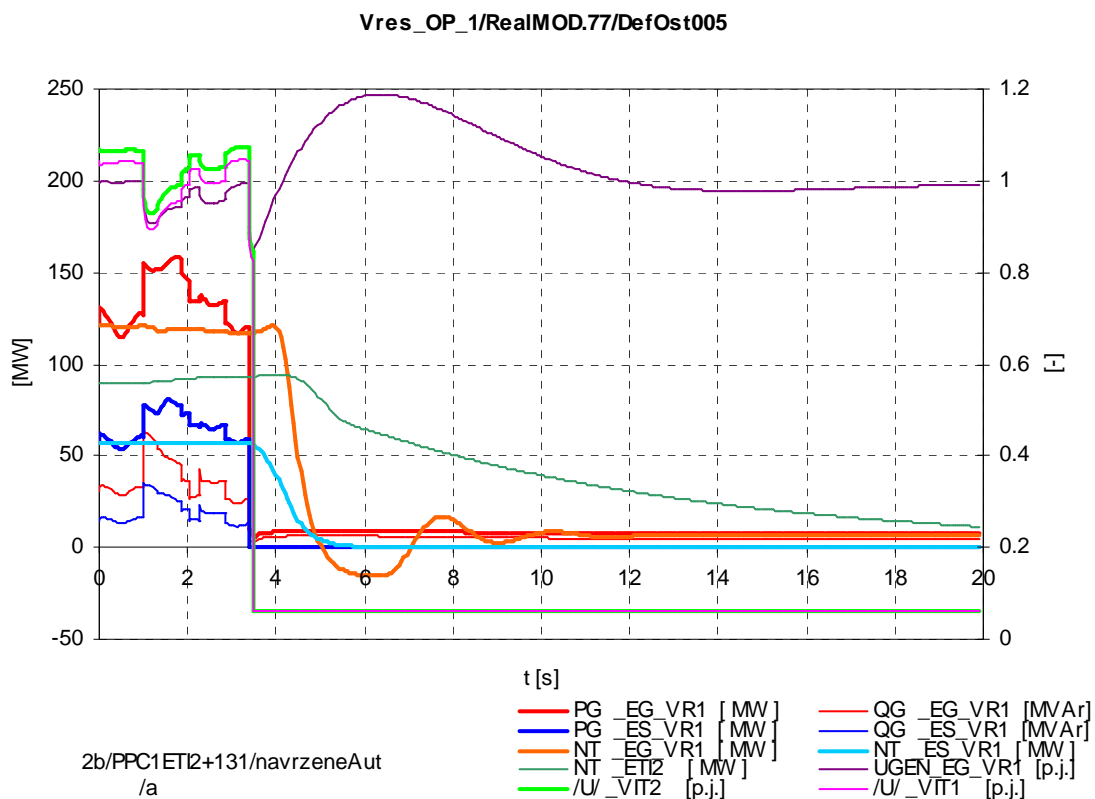
Zkrat 200 ms s vypnutím linky – obr. 4

V čase 1s vznikl zkrat na lince V224 (220kV, Vítkov – Hradec). Linka byla odepnuta po 200ms. Při původně uvažovaném nastavení 50,2Hz/0,1s by v čase 1,4s zapůsobil 1° FREA a přepnul by nadbytečně PPC do ostrovní regulace. Nastavení navržené na základě této simulace je 50,2Hz/0,4s. Toto nastavení je již proti kývání frekvence stabilní. Tato stabilizace časovým zpožděním na druhé straně znamená poněkud opožděnou reakci při detekci skutečného ostrovního režimu. Zpoždění je v řádu zlomků sekundy a při reakci ROP na přebytekové ostrovy se pokládá za zcela akceptovatelné.

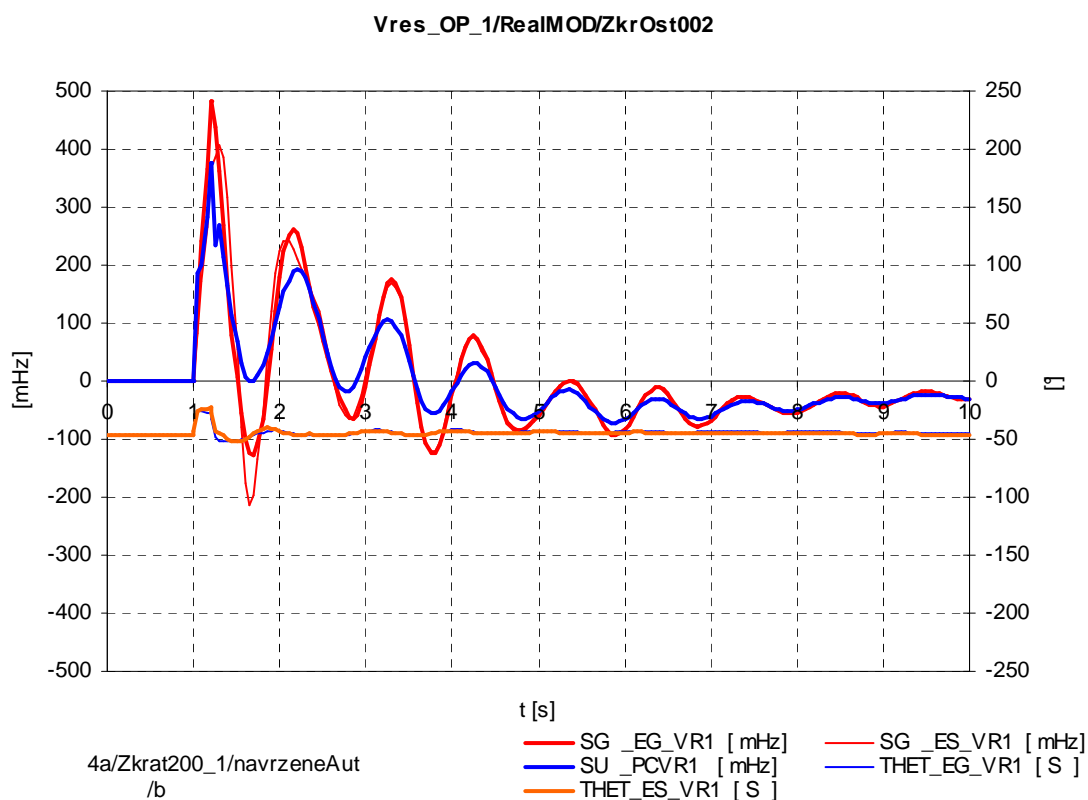
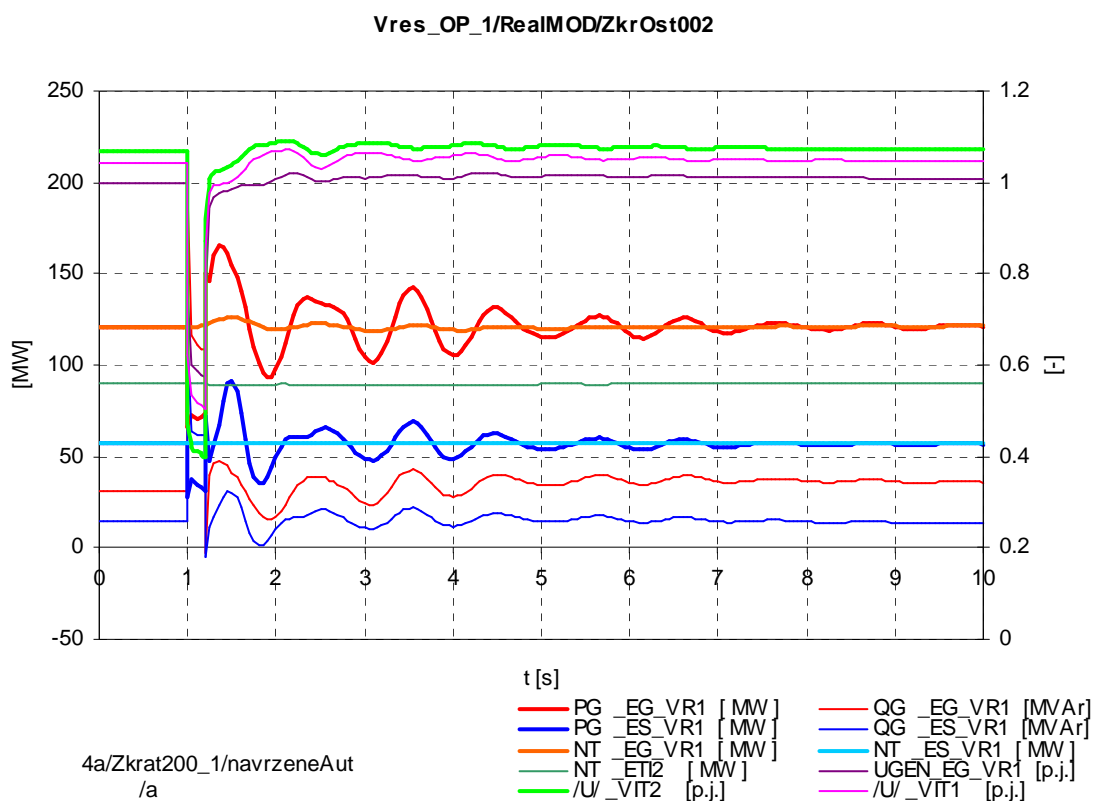
Shrnutí

Na konkrétním případě paroplynové elektrárny, jež představuje složitou strukturu strojních, elektrických a řídicích systémů, byl předveden současný způsob návrhu a projektování doplnění ostrovního provozu. V dnešní době již běžné použití simulací na matematickém modelu umožňuje zjistit odezvu takového systému, ve kterém byly například navrženy nové funkce a který má zvládnout další provozní režimy, na různé poruchové události a přechodové stavy. Na základě toho lze provést základní nastavení ochran, automatik i regulací. Toto nastavení je již pro nasimulované události vzájemně zkoordinováno podle podmínek citlivosti, stability a vzájemné selektivity. Velkou výhodou je, že lze nasimulovat i události a stavy, které lze v reálné elektrizační soustavě vytvořit pouze obtížně nebo vůbec ne. Navržené řešení a nastavení se dále ověřuje a upřesňuje zkouškami a měřeními.

Simulace na modelu umožňuje odhalit problémy a „úzká místa“ i mimo projektovanou elektrárnu. Typickým příkladem je vzájemná koordinace automatiky frekvenčního odlehčování a nastavení 2. stupně FREA u bloku elektrárny Tisová. Z pohledu hodnot frekvencí se zdají nastavení vzájemně selektivní. Dynamický pohled ale ukázal vzájemnou neselektivitu, která při simulaci vedla ke zhroucení ostrova v důsledku odepnutí bloku Tisové.



obr. 3 Deficitní ostrov se zátěží cca 400MW



obr. 4 Zkrat 200 ms s vypnutím linky

3. KAPITOLA

SMART GRIDS

Evropská elektrizační síť je jedním z největších technických systémů na světě. Slouží 430 milionům lidí prostřednictvím 230 tisíc km přenosových vedení vvn a zvn a 5 miliónů km distribučních vedení vn. Včetně všech rozvodů, transformoven a podpůrných systémů se do této soustavy investovalo do roku 2008 600 miliard EUR, což představuje cca 1500 EUR na obyvatele – [ETP08].

Tato síť úspěšně poskytuje životně důležité spojení mezi výrobcí elektrické energie a jejich zákazníky již několik desetiletí. Základní architektura této sítě je založena na zvládnutí potřeb velkých, převážně uhelných elektrárenských bloků, vzdálených od center spotřeby. Hlavním energetickým problémem, kterému dnešní Evropa čelí, je změna charakteru zdrojů.

Úsilí o snižování zastoupení zdrojů na fosilní paliva v kombinaci s narůstající snahou odběratele o větší efektivitu otevírají zákazníkům možnosti více interaktivního přístupu k síti. Více spotřebitelsky orientovaná síť je cesta kupředu. Tato principiální změna má však zásadní dopad na příští návrh sítí a jejich řízení.

Převážná část evropské elektrizační sítě byla vybudována během posledních čtyřiceti let. Obnova je nezbytná a již začala. Podle Mezinárodní energetické agentury si vyžádá do roku 2030 cca 500 miliard EUR. Bez nasazení nových "Smart" přístupů a technologií se tato obnova stane obyčejným výměnným programem založeným na starých konceptech a stávajících technologiích s malým potenciálem pro zvýšení hospodárnosti. Případně tato pouhá výměna může vést až ke ztrátě investic a nenaplnění ambiciózních energetických cílů.

Elektrizační soustava budoucnosti bude muset zahrnovat velké množství distribuovaných zdrojů, bude muset umožnit práci rozprostřené výroby z obnovitelných zdrojů a usnadnit připojení velkého množství centralizovaných výroben v pro ně vhodných lokalitách (daných například dostupností provozních médií). Navíc musí být podporována a aktivně umožněna služba dodávky elektrické energie pro účely očekávaného masivního rozšíření vozidel na elektrický pohon, ať soukromých nebo veřejných dopravních prostředků.

V tomto kontextu byla v roce 2005 založena European Technology Platform Smart Grids, která vytváří společnou vizi evropských sítí pro rok 2020 a dále do budoucna. Určuje cíle a navrhuje strategii uvedení této vize do reality tak, aby z toho těžila celá Evropa, respektive spotřebitelé elektrické energie – [ETP06].

3.1 Koncept a funkce SG

3.1.1 Definice SG

Smart Grids (SG) můžeme definovat [ETP08] jako inteligentní, samočinně se řídící a regulující elektrické sítě, které integrují činnosti všech připojených uživatelů – jak výrobců, tak odběratelů elektrické energie i těch, kteří se zabývají obojím – za účelem efektivního, ekonomického a trvale udržitelného zajištění dodávky elektrické energie až ke koncovému spotřebiteli, a to vše s minimem lidských zásahů.

SG uplatňují inovativní přístupy a služby společně s inteligentním monitorováním, řízením, komunikací a self-healing technologií za účelem:

- snáze připojit a provozovat generátory všech velikostí a technologií,
- umožnit spotřebitelům aktivně se podílet na optimalizaci funkce systému,
- poskytnout spotřebitelům více informací a možnost výběru dodávek,
- významně snížit dopad celého systému na životní prostředí,
- poskytnout zvýšenou spolehlivost a bezpečnost dodávek elektrické energie.

Nasazení Smart Grid musí být doprovázeno nejen řešením otázek technologických, tržních, obchodních, vlivů na životní prostředí, právních, normativních, informačních a komunikačních technologií, migračních, ale také musí být kladen důraz na společenské požadavky a vládní ustanovení.

3.1.2 Důvody vzniku konceptu SG

Obecná východiska vedoucí ke vzniku konceptu SG lze vyjádřit následovně:

Změna charakteru toku elektrické energie

SG se dotýkají celkové koncepce elektroenergetiky a zahrnují jak provozovatele distribuční soustavy (DS), případně PS a výrobce elektrické energie, tak i koncového zákazníka. Stávající sítě jsou koncipovány pro velké centrální zdroje a následnou distribuci. To znamená, že vyrobená elektrická energie je distribuována zákazníkovi standardním jednosměrným způsobem přes DS a/nebo PS, to znamená výrobce → distributor → zákazník. Tento model můžeme označit jako částečně pasivní a vyhovoval do té doby, než se začalo přecházet k decentralizované výrobě elektrické energie – [Ptr09].

Otevření trhu s elektrickou energií – liberalizace vede ke zvýšeným požadavkům na dálkový transport elektrické energie. K této situaci nepřispívá postupné rozdělování klíčových činností v oblasti podnikání s výrobou, distribucí a prodejem elektrické energie – unbundling, které ke snížení dynamiky některých hlavních, ale i vedlejších a servisních procesů – [Rbl10].

Nárůst decentralizované výroby

Podstatným důvodem snahy o zavádění SG je rostoucí cena paliv, tlak na snižování emisí CO₂, které vyvolávají potřebu nacházet nové šetrnější zdroje elektrické energie, podpora podnikání či zaměstnanosti zejména v dodavatelských odvětvích, diverzifikace zdrojů, ...

Jedná se o obnovitelné zdroje energie, z nichž jsou v současnosti nejrozšířenější větrné a fotovoltaické elektrárny. Jejich slabou stránkou je velká elasticita

(nestabilita) dodávky elektrické energie v závislosti na momentálních přírodních podmínkách a dále například problémy s udržením hladiny napětí při zpětných dodávkách elektrické energie do DS.

Další drobné decentralizované zdroje jsou zastoupeny například malými vodními elektrárnami, geotermálními elektrárnami nebo zdroji elektrické energie zpracovávající biomasu.

Tyto zdroje menších výkonů však nemusejí být pouze z řad obnovitelných zdrojů. Mohou být zastoupeny i kogeneračními jednotkami nebo zdroji na bioplyn. Z pochopitelných důvodů může vést připojování malých decentralizovaných zdrojů do DS a jejich následné řízení činit v budoucnosti velké problémy. Snižuje se stabilní rezerva ve výrobě elektrické energie, a tím se minimalizuje možnost eliminovat náhodně vzniklé mimořádné situace. Vznikají nové požadavky na systémové a podpůrné služby.

Zvýšení požadavků na kvalitu i velikost dodávky elektrické energie

Současný zákazník má nezanedbatelně vyšší spotřebu elektrické energie, používá nové typy spotřebičů, zažívá vyšší míru pocitu o nezbytnosti dodávky elektrické energie. Dalším důvodem při zavádění SG je tedy i snaha distributora elektrické energie o zajištění zvýšených požadavků na kvalitu i velikost dodávky elektrické energie koncovému zákazníkovi. Distributor zaznamenává i zvýšené požadavky na doplňkové služby a na servis spojený s odběrem i dodávkou elektrické energie.

Řízení na straně spotřeby

Zvyšující se cena elektrické energie je rovněž legitimním důvodem hovořícím pro SG. Odběratelé elektrické energie jeví vyšší zájem o možnost řízení své spotřeby v závislosti na tarifech. Poskytnutím široké škály spotřebitelských tarifů elektrické energie může distributor dosáhnout změny profilů (24 hodinový, týdenní, sezónní, roční, den/noc, ...) a tak regulovat chod DS a lépe vykrývat diagram denní spotřeby v době největší špičky.

Kromě změn v samotném chování koncových zákazníků lze očekávat i změny charakteru zátěží. V souvislosti s postupným vyčerpáváním fosilních paliv, zejména ropy, a postupným snižováním CO₂ zmiňme pro příklad automobilový průmysl, do něhož začínají vstupovat elektromobily. Jejich hlavní problém spočívá především v malé kapacitě akumulátorů, a tím pádem i v malém akčním rádiu. Na tomto poli lze očekávat velký pokrok, a tudíž můžeme předpokládat, že v budoucnu bude možné elektromobily využít i ke skladování elektrické energie.

Pokrok v technologiích

Dalším významným vlivem je významný pokrok v technologiích, a to ať už přímo ve primárních technologiích spojených s výrobou, přenosem, distribucí či spotřebou elektrické energie nebo v technologiích sekundárních, jako je monitorování, řízení, chránění a automatizace, či v technologiích zajišťujících potřebnou infrastrukturu pro jednotlivá řešení, což je zejména komunikace, přenos dat, obecný rozvoj technologií HW a SW výpočetních a informačních systémů

Pokrokem lze chápat nejen absolutní nárůst funkčnosti, ale i významný posun v poměru cena/výkon, tedy posun s ohledem na akceptovatelnou výši ceny nových řešení.

3.1.3 Očekávané funkce SG

SG zabezpečuje následující funkce:

Vyrovnaní dodávek elektrické energie

SG lépe vyrovnávají dodávky energie s poptávkou, tím lze docílit provozních úspor. Děje se tak prostřednictvím dálkové regulace spotřeby elektrické energie u jednotlivých „inteligentních“ spotřebičů na straně zákazníka. Takový koncept umožňuje efektivně řešit nejen běžný aktuální nesoulad mezi výrobou a spotřebou elektrické energie na úrovni DS, ale také krizové situace, kdy je nutné v krátkém čase významně omezit spotřebu elektrické energie u velkého počtu zákazníků. Dnes je kritický nedostatek výkonu zajišťován například frekvenčním odlehčováním (FO), které neumožňuje selektivní řízení v rámci spotřeby jednoho zákazníka – [Ptr09].

Obousměrný tok elektrické energie

SG zapojí do tradiční DS další výrobní zdroje a umožní obousměrný tok elektřiny k zákazníkovi i zpět. Do sítí budou elektřinu dodávat nejen dnes běžné velkokapacitní elektrárny, ale navíc budou zapojeny menší lokální či regionální zdroje, jako například palivové články, solární elektrárny, větrné farmy, mikroturbíny a jiné decentralizované technologie výroby elektřiny. Tímto bude umožněno, aby koncoví zákazníci z řady měst a obcí či obchodních firem a průmyslových podniků vyráběli elektřinu vlastními zdroji a její přebytky dodávali do sítě, případně při jejím nedostatku ze sítě čerpali. Předpokladem je samozřejmě také obousměrný tok elektřiny mezi distribučními a přenosovými soustavami.

Mikrosítě a OP

Nový přístup k řízení spotřeby elektrické energie umožňuje provozovat mikrosítě v režimu OP za podmínky, že mají svůj nezávislý zdroj, respektive zdroje elektrické energie.

Automatizace elektrických stanic

SG nabízí systémy pro automatizaci elektrických stanic, které jsou propojeny s operačními centry a technickými divizemi. Použití automatizace vytváří předpoklady pro zvýšení spolehlivosti dodávek elektrické energie při současném snížení provozních a servisních nákladů.

Monitoring prvků schématu

SG používají technologie jak v oblasti monitoringu v reálném čase, tak diagnostických služeb nezbytných nejen pro zvyšování spolehlivosti elektrické sítě, ale především pro optimalizaci využití její infrastruktury.

Pokročilá měření, rychlá detekce poruch

Pokročilá měření sítě doplňují běžný měřicí systém a rozšiřují jeho kapacitu prostřednictvím kombinování informací ze senzorů umístěných v síti a informací získaných z těchto pokročilých měření. Tím lze docílit komplexního přehledu o síti a rychlé lokace poruch.

Poruchy vedení jsou pak detekovány prostřednictvím inteligentních senzorů s nízkými nároky na údržbu a přináší tak náhled na stav sítě v reálném čase. Je tak

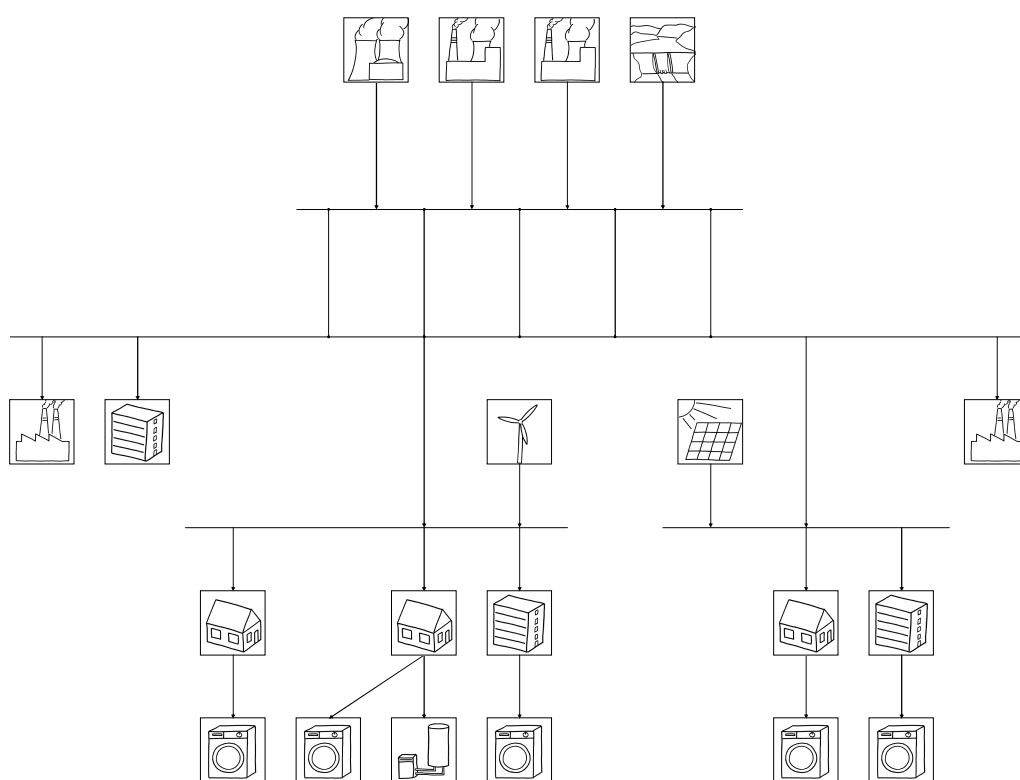
umožněna rychlá detekce poruch, případně i předcházení poruch, nebo alespoň zkracování výpadků.

Komunikace po elektrických rozvodech, vyšší portfolio služeb

K zabezpečení jmenovaných funkcí je rovněž nutná spolehlivá infrastruktura umožňující komunikaci. Nabízí se využití existujících energetických rozvodů pro širokopásmové služby, jako například internet, telefon, řízení spotřeby a podobně.

3.2 Srovnání funkce SG s konvenční ES

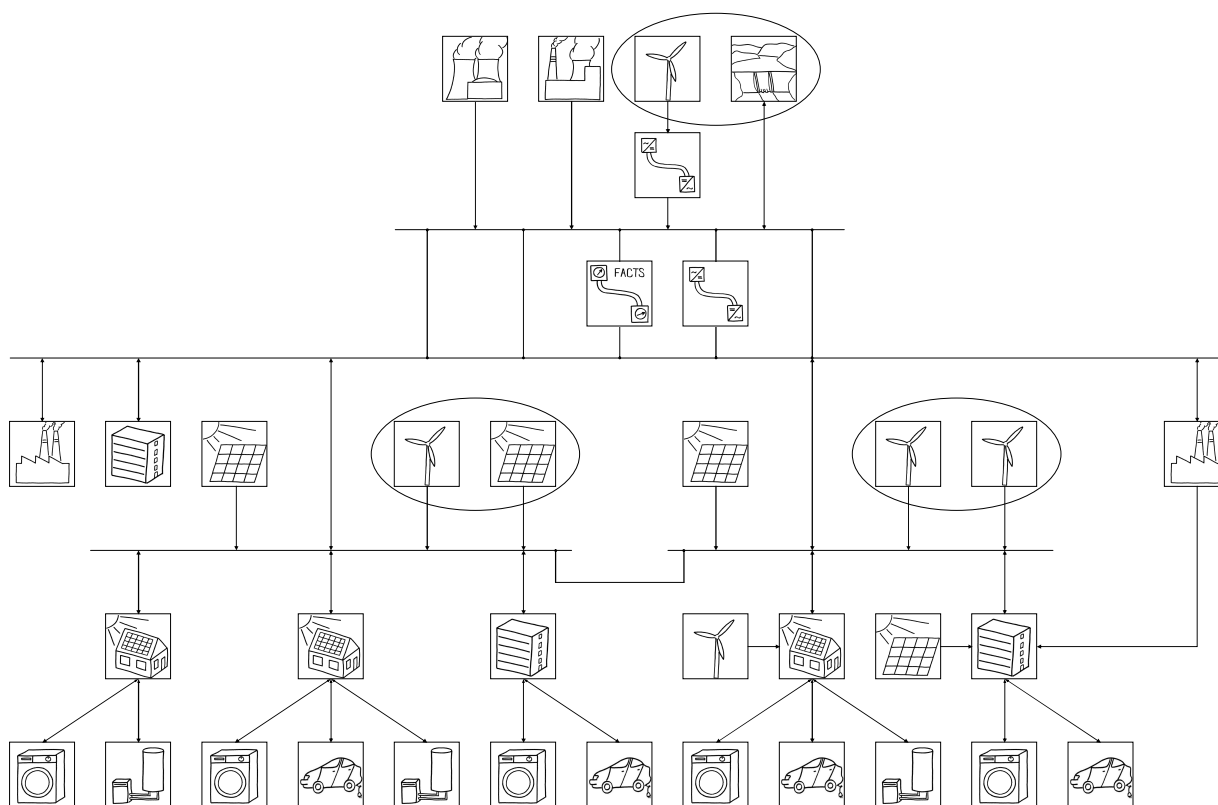
Budoucí rozvodná síť je rozšířenou verzí současné sítě s větším množstvím monitorovacích a komunikačních systémů, nových propojení, dvousměrným tokem energie a informací a větším podílem lokální výroby elektrické energie. Srovnání SG se současným energetickým systémem je patrný z následujících schémat obr. 5 a obr. 6.



obr. 5 Konvenční systém

Konvenční systém

- Centrální výroba
- Jednosměrný tok výkonu
- Radiální topologie
- Výroba sleduje poptávku
- Řízení a plánování „shora – dolů“
- Řízení a plánování především na základě historických zkušeností
- Manuální obnova po poruše
- Oblastní a národní technické, obchodní a právní normy



obr. 6 Smart Grid

Smart Grid

- Centrální i distribuovaná výroba
- Přerušovaná a těžko předvídatelná výroba v obnovitelných zdrojích
- Obousměrný tok výkonu
- Síťová topologie
- Spotřeba sleduje (do jisté míry) výrobu
- Spotřeba je nedílnou součástí operativního řízení
- Řízení a plánování především na základě informací získávaných v reálném čase
- Poloautomatická nebo automatická obnova po poruše
- Harmonizované technické, obchodní a právní normy v rámci Evropy

3.3 Technické prostředky SG

K zajištění pořadových funkcí SG se využívají moderní technické prostředky.

Aplikace na straně výroby a distribuce

- Virtuální elektrárny
- FACTS
- Zásobníky elektrické energie
- HVDC

- Self Healing
- Smart Metering
- WAM (Wide Area Monitoring) monitorování sítí na principu synchronních měření, synchronní fázory – [Rbl10]
- Další prostředky: Komunikační technologie, on-line optimalizované zpětnovazební řízení zdrojů v DS, dynamické kompenzátory, pomaloběžné generátory, ...

Aplikace na straně koncových zákazníků

- Smart Metering
(detailní měření spotřeby, trvalé informace o spotřebě)
- Smart House
domácí automatizace, řízení spotřeby
- Elektromobily

Nejdůležitější technické prostředky SG jsou blíže charakterizovány v následujících odstavcích.

3.3.1 Virtuální elektrárny

Síla větru a množství slunečního záření jsou poměrně špatně předvídatelné hodnoty, ale při správném propojení se mohou stát stabilním faktorem rozsáhlé energetické sítě. SG umožňují spojením malých výroben vytvořit virtuální elektrárnu a definovat ji jako množinu malých výrobních jednotek řízenou prostřednictvím inteligentních sítí. Z hlediska ES se virtuální elektrárna chová jako klasická výrobní jednotka.

Například na přelomu let 2008 a 2009 RWE spojil 9 malých vodních elektráren, několik větrných elektráren a elektráren na biomasu s výkony mezi 150 a 1100 kW do virtuální elektrárny přes 9 MW. Takovato propojení přináší výhody všem zúčastněným. Je tak možné efektivněji řídit provoz a přes kolísavý rozsah výroby může být lépe vybalancována vyráběná elektrická energie. To v konečném důsledku umožní účastníkům lépe obchodovat, protože dosáhnou kritické velikosti, při které se již mohou aktivně podílet na energetickém trhu.

Nejdůležitější technologií pro virtuální elektrárny jsou moderní komunikační a řídicí systémy. Tyto systémy propojující jednotlivé distribuované energetické zdroje vytváří denní plán využití zdrojů na základě aktuálních cen elektrické energie a poptávky zákazníků a určují, které elektrárny a kdy budou do sítě připojeny případně i režim práce akumulacních zdrojů, kterými jsou například přečerpávací vodní elektrárny.

3.3.2 FACTS a zásobníky elektrické energie

S připojováním většího množství decentralizovaných výrobců elektrické energie je nezbytné umožnit řídit toky elektrické energie. S pomocí Flexibilních střídavých přenosových systémů – FACTS (Flexible AC Transmission Systems) může být elektrický přenos veden definovanou cestou.

FACTS zásadně zvedají kapacitu přenosových elektrických vedení, a to až o 50% a zároveň zachovávají, respektive zvyšují, stabilitu a spolehlivost systému. Celkově lze říci, že FACTS zlepšují účinnost dálkových přenosů energie, odstraňují místa s úzkou

průchodností a používají se k bezpečné integraci nestálých zdrojů elektrické energie, jako jsou větrné a sluneční elektrárny, do sítě.

Poslední inovace technologií FACTS poskytují kromě funkce proudové a napěťové stabilizace i nárůst kapacity uchovávání energie. Tato nová funkce je důležitá při zvyšování podílu energie z obnovitelných zdrojů. Současné prostředky pro uchování elektrické energie dokážou poskytnout kapacitu cca 20MW v řádech desítek minut – [ABB10]. Tato kapacita umožňuje chod cca 10 tisíc domácností po dobu nezbytnou k odstranění poruch, nebo připojení náhradního zdroje. Připravuje se zvětšená varianta současného modelu o kapacitě až 50MW po dobu delší než jedna hodina. Tato varianta významně přispívá ke stabilitě sítě, lze jí využít k vyrovnání nepředvídatelné produktivity větrných a slunečných elektráren a také k zajištění nouzového zdroje energie při obnově sítě po výpadku. V železniční dopravě může tento typ sloužit při rekuperačním brzdění trakčních vozidel.

3.3.3 HVDC

Pro dlouhé úseky, které by měly propojit vzdálené oblasti do PS, je vhodná technologie vysokonapěťového stejnosměrného přenosu – HVDC (High Voltage DC), která je schopna přenášet elektrickou energii na velké vzdálenosti až tisíců km s malými ztrátami.

Toto řešení je vhodné například pro vyvedení energie z elektráren, které jsou umístěny daleko na otevřeném moři (na příklad v Německu 400MW, 130km – [ABB10]). V souvislosti s globálně dostupnými obnovitelnými zdroji elektrické energie, například solární panely na Sahaře nebo větrné parky ve Skandinávii, které jsou teoreticky schopné zajistit čistou výrobu pro celou Evropu, je rovněž vyžadován rychlý, efektivní a pružný přenos napříč Evropou. To není možné bez HVDC.

HVDC může sloužit i v opačném směru zařízením instalovaným v moři, jakými jsou například vrtné plošiny. Prostřednictvím tohoto přenosu je možné dodávat čistou a levnou hydroelektřinu z pobřeží místo z místních dieselových generátorů.

Výměna energie mezi sousedními sítěmi zvyšuje celkovou spolehlivost obou systémů a umožňuje rozsáhlejší využití energií z obnovitelných zdrojů. Části sítě, do kterých pracují větrné nebo solární elektrárny mohou mít podporu ostatních částí, které zásobují spolehlivější zdroje, například vodní nebo tepelné elektrárny.

3.3.4 Smart Metering

Smart Metering, neboli inteligentní měření – AMM (Automatic Meter Management), je technologie, jejíž pomocí si mohou koncoví zákazníci sami řídit svou spotřebu. V podstatě se jedná o integraci zákazníka do DS, kdy mu je nabídnuta možnost vybrat si z více tarifů spotřeby elektrické energie. Plná integrace zákazníků spočívá jak v instalaci digitálních měřidel dovolujících obousměrný přenos informací, tak v začlenění zákaznických elektrických zařízení přímo do sítě. Přesné informace v reálném čase umožní vznik sofistikovaných tarifů stanovujících cenu za spotřebovanou elektřinu podle aktuální situace v síti. To, spolu se schopností ovládat dálkově "chytré" domácí spotřebiče dá zákazníkům příležitost lépe řídit svoji spotřebu, např. zapínat ohřev teplé vody nebo praní prádla, pouze existuje-li v síti volná kapacita. Zákazník se tedy sám aktivně podílí na vlastní spotřebě.

Tento model je výhodný nejen pro zákazníka, ale i pro distributora, jenž prostřednictvím tohoto nástroje a nabídky různorodých tarifů může snáze regulovat chod DS a lépe vykrývat diagram denní spotřeby v době největší špičky. Energetické

společnosti získají přesné informace o chování jednotlivých zákaznických segmentů, což v ideálním případě povede ke zkvalitnění jejich služeb – [Švr09].

Základní funkce AMM

- Vzdálený odečet měřených dat
- Vzdálená ovládání měřidel
- Sběr dat pro následné analýzy řízení DS
- Řízení poptávky
- Zpětné informace zákazníkovi

Výhody technologie AMM

- Pro distributora:
 - úspory na netechnických ztrátách
 - snížení množství fyzických kontrol odběrových míst
 - nahrazení HDO
- Pro obchodníka:
 - nabídka nových tarifních struktur
 - rozšíření nabídky produktů mezi obchodníky s energiemi
- Pro zákazníka:
 - výběr z více tarifů
 - možnost ovlivnění spotřeby spínáním spotřebičů při výhodných tarifech
 - nabídka volné energie zpět distributorovi

Komponenty systému

Systém se skládá z několika úrovní. Nejnižší úroveň obsahuje multifunkční elektroměry a zařízení pro spínání zátěže. Tato zařízení komunikují po silovém vedení s nadřazenými datovými koncentrátory, které jsou umístěné převážně v distribučních transformovnách vn/nn. Tyto koncentrátory jednak zajišťují přenos dat z a do elektroměrů a zároveň mohou plnit úlohu procesní stanice pro sběr dat a řízení trafostanice, monitorování kvality energie a podobně. V případě hromadného nasazení systému AMM se z důvodů velkého množství dat nasazují do uvedené konfigurace další datové uzly na rozvodnách vvn/vn, které komunikují s datovými koncentrátory a řídicím centrem prostřednictvím optických, metalických, radiových či GSM vazeb – [Zhr09].

Pod pojmem multifunkční elektroměr si můžeme představit přístroj, u kterého je možné automaticky měnit tarify z řídicího centra. Tyto elektroměry podporují měření činné i jalové energie, odběr i dodávku, obsahují rozhraní k plynoměru, vodoměru, jsou připraveny pro domácí automatizaci. Podporují jednotky pro spínání zátěže a tím nahrazují dosavadní systém HDO.

Zařízení pro spínání zátěže má oproti HDO řadu výhod. Jednak je možné pružně měnit skupiny, na které je poslán povel na zapnutí spotřebičů, a tím zařízení lépe využívat pro řízení zatížení sítě. Zařízení navíc monitoruje vstupní a výstupní napětí relé, a tak je možné rychle zjistit, kde nastala případná porucha. Systém tím, že

využívá obousměrnou komunikaci, dovoluje komplexní řízení sítě a trvalé posuzování spotřeby a zatížení sítě.

3.3.5 Self Healing

Jak již bylo zmíněno SG umožňují maximální využití elektrické energie z jakéhokoliv výrobního zdroje. K tomu jsou navíc schopny sofistikovaně reagovat na abnormální provozní parametry, například nepříznivé napěťové poměry, přetížení sítě, deficit výkonu a podobně. Jedná se o takzvaný proces sebehojení – Self Healing, kdy se elektrická soustava sama dokáže znovu uvést do rovnováhy – [Ptr09], [Švr09].

Pro tento účel jsou SG vybaveny technologickými prvky v podobě dálkových vypínačů, integrovaných senzorů a dalších členů usnadňující samostatný provoz soustavy. Zahrnují inteligentní kontrolní a řídicí systém, který monitoruje chování ES a následně vyhodnocuje data a usměrňuje provoz sítě dle žádaných parametrů. Nedílnou součástí je i dostupnost informací o zatížení sítě v reálném čase, kvalitě dodávky, přerušení apod.

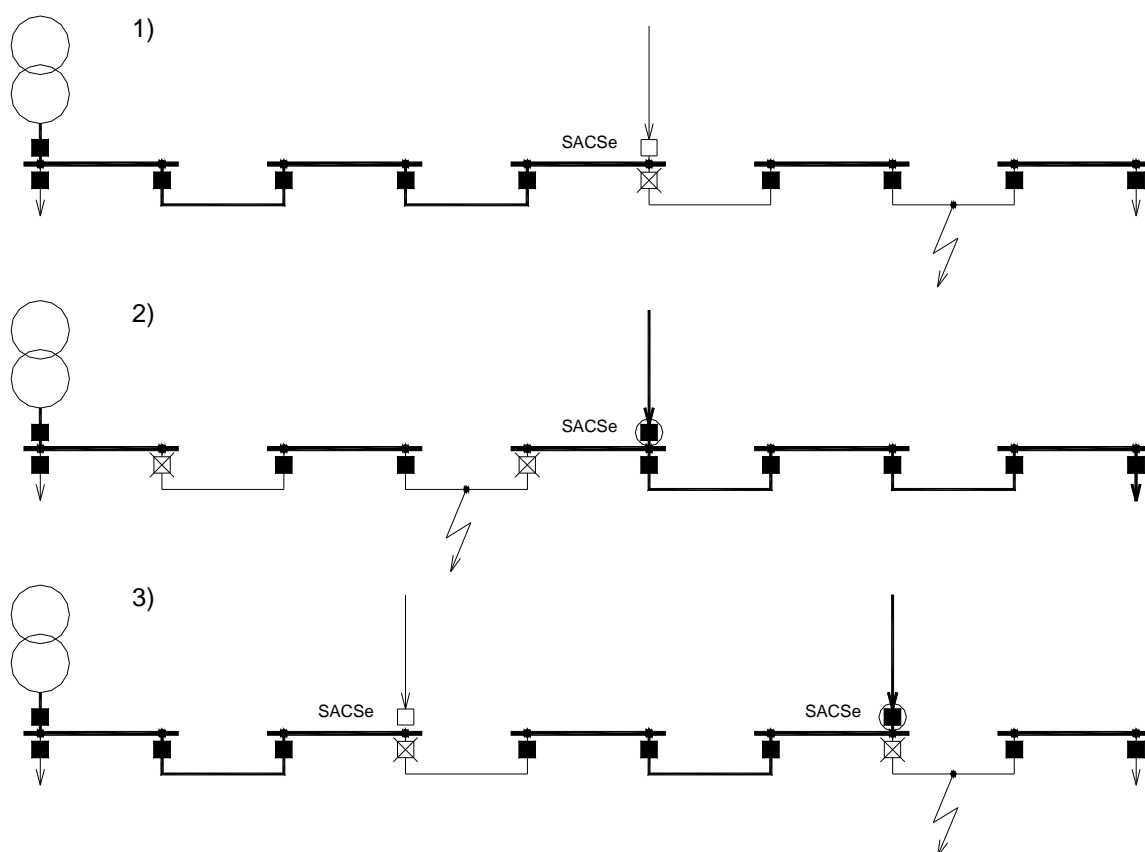
Například při detekci beznapěťového stavu SG tuto situaci vyhodnotí a hledá cestu k obnovení dodávky elektrické energie ke koncovému zákazníkovi. Flexibilní přesměrování toku elektrického výkonu umožňuje izolovat postižené místo a přesto zajistit dodávku. Tímto způsobem přispívá SG ke stabilnějšímu a úspornějšímu provozování elektrické sítě. Principy SG je možné využít při provozování lokálních distribučních soustav v OP za podmínky, že mají svůj nezávislý zdroj.

V současném prostředí, kdy je zjištěná porucha odstraňována manuálně, je možné diskutovat pouze o zkrácení doby výpadku. O snížení počtu výpadků lze uvažovat jen při nasazení automatizace, kterou lze implementovat centrálně. Centrální přístup umožňuje spravovat větší celky s větší efektivitou, protože je k dispozici větší množství informací. Oproti tomu lokální systém i přesto, že má k dispozici informace jen z nejbližšího okolí, reaguje výrazně rychleji, což může být pro některé spotřebitele zásadní.

Princip funkce Self Healing lze popsat prostřednictvím následujících 3 scénářů, viz obr. 7. Mějme mřížovou síť s hlavní napájecí rozvodnou. Každý uzel sítě je osazen přepínacím zařízením SACSe (Sectionalizing And Changeover System enhanced), které umožňuje sekcionování a záskok napájení ze zdravé části sítě – [KrS09]

1. Zkrat v síti vznikne za zřízením SACSe. Nadproudé relé selektivně vypne jen postiženou část sítě, dříve než zapůsobí ochrana v napájecí rozvodně. Zákazníkům mezi napájecí rozvodnou a zařízením SACSe bude zachována dodávka elektrické energie.
2. Dojde-li ke zkratu mezi napájecí rozvodnou a zařízením SACSe, toto zařízení nevyměří nadproud. Vývod je vypnut přímo v napájecí rozvodně. SACSe reaguje tak, že po ztrátě napětí vypíná napájecí přívod a zapne rezervní přívod z jiné části mřížové sítě.
3. Pokud dojde ke zkratu za zařízením SACSe, podobně jako v prvním případě, vypínač na SACSe vypne postiženou část sítě. Dojde-li po poruše ke ztrátě napětí v důsledku působení SACSe umístěného mezi napájecí rozvodnou a sledovaným uzlem, zařízení SACSe sledovaného uzlu přepojí napájení do nepostižené části rozvodu z rezervního přívodu jiné části soustavy.

Prostředky SACSe poloautomaticky rekonfigurují síť připínáním rezervního napájení, a to ve směru původního toku výkonu, tak i v protisměru.



obr. 7 Princip provozu Self Healing sítě se zařízením SACSe

3.4 Provozní zkušenosti

V následujících odstavcích je uvedeno několik příkladů, které popisují zkušenosti s provozováním takzvaných microgrids sítí. Microgrid je nový typ energetického systému spočívající v připojení malých výroben elektrické energie do DS. Microgrid může být provozována paralelně s hlavní DS nebo pracuje v OP s řízením výroby a spotřeby.

V kontextu se SG můžeme tyto sítě chápat jako první reálné uplatnění zásad požadovaných u sítí SG. Pro získání praktických zkušeností s provozováním těchto sítí byl vytvořen demonstrační projekt „More-Microgrids“, do nějž jsou v rámci celé Evropy zahrnuty městské a obchodní sítě, dále venkovské, laboratorní sítě i sítě na ostrovech. Cílem tohoto experimentu je vyhodnotit:

- Provozní režimy a schopnosti:
 - paralelní provoz s DS,
 - dlouhodobý OP (míra poruchovosti, paralelní práce měničů, vyšší harmonické),
 - přechod mezi oběma uvedenými režimy,
 - automatické vydělení do ostrova a opětovné přifázování,
 - schopnost minimalizace přetoku výkonu z a do nadřazené sítě,
 - schopnost řídit zátěže a
 - schopnost startu ze tmy.

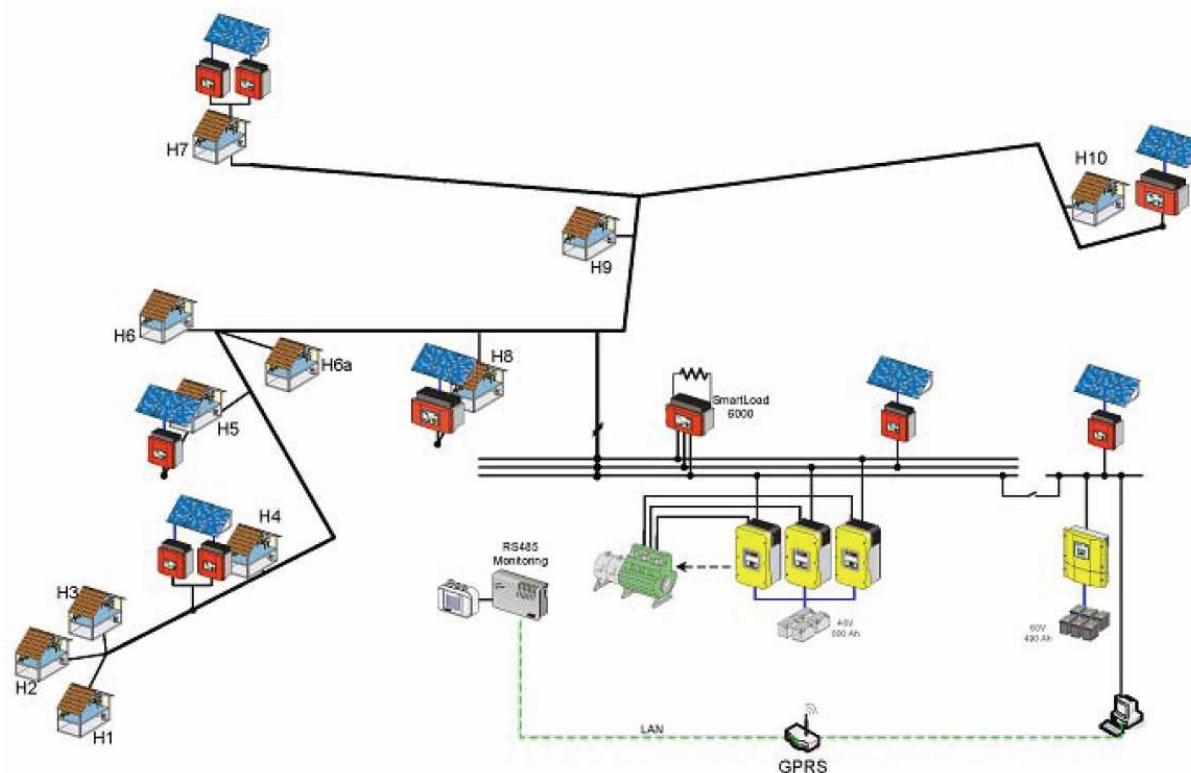
- Rozdílné strategie řízení:
 - centralizovaná,
 - decentralizovaná.
- Kvalitu elektrické energie při použití alternativních zdrojů elektrické energie jakými jsou obnovitelné zdroje, ale i DG, akubaterie a polovodičové výkonové prvky.
- Otázky týkající se vnímavosti, informovanosti, připravenosti a přístupu zákazníků.

Získané zkušenosti se uplatní ve větším měřítku u SG, například i při snižování emisí v elektroenergetice.

3.4.1 Ostrov Kythnos

Microgrid na ostrově Kythnos v Giadouromantře – Řecko byla vybudována v roce 2001 – [Tsp10]. Jedná se o autonomní třífázovou síť nn. Použitými zdroji jsou fotovoltaické panely, DG a akubaterie, které pracují společně s usměrňovači a střídači. Přenos elektrické energie zajišťují linky venkovního vedení. Komunikační kabely, které slouží k měření a řízení, jsou taženy souběžně se silovým vedením.

Instalovaný výkon zdrojů v oblasti je 15kVA. Technologie zahrnuje solární panely, akubaterie, DG a inteligentní řízení spotřebičů. Maximální zátěž rozdělená mezi 12 domků je 12kVA, viz obr. 8.



obr. 8 Síť Giadouromantra – [Tsp10]

Cíle projektu

Cílem projektu byla optimalizace provozu v ostrovním režimu s využitím odložitelné zátěže. Je možné ho rozdělit na technologický a elektroenergetický:

- Technickým cílem bylo vybudovat, ověřit a optimalizovat celý komplexní systém za reálných podmínek.
- Elektroenergetický cíl zahrnoval minimalizaci použití DG prostřednictvím spínání zátěže v době práce solárních panelů.

Vyhodnocení kvality elektrické energie

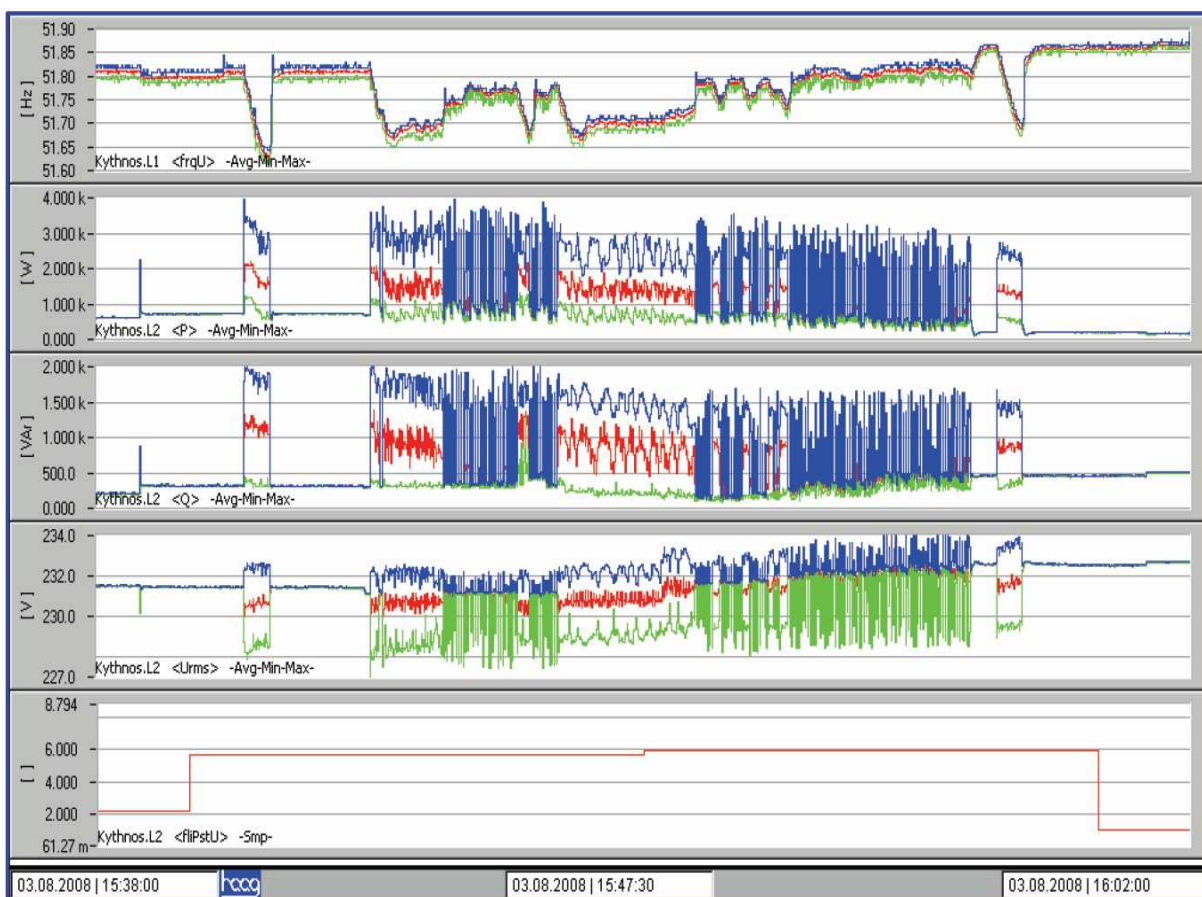
Kvalita dodávané elektrické energie byla posuzována podle EN50160 po dobu jednoho týdne, viz graf na obr. 9.

- Provozní meze síťové frekvence byly překročeny. Bylo to způsobeno tím, že se frekvence používá k řízení zátěže. (Odpínání zátěže při frekvenci < 49 Hz způsobuje prudký nárůst frekvence. Výkon solárních panelů je snižován při frekvenci > 51 Hz). Viz graf pro jeden měsíc na obr. 10.
- Vyšší krátkodobé hodnoty flickeru napětí vlivem provozu čerpadel.
- Devátá harmonická vykazovala vyšší hodnoty vlivem cyklicky spínané zátěže – lednice.
- Šestá harmonická vykazovala vyšší hodnoty během provozu solárních panelů se sníženým výkonem.

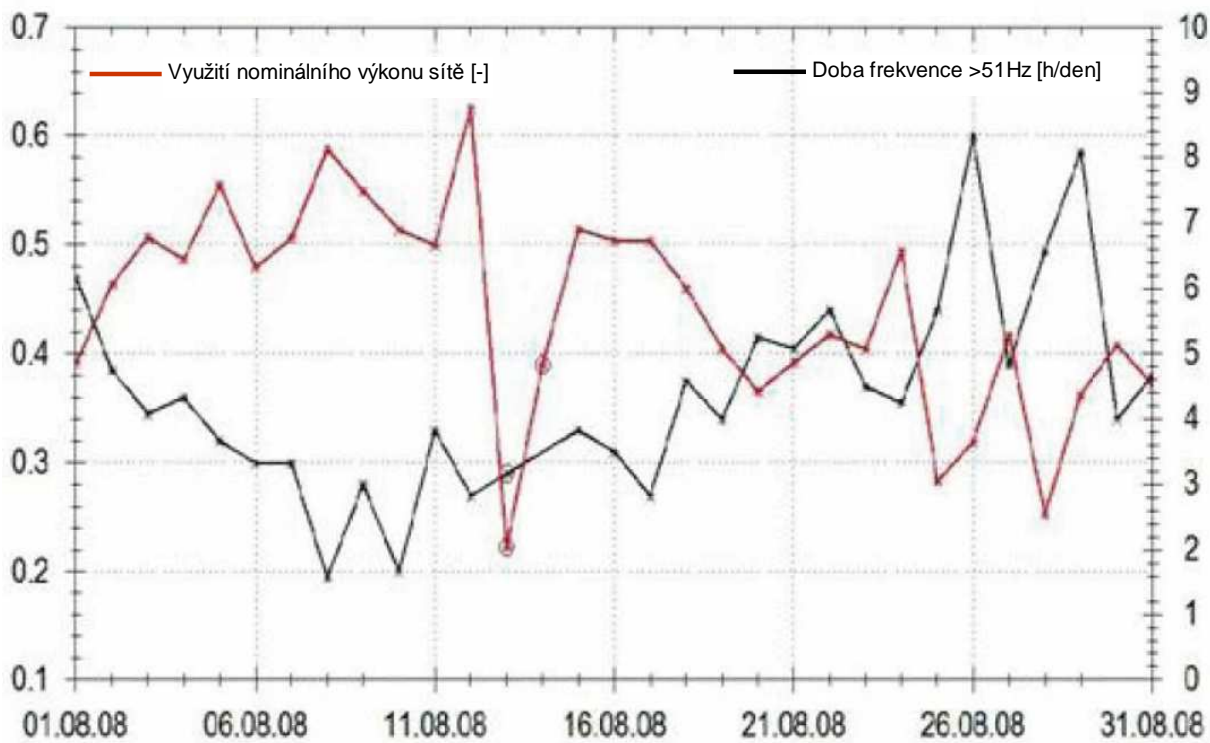
Závěry

Dále bylo vyhodnoceno:

- Denní využití nominálního výkonu sítě se pohybovalo v rozsahu 0,2 až 0,6, viz graf na obr. 10.
- Pro zvýšení výkonnosti sítě je navrhováno využívat přebytky výkonu v systému k čerpání vody, její odsolení a podobně.
- Inteligentní řízení a monitorování systému (zdrojů a zátěží) založeném na moderních technických prostředcích je nezbytné.
- Většina obyvatel velmi dobře spolupracovala během testu



obr. 9 Monitorování frekvence, činného a jalového výkonu a flickeru napětí – [Tsp10]



obr. 10 Využití výkonu sítě, trvání frekvence >51Hz – [Tsp10]

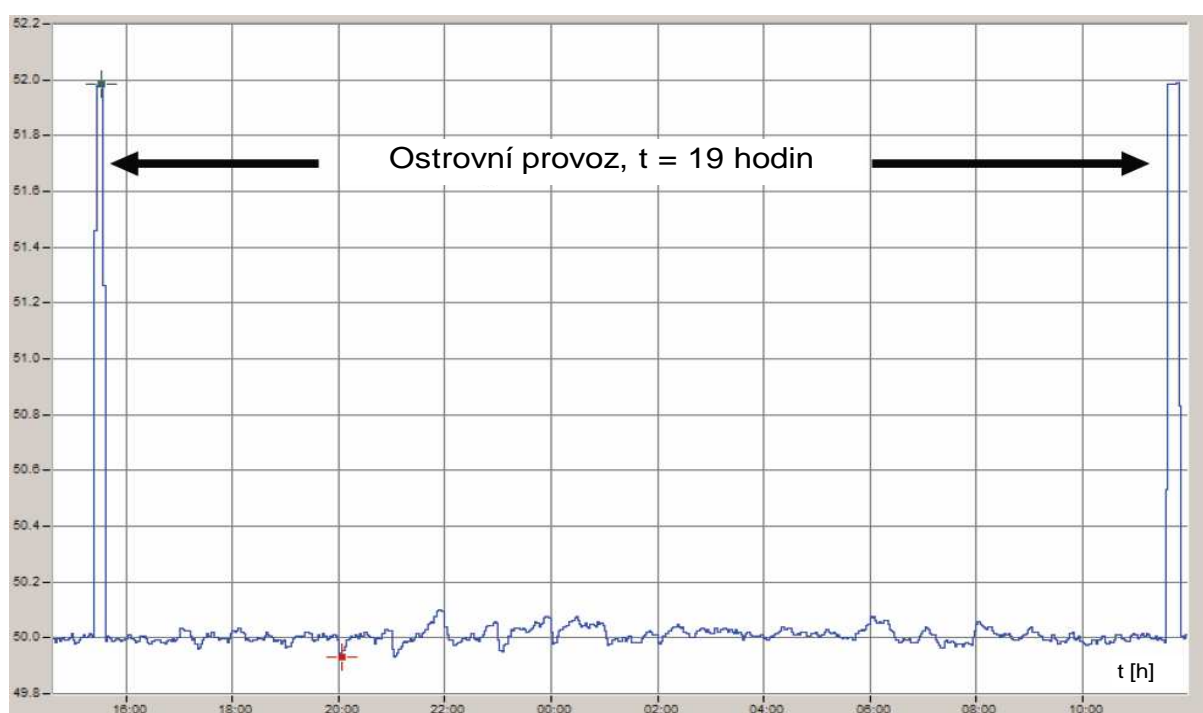
3.4.2 Mannheim

V rezidentní oblasti Mannheim-Wallstadt – Německo se v srpnu 2006 uskutečnil test přechodu microgrid do OP – [Bch10]. Vyčleněná oblast obsahuje 6 solárních panelů o celkovém výkonu 40kW o výkonech od 1kW až po 23kW.

Experiment měl za úkol:

- Vyčlenit segment DS pro microgrid
- Provéřit komunikaci mezi zdroji a spotřebiči
- Provéřit možnost přechodu do OP

Průběh frekvence při přechodu do OP je zobrazen na grafu, viz obr. 11. Při přechodu do OP a při návratu práce do DS je možné sledovat nárůst frekvence až o 2Hz. V průběhu OP však odchylka frekvence dosahovala maximálně 100 mHz.



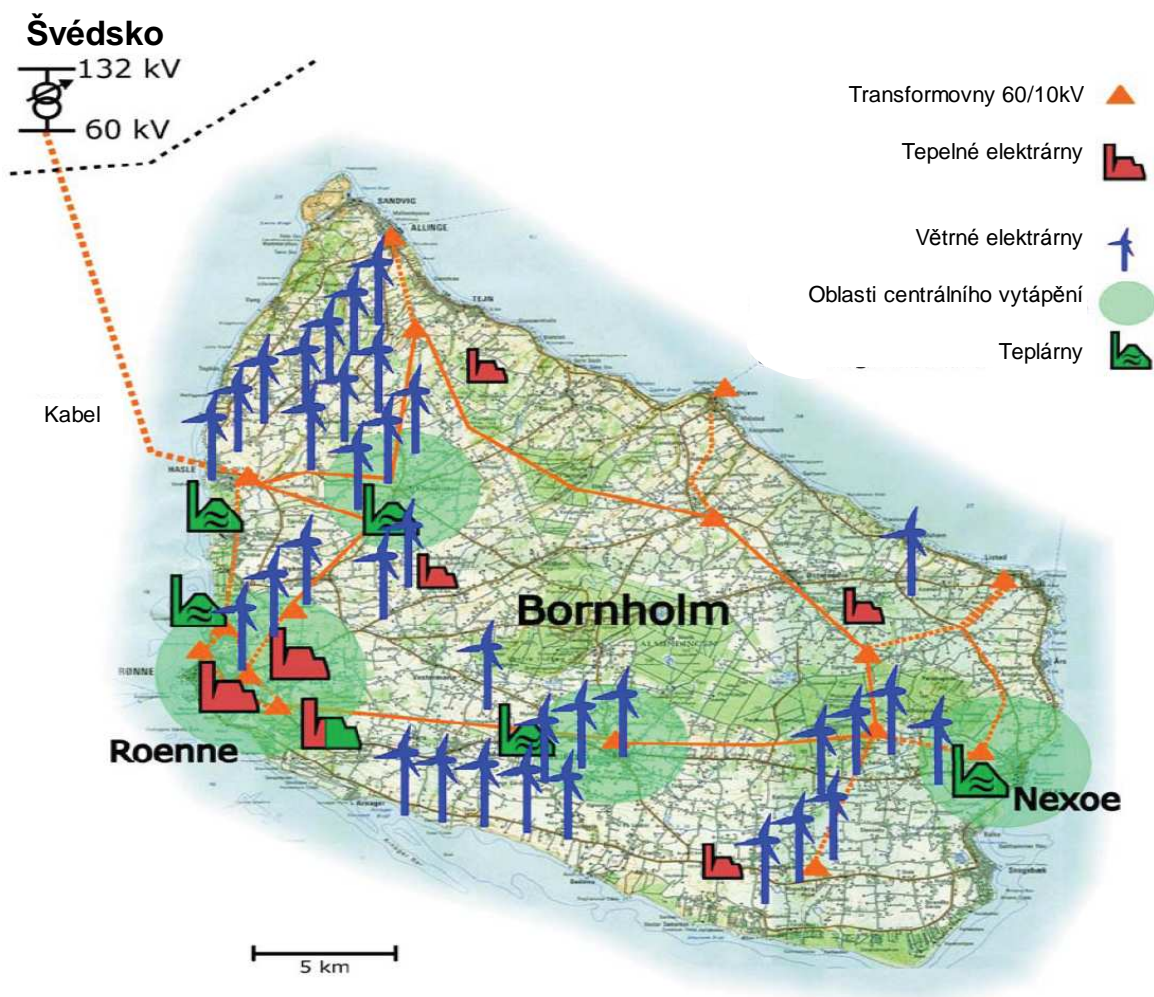
obr. 11 Průběh frekvence při OP Mannheim – [Bch10]

Závěry

- Synergický efekt s ostatními projekty pomáhá, ale je velmi složité sladit harmonogramy
- Přechod od laboratorních testů k praktickým projektům je doprovázen příliš mnoha formálními procedurami.
- Při integraci rozptýlené výroby vytváří unbundling dodatečné problémy
- Přijetí projektu zákazníky, kteří jsou současně i výrobci, vyžaduje větší než předpokládané úsilí.
- Největší výkon solárních panelů byl instalován v mateřské škole, která se ukázala jako velmi dobrý startovací bod projektu.

3.4.3 Bornholm

Sít se nachází na ostrově Bornholm v Dánsku – [Nls10]. Ostrov je připojen 60kV podmořským kabelem do švédské transformovny 132/60kV. Páteřní síť je tvořena linkami 60kV, na které navazuje rozvod 10kV. Zjednodušené schéma zdrojů viz obr. 12.



obr. 12 Síť Bornholm – [Nls10]

Do sítě je připojeno 28 tisíc zákazníků, disponuje 55MW špičkového výkonu, obsahuje 16 transformoven 60/10kV. Zdroje jsou převážně konvenční: DG 39MW, parní elektrárny na ropné produkty 39MW, parní elektrárny s kombinovaným palivem (ropné produkty a uhlí) 37MW a konečně větrné elektrárny 30MW. Na ostrově pracuje rovněž 6 tepláren, které zajišťují centrální vytápění ve 4 oblastech.

Cíle projektu

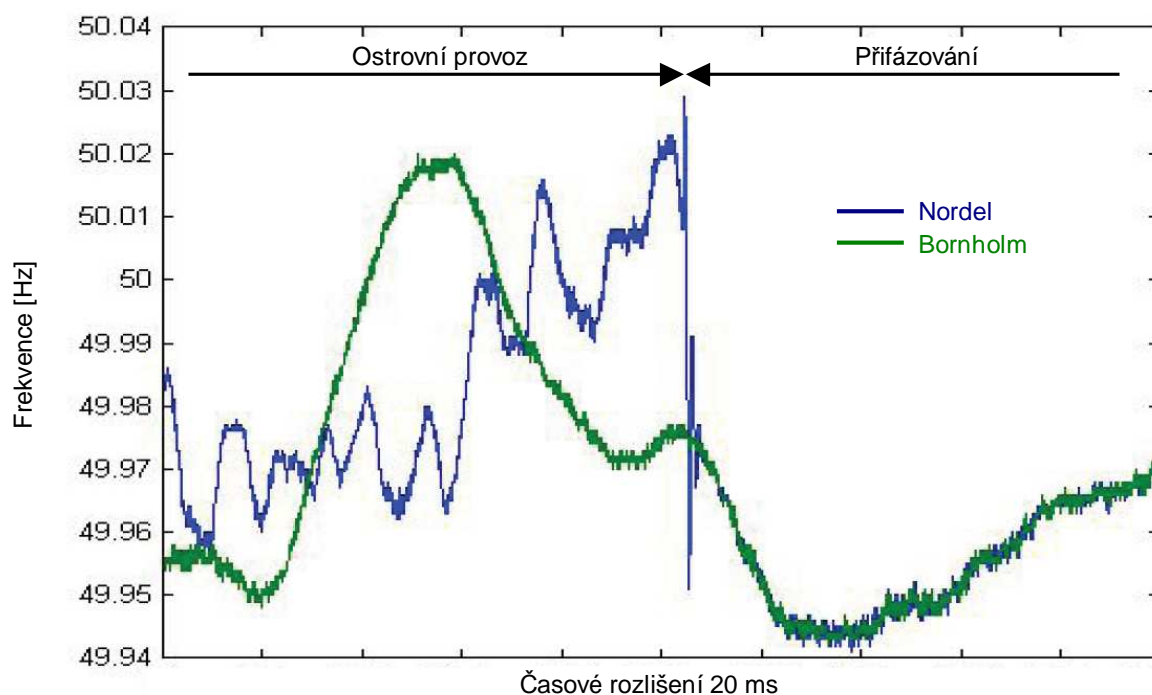
Cílem projektu bylo:

- Popsat všechny elementy sítě (zátěže, linky, rozvodny, zdroje, ...)
- Vytvořit počítačový model sítě s možnostmi
 - funkce předpovědi výroby a spotřeby,
 - funkce běžné ochrany sítě založené na výpočtech ustálených stavů a
 - simulace provozních stavů sítě.

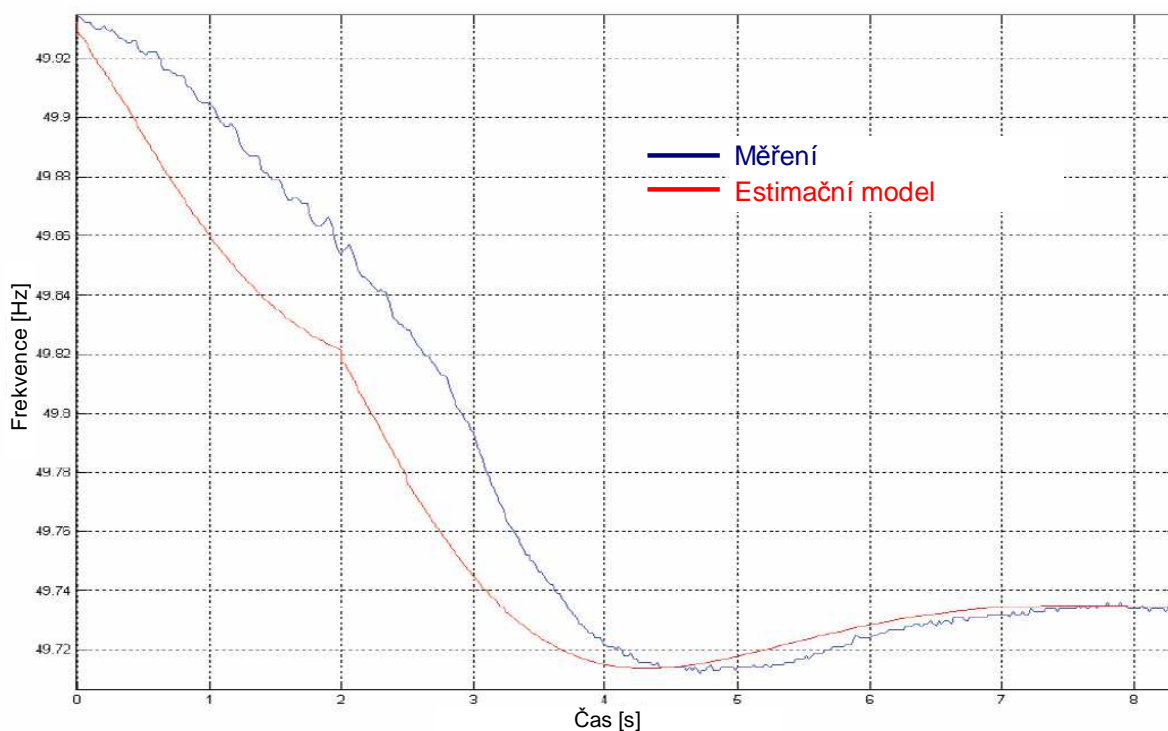
- Prověřit schopnost sítě
 - řídit rovnováhu mezi výrobou a spotřebou,
 - startu ze tmy
 - zpětného přifázování k nadřazené soustavě.
- Demonstrovat funkci
 - OP, viz obr. 13,
 - estimačního modelu sítě, viz obr. 14
 - fuzzy state estimation – odhad vývoje stavu sítě na základě historických dat a měření v reálném čase

Zkušenosti

- Pro sítě nn a vn nebyly k dispozici databáze, pouze mapy.
- Chyběla měření P a Q, byla instalována pouze měření I.
- Nebyl k dispozici počítačový model sítě, pouze spreadsheet.
- Měření bylo odečítáno v intervalech 1 hodina, bylo třeba po minutách.
- K dispozici byly modely pro projektování, nikoliv pro řízení provozu.



obr. 13 Ukázka OP – [NIs10]



obr. 14 Odepnutí bloku 1MW – [NIs10]

3.5 Shrnutí

V předchozích odstavcích byl vysvětlen pojem SG, obecná východiska, která vedou k motivaci vzniku SG. Byly vyjmenovány a popsány technické prostředky používané pro dosažení požadovaných funkcí SG. Na konkrétních příkladech byl ilustrován způsob provozu Micro Grids.

Srovnání funkce SG a běžných rozvodných sítí bylo provedeno v odstavci 3.2. Je však důležité připomenout, že zásadní vlastností SG v souvislosti s OP je jistá míra spotřebičového řízení. Spotřeba zčásti sleduje výrobu, je nedílnou součástí operativního řízení, které probíhá a plánuje se především na základě informací získávaných v reálném čase.

4. KAPITOLA

VLASTNÍ SPOTŘEBA

JADERNÉHO BLOKU

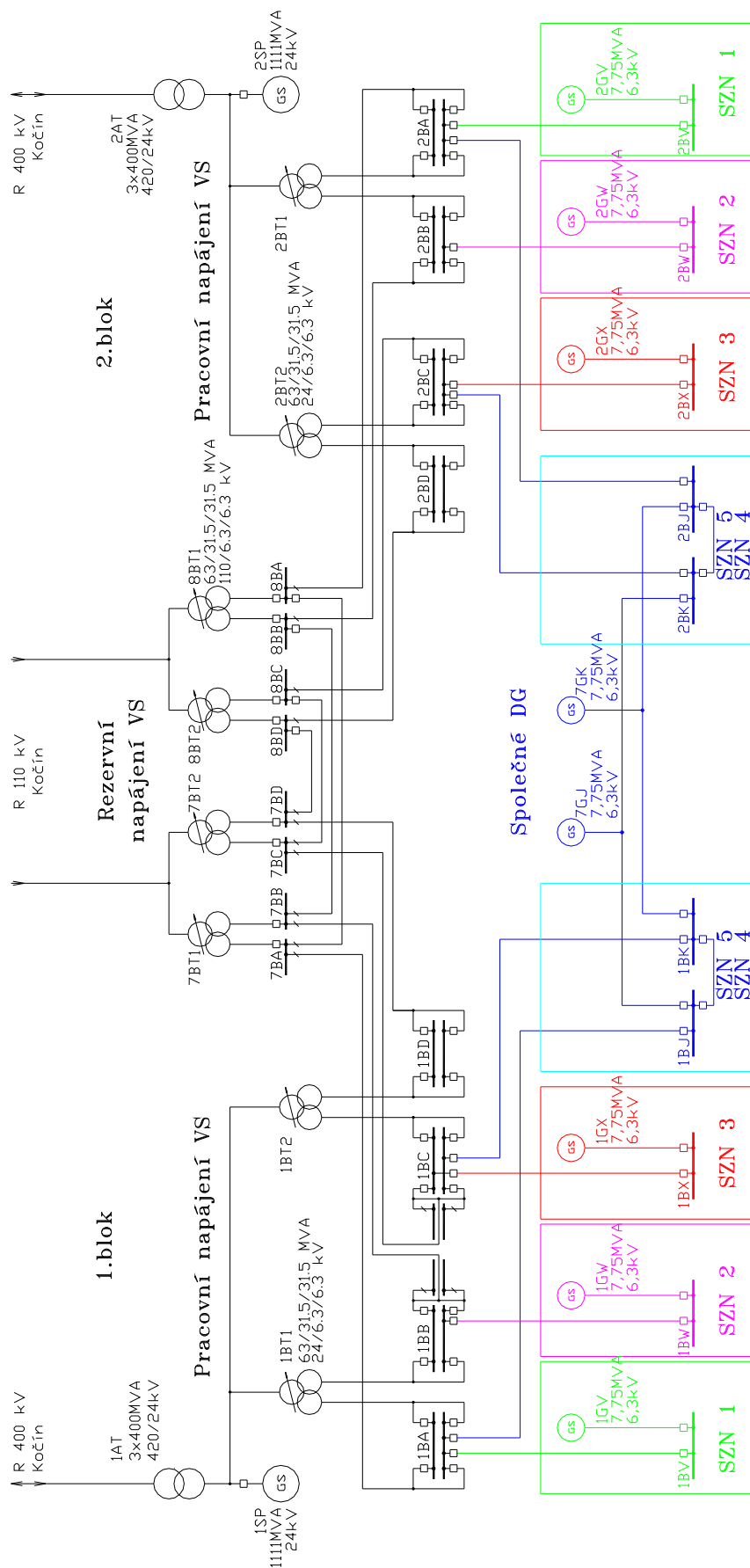
Elektrické napájení VS jaderného bloku je oproti běžným elektrárnám výrazně složitější, a to především z důvodu vyšších nároků na zajištění napájení těch elektrických spotřebičů, které patří k jaderně-bezpečnostním systémům, nebo k systémům souvisejících s jadernou bezpečností. (Legislativní požadavky byly již zmíněny v odstavci 2.1.3.) Elektrické systémy jsou navrženy a konstruovány tak, aby byla zajištěna jejich plná funkceschopnost s ohledem na podmínky okolního prostředí, seismicitu, vlastnosti navazujících sítí, elektromagnetické rušení a další podmínky.

Na příkladu JETE, JEDU a JEMO bude vyjasněna základní filozofie schématu napájení VS jaderného bloku, jeho jednotlivých částí a provozních režimů, [Kbl10b]. Každá ze jmenovaných elektráren řeší způsob napájení VS částečně odlišně. Společná filozofie však zůstává zachována. Popis je tedy nutné chápat jako ilustrativní, neklade si za cíl dokumentovat řešení konkrétního bloku. Je zaměřen především na systémy zajištěného napájení (SZN). Tyto SZN se zálohováním 3x100% používají jako nouzové zdroje elektrické energie DG a akubaterie, které pracují v režimu podobném OP, [Kbl10c].

Dimenzování a způsob zatěžování DG, takzvaná automatika postupného spouštění (APS), jsou klíčovými kroky návrhu elektrického schématu zajištěného napájení. Při jejich vypracování musí být zohledněny požadavky technologie, okolního prostředí, kombinace možných i méně pravděpodobných poruchových událostí, parametry DG, technicko-ekonomické aspekty. Návrh DG pro JE je komplexní odborná činnost vyžadující meziprofesionální zkušenosti a znalosti požadavků bezpečnosti, výroby elektrické energie a technických možností jednotlivých typů zdrojů elektrického napájení. Zahrnuje postupné kroky prováděné jak na straně požadavků zátěží, tak na straně zdrojů.

4.1 Základní elektrické schéma

Základní elektrické schéma se skládá z vyvedení výkonu elektrárny do sítě 400kV, pracovního, rezervního a nouzového napájení VS. Schéma je uvedeno na obr. 15.



obr. 15 Schéma napájení VS JETE 1. a 2. blok – [EGP01]

Výkon obou bloků je vyveden do PS 400kV prostřednictvím rozvodny 400kV Kočín situované přibližně 3km od JETE. V této rozvodně je i transformovna 400/110kV, která je jedním ze zdrojů pro síť 110kV. K této síti je připojeno rezervní napájení.

Požadavky na elektrické systémy uvnitř elektrárny zajišťující jadernou bezpečnost a radiační ochranu jsou stanovené ve vyhlášce [V195/99]. Schéma je řešeno tak, aby splňovalo potřeby strojně-jaderné technologie elektrárny i elektrizační soustavy. Pro splnění těchto kritérií je elektrické schéma řešeno podle následující koncepce – [EGP99], [EGP01].

Blokovost

JETE je tvořena dvěma bloky 1000MW. Schéma vyvedení výkonu i schéma napájení VS je řešeno rovněž blokově. Blokované uspořádání zajišťuje oddělení elektrických systémů, a tím omezuje možnost přenosu poruch mezi bloky. Rovněž schéma zapojení JETE do vnější sítě i jeho způsob provozu jsou voleny tak, aby byl maximálně omezen vzájemný přenos poruch mezi bloky JETE, mezi bloky JETE a elektrizační soustavou i mezi sítěmi 400kV a 110kV, do kterých je elektrárna zapojena. Napájení elektrických spotřebičů VS je rozděleno na více rozveden, napájecích systémů a zdrojů, které se zálohují a jsou elektricky i fyzicky odděleny. Tím se omezují důsledky poruch těchto systémů na provoz reaktoru a bloku.

Zdroje elektrického napájení

Elektrické spotřebiče jsou s ohledem na vztah k jaderné bezpečnosti a přípustnou dobu výpadku napájení rozděleny do skupin podle jejich důležitosti. Podle této důležitosti jsou napájeny ze zdrojů a sítí odpovídající kategorie zajištěnosti napájení. VS každého z bloků JETE má k dispozici:

- Pracovní zdroje
napájené z turbogenerátoru 1000MW a/nebo ze sítě 400kV,
- rezervní zdroje
napájené ze sítě 110kV a
- nouzové zdroje,
které jsou tvořeny DG, akubateriemi a střídači. Jsou součástí systémů zajištěného napájení. Jejich funkceschopnost nezávisí na stavu pracovních a rezervních zdrojů ani vnější sítě. Nouzové zdroje jsou dimenzovány podle požadavků napájených zátěží v nejnáročnějších režimech, které musí být zvládnuty.

Klasifikace systémů a elektrických spotřebičů

Všechny systémy, zařízení a konstrukce JETE jsou klasifikovány v souladu se základní koncepcí bezpečnosti provozování. Dělí se na:

- Důležité z hlediska jaderné bezpečnosti – plní některou bezpečnostní funkci
 - bezpečnostní systémy (BS) a
 - systémy související s jadernou bezpečností (SSB).
- Nedůležité systémy z hlediska jaderné bezpečnosti (SNB).

V elektrické části je tato klasifikace dále rozvedena a spotřebiče jsou zařazeny do skupin důležitosti. Skupina důležitosti spotřebiče vyjadřuje požadavky spotřebiče na kvalitu a zajištěnost elektrického napájení, tj. zejména na:

- Funkci spotřebiče při zajišťování jaderné bezpečnosti, bezpečnosti osob a drahých zařízení nebo pouze funkci při výrobě elektřiny.
- Přípustnou dobu přerušení napájení spotřebiče.

Na základě této klasifikace jsou spotřebiče připojeny k elektrickým napájecím zdrojům a sítím s různou kategorií zajištěnosti.

SZN

U každého bloku je v rámci každé ze 3 divizí bezpečnostních systémů vytvořen systém zajištěného napájení označený jako SZN1, SZN2 a SZN3. Tyto tři SZN jsou nezávislé navzájem i na stavu pracovních a rezervních zdrojů VS. Jsou vzájemně výkonově rovnocenné. Pro napájení SSB a SNB, které zajišťují obecnou bezpečnost osob a drahých zařízení (např. turbosoustrojí), je u každého z bloků vytvořen SZN4 a SZN5. Hlavním nouzovým zdrojem těchto SZN je dvojice DG společná pro oba bloky.

Napájecí sítě VS

Klasifikace elektrických sítí a zdrojů je založena na znalosti požadavků bezpečnosti a výroby elektrické energie a znalosti technických možností jednotlivých typů zdrojů elektrického napájení. Rozvodné sítě a jejich zdroje jsou klasifikovány na I., II., III/I., III/II. a III. kategorii zajištěného napájení. Klasifikaci je možné znázornit následující tab. 1:

Přípustná doba výpadku	Vztah k jaderné bezpečnosti nebo výrobě elektrické energie		
	BS	SSB, SNB zajišťující bezpečnost osob nebo drahých zařízení	SNB
0 s	I. kategorie akubaterie + UPS	III/I. kategorie akubaterie + UPS	III. kategorie AZR
10 s až minuty	II. kategorie DG	III/II. kategorie DG	III. kategorie ruční záskoky
bez požadavku			III. kategorie

tab. 1 Přiřazení spotřebičů k napájecím sítím

Z tab. 1 je například zřejmé že:

- Spotřebiče BS, které musí být napájeny bezpauzově, jsou připojeny k sítím I. kategorie zajištěného napájení. Zdrojem pro tyto sítě jsou akubaterie a střídače (UPS). Takto jsou napájeny zejména řídicí a ochranné systémy.
- Spotřebiče BS, které snesou přerušení napájení na dobu několika desítek sekund, jsou připojeny k sítím II. kategorie zajištěného napájení. Tyto sítě jsou v případě výpadku pracovních nebo rezervních zdrojů napájeny z nouzových DG.
- Naopak spotřebiče SNB jsou napájeny ze sítí III. kategorie napájení, vybavených buď automatickým nebo ručním záskokem napájení z více zdrojů nebo nemají vůbec záskok napájení. Jedná se především o spotřebiče sloužící pro výrobu elektřiny.

4.2 Provozní režimy elektrického schématu

Pro zvýšení bezpečnosti bloku je schéma řešeno tak, aby byl snížen vliv poruch v elektrickém rozvodu i poruch napájených spotřebičů. Většina rozvaděčů je napájena

více přívody s automatickým záskokem mezi nimi. Vzájemně se technologicky rezervující spotřebiče (čerpadla, ventilátory,...) jsou napájeny z různých rozvaděčů. Při výpadku pracovních čerpadel nebo ventilátorů nabíhají působením strojně-technologických automatik pohony záložní.

4.2.1 Režimy pracovního a rezervního napájení VS

Při normálním provozu elektrického schématu bloku je veškerá VS napájena z pracovních zdrojů tvořených odbočkovými transformátory 24/6,3/6,3 kV. To znamená, že z odbočkových transformátorů se VS napájí ve všech režimech, kdy je pracovní napájení k dispozici – najíždění, provoz na výkonu, plánované, abnormální či havarijní odstavení bloku.

Při ztrátě vazby se sítě 400kV zreguluje pracující TG 1000MW na výkon VS. Pokud je zregulování úspěšné, pokračuje VS v napájení z pracovních zdrojů.

Při ztrátě napájení některé sekce blokových rozvodů 6kV z pracovních zdrojů je postižená sekce přepínána automatikou AZR na napájení z rezervních zdrojů VS, tedy na rezervní transformátory 110/6,3/6,3 kV. Každá sekce blokové rozvodny má samostatnou automatiku AZR. Připouští se dočasné provozování bloku na výkonu s napájením 1 až 2 blokových rozvodů 6kV z rezervních zdrojů.

Plánované přepnutí mezi pracovním a rezervním napájením blokové R6kV se provádí na povel operátora pomocí krátkodobého sepnutí sítě pracovního a rezervního napájení. Před sepnutím musí být splněny fázovací podmínky obou sítí.

Při normálním provozu schématu rezervního napájení je každý z rezervních zdrojů 1. bloku, to je dvojice transformátorů 7BT1, 7BT2, i 2. bloku, to je dvojice transformátorů 8BT1, 8BT2, napájen vlastní linkou 110kV ze svého systému přípojníc R110kV Kočín. Propojka 6kV mezi těmito zdroji je rozepnuta. Při poruše nebo revizi jednoho z rezervních transformátorů obsluha spíná z ústřední elektrické dozorny propojku 6kV. Rezervní napájení obou bloků se mohou vzájemně zálohovat.

Takto je zajištěna síť III. kategorie napájení. Z této sítě jsou napájeny spotřebiče SNB, které jsou nedůležité pro jadernou bezpečnost a slouží převážně pro výrobu elektrické energie. Zajištění elektrického napájení v této síti odpovídá klasickým elektrárnám.

4.2.2 Režimy nouzového napájení VS

Systémy zajištěného napájení jsou normálně napájeny ze sítě III. kategorie, to je z blokových rozvodů 6kV. Nouzové DG jsou udržovány v horké rezervě a akumulátorové baterie jsou v režimu trvalého dobíjení.

SZN 1, 2, 3

Pokud dojde ke ztrátě napájení některé z rozvodů II. kategorie zajištěného napájení, příslušný SZN se odpíná od sítě III. kategorie vypnutím sekčních vypínačů 6kV. Vyhodnocení ztráty napájení je na každém z SZN 1, 2, 3 samostatné a nezávislé na stavu ostatních SZN. Je vydán povel na start nouzového DG. Po rozběhu, který trvá méně než 10 s, je DG postupně v několika krocích zatěžován podle programů automatiky APS. To znamená, že se při ztrátě pracovního i rezervního napájení bloku startují a zatěžují DG na všech třech SZN, každý od ztráty napájení na své systémové rozvodně.

Po ztrátě pracovního napájení, ještě než DG přivezme zátěž, jsou spotřebiče v síti I. kategorie napájeny bezpauzově z akubaterií. Po obnovení napájení SZN z DG přejdou akubaterie automaticky opět do režimu nabíjení.

Automatika APS řídí funkci SZN a hlídá připínání zátěží, a tím i zatížení DG po celé období, kdy je SZN napájen z DG. Automatika APS má prioritu před povely vydávanými obsluhou nebo povely vydávanými technologickými ochrannými systémy. Při potřebě připnout na napájení z DG další spotřebiče APS stanovuje povolující podmínky nebo přímo řídí další zatěžování opakovaným spuštěním programu postupného zatěžování DG.

Po obnovení napájení v síti III. kategorie je možno přepnout napájení rozvodny 6kV II. kategorie zpět na normální napájení za podmínky, že je ukončen program zatěžování a nejsou přítomny technologické havarijní signály. Přepnutí zajišťuje algoritmus zpětného skoku v automatice APS. Pokud je zpětný skok úspěšný, může obsluha odstavit DG.

SZN 5

Funkce SZN5 je při ztrátě napájení obdobná. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že při ztrátě napájení některé z rozvodny 6kV, například 1BJ, se nejprve AZR této rozvodny pokusí o záskok napájení ze sousední sekce, tedy 1BK. Pokud je záskok úspěšný a dojde k obnovení napájení, DG se neshodují.

Nedojde-li funkcí AZR k obnovení napájení, je vydán povel na start společných DG 7GJ, 7GK a příslušná automatika APS řídí jejich postupné zatěžování podle programu. Programy zatěžování APS pracují tak, že umožňují postupné převzetí zátěže SZN5 obou bloků i pouze jedním ze společných DG.

4.2.3 Popis SZN 1, 2, 3

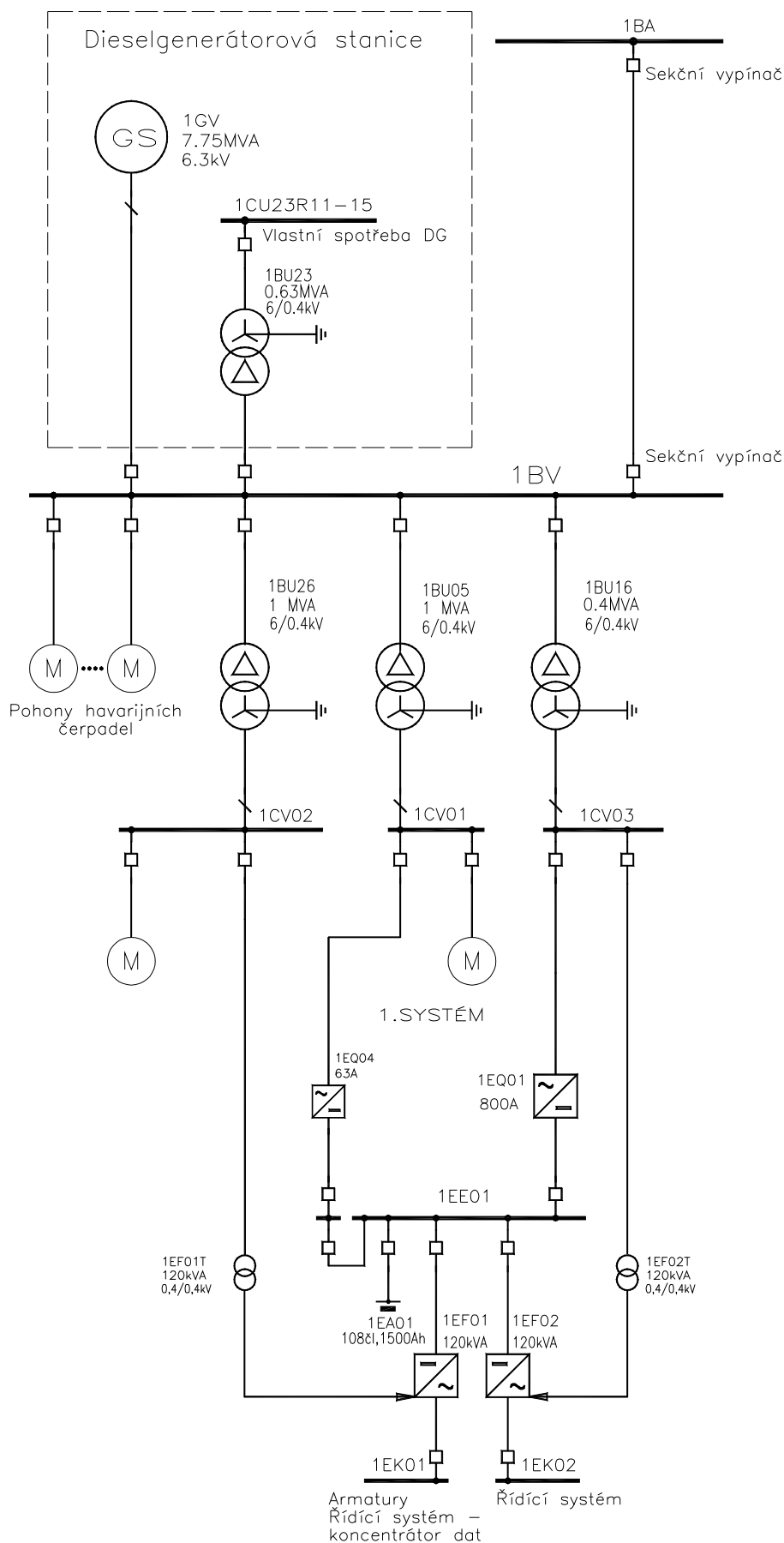
Vraťme se k popisu SZN1, 2, 3, tentokrát do větších podrobností.

Pro napájení jednotlivých divizí bezpečnostních systémů 1, 2, 3 elektrickou energií slouží stejnojmenné SZN 1, 2, 3, které patří do dané divize a fungují jako podpůrný bezpečnostní systém pro ostatní bezpečnostní systémy této divize. Pro zajištění potřebné míry redundance jsou SZN 1, 2, 3 nezávislé a vzájemně oddělené dispozičně i elektricky. V souladu s principem vzájemné nezávislosti se zdroje jednotlivých SZN 1, 2, 3 vzájemně nezálohuje.

4.2.3.1 Komponenty

Popis je proveden pro SZN 1 prvního bloku, pro ostatní SZN platí analogicky. Elektrické schéma SZN 1 je uvedeno na obr. 16. SZN se skládá ze sítí I. a II. kategorie zajištěného napájení a nouzových zdrojů. Pro zabezpečení funkceschopnosti dané divize bezpečnostních systémů je nutná funkceschopnost zdrojů a sítí I. kategorie i II. kategorie příslušného SZN.

Hlavním nouzovým zdrojem je DG 1GV, 6,3MW, 7,9MVA, 6,3kV. DG se skládá ze čtyřtaktního přeplňovaného dieselmotoru vyrobeného závodem ZGODA v licenci SULZER a synchronního alternátoru DOLMEL. Provoz DG (spuštění, odstavování, doplňování paliva do provozní nádrže, udržování tlaku ve startovacích zásobnících stlačeného vzduchu a udržování DG v horkém stavu) je plně automatizován. Automatické řízení zajišťuje automatika DG (ADG).



6kV AC	III. kategorie
220/380V AC	II. kategorie
220V DC	I. kategorie
220/380V AC	I. kategorie

obr. 16 Schéma SZN 1 – [EGP01]

Pomocné zařízení nutné pro provoz DG je seismicky odolné a redundantně zálohované pro zajištění vysoké spolehlivosti. Doba rozběhu DG od podání povelu na start do vydání signálu o připravenosti k zatěžování je menší než 10s.

Neméně důležitým zdrojem jsou staniční akubaterie 220Vss 1EA01, 108 článků typu Varta Bloc Vb2415, C10 = 1500Ah. Baterie se normálně provozuje v režimu trvalého dobíjení. Tím je zajištěno její plné nabití a optimální životnost. Při ztrátě napájení II. kategorie přechází baterie do režimu vybíjení a zajišťuje nepřerušené napájení zátěží. Akubaterie jsou dimenzovány na vybíjecí doby větší než 30 minut, což je požadavek mezinárodních bezpečnostních doporučení IAEA. Vypočtená skutečná vybíjecí doba pro konzervativně stanovené podmínky je však větší než 1 hodina.

Z rozvodu II. kategorie je napájen rozvod I. kategorie zajištěného napájení pomocí usměrňovačů. Proto je schéma II. kategorie současně řešeno i podle požadavků navazujícího rozvodu I. kategorie, který byl navržen v návaznosti na kvalitativně vyšší nároky na nepřerušené napájení nového systému kontroly a řízení.

4.2.3.2 Funkce

V normálním provozním režimu schématu VS jsou rozvodny 6kV II. kategorie, v našem případě 1BV, napájeny z pracovních nebo rezervních zdrojů, tedy sítě III. kategorie. V propojce mezi sítí II. a III. kategorie jsou 2 sekční vypínače 6kV pro zajištění spolehlivého odepnutí SZN od sítě III. kategorie. DG jsou udržovány ve stavu horké rezervy a připraveny k zatěžování.

1) REAZN

Funkce SZN řídí několik režimových automatik zajištěného napájení (REAZN), které navzájem spolupracují – [UJV08]:

- Část systému kontroly a řízení (SKŘ) zahrnuje funkce vyhodnocení ztráty napájení, APS, automatiku podpěťového vypínání (APV), automatiku zpětného skoku (RBT). Tyto funkce jsou obsaženy v bezpečnostní automatice ESFAS.
- Automatika DG (ADG) řídí provozní režimy vlastního DG – horká rezerva, normální práce, práce v testu, práce do sítě.
- Elektrotechnická část, ve které jsou implementovány měření ztráty a přítomnosti napětí, ovládací schémata vypínačů a elektrické ochrany.

Každý ze SZN 1, 2, 3 má svoje vlastní REAZN a systémy řízení, které jsou nezávislé na ostatních divizích bezpečnostních systémů. REAZN jsou navrženy tak, aby zajišťovaly bezpečnost bloku v následujících projektových kombinacích a časových posloupnostech ztráty napětí VS a havárie ve strojně-jaderné části:

- ztráta elektrického napájení bez havárie ve strojně-jaderné části,
- ztráta elektrického napájení a současná nebo následná havárie ve strojně-jaderné části
- havárie ve strojně-jaderné části a následná ztráta elektrického napájení.

REAZN musí dále splňovat tyto hlavní podmínky:

- Podmínky a logika iniciace musí být zkoordinovány s elektrickými systémy (ochrany, AZR,...) tak, aby nedocházelo k nadbytečné iniciaci nouzových zdrojů.

- Logika REAZN musí zabránit opakované iniciaci přípravné a zatěžovací fáze při přechodových procesech v elektrické síti, kdy je již SZN napájen z DG
- Musí umožňovat provedení zkoušek v rámci svého SZN a divize bezpečnostních systémů za provozu bloku.
- Musí umožnit podat napájení z DG do sítě III. kategorie. Tato schopnost je potřebná pro periodické zkoušky DG paralelní prací se sítí a pro některé postupy řešení úplné ztráty napájení bloku.

2) Iniciace

Základní funkce režimových automatik SZN 1, 2 a 3, kterou je vyčlenění SZN, nastartování a postupné zatížení DG, se iniciuje od podmínek vyjadřujících ztrátu napájení rozveden 6kV II. kategorie zajištěného napájení:

- Pokles napětí pod $0,25U_n/2s$
- Pokles napětí pod $0,7U_n/5s$
- Pokles frekvence pod $47Hz/5s$

Pro omezení možnosti nadbytečného startu DG při vzniku lokální poruchy, která postihla danou sekci 6kV (např. zkrat na přípojnicích), jsou iniciační podmínky REAZN blokovány od elektrických ochranných a působení automatiky selhání vypínače (ASV). Tato blokáda zabraňuje zbytečnému a škodlivému připnutí DG na sekci 6kV, která je stejně vyřazená zkratem.

Vypínač DG a oba sekční vypínače jsou vzájemně blokovány pomocí stavové blokády. Podmínkou umožňující zapnutí některého z vypínačů je vypnutý stav alespoň jednoho ze zbývajících dvou vypínačů. Tuto blokádu je ale možné sejmut, aby bylo možno provádět periodické zkoušky DG paralelní prací se sítí.

3) Přípravná fáze

Iniciační podmínky aktivují paměť ztráty napájení (LOPM), která zajišťuje:

- vydání povelu na vypnutí obou sekčních vypínačů 6kV
- vydání povelu na start DG do ADG. Povel na start má přednost před všemi ostatními povely s výjimkou redukovaného rozsahu ochranných vlastního DG.
- vydání povelu na odepnutí vybraných zátěží (zátěže 6kV i 0,4kV). Nevypínají se prvky tvořící kostru elektrického schématu, například transformátory.
- zavedení blokad ovládání prvků elektrického schématu
 - blokáda ručního dálkového vypnutí vypínače DG (do resetu LOPM)
 - blokáda ručního dálkového vypnutí transformátorů 6/0,4kV (po dobu napájení z DG)
 - blokáda zapnutí sekčních vypínačů (do resetu LOPM)
 - blokáda dálkového STOP DG (po dobu napájení z DG)
- zavedení blokad technologie (slouží i jako ochrana DG před přetížením, hlavní obavou je vytváření paralelních zatěžovacích sekvencí k programu APS)
 - blokady automatik normálního provozu (po dobu napájení z DG)

- blokáda technologických AZR pohonů (blokáda přiskočení pohonu z jiné divize i blokáda AZR mezi pohony téže divize, po dobu napájení z DG)
 - blokáda ručního ovládní pohonů (po dobu programu APS, respektive po určitou delší dobu)
 - blokáda ručního ovládní pohonů čerpadel technické vody důležité (po dobu napájení z DG)
 - blokáda spouštění velkých čerpadel od technologických havarijních signálů – ESFAS i superhavarijních napáječek a čerpadel technické vody důležité, po dobu napájení z DG).
- vydání povelu na vypnutí doplňovacího agregátu primárního okruhu

4) Zapnutí vypínače DG

Po rozběhu DG a dosažení požadovaných hodnot U , f je z ADG do SKŘ vydán signál „DG ready“, který za podmínky vypnutí alespoň jednoho sekčního vypínače 6kV zapíná vypínač DG.

Zapnutím vypínače DG se spouští první skupina zátěží (neodpínané zátěže).

5) Zatěžování programem APS

Zapnutím vypínače DG se za podmínky $U_{R6KV} > 0,7U_n$ rozbíhá program APS postupného zatěžování DG.

Od tohoto okamžiku začíná automatika APS podle pevného programu postupně zatěžovat DG. Program splňuje požadavky na zajištění bezpečnosti JE při různých typech havárií. Toho se dosahuje spuštěním pohonů všech bezpečnostních systémů s tím, že čerpadla nepotřebná pro zvládnutí dané havárie nepracují do výtlačku ale do recirkulace. Pokud vznikne potřeba, aby čerpadlo začalo vodu dodávat do primárního nebo sekundárního okruhu, přestaví se příslušné armatury.

V závislosti na teplotě primárního okruhu se DG zatěžuje podle dvou programů. Základní program APS-H se používá při teplotě nad 70°C. Při nižší teplotě nabíhá program APS-S, který zapíná omezenou sestavu zátěží. Program APS-S funguje hlavně při výměně paliva v reaktoru. Program zatěžování APS-H má 5 stupňů a trvá přibližně 30s. Program zatěžování APS-S má 3 stupně a trvá 20s.

Na jiných elektrárnách, například na Jaderné elektrárně Mochovce (JEMO) 3. a 4. blok, existuje pouze jeden zatěžovací program APS. Jeho sekvence zatěžování se mění podle podmínek v jaderné a strojní části.

Program APS musí mít prioritu před spouštěním spotřebičů od jiných povelů SKŘ a technologických podmínek (signály ESFAS).

6) Funkce REAZN po ukončení programu APS

Po ukončení programu APS končí většina blokád na ovládní spotřebičů operátorem. Operátor má tak možnost přizpůsobit sestavu pracujících pohonů technologickým poměrům na bloku. Přitom je nutno uvažovat možný následný vznik nebo další rozvoj technologické havárie.

Opětovné zapínání velkých spotřebičů od povelů ESFAS je řízeno přes logiku APS tak, aby nedošlo k přetížení DG a nadměrným odchylkám napětí a frekvence. Potřebné výkonové odlehčení DG je dosaženo vypnutím doplňovacího agregátu primárního okruhu před spuštěním jiných velkých spotřebičů.

Dalším opatřením proti přetížení DG je zákaz odepnutí spuštěných velkých pohonů při napájení z DG. Tuto blokádu může operátor dočasně zrušit pro provedení nutných korekčních akcí.

7) Zpětný skok na normální napájení

Přepnutí napájení z DG zpět na normální napájení zajišťuje logika RBT. Nejdříve je nutno resetovat paměť LOPM. To je možné při současném splnění všech následujících podmínek:

- Napětí na R6kV III.kat. je větší než $0,9U_n$,
- ukončení programu APS,
- povel operátora tlačítkem „povolení zpětného záskoku“ z blokové nebo nouzové dozorny

Pokud je RBT povolen, vypne operátor vypínač DG. Následně se automaticky s časovým zpožděním potřebným pro doznění napětí zapnou oba sekční vypínače. DG zůstává v chodu naprázdno. Po úspěšném zpětném skoku operátor dálkově odstavuje DG. Pokud je přechod na III. kategorii neúspěšný, dojde na přípojnicích 6kV ke ztrátě napájení a celá zatěžovací sekvence APS je automaticky zopakována.

4.3 Dimenzování DG

Nejdůležitějším nouzovým zdrojem na JE je DG. Jeho dimenzování je věnována zvýšená pozornost. Na rozdíl od běžného použití DG jako nouzového zdroje v občanské výstavbě, kdy je zatěžován převážně statickou zátěží, je DG na JE zatěžován převážně motorickou zátěží. Ta je z důvodů spolehlivosti neregulovaná a nejsou ani používány rozběhové prostředky snižující záběrné proudy, což představuje pro DG náročné spouštěcí podmínky.

4.3.1 Metodika a cíl

Dimenzování DG a jejich kontroly jsou prováděny dle následujících požadavků – [UJV08]. V tab. 2 jsou uvedené hlavní kontrolované parametry DG.

Požadavky	Kontrola	Parametry DG
Schopnost zajistit nouzové napájení při ztrátě pracovních a rezervních zdrojů bloku. Umožnit bezpečné odstavení bloku	Kontrola zatěžování	P_n , zatěžovací charakteristika
Udržet zkratové proudy pod hladinou, na kterou je dimenzován napájený rozvod	Výpočet maximálních zkratových proudů	S_n, x_d''
Udržet zkratové proudy nad hladinou, která je potřebná pro činnost ochran.	Výpočet minimálních zkratových proudů	S_n , buzení a jeho regulace
Udržet napájecí napětí v ustálených i přechodových stavech v mezích, které odpovídají požadavkům napájených spotřebičů a sítí.	Kontrola zatěžování	S_n, U_n , buzení a jeho regulace

tab. 2 Kontroly dimenzování DG

Cílem kontroly zatěžování DG je prověřit schopnost DG napájet stanovenou zátěž ve všech projektových režimech v ustálených i přechodových stavech – [UJV10]. Kritéria kontrol je možné rozdělit na:

- Kritéria pro kontrolu ustáleného stavu
 - Ustálený činný výkon zátěže nezpůsobí přetížení motoru DG.
 - Ustálený jalový výkon zátěže nezpůsobí přetížení generátoru DG.
- Kritéria pro kontrolu přechodových dějů
 - Rozběhový činný výkon zátěže je pod mezními zatěžovacími křivkami DG, které respektují maximální dovolený pokles frekvence.
 - Rozběhový jalový výkon zátěže, respektive pokles napětí na svorkách DG, je menší než dovolený limit.

4.3.2 Zatěžovací křivky DG

Při kontrole postupného zatěžování DG jsou tedy porovnávány výkonové požadavky zátěží v různých projektem uvažovaných havarijních situacích s křivkami mezního zatížení, které stanovil výrobce DG. Křivky mezního ztížení je možné chápat jako závislost maximální velikosti spustitelné zátěže daného charakteru na předběžném zatížení DG. Mezní křivky jsou sestaveny pro zátěže s charakteristikami odpovídajícími bezpečnostním systémům pro následující mezní podmínky – příklad JETE [EGP01]:

- dynamický pokles otáček DG < 6%,
- dosažení statického pásma otáček DG $\pm 1\%$ do 5s,
- maximální pokles napětí DG < 20%,
- dovolené zatížení ustálenou zátěží 110% výkonu DG po dobu jedné hodiny.

Při návrhu APS pro JETE – [EGP99] bylo využito dynamického způsobu zatěžování DG, který spočívá v těsném následném řazení stupňů s ohledem na dobu rozběhu zátěží tak, aby

- tlak turbodmychadla plynule stoupal a
- byla zachována vysoká dodávka paliva.

Dalšími charakteristikami DG, kromě křivek mezního zatížení, jsou vlastnosti napěťové regulace DG. Například pro JEMO – [UJV10] jsou definovány: Při skokové změně zátěže induktivního charakteru s účínkem mezi 0,3 a 0,4 o +50% nebo -100% I_{nDG} se napětí na svorkách DG ustálí na hodnotě $\pm 1,5\% U_{nDG}$ do 3s. Přičemž největší rozdíl svorkového napětí DG během přechodového procesu je 10% U_{nDG} pro 50% I_{nDG} a 20% U_{nDG} pro 100% I_{nDG} .

Neméně důležitá data se týkají dlouhodobé zatížitelnosti DG a jeho možné jednohodinové přetížitelnosti pro dané podmínky okolního prostředí.

4.3.3 Kontrola APS

Program APS v závislosti na stavu technologie a vzniklé eventuální havárii může vytvářet řadu variant sekvencí zatěžování. Všechny tyto případy od zatěžování DG po ztrátě pracovního i rezervního napájení VS bez havárie v technologii až po

zatěžování DG po ztrátě pracovního i rezervního napájení VS s havárií v technologii typu velký únik z primárního okruhu je třeba analyzovat, eventuálně navrhnout další úpravy APS.

Příklad kontrolovaných sekvencí zatěžování – [UJV10]:

- Prostá ztráta pracovního a rezervního napájení VS (LOP).
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS spojená s kompenzovatelným únikem z primárního okruhu (LOP+SSBLOCA)
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS spojená s malým únikem z primárního okruhu (LOP+SBLOCA)
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS spojená se středním únikem z primárního okruhu (LOP+MBLOCA).
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS spojená s velkým únikem z primárního okruhu (LOP+LBLOCA).
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS spojená s únikem z sekundárního okruhu (LOP+SSHL)
- Ztráta pracovního a rezervního napájení VS při výměně paliva

Pro jednotlivé výpočtové případy zatěžování jsou sestavovány tabulky časové sekvence spínání zátěží v jednotlivých stupních APS, ve kterých je vypočtena výkonová bilance jednotlivých stupňů APS. Tyto tabulky obsahují jak spouštěcí výkony, tak výkony ustálené (činné i jalové). Dále je pro každý stupeň vypočtena hodnota spouštěcího proudu a počáteční hodnoty napětí na R6kV bez vlivu regulace napětí. Viz tab. 3.

Porovnání s křivkou mezního zatížení DG stanovenou výrobcem DG je provedeno na následujícím grafu, viz obr. 17. Jsou zde vyneseny křivky mezního zatížení DG pro:

- trvalé zatížení 2800kW
- 1 hodinové přetížení (1x za 12hodin provozu DG) 3100kW.

Vynášené body odpovídající jednotlivým stupňům APS (0) až (6), respektive spouštění velkých spotřebičů po APS (a) až (d) v souřadnicích:

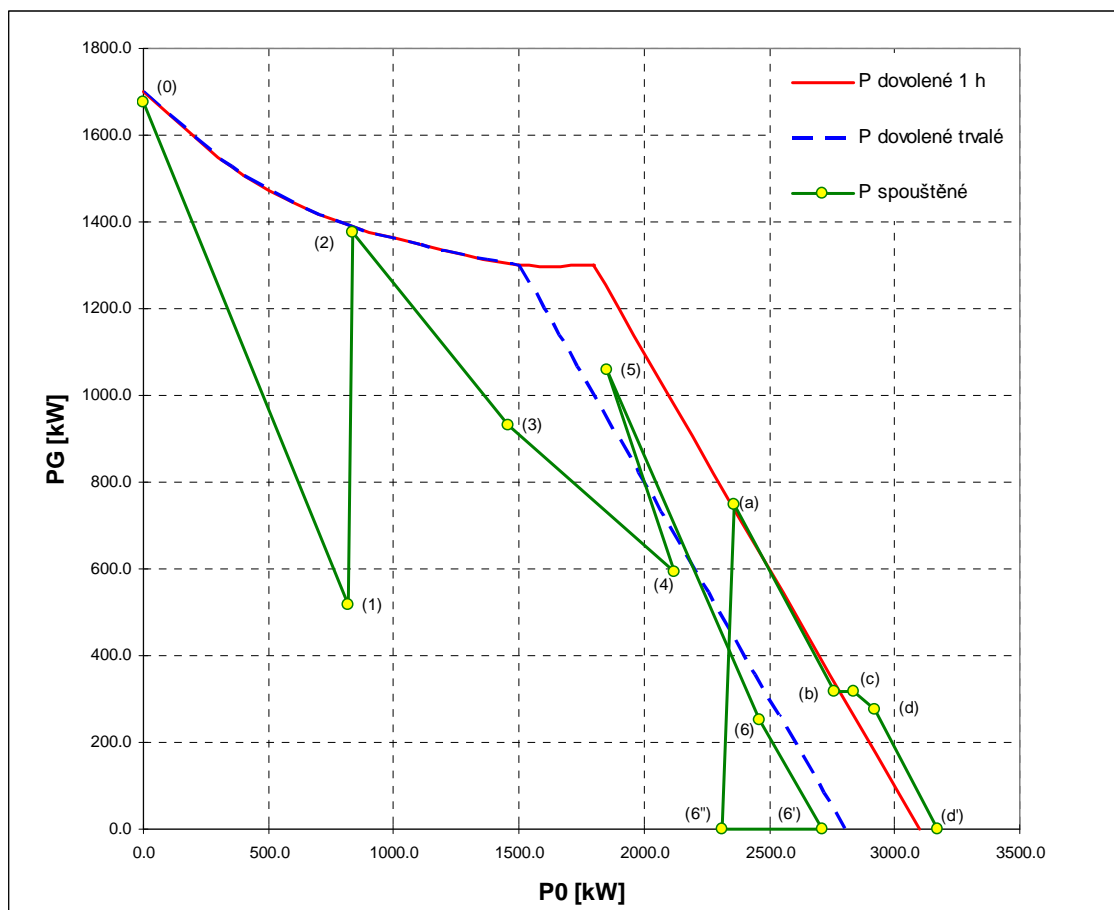
- Osa Y: Skok spouštěcího činného výkonu PG [kW]
- Osa X: Zatížení DG činným výkonem v okamžiku před spuštěním zátěže v daném stupni P0 [kW]. Může se jednat o ustálené zatížení od zátěží spuštěných v předcházejících stupních, ale může zde být i podíl spouštěcího výkonu od zátěží, které se v předchozím stupni ještě nestačily rozběhnout (např. ventilátory, usměrňovače).

Linka mezi jednotlivými body je pouhá spojnice pro usnadnění prosledovatelnosti posloupnosti bodů, nemá však žádnou souvislost s časovým průběhem zatěžování.

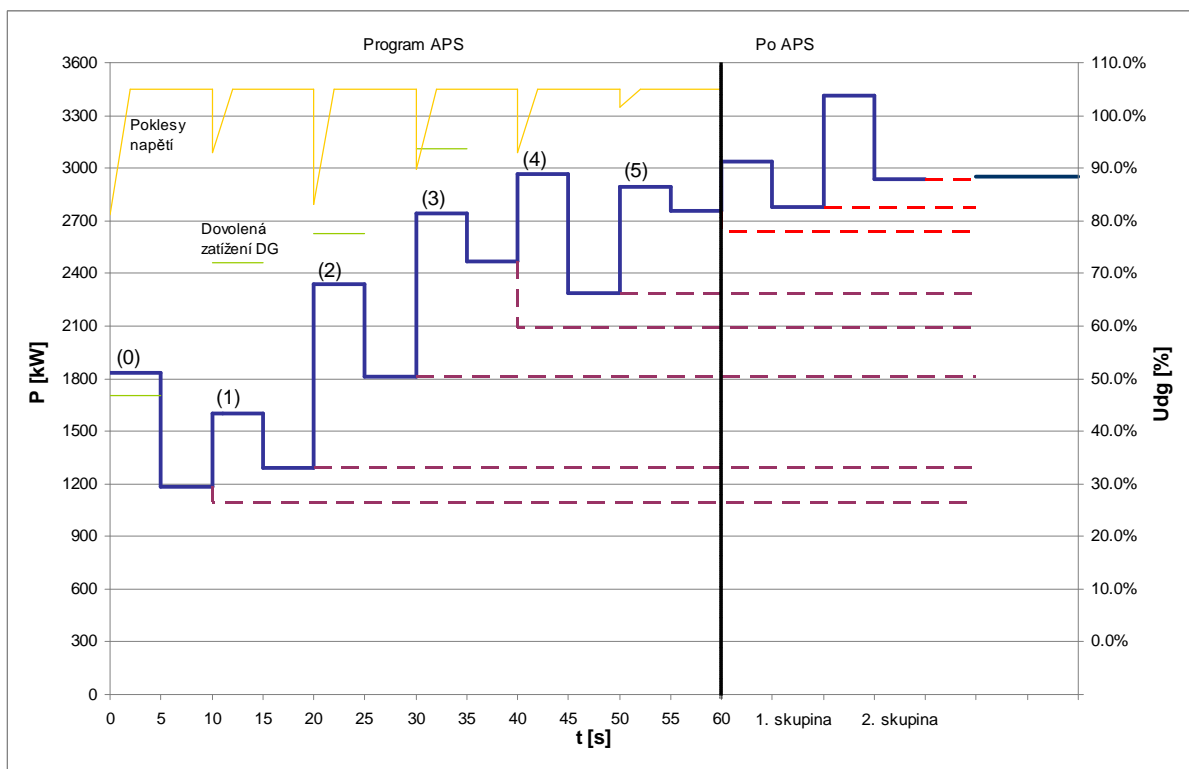
Příklad časového průběhu kontroly zatěžování, včetně poklesů napětí, je znázorněn na grafu, viz obr. 18. Úbytky napětí jsou počítány bez vlivu regulace napětí z rozložení napětí na spouštěcí impedanci pohonu a přechodové impedanci DG x_d' .

REŽIM EL. REŽIM TECH	Ztráta napájení VS (LOP) kompenzovatelný únik z IO (SSBLOCA)			Spouštěcí výkony			Spouštěcí/ustálené výkony (usměr., ventilátory/čerpadla)			Ustálené výkony			
APS stupeň	Označení	Název	Pn kW	P1 kW	Q1 kVAr	T1 s	P2 kW	Q2 kVAr	T2 s	P3 kW	Q3 kVAr	T3 s	
0s (0)	SZN 1												
	1BMK1	Základní zatížení		517.4	1012.8	5	212.6	158.3	5	212.6	158.3	60	
	1BMT01, ...	Ztráty traf		44.3	165.1	5	44.3	165.1	5	44.3	165.1	60	
		Ztráty kabely 1.SZN		62.5	0.0	5	62.5	0.0	5	62.5	0.0	60	
	1BTU01	Usm.220V 1.SZN		200.0	96.9	5	200.0	96.9	5	100.0	48.4	60	
	1BMK90	VS DGS		103.0	264.0	5	37.8	26.0	5	37.8	26.0	60	
	1JNF21AP01	VT čerp. HSCHZ	500	748.5	2898.8	5	261.0	133.0	5	261.0	133.0	60	
		Suma :		1675.7	4437.5		818.2	579.2					
		Napětí vzt na 6 kV		80.9%									
		Isum (A)		435.2			96.6						
	Celkem					818.2	579.2		718.2	530.8			
10s (1)	1JNG21AP01	NT čerp. HSCHZ	250	503.0	1949.0	5	116.4	49.6	5	116.4	49.6	50	
	1KAA20AP01	Vlož.okr. HSCHZ	4	13.1	34.9	5	4.0	2.7	5	4.0	2.7	50	
		Suma :		516.1	1983.9		120.4	52.3					
		Napětí vzt na 6 kV		92.8%									
	Isum (A)		188.1			12.6							
	Celkem					838.6	583.1		838.6	583.1			
20s (2)	1PEC01AP002	Čerp. TVD	250	449.7	1741.8	5	235.7	158.4	5	235.7	158.4	40	
	1PEC01AP003	Čerp. TVD	250	449.7	1741.8	5	235.7	158.4	5	235.7	158.4	40	
	1KAA11AP001	Vlož. okr. HCČ	132	327.5	1041.5	5	100.0	45.6	5	100.0	45.6	40	
	1KAA31AP001	Vlož.okr.SOR	45	123.6	393.1	5	42.0	20.4	5	42.0	20.4	40	
	1MKW06AP001	Čerp. těs. ol. TG	7.5	24.6	65.8	5	7.4	5.5	5	7.4	5.5	40	
		Suma :		1375.1	4984.0		620.8	388.3					
		Napětí vzt na 6 kV		78.8%									
	Isum (A)		474.4			70.5							
	Celkem					1459.4	971.4		1459.4	971.4			
30s (3)	1LAR01AP001	HNC	200	419.0	1382.5	5	148.3	80.0	5	148.3	80.0	30	
	1LAR11AP001	SHNC	250										
	1KLA10AN101	Ventilátor herm.p.	75	256.5	587.7	5	256.5	587.7	5	68.0	34.9	30	
	1KLA11AN101	Ventilátor šachty	75	256.5	587.7	5	256.5	587.7	5	68.0	34.9	30	
		Suma :		932.0	2557.9		661.3	1255.4					
	Napětí vzt na 6 kV		89.7%										
	Isum (A)		249.8			136.7							
	Celkem					2120.7	2226.8		1743.7	1121.2			
40s (4)	1LAR24AP001	Hav.doplň.čerp.	55	246.6	450.6	5	35.8	20.3	5	35.8	20.3	20	
	1MAV09AP001	Čerp. maz. ol. TG	22	69.6	186.4	5	20.8	12.3	5	20.8	12.3	20	
	1FAK11AP001	Čerp.bazenu	55	228.4	417.4	5	35.5	20.1	5	35.5	20.1	20	
	1KTA20AP001	Čerp.org.úniku	15	47.5	127.0	5	14.3	8.1	5	14.3	8.1	20	
	1JMN21AP001	Sprchové čerp.	110										
		Suma :		592.1	1181.4		106.4	60.8					
		Napětí vzt na 6 kV		97.3%									
	Isum (A)		121.2			11.8							
	Celkem					1850.1	1182.0		1850.1	1182.0			
50s (5)	7SGB01AP001	Požární čerp	132	312.0	992.0	5	128.7	79.8	5	128.7	79.8	10	
	1BNK01	VZT - BD, ND		208.6	533.6	5	63.7	46.7	5	63.7	46.7	10	
	1SAF15AN523	Under U35 BD, ND	35	138.8	82.3	5	20.9	13.5	5	20.9	13.5	10	
	1BTU04.14	Usm. 220V 4.SZN		400.0	193.7	5	400.0	193.7	5	190.0	92.0	10	
		Suma :		1059.4	1801.7		613.3	333.8					
	Napětí vzt na 6 kV		93.6%										
	Isum (A)		191.8			67.3							
	Celkem					2463.4	1515.7		2253.4	1414.0			
60s (6)	1BTR01.21,11,31	Usm.24V 1.SZN		152.8	155.9	5	152.8	155.9	5	28.2	28.8	10	
	1BTR04,05,24	Usm. 24V 4.SZN		98.3	100.2	5	98.3	100.2	5	28.2	28.8	10	
		Suma :		251.1	256.2		251.1	256.2					
	Napětí vzt na 6 kV		103.2%										
	Isum (A)		32.9			32.9							
	Celkem					2714.5	1771.9		2309.9	1471.6			
Po APS	1KBA20AP001	předřazené čerp.	55							13.5	6.5		
	1KPL10BH003	Ohřívák	24							24.0	0.0		
	1QBR32AP001	olejové čerp	15							14.4	7.4		
										2361.8	1485.5		
(a)	1KBA20AP002	Doplň. čerp. IO	500	748.5	2898.8	5	397.1	203.4		397.1	203.4		
										2758.9	1688.9		
(b)	7UPB19AN001	ventilátor chl.veží	75	318.3	536.8	10	80.6	52.1		80.6	52.1		
										2839.5	1741.0		
(c)	7UPB19AN003	ventilátor chl.veží	75	318.3	536.8	10	80.6	52.1		80.6	52.1		
										2920.1	1793.1		
(d)	1JMN21AP001	Sprchové čerp.	110	277.5	742.6	5	84.3	40.8		84.3	40.8		
	IC10	Centrum tech. podpory								7.9	4.1		
	IH03	Hašení								2.3	1.2		
	1JEF10BH001	Ohřívák komp. objemu	90							90.0	0.0		
	7KDD30AP001	Čerp.rozt.H3BO3	11										
	1SAF12AN520	UNDER U75A, ASŘTP	51							40.5	26.2		
	7BNK86	VT Kompresor	75										
	1SAF09AN201	Ventilátor	15							14.6	10.9		
	1KDE13AP001	Čerp.roztoku.čist.	15							14.4	10.8		
	1BUH1	sepnutí 4. - 5.SZN	150										
				Celkem ručně spínané							864.2	415.5	
				celkové zatížení DG							P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)
										3174.1	1887.2	3692.734	

tab. 3 Kontrola zatěžování při APS – SZN 1, LOP+SSBLOCA [EGP97]



obr. 17 Kontrola zatěžování při APS – SZN 1, LOP+SSBLOCA [EGP97]



obr. 18 Kontrola zatěžování při APS, LOP+MBLOCA [EGP10]

ČÁST II.

Dynamický model dieselgenerátoru

Základním prostředkem k optimálnímu dimenzování zdroje, respektive k návrhu a kontrole způsobu řízení dodávky a odběru elektrické energie, případně k provedení citlivostní analýzy, je matematický model umožňující simulovat elektromechanické přechodné děje. Pro jeho sestavení je nutné vytvořit modely jednotlivých technologických komponent používaných v ES. Zde se jedná především o model zdroje, tedy dieselového motoru a synchronního generátoru.

Tato část disertační práce se věnuje samotnému dynamickému modelu DG. Je rozčleněna do třech kapitol.

V první se podrobně seznámíme s popisem a odvozením matematických modelů jednotlivých komponent DG. Kapitola odkazuje na 2 přílohy.

Druhá kapitola uvádí chování modelu DG. Je zde provedena citlivostní analýza modelu v reakci na různé parametry DG. Kapitola obsahuje i nezbytnou parametrizaci modelu podle reálně vyráběného typu DG. Základní výpočtový případ prezentující dopodrobna chování celého modelu je uveden v příloze této kapitoly.

Třetí kapitola této části se věnuje možnosti dimenzování DG pomocí vytvořeného modelu. Konkrétní výsledky simulací jsou uvedeny v samostatné příloze této kapitoly.

5. KAPITOLA

TVORBA MODELU

Model DG byl vytvořen v programovém prostředí Mathematica tak, aby umožňoval detailní simulaci elektromechanických přechodových dějů, které nastávají zejména při jeho postupném zatěžování, respektive při různých poruchových událostech.

- Model musí být universální, co se týče jeho velikosti – elektrických i mechanických parametrů, tedy i například počtu válců, velikost setrvačnicku a podobně.
- Musí umožňovat simulaci jak běžných provozních stavů, tak poruch a to i nesymetrických.
 - Kromě nesymetrických poruch v elektrickém smyslu, kdy nastávají různé děje v různých fázích střídavého trojfázového elektrického obvodu,
 - je zde kladen požadavek i na možnost simulací nesymetrií na strojně mechanické části modelu. Jedná se například o poruchu na jediném válci.
- Model musí umožňovat provedení citlivostní analýzy pro dimenzování DG, volbě jeho parametrů a návrhu regulačních obvodů.
- Model musí být přehledně zpracován v otevřeném kódu a umožňovat tak další potřebné modifikace při dalším vývoji a simulaci specifických elektromechanických přechodových dějů.

Na funkci modelu jsou tedy kladeny náročné požadavky, nicméně jeho detailní zpracování bylo v průběhu zpracování konfrontováno i z požadavky na jeho robustnost a praktickou použitelnost.

Prvotní koncepci modelu samostatného diesel motoru publikoval v roce 2005 doc. S. Jirků ve svém příspěvku Simulační model spalovacího motoru, [Jrk05]. Tento typ modelu byl naprogramován nejprve pomocí simulátoru Matlab, [Thn05]. Později byl realizován v SW Mathematica, [Brs08]. V roce 2010 J. Kabelák presentoval příbuzný typ modelu, který slouží jako točivá redukce tlaku v energetických systémech, [Kbl10a]. Postupně byl model zdokonalován a rozšiřován [Kbl12a], [Kbl12b]. Dále dokumentovaný model obsahuje jak diesel motor, tak synchronní generátor; tedy celý DG, který napájí zátěž. Základní vlastnosti modelu a výsledky simulací jsou připraveny k publikování, viz [Kbl14].

5.1 Struktura modelu

Tyto odstavce usnadní základní orientaci v modelu. Jejich cílem není vyčerpávající popis jednotlivých rovnic, nýbrž přehledné zobrazení hlavních komponent modelu.

Detailní odvození jednotlivých fyzikálních vztahů a relací mezi vnitřními proměnnými modelu bylo provedeno přímo v prostředí Mathematica. Disertační práce je opatřena dvěma samostatnými přílohami, jež tyto souvislosti detailně dokumentují:

- Příloha 5-1 Základní fyzikální vztahy modelu – notebook Mathematica obsahuje odvození a demonstraci výchozích funkcí a procedur použitých v modelu. Je zaměřena především na část diesel motoru.
- Příloha 5-2 Funkční model DG – notebook Mathematica je kompletním výpisem zdrojového kódu modelu. Tento dopodrobna členěný soubor s bohatými komentáři je koncipován jako funkční model, dokumentace a průvodce zároveň.

Z uvedených důvodů není účelné se v této kapitole zabývat přílišnými detaily. Dále je uvedena pouze zásadní struktura modelu. Nejdůležitějším komponentům je následně věnován odstavec, jak je zřejmé z připojených odkazů.

1. Diesel motor

1.1. Klikový mechanismus

1.1.1. Poloha pístu

1.1.2. Objem válců

1.1.2.1. Objem jednoho válce

1.1.2.2. Objem všech válců (matice)

1.1.3. Teplosměnná plocha válců (matice)

1.1.4. Redukovaný moment setrvačnosti

1.1.4.1. Kliková hřídel

1.1.4.2. Píst

1.1.4.3. Ojnice

1.2. Funkce ventilů

1.2.1. Periodická funkce

1.2.2. Trapézová funkce

1.2.3. Funkce otevírání a zavírání

1.2.3.1. pro jeden ventil jednoho válce

1.2.3.2. pro 3 ventily (sání, výfuk a vstřík) a všechny válce (matice)

- 1.3. Hydrodynamika diesel motoru
 - 1.3.1. Hmotnost vzduchu ve válcích v čase 0
 - 1.3.2. Hmotností toky rovnice (1)
 - 1.3.2.1. Sání
 - 1.3.2.2. Výfuk
 - 1.3.2.3. Palivo
 - 1.3.3. Rychlost proudění – Bernoulliho rovnice rovnice (2)
- 1.4. Termodynamika diesel motoru
 - 1.4.1. Energetická bilance systému rovnice (3)
 - 1.4.2. Vnitřní teplota systému rovnice (4)
 - 1.4.3. Tepelný tok rovnice (5)
 - 1.4.4. Stavová rovnice plynu rovnice (6)
- 2. Pohybová rovnice** rovnice (7)
 - 2.1. Hnací moment diesel motoru rovnice (8)
 - 2.2. Protimoment synchronního generátoru rovnice (11)
 - 2.3. Regulátor otáček
- 3. Synchronní generátor**
 - 3.1. Zpražené magnetické toky rovnice (9)
 - 3.2. Napěťové rovnice rovnice (10)
 - 3.3. Obvodové rovnice a zátěž
 - 3.4. Buzení

Ad 1.3.2. Hmotností toky

Maximální množství paliva m_F , které je možné spálit, závisí na množství vzduchu ve válci $V_C \cdot \rho_0$, stechiometrickém koeficientu k_s a přebytku vzduchu λ . Toto množství paliva je vstřikováno po dobu otočení klikového hřídele o úhel β . Úhlová rychlost otáčení hřídele je φ_m' . Viz 1. rovnice v (1).

Hmotnostní tok sání m_I' závisí na vstupní rychlosti nasávaného vzduchu c_I , jeho hustotě ρ_I a průřezu sacího potrubí A_I . Podobně hmotnostní tok výfukových plynů m_E' závisí na výstupní rychlosti plynu c_E , jeho hustotě (dané tlakem p a teplotou T uvnitř válce a měrnou plynovou konstantou R) a průřezu výfukového potrubí A_E . Viz 2. a 3. rovnici v (1).

Součet všech hmotnostních toků představuje poslední rovnice v (1). Funkce otevírání vstřikovacího, sacího a výfukového ventilu jsou dány f_F , f_I a f_E .

$$m_F'(t) = \frac{V_C \cdot \rho_0 \cdot \varphi_m'(t)}{\beta \cdot k_s \cdot \lambda} \quad m_I'(t) = c_I(t) \cdot A_I \cdot \rho_I \quad m_E'(t) = -c_E(t) \cdot A_E \cdot \frac{p(t)}{R \cdot T(t)} \quad (1)$$

$$m'(t) = m_I'(t) \cdot f_I(\varphi) + m_E'(t) \cdot f_E(\varphi) + m_F' \cdot f_F(\varphi)$$

Ad 1.3.3. Rychlosti proudění

Rychlosti proudění jsou dány Bernoulliho rovnicemi. Předpokládáme, že sací a výfukové potrubí mají konstantní průřez a délky l_I , l_E . Hydraulické ztráty vyjádříme koeficienty ζ_I , ζ_E . Tlak nasávaného vzduchu a tlak za výfukovým potrubím označíme p_I a p_E . Zanedbáme stlačitelnost plynu v průběhu proudění. Po úpravách dostáváme rovnice (2).

$$c_I(t) = \frac{1}{l_I} \left(\frac{p_I - p(t)}{\rho_I} - (1 + \zeta_I) \frac{c_I(t)^2}{2} \operatorname{sign}(c_I(t)) \right)$$

$$c_E(t) = \frac{1}{l_E} \left(\frac{p(t) - p_E}{\rho(t)} R \cdot T(t) - (1 + \zeta_E) \frac{c_E(t)^2}{2} \operatorname{sign}(c_E(t)) \right)$$
(2)

Ad 1.4. Termodynamika diesel motoru

Z prvního zákona termodynamiky dostáváme rovnici (3), kde dU je změna vnitřní energie systému, dQ představuje tepelnou energii, dW objemovou práci a dE_m energii přivedenou do systému plynem o hmotnosti m .

$$dU = dQ + dW + dE_m$$

$$T'(t) = \frac{Q'(t)}{m(t) \cdot C_V} - \frac{R}{C_V} T(t) \frac{V'(t)}{V(t)} + \left(\frac{R}{C_V} T(t) + \Delta T_m(t) \right) \frac{m'(t)}{m(t)}$$
(3)

Druhá rovnice v (3) vyjadřuje vnitřní teplotu soustavy T . C_V je měrná tepelná kapacita plynu při konstantním objemu. V je objem válce. ΔT_m je rozdíl teploty okolí a vnitřní teploty plynu ve válci, viz rovnice (4).

$$\Delta T_m(t) = (T_I - T(t)) f_I(\varphi) \operatorname{sign}(c_I(t)) + (T(t) - T_E) f_E(\varphi) \operatorname{sign}(c_E(t))$$
(4)

Celková tepelná energie Q se skládá z energie uvolněné hořením paliva s výhřevností q_F a tepla prostupujícího stěnami válce. Viz rovnice (5), kde α je střední hodnota součinitele přestupu tepla, A_W je efektivní teplosměnná plocha a T_w je střední teplota stěn válce.

$$Q'(t) = \frac{q_F \cdot V_C \cdot \rho_0 \cdot \varphi'(t)}{\beta \cdot k_{stoich} \cdot \lambda} f_I(\varphi(t)) + \alpha \cdot A_W(t) \cdot (T_w - T(t))$$
(5)

Rovnice (4) a (5) dosadíme do rovnice (3) a dostaneme výslednou rovnici pro $T(t)$. Budeme také potřebovat stavovou rovnici plynu, viz (6), která představuje vnitřní tlak ve válci $p(t)$.

$$p'(t) = \frac{R \cdot T(t) \cdot m'(t)}{V(t)} + \frac{R \cdot T'(t) \cdot m(t)}{V(t)} - \frac{R \cdot T(t) \cdot m(t) \cdot V'(t)}{V^2(t)}$$
(6)

Ad 2. Pohybová rovnice

Pohybová rovnice je uvedena níže, viz (7). J_r je redukovaný moment setrvačnosti, který není v případě dieselového motoru konstantní, ale závisí na φ_m . M_{SG} je protimoment synchronního generátoru.

$$J_r \cdot \varphi_m'' + \frac{1}{2} \frac{dJ_r}{d\varphi} \varphi_m'^2 = M_{DM} - M_{SG}$$
(7)

Ad 2.1. Hnací moment diesel motoru

Celkový hnací moment diesel motoru M_{DE} je dán součtem momentů všech pístů n_c , viz (8). A_p je plocha pístu a x je jeho poloha.

$$M_{DM} = \sum_{n=1}^{n_c} \left(A_p \cdot p_n(t) \cdot \frac{dx}{d\phi} \right) \quad (8)$$

Ad 3. Synchronní generátor

V práci byl použit model synchronního generátoru ABC, viz například [Mch08]. Obsahuje rovnice pro výpočet impedancí, 6 rovnic pro výpočet spřažených magnetických toků (9) a 6 napěťových rovnic (10). Tato soustava rovnic byla doplněna o 9 obvodových rovnic. Rovnice pro výpočet momentu M_{SG} pomocí koenergie W_c jsou uvedeny v (11)

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} l_{aa}(2\theta) & l_{ab}(2\theta) & l_{ac}(2\theta) & l_{aF}(\theta) & l_{aD}(\theta) & l_{aQ}(\theta) \\ l_{ba}(2\theta) & l_{bb}(2\theta) & l_{bc}(2\theta) & l_{bF}(\theta) & l_{bD}(\theta) & l_{bQ}(\theta) \\ l_{ca}(2\theta) & l_{cb}(2\theta) & l_{cc}(2\theta) & l_{cF}(\theta) & l_{cD}(\theta) & l_{cQ}(\theta) \\ l_{Fa}(\theta) & l_{Fb}(\theta) & l_{Fc}(\theta) & l_{FF} & l_{FD} & 0 \\ l_{Da}(\theta) & l_{Db}(\theta) & l_{Dc}(\theta) & l_{DF} & l_{DD} & 0 \\ l_{Qa}(\theta) & l_{Qb}(\theta) & l_{Qc}(\theta) & 0 & 0 & l_{QQ} \end{bmatrix}, \quad \text{kde } \theta = f(t) \quad (9)$$

$$I_{SG}(t) = [i_a(t) \quad i_b(t) \quad i_c(t) \quad i_F(t) \quad i_D(t) \quad i_Q(t)]^T$$

$$\Psi(t) = [\psi_a(t) \quad \psi_b(t) \quad \psi_c(t) \quad \psi_F(t) \quad \psi_D(t) \quad \psi_Q(t)]^T$$

$$\Psi(t) = L(\theta(t)) \times I(t)$$

$$\begin{aligned} U_a(t) &= -R_a I_a(t) - \psi'_a(t) - R_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t)) - l_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t))' \\ U_b(t) &= -R_b I_b(t) - \psi'_b(t) - R_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t)) - l_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t))' \\ U_c(t) &= -R_c I_c(t) - \psi'_c(t) - R_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t)) - l_0(I_a(t) + I_b(t) + I_c(t))' \\ U_F(t) &= -R_F I_F(t) - \psi'_F(t) \\ U_D(t) &= -R_D I_D(t) - \psi'_D(t) \\ U_Q(t) &= -R_Q I_Q(t) - \psi'_Q(t) \end{aligned} \quad (10)$$

$$W_c = \frac{1}{2} I_{SG}^T \Psi$$

$$M_{SG} = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (11)$$

Detailní a přitom stále přehledný popis lze nalézt v příloze 5-2 Funkční model DG, která je kompletním řádně komentovaným výpisem zdrojového kódu modelu.

5.2 Efektivní řešení

Jak již bylo zmíněno, na model jsou kladeny nejen požadavky týkající se jeho přesnosti a detailu zpracování, ale také požadavky na jeho universálnost, srozumitelnost, robustnost, a praktickou použitelnost. To vede k nutnosti přijmout některá efektivní řešení, která model zjednoduší a zpřehlední. V některých případech dochází ke snížení přesnosti výpočtu, které je ovšem akceptovatelné a ve svém končeném důsledku vede k zásadnímu zkrácení výpočetní doby při hledání řešení.

V dalších odstavcích je ilustrováno několik takovýchto „efektivních řešení“.

5.2.1 Variabilita počtu válců

Jeden z požadavků na model diesel motoru je i variabilita počtu válců. V případě sestavování rovnic v SW Mathematica není vhodné používat klasický programátorský cyklus typu FOR – NEXT. Nabízí se zde však řešení s použitím matic.

Model tedy obsahuje sestavu rovnic fyzikálních vztahů pro jeden válec, respektive pro jednoválcový diesel motor. Veličiny dosazené do těchto rovnic však nebyly klasické jednorozměrné proměnné. Namísto toho se jednalo o sloupcové matice, kde počet řádků odpovídá počtu válců motoru. Analogii této filozofie můžeme najít u konkrétního výrobce a dodavatele diesel motorů a diesel generátorů firmy Wärtsilä, která sestavuje diesel agregáty z unifikovaných jednoválcových jednotek, viz katalog [W12]

Podívejme se na příklad okamžitého objemu válce V , který je funkcí natočení klikové hřídele φ_m . Veličina φ_0 představuje vzájemnou polohu všech pístů motoru, danou uspořádáním klikové hřídele. Z funkce pro jednoválcový motor $V1$ získáváme funkci V pro obecně n_v válcový motor, jež je sloupcovou maticí s počtem řádků právě n_v .

$$VI = f(\varphi_m)$$

$$\varphi_0 = \left[0 \quad \frac{1}{n_v} 4\pi \quad \frac{2}{n_v} 4\pi \quad \frac{3}{n_v} 4\pi \quad \dots \quad \frac{n_v - 1}{n_v} 4\pi \right]^T \quad (12)$$

$$V = VI(\varphi_m - \varphi_0)$$

Podobně je tomu tak i u funkce efektivní teplosměnné plochy válců.

Poněkud odlišným případem jsou funkce momentu setrvačnosti J a hnacího momentu M_{DM} diesel motoru, které jsou součtem jednotlivých příspěvků každého válce, viz (13).

$$J(\varphi_m) = JI(\varphi_m - 0) + JI\left(\varphi_m - \frac{1}{n_v} 4\pi\right) + JI\left(\varphi_m - \frac{2}{n_v} 4\pi\right) + \dots + JI\left(\varphi_m - \frac{n_v - 1}{n_v} 4\pi\right) \quad (13)$$

Poněkud komplikovanější, avšak s výhodou využitelná, je funkce otvírání a zavírání sacího, výfukového a vstřikovacího ventilu, kde jednotlivé řádky odpovídají druhu ventilu a sloupce jednotlivým válcům, viz (14)

$$FceVentilu(\varphi_m) = \begin{bmatrix} Sání 1(\varphi_m) & Sání 2(\varphi_m) & \dots & Sání n_v(\varphi_m) \\ Výfuk 1(\varphi_m) & Výfuk 2(\varphi_m) & \dots & Výfuk n_v(\varphi_m) \\ Vstřst 1(\varphi_m) & Vstřst 2(\varphi_m) & \dots & Vstřst n_v(\varphi_m) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Snad nejelegantnější využití tohoto maticového způsobu vyjádření proměnných nabízí samotné rovnice termodynamiky dieselmotoru, kterých je 5. Za jednotlivé

veličiny se dosazují vždy sloupcové matice s počtem řádků odpovídajících počtu válců. Tím vzniká například pro 12ti válcový motor 60 rovnic s velmi úsporným způsobem zápisu.

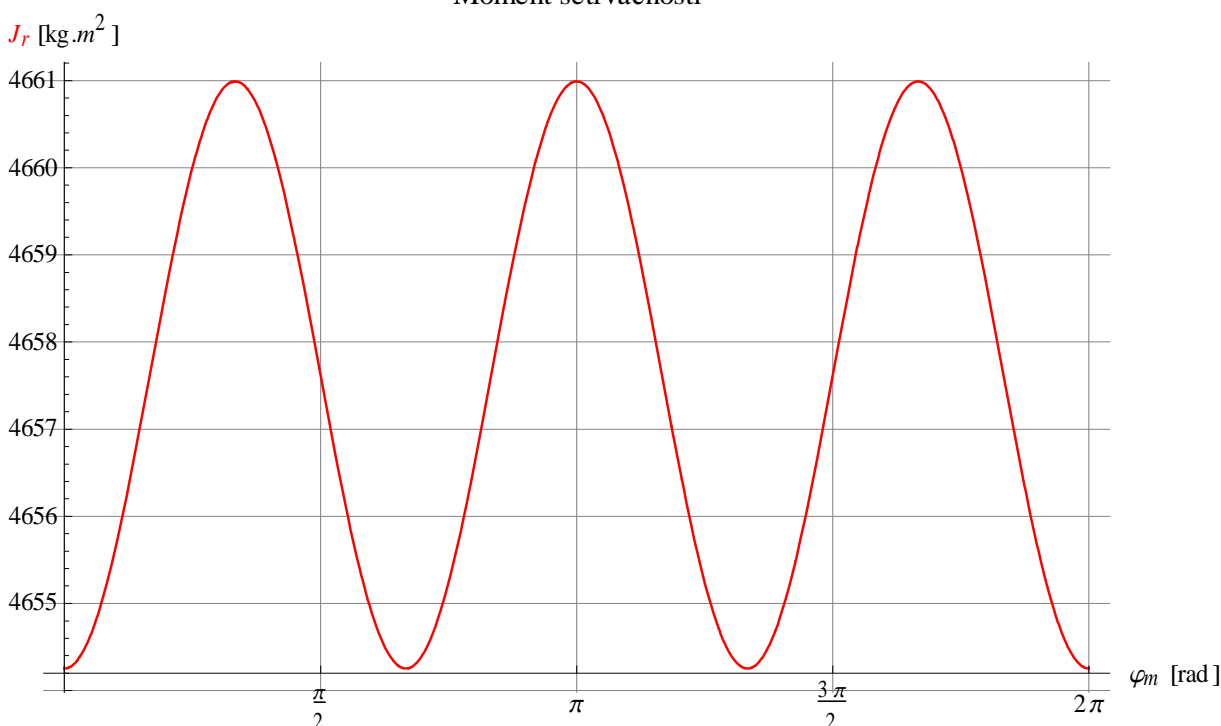
5.2.2 Fourierův rozvoj

Celkový redukovaný moment setrvačnosti J_r diesel motoru není konstantou. U našeho modelu závisí na úhlu natočení klikového hřídele φ_m . Skládá se z příspěvků momentů setrvačnosti klikového hřídele, ojnice a pístu. Tyto příspěvky je navíc nutné sečíst přes všechny válce n_v stroje. Výsledný vzorec momentu setrvačnosti šestiválcového diesel motoru je pro ilustraci uveden v (15).

$$\begin{aligned}
 & 0.04 \left(68.8146 \cos^2(2.0944 - \varphi_m(t)) + 153.5 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t)) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) - 2.0944))} + 3.63718 \cos(2.0944 - \varphi_m(t)) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) - 2.0944)) \right) + 0.870121 \right) \right) + \\
 & \quad \frac{0.895841 - 0.03856 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t))}{0.929296 - 0.04 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{0.04 \left(68.8146 \cos^2(4.18879 - \varphi_m(t)) + 153.5 \sin^2(4.18879 - \varphi_m(t)) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) - 4.18879))} + 3.63718 \cos(4.18879 - \varphi_m(t)) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) - 4.18879)) \right) + 0.870121 \right) \right)}{0.895841 - 0.03856 \sin^2(4.18879 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{0.04 \left(68.8146 \cos^2(6.28319 - \varphi_m(t)) + 153.5 \sin^2(6.28319 - \varphi_m(t)) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) - 6.28319))} + 3.63718 \cos(6.28319 - \varphi_m(t)) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) - 6.28319)) \right) + 0.870121 \right) \right)}{0.895841 - 0.03856 \sin^2(6.28319 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{0.04 \left(68.8146 \cos^2(8.37758 - \varphi_m(t)) + 153.5 \sin^2(8.37758 - \varphi_m(t)) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) - 8.37758))} + 3.63718 \cos(8.37758 - \varphi_m(t)) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) - 8.37758)) \right) + 0.870121 \right) \right)}{0.895841 - 0.03856 \sin^2(8.37758 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{0.04 \left(68.8146 \cos^2(10.472 - \varphi_m(t)) + 153.5 \sin^2(10.472 - \varphi_m(t)) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) - 10.472))} + 3.63718 \cos(10.472 - \varphi_m(t)) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) - 10.472)) \right) + 0.870121 \right) \right)}{0.895841 - 0.03856 \sin^2(10.472 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{0.04 \left(68.8146 \cos^2(\varphi_m(t) + 0) + 153.5 \sin^2(\varphi_m(t) + 0) \left(0.0642 \left(\sqrt{0.08 \cos(2(\varphi_m(t) + 0))} + 3.63718 \cos(\varphi_m(t) + 0) + 0.2 \cos(2(\varphi_m(t) + 0)) \right) + 0.870121 \right) \right)}{0.895841 - 0.03856 \sin^2(\varphi_m(t) + 0)} + \\
 & \frac{3.28 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t)) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t))} + 0.2 \cos(2.0944 - \varphi_m(t)) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(2.0944 - \varphi_m(t))} + \frac{3.28 \sin^2(4.18879 - \varphi_m(t)) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(4.18879 - \varphi_m(t))} + 0.2 \cos(4.18879 - \varphi_m(t)) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(4.18879 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{3.28 \sin^2(6.28319 - \varphi_m(t)) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(6.28319 - \varphi_m(t))} + 0.2 \cos(6.28319 - \varphi_m(t)) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(6.28319 - \varphi_m(t))} + \frac{3.28 \sin^2(8.37758 - \varphi_m(t)) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(8.37758 - \varphi_m(t))} + 0.2 \cos(8.37758 - \varphi_m(t)) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(8.37758 - \varphi_m(t))} + \\
 & \frac{3.28 \sin^2(10.472 - \varphi_m(t)) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(10.472 - \varphi_m(t))} + 0.2 \cos(10.472 - \varphi_m(t)) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(10.472 - \varphi_m(t))} + \frac{3.28 \sin^2(\varphi_m(t) + 0) \left(\sqrt{0.929296 - 0.04 \sin^2(\varphi_m(t) + 0)} + 0.2 \cos(\varphi_m(t) + 0) \right)^2}{0.929296 - 0.04 \sin^2(\varphi_m(t) + 0)} + 4620
 \end{aligned} \tag{15}$$

Při vykreslení funkce $J_r = f(\varphi_m)$, obr. 19, však zjišťujeme, že její průběh je sinusový. Snadno zde aplikujeme Fourierův rozvoj, jejíž naprogramování je patrné z přílohy 5-2 Funkční model DG, odstavce 2.2.5 Fourierův rozvoj momentů setrvačnosti.

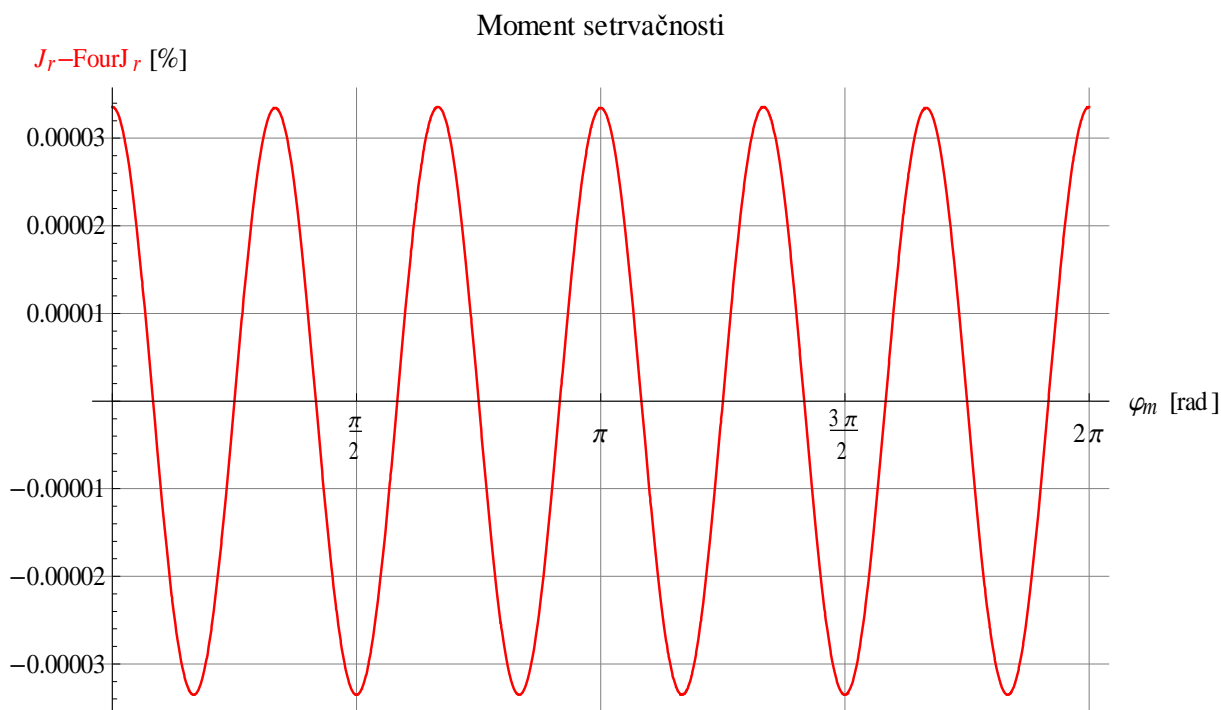
Moment setrvačnosti



obr. 19 Redukovaný moment setrvačnosti dieselmotoru dle rovnice (15)

Počet harmonických byl volen experimentálně. Po aplikaci Fourierova rozvoje dostáváme rovnici (16). Následující graf na obr. 20 ukazuje relativní rozdíl obou funkcí.

$$4657.62 - 3.36886 \cdot \cos(3\varphi_m(t)) \quad (16)$$



S ještě větší výhodou získáváme i zjednodušení derivovaného redukovaného momentu setrvačnosti, který se rovněž uplatní v pohybové rovnici (7).

5.2.3 Svorkové napětí pro regulaci buzení

V simulaci je použit model synchronního generátoru v systému ABC. To znamená, že výsledkem výpočtu jsou okamžité (střídavé) hodnoty napětí na svorkách generátoru, respektive na zátěži. Tato napětí jsou regulována budícím systémem, jehož součástí je i regulátor buzení.

Problém nastává při výpočtu regulační odchylky, tedy rozdílu efektivního napětí na svorkách generátoru a žádaného napětí. V modelu ale byla k dispozici jen okamžitá napětí s nominální frekvencí 50 Hz. Použití definice pro výpočet efektivní hodnoty pomocí integrálu přes periodu není možné, protože toto napětí je třeba získávat okamžitě během výpočtu; nikoliv po periodách, které navíc závisí na momentálních otáčkách soustrojí.

Jako vhodná a jednoduchá metoda se nakonec ukázalo použití Parkovy transformace systému ABC na systém $0dq$, viz rovnice (17). Přičemž z napětí U_d a U_q , která jsou na sebe kolmá byla počítána absolutní hodnota, po zjednodušení viz (18). Podrobněji viz příloha 5-2 Funkční model DG, odstavec 3.3.4 Parkova transformace napětí.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$U_d = \sqrt{\frac{2}{3}} U_a \cos(\theta) - \sqrt{\frac{2}{3}} U_b \sin(\frac{\pi}{6} - \theta) - \sqrt{\frac{2}{3}} U_c \sin(\frac{\pi}{6} + \theta)$$

$$U_q = \sqrt{\frac{2}{3}} U_a \sin(\theta) - \sqrt{\frac{2}{3}} U_b \cos(\frac{\pi}{6} - \theta) + \sqrt{\frac{2}{3}} U_c \cos(\frac{\pi}{6} + \theta)$$

$$U_{abs} = \sqrt{\frac{2}{3} (U_a^2 + U_b^2 + U_c^2 - U_a U_b - U_b U_c - U_a U_c)} \quad (18)$$

Rovnice (18) byla použita k výpočtu regulační odchylky napětí.

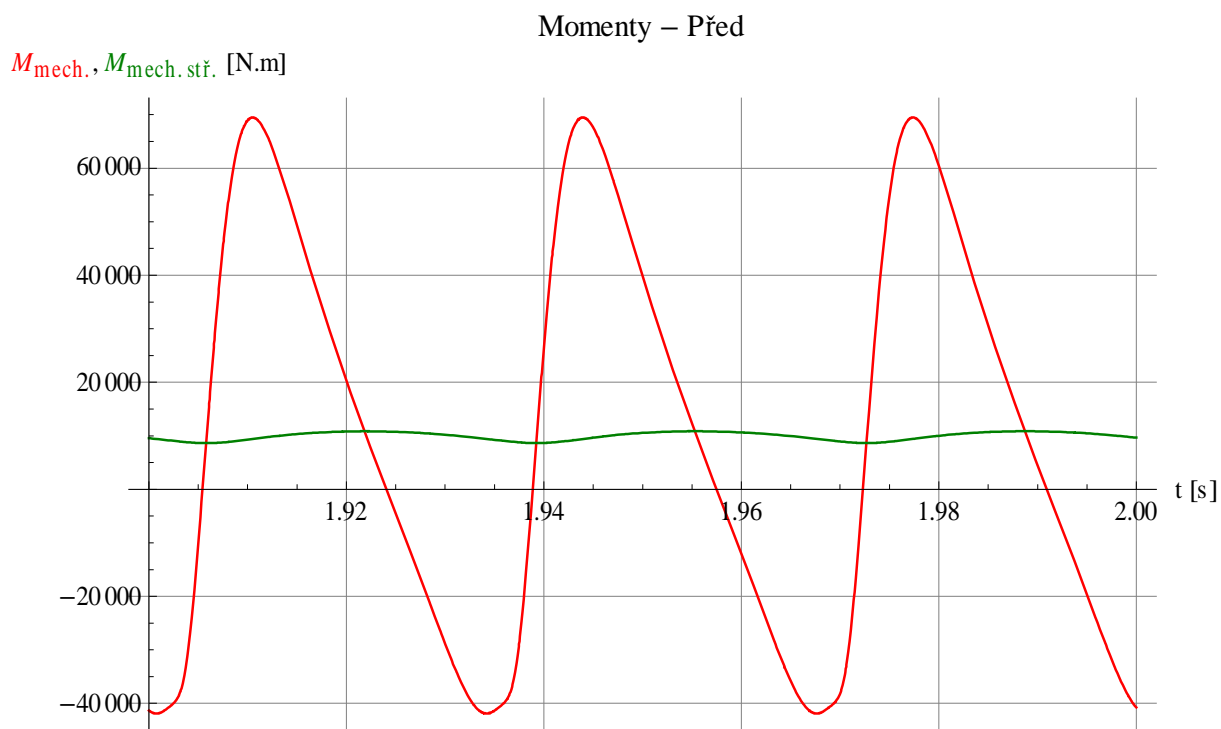
5.2.4 Střední hodnota momentu diesel motoru

Z principu práce čtyřdobého dieselového motoru (kdy po dobu jedné otáčky probíhá sání, komprese a po dobu druhé otáčky expanze a výfuk) plyne kmitavý průběh výstupního momentu. Jeho charakter samozřejmě závisí na počtu válců diesel motoru a výrazně také na tom, zda je jich sudý, nebo lichý počet, jak bude ukázáno v následující kapitole.

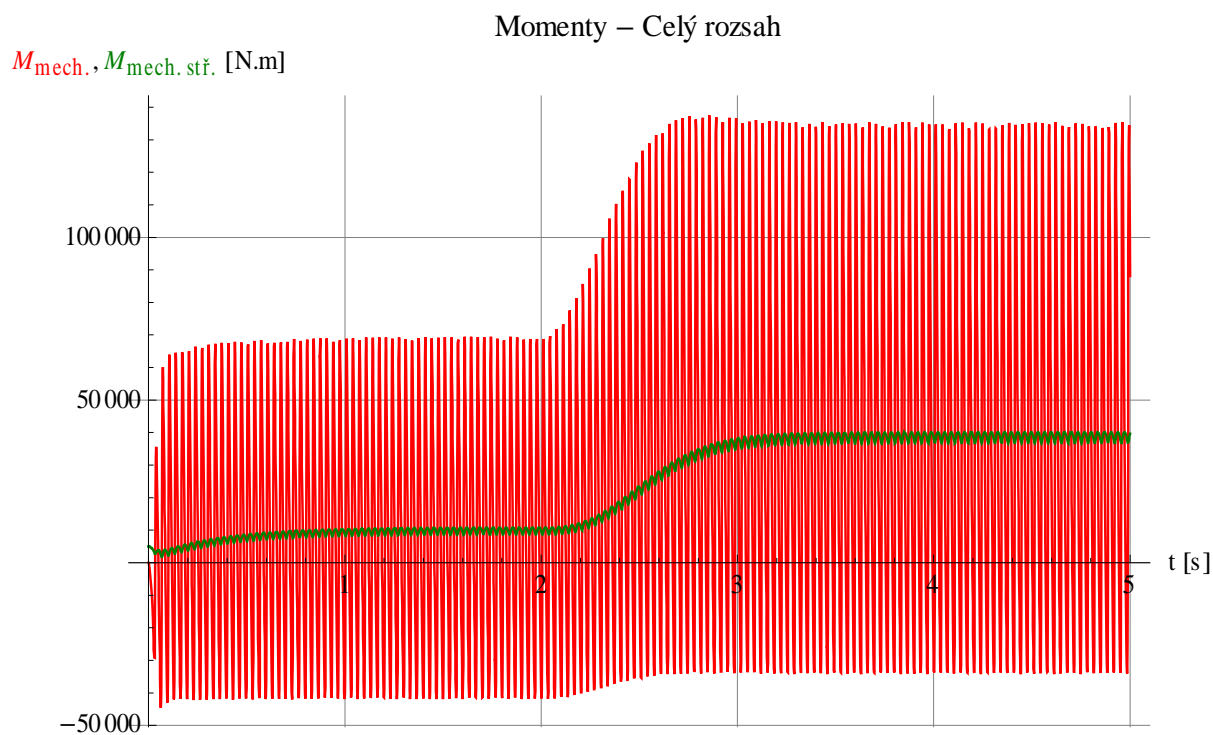
Pro účely ladění modelu (zejména pak regulátoru otáček, kdy je třeba srovnávat momenty diesel motoru a synchronního generátoru) není průběh okamžitého momentu na hřídeli dostatečně ilustrativní. Proto byl vytvořen i střední mechanický moment diesel motoru $M_{mech.stř.}$, který lépe vystihuje stav modelu, jak plyne z grafů na obr. 21 a obr. 22.

Rovnice pro výpočet $M_{mech.stř.}$ je uvedena níže, viz (19). Jedná se o zpoždění prvního řádu. Časová konstanta a počáteční podmínky byly voleny experimentálně.

$$M_{mech.}(t) = T_S M'_{mech.stř.}(t) + M_{mech.stř.} \quad (19)$$



obr. 21 Porovnání okamžitého a vypočteného středního momentu diesel motoru, detail 100ms



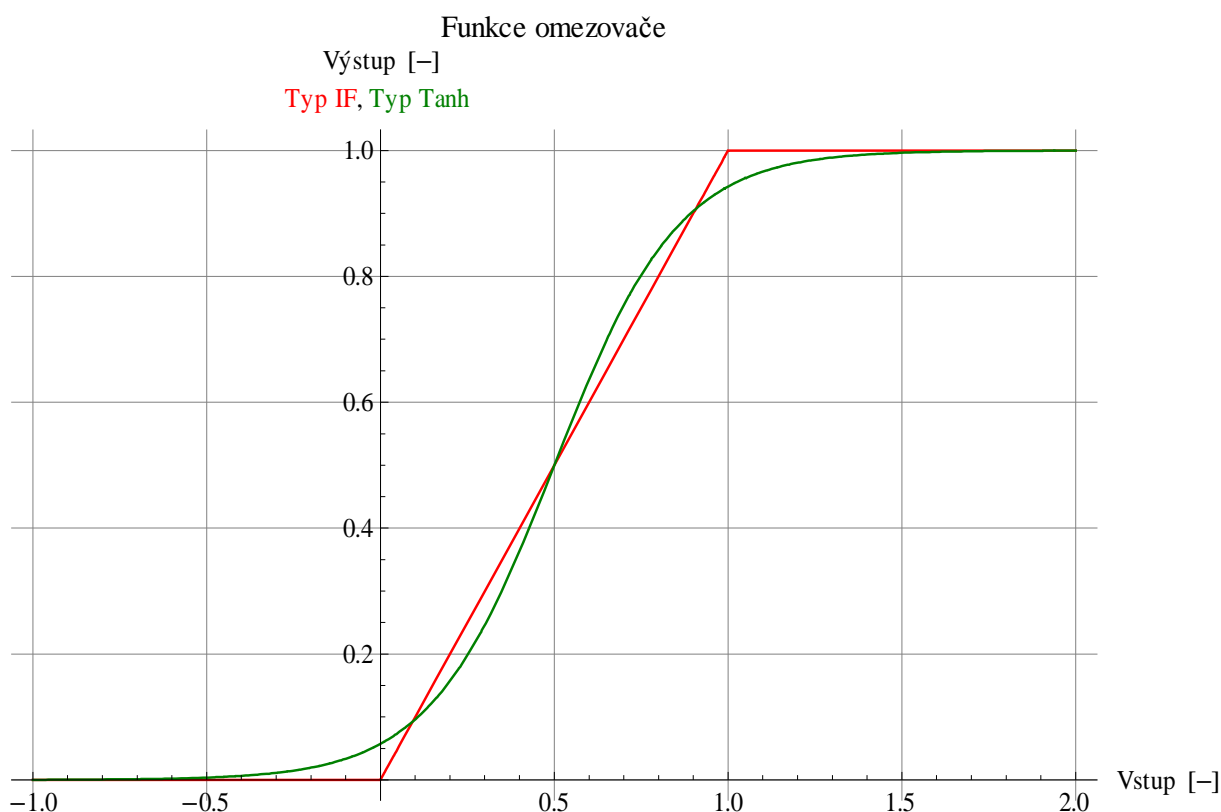
obr. 22 Porovnání okamžitého a vypočteného středního momentu diesel motoru, celý přechodový děj 5s

5.2.5 Omezovače

Pro simulaci reálných regulačních obvodů je potřeba použít funkce omezovače. V případě výstupu regulátoru mimo technické meze zařízení, omezovač signál stáhne na reálné hodnoty. Například úhel vstřiku paliva je třeba omezit na interval od 0 až β_{max} . Obdobně má budicí systém své omezení v podobě maximálního přebuzení a minimálního podbuzení.

Funkce omezovače lze definovat po úsecích pomocí příkazu „If“, viz 1. rovnice v (20). Tato cesta však způsobuje obtíže při numerickém hledání řešení. V některých případech nebylo řešení nalezeno vůbec. Proto byla funkce omezení definována pomocí tangens hyperbolický, viz 2. rovnice v (20). Obě funkce jsou znázorněny na obr. 23.

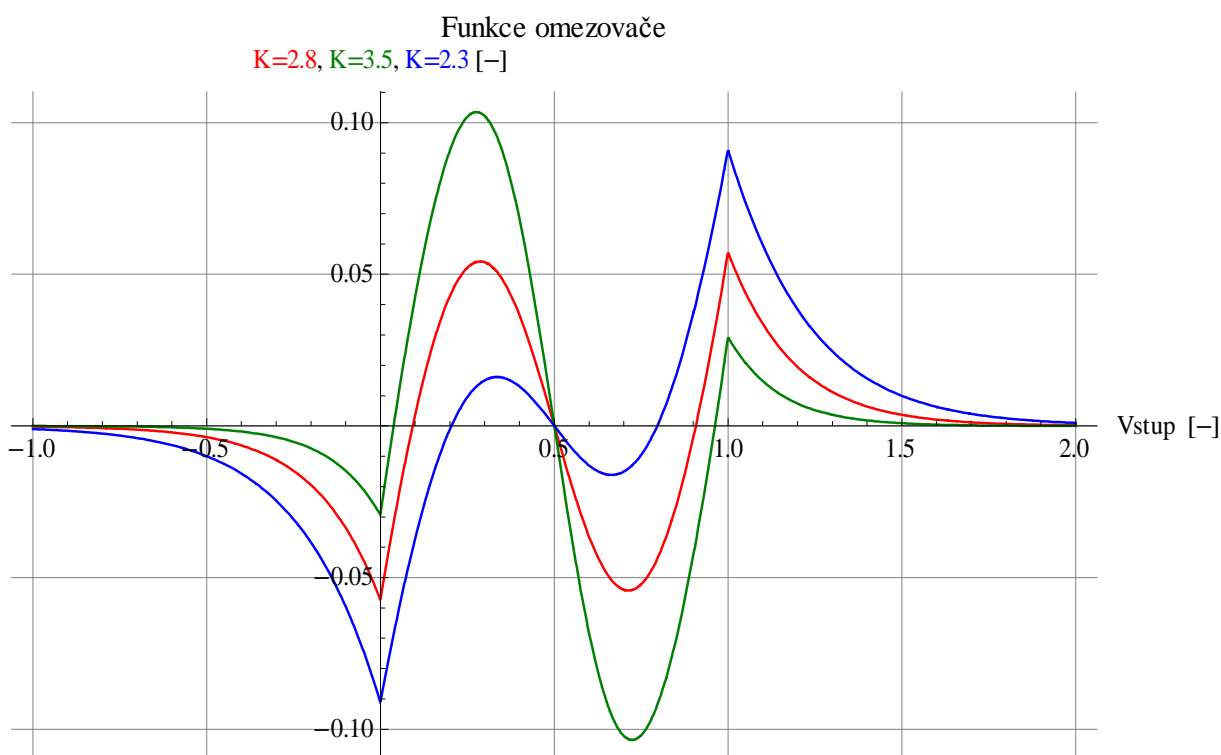
$$\begin{aligned} OmezIF(vstup) &= If(vstup > 1; 1; If(vstup < 0; 0; vstup)) \\ OmezTanh(vstup) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} Tanh(K(vstup - \frac{1}{2})) \end{aligned} \quad (20)$$



obr. 23 Porovnání funkce omezovače typu „IF“ a „Tanh“

Konstantu K lze ve výrazu (20) volit podle různých kritérií. Pokud požadujeme minimální odchylku mezi vzorovou funkcí omezovače typu „IF“ a náhradní funkcí typu „Tanh“ volíme $K = 2.8$. Volba K je znázorněna na obr. 24.

V případě omezení buzení bylo upřednostněno kritérium zachování směrnice náhradní funkce v pracovním bodě.



obr. 24 Rozdíl funkce omezovačů typu „IF“ a „Tanh“ pro různá nastavení konstanty K

5.3 Numerické metody řešení

Systém obyčejných diferenciálních rovnic lze vyjádřit $x' = f(t, x)$. Derivace závislé proměnné x jsou vyjádřeny explicitně na nezávislé proměnné t a závislé proměnné x . Pokud je funkce f spojitá, můžeme vždy najít jednoznačné řešení pro stanovené počáteční podmínky.

Náš model je však popsán algebraicko-diferenciálními rovnicemi, které mají obecnou formu $F(t, x, x') = 0$. Derivace nejsou vyjádřeny explicitně. Ve skutečnosti se derivace některých závislých proměnných v rovnicích popisujících model ani neobjeví. SW Mathematica nabízí řadu numerických výpočtových metod pro řešení algebraicko-diferenciálních rovnic, viz [WM9] kapitola „NDSolveDAE“. Obecně se postupuje tak, že je systém algebraicko-diferenciálních rovnic převeden na systém obyčejných diferenciálních rovnic derivování podle proměnné t ...

V průběhu ladění modelu, bylo vyzkoušeno mnoho metod a nastavení řešícího jádra. Některé rovnice zadání musely být připraveny do vhodnějšího tvaru. Jedná se například o rovnici tlaku, která musela být na obou stranách předem zderivována. Musely být odstraněny omezující podmínky plynoucí z původních nezderivovaných rovnic. Musel být přestaven počáteční iterační krok řádově na μs . Musely být správně voleny počáteční podmínky. Některé byly vypočteny, některé byly hledány experimentální cestou. Do obvodových rovnic, musely být připsány některé parazitní prvky, které usnadňují řešení. A podobně...

Konečné nastavení řešitele je zřejmé z přílohy 5-2 Funkční model DG, odstavec 5.2 Řešení.

6. KAPITOLA

OVĚŘENÍ FUNKCE MODELU

6.1 Analýza vlastností modelu

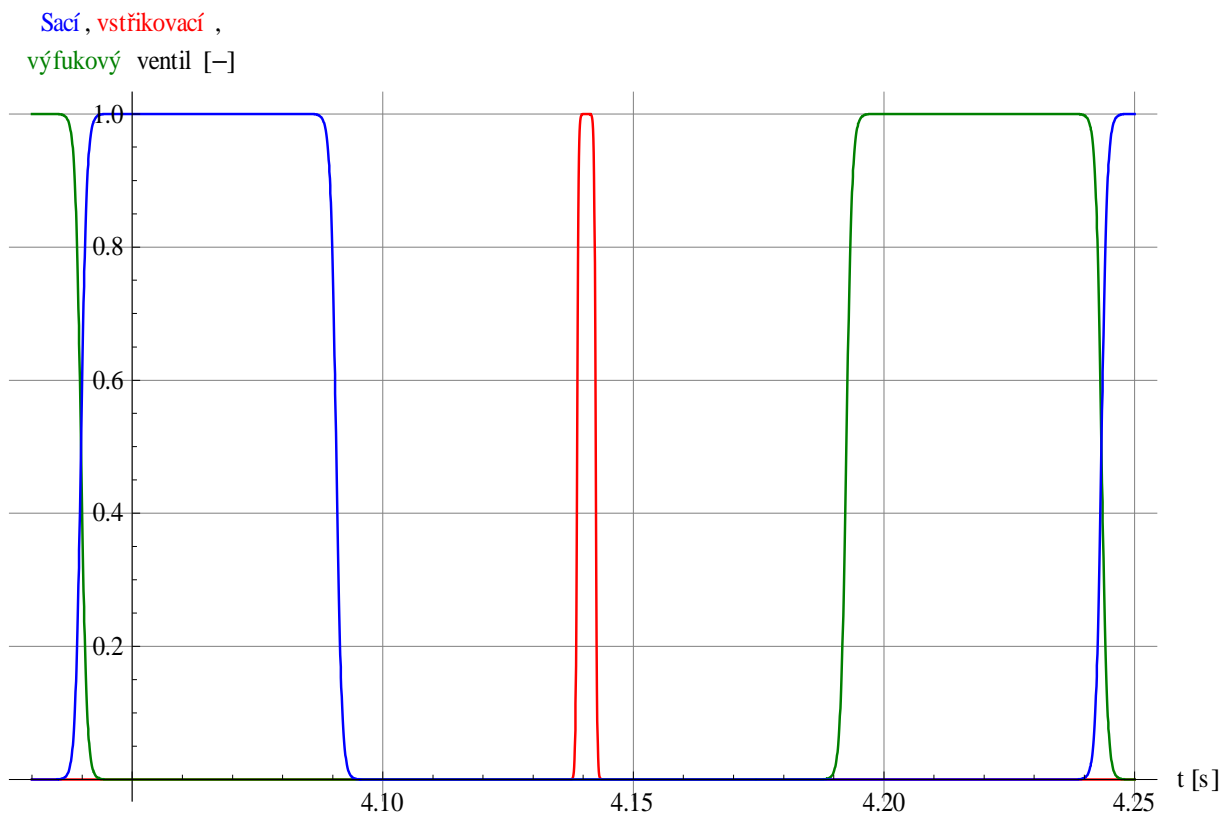
V tomto odstavci se budeme zabývat vysvětlením funkcí hlavních komponent modelu, respektive uvádí citlivostní analýzu modelu.

Testovací příklady byly sestaveny tak, aby se ověřily odezvy modelu na změny jeho parametrů. Není-li uvedeno jinak, jedná se o odezvu na poruchovou událost, kdy je diesel generátor na počátku zatížen na 10% a v čase 2s je připojena další zátěž o velikosti 30% jmenovitého výkonu DG.

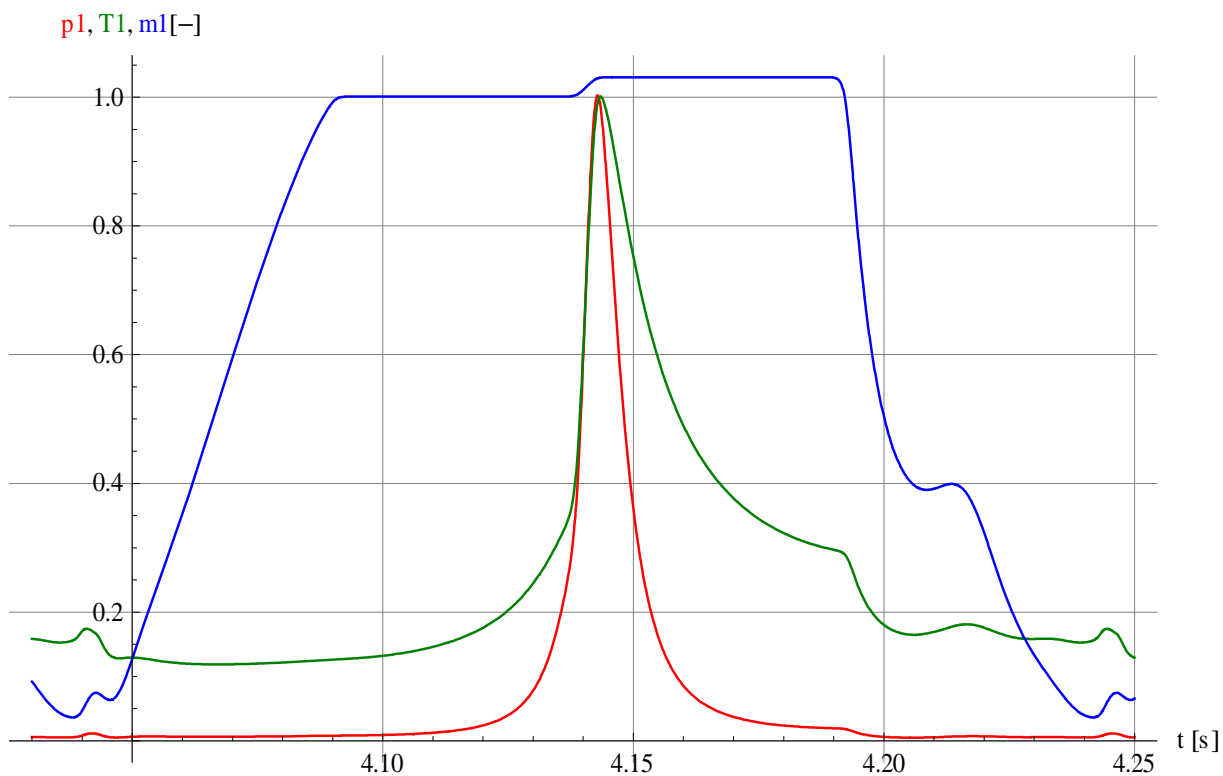
Některé veličiny jsou vyneseny bezrozměrně tak, aby byl zřetelný především tvar křivky. Tlak je vynášen jako rozdíl mezi tlakem uvnitř válce a atmosférickým tlakem. Nulová teplota odpovídá 0°C. Jmenovité otáčky $n_n=3000\text{min}^{-1}$.

6.1.1 Pracovní oběh diesel motoru

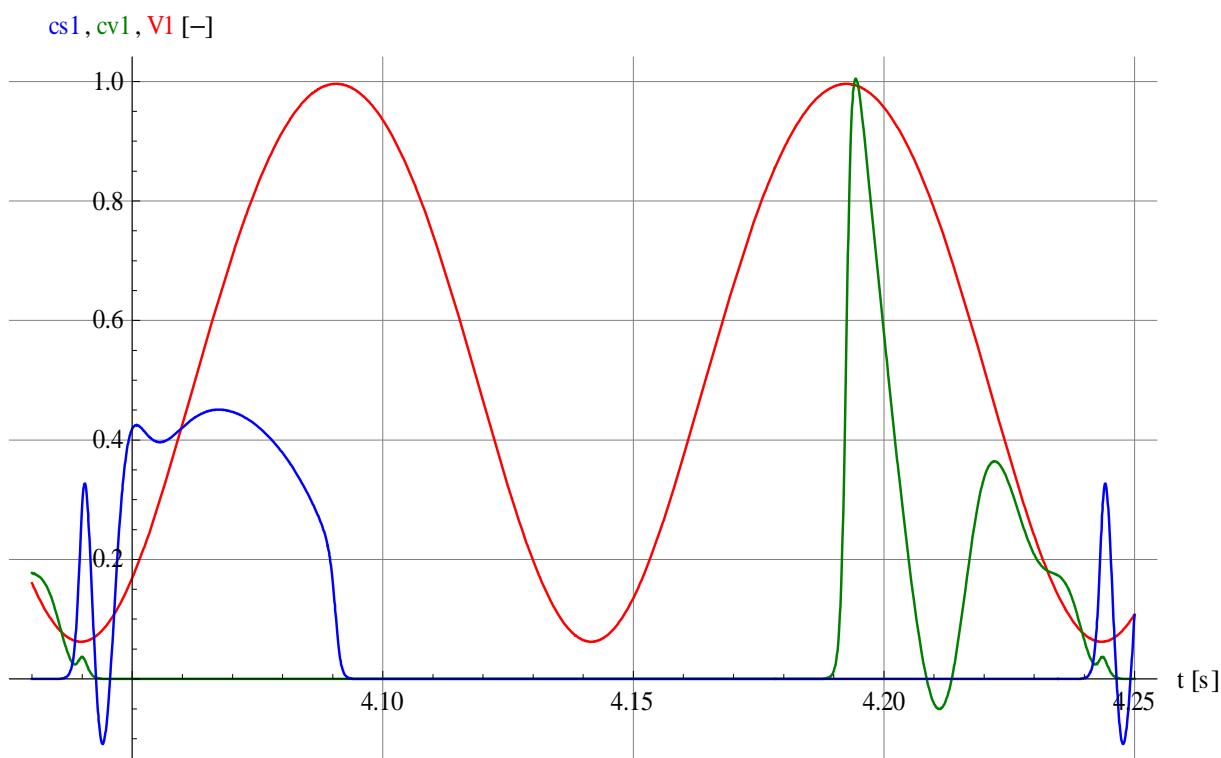
Pracovní oběh čtyřdobého vznětového motoru se skládá ze sání, komprese, expanze a výfuku. Tento cyklus proběhne vždy během dvou otáček, tedy 4π rad, respektive 200ms pro jmenovité otáčky 600min^{-1} . Na obr. 25 můžeme sledovat pracovní cyklus sacího, vstřikovacího a výfukového ventilu 1. válce. Na obr. 26 je průběh tlaku, teploty a množství směsi v 1. válci. A obr. 27 ukazuje rychlosti proudění médií v sání a výfuku a okamžitý objem 1. válce daný pohybem pístu. Veličiny jsou vyneseny bezrozměrně tak, aby bylo možné porovnat tvar křivek.



obr. 25 Pracovní oběh diesel motoru – činnost ventilů 1. válce



obr. 26 Pracovní oběh diesel motoru – tlak, teplota a hmotnost v 1. válci

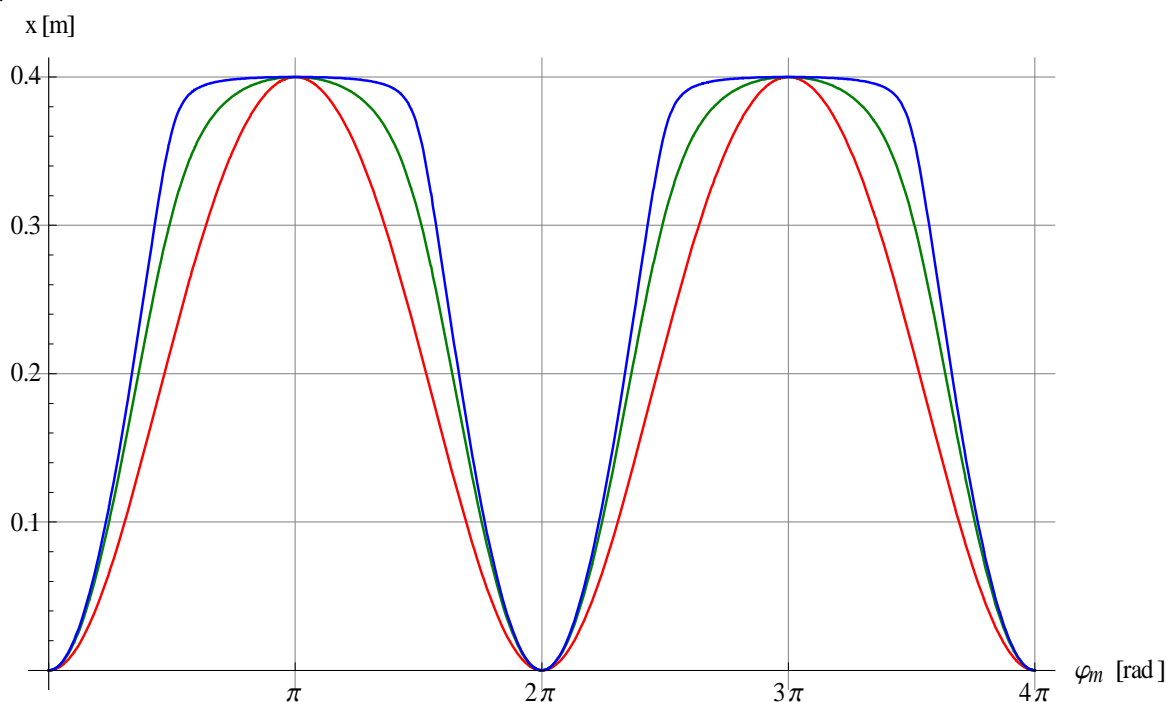


obr. 27 Pracovní oběh diesel motoru – rychlost sání, výfuku a objem 1. válce

6.1.2 Geometrie klikového mechanismu

V předchozím oddílu byl zobrazen objem válce v průběhu pracovního oběhu diesel motoru. Objem válce je přímo úměrný poloze pístu. Následující obr. 28 ukazuje, jak závisí poloha pístu (0 odpovídá horní úvrati) na poměru délky ojnice l_o a poloměru kliky r_k . Je zřejmé, že pro malé poměry je l_o/r_k je křivka u dolní úvrati příliš plochá, což je konstrukčně nevýhodné. Obvykle se volí tento poměr kolem 5.

$l_o/r_k = 5, 1.2, 1.02$

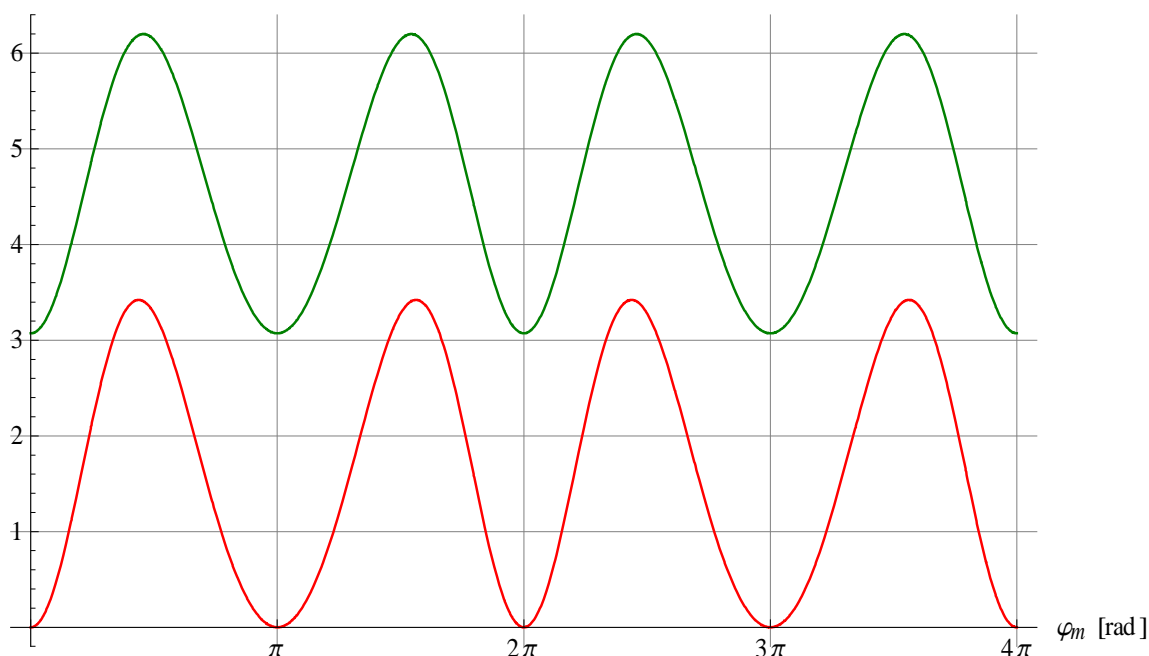


obr. 28 Vliv poměru délky ojnice a kliky – poloha pístu 1. válce

6.1.3 Momenty setrvačnosti

Nyní sledujeme momenty setrvačnosti jednotlivých součástí diesel motoru. Na obr. 29 je zobrazen průběh momentu setrvačnosti jednoho pístu J_{rp} a jedné ojnice J_{ro} . Je zřejmé, že píst má v horní a dolní úvrati nulový moment setrvačnosti, protože stojí. Ojnice má vždy nenulový moment setrvačnosti. Její pohyb má posuvnou i rotační složku.

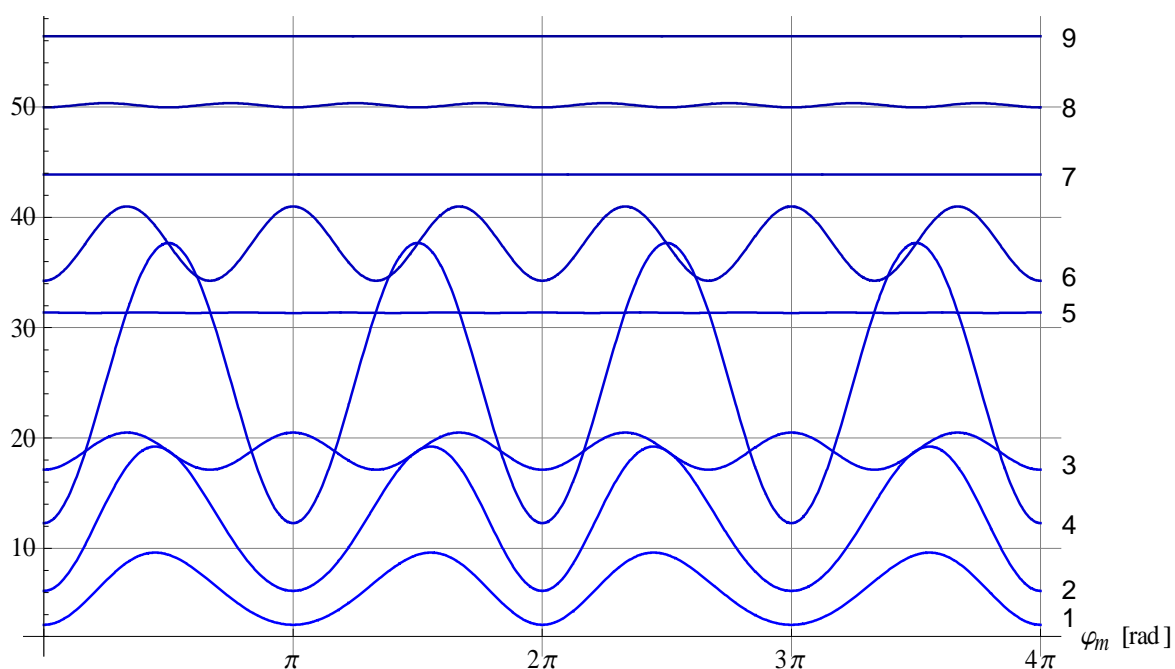
J_{rp}, J_{ro} [kg.m²]



obr. 29 Momenty setrvačnosti pístu a ojnice 1. válce

Porovnejme nyní součty momentů setrvačnosti ojnice a pístu pro jednoválcový, dvouválcový až devítiválcový motor, viz obr. 30. Můžeme si povšimnout, že u motorů s lichým počtem válců se odchylky momentů setrvačnosti vzájemně vyrovnávají. Výrazná střídavá složka tohoto průběhu je u čtyřválcového motoru, kde jsou jednotlivé písty „ve fázi“ a tato složka se „zesiluje“.

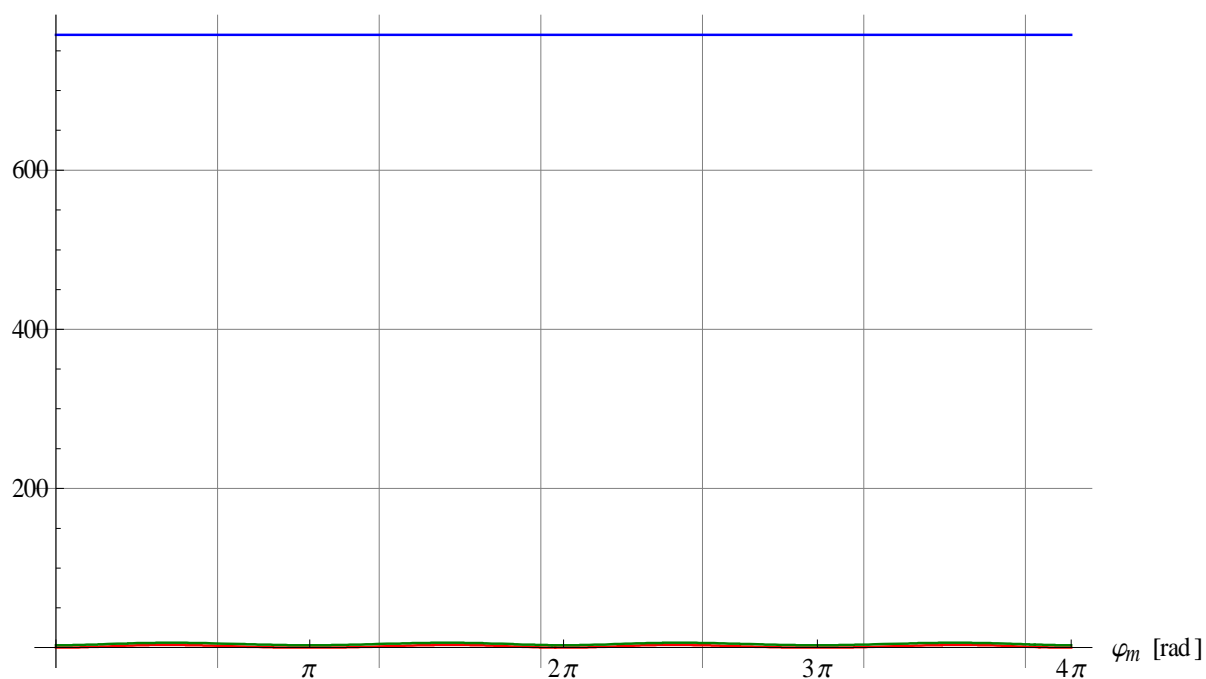
$J_{r_{p0} 1}, J_{r_{p0} 2},$
 $\dots J_{r_{p0} 9} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$



obr. 30 Momenty setrvačnosti pístu + ojnice pro jedno- až devíti-válcový motor

Na závěrečném grafu, obr. 31, lze porovnat momenty setrvačnosti ojnice, pístu a části klikového hřídele odpovídající úseku jednoho válce. Je zřejmé, že moment klikového hřídele je dominantní.

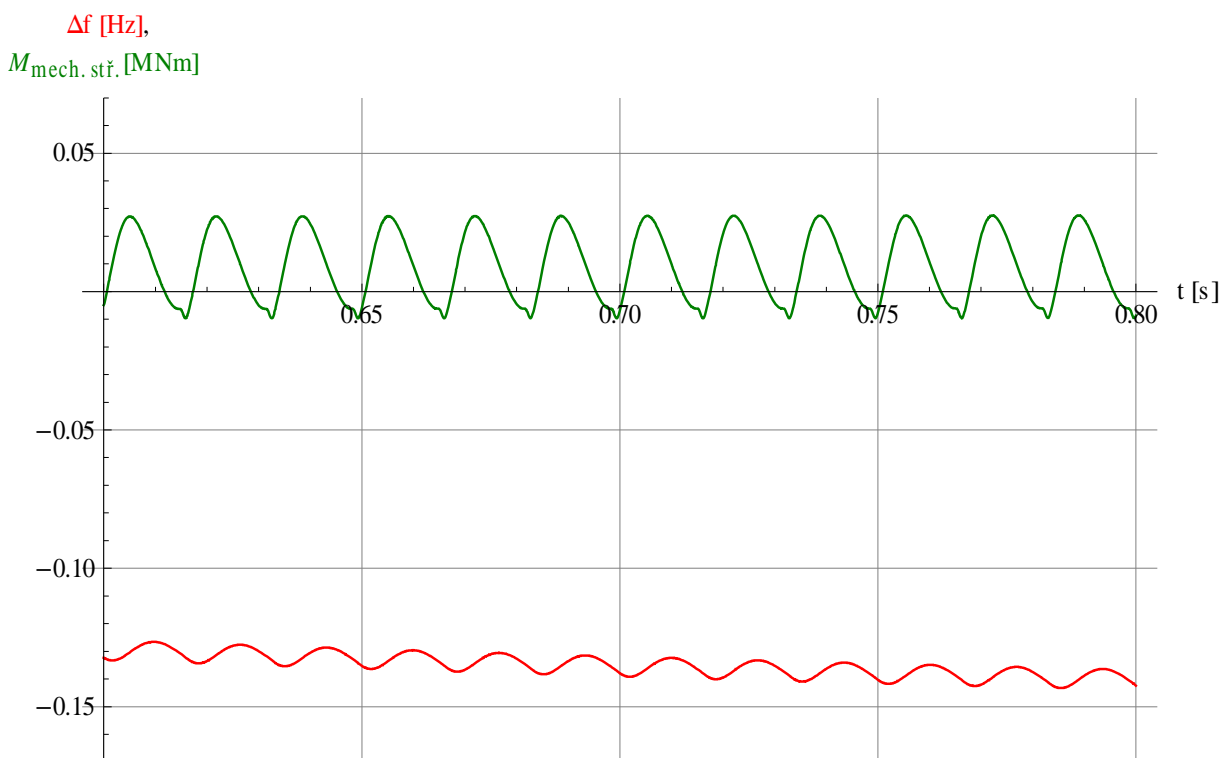
$J_{r_p 1}, J_{r_o 1},$
 $J_{r_k 1} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$



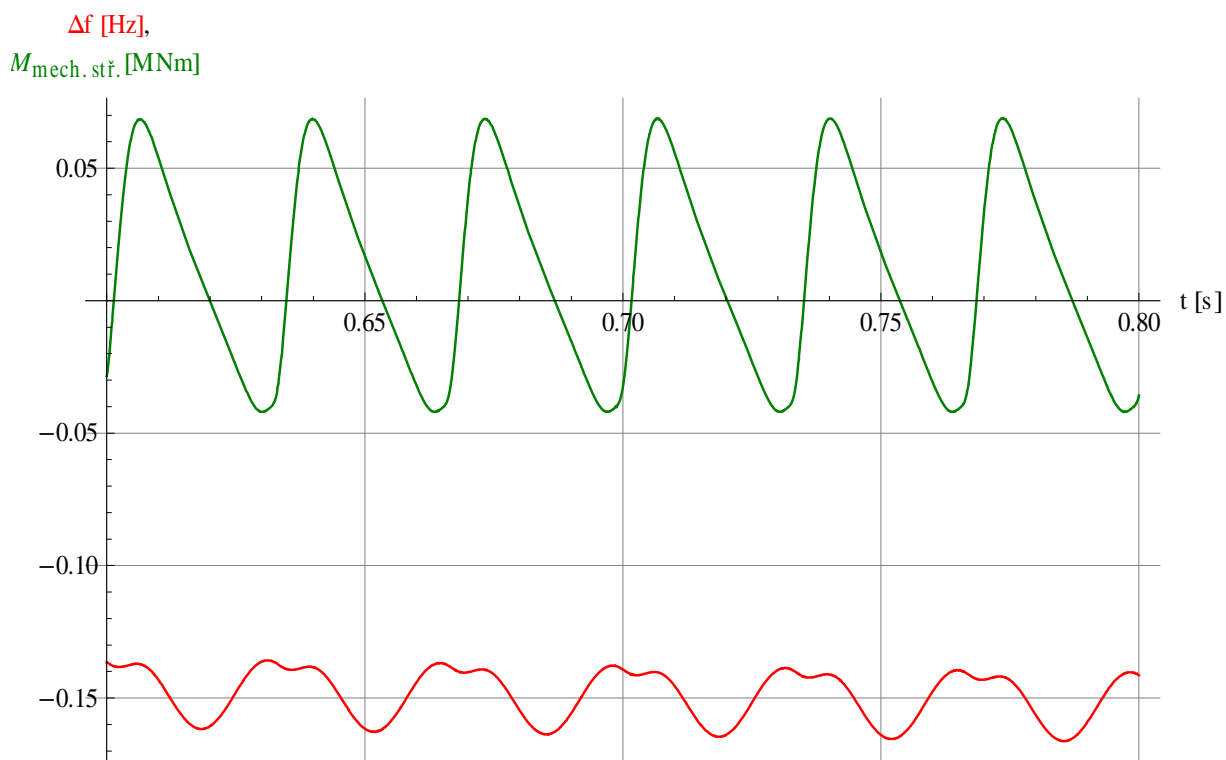
obr. 31 Momenty setrvačnosti pístu, ojnice a klikové hřídele odpovídající 1. válci

6.1.4 Moment dieselového motoru

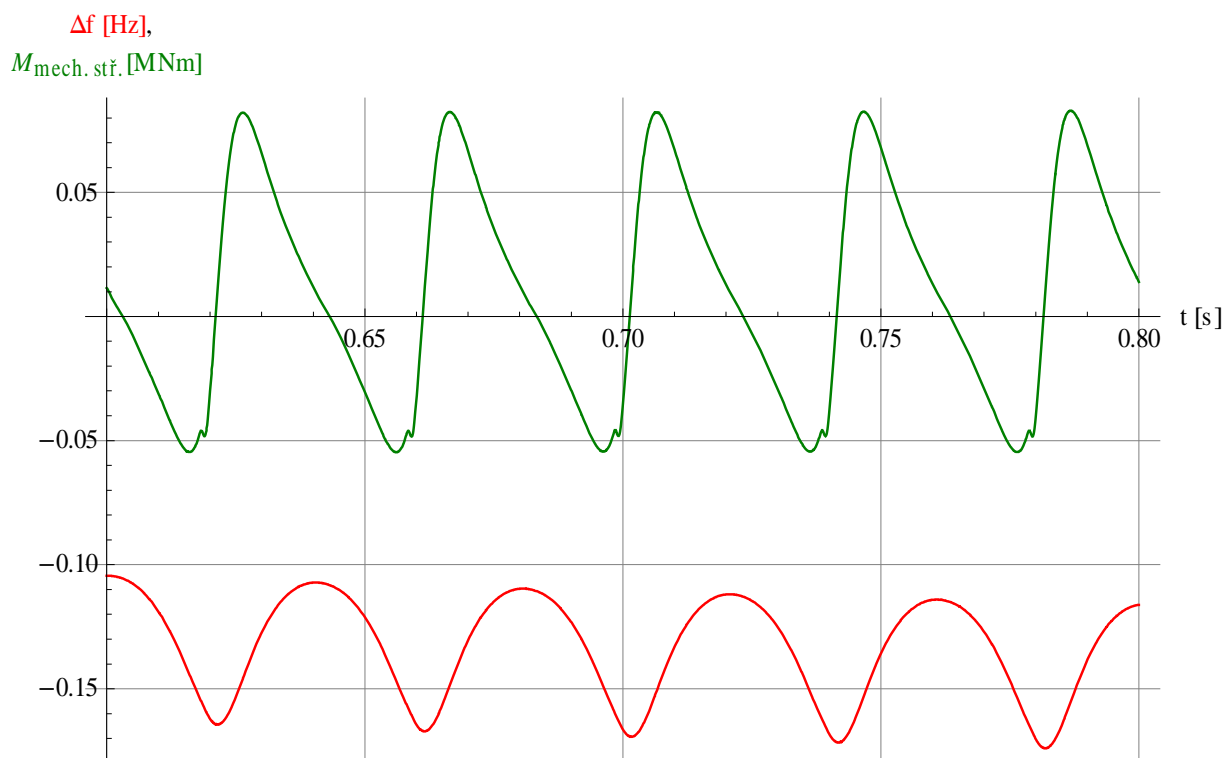
Následující sada grafů zobrazuje chování různých dieselových motorů. Mají odlišný počet válců. Postupně 12 - obr. 32, 6 - obr. 33, 5 - obr. 34 a 4 - obr. 35. Objem válců byl vždy upraven tak, aby celkový výkon motoru zůstal nezměněn. Můžeme porovnávat různý charakter celkového okamžitého momentu diesel motoru a jeho vliv na odchylku frekvence svorkového napětí. U motoru s větším počtem válců o menším objemu jednoho válce, je i střídavá složka celkového momentu na hřídeli menší, frekvence těchto plusů je vyšší. Rozptyl frekvence pro 12ti válcový DG je 8 mHz, oproti tomu pro čtyřválcový DG je tento rozptyl 295 mHz.



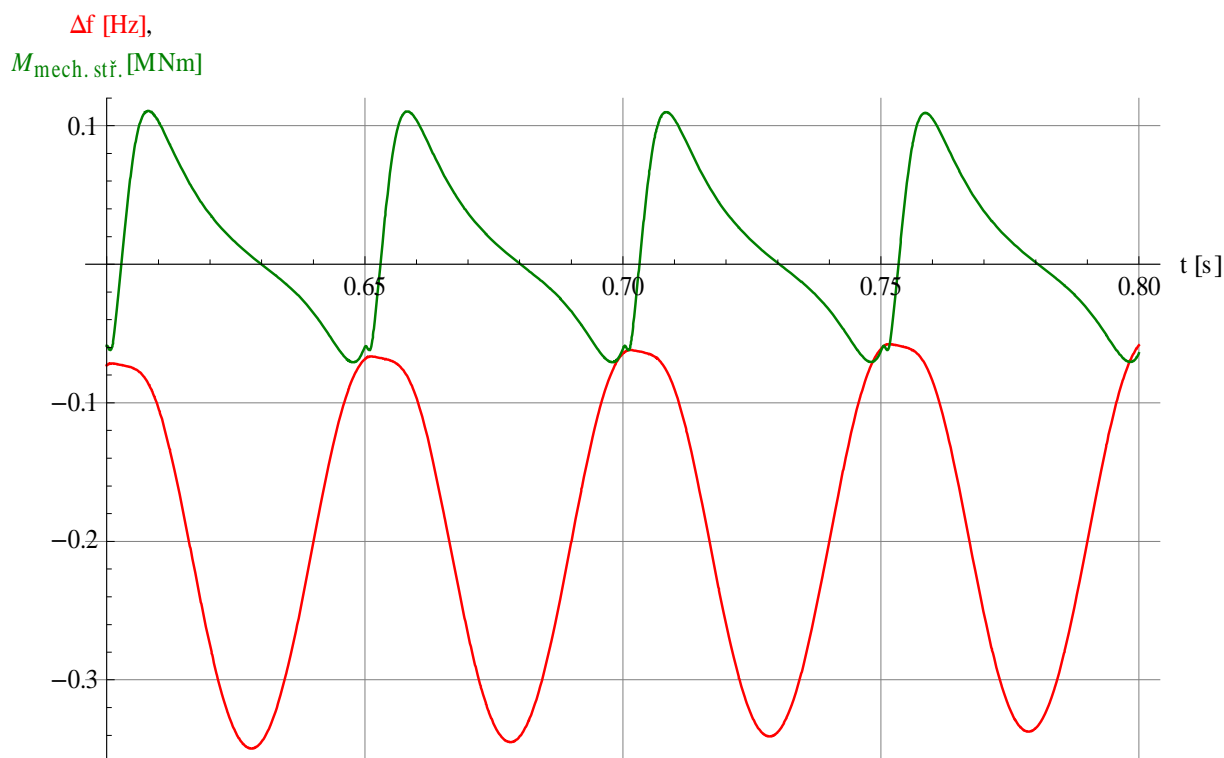
obr. 32 Moment na hřídeli a odchylka frekvence pro 12ti válcový DG



obr. 33 Moment na hřídeli a odchylka frekvence pro 6ti válcový DG

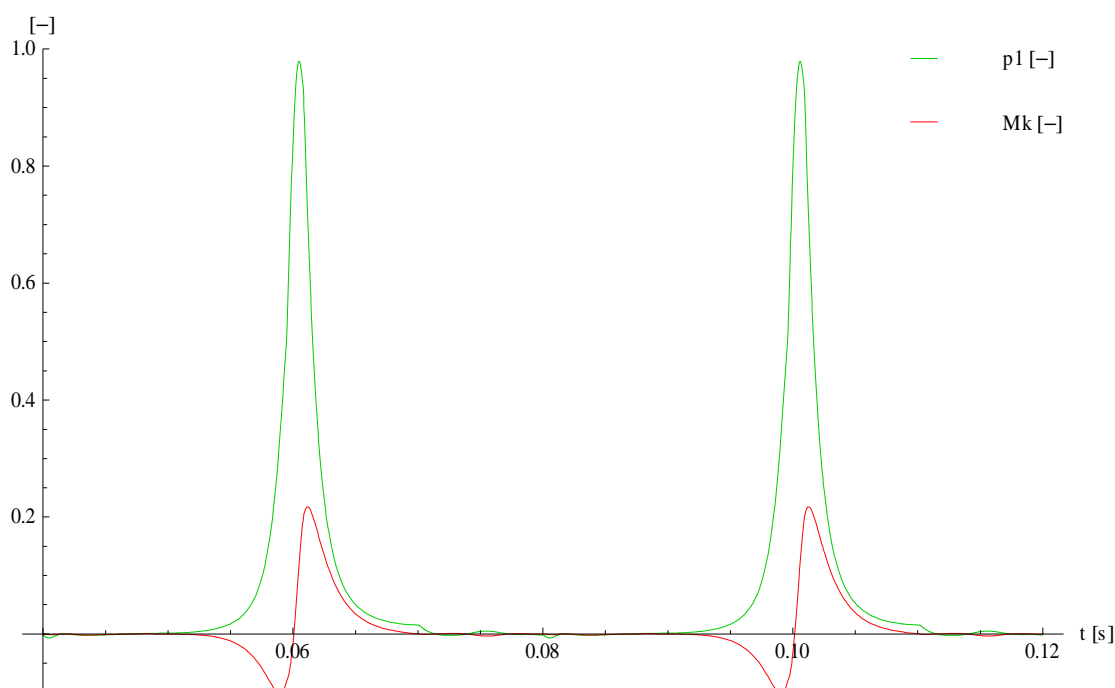


obr. 34 Moment na hřídeli a odchylka frekvence pro 5ti válcový DG

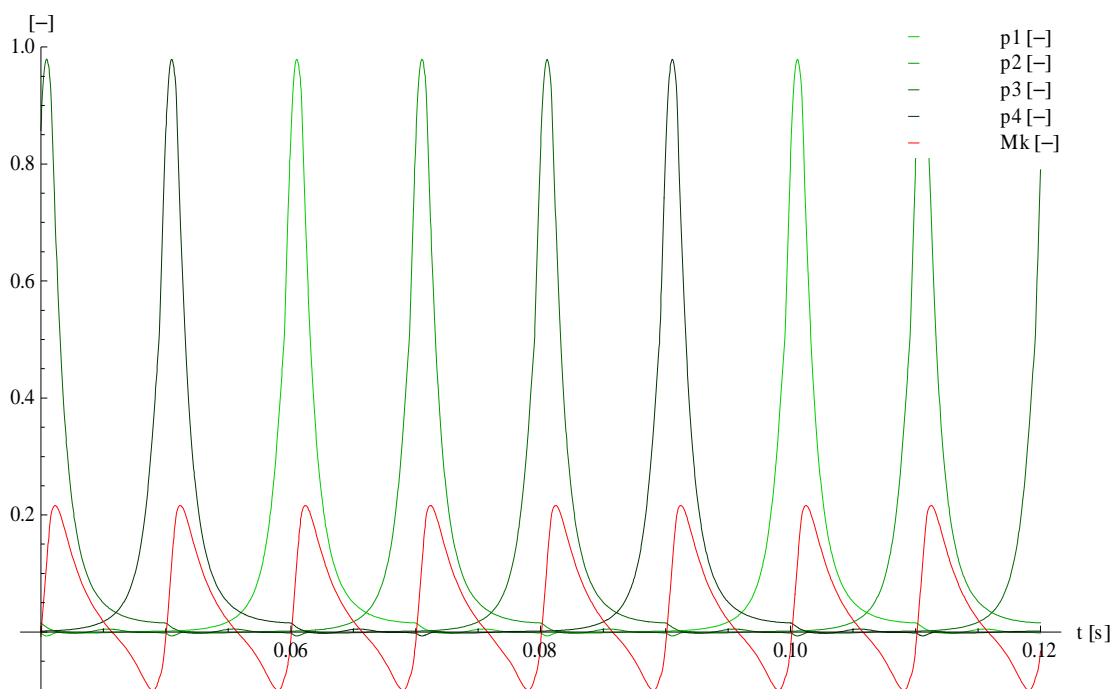


obr. 35 Moment na hřídeli a odchylka frekvence pro čtyřválcový DG

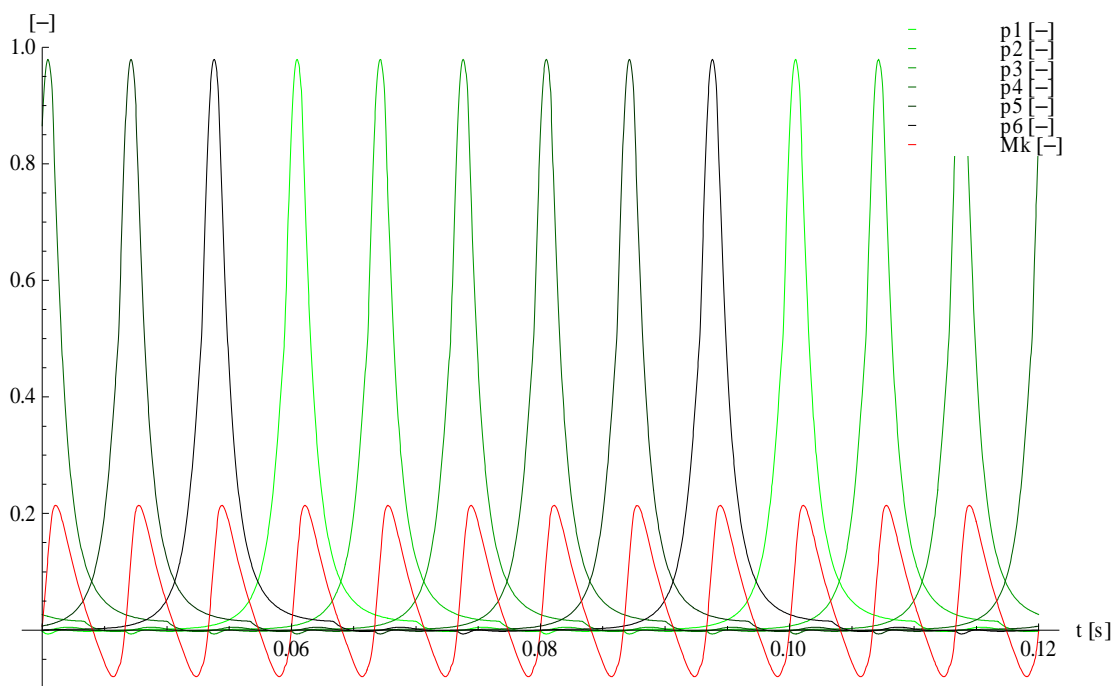
Další 3 grafy ukazují princip skládání celkového momentu diesel motoru na jeho hřídeli. Sledujeme opět vliv počtu válců (postupně 1, 4 a 6). Tentokrát se jedná vždy o stejně velké jednoválcové jednotky. Celkový jmenovitý výkon diesel motoru je na obr. 37, respektive na obr. 38 oproti prvnímu grafu na obr. 36 čtyřikrát, respektive šestkrát větší. Maximální hodnoty výstupního momentu zůstávají ve všech případech stejné. Mění se pouze četnost zákmítů. V grafech je bezrozměrně vynesena tlak jednotlivých válců a celkový moment na hřídeli stroje.



obr. 36 Skládání celkového momentu jednoválcového diesel motoru



obr. 37 Skládání celkového momentu čtyřválcového diesel motoru



obr. 38 Skládání celkového momentu 6ti válcového diesel motoru

6.1.5 Nastavení regulátoru otáček

Model DG je vybaven proporčním regulátorem otáček, který je vhodný pro spolupráci více strojů v ostrovu. Pokud pracuje pouze jeden stroj například při nouzovém napájení VS elektrárny, je možné použít proporčně-integrační regulátor. Tento je přesnější, integrační konstanta však bývá delší a tak by jeho činnost při simulacích dějů v jednotkách sekund nebyla zřetelná.

Statika regulátoru otáček

Základní vlastností proporčního regulátoru otáček je jeho zesílení K , respektive statika, což je převrácená hodnota tohoto zesílení. Větším zesílením K můžeme dosáhnout menší odchylky ustálené hodnoty otáček a tím přesnější regulace. Při příliš velkém zesílení může být děj přeregulovaný a periodický, čemuž se snažíme vyhnout. Zkoumaný model má nastavenou obvyklou hodnotu zesílení $K=20$, tedy statika je 5%. To znamená, že při zvýšení zatížení stroje o 100%, poklesnou ustálené otáčky o 5%.

Vše je zřejmé z následujících grafů. **Černá křivka** na obr. 39 představuje změnu momentu SG, tedy změnu zatížení DG. Konkrétně se ve 2. sekundě zvýšilo zatížení z 10% na 40% jmenovitého výkonu DG.

V reakci na tuto změnu přidává regulátor palivo diesel motoru a zvedá se i moment na hřídeli. **Červená křivka** na obr. 39 ukazuje průběh momentu při $K=20$, **zelená křivka** při $K=40$. Vidíme, že **regulace s větším zesílením je razantnější**. Plocha vymezená **momentem SG** a momentem diesel motoru určuje celkový pokles otáček. Srovnaj **červené** a **zelené** otáčky na obr. 40. Ve 2. sekundě jsme zvýšili zatížení stroje o 30% a otáčky poklesly o $1/20 \times 30\% = 1.5\%$ při $K=20$ (**červená**) a o $1/40 \times 30\% = 0.75\%$ při $K=40$ (**zelená**).

Základní otevření „Basic opening”

Pokles otáček, vysvětlený výše je vždy relativní. Vztahuje se k pracovnímu bodu, v kterém se nacházel DG před přechodným dějem. Při ustáleném chodu lze BO nastavit tak, aby otáčky odpovídaly jmenovité frekvenci. U proporčně-integračního regulátoru je defacto BO trvale doladován integrační větví regulátoru.

Vliv nastavení BO je demonstrován opět na obr. 39 a obr. 40. **Červené křivky**, $BO=0.1$. **Modré křivky** $BO=0.4$. Je zřejmé, že při počátečním zatížení 10%, odpovídá lépe skutečnosti $BO=0.1$ – **červené křivky**. Nastavení $BO=0.4$ je nevhodné. Později v průběhu přechodného děje, v čase 2 až 5 sekund, kdy je celkové zatížení 40%, je vhodnější $BO=0.4$.

U některých regulátorů, kdy se při vzniku ostrova automaticky přepíná z výkonové regulace na otáčkovou, se BO automaticky vysledovává a v čase přepnutí je nastaven tak, aby odchylka frekvence byla nulová.

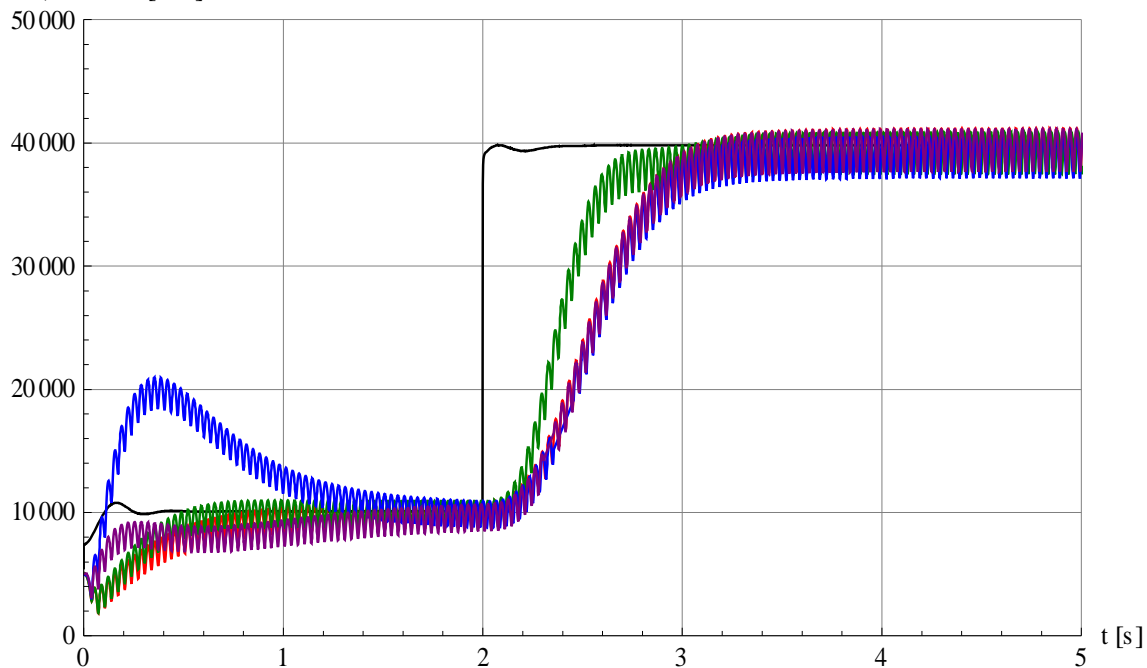
Počáteční podmínky

Mohlo by se zdát, že volba počátečních podmínek výpočtu je analogií nastavení BO. Tomu tak ale není, jak je patrné ze srovnání **červených průběhů**, kdy $PP=0.1$ a **purpurových**, kdy $PP=0.3$.

Z uvedeného je zřejmé, že model je vhodný pro návrh struktury a funkce regulátoru a v neposlední řadě pomůže i při jeho optimální parametrizaci.

$M_{e1}, M_{mech.stř.} : \text{Base}, K=40,$

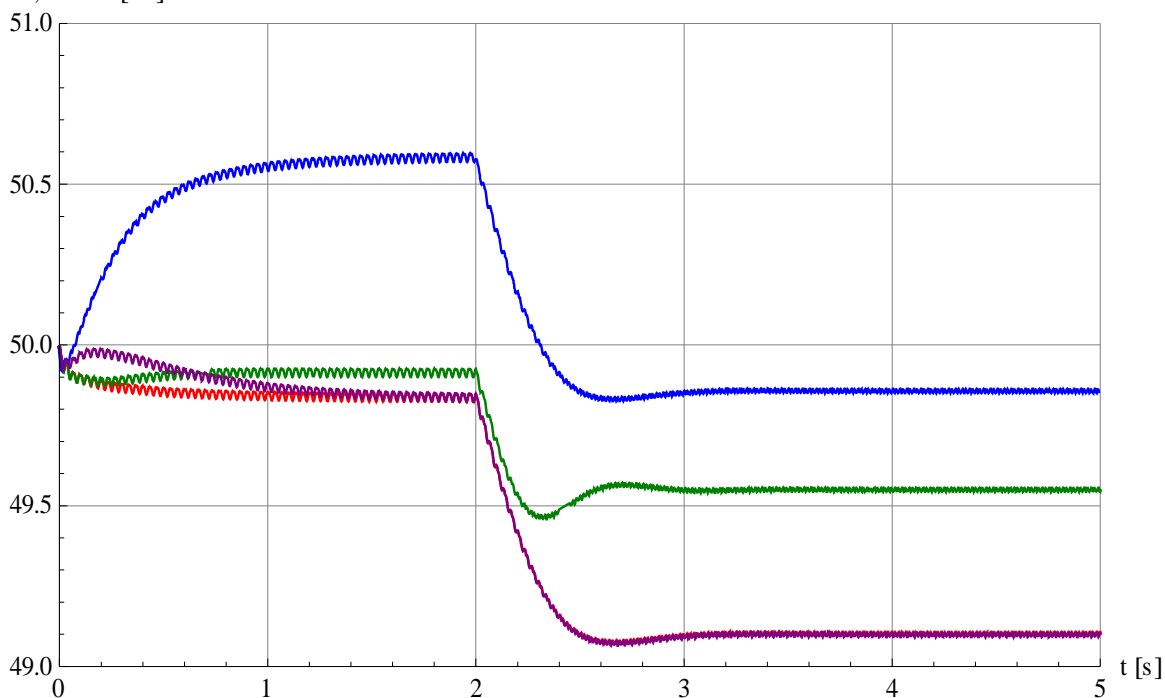
$BO=0.4, PP=0.3$ [Nm]



obr. 39 Parametrizace regulátoru otáček - momenty

$\text{Base}, K=40,$

$BO=0.4, PP=0.3$ [Hz]

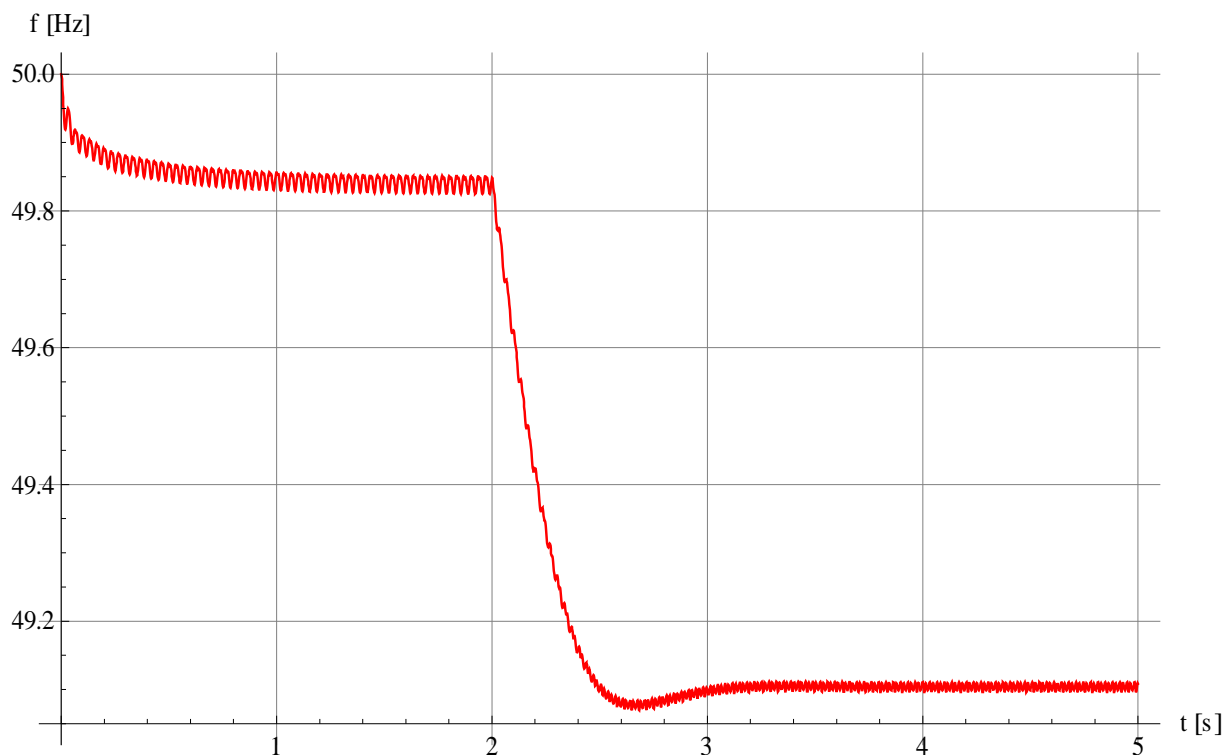


obr. 40 Parametrizace regulátoru otáček - frekvence

6.1.6 Řetězec veličin regulace otáček

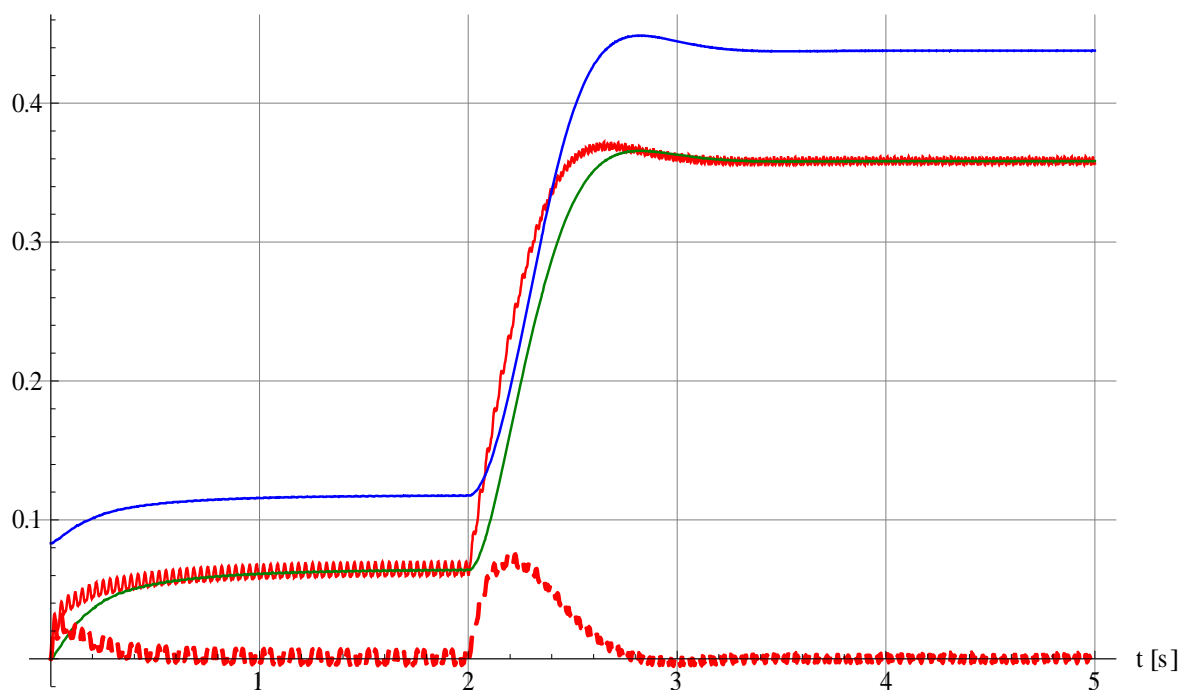
Na grafech, viz obr. 41 a obr. 42 můžeme sledovat řetězec vnitřních veličin v průběhu regulace otáček. Při skokovém nárůstu zatížení TG v 2. sekundě dojde k poklesu otáček - obr. 41. Regulátor vyhodnotí regulační odchylku skutečných otáček od zadaných. Po vynásobení proporcionálním zesílením dostáváme vnitřní

veličinu regulátoru otáček označenou na obr. 42 $\Delta\omega_m \cdot K_{RO}$. Se zpožděním prvního řádu, viz RO' , získáváme výstupní hodnotu regulátoru, která prochází omezovačem a mění se na veličinu označenou Plyn. Po zpracování signálu převodníkem, obdržíme akční veličinu, která zavírá vstřikovací ventil v úhlu daném φ_{vstz} . Průběh signálu je zřejmý z grafu na obr. 42.



obr. 41 Regulace otáček – frekvence

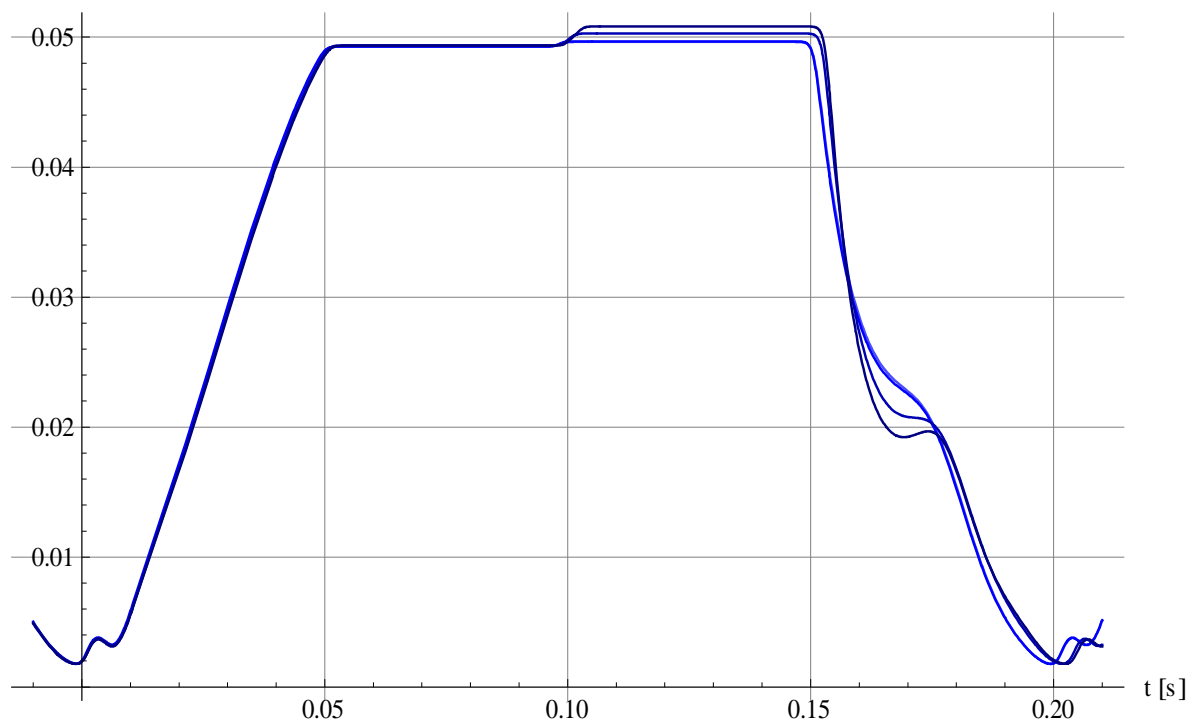
$-\Delta\omega_m \cdot K_{RO}$, RO ,
Plyn, RO' [p.u.]



obr. 42 Řetězec regulace otáček

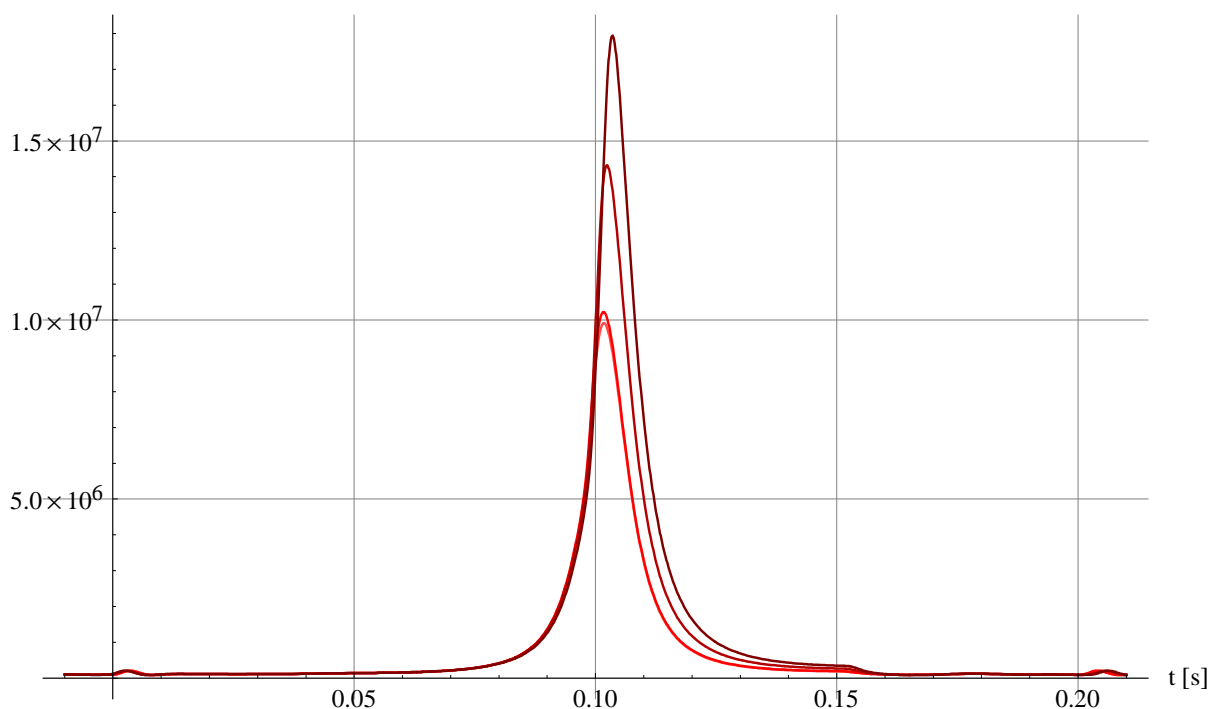
Další série grafů ukazuje technologické veličiny: hmotnost m_1 v 1. válci - obr. 43, tlak p_1 v prvním válci - obr. 44 a celkový výstupní mechanický moment na hřídeli motoru M_{mech} - obr. 45. Na grafech jsou zachyceny 200 ms snímky na počátku výpočtu v čase 0, těsně před poruchovou událostí v čase 1,8 s, po poruše v čase 2,2 s a po ustálení v čase 4.2 s. Je tak možno sledovat pracovní cyklus válce během regulace.

$m_1(0), m_1(1.8),$
 $m_1(2.2), m_1(4.2)$ [kg]



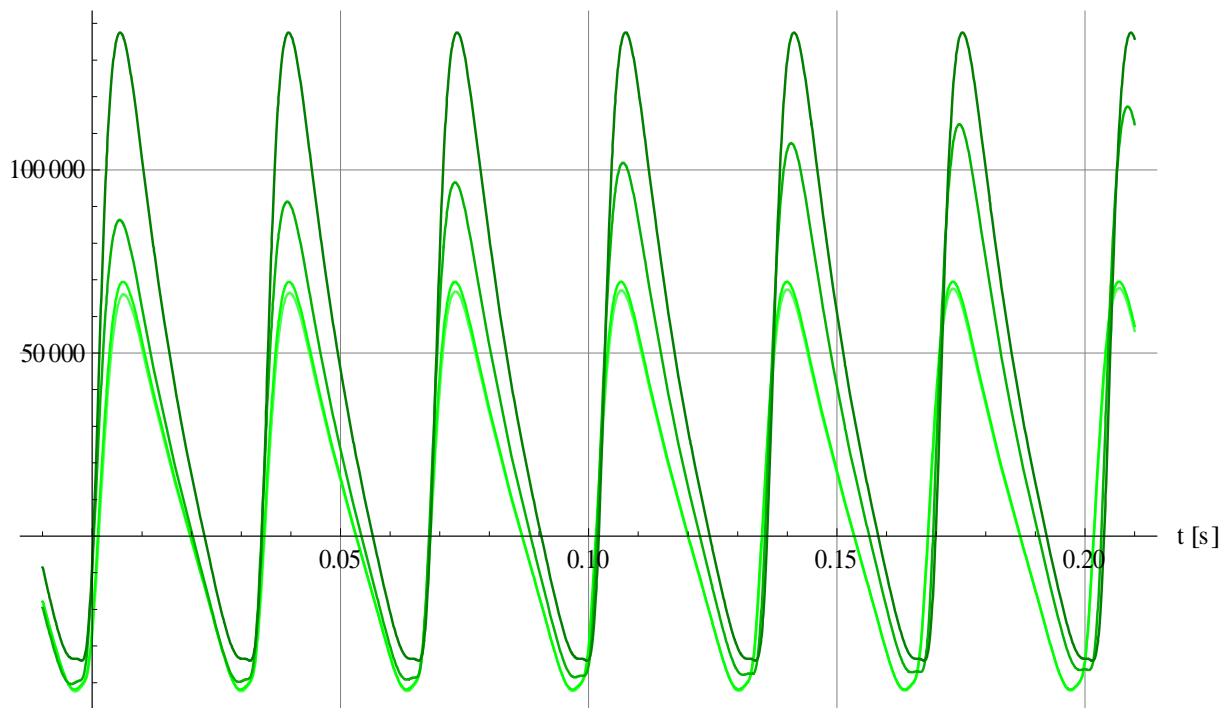
obr. 43 Snímky hmotnosti v 1. válci během regulace

$p_1(0), p_1(1.8),$
 $p_1(2.2), p_1(4.2)$ [Pa]



obr. 44 Snímky tlaku v 1. válci během regulace

$M_{\text{mech.}}(0),(1.8),$
 $(2.2),(4.2)$ [Nm]

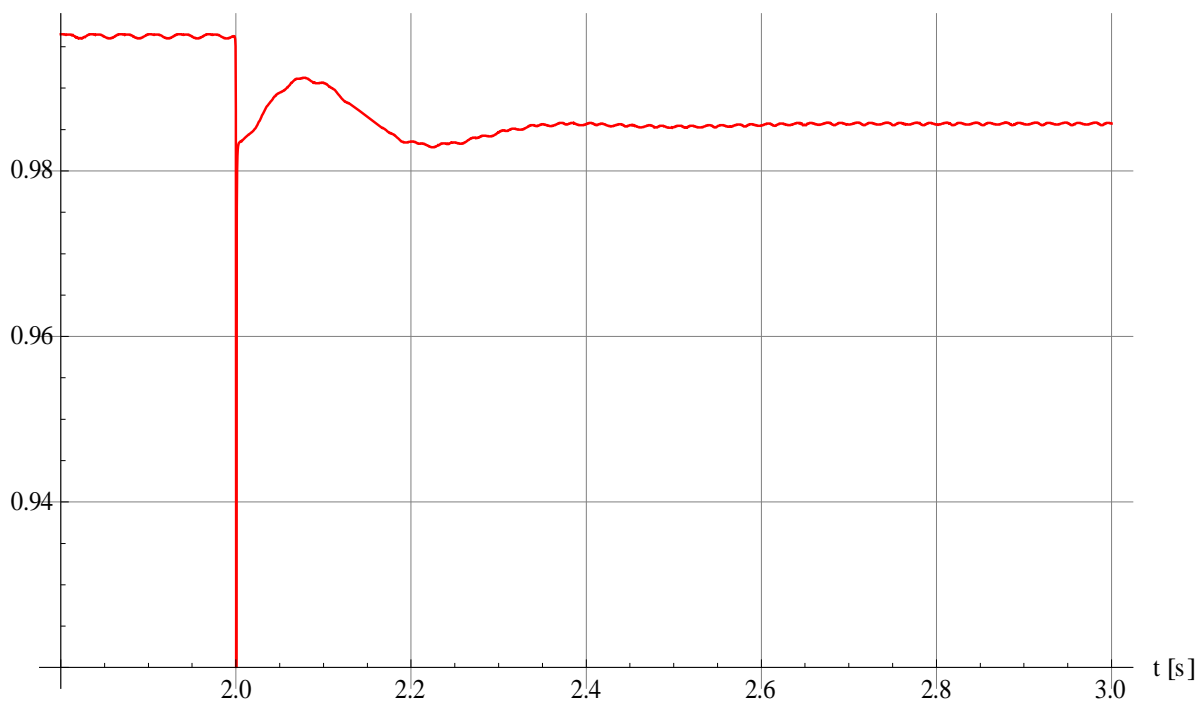


obr. 45 Snímky celkového momentu na hřídeli během regulace

6.1.7 Regulace buzení

Skoková změna zatížení v čase 2s se projevuje i na poklesu napětí a regulaci budícího systému. Pokles napětí je zobrazen na obr. 46.

U_{absG}/U_n [pu]

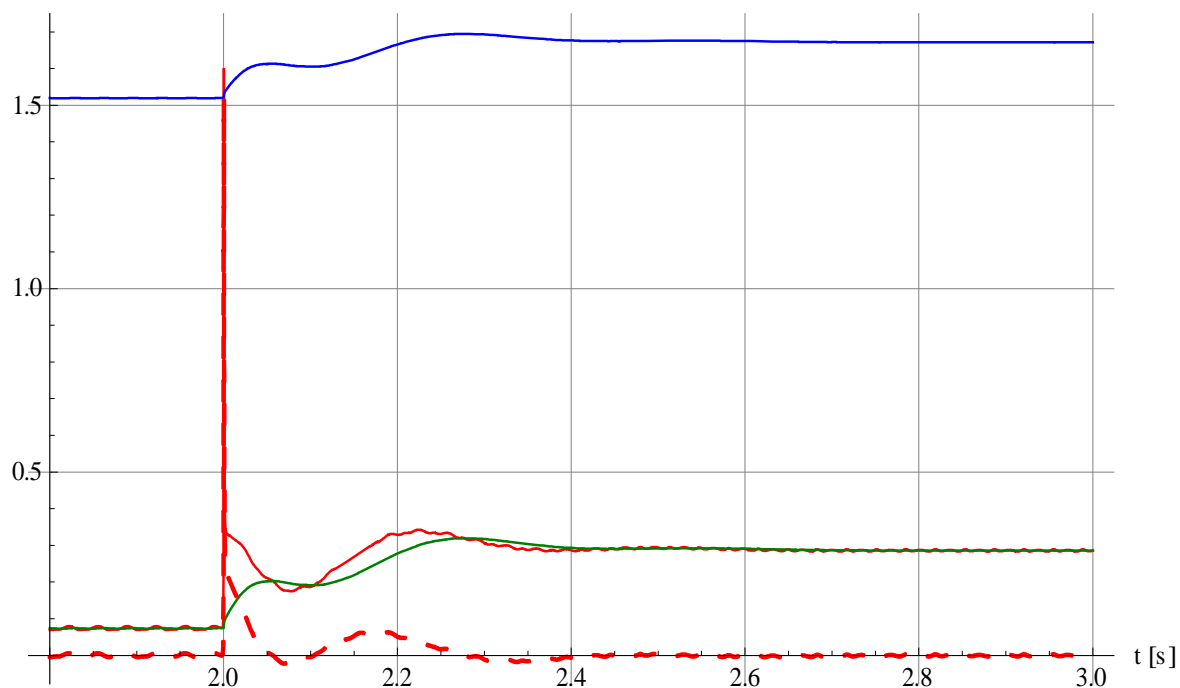


obr. 46 Regulace buzení – svorkové napětí

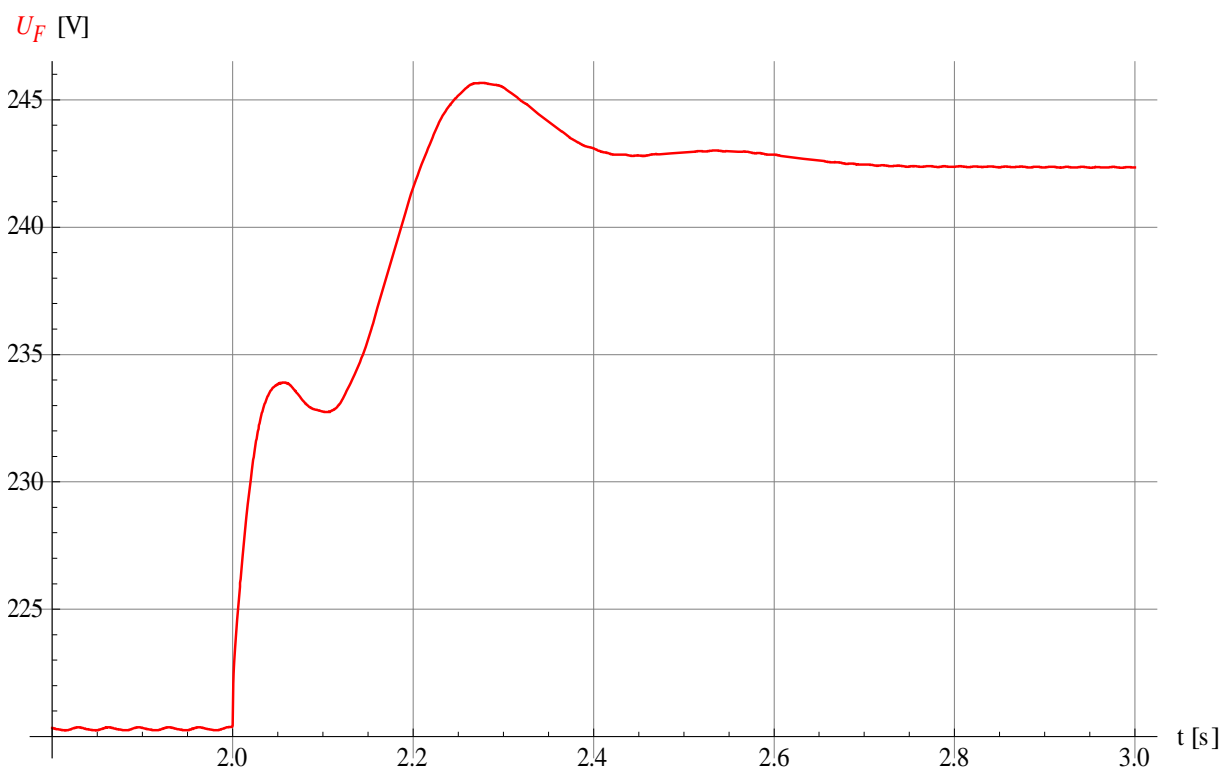
Regulační řetězec buzení je zřejmý z obr. 47. Do regulátoru vstupuje odchylka napětí, je zesílena a vzniká tak signál $\Delta U.K_{buz}$. Zpoždění prvního řádu je na grafu zobrazeno jako RB' . Výstup regulátoru je přiváděn do budicí soupravy. Výstupem je budicí napětí U_F , viz obr. 48

$-\Delta U.K_{buz}, RB,$

$\frac{U_F}{U_{Fn}}, RB'$ [p.u.]



obr. 47 Řetězec regulace buzení



obr. 48 Regulace buzení – budicí napětí

6.2 Parametrizace modelu

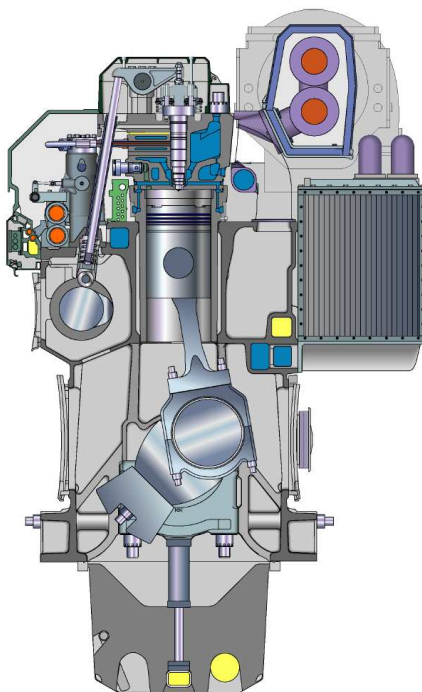
Na tomto místě je vhodné zmínit, jakým způsobem model vzniká. Jedná se o náročný proces, který lze s trochou nadsázky přirovnat k metodě „zadního stehu“. Vždy jsou provedeny dva kroky vpřed a jeden vzad. Nejprve je vytvořena jedna komponenta modelu, vyzkoušena její funkce, parametrizována dle reálných dat a prověřeny odezvy dle praktických zkušeností, případně měření. Po vytvoření a odladění další komponenty jsou tyto dvě spojeny v jeden funkční celek. Opět je vyzkoušena jeho činnost, je zkontrolována, respektive upravena parametrizace a ověřena reálnost výstupů. Tak se postupuje od základních komponent modelu, k větším celkům až po konečný funkční model. V průběhu ladění se upravují i počáteční podmínky a nastavení numerického řešitele.

Z uvedeného vyplývá, že parametrizace modelu, je iterační proces. Parametrizace může přinést i některé nové požadavky na funkci modelu. Jiné součásti se naopak ukážou jako méně důležité, výsledky neovlivňující.

V těchto odstavcích je uvedena pouze výsledná část procesu parametrizace. V tab. 4 jsou přehledně uvedeny vstupní parametry modelu společně s komentářem, který ozřejmí původ a způsob vzniku daného parametru.

Pro vytvoření modelu byly konfrontovány podklady použité při dimenzování DG na JETE. Jedná se o odborné pomoci polského dodavatele DG, firmy ZGODA, viz [ZGD84], [ZGD88] a inženýrské firmy Megadex – [MGX94]. Některé informace z modelování DG a závěry odborných prací byly rovněž publikovány v odborných časopisech – [Frn78] a [Frn89]. Nepostradatelnou pomůckou pro kontrolu parametrů DG byly i Předprovozní bezpečnostní zpráva JETE – [BZ03] a kontrola postupného zatěžování DG na JETE – [EGP99]. Na obou posledně jmenovaných analýzách se doktorand významně podílel.

Druhou větev podkladů tvoří dokumentace společnosti Wärtsilä se sídlem ve Finsku. Tato společnost, mimo jiné, vyrábí moderní dieselgenerátory velkých výkonů, které se podle požadavků zákazníka sestavují z jednoválcových jednotek, viz [W12]. Jako vzor pro naplnění modelu slouží DG s motorem označeným W12V32, viz obr. 49.



obr. 49 Řez jednotkou dieselového motoru typu L32, [W12]

Legenda k tabulce

OP	Označení parametru použité v SW Mathematica.
Popis	Vysvětlení významu a funkce.
Zgoda	Hodnota parametru DG použitého pro nouzové napájení VS na JETE, viz [MGX94], [EGP99] a [BZ03].
Wärtsilä	Hodnota parametru uvedeného v katalogu [W12] pro jednu jednoválcovou jednotku, z které se skládá dieselmotor typu W12V32.
Model	Parametr použitý v sestaveném modelu
MJ	Měrné jednotky, v kterých je parametr uveden. Pomlčka označuje bezrozměrnou veličinu, případně veličinu vztaženou na štítkové parametry stroje.
T	Třída parametru vystihuje, jakým způsobem byl použitý parametr získán
K	Údaj je explicitně uveden v katalogu, či projektové dokumentaci.
F	Údaj pochází z fyzikálních tabulek.
E	Estimace, neboli údaj získaný pomocným výpočtem.
O	Odborný odhad, údaj získaný z praxe a zkušeností.
M	Parametr usnadňující výpočet v SW Mathematica.

OP	Popis	Zgoda	Wärtsilä	Model	MJ	T
	Diesel motor					
	výkon diesel motoru	6 600	6 960	6 600	kW	K
	otáčky	600	750	600	min ⁻¹	K
	Klikový mechanismus					
nvs	počet válců	12	12	12	-	K
Dp	vrtnání, průměr pístu		320	320	mm	K
mp	hmotnost pístu		82	82	kg	K
Lo	délka ojnice		964	964	mm	K
Lat	vzdálenost těžiště ojnice od osy společného čepu ojnice a klikové hřídele			321	mm	E
mo	hmotnost ojnice		153,5	153,5	kg	K
Jot	moment setrvačnosti ojnice v těžišti			7,92	kg.m ²	E
rk	poloměr kliky			200	mm	E
2.rk	zdvih		400	400	m	K
Jk	moment setrvačnosti části klikového hřídele připadající na jeden válec	597	730 až 810	770	kg.m ²	K
Vz	zdvihový objem jednoho válce	60,320	32,200	32,169	dcm ³	E
ek	kompresní poměr (Vk+Vz)/Vk		16	16	-	K
	Vstupy a výstupy médií					
Tw	střední teplota stěn válce			423	K	O
α	střední hodnota součinitele přestupu tepla			500	W.m ⁻² .K ⁻¹	O
Ls	délka sacího potrubí			1 000	mm	O
Ds	průměr sacího potrubí			100	mm	O
ξs	součinitel místního odporu tlakových ztrát v sání			3	-	O
φmso	úhel otevření sacího ventilu			0	°	O
φmsz	úhel zavření sacího ventilu			180	°	O
ts	ekvivalentní doba otvírání sacího ventilu			4	°	M
Lv	délka výfukového potrubí			2 000	mm	O
Dv	průměr sacího potrubí			150	mm	O

OP	Popis	Zgoda	Wärtsilä	Model	MJ	T
ξ_v	součinitel místního odporu tlakových ztrát ve výfuku			5	-	O
φ_{mvo}	úhel otevření výfukového ventilu			540	°	O
φ_{mvz}	úhel zavření výfukového ventilu			720	°	O
t_v	ekvivalentní doba otvírání výfukového ventilu			4	°	M
T_v	teplota výfukových plynů		613	423	K	E
p_v	tlak za výfukovým potrubím			p_0	kPa	O
Predstih	předstih, úhel mezi počátkem vstřiku paliva a horní úvratí pístu			10	°	O
β_{vstr}	maximální úhel, nebo také maximální ekvivalentní doba trvání vstřiku paliva			30	°	O
φ_{mvstro}	úhel počátku vstřiku paliva			360 – Predstih	°	O
φ_{mvstrz}	úhel ukončení vstřiku paliva			$\varphi_{mvstro} + \beta_{vstr}$.Plyn	°	O
Okolní prostředí a konstanty						
p_0	atmosférický tlak	98,2		100	kPa	O
T_0	teplota okolí		298	293	K	O
m_{pk}	měrná plynová konstanta vzduchu	287,15		287,1	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	F
C_V	měrná tepelná kapacita vzduchu			720	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	F
Palivo						
q_n	výhřevnost paliva	42,71		42,71	$MJ \cdot kg^{-1}$	F
k_{stech}	stechiometrický poměr, teoretická spotřeba vzduchu na spálení paliva	14,3		14,3	-	F
λ	součinitel přebytku vzduchu			1,1	-	O
Synchronní generátor						
S_n	jmenovitý zdánlivý výkon SG	7 900	8 350	7 900	kVA	K
P_n	jmenovitý činný výkon SG	6 300	6 680	6 300	kW	K
U_n	jmenovité svorkové napětí SG (sdružená efektivní hodnota)	6 300		6 300	V	K
f_n	jmenovití frekvence	50	50	50	Hz	K
p_p	počet pólpárů			5	-	E
I_{Fn}	budicí proud	280		280	A	K
U_{fn}	budicí napětí	145		145	V	K
J_{sg}	moment setrvačnosti SG			1 000	$kg \cdot m^2$	E
x_d	ustálená reaktance v podélné ose	1,54		1,54	-	K
x_{d1}	přechodová reaktance v podélné ose	0,24		0,24	-	K
x_{d2}	rázová reaktance v podélné ose	0,11		0,11	-	K
x_q	ustálená reaktance v příčné ose	0,76		0,76	-	K
x_{q1}	přechodová reaktance v příčné ose	0,76		0,28	-	E
x_{q2}	rázová reaktance v příčné ose	0,107		0,107	-	K
x_σ	rozptylová reaktance vzduchové mezery			0,050	-	O
r_a, r_b, r_c	Odpor vynutí statoru při 80°C	0.03015 Ω		0,006	-	K
r_F	Odpor vynutí budicího vinutí při 80°C			0,020	-	O
r_D	Odpor rotoru v podélné ose			0,050	-	O
r_Q	Odpor rotoru v příčné ose			0,050	-	O

tab. 4 Parametry modelu

6.3 Demonstrace funkce modelu

Funkce modelu, který je parametrizován dle odstavce 6.2, je demonstrována na výchozím výpočtovém případě. DG je na počátku zatížen 10% svého jmenovitého výkonu. V čase 2 s se připojí čistě odporová zátěž, která představuje nárůst výkonu DG o dalších 30%.

V příloze 6-1 Výchozí výpočtový případ jsou shromážděny grafy průběhů nejdůležitějších veličin, které demonstrují reakci modelu na popsanou poruchovou událost. Tato příloha v úvodu popisuje všechny použité symboly a jednotky. Následuje soubor grafů, jejichž seznam je umístěn rovněž v úvodu přílohy.

V příloze jsou použity známé symboly pro výkony P , Q a S s indexy mechanický, elektrický a zátěže. Nejedná se však o činný, jalový a zdánlivý výkon ve smyslu definice založené na fázorech a úhlech jimi sevřených. Tyto veličiny činný, jalový a zdánlivý výkon jen připomínají. Vždy se jedná o výkony vypočtené z okamžitých hodnot a mající rovněž okamžitou hodnotu. V úvodní tabulce přílohy 6-1 je kromě jejich označení a názvu uveden i způsob jejich výpočtu, respektive jejich definice. Například Q_{SG} není jalový výkon generátoru dle fázorové definice, nýbrž rozdíl výkonu generátoru vypočteného z proudů a napětí a výkonu generátoru vypočteného z proudů a magnetických toků.

Nyní si uvedme několik zajímavých fenoménů, kterých je vhodné si povšimnout:

- Na grafech typu p1 až p6, T1 až T6, ... je možné sledovat vzájemný úhlový posun v pracovním cyklu jednotlivých válců.
- Po přiskočení zátěže se zvyšuje množství přidávaného paliva. Nárůst je vidět na grafech m1 až m6, zvýšeným „zubem“ v blízkosti maxim.
- Zvýšené množství paliva, má za následek zvýšení tlaku a teploty ve válci. Grafy p1 až p6 a T1 až T6.
- Zvýšený tlak ve válcích zvětšuje i rychlost proudění ve výfuku. Grafy cv1 až cv6. Oproti tomu se rychlost sání nemění. Ta závisí hlavně na tlaku vzduchu za turbodmychadlem, viz cs1 až cs6.
- Různé rychlosti výfuku na začátku a na konci děje jsou zřejmé i ze strmosti poklesu hmotností. Viz detailní grafy na počátku a konci simulace m1 až m6.
- Na detailních grafech rychlostí sání se objevuje oscilace. V těchto místech dochází k uzavírání ventilu výfuku a otevírání ventilu sání. Zřejmě by bylo vhodné volit větší „mrtvé“ pásmo mezi těmito akcemi.
- Pokles napětí při skoku zátěže není na svorkových U_a , U_b a U_c příliš znatelný. Pokles můžeme pozorovat až na napětí U_{abs} . Celkový pokles je cca 1.25%
- U_{dG} a U_{qG} naznačuje posun vnitřního zátěžného úhlu SG.
- Připnutím činné zátěže nedošlo k vývinu střední hodnoty proudů generátoru. I_a , I_b a I_c jsou stále symetrické k ose x.
- Pokles frekvence cca o 1.5% při přiskočení zátěže o 30% odpovídá nastavené statické otáčkové regulátoru 5%.
- $M_{mech.stř.}$ je pouze ilustrativní veličina, která má za skutečným efektivním momentem diesel motoru jisté zpoždění odpovídající zadané časové konstantě 0.25 s.

7. KAPITOLA

ZATĚŽOVÁNÍ DG

Následující odstavce ilustrují možnost využití vytvořeného modelu ke kontrole dimenzování DG například pro napájení VS elektrárny. Konkrétní grafické výstupy výpočtů jsou uvedeny v samostatné příloze 7-1 Zatěžování DG.

7.1 Postupné zatěžování DG

V kapitole 4.3 Dimenzování DG, respektive odstavci 4.3.3 Kontrola APS byl vysvětlen způsob dimenzování DG a funkce automatiky postupného spuštění. Jedná se o automatické připínání zátěže podle aktuálního stavu a momentálních požadavků technologie jaderného bloku.

V tomto odstavci byly vytvořeny tři výpočtové případy imitující postupné zatěžování DG. Jedná se o zatěžování ve stupních podle tab. 5 a grafu na obr. 50. Ve výpočtovém případě 7.1.1 byla zátěž čistě odporová. V případě 7.1.2 měla zátěž i indukční charakter, $\cos(\varphi)=0.8$. Během výpočtu se ukázalo, že strop buzení je nastaven příliš nízko. Proto byl změněn z hodnoty 3 na hodnotu 6. To dalo vzniknout případu 7.1.3.

V příloze 7-1 Zatěžování DG můžeme nalézt grafy průběhů jednotlivých veličin. Příloha je v úvodu opatřena seznamem výpočtových případů a tabulkou použitých veličin a jednotek. Je možné si zde všimnout následujících souvislostí.

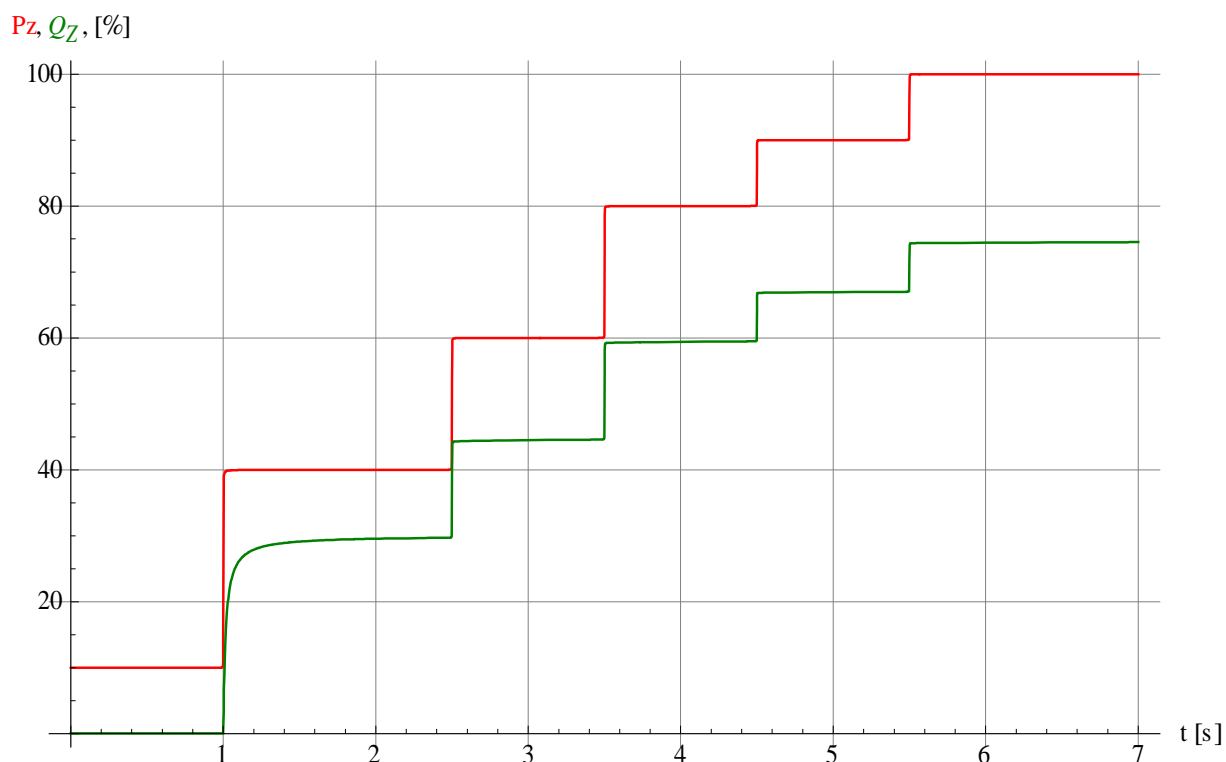
- Pokles napětí na svorkách generátoru můžeme rozdělit na úsek přechodového děje a úsek ustáleného stavu. Ustálený stav svorkového napětí je dán zesílením proporcionálního členu regulátoru buzení a lze ho upravit. Poklesy napětí při zatěžování RL členem jsou podle očekávání větší.
- Jsou zde vyobrazeny proudy generátoru, R větví obvodu a L větví. Je zřejmé, že indukčnost vkládá do obvodu nesymetrii. Proud se nemůže skokem změnit. Podle okamžiku připnutí zátěže se vyvine stejnosměrná složka proudu, která zaniká jen pomalu. Nesymetrie jsou vyrovnávány proudy v rotoru DG. To ve svém důsledku způsobuje i kmitání svorkového výkonu DG.
- Výstupní výkon diesel motoru sleduje požadovaný výkon na svorkách SG s určitým zpožděním. Nerovnováha těchto výkonů, respektive momentů dává vzniknout odchylce frekvence.
- Při zatížení čistě odporovaném, nedojde k ustálení frekvence. Znamená to, že daný DG je na uvedenou zátěž příliš malý. Při zatěžování RL členem, je

v důsledku poklesu napětí odběr zátěží menší a tak DG z hlediska činných výkonů, respektive otáček pokryje nároky zátěže snáze. Naopak pokles napětí a to zejména v případě 7.1.2 je nevyhovující.

Krok [-]	0	1	2	3	4	5
Čas [s]	0	1	2.5	3.5	4.5	5.5
ΔP [%]	10	30	20	20	10	10
P_z [kW]	630	2 520	3 780	5 040	5 670	6 300
Q_z [kVA]	4	1 890	2 835	3 780	4 253	4 725
S_z [kVA]	630	3 150	4 725	6 300	7 088	7 875

Poznámka: Zátěž byla uvažované při $U_n = 6.3$ kV. ΔP je vztažen na $P_n = 6\,300$ kW.

tab. 5 Postupné zatěžování DG – zadání

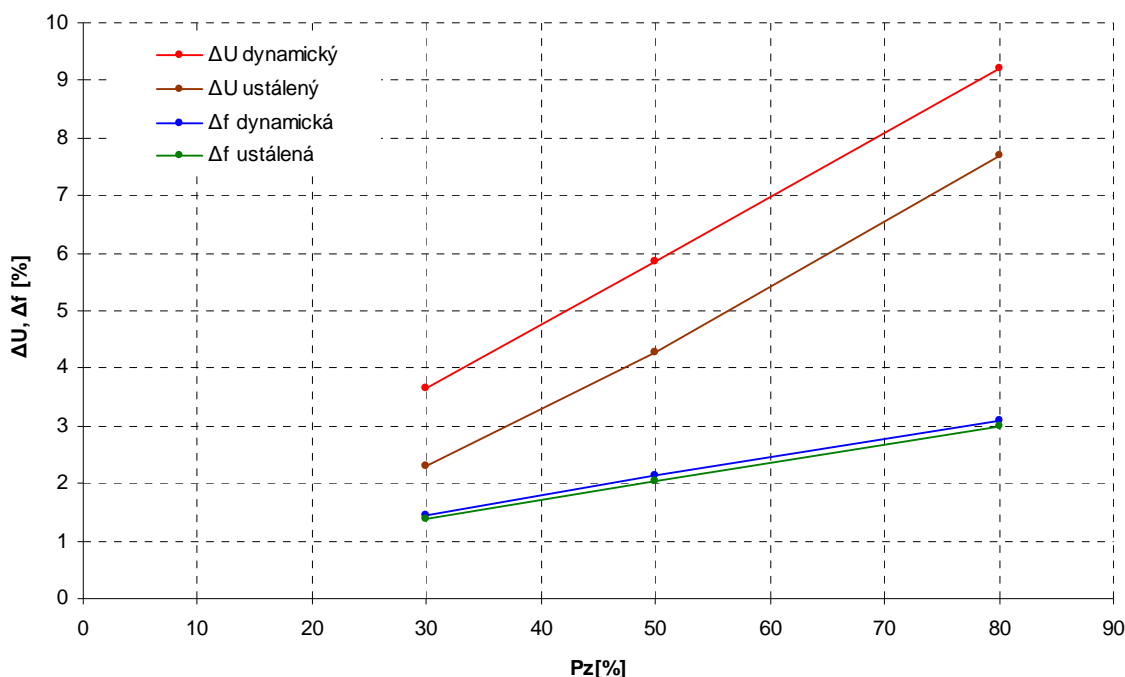


obr. 50 Postupné zatěžování DG – zadání

7.2 Mezní skok zatížení DG

Možným nástrojem pro kontrolu dimenzování DG jsou i jeho zatěžovací křivky. Tímto tématem se zabývaly odstavce 4.3.2 Zatěžovací křivky DG a 4.3.3 Kontrola APS. Zatěžovací křivky jsou uvedeny na obr. 17 Kontrola zatěžování při APS. Křivky obvykle sestavuje výrobce na základě požadavků na maximální dovolený pokles napětí a frekvence při zatěžování.

Zde byla vypočtena série případů, kdy je na DG pracující v základním zatížení 10% připojena zátěž různého výkonu. Sledují se dynamické a ustálené poklesy frekvence napětí. Výsledky simulací jsou uvedeny v příloze 7-1 Zatěžování DG. Souhrnný graf zobrazující pokles frekvence a napětí v závislosti na skokovém zatížení je uveden na obr. 51.



obr. 51 Poklesy napětí a frekvence při skokovém zatížení DG

7.3 Závěr

Ve skutečnosti výrobce sestavuje zatěžovací křivky z mnoha výpočtových případů, kdy varíruje nejen velikost připínané zátěže, ale i předběžné zatížení DG. Projektant pak pracuje s těmito křivkami a zakresluje do grafů různé kombinace zatěžování.

Místo toho je vhodnější, aby projektant pracoval přímo s modelem a mohl se tak podrobněji věnovat konkrétním omezením a to jak na straně zdroje, tak na straně zátěží. Tím je možné dimenzovat DG úsporněji, efektivněji, zkrátka lépe využít jeho limitů.

8. KAPITOLA

ZÁVĚR

V disertační práci byly vyhodnoceny odlišné přístupy k řízení různých elektroenergetických systémů. Práce poskytuje nový nástroj v podobě modelu dieselgenerátoru umožňující další výzkum při aplikaci jejich kombinací.

Obsah a výsledky disertační práce

První část disertační práce se soustřeďuje na oblast abnormálního, respektive nekonvenčního provozu energetických systémů. Zde je ve třech kapitolách podrobně popsán fenomén ostrovního provozu, smart grids a nouzového napájení vlastní spotřeby elektrárny. Jednotlivé odstavce těchto 3 kapitol se věnují definici, důvodům vzniku, popisu jejich funkcí, technickým prostředkům, které tyto funkce zajišťují, provozním zkušenostem a příkladům ze současné praxe.

Ostrovní provoz a požadavky na práci elektrárenských bloků v režimu ostrovní provoz jsou dány Kodexem přenosové soustavy. Definice ostrovního provozu je založena na odchylce frekvence systému. Při přechodu elektrárny do ostrovního režimu je přepnuta regulace výkonu na ostrovní regulaci. Jedná se o proporcionální regulaci otáček. Některé elektrárny používají funkci základního otevření regulačních ventilů, jenž usnadňuje přechod do ostrova.

Smart grids používají inovativní přístup k řízení bilance vyráběné a spotřebované elektrické energie. U těchto sítí s vysokým podílem distribuovaných obnovitelných zdrojů (často s obtížnou predikcí výroby) je použit nejen konvenční způsob regulace na straně výroby, ale je řízena i strana spotřeby.

V kapitole týkající se vlastní spotřeby jaderného bloku je vysvětlen nejen způsob napájení vlastní spotřeby a přechod z normálního a rezervního napájení na nouzové napájení z diesel sekcí, ale především metodika dimenzování DG. Touto metodikou se autor disertační práce podrobně zabýval v rámci své projektantské praxe při dimenzování DG na českých i slovenských jaderných elektrárnách. Metodika je založena na srovnávání skokového zatížení DG při jeho definovaném předběžném zatížení s křivkami mezního zatížení DG. Tento způsob však nedovoluje modelovat detailní fyzikální interakci řetězce diesel motor – synchronní generátor – distribuce – asynchronní motor – zátěž typu ventilátor, čerpadlo, či kompresor a tak dochází k řadě zjednodušení tzv. „na straně bezpečosti“.

Druhá část disertační práce se zabývá samotným modelem DG. První kapitola včetně dvou příloh obsahuje detailní popis a odvození tohoto modelu. Ukazuje postupy a efektivní řešení použité při jeho tvorbě. Model se skládá z diesel motoru, umožňující volbu vstupních parametrů včetně počtu válců. Další součástí modelu je synchronní generátor. Je zde použit model abc s okamžitými hodnotami elektrických veličin. Model umožňuje připojení libovolné zátěže do elektrického obvodu generátoru. DG byl vytvořen v programovém prostředí Mathematica tak, aby umožňoval detailní simulaci elektromechanických přechodových dějů, které nastávají zejména při jeho postupném zatěžování, respektive při různých poruchových událostech. Je formulován způsobem umožňujícím snadnou přenositelnost do jiných simulačních nástrojů.

Druhá kapitola detailně ověřuje funkce jak jednotlivých komponent, tak celého modelu. Zabývá se citlivostní analýzou vybraných vstupních parametrů modelu. Součástí modelu je i precizní parametrizace, dle skutečně vyráběných strojů a ověření funkce parametrizovaného modelu.

Poslední kapitola této části ukazuje možnosti použití modelu při dimenzování, návrhu regulace DG a zpracování případových studií.

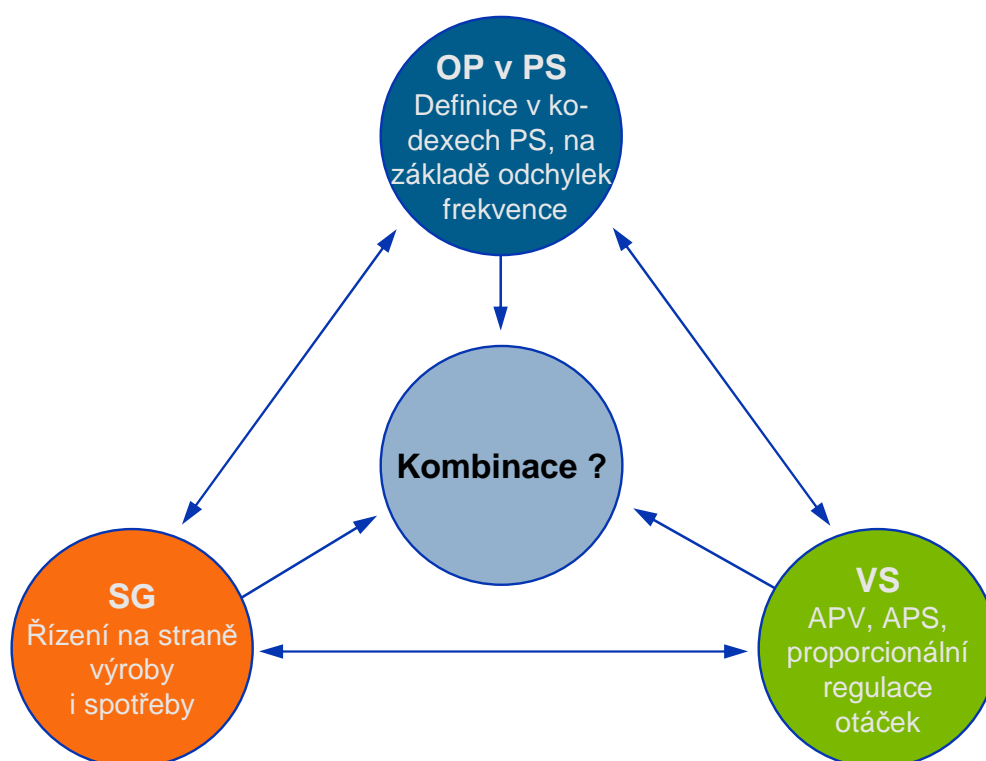
Závěry pro další rozvoj teorie a praxe

Existuje více metod, jak ověřit funkci DG v daném elektroenergetickém systému. Modelování a simulace, například vedle reálného zatěžovacího testu, se s rozvojem výpočetních prostředků stále více jeví jako ekonomičtější, dostatečně přesný a celkově flexibilnější nástroj.

V této práci byl vytvořen model DG se širokými možnostmi použití.

- Model je universální z hlediska volby jeho elektrických i mechanických parametrů.
- Je vhodný pro simulace jak běžných provozních stavů, tak poruch a to i nesymetrických.
Poznámka: Jedná se o nesymetrie v elektrickém smyslu, kdy nastávají různé děje v různých fázích střídavého trojfázového elektrického obvodu, ale také nesymetrie na strojně mechanické části modelu, například porucha na jediném válci.
- Umožňuje zpracovávat citlivostní analýzy pro dimenzování DG, volbu jeho parametrů a návrhu regulačních obvodů. Umožňuje sestavovat kritéria bezpečné oblasti provozování DG z hlediska přetížení a stability. Umožňuje vytváření a nastavování diagnostických systémů.
- Model je přehledně zpracován v otevřeném kódu a umožňuje tak potřebné modifikace při dalším vývoji a simulaci specifických elektromechanických přechodových dějů.

V současné technické praxi pracuje projektant při dimenzování DG se zatěžovacími křivkami daných výrobcem a zakresluje do nich různé kombinace zatěžování. Místo toho je vhodnější, aby projektant pracoval přímo s modelem a mohl se tak podrobněji věnovat konkrétním omezením a to jak na straně zdroje, tak na straně zátěží. Tím je možné dimenzovat DG úsporněji, efektivněji, zkrátka lépe využít jeho limitů.



obr. 52 Kombinace přístupů k řízení výkonové bilance

Klasické přístupy k řízení elektroenergetických systémů jsou různé, ať už se jedná o ostrovní provoz elektrizační soustavy, smart grids, či postupné zatěžování po výpadku pracovních a rezervních zdrojů jaderné elektrárny. Je zřejmé, že v budoucnu, při

- stálém zvyšování nároků na spolehlivost a kvalitu dodávek elektrické energie,
- vzrůstajícím nasazení malých obnovitelných a obtížně předvídatelných zdrojů a
- nárůstem spotřeby elektrické energie

se neobejdeme bez kombinace aplikací všech přístupů řízení. Numerické simulace a příprava modelů jednotlivých komponent systému, má v této oblasti zásadní význam.

LITERATURA

Standardy, legislativa

- [KdxCZ] Pravidla provozování přenosové soustavy – Kodex přenosové soustavy – revize 09; ČEPS a.s.; 01/2009
- [FP] 219/2001 Sb. – Vyhláška Ministerstva průmyslu a obchodu ze dne 14. června 2001 o postupu v případě hrozícího nebo stávajícího stavu nouze v elektroenergetice; (obsahuje: Regulační plán, Vypínací plán, Frekvenční plán); MPO ČR; 06/2001
- [Z18/97] 18/1997 Sb. Zákon ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů
- [V195/99] 195/1999 Sb. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost ze dne 21. srpna 1999 o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti; SÚJB; 08/1999
- [V1/10] Připravovaná vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti; SÚJB; 2010
- [V50/06SK] 50/2006 Zb. – Vyhláška Úradu jadrového dozoru Slovenskej republiky z 12. januára 2006, ktorou sa ustanovujú podrobnosti o požiadavkách na jadrovú bezpečnosť jadrových zariadení pri ich umiestňovaní, projektovaní, výstavbe, uvádzaní do prevádzky, prevádzke, vyradovaní a pri uzatvorení úložiska, ako aj kritériá pre kategorizáciu vybraných zariadení do bezpečnostných tried; ÚJD SR; 01/2006

Odborná literatura

- [Mch08] Bialek J. W., Bumby J. R., Machovski J.; Power system dynamics: stability and control, second edition; ISBN 978-0-470-72558-0; John Wiley & Sons, Ltd; 2008
- [WM9] Wolfram Mathematica 9, Dokumentace k programu

Odborné práce – studie a projekty

- [ZGD84] Ferenc M., Osoba J., Osuch W., Stoklosa H.; Evaluation of the dynamic response of medium speed Diesel engine in generator set applied as stand-by power source for nuclear power plants; ZGODA WORKS, Swietochlowice; 1984
- [ZGD88] Ferenc M., Fiutkowski M.; Modele matematyczne regulatorow predkosci obrotowej stosowane w analizie dynamiki 4-suwowych srednioobrotowych silnikow wysokopreznych; ZUT ZGODA – Swietochlowice; 1988
- [MGX94] Calculations of boundary loads curves of 6.3 MW generator-set for NPP Temelin; Megadex SA - Warsaw; 1994
- [EGP97] Antoš P.; JE Mochovce 2. stavba, Dodatek ÚP Z559E,M Úpravy logického diagramu náběhu dieselgenerátoru – BO EL01, Společná

- dokumentace elektrotechnické části dÚP č. 15; EGP 4302-6-980412; ENERGOPROJEKT PRAHA a.s.; 09/1997
- [EGP99] Kabelák J., kolektiv; JE Temelín IV. B stavba 1. a 2. blok, dÚP č.423 – aktualizace, Korekce postupného zatěžování DG systémů zajištěného napájení 1,2,3,5, Společná dokumentace elektrotechnické části – dodatek 20, 002 Technická zpráva, 061 Kontrola zatěžování DG 1., 2., a 3. SZN; EGP 4302-9-990222; ENERGOPROJEKT PRAHA a.s.; 12/1999
- [LU00] Mats Larsson; Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems; Lund University; 2000
- [EDU01] Provozní předpis P203p-206-00, Budící souprava generátoru 259 MVA; ČEZ-EDU; 01/2001
- [EGP01] Anděl J., Kabelák J., kolektiv; Jaderná elektrárna Temelín – Bezpečnostní zpráva pro veřejnost – kapitola 3.2.5 Elektrotechnická část; EGP4910-T-001400; ENERGOPROJEKT PRAHA a.s.; 01/2001
- [EGP02] Ing. Petr Široký; JE Dukovany, Inovace budících soustav TG 220MW; ENERGOPROJEKT PRAHA a.s.; 04/2002
- [TNL02] Technický manuál, Mikroprocesorový regulátor buzení TE – 5301 s IGBT regulačním stupněm TE – 6201; TENEL ČR s.r.o.; 05/ 2002
- [BZ03] Předprovozní bezpečnostní zpráva pro 2. blok ETE, díl 8 – Elektrické systémy, revize 1; EGP4910-T-000601; ÚJV Řež a.s.; 12/2003
- [UJV05] Antoš P., Dědeček T., Kabelák J., Urbánek T.; PPC Vřesová – doplnění funkce ostrovní provoz, Návrh ostrovního regulátoru a výpočtové analýzy; EGP5030-T-009205; ÚJV Řež a.s.; 09/2005
- [UJE07] Vacek A.; Náhrada olejové regulace TG – EDU – Technické zadání; ev.č. 5413; ČEZ-UJE; 03/2007
- [UJV08] Anděl J., Antoš P., Beránek J., Fajgl P., Kabelák J., Svoboda T.; JE Mochovce – 3. a 4. blok, WP 04.1 – Revize a dopracování Úvodního projektu pro MO34, C – Technologická část, Společná dokumentace elektrotechnické části; EGP 5032-F-070367; ÚJV Řež a.s.; 12/2008
- [UJV09] Anděl J., Kabelák J., Křenková N., Šípková K., Vozábal M.; Projekt MPO – Tandem, Bezpečnostní aspekty pokročilých jaderných reaktorů, Způsob a podmínky zapojení do elektrické sítě; UJV Z 2649 T; ÚJV Řež a.s.; 01/2009
- [UJV10] Antoš P., Kabelák J.; Mochovce Power Plant, Completion of Unit 3 and 4, Calculation Report – Emergency diesel generator sizing; PNM3413017701, EGP 5032-F-090506; ÚJV Řež a.s.; 02/2010
- [Brs08] Brašnička V.; Zászkové zdroje – modelování dieselového motorgenerátoru – Diplomová práce; 2008

Konference a publikace v odborných časopisech

- [Frn78] Ferenc M.; Problemy matematycznego modelowania silnikow wysokopreznych z doladowaniem; Energetyka z. 66, Nr kol. 562; 1978
- [Frn89] Ferenc M., Osuch W., Stoklosa H.; Uproszczony model amtematyczny dynamiki srednioobrotowego silnika wysokopreznego; Silniki spalinowe NR 4/1989; 1989

- [Kbl02] Kabelák J.; Dynamická simulace jako podpora zkoušek ETE; Konference: Modelování a dynamické výpočty ES – Dynamika distribučních soustav – Cyklus E2002; EGÚ Praha Engineering; 04/2002
- [Kbl05] Anděl J., Kabelák J.; Ostrovní provoz elektrárny Vřesová; Konference: Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy – Poděbrady 2005; EGÚ Praha Engineering; 11/2005
- [Thn05] Thöendel E.; Simulační model klikové hřídele kogenerační jednotky; International conference on Technical Computing Prague 2005 – Humusoft s.r.o.; ISBN 80-7080-577-3; 11/2005
- [Jrk05] Jirků S., Kočárník P.; Simulační model spalovacího motoru. Mezinárodní XLVI konference kateder částí a mechanismů strojů, Liberec, Technická univerzita; 09/2005
- [ETP06] European Technology Platform – Smart Grids; Vision and strategy for Europe's Electricity Networks of the Future; ISBN 92-79-01414-5; European Commission; 2006
- [ETP08] European Technology Platform – Smart Grids; Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the Future; 09/2008
- [KrS09] Kaare S. R.; A real case of self healing distribution network; CIRED 20th International Conference on Electricity Distribution – Prague 8-11 June 2009; DONG Energy Denmark; 09/2009
- [Ptr09] Petrák K., Lisý P.; Smart Grids; Konference ČK CIRED 2009 – Tábor 10. a 11. 11. 2009; Český komitét CIRED; 11/2009
- [Zhr09] Zahrádka M.; AMIS – Řešení Siemens pro smart metering; Konference ČK CIRED 2009 – Tábor 10. a 11. 11. 2009; Český komitét CIRED; 11/2009
- [Švr09] Švrček M., Hrabětová J., Kaisr T.; Budoucnost má jméno smart grids; A.T. Kearney; 01/2009
- [Kbl10a] Kabelák J.; Rotary pressure reduction in power systems; Conference Poster 2010; Czech Technical University; 05/2010
- [Kbl10b] Anděl, J., Kabelák, J., Vozábal, M., Zborník, J.; Technical concept of NPP Mochovce 3, 4 in the Basic Design level – Defence in depth; 9th International Conference Control of Power Systems 2010; Slovak University of Technology in Bratislava; 05/2010
- [Kbl10c] Anděl, J., Kabelák, J., Vozábal, M., Zborník, J.; Technical concept of NPP Mochovce 3, 4 in the Basic Design level – Electrical Emergency Power Supply Systems; 9th International Conference Control of Power Systems 2010; Slovak University of Technology in Bratislava; 05/2010
- [Rbl10] Roubal J.; Fenomén Smart Grid; ABB; 06/2010
- [ABB10] Úvod do problematiky inteligentních sítí; ABB; 06/2010
- [Tsp10] Tselepis S.; Field tests on actual microgrids – Highlight results from the case of Gaidouromantrasite, KythnosIsland; Microgrids - Novel Architectures for Future Power Systems – Paris, France, 29 January 2010; CRES; 01/2010

- [Bch10] Buchholz B., Pickhan R., Khattabi M., Drenkard S., Dietschmann H.; Microgrid in Mannheim – Field test on transfer between interconnected and islanding mode in Mannheim; Microgrids - Novel Architectures for Future Power Systems – Paris, France, 29 January 2010; MVV Energie; 01/2010
- [Nls10] Eli Nielsen J.; Field tests on actual microgrids – Highlight results from the case of Bornholm island; Microgrids - Novel Architectures for Future Power Systems – Paris, France, 29 January 2010; Elektro DTU; 01/2010
- [Kbl12a] Kabelák J., Zborník J.; Ostrovní provozy PS, SG a VS jaderného bloku, model dieselgenerátoru jako nouzového zdroje; 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012; VSB - Technical University of Ostrava and Brno University of Technology; 05/2012
- [Kbl12b] Kabelák J.; Model dieselgenerátoru jako nouzového zdroje pro SG a VS elektráren; Konference: Simulace a dynamické modelování procesů a systémů v energetice – Cyklus E2012; EGÚ Praha Engineering; 10/2002
- [Kbl14] Kabelák J., Zborník J.; Dynamic Model of Diesel Generator as Emergency Source for Smart Grids and Power Plant Auxiliaries, Ref. No.: EPSR-D-13-00380; Electric Power Systems Research; (in an approval process) 2014

Firemní katalogy

- [W12] Wärtsilä 32 - Product Guide; WÄRTSILÄ Finland OY; 04/2012

SEZNAM ZKRATEK

AC	Střídavý proud / napětí (Alternative Current)
ADG	Automatika dieselgenerátoru
AMM	Smart Metering – inteligentní měření (Automatic Meter Management)
APS	Automatika postupného spouštění
APV	Automatika podpěťového vypínání
ARN	Automatický regulátor napětí
ASRU	Automatická sekundární regulace napětí
ASV	Automatika selhání vypínače
AVV	Automatika vypnutí vypínače
AZR	Automatický záskok rezervy
BO	Základní otevření regulačních ventilů (Basic Opening)
BS	Bezpečnostní systémy (z hlediska jaderné bezpečnosti)
CAB	Centrální automatika bloku
ČR	Česká republika
DC	Stejnoseměrný proud / napětí (Direct Current)
DG	Dieselgenerátor
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
ESFAS	Systém pro spouštění bezpečnostních prostředků (Engineered Safety Features Actuation System)
FACTS	Pružné střídavé přenosové systémy (Flexible AC Transmission Systems)
FO	Frekvenční odlehčování
GT	Spalovací turbína (Gas Turbine)
GV	Generátorový vypínač
HAZR	Hromadný automatický záskok rezervy
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HVDC	Vysokonapěťový stejnosměrný přenos (High Voltage DC)
HW	Hardware
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency)
JE	Jaderná elektrárna
JEDU	Jaderná elektrárna Dukovany
JEMO	Jaderná elektrárna Mochovce
JETE	Jaderná elektrárna Temelín
LOP	Ztráta pracovního a rezervního napájení (Lost of Power)

LOPM	Paměť ztráty napájení (Lost of Power Memory)
MJ	Měrné jednotky
nn	Nízké napětí 50 V až 1000 V
NT	Nízkotlaký
OP	Ostrovní provoz (Jedná se o jev v ES. Ostrovní režim je stav regulace neboli reakce technologie na jev OP)
PI	Proporcionálně integrační
PPC	Paroplynový cyklus
PS	Přenosová soustava
PSK	Přepouštěcí stanice do kondenzátoru
PV	Podpěťové vypínání
RBT	Automatika zpětného skoku (Automatic Bus Transfer)
REAZN	Režimové automatiky zajištěného napájení
RNVS	Rezervní napájení vlastní spotřeby
ROP	Regulátor ostrovního provozu
RV	Regulační ventily
SACSe	Přepínací zařízení umožňující sekcionování a záskok (Sectionalizing And Changeover System enhanced)
SG	Smart Grid (elektrické sítě s vlastní inteligencí)
SKŘ	Systém kontroly a řízení
SNB	Nedůležité systémy z hlediska jaderné bezpečnosti
SR	Slovenská republika
SRUQ	Sekundární regulace U/Q
SSB	Systémy související s jadernou bezpečností
ST	Parní turbína (Steam Turbine)
SW	Software
SZN	Systém zajištěného napájení
TCS	Řídicí systém turbíny (Turbine Control System)
TG	Turbogenerátor
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
UPS	Zdroj nepřerušeno napájení (Uninterruptible Power Supply)
vn	Vysoké napětí 1 kV až 52 kV
VS	Vlastní spotřeba elektrárenského bloku
VT	Vysokotlaký
vvn	Velmi vysoké napětí 52 kV až 300 kV
zvn	Zvláště vysoké napětí 300 kV až 800 kV

PŘÍLOHY

Přílohy ke kapitole 5 Tvorba modelu

5-1 Základní fyzikální vztahy modelu – notebook Mathematica

5-2 Funkční model DG – notebook Mathematica

Příloha ke kapitole 6 Ověření funkce modelu

6-1 Výchozí výpočtový případ – výsledky simulace

Příloha ke kapitole 7 Kontrola dimenzování DG

7-1 Zatěžování DG – výsledky simulací

PŘÍLOHA 5-1

Základní fyzikální vztahy modelu notebook Mathematica

1 Základní fyzikální vztahy modelu

1.1 Klikový mechanismus

1.1.1 Poloha pístu x jako funkce natočení kliky: $x [fi]$

Použité veličiny

Odvození - geometrie trojúhelníků ACD, ABD

Definice funkce

Kontrolní graf

1.1.2 Objem 1. válce V jako funkce natočení kliky: $V1fi [fi]$

Použité veličiny

Definice funkce

Kontrolní graf

1.1.3 Objem válců V jako funkce natočení kliky: $Vfi [fi] [[valec]]$

Použité veličiny

Definice funkce

Kontrolní graf

1.1.4 Teplosměnná plocha válců A jako funkce natočení kliky: $Afi [fi] [[valec]]$

Použité veličiny

Odvození teplosměnných ploch A_k (kompresní část hlavy válce) včetně ploch podstav

Definice A_k

Odvození teplosměnné plochy A_z (maximální plocha pláště zdvihového objemu, při maximálním vytažení pístu)

Definice A_z

Definice funkce $Afi [fi] [[valec]]$

Kontrolní graf

1.1.5 Redukovaný moment setrvačnosti kliky: $Iredklika [fi]$

Použité veličiny

Odvození

Definice funkce

1.1.6 Redukovaný moment setrvačnosti pístu: $Iredpist [fi]$

Použité veličiny

Odvození

Definice funkce

1.1.7 Redukovaný moment setrvačnosti ojnice: $Iredojnice [fi]$

Použité veličiny

Rovnice pro ωt
 Rovnice pro ct
 Rovnice pro kinetickou energii
 Definice funkce
 Kontrolní graf

1.1.8 Pohybová rovnice dieselového motoru

Celkový redukovaný moment setrvačnosti
 Celkový moment dieselového motoru
 Protimoment zátěže
 Pohybová rovnice

1.2 Funkce otvírání a zavírání ventilů - sání, výfuk, vstřík

1.2.1 Definice opakovací funkce jednoho oběhu: $\psi_i [f_i]$, $f_i \in (-4\pi, \infty)$, $\psi_i \in (0, 4\pi)$

Použité veličiny
 Definice funkce
 Kontrolní graf

1.2.2 Princip vytvoření obdelníkové funkce pomocí tangens hyperbolický

Tangens hyperbolický - ukázka
 Otvírání a zavírání ventilů, sestavených z 2 tangens hyperbolických - ukázka

1.2.3 Zperiodičnění funkce otvírání a zavírání jednoho ventilu pomocí vytvoření dvou-periodické funkce (méně vhodný způsob)

Úvodní poznámka:
 Otvírání a zavírání ventilu, sestavených z 2 tangens hyperbolických, 2 periody - ukázka
 Zperiodičnění předchozí 2 periodické funkce - ukázka

1.2.4 Zperiodičnění funkce otvírání a zavírání jednoho ventilu pomocí centrování (vhodnější způsob): ventil1period [f_i , φ_1 , φ_2 , tau]

Úvodní poznámka:
 Použité veličiny
 Definice obdelníkové funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1[psi; parametry: φ_1 , φ_2 , tau]
 Definice centované funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1centr[psi; parametry: φ_1 , φ_2 , tau]
 Kontrolní graf
 Definice centované periodické funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1centrperiod[f_i; parametry: φ_1 , φ_2 , tau]
 Definice periodické funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1period[f_i; parametry: φ_1 , φ_2 , tau]
 Kontrolní graf

1.2.5 Vytvoření funkcí otvírání a zavírání pro všechny válce a pro všechny ventily - sání, výfuk, vstřík: fceVentilu [f_i] [[ventil, valec]]

Použité veličiny
 Definice funkce

1.3 Termodynamika dieselového motoru

1.3.1 Hmotnost vzduchu v jednotlivých válcích v čase $t=0$: m_0 [[valec]]

Použité veličiny

Odvození

Definice - výsledný vzorec

Kontrolní numerický výpočet a graf (bezrozměrný)

1.3.2 Hmotnostní toky: $m'[t]$, $ms'[t]$, $mv'[t]$, $mp'[t]$

Odvození

Definice rovnic celkové bilance hmotnostního toku

Rekapitulace rovnic hmotnostních toků

1.3.3 Rychlosti proudění: $cs'[t]$, $cv'[t]$

Odvození

Definice respektive rekapitulace rovnic rychlostí proudění

1.3.4 Termodynamika

Odvození

Definice rovnice pro $T[t]$ r00

Rovnice pro teploty $\Delta T_m[t]$ r10

Rovnice teplených toků r20

Celková definice

1.3.5 Stavová rovnice plynu: $p[t]$

1 Základní fyzikální vztahy modelu

1.1 Klikový mechanismus

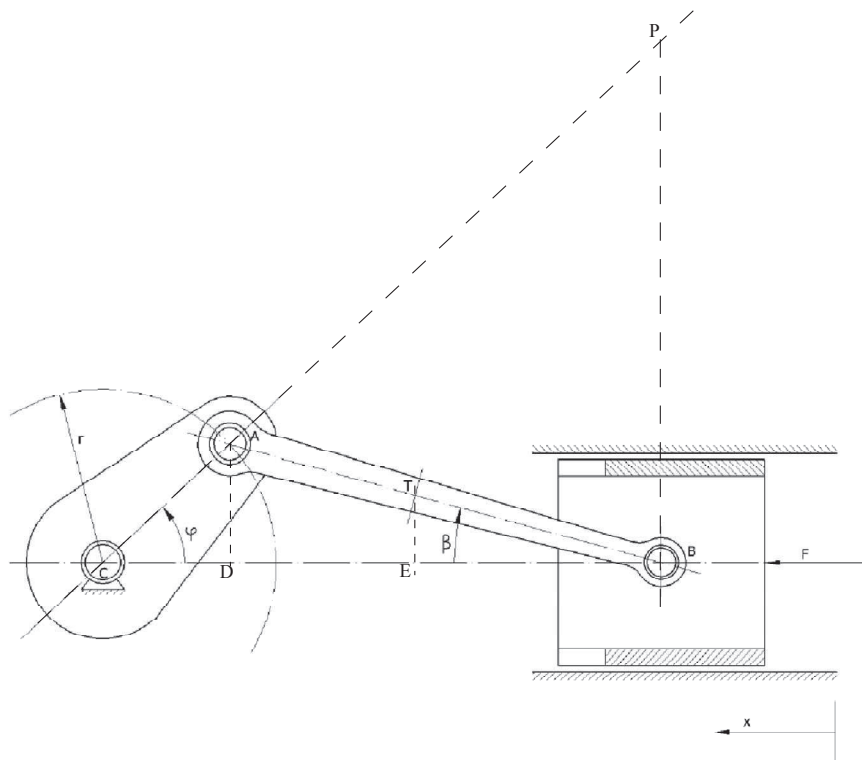


Figure 1.1. Klikový mechanismus - [Thn05]

1.1.1 Poloha pístu x jako funkce natočení kliky: $x [f_i]$

Použité veličiny

$x [f_i]$... poloha pístu, hledaná funkce

f_i ... úhel natočení kliky

L ... délka ojnice, tj. AB

r ... poloměr kliky, tj. AC

Odvození - geometrie trojúhelníků ACD , ABD

```

Clear[ r, L, fi, CD, DB, AD, Vysledek]
Vysledek = Solve[{ x == r + L - CD - DB,
                  CD
                  / r == Cos[fi] ,
                  AD
                  / r == Sin[fi] ,
                  AD2 + DB2 == L2}, x, {CD, AD, DB}]

{{x -> L + r - r Cos[fi] - Sqrt[L2 - r2 Sin[fi]2], {x -> L + r - r Cos[fi] + Sqrt[L2 - r2 Sin[fi]2]}

```

Pouze první řešení má reálný význam

Definice funkce

```

x[fi_] := Evaluate[x /. Vysledek[[1]]]
Definition[x]
Clear[ Vysledek]

```

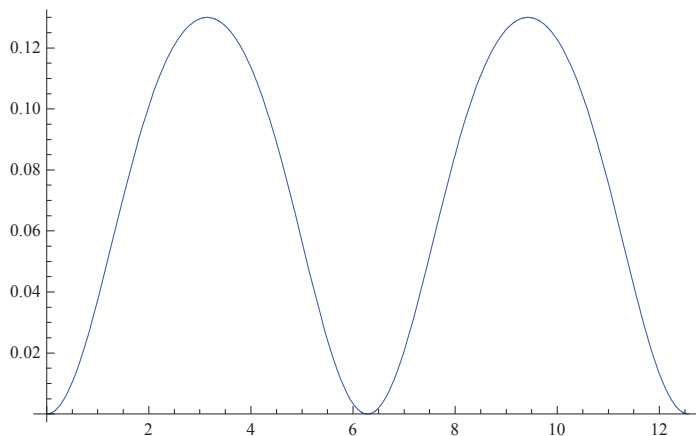
```
x[fi_] := L + r - r Cos[fi] - Sqrt[L2 - r2 Sin[fi]2]
```

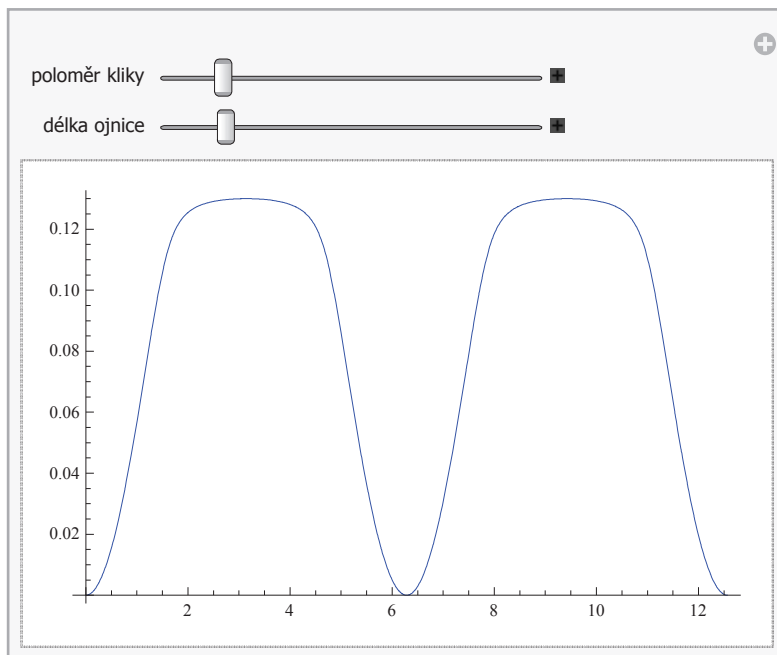
Kontrolní graf

```

r = 0.065 (* m polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
L = 0.2; (* m delka ojnice*)
Plot[Tooltip[x[fi], "x [fi] - poloha pístu"], {fi, 0, 4 Pi}, PlotStyle -> Blue]
Manipulate[
  Plot[Tooltip[L + r - r Cos[fi] - Sqrt[L2 - r2 Sin[fi]2], "x [fi] - vliv geometrie"],
    {fi, 0, 4 Pi}, PlotStyle -> Blue],
  {{r, 0.065, "poloměr kliky"}, 0.0, 0.500}, {{L, 0.2, "délka ojnice"}, 0.0, 0.5}]
Clear[ r, L]

```





1.1.2 Objem 1. válce V jako funkce natočení kliky: $V1fi [fi]$

Použité veličiny

$V1fi [fi]$...objem 1. válce, hledaná funkce

fi ... úhel natočení kliky

Vz ... maximální zdvihový objem jednoho válce motoru, amplituda okamžitého objemu V

Vk ... kompresní objem jednoho válce motoru

L ... délka ojnice, tj. AB

r ... poloměr kliky, tj. AC

$x [fi]$... poloha pístu

Definice funkce

```
Clear[ Vk, Vz, r, L, fi]
```

```
V1fi [fi_] := Evaluate [Vk + Vz *  $\frac{x [fi]}{2 r}$ ]
```

```
Definition [V1fi]
```

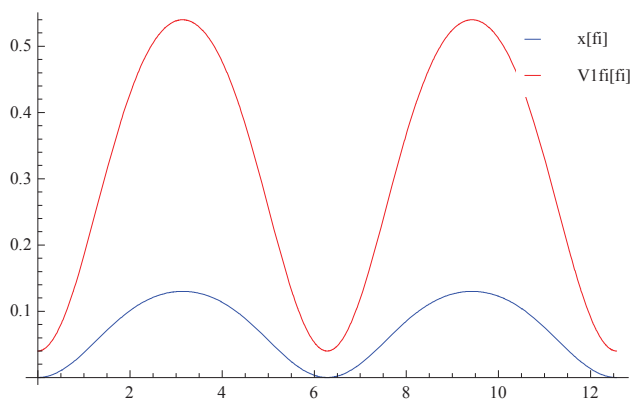
$$V1fi [fi_] := Vk + \frac{Vz \left(L+r-r \cos [fi] - \sqrt{L^2-r^2 \sin [fi]^2} \right)}{2 r}$$

Kontrolní graf

```

r = 0.065 (* m polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
L = 0.2; (* m delka ojnice*)
Vz = 500 * 10-6; (* m3 zdvihovy objem *)
Vkrel = 8; (* % relativní kompresní objem*)
Vk = Vz * Vkrel / 100; (*m3 kompresni pomer *)
Needs["PlotLegends`"]
Plot[{Tooltip[x[fi], "x[fi] - poloha pístu"],
      Tooltip[Vlfi[fi] * 1000, "Vlfi[fi] - objem válce v litrech"]},
     {fi, 0, 4 Pi}, PlotStyle -> {Blue, Red}, PlotLegend -> {"x[fi]", "Vlfi[fi]"},
     LegendPosition -> {0.6, 0.35}, LegendShadow -> {0, 0},
     LegendBorder -> None, LegendSize -> {0.5, 0.25}]
Clear[Vk, Vkrel, Vz, r, L, fi]

```



1.1.3 Objem válců V jako funkce natočení kliky: Vfi [fi] [[valec]]

Použité veličiny

V1fi [fi]...objem 1. válce

Vfi [fi] [[valec]]...objem válců

fi0[[valec]] ... úhel natočení kliky v čase t=0 pro daný válec, vzájemné pootočení válců

fi ... úhel natočení kliky

Definice funkce

[zde je již nutno zadat nv - počet válců]

```
Clear[Vk, Vz, r, L, fi, fi0]
```

```
nv = 4;
```

```
fi0 = Table[fi, {fi, 0, 4 Pi -  $\frac{4 \text{ Pi}}{\text{nv}}$ ,  $\frac{4 \text{ Pi}}{\text{nv}}$ }]
```

```
{0,  $\pi$ , 2  $\pi$ , 3  $\pi$ }
```

```
Vfi[fi_] := Vlfi[fi - fi0]
```

```
Definition[Vfi]
```

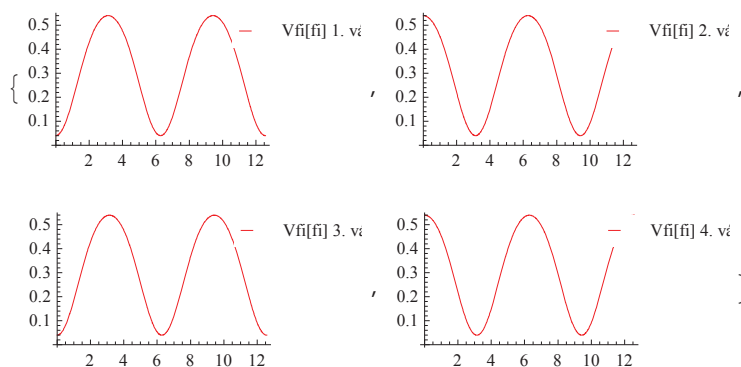
```
Vfi[fi_] := Vlfi[fi - fi0]
```

Kontrolní graf

```

r = 0.065 (* m polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
L = 0.2; (* m delka ojnice*)
Vz = 500 * 10-6; (* m3 zdvihovy objem *)
Vkrel = 8; (* % relativní kompresní objem*)
Vk = Vz * Vkrel / 100; (*m3 kompresni pomer *)
Table[Plot[Tooltip[Vfi[fi][[i]] * 1000,
  StringForm["Vfi[fi] - objem ``. válce v litrech.", i]], {fi, 0, 4 Pi},
  PlotStyle -> {Red}, PlotLegend -> StringForm["Vfi[fi] ``. válce", i],
  LegendPosition -> {0.6, 0.35}, LegendShadow -> {0, 0},
  LegendBorder -> None, LegendSize -> {1.0, 0.25}], {i, 1, nv}]
Clear[Vk, Vkrel, Vz, r, L, fi]

```



1.1.4 Teplosměnná plocha válců A jako funkce natočení kliky: Afi [fi] [[válec]]

Použité veličiny

fi0[[válec]] ... úhel natočení kliky v čase t=0 pro daný válec, vzájemné pootočení válců

fi ... úhel natočení kliky

Odvození teplosměnných ploch Ak (kompresní část hlavy válce) včetně ploch podstav

```

Clear[obvodP, viskaK, polomerP, Ap, Vz, Vk, r, Vysledek, Ak]
Vysledek = Simplify[Solve[{Ak == obvodP * viskaK + 2 Ap,
  obvodP == 2 * Pi * polomerP,
  Ap == Pi * polomerP2,
  Ap ==  $\frac{Vz}{2 r}$ ,
  Vk == Ap * viskaK}], Ak, {obvodP, viskaK, polomerP, Ap}]]

```

$$\left\{ \left\{ Ak \rightarrow -\frac{2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r} V_k}{\sqrt{V_z}} + \frac{V_z}{r} \right\}, \left\{ Ak \rightarrow \frac{2 \sqrt{2 \pi} r^{3/2} V_k + V_z}{\sqrt{V_z} r} \right\} \right\}$$

Pouze druhé řešení má reálný význam

Definice Ak

```
Ak = Evaluate[Ak /. Vysledek[[2]]];
```

```
Definition[Ak]
```

```
Clear[Vysledek]
```

$$Ak = -\frac{2 \sqrt{2 \pi} r^{3/2} V_k + V_z}{\sqrt{V_z} r}$$

Odvození teplosměnné plochy Az (maximální plocha pláště zdvihového objemu, při maximálním vytažení pístu)


```

Clear[obvodP, polomerP, Ap, Vz, r, Vysledek, Az]
Vysledek = Simplify[Solve[{Az == obvodP * 2 r,
    obvodP == 2 * Pi * polomerP,
    Ap == Pi * polomerP^2,
    Ap ==  $\frac{Vz}{2 r}$ }, Az, {obvodP, polomerP, Ap}]]

```

$$\{\{Az \rightarrow -2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r} \sqrt{Vz}\}, \{Az \rightarrow 2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r} \sqrt{Vz}\}\}$$

Pouze druhé řešení má reálný význam

Definice Az

```

Az = Evaluate[Az /. Vysledek[[2]]];
Definition[Az]
Clear[Vysledek]

```

$$Az = 2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r} \sqrt{Vz}$$

Definice funkce Afi [fi] [[valec]]

```

Clear[Ak, Az, r, L, fi, fi0]
Afi[fi_] := Evaluate[Ak + Az *  $\frac{x[fi - fi0]}{2 r}$ ]
Definition[Afi]

```

$$Afi[fi_] := Ak + \frac{Az \left(L + r - r \cos[fi - fi0] - \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[fi - fi0]} \right)}{2 r}$$

Kontrolní graf

```

r = 0.065 (* m polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
L = 0.2; (* m delka ojnice*)
Vz = 500 * 10^-6; (* m^3 zdvihovy objem *)
Vkrel = 8; (* % relativní kompresní objem*)
Vk = Vz * Vkrel / 100; (*m^3 kompresni pomer *)
nv = 4;

```

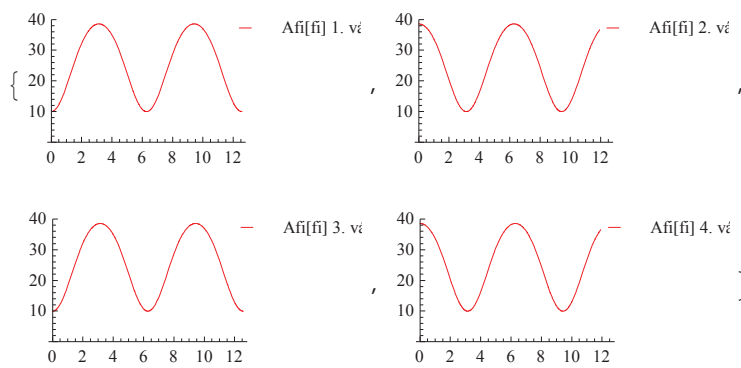
$$Ak = \frac{2 \sqrt{2 \pi} r^{3/2} Vk + Vz}{r};$$

$$Az = 2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r} \sqrt{Vz};$$

```

fi0 = Table[fi, {fi, 0, 4 Pi -  $\frac{4 Pi}{nv}$ ,  $\frac{4 Pi}{nv}$ ]];
Table[
  Plot[Tooltip[Afi[fi][[i]] * 1000, StringForm["Afi[fi] - povrch ``. válce.", i]],
    {fi, 0, 4 Pi}, PlotStyle -> Red, PlotRange -> {0, 40},
    PlotLegend -> StringForm["Afi[fi] ``. válce", i], LegendPosition -> {0.6, 0.35},
    LegendShadow -> {0, 0}, LegendBorder -> None, LegendSize -> {1.0, 0.25}], {i, 1, nv}]
Clear[Vk, Vkrel, Vz, r, L, fi]

```



1.1.5 Redukovaný moment setrvačnosti kliky: Iredklika [fi]

Použité veličiny

Iredklika[fi] ... redukovaný moment setrvačnosti kliky, hledaná funkce

fi ... úhel natočení kliky

$\varphi'[t]$... úhlová rychlost kliky (proměnná s časem)

Ekklika ... kinetická energie kliky

Ik ... moment setrvačnosti kliky

Odvození

Klika vykonává rotační pohyb, pro její kinetickou energii platí

$$E_{\text{kklika}} = \frac{1}{2} * I_k * (\varphi' [t])^2$$

Redukovaný moment kliky tedy odpovídá momentu setrvačnosti kliky vzhledem k ose otáčení

Definice funkce

$$I_{\text{redklika}}[fi_] = I_k;$$

1.1.6 Redukovaný moment setrvačnosti pístu: Iredpist [fi]

Použité veličiny

Iredpist[fi] ... redukovaný moment setrvačnosti pístu, hledaná funkce

fi ... úhel natočení kliky

$\varphi'[t]$... úhlová rychlost kliky (proměnná s časem)

x [fi] ... poloha pístu

Ekpist ... kinetická energie pístu

Mp ... hmotnost pístu

Odvození

Píst vykonává translační pohyb ve směru osy x, pro jeho kinetickou energii platí

$$E_{\text{kpist}} = \frac{1}{2} * M_p * x'^2 = \frac{1}{2} * I_{\text{redpist}} * \varphi'^2$$

Již dříve bylo odvozeno

$$x [fi_] := L + r - r \cos [fi] - \sqrt{L^2 - r^2 \sin [fi]^2}$$

Dosažením

$$x [fi_] := L + r - r \cos [fi] - \sqrt{L^2 - r^2 \sin [fi]^2}$$

Výsledek =

$$\text{FullSimplify}[\text{Solve}[\{\frac{1}{2} * M_p * D[x[\varphi[t]], t]^2 == \frac{1}{2} * I_{\text{redpist}} * \varphi'[t]^2\}, I_{\text{redpist}}]]$$

$$\left\{ \left\{ \text{Iredpist} \rightarrow \left(\text{Mp } r^2 \sin[\varphi[t]]^2 \left(r \cos[\varphi[t]] + \sqrt{L^2 - r^2 \sin[\varphi[t]]^2} \right)^2 \right) / \left(L^2 - r^2 \sin[\varphi[t]]^2 \right) \right\} \right\}$$

Definice funkce

```
Iredpist[fi_] := Evaluate[Iredpist /. Vysledek[[1]] /. { $\varphi[t] \rightarrow fi$ }];
```

```
Definition[Iredpist]
```

```
Clear[Vysledek]
```

$$\text{Iredpist}[fi_]:= \frac{\text{Mp } r^2 \sin[fi]^2 \left(r \cos[fi] + \sqrt{L^2 - r^2 \sin[fi]^2} \right)^2}{L^2 - r^2 \sin[fi]^2}$$

1.1.7 Redukovaný moment setrvačnosti ojnice: Ireojnice [fi]

Použité veličiny

Ireojnice[fi] ... redukovaný moment setrvačnosti ojnice, hledaná funkce

fi ... úhel natočení kliky

$\varphi'[t]$... úhlová rychlost kliky (proměnná s časem)

x [fi] ... poloha pístu

xt [fi] ... x-ová poloha těžiště ojnice

yt [fi] ... y-ová poloha těžiště ojnice

Ekojnice ... kinetická energie ojnice

Mo ... hmotnost ojnice

lot ... moment setrvačnosti ojnice v těžišti

L ... délka ojnice

Lat ... poloha těžiště ojnice vůči bodu A

ωt ... úhlová rychlost rotace ojnice vzhledem k těžišti

ct ...

r ... polomer kliky, vzdálenost AC

L ... délka ojnice, vzdálenost AB

Rovnice pro ωt

Úhlová rychlost rotace ojnice vzhledem k těžišti ωt je rovna úhlové rychlosti kolem okamžitého pólu $\omega \pi$, viz obr. 1.1 výše. Platí, že okamžité rychlosti bodu A vyjádřené buď pomocí obvodové rychlosti se středem otáčení v bodu C, respektive pomocí úhlové rychlosti $\varphi'[t]$, nebo pomocí obvodové rychlosti se středem otáčení v pólu P ωt , respektive $\omega \pi$ se musí rovnat:

```
Vysledek1 = Solve[r * fi' == AP *  $\omega t$ ,  $\omega t$ ]
```

$$\left\{ \left\{ \omega t \rightarrow \frac{r \text{ fi}'}{AP} \right\} \right\}$$

Délku AP postupně odvodíme:

```
Vysledek2 = Solve[{
  (r + AP) * Cos[fi] == CD + BD,
  CD == r * Cos[fi],
  BD2 == L2 - AD2,
  AD == r * Sin[fi], AP, {CD, BD, AD}]
```

$$\left\{ \left\{ AP \rightarrow -\text{Sec}[fi] \sqrt{L^2 - r^2 \sin[fi]^2} \right\}, \left\{ AP \rightarrow \text{Sec}[fi] \sqrt{L^2 - r^2 \sin[fi]^2} \right\} \right\}$$

Pouze druhé řešení má reálný význam

```
 $\omega t$ [fi_] := Evaluate[FullSimplify[ $\omega t$  /. Vysledek1[[1]] /. Vysledek2[[2]]]]
```

```
Definition[ $\omega t$ ]
```

$$\omega t[\text{fi}_] := \frac{r \cos[\text{fi}] \text{fi}'}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}}$$

Rovnice pro ct

X-ová poloha těžiště, bod T

Z Pythagorovy věty pro trojúhelník ADB platí

$$\text{Vysledek1} = \text{Solve}[(L * \cos[\text{beta}])^2 + (r * \sin[\text{fi}])^2 = L^2, \cos[\text{beta}]]$$

$$\left\{ \left\{ \cos[\text{beta}] \rightarrow -\frac{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}}{L} \right\}, \left\{ \cos[\text{beta}] \rightarrow \frac{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}}{L} \right\} \right\}$$

Pro trojúhelník TEB platí následující vztah, do něhož dosadíme za Cos[beta] z předchozího vztahu a za x již odvozenou funkci.

$$\text{xt}[\text{fi}_] := \text{Evaluate}\left[\frac{x + (L - \text{Lat}) * \cos[\text{beta}] /. \text{Vysledek1}[[2]]}{.} \rightarrow L + r - r \cos[\text{fi}] - \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]} \right]$$

Definition[

xt]

$$\text{xt}[\text{fi}_] := L + r - r \cos[\text{fi}] - \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]} + \frac{(L - \text{Lat}) \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}}{L}$$

Y-ová poloha těžiště, bod T

Pro trojúhelníky TEB a pro výšku AD platí

$$\text{Vysledek2} = \text{Solve}\left\{ \begin{array}{l} \text{yt} = (L - \text{Lat}) * \sin[\text{beta}], \\ r * \sin[\text{fi}] = L * \sin[\text{beta}], \end{array} \text{yt}, \text{beta} \right\}$$

$$\left\{ \left\{ \text{yt} \rightarrow \frac{(L - \text{Lat}) r \sin[\text{fi}]}{L} \right\} \right\}$$

$$\text{yt}[\text{fi}_] := \text{Evaluate}[\text{yt} /. \text{Vysledek2}[[1]]]$$

Definition[yt]

$$\text{yt}[\text{fi}_] := \frac{(L - \text{Lat}) r \sin[\text{fi}]}{L}$$

$$\text{ct}[\text{fi}_] := \text{Evaluate}\left[\sqrt{D[\text{xt}[\varphi[t]], t]^2 + D[\text{yt}[\varphi[t]], t]^2} /. \{\varphi[t] \rightarrow \text{fi}, \varphi'[t] \rightarrow \text{fi}'\} \right]$$

Definition[ct]

ct[fi_] :=

$$\sqrt{\left(\frac{(L - \text{Lat})^2 r^2 \cos^2[\text{fi}] (\text{fi}')^2}{L^2} + \left(r \sin[\text{fi}] \text{fi}' + \frac{r^2 \cos[\text{fi}] \sin[\text{fi}] \text{fi}'}{\sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}} - \frac{(L - \text{Lat}) r^2 \cos[\text{fi}] \sin[\text{fi}] \text{fi}'}{L \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\text{fi}]}} \right)^2 \right)}$$

Vysledek =

$$\text{FullSimplify}\left[\text{Solve}\left[\left\{ \frac{1}{2} * M_p * D[x[\varphi[t]], t]^2 = \frac{1}{2} * I_{redpist} * \varphi'[t]^2 \right\}, I_{redpist} \right] \right]$$

{ { Iredpist →

$$\left(M_p r^2 \sin^2[\varphi[t]] \left(r \cos[\varphi[t]] + \sqrt{L^2 - r^2 \sin^2[\varphi[t]]} \right)^2 \right) / (L^2 - r^2 \sin^2[\varphi[t]]) \}$$

Rovnice pro kinetickou energii

Ojnice vykonává translační a rotační pohyb, pro jeho kinetickou energii

platí

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * M_o * ct^2 + \frac{1}{2} * I_{ot} * \omega t^2 = \frac{1}{2} * I_{redojnice} * \varphi'^2$$

```
Vysledek = FullSimplify[
  Solve[{ $\frac{1}{2} * Mo * ct[\varphi[t]]^2 + \frac{1}{2} * Iot * \omega t[\varphi[t]]^2 == \frac{1}{2} * Irejnice * \varphi[t]^2$ }, Irejnice]]
{{Irejnice ->
  
$$\frac{1}{L^3 - L r^2 \sin[\varphi[t]]^2} r^2 \left( L (Iot + (L - Lat)^2 Mo) \cos[\varphi[t]]^2 + Mo \left( L^3 - L r^2 + Lat r^2 + \right. \right.$$


$$\left. \left. Lat r \left( r \cos[2 \varphi[t]] + \cos[\varphi[t]] \sqrt{4 L^2 - 2 r^2 + 2 r^2 \cos[2 \varphi[t]]} \right) \right) \sin[\varphi[t]]^2 \right)}}$$

```

Definice funkce

```
Irejnice[fi_] := Evaluate[Irejnice /. Vysledek[[1]] /. {φ[t] -> fi}];
```

```
Definition[Irejnice]
```

```
Clear[Vysledek]
```

```
Irejnice[fi_] :=
  
$$\left( r^2 \left( L (Iot + (L - Lat)^2 Mo) \cos[fi]^2 + Mo \left( L^3 - L r^2 + Lat r^2 + Lat r \left( r \cos[2 fi] + \right. \right. \right. \right.$$


$$\left. \left. \left. \cos[fi] \sqrt{4 L^2 - 2 r^2 + 2 r^2 \cos[2 fi]} \right) \right) \sin[fi]^2 \right) \right) / (L^3 - L r^2 \sin[fi]^2)$$

```

Kontrolní graf

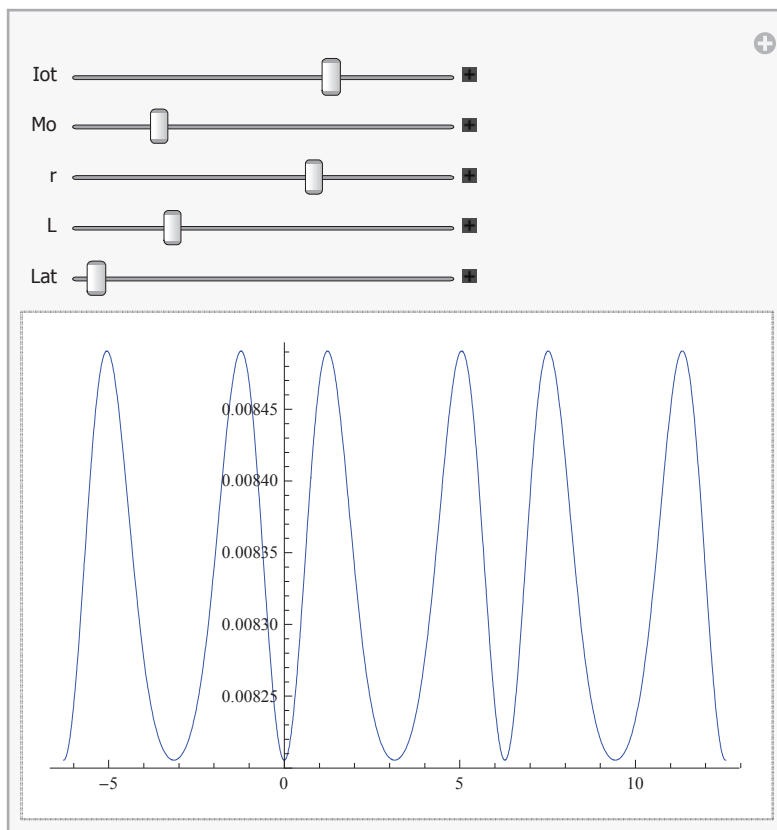
```
Clear [Mp, r, L]
```

```
Manipulate[
```

```
Plot[ $\frac{1}{L^3 - L r^2 \sin[fi]^2} r^2 \left( L (Iot + (L - Lat)^2 Mo) \cos[fi]^2 + Mo \left( L^3 - L r^2 + Lat r^2 + \right. \right.$ 

$$\left. \left. Lat r \left( r \cos[2 fi] + \cos[fi] \sqrt{4 L^2 - 2 r^2 + 2 r^2 \cos[2 fi]} \right) \right) \sin[fi]^2 \right),$$

  {fi, -2 Pi, 4 Pi}, PlotStyle -> {Blue}], {{Iot, 7 * 10-3}, 0.0001, 0.01},
  {{Mo, 2}, 0.001, 10}, {{r, 0.065}, 0.001, 0.1},
  {{L, 0.2}, 0.001, 1}, {{Lat, 0.13}, 0.001, 0.5}]
```



1.1.8 Pohybová rovnice dieselového motoru

Celkový redukovaný moment setrvačnosti

```
Ired[t_] = Iredklika[φ[t]] + Iredpist[φ[t]] + Irejnice[φ[t]];
celkIred = Plus @@ Table[Ired[t] /. φ[t] -> φ[t] - i * 4. Pi / nv, {i, 0, nv - 1}];
```

Celkový moment dieselového motoru

```
celkQred = Plus @@ Table[
  A * a * (p[t] [[i + 1]] - p0) * (r * Sin[φ[t]] + 1/2 * L * (k^2 * Sin[2 * φ[t]] /
  Sqrt[1 - (k^2 * (Sin[φ[t]])^2))])
  /. φ[t] -> φ[t] - i * 4. Pi / nv, {i, 0, nv - 1}];
```

Protimoment zátěže

```
Mvent[t_] = 0.2 (200 + (1000 - 200) (φ'[t] / (100 * Pi))^3);
```

Pohybová rovnice

$$(\text{celkIred} + 20) * \varphi''[t] + \frac{1}{2} * D[\text{celkIred}, \varphi[t]] * (\varphi'[t])^2 = \text{celkQred} - M_{\text{vent}}[t];$$

1.2 Funkce otvírání a zavírání ventilů - sání, výfuk, vstřík

1.2.1 Definice opakovací funkce jednoho oběhu: $\psi_i [f_i]$, $f_i \in \langle -4\pi, \infty \rangle$, $\psi_i \in \langle 0, 4\pi \rangle$

Použité veličiny

$\psi_i[f_i]$... úhel natočení kliky z intervalu $\langle 0, 4\pi \rangle$

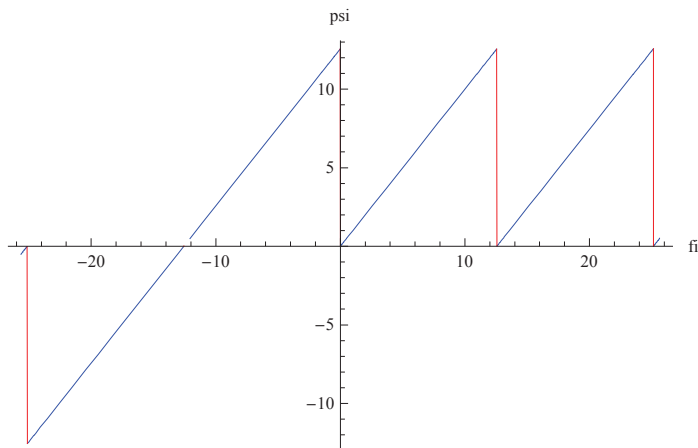
f_i ... úhel natočení kliky od počátku výpočtu z intervalu $\langle -4\pi, \infty \rangle$.

Definice funkce

```
psi[fi_] := 4 * Pi * FractionalPart[ $\frac{fi + 4 Pi}{4 * Pi}$ ]
```

Kontrolní graf

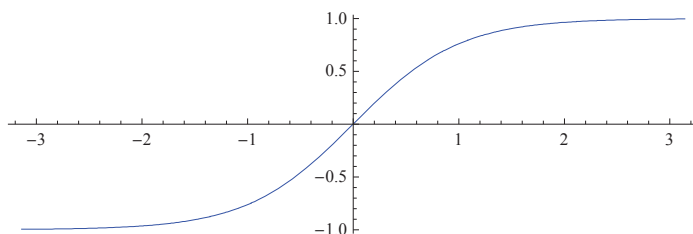
```
Plot[psi[fi], {fi, -8 Pi - 0.5, 8 Pi + 0.5}, PlotStyle -> Blue,
  AxesLabel -> {"fi", "psi"}, Exclusions -> True, ExclusionsStyle -> Red]
```



1.2.2 Princip vytvoření obdelníkové funkce pomocí tangens hyperbolický

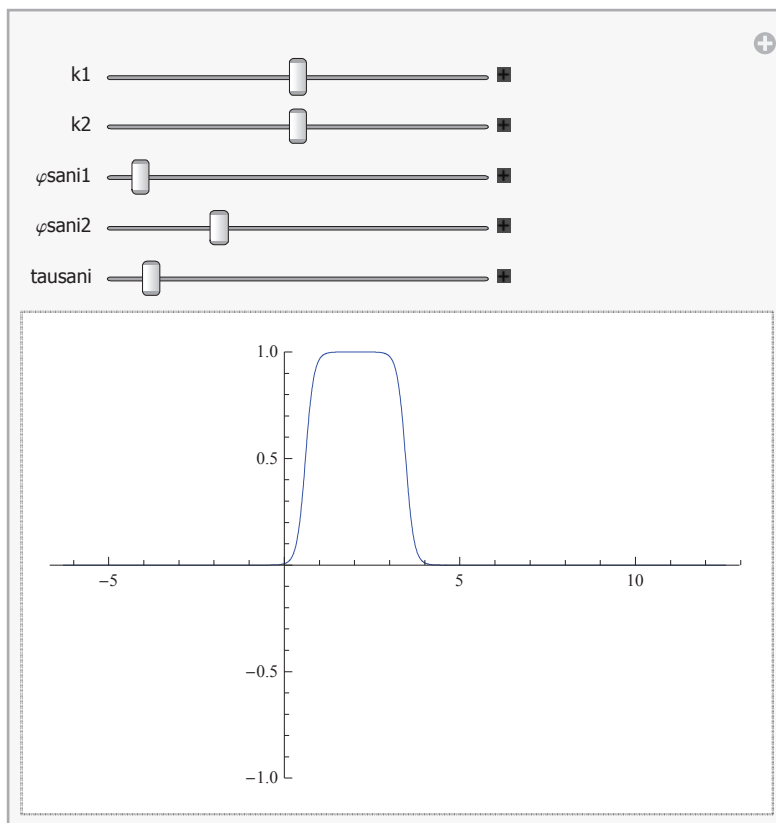
Tangens hyperbolický - ukázka

```
Plot[Tanh[psi], {psi, -Pi, Pi}, PlotStyle -> Blue, AspectRatio -> Automatic]
```



Otevírání a zavírání ventilů, sestavených z 2 tangens hyperbolických - ukázka

```
Manipulate[
  Plot[ $\left( k1 * \text{Tanh}\left[ \frac{\psi - \varphi_{sani1}}{\tau_{ausani}} \right] - k2 * \text{Tanh}\left[ \frac{\psi - \varphi_{sani2}}{\tau_{ausani}} \right] \right)$ , {psi, -2 Pi, 4 Pi},
  PlotStyle -> Blue, PlotRange -> {-1, 1}, AxesLabel -> Automatic],
  {{k1, 0.5}, 0, 1}, {{k2, 0.5}, 0, 1}, {{phi_sani1, 0}, 0, 2 * 360},
  {{phi_sani2, 180}, 0, 2 * 360}, {{tausani, 0.03}, 0, Pi}]
```



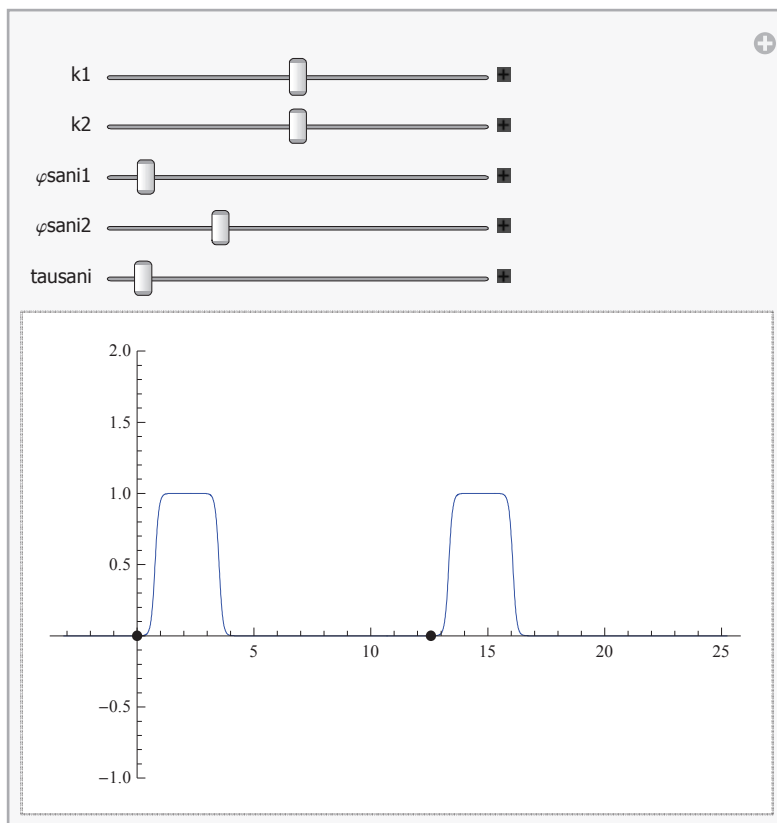
1.2.3 Zperiodičnění funkce otvírání a zavírání jednoho ventilu pomocí vytvoření dvou-periodické funkce (méně vhodný způsob)

Úvodní poznámka:

Na intervalu 0 až 4π část funkce chybí - polovina náběžné hrany, je-li otevření nebo zavření ventilu blízko 0 nebo 4π . Je třeba zajistit, aby interval pro opakování z této funkce neožezal důležité hodnoty. V dalším je to zajištěno tak, že je funkce zkopírována 2x za sebou a teprve potom zperiodičněna.

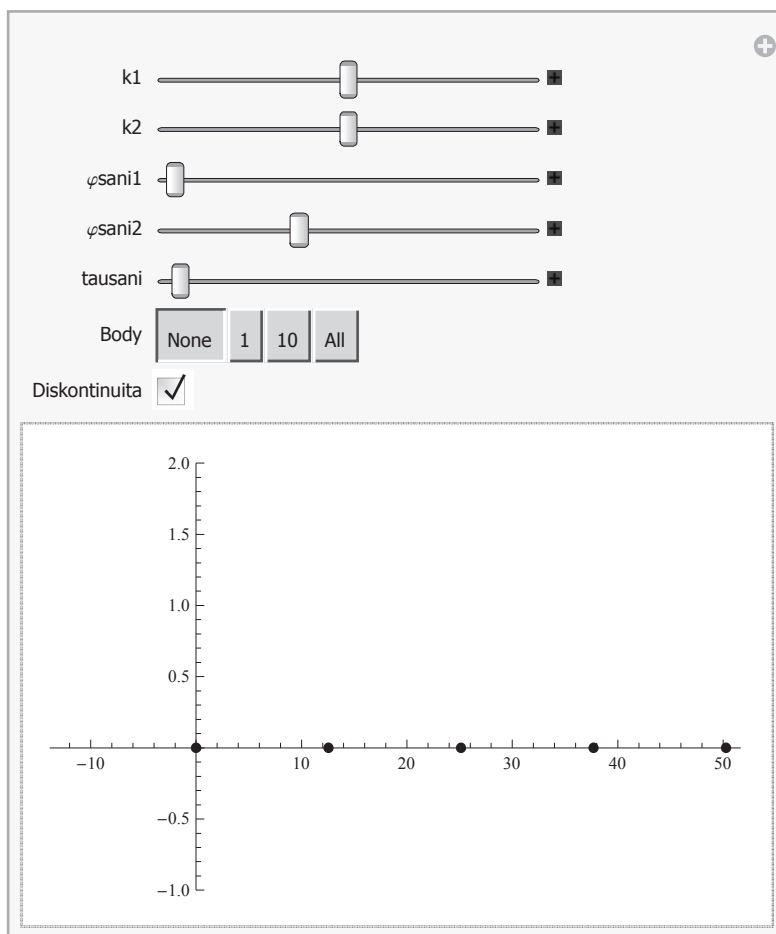
Otvírání a zavírání ventilu, sestavených z 2 tangens hyperbolických, 2 periody - ukázka

```
Manipulate[Plot[ $\left( k1 * \text{Tanh}\left[\frac{\text{psi} - \varphi_{\text{sani1}}}{\text{tausani}}\right] - k2 * \text{Tanh}\left[\frac{\text{psi} - \varphi_{\text{sani2}}}{\text{tausani}}\right] \right)$ 
+  $\left( k1 * \text{Tanh}\left[\frac{\text{psi} - 4 \text{ Pi} - \varphi_{\text{sani1}}}{\text{tausani}}\right] - k2 * \text{Tanh}\left[\frac{\text{psi} - 4 \text{ Pi} - \varphi_{\text{sani2}}}{\text{tausani}}\right] \right)$ ,
{psi, -Pi, 8 Pi + 0.1}, PlotStyle -> Blue, PlotRange -> {-1, 2}, AxesLabel ->
Automatic, Epilog -> {PointSize[0.015], Point[{0, 0}], Point[{4 Pi, 0}]},
{{k1, 0.5}, 0, 1}, {{k2, 0.5}, 0, 1}, {{phi_sani1, 0}, 0, 2 * 360},
{{phi_sani2, 180}, 0, 2 * 360}, {{tausani, 0.03}, 0, Pi}]
```

Zperiodičnění předchozí 2 periodické funkce - ukázka

```
Manipulate[Plot[ $\left( k1 * \text{Tanh}\left[ \frac{\text{psi}[fi] - \varphi_{\text{sani1}}}{\text{tausani}} \right] - k2 * \text{Tanh}\left[ \frac{\text{psi}[fi] - \varphi_{\text{sani2}}}{\text{tausani}} \right] \right)$ 
+  $\left( k1 * \text{Tanh}\left[ \frac{\text{psi}[fi] - 4 \text{ Pi} - \varphi_{\text{sani1}}}{\text{tausani}} \right] - k2 * \text{Tanh}\left[ \frac{\text{psi}[fi] - 4 \text{ Pi} - \varphi_{\text{sani2}}}{\text{tausani}} \right] \right)$ ,
{fi, -4 Pi, 16 Pi + 0.1}, PlotStyle -> Blue, PlotRange -> {-1, 2},
Mesh -> Body, Exclusions -> Diskontinuita, ExclusionsStyle -> Red,
AxesLabel -> Automatic, Epilog -> {PointSize[0.015], Point[{0, 0}],
Point[{4 Pi, 0}], Point[{8 Pi, 0}], Point[{12 Pi, 0}], Point[{16 Pi, 0}]},
{{k1, 0.5}, 0, 1}, {{k2, 0.5}, 0, 1}, {{phi_sani1, 0}, 0, 2 * 360},
{{phi_sani2, 180}, 0, 2 * 360}, {{tausani, 0.03}, 0, Pi},
{{Body, None}, {None, 1, 10, All}}, {{Diskontinuita, True}, {False, True}}
```



1.2.4 Zperiodičnění funkce otvírání a zavírání jednoho ventilu pomocí centrování (vhodnější způsob): ventil1period [φ_1 , φ_2 , tau]

Úvodní poznámka:

Na intervalu 0 až 4π část neperiodické funkce otvírání a zavírání ventilu chybí - polovina náběžné hrany, je-li otevření nebo zavření ventilu blízko 0 nebo 4π . Je třeba zajisti, aby interval pro opakování z této funkce neořezal důležité hodnoty. V dalším je to zajištěno tak, že je funkce vycentrována na intervalu $(0, 4\pi)$, následně zperiodičněna a nakonec posunuta zpět na původní souřadnice φ_1 , respektive φ_2 .

Použité veličiny

φ_1 ... úhel natočení kliky od počátku výpočtu z intervalu $\langle -4\pi, \infty \rangle$

φ_2 ... úhel natočení kliky z intervalu $\langle 0, 4\pi \rangle$

ventil1[φ_1 ; parametry: φ_1 , φ_2 , tau] ... obdelníková funkce otevření a zavření ventilu u jednoho válce

ventil1centr[φ_1 ; parametry: φ_1 , φ_2 , tau] ... obdelníková funkce otevření a zavření ventilu jednoho válce - vycentrovaná na intervalu $(0, 4\pi)$

ventil1centrperiod[φ_1 ; parametry: φ_1 , φ_2 , tau] ... obdelníková periodická funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce - vycentrovaná na intervalu $(0, 4\pi)$

ventil1period[φ_1 ; parametry: φ_1 , φ_2 , tau] ... obdelníková periodická funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce

φ_1 ... úhel otevření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

φ_2 ... úhel zavření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

tau ... ekvivalentní doba otvírání ventilu.

Definice obdelníkové funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1[φ_1 ; parametry: φ_1 , φ_2 , tau]

$$\text{ventill}[\text{psi}_, \varphi 1_ , \varphi 2_ , \text{tau}_] := \frac{1}{2} \left(\text{Tanh} \left[\frac{\text{psi} - \varphi 1}{\text{tau}} \right] - \text{Tanh} \left[\frac{\text{psi} - \varphi 2}{\text{tau}} \right] \right)$$

Definice centrováné funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: `ventil1centr[psi; parametry: $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$]`

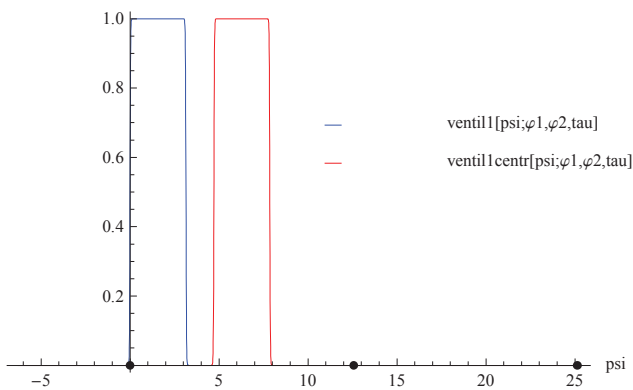
```
ventillcentr[psi_,  $\varphi 1_$ ,  $\varphi 2_$ , tau_] :=
  Evaluate[Simplify[ventill[psi + ( $\frac{\varphi 1 + \varphi 2}{2} - 2 \text{Pi}$ ),  $\varphi 1$ ,  $\varphi 2$ , tau]]]
```

Definition[ventillcentr]

$$\text{ventillcentr}[\text{psi}_, \varphi 1_ , \varphi 2_ , \text{tau}_] := \frac{1}{2} \left(-\text{Tanh} \left[\frac{-4 \pi + 2 \text{psi} + \varphi 1 - \varphi 2}{2 \text{tau}} \right] + \text{Tanh} \left[\frac{-4 \pi + 2 \text{psi} - \varphi 1 + \varphi 2}{2 \text{tau}} \right] \right)$$

Kontrolní graf

```
 $\varphi 1 = 0^\circ$ ;
 $\varphi 2 = 180^\circ$ ;
tau = 0.03;
Plot[{Tooltip[ventill[psi,  $\varphi 1$ ,  $\varphi 2$ , tau], "ventill[psi; parametry:  $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$ ]"],
  Tooltip[ventillcentr[psi,  $\varphi 1$ ,  $\varphi 2$ , tau],
    "ventillcentr[psi; parametry:  $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$ ]"],
  {psi, -2 Pi, 8 Pi + 0.1}, AxesLabel -> Automatic, PlotStyle -> {Blue, Red},
  PlotLegend -> {"ventill[psi;  $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$ ]", "ventillcentr[psi;  $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$ ]"},
  LegendPosition -> {-0.1, 0.0}, LegendShadow -> {0, 0}, LegendBorder -> None,
  LegendSize -> {1.1, 0.25}, Epilog -> {PointSize[0.015], Point[{0, 0}],
    Point[{4 Pi, 0}], Point[{8 Pi, 0}], Point[{12 Pi, 0}], Point[{16 Pi, 0}]}}]
Clear[
 $\varphi 1$ ,
 $\varphi 2$ ,
tau]
```



Definice centrováné periodické funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: `ventil1centrperiod[fi; parametry: $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$]`

```
ventillcentrperiod[fi_,  $\varphi 1_$ ,  $\varphi 2_$ , tau_] :=
  Evaluate[Simplify[ventillcentr[psi[fi],  $\varphi 1$ ,  $\varphi 2$ , tau]]]
Definition[ventillcentrperiod]
```

$$\text{ventillcentrperiod}[\text{fi}_, \varphi 1_ , \varphi 2_ , \text{tau}_] := \frac{1}{2} \left(-\text{Tanh} \left[\frac{-4 \pi + \varphi 1 - \varphi 2 + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[1 + \frac{\text{fi}}{4 \pi} \right]}{2 \text{tau}} \right] + \text{Tanh} \left[\frac{-4 \pi - \varphi 1 + \varphi 2 + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[1 + \frac{\text{fi}}{4 \pi} \right]}{2 \text{tau}} \right] \right)$$

Definice periodické funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: `ventil1period[fi; parametry: $\varphi 1, \varphi 2, \text{tau}$]`

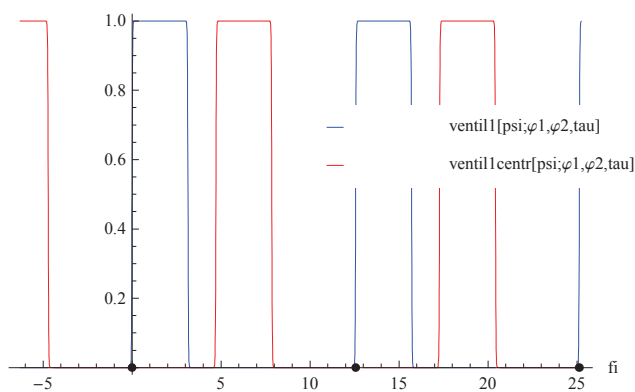
```
ventillperiod[fi_, φ1_, φ2_, tau_] :=
  Evaluate[Simplify[ventillcentrperiod[fi - ( $\frac{\varphi1 + \varphi2}{2} - 2 \text{ Pi}$ ), φ1, φ2, tau]]]
```

```
Definition[ventillperiod]
```

```
ventillperiod[fi_, φ1_, φ2_, tau_] :=
   $\frac{1}{2} \left( -\text{Tanh} \left[ \frac{4 \pi + \varphi1 - \varphi2 + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[ \frac{-2 \text{ fi} - 12 \pi + \varphi1 + \varphi2}{8 \pi} \right]}{2 \text{ tau}} \right] + \text{Tanh} \left[ \frac{4 \pi - \varphi1 + \varphi2 + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[ \frac{-2 \text{ fi} - 12 \pi + \varphi1 + \varphi2}{8 \pi} \right]}{2 \text{ tau}} \right] \right)$ 
```

Kontrolní graf

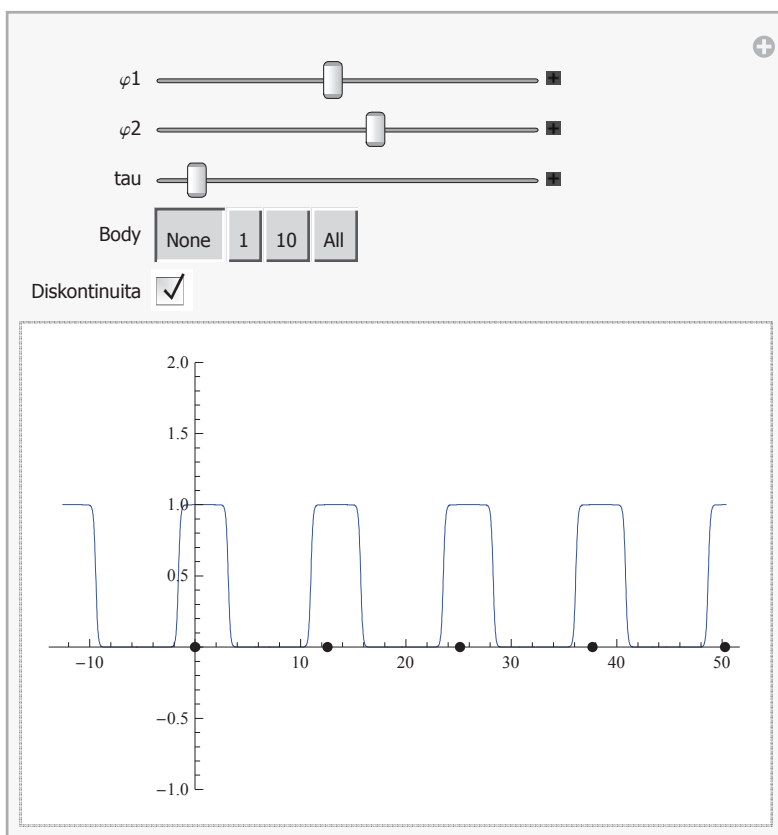
```
φ1 = 0 °;
φ2 = 180 °;
tau = 0.03;
Plot[{Tooltip[ventillperiod[fi, φ1, φ2, tau],
  "ventillperiod[fi; parametry: φ1, φ2, tau]"],
  Tooltip[ventillcentrperiod[fi, φ1, φ2, tau],
  "ventillcentrperiod[fi; parametry: φ1, φ2, tau]"]},
{fi, -2 Pi, 8 Pi + 0.1}, AxesLabel -> Automatic, PlotStyle -> {Blue, Red},
PlotLegend -> {"ventill[psi;φ1,φ2,tau]", "ventillcentr[psi;φ1,φ2,tau]"},
LegendPosition -> {-0.1, 0.0}, LegendShadow -> {0, 0},
LegendBorder -> None, LegendSize -> {1.1, 0.25},
Epilog -> {PointSize[0.015], Point[{0, 0}], Point[{4 Pi, 0}],
  Point[{8 Pi, 0}], Point[{12 Pi, 0}], Point[{16 Pi, 0}]}}
Clear[
  φ1,
  φ2,
  tau]
```



```

Manipulate[Plot[ $\frac{1}{2} \left( -\text{Tanh}\left[\frac{1}{2 \text{tau}} \left( 4 \pi + \varphi_1 - \varphi_2 + 8 \pi \text{FractionalPart}\left[\frac{-2 \text{fi} - 12 \pi + \varphi_1 + \varphi_2}{8 \pi}\right]\right)\right] + \right.$ 
 $\left. \text{Tanh}\left[\frac{1}{2 \text{tau}} \left( 4 \pi - \varphi_1 + \varphi_2 + 8 \pi \text{FractionalPart}\left[\frac{-2 \text{fi} - 12 \pi + \varphi_1 + \varphi_2}{8 \pi}\right]\right)\right] \right)$ ,
{fi, -4 Pi, 16 Pi + 0.1}, PlotStyle -> Blue, PlotRange -> {-1, 2},
Mesh -> Body, Exclusions -> Diskontinuita, ExclusionsStyle -> Red,
AxesLabel -> Automatic, Epilog -> {PointSize[0.015], Point[{0, 0}],
Point[{4 Pi, 0}], Point[{8 Pi, 0}], Point[{12 Pi, 0}], Point[{16 Pi, 0}]}},
{{phi1, 0}, -3 * 360, 3 * 360}, {{phi2, 180}, -3 * 360, 3 * 360},
{{tau, 0.03}, 0, Pi}, {{Body, None}, {None, 1, 10, All}},
{{Diskontinuita, True}, {False, True}}]

```



1.2.5 Vytvoření funkcí otevírání a zavírání pro všechny válce a pro všechny ventily - sání, výfuk, vstřík: fceVentilu [fi] [[ventil, valec]]

Použité veličiny

fceVentilu [fi][[ventil, valec]] ... matice obdelníkových periodických funkcí pro pro ventil {sání, výfuk, vstřík} (3 jednotlivé řádky) a pro válec 1..nv (nv sloupců)

fi ... úhel natočení kliky od počátku výpočtu z intervalu $\langle -4\pi, \infty \rangle$

nv ... počet válců

φ_1 ... úhel otevření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

φ_2 ... úhel zavření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

tau ... ekvivalentní doba otevírání ventilu

Definice funkce

```

Clear[nv, fi0, φ1, φ2, tau]
nv = 4;
φ1 = {φsani1, φvyfuk1, φvstrik1};
φ2 = {φsani2, φvyfuk2, φvstrik2};
tau = {tausani, tauvyfuk, tauvstrik};
fi0 = Table[fi, {fi, 0, 4 Pi -  $\frac{4 Pi}{nv}$ ,  $\frac{4 Pi}{nv}$ ]];
(*už jednou definované bylo, zde je to jen zopakované*)
fceVentilu[fi_] :=
  Evaluate[Table[ventilperiod[fi - fi0[[valec]], φ1[[ventil]], φ2[[ventil]],
    tau[[ventil]]], {ventil, 3}, {valec, nv}]]
Definition[fceVentilu];

```

1.3 Termodynamika dieselového motoru

1.3.1 Hmotnost vzduchu v jednotlivých válcích v čase t=0: m_0 [[valec]]

Použité veličiny

m_0 [[valec]]...hmotnost vzduchu ve válci. Předpokládá se, že je ve válci atmosférický tlak, ventily "netěsní".

V_{f1} [fi]...objem 1. válce

fi_0 [[valec]] ... úhel natočení kliky v čase t=0 pro daný válec, vzájemné pootočení válců

V_z ... maximální zdvihový objem jednoho válce motoru, amplituda V

V_k ... kompresní objem jednoho válce motoru

L ... délka ojnice, tj. AB

r ... poloměr kliky, tj. AC

p_0 ... atmosférický tlak

T_0 ... teplota okolí

mpk ... Měrná plynová konstanta vzduchu

nv ... počet válců

Odvození

Stavová rovnice ideálního plynu má základní tvar $\frac{pV}{T} = m * mpk = konst$, kde m [kg] je

hmotnost plynu, mpk [J.kg⁻¹ K⁻¹] je měrná plynová konstanta pro daný plyn, V [m³] je

objem plynu, p [Pa] je tlak plynu a T [K] je teplota plynu. Pak hustota plynu je:

```

Clear[p0, T0, V0, m0, mpk, ρ0]
Solve[{ $\frac{p_0 * V_0}{T_0} == m_0 * mpk$ ,  $\rho_0 == \frac{m_0}{V_0}$ }, ρ0, {V0, m0}]

```

```

{{ρ0 →  $\frac{p_0}{mpk T_0}$ }}

```

Definice - výsledný vzorec

```

Clear[fi, Vk, Vkre1, Vz, r, L, fi, p0, mpk, T0]

```

```

m0 = Vfi[0] *  $\frac{p_0}{mpk T_0}$ 

```

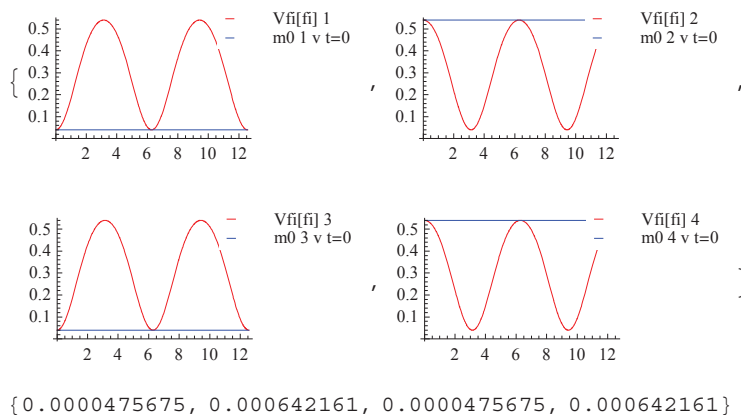
$$\left\{ \frac{p_0 \left(V_k + \frac{(L - \sqrt{L^2}) v_z}{2r} \right)}{mpk T_0}, \frac{p_0 \left(V_k + \frac{(L - \sqrt{L^2 + 2r}) v_z}{2r} \right)}{mpk T_0}, \frac{p_0 \left(V_k + \frac{(L - \sqrt{L^2}) v_z}{2r} \right)}{mpk T_0}, \frac{p_0 \left(V_k + \frac{(L - \sqrt{L^2 + 2r}) v_z}{2r} \right)}{mpk T_0} \right\}$$

Kontrolní numerický výpočet a graf (bezrozměrný)

```

(* nv=4 počet válců, již zadáno při odvození výsledného vzorce *)
r = 0.065 (* m polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
L = 0.2; (* m delka ojnice*)
Vz = 500 * 10-6; (* m3 zdvihovy objem *)
Vkrel = 8; (* % relativní kompresní objem*)
Vk = Vz * Vkrel / 100; (*m3 kompresni pomer *)
p0 = 1 * 105; (* atmosfericky tlak *)
T0 = 273 + 20 (* K teplota okolí*);
mpk = 287; (* J.kg-1.K-1 Měrná plynová konstanta vzduchu 287.1*)
Table[Plot[{Tooltip[Vfi[fi][[i]] * 1000, StringForm[
    "Vfi[fi] - objem ``. válce v litrech.", i]], Tooltip[m0[[i]] /
    (p0 / (mpk T0) * 1000,
    StringForm["m0 - hmotnost vzduchu v t=0, válce ``, pseudojednotky", i]]}],
{fi, 0, 4 Pi}, PlotStyle -> {Red, Blue},
PlotLegend -> {StringForm["Vfi[fi] ``", i], StringForm["m0 `` v t=0", i]},
LegendPosition -> {0.6, 0.35}, LegendShadow -> {0, 0},
LegendBorder -> None, LegendSize -> {1.2, 0.35}
], {i, 1, nv}]
m0
Clear[Vk, Vkrel, Vz, r, L, fi, p0, T0, mpk]

```



1.3.2 Hmotnostní toky: $m'[t]$, $ms'[t]$, $mv'[t]$, $mp'[t]$

Odvození

Maximální množství paliva, které je možno spálit závisí na hmotnosti vzduchu ve válci, stechiometrickém poměru a součiniteli přebytku vzduchu.

Hmotnost vzduchu ve válci lze vyjádřit pomocí objemu válce a hustoty vzduchu.

V průběhu spalování tohoto maximálního množství paliva dojde k natočení klikového hřídele o úhel beta maximální. Hmotnostní tok paliva za předpokladu rovnoměrného vstřikování závisí na rychlosti otáčení motoru, respektive čas k překonání úhlu beta maximální je dán rychlostí otáčení kliky.

Vysledek =

$$\text{Solve}\left[\left\{\begin{aligned} \text{mpmax} &= \frac{\text{mvzd}}{\text{kstech} * \text{lambda}}, \\ \text{mvzd} &= \text{Vz} * \text{ro0}, \\ \text{mp}'[t] &= \frac{\text{mpmax}}{\text{beta}} \varphi'[t], \\ \text{ms}'[t] &= \text{cs}[t] * \text{AS} * \text{roS}, \\ \text{mv}'[t] &= -1 * \text{cv}[t] * \text{AV} * \frac{\text{p}[t]}{\text{mpk} * \text{T}[t]} \end{aligned}\right\}, \{\text{mp}'[t], \text{ms}'[t], \text{mv}'[t]\}, \{\text{mpmax}, \text{mvzd}\}\right]$$

$$\left\{\left\{\begin{aligned} \text{mp}'[t] &\rightarrow \frac{\text{ro0 Vz} \varphi'[t]}{\text{beta kstech lambda}}, \\ \text{ms}'[t] &\rightarrow \text{AS roS cs}[t], \\ \text{mv}'[t] &\rightarrow -\frac{\text{AV cv}[t] \text{p}[t]}{\text{mpk T}[t]} \end{aligned}\right\}\right\}$$

Definice rovnic celkové bilance hmotnostního toku

$$m'[t] == \text{ms}'[t] * \text{fcesani} + \text{mv}'[t] * \text{fcevyfuk} + \text{mp}'[t] * \text{fcevstrik} /. \text{Vysledek}[1]$$

$$m'[t] == \text{AS fcesani roS cs}[t] - \frac{\text{AV fcevyfuk cv}[t] \text{p}[t]}{\text{mpk T}[t]} + \frac{\text{fcevstrik ro0 Vz} \varphi'[t]}{\text{beta kstech lambda}}$$

Rekapitulace rovnic hmotnostních toků

$$\begin{aligned} m'[t] &= \text{mp}'[t] * \text{fcevstrik} + \text{ms}'[t] * \text{fcesani} + \text{mv}'[t] * \text{fcevyfuk} \\ \text{ms}'[t] &\rightarrow \text{cs}[t] * \text{AS} * \text{roS} \\ \text{mv}'[t] &\rightarrow -1 * \text{cv}[t] * \text{AV} * \frac{\text{p}[t]}{\text{mpk} * \text{T}[t]} \\ \text{mp}'[t] &\rightarrow \frac{\text{Vz} * \text{ro0} * \varphi'[t]}{\text{beta} * \text{kstech} * \text{lambda}} \end{aligned}$$

1.3.3 Rychlosti proudění: $cs'[t]$, $cv'[t]$

Odvození

Proudění plynu v sacím a výfukovém potrubí popíšeme rozšířenou Bernoulliho rovnicí nestacionárního proudění se ztrátami v proudové trubici. Pro zjednodušený předpoklad trubice konstantního průřezu As délky lS a při zanedbání stlačitelnosti bude

$$\frac{pS}{roS} == \frac{p[t]}{roS} + \frac{cs[t]^2}{2} + \frac{cs[t]^2}{2} dzetaS + cs'[t] * lS, \quad cs'[t]$$

kde pS je vstupní tlak a roS hustota nasávaného vzduchu, cs respektive cs' rychlost proudění respektive její derivace a ztrátový součinitel sacího potrubí. Rovnici upravíme do tvaru v němž funkce Tanh respektuje případný opačný směr proudění. Podobně můžeme popsat proudění ve výfukovém potrubí. $roV = \frac{\rho[t]}{\text{mpk} * \text{T}[t]}$.

Definice respektive rekapitulace rovnic rychlostí proudění

$$\begin{aligned} cs'[t] &== \frac{1}{lS} * \left(\frac{pS - p[t]}{roS} - (1 + dzetaS) * \frac{cs[t]^2}{2} * \text{Tanh}\left[\frac{cs[t]}{\text{taupotrubi}}\right] \right); \\ cv'[t] &== \frac{1}{lV} * \left(\frac{p[t] - pV}{p[t]} * \text{mpk} * \text{T}[t] - (1 + dzetaV) * \frac{cv[t]^2}{2} * \text{Tanh}\left[\frac{cv[t]}{\text{taupotrubi}}\right] \right); \end{aligned}$$

1.3.4 Termodynamika

Odvození

První věta termodynamická pro otevřené soustavy:

$$r01 = dU == dQ + dW + dEm;$$

dU ... změna vnitřní energie (CV měrná tepelná kapacita při stálém objemu)

$$r02 = dU == m * CV * dT;$$

dQ ... teplo sdělené plynu v pracovním prostoru

dW ... objemová práce

$$r03 = dW == -p * dV;$$

dEm ... energie, kterou do válce přináší (odnáší) nasávaný (vyfukovaný) plyn o hmotnosti dm . Skládá se s energie tlakové dEp a vnitřní dUm . ΔTm ... teplotní rozdíl plynu ve válci a okolním prostředí.

$$r04 = dEm == \left(\frac{p}{\rho} + cv * \Delta Tm \right) dm;$$

Stavová rovnice plynu

$$r05 = p == \frac{m * mpk * T}{v};$$

$$r06 = \rho == \frac{m}{v};$$

Úpravou $r01$ s ohledem na $r05$ dostáváme

$$\text{Expand}[\text{Solve}[\{r01, r02, r03, r04, r05, r06\}, dT, \{dU, dW, dEm, \rho, p\}]]$$

$$\left\{ \left\{ dT \rightarrow \frac{\Delta Tm dm}{m} + \frac{dQ}{cv m} + \frac{dm mpk T}{cv m} - \frac{dV mpk T}{cv v} \right\} \right\}$$

Definice rovnice pro $T[t]$ $r00$

Derivací podle času dostáváme:

$$r00 = T'[t] == \frac{Q'[t]}{m[t] * cv} - \frac{mpk}{cv} * T[t] * \frac{v'[t]}{v[t]} + \left(\frac{mpk}{cv} * T[t] + \Delta Tm[t] \right) * \frac{m'[t]}{m[t]};$$

Rovnice pro teploty $\Delta Tm[t]$ $r10$

Poznámka: Člen $\text{Tanh}\left[\frac{cs[t]}{\text{taupotrubi}}\right]$ obrací znaménko. Pokud je cs kladná, nabývá hodnoty $+1$, pokud je cs záporná, nabývá hodnoty -1 . f_{cesani} je použita protože rychlosti cs a cv mají skutečný fyzikální význam jen při otevřených příslušných ventilech.

$$r11 = \Delta Tm[t] == \Delta Tmsani[t] * f_{cesani} + \Delta Tmvyfuk[t] * f_{cevyfuk};$$

$$r12 = \Delta Tmsani[t] == (TS - T[t]) * \text{Tanh}\left[\frac{cs[t]}{\text{taupotrubi}}\right];$$

$$r13 = \Delta Tmvyfuk[t] == (T[t] - TV) * \text{Tanh}\left[\frac{cv[t]}{\text{taupotrubi}}\right];$$

Po dosazení

$$r10 = \text{Simplify}[\text{Solve}[\{r11, r12, r13\}, \Delta Tm[t], \{\Delta Tmsani[t], \Delta Tmvyfuk[t]\}]]$$

$$\left\{ \left\{ \Delta Tm[t] \rightarrow f_{cesani} (TS - T[t]) \text{Tanh}\left[\frac{cs[t]}{\text{taupotrubi}}\right] + f_{cevyfuk} (-TV + T[t]) \text{Tanh}\left[\frac{cv[t]}{\text{taupotrubi}}\right] \right\} \right\}$$

Rovnice tepelných toků $r20$

Celkový tepelný tok Q' sdělený plynu se skládá z toku přivedeného spalováním vstřikovaného paliva Qp' a toku sděleného mezi plynem a stěnami pracovního prostoru Qw' .

$$r21 = Q'[t] == Qp'[t] * f_{cevstrik} + Qw'[t];$$

Tepelný tok získaný hořením paliva o výhřevnosti qn bude $Qp'[t] = qn * mp'[t]$. $mp'[t]$ odvozeno již dříve. Množství dodaného tepla a tím i výkon motoru regulujeme volbou úhlu spalování v rozsahu $\beta \in (0, \beta_{max})$, který měříme od úhlu začátku hoření před horní úvratí.

$$r22 = Qp'[t] == \frac{qn * Vz * \rho_0 * \varphi'[t]}{\beta * k_{stech} * \lambda};$$

Tepelný tok sdělený mezi plynem a stěnami pracovního prostoru vyjádříme z empirického Newtonova ochlazovacího zákona, kde T_w je střední teplota stěn a α střední hodnota součinitele přestupu tepla v průběhu jednoho cyklu.

$$r23 = Qw'[t] == \alpha * Aw[t] * (T_w - T[t]);$$

Po dosazení

```
r20 = Simplify[Solve[{r21, r22, r23}, Q'[t], {Qp'[t], Qw'[t]}]]
```

$$\left\{ \left\{ Q'[t] \rightarrow \text{alfa Aw}[t] (T_w - T[t]) + \frac{f_{\text{cevstrik}} q_n \rho_0 V_z \varphi'[t]}{\text{beta kstech lambda}} \right\} \right\}$$

Celková definice

```
r00 //. Join[r10[[1]], r20[[1]]]
```

$$T'[t] = \frac{1}{m[t]} \left(\frac{mpk T[t]}{CV} + f_{\text{cesani}} (T_S - T[t]) \text{Tanh} \left[\frac{cs[t]}{\text{taupotrubi}} \right] + \right. \\ \left. f_{\text{cevyfuk}} (-T_V + T[t]) \text{Tanh} \left[\frac{cv[t]}{\text{taupotrubi}} \right] \right) m'[t] - \\ \frac{mpk T[t] V'[t]}{CV V[t]} + \frac{\text{alfa Aw}[t] (T_w - T[t]) + \frac{f_{\text{cevstrik}} q_n \rho_0 V_z \varphi'[t]}{\text{beta kstech lambda}}}{CV m[t]}$$

1.3.5 Stavová rovnice plynu: $p[t]$

$$D[p[t]] == \frac{m[t] * mpk * T[t]}{V[t]}, t]$$

$$p'[t] = \frac{mpk T[t] m'[t]}{V[t]} + \frac{mpk m[t] T'[t]}{V[t]} - \frac{mpk m[t] T[t] V'[t]}{V[t]^2}$$

PŘÍLOHA 5-2

Funkční model DG

notebook Mathematica

1 Inicializace

1.1 Mathematica

1.2 Řízení výpočtu

2 Model dieselova motoru (DM)

2.1 Vstupní parametry

2.1.1 Klikový mechanismus

2.1.2 Vstupy a výstupy médií (chlazení, ventily, potrubí)

2.1.3 Okolní prostředí a konstanty

2.2 Geometrie a mechanika

2.2.1 Poloha pístu

2.2.2 Objemy válců

2.2.3 Teplosměnné plochy válců

2.2.4 Redukované momenty setrvačnosti

2.2.5 Fourierův rozvoj momentů setrvačnosti

2.2.6 Funkce otvírání a zavírání ventilů - sání, výfuk, vstřík

2.3 Termodynamika dieselu (TDD)

2.3.1 Hledané neznámé TDD

2.3.2 Rovnice TDD

2.3.3 Počáteční podmínky TDD

2.3.4 Celkový hnací moment Dieselova motoru

2.4 Regulace otáček DM

3 Model synchronního generátoru (SG)

3.1 Vstupní parametry SG

3.1.1 Štítkové údaje SG

- 3.1.2 Proudý a napětí vinutí rotoru
- 3.1.3 Mechanické parametry SG
- 3.1.4 Zadané reaktance, rezistance a časové konstanty

3.2 Výpočet impedancí SG

- 3.2.1 Vztažné veličiny
- 3.2.2 Výpočet poměrných reaktancí [pu]
- 3.2.3 Výpočet indukčností [H]
- 3.2.4 Výpočet rezistancí [Ω]

3.3 Sestavení základních rovnic SG

- 3.3.1 Úhel θ
- 3.3.2 Sprážené magnetické toky
- 3.3.3 Koenergie
- 3.3.4 Parkova transformace napětí
- 3.3.5 Regulace buzení, rotorová napětí
- 3.3.6 Generátorové rovnice
- 3.3.7 Moment SG

3.4 Seznam neznámých SG

3.5 Počáteční podmínky SG

4 Dynamika pohybu (DP)

- 4.1 Hledané neznámé DP
- 4.2 Pohybová rovnice
- 4.3 Počáteční podmínky DP (úhel a úhlová rychlost)

5 Výpočet

- 5.1 Spojení všech rovnic a neznámých
- 5.2 Řešení

6 Zpracování výsledků

6.1 Grafy výsledných veličin

6.1.1 Všechny neznámé pro 2 oběhy DM

6.1.2 Všechny neznámé pro celý děj

6.2 Příprava odvozených veličin

6.2.1 Proudů

6.2.2 Napětí (interpolace)

6.2.3 Magnetické toky (interpolace)

6.2.4 Frekvence, úhel δ

6.2.5 Výkony

6.2.6 Impedance zátěže

6.3 Grafy odvozených veličin

6.3.1 Globální nastavení grafů

6.3.2 Příprava konkrétních grafů

6.3.3 Tisk grafů

6.4 Čísla pro kontrolu

1 Inicializace

1.1 Mathematica

```
ClearAll["Global`*"] (* Vymazání všech proměnných *);
$HistoryLength = 2;
SetDirectory[NotebookDirectory[]] (* Nastaví aktuálního adresáře *);
Off[NIntegrate::"ncvb", NIntegrate::"slwcon"]
(* Kvůli Fourierovy transformaci a výpočtu integrálů *);
Off[General::"obspkg"] (* Kvůli legendám ke grafům starší verze *);
Off[NDSolve`ProcessEquations::"pdord"]; (*Vypnutí hlášení:
"NDSolve`ProcessEquations::pdord: "
Some of the functions have zero differential order,
so the equations will be solved as a system of differential-
algebraic equations."*)
Needs["PlotLegends`"];
```

1.2 Řízení výpočtu

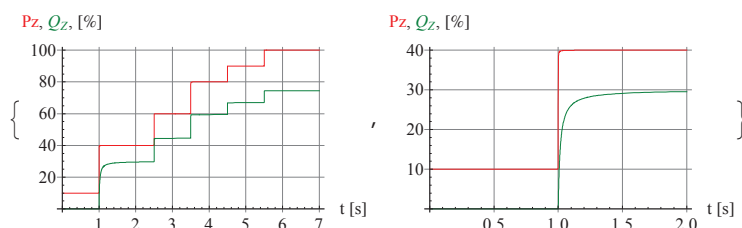
```
STOPcas = 7 (* 15 *) (* s doba simulace *);
```

Připojování zátěže

$$\text{Pripoj4}[t_, tp_] := \left(\frac{1}{\pi} \text{ArcTan}[(t - tp) * 10^4] + 0.5 \right)$$

```
RZ = 63 - 47.25 * Pripoj4[t, 1] - 5.25 * Pripoj4[t, 2.5] -
2.625 * Pripoj4[t, 3.5] - 0.875 * Pripoj4[t, 4.5] - 0.7 * Pripoj4[t, 5.5];
(* 63 Ω odpovídá 630 kW t.j. 10% Pn.*)
LZp =  $\frac{10000}{\omega_0 e}$  -  $\frac{9979}{\omega_0 e}$  * Pripoj4[t, 1] -
 $\frac{7}{\omega_0 e}$  * Pripoj4[t, 2.5] -  $\frac{3.5}{\omega_0 e}$  * Pripoj4[t, 3.5] -
 $\frac{1.166666666}{\omega_0 e}$  * Pripoj4[t, 4.5] -  $\frac{0.933333333}{\omega_0 e}$  * Pripoj4[t, 5.5];
(* 10 000 Ω = 4 kW t.j. méně jak 0.1% Pn.*)
```

```
 $\omega_0 e = 2 * \pi * 50$ ;
{Plot[{6.300 * 6.300 / RZ / 6.3 * 100,
6.300 * 6.300 / (LZp *  $\omega_0 e$ ) / 6.3 * 100},
{t, 0, STOPcas}, AxesOrigin -> {0, 0}, GridLines -> Automatic,
AxesLabel -> {"t [s]", "Pz, Qz, [%]"},
PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], RGBColor[0, 0.5, 0]}},
Plot[{6.300 * 6.300 / RZ / 6.3 * 100,
6.300 * 6.300 / (LZp *  $\omega_0 e$ ) / 6.3 * 100},
{t, 0, 2}, AxesOrigin -> {0, 0}, GridLines -> Automatic,
AxesLabel -> {"t [s]", "Pz, Qz, [%]"},
PlotStyle -> {RGBColor[1, 0, 0], RGBColor[0, 0.5, 0]}}
```



2 Model dieselova motoru (DM)

2.1 Vstupní parametry

2.1.1 Klikový mechanismus

2.1.1.1 Válec

```
(* OK *)
nvs = 12      (* -, skutečný počet válců *);
knv = 2       (* -, párování válců,
              označuje válce pracující ve stejném pracovním cyklu *);
nv = nvs / knv (* -, modelovaný počet válců po párování *);
```

2.1.1.2 Píst

```
(* OK *)
Dp = 0.320    (* m, vrtání, tzn. průměr pístu *);
Ap =  $\frac{\pi * Dp^2}{4}$  (* m2, plocha pístu *);
mp = 82       (* kg, hmotnost pístu *);
```

2.1.1.3 Ojnice

```
(* OK *)
Lo = 0.964    (* m, délka ojnice *);
Lat = 0.321   (* m, vzdálenost těžiště ojnice od bodu A,
              tj. od osy společného čepu ojnice a klikové hřídele, odborný odhad *);
mo = 153.5    (* kg, hmotnost ojnice *);
Jot = 7.92    (* kg.m2,
              moment setrvačnosti ojnice v tezišti, odborný odhad *);
```

2.1.1.4 Kliková hřídel

```
(* OK *)
rk = 0.200    (* m, polomer kliky, tzn. polovina zdvihu *);
Jk = 770      (* kg.m2,
              moment setrvačnosti části klikového hřídele připadající na jeden válec *);
```

2.1.1.5 Zdvihový a kompresní objem

```
(* OK *)
Vz = Ap * 2 * rk (* m3, zdvihový objem jednoho válce *);
ek = 16          (* -, kompresní poměr  $ek = \frac{V_k + V_z}{V_k}$  *);
Vk =  $\frac{V_z}{ek - 1}$  (* m3 kompresní objem jednoho válce *);
```


2.1.2 Vstupy a výstupy médií (chlazení, ventily, potrubí)

2.1.2.1 Chlazení

$T_w = 273 + 150$ (* K, střední teplota stěn válce *);
 $\alpha = 500$ (* $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,
 střední hodnota součinitele přestupu tepla *);

2.1.2.2 Sání

$L_s = 1$ (* m, délka sacího potrubí *);
 $D_s = 0.1$ (* m, průměr sacího potrubí *);
 $A_s = \frac{\pi \cdot D_s^2}{4}$ (* m^2 , průřez sacího potrubí *);
 $\zeta_s = 3$ (* -, součinitel místního odporu tlakových ztrát *);

$\varphi_{mso} = 0^\circ$ (* rad, úhel otevření sacího ventilu,
 ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření *);
 $\varphi_{msz} = 180^\circ$ (* rad, úhel zavření sacího ventilu,
 ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření *);
 $\tau_s = 4^\circ$ (* rad, ekvivalentní doba otvírání sacího ventilu *);
 $\tau_p = 2^\circ$ (* -, nastavení hranatosti změny
 znaménka ve vzorcích rychlosti proudění v potrubí. *);

$T_s = T_0$ (* K, teplota nasávaného vzduchu *);
 $kt_d = 1.4$ (* -, zvýšení tlaku turbodmychadlem *);
 $p_s = kt_d \cdot p_0$ (* Pa, tlak nasávaného vzduchu *);
 $\rho_s = kt_d \cdot \rho_0$ (* kg/m^3 , hustota nasávaného vzduchu *);

2.1.2.3 Výfuk

$L_v = 2$ (* m, délka výfukového potrubí *);
 $D_v = 0.15$ (* m, průměr výfukového potrubí *);
 $A_v = \frac{\pi \cdot D_v^2}{4}$ (* m^2 , průřez výfukového potrubí *);
 $\zeta_v = 5$ (* -, součinitel místního odporu tlakových ztrát *);

$\varphi_{mvo} = 3 \cdot \pi$ (* rad, úhel otevření výfukového ventilu,
 ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření *);
 $\varphi_{mvz} = 4 \cdot \pi$ (* rad, úhel zavření výfukového ventilu,
 ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření *);
 $\tau_v = 4^\circ$ (* rad, ekvivalentní doba otvírání výfukového ventilu *);

$T_v = 273 + 150$ (* K, teplota výfukových plynů *);
 $p_v = p_0$ (* Pa, tlak za výfukovým potrubím *);
 $A_v = \pi \cdot D_v^2 / 4$ (* m^2 , průřez výfukového potrubí *);

2.1.2.4 Vstřík

$\text{Predstih} = 10^\circ$ (* rad, předstih,
 úhel mezi počátkem vstříku paliva a horní úvratí pístu *);
 $\beta_{vstr} = 30^\circ$ (* rad, maximální úhel,
 nebo také maximální ekvivalentní doba trvání vstříku paliva*);
 $\tau_{vstr} = 4^\circ$ (* rad, ekvivalentní doba otvírání vstříku *);

```

 $\varphi_{mvstro} = 2 * \text{Pi} - \text{Predstih}$  (* rad, úhel počátku vstřiku paliva, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření *);
 $\varphi_{mvstrz} = \varphi_{mvstro} + \beta_{vstr} * \text{Plyn}$  (* rad, úhel ukončení vstřiku paliva, ovládáno RO *);

```

2.1.2.5 Úhly otvírání a zavírání ventilů

```

 $\varphi_{mo} = \{\varphi_{ms0}, \varphi_{mvo}, \varphi_{mvstro}\}$ ;
 $\varphi_{mz} = \{\varphi_{msz}, \varphi_{mvz}, \varphi_{mvstrz}\}$ ;
 $\tau = \{\tau_s, \tau_v, \tau_{vstr}\}$ ;

```

2.1.3 Okolní prostředí a konstanty

2.1.3.1 Okolní teplota a tlak

```

 $p_0 = 1 * 10^5$  (* Pa, atmosférický tlak *);
 $T_0 = 273 + 20$  (* K, teplota okolí *);

```

2.1.3.2 Vlastnosti vzduchu

```

 $mpk = 287.1$  (* J.kg-1.K-1, měrná plynová konstanta vzduchu *);
 $CV = 720$  (* J.kg-1.K-1, měrná tepelná kapacita vzduchu *);

```

```

 $\rho_0 = \frac{p_0}{mpk * T_0}$  (* kg.m-3, hustota vzduchu *);

```

2.1.3.3 Vlastnosti paliva

```

 $q_n = 42.71 * 10^6$  (* J.kg-1 výhřevnost paliva*);
 $k_{stech} = 14.3$  (* -, stechiometrický poměr, teoretická poměr spotřeby vzduchu na spálení paliva *);
 $\lambda = 1.1$  (* -, Součinitel přebytku vzduchu, poměr mezi množstvím vzduchu skutečně přivedeného do spalovací komory a teoretickým množstvím vzduchu, které je nutné pro ideální spalování *);

```

2.2 Geometrie a mechanika

2.2.1 Poloha pístu

Poloha 1. pístu jako funkce natočení kliky: x_{1fi} [fi]

```

 $x_{1fi}[fi\_] := L_0 + r_k - r_k \text{Cos}[fi] - \sqrt{L_0^2 - r_k^2 \text{Sin}[fi]^2}$ ;

```

2.2.2 Objemy válců

Objem 1. válce jako funkce natočení kliky: V_{1fi} [fi]

```

 $V_{1fi}[fi\_] := V_k + \frac{V_z * x_{1fi}[fi]}{2 r_k}$ ;

```

Úhel natočení kliky v čase $t=0$ pro daný válec, neboli pootočení válců: fi_0 [[válec]]

```

 $fi_0 = \text{Table}[fi, \{fi, 0, 4 \text{Pi} - \frac{4 \text{Pi}}{nv}, \frac{4 \text{Pi}}{nv}\}]$ ;

```

Objem daného válce jako funkce natočení kliky: V_{fi} [fi] [[válec]]

```

 $V_{fi}[fi\_] := V_{1fi}[fi - fi_0]$ ;

```

2.2.3 Teplosměnné plochy válců

Teplosměnná plocha kompresní části válce včetně dvou ploch podstav

$$A_k = \frac{2 \sqrt{2 \pi} r_k^{3/2} v_k + V_z}{r_k};$$

Maximální teplosměnná plocha pláště zdvihového objemu, při maximálním vytažení pístu

$$A_z = 2 \sqrt{2 \pi} \sqrt{r_k} \sqrt{V_z};$$

Aktivní teplosměnná plocha daného válce jako funkce natočení kliky: $A_{fi} [fi]$ [[valec]]

$$A_{fi} [fi_] := A_k + \frac{A_z * x_{lfi} [fi - fi_0]}{2 r_k};$$

2.2.4 Redukované momenty setrvačnosti

Redukovaný moment setrvačnosti části klikové hřídele připadající na 1. válec.

Tento moment setrvačnosti je konstantní, tedy nezávislý na čase a úhlu natočení klikového hřídele

$$J_{rk1} = J_k;$$

Redukovaný moment setrvačnosti 1. pístu

$$J_{rp1} = \left(m_p r_k^2 \sin^2 [fi] \left(r_k \cos [fi] + \sqrt{L_o^2 - r_k^2 \sin^2 [fi]} \right)^2 \right) / \left(L_o^2 - r_k^2 \sin^2 [fi] \right);$$

Redukovaný moment setrvačnosti 1. ojnice

$$J_{ro1} = \frac{1}{L_o^3 - L_o r_k^2 \sin^2 [fi]} r_k^2 \left(L_o \left(J_{ot} + (L_o - L_{at})^2 m_o \right) \cos^2 [fi] + m_o \left(L_o^3 - L_o r_k^2 + L_{at} r_k^2 + L_{at} r_k \left(r_k \cos [2 fi] + \cos [fi] \sqrt{4 L_o^2 - 2 r_k^2 + 2 r_k^2 \cos [2 fi]} \right) \right) \sin^2 [fi] \right);$$

Celkový redukovaný moment setrvačnosti připadající na 1. válec

$$J_{r1} = J_{rk1} + J_{rp1} + J_{ro1};$$

Celkový redukovaný moment setrvačnosti celého DM

$$J_r = knv * Plus @@ Table [J_{r1} /. fi -> \varphi_m [t] - i * 4. Pi / nv, \{i, 0, nv - 1\}];$$

2.2.5 Fourierův rozvoj momentů setrvačnosti

2.2.5.1 Výpočet FourierJr

```
Perioda = 2 Pi;
nHarm = 3; (* 1válec 3, 2válec 3, 3válec 3, 4válec 2,
5válec 0 a pak až 5 je to konstanta, 6válec 3*)
MnozinaHarm = Range[nHarm];
sinus[n_] := Sin[2 Pi / Perioda * \varphi_m [t] * n];
MnozinaSinu = Map[sinus, MnozinaHarm];
cosinus[n_] := Cos[2 Pi / Perioda * \varphi_m [t] * n];
MnozinaCosinu = Map[cosinus, MnozinaHarm];
```

```

acko[n_] :=  $\frac{2}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[Jr * cosinus[n], {ϕm[t], 0, Perioda}];
becko[n_] :=  $\frac{2}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[Jr * sinus[n], {ϕm[t], 0, Perioda}];
a0 =  $\frac{1}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[Jr, {ϕm[t], 0, Perioda}];
MnozinaAcek = Chop[Map[acko, MnozinaHarm], 10-5];
MnozinaBecek = Chop[Map[becko, MnozinaHarm], 10-5];

FourierJr =
a0 + Apply[Plus, MnozinaAcek * MnozinaCosinu + MnozinaBecek * MnozinaSinu];

```

2.2.5.2 Výpočet FourierDerivaceJr

```
DerivaceJr = D[Jr, ϕm[t]];
```

```

Perioda = 2 π;
nHarm = 4; (* 1válec 4, 2válec 4,3válec 3,4válec 2 nebo spíš 4,
5 válec je přibližně 0 - objeví se až 5. harm, 6válec 3*)
MnozinaHarm = Range[nHarm];
sinus[n_] := Sin[ $\frac{2 \text{ Pi}}{\text{Perioda}}$  * ϕm[t] * n];
MnozinaSinu = Map[sinus, MnozinaHarm];
cosinus[n_] := Cos[ $\frac{2 \text{ Pi}}{\text{Perioda}}$  * ϕm[t] * n];
MnozinaCosinu = Map[cosinus, MnozinaHarm];

```

```

acko[n_] :=
 $\frac{2}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[DerivaceJr * cosinus[n], {ϕm[t], 0, Perioda}];
becko[n_] :=  $\frac{2}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[DerivaceJr * sinus[n], {ϕm[t], 0, Perioda}];
a0 = Chop[ $\frac{1}{\text{Perioda}}$  * NIntegrate[DerivaceJr, {ϕm[t], 0, Perioda}], 10-5];
MnozinaAcek = Chop[Map[acko, MnozinaHarm], 10-5];
MnozinaBecek = Chop[Map[becko, MnozinaHarm], 10-5];

```

```

FourierDerivaceJr =
a0 + Apply[Plus, MnozinaAcek * MnozinaCosinu + MnozinaBecek * MnozinaSinu];

```

2.2.6 Funkce otvírání a zavírání ventilů - sání, výfuk, vstřík

Definice periodické funkce otvírání a zavírání ventilu jednoho válce: ventil1period[fi; parametry: ϕmo, ϕmz, τ]

fi ... úhel natočení kliky od počátku výpočtu z intervalu <-4π,∞)

ϕmo ... úhel otevření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

ϕmz ... úhel zavření ventilu, ventil je v tomto okamžiku na 50% otevření

τ ... ekvivalentní doba otvírání ventilu.

```

ventil1period[fi_, ϕmo_, ϕmz_, τ_] :=
 $\frac{1}{2} \left( -\text{Tanh} \left[ \frac{1}{2 \tau} \left( 4 \pi + \phi_{mo} - \phi_{mz} + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[ \frac{-2 \text{ fi} - 12 \pi + \phi_{mo} + \phi_{mz}}{8 \pi} \right] \right) \right] + \right.$ 
 $\left. \text{Tanh} \left[ \frac{1}{2 \tau} \left( 4 \pi - \phi_{mo} + \phi_{mz} + 8 \pi \text{FractionalPart} \left[ \frac{-2 \text{ fi} - 12 \pi + \phi_{mo} + \phi_{mz}}{8 \pi} \right] \right) \right] \right)$ 

```

```
(*   ventillperiod[fi_, φmo_, φmz_, τ_] :=
  1/2 (-Tanh[2φmo+2 fi/2 τ]+Tanh[2φmz+2 fi/2 τ]); 0≤fi<4π
   ventillperiod[fi_, φmo_, φmz_, τ_] :=
   ventillperiod[fi-4π, φmo, φmz, τ]; fi≥4π
   ventillperiod[fi_, φmo_, φmz_, τ_] :=
   ventillperiod[fi+4π, φmo, φmz, τ]; fi<0 *)
```

Definice funkce otvírání a zavírání pro všechny válce a pro všechny ventily - 1. sání, 2. výfuk, 3. vstřík
fceVentilu[fi][[ventil, valec]]

Jedná se o matice obdelníkových periodických funkcí pro ventil {sání, výfuk, vstřík} (3 jednotlivé řádky) a pro válec 1..nv (nv sloupců)

```
fceVentilu[fi_] :=
  Evaluate[Table[ventillperiod[fi - fi0[[valec]], φmo[[ventil]],
    φmz[[ventil]], τ[[ventil]]], {ventil, 3}, {valec, nv}]]
```

2.3 Termodynamika dieselu (TDD)

2.3.1 Hledané neznámé TDD

DSolve neumí pracovat s poli a maticemi, je nutné "ručně" vytvořit seznamy funkcí pro jednotlivé válce. Průběhy těchto veličin v čase budou výsledkem řešení.

```
VytvorListFunkce[JmenoFunkce_, Derivace_] := Table[ToExpression[
  JmenoFunkce <> ToString[valec] <> Derivace <> "[t]", {valec, nv}]

p'[t_] = VytvorListFunkce["p", ""];
p[t_] = VytvorListFunkce["p", ""];
T'[t_] = VytvorListFunkce["T", ""];
T[t_] = VytvorListFunkce["T", ""];
m'[t_] = VytvorListFunkce["m", ""];
m[t_] = VytvorListFunkce["m", ""];
cs'[t_] = VytvorListFunkce["cs", ""];
cs[t_] = VytvorListFunkce["cs", ""];
cv'[t_] = VytvorListFunkce["cv", ""];
cv[t_] = VytvorListFunkce["cv", ""];

NeznameTDD = Join[p[t], T[t], m[t], cs[t], cv[t]];
```

2.3.2 Rovnice TDD

RovniceTDD =

$$\text{Flatten}[\text{Map}[\text{Thread}, \{D[p[t] == \frac{m[t] * \text{mpk} * T[t]}{\text{Vfi}[\varphi m[t]]}, t] /. \varphi m'[t] \rightarrow \omega m[t],$$

$$T'[t] == \frac{1}{m[t]} \left(\frac{\text{mpk} T[t]}{\text{CV}} + \text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[1]] (Ts - T[t]) \text{Tanh}\left[\frac{\text{cs}[t]}{\tau p}\right] + \right.$$

$$\left. \text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[2]] (-Tv + T[t]) \text{Tanh}\left[\frac{\text{cv}[t]}{\tau p}\right] \right) m'[t] -$$

$$\frac{\text{mpk} T[t] D[\text{Vfi}[\varphi m[t]], t]}{\text{CV} \text{Vfi}[\varphi m[t]]} + \frac{1}{\text{CV} m[t]} (\alpha \text{Afi}[\varphi m[t]] (Tw - T[t]) +$$

$$(\text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[3]] \varrho_0 \text{Vz} \omega m[t] * \text{ktD}) /$$

$$(\beta \text{vstr} \text{kstech} \lambda)) /. \varphi m'[t] \rightarrow \omega m[t],$$

$$m'[t] == \text{As} \text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[1]] \varrho s \text{cs}[t] -$$

$$(\text{Av} \text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[2]] \text{cv}[t] p[t]) / (\text{mpk} T[t]) +$$

$$(\text{fceVentilu}[\varphi m[t]][[3]] \varrho_0 \text{Vz} \omega m[t] * \text{ktD}) / (\beta \text{vstr} \text{kstech} \lambda),$$

$$\text{cs}'[t] == \frac{1}{\text{Ls}} * \left(\frac{\text{ps} - p[t]}{\varrho s} - (1 + \zeta s) * \frac{\text{cs}[t]^2}{2} * \text{Tanh}\left[\frac{\text{cs}[t]}{\tau p}\right] \right),$$

$$\text{cv}'[t] == \frac{1}{\text{Lv}} * \left(\frac{p[t] - pV}{p[t]} * \text{mpk} * T[t] - (1 + \zeta v) * \frac{\text{cv}[t]^2}{2} * \text{Tanh}\left[\frac{\text{cv}[t]}{\tau p}\right] \right) \}];$$

2.3.3 Počáteční podmínky TDD

Pro hmotnost vzduchu v jednotlivých válcích v čase t=0 se předpokládá, že ve válci je atmosférický tlak, tedy ϱ_0 , ventily netěsní.

```
PocPodTDD = Flatten[Map[Thread,
  {p[0] == p0, T[0] == T0, m[0] == Vfi[0] * ρ0, cs[0] == 0, cv[0] == 0}]];
```

2.3.4 Celkový hnací moment Diesela motoru

$$M * d\varphi m = F * dx$$

$$M = F * dx / d\varphi m$$

```
Mdm = knv * Plus@@Table[Ap * (p[t][[i + 1]] - p0) * x1fi'[\varphi m[t]] /.
  \varphi m[t] -> \varphi m[t] - i * 4. Pi / nv, {i, 0, nv - 1}];
```

Střední hodnota hnacího momentu

```
Ts = 0.25;
RovniceMdms = {Ts * Mdms'[t] + Mdms[t] == Mdm, Mdms[0] == 5000};
```

2.4 Regulace otáček DM

```
\omega zad = \omega 0m;
Tehp = 0.1;
Kro = 20;
Boro = 0.1;
```

```
Omezovac[vstup_] := \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{Tanh}[3.0 (vstup - 0.5)];
(* konstanta 2.8 je více progresivní*)
Plyn = Omezovac[VystRO[t] + Boro];
```

```

RovniceRO = {Tehp * VystRO'[t] + VystRO[t] + Kro  $\frac{\omega m[t] - \omega zad}{\omega 0m} = 0$ };
PocPodRO = {VystRO[0] == 0};
NeznameRO = {VystRO[t]};

```

3 Model synchronního generátoru (SG)

3.1 Vstupní parametry SG

3.1.1 Šítkové údaje SG

```

(* OK *)
Sn = 7900000 (* VA, zdánlivý jmenovitý výkon SG *);
Pn = 6300000 (* W, jmenovitý činný výkon SG, při cosφn=0.8*);
Un = 6300 (* V, jmenovité svorkové napětí SG, sdružené efektivní *);

```

```

(* OK *)
Ian =  $\frac{Sn}{\sqrt{3} Un}$  (* A, jmenovitý proud SG, fázový efektivní, *);
(* Print["Ian = ", N[Ian] , " A"] *)
(* Ian = 723.9789089838165` A *)

```

```

(* OK *)
fn = 50 (* Hz, jmenovitá frekvence SG *);

```

```

pp = 5 (* -, počet pólpárů 5 *);
φe[t] := φm[t] * pp
ωe[t] := ωm[t] * pp
ω0e = 2 π fn (* rad/s,
jmenovitá úhlová rychlost - elektrická,
v které se neprojevuje počet pólpárů *);
ω0m = 2 π fn / pp;

```

```

(* Print["Jmenovitý moment je cca ", N[Sn*pp/ω0e] ,
" N.m. Uvažujeme Sn, nikoliv Pn. Tedy cosφ=1"] *)
(* Jmenovitý moment je cca 25146.5 N.m.
Uvažujeme Sn nikoliv Pn. Tedy cosφ=1 *)

```

```

(* OK *)
Sv = Sn (* VA, vztažený výkon *);

```

3.1.2 Proudy a napětí vinutí rotoru

Jedná se o jmenovité, respektive vztažené hodnoty

```

(* OK *)
IFn = 280 (* A, budicí proud 668 *);
(* Odborný odhad *)
IDn = 5 * Ian (* A, tlumicí proud v podélné ose *);
IQn = 5 * Ian (* A, tlumicí proud v příčné ose *);

```

```
(* OK *)
UFn = 145 (* V, budicí napětí *);
      Sv
UDn = ----;
      IDn
      Sv
UQn = ----;
      IQn
```

3.1.3 Mechanické parametry SG

```
(* OK *)
Jsg = 1000 (* kg.m2, moment setrvačnosti SG, odborný odhad *);
(* Odborný odhad *)
B = 0.1 (* - , součinitel tlumení *);
```

3.1.4 Zadané reaktance, rezistance a časové konstanty

Poměrné hodnoty jsou značeny malými písmeny.

Reaktance

```
(* OK *)
xd = 1.54; xd1 = 0.24; xd2 = 0.110; (* pu *)
(* ustálená, přechodová a rázová reaktance v podélné ose *)
xq = 0.76; xq1 = 0.28; xq2 = 0.107; (* pu *)
(* ustálená, přechodová a rázová reaktance v příčné ose *)
(* xq1 - odborný odhad *)
xσ = 0.05; (* pu *)
(* rozptylová reaktance vzduchové mezery - odborný odhad *)
x0 = 0.084; (* pu *)
(* nulová reaktance *)
(* Pro zapojení vinutí do hvězdy -
která je izolována - se nemusí uvažovat. *)
```

```
L0 = 10 / ω0e; (* H *)
(* Uzemění uzlu generátoru. *)
(* U0 se uplatní jen při nesymetriích - zde fakticky neuvažováno *)
```

Rezistance, nebo časové konstanty³

```
(* Ra20 = 0.0244 *) (* Ω *)
(* odpor fáze vinutí statoru při 20°C *)
(* θ0Cu=234.5; θ=80; Ra80 = Ra20θ0Cu+θ/θ0Cu+20 *)
(* Ra80 = 0.03015 *) (* Ω *)
(* odpor fáze vinutí statoru při 80°C *)
(* ra=Ra80/Zn *) (* = 0.006001622594755723` *) (* pu *)
```

```
(* OK *)
ra = 0.006; (* pu *)
rb = 0.006; (* pu *)
rc = 0.006; (* pu *)
(* Odborný odhad *)
rF = 0.02; (* pu *)
rD = 0.05; (* pu *)
rQ = 0.05 (* pu *);
```

```
R0 = 10; (* Ω *)
(* Uzemění uzlu generátoru. *)
(* U0 se uplatní jen při nesymetriích - zde fakticky neuvažováno *)
```


3.2 Výpočet impedancí SG

3.2.1 Vztažné veličiny

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (* \text{ ohm, vztažná impedance } *);$$

$$L_n = \frac{Z_n}{\omega_0 e} \quad (* \text{ H, vztažná indukčnost } *);$$

3.2.2 Výpočet poměrných reaktancí [pu]

Konstantní část vlastních reaktancí

$$x_{aak} = x_0 + x_d + x_q;$$

$$x_{FFk} = \frac{(x_d - x_\sigma)^2}{x_d - x_{d1}};$$

$$x_{DDk} = \frac{(x_d - x_\sigma)^2 * (x_d - x_{d1}) * (x_d - x_\sigma)}{x_d - x_{d1}} / \left(\frac{(x_d - x_\sigma)^2}{x_d - x_{d1}} * (x_d - x_{d1}) - (x_{d1} - x_\sigma) * (x_{d2} - x_\sigma) \right);$$

$$x_{QQk} = \frac{(x_q - x_\sigma)^2 * (x_q - x_{q1}) * (x_q - x_\sigma)}{x_q - x_{q1}} / \left(\frac{(x_q - x_\sigma)^2}{x_q - x_{q1}} * (x_q - x_{q1}) - (x_{q1} - x_\sigma) * (x_{q2} - x_\sigma) \right);$$

Konstantní část vzájemných reaktancí

$$x_{abk} = \frac{x_d + x_q}{2} - x_0;$$

$$x_{FDk} = x_d - x_\sigma;$$

Periodická část vlastních reaktancí

$$x_{aap} = x_d - x_q;$$

Periodická část vzájemných reaktancí

$$x_{abp} = x_d - x_q;$$

$$x_{aFp} = x_d - x_\sigma;$$

$$x_{aDp} = x_d - x_\sigma;$$

$$x_{aQp} = x_q - x_\sigma;$$

Matice reaktancí

$$x_k = \begin{pmatrix} x_{aak} & -x_{abk} & -x_{abk} & 0 & 0 & 0 \\ -x_{abk} & x_{aak} & -x_{abk} & 0 & 0 & 0 \\ -x_{abk} & -x_{abk} & x_{aak} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{FFk} & x_{FDk} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{FDk} & x_{DDk} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{QQk} \end{pmatrix};$$

$$x_p = \begin{pmatrix} x_{aap} & -x_{abp} & -x_{abp} & x_{aFp} & x_{aDp} & x_{aQp} \\ -x_{abp} & x_{aap} & -x_{abp} & x_{aFp} & x_{aDp} & x_{aQp} \\ -x_{abp} & -x_{abp} & x_{aap} & x_{aFp} & x_{aDp} & x_{aQp} \\ x_{aFp} & x_{aFp} & x_{aFp} & 0 & 0 & 0 \\ x_{aDp} & x_{aDp} & x_{aDp} & 0 & 0 & 0 \\ x_{aQp} & x_{aQp} & x_{aQp} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

3.2.3 Výpočet indukčností [H]

Matice převodů - zohledňuje přepočítání z rotoru na stator.

$$\text{Prvd} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} \\ \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Dn}}{I_{Fn}} \\ \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} & \frac{I_{Qn}}{I_{Fn}} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \\ 1 & 1 & 1 & \frac{I_{an}}{I_{Fn}} & \frac{I_{an}}{I_{Dn}} & \frac{I_{an}}{I_{Qn}} \end{pmatrix};$$

Matice vycházející z Parkovy transformace pro přepočítání indukčností z 0,d,q na a,b,c a polohy rotoru a statoru.

$$K_{pt1} = \frac{1}{3}; K_{pt2} = \sqrt{\frac{2}{3}};$$

$$K_{pt} = \begin{pmatrix} K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} \\ K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} \\ K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt1} & K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} \\ K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} & 1 & 1 & 1 \\ K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} & 1 & 1 & 1 \\ K_{pt2} & K_{pt2} & K_{pt2} & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$\text{Rot} = \begin{pmatrix} \cos[2\theta] & \cos[2(\theta + \frac{\pi}{6})] & \cos[2(\theta + \frac{5\pi}{6})] & \cos[\theta] & \cos[\theta] & \sin[\theta] \\ \cos[2(\theta + \frac{\pi}{6})] & \cos[2(\theta - \frac{2\pi}{3})] & \cos[2(\theta - \frac{\pi}{2})] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \sin[\theta - \frac{2\pi}{3}] \\ \cos[2(\theta + \frac{5\pi}{6})] & \cos[2(\theta - \frac{\pi}{2})] & \cos[2(\theta + \frac{2\pi}{3})] & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & \sin[\theta + \frac{2\pi}{3}] \\ \cos[\theta] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & 0 & 0 & 0 \\ \cos[\theta] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] & 0 & 0 & 0 \\ \sin[\theta] & \sin[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \sin[\theta + \frac{2\pi}{3}] & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

Přepočítání z poměrných hodnot na pojmenované a z rotoru na stator

$$\mathbf{L} = \mathbf{L}_n * \text{Prvd} * \mathbf{K}_{pt} (\mathbf{x}_k + \mathbf{x}_p * \text{Rot});$$

3.2.4 Výpočet rezistancí [Ω]

$$\mathbf{r} = \begin{pmatrix} r_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{Z}_n * \text{Prvd} * \mathbf{r};$$

$$\begin{pmatrix} R_a & \square & \square & \square & \square & \square \\ \square & R_b & \square & \square & \square & \square \\ \square & \square & R_c & \square & \square & \square \\ \square & \square & \square & R_F & \square & \square \\ \square & \square & \square & \square & R_D & \square \\ \square & \square & \square & \square & \square & R_Q \end{pmatrix} = \mathbf{R};$$

3.3 Sestavení základních rovnic SG

3.3.1 Úhel θ

Deklarace úhlu, který uběhl od t=0

$$\begin{aligned}
 & (* \theta = \omega_0 e * t + \delta + \pi / 2; *) \\
 & (* \delta = \varphi_e [t] - \omega_0 e t; *) \\
 & \theta = \frac{\pi}{2} + \varphi_e [t];
 \end{aligned}$$

3.3.2 Sprážené magnetické toky

$$\mathbf{Isg} = \begin{pmatrix} \mathbf{Ia}[t] \\ \mathbf{Ib}[t] \\ \mathbf{Ic}[t] \\ \mathbf{IF}[t] \\ \mathbf{ID}[t] \\ \mathbf{IQ}[t] \end{pmatrix};$$

$$\Psi = \mathbf{L} \cdot \mathbf{Isg};$$

$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \Psi;$$

3.3.3 Koenergie

$$Wc = \frac{1}{2} * \mathbf{Isg}^T \cdot \Psi // \text{First} // \text{First};$$

3.3.4 Parkova transformace napětí

Je zde uvedena jen pro odvození měřeného napětí Usvorkove, které slouží regulaci buzení. Také jsou napětí 0dq vynášeny i do výsledných grafů.

3.3.4.1 Generátorová napětí ABC

$$\begin{aligned}
 U0g &= L0 * \partial_t (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) + R0 * (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) / . \varphi m' [t] \rightarrow \omega m [t]; \\
 Uag &= Ra * Ia[t] + \partial_t \psi a + U0g / . \varphi m' [t] \rightarrow \omega m [t]; \\
 Ubg &= Rb * Ib[t] + \partial_t \psi b + U0g / . \varphi m' [t] \rightarrow \omega m [t]; \\
 Ucg &= Rc * Ic[t] + \partial_t \psi c + U0g / . \varphi m' [t] \rightarrow \omega m [t];
 \end{aligned}$$

$$\text{MatrixForm} [Uabcg = \begin{pmatrix} Uag \\ Ubg \\ Ucg \end{pmatrix}];$$

3.3.4.2 Generátorová napětí 0dq

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos[\theta] & \cos[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \cos[\theta + \frac{2\pi}{3}] \\ \sin[\theta] & \sin[\theta - \frac{2\pi}{3}] & \sin[\theta + \frac{2\pi}{3}] \end{pmatrix} = \\
 &\begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \cos[\theta] & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin[\frac{\pi}{6} - \theta] & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin[\frac{\pi}{6} + \theta] \\ \sqrt{\frac{2}{3}} \sin[\theta] & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos[\frac{\pi}{6} - \theta] & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos[\frac{\pi}{6} + \theta] \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

$$U_{00dqg} = \frac{U_{ag}}{\sqrt{3}} + \frac{U_{bg}}{\sqrt{3}} + \frac{U_{cg}}{\sqrt{3}};$$

$$U_{d0dqg} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{ag} \cos[\theta] - \sqrt{\frac{2}{3}} U_{bg} \sin\left[\frac{\pi}{6} - \theta\right] - \sqrt{\frac{2}{3}} U_{cg} \sin\left[\frac{\pi}{6} + \theta\right];$$

$$U_{q0dqg} = -\sqrt{\frac{2}{3}} U_{bg} \cos\left[\frac{\pi}{6} - \theta\right] + \sqrt{\frac{2}{3}} U_{cg} \cos\left[\frac{\pi}{6} + \theta\right] + \sqrt{\frac{2}{3}} U_{ag} \sin[\theta];$$

(* Usvorkove=FullSimplify[$\sqrt{U_{d0dqg}^2 + U_{q0dqg}^2}$] *)

$$\text{MatrixForm}\left[U_{0dqg} = \begin{pmatrix} U_{00dqg} \\ U_{d0dqg} \\ U_{q0dqg} \end{pmatrix}\right];$$

3.3.5 Regulace buzení, rotorová napětí

UD, UQ tlumicí vinutí jsou nakrátko

```
UD[t_] := 0
UQ[t_] := 0
```

Regulace buzení

```
Uzad = Un;
Tbuz = 0.050;
Kbuz = 20;
Prebuzeni = 6; (* Strop budicích napětí *)
Podbuzeni = 6; (* musí být symetrické - problém s protnutím počátku *)
```

```
Usvorkove = Sqrt[2/3 (Uag^2 + Ubg^2 + Ucg^2 - Uag Ubg - Ubg Ucg - Uag Ucg)];
OmezovacBuzeni[vstup_] := 1/2 (Prebuzeni - Podbuzeni +
(Prebuzeni + Podbuzeni) Tanh[Podbuzeni - Prebuzeni + 2 vstup /
(Podbuzeni + Prebuzeni)]);
UF[t_] := UFn * OmezovacBuzeni[VystRB[t] + 1.6];
```

```
RovniceRB = {Tbuz * VystRB'[t] + VystRB[t] + Kbuz * (Usvorkove - Uzad) / Un == 0};
(*1 je přepočten pojmenovaných na vztažné*)
PocPodRB = {VystRB[0] == 0}; (* 95 / UFn = 0.655      104.763 / UFn = 0.0121212 *)
NeznameRB = {VystRB[t]};
```

3.3.6 Generátorové rovnice

Generátorové rovnice pro řazení zátěže Lz a Rz do série

```
(* LZs=  $\frac{0.630}{\omega_0 e}$ ;
GenRovniceSGABC={
RZ*Ia[t]+LZs* $\partial_t$ Ia[t]+Ra*Ia[t]+ $\partial_t \psi_a+L0*\partial_t(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])+$ 
R0*(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])==Ua[t]/ $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RZ*Ib[t]+LZs* $\partial_t$ Ib[t]+Rb*Ib[t]+ $\partial_t \psi_b+L0*\partial_t(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])+$ 
R0*(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])==Ub[t]/ $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RZ*Ic[t]+LZs* $\partial_t$ Ic[t]+Rc*Ic[t]+ $\partial_t \psi_c+L0*\partial_t(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])+$ 
R0*(Ia[t]+Ib[t]+Ic[t])==Uc[t]/ $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RF*IF[t]+ $\partial_t \psi_F=-UF[t]/\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RD*ID[t]+ $\partial_t \psi_D=-UD[t]/\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RQ*IQ[t]+ $\partial_t \psi_Q=-UQ[t]/\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ }; *)
```

Generátorové rovnice pro řazení zátěže (Rz+Lzs) || Lzp

```
LZs =  $\frac{0.630}{\omega_0 e}$ ; (* 0.630 odpovídá 0.001 Rz0 *)
RovniceSGABC = {
D[Ia[t] == Iar[t] + Ial[t], t],
(*Ia[t]==Iar[t]+Ial[t], *)
-Uaz[t] == Ra * Ia[t] +  $\partial_t \psi_a + L0 * \partial_t (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) +$ 
R0 * (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) /  $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
Uaz[t] == RZ * Iar[t] + LZs *  $\partial_t$  Iar[t],
Uaz[t] == LZp *  $\partial_t$  Ial[t],

D[Ib[t] == Ibr[t] + Ibl[t], t],
(*Ib[t]==Ibr[t]+Ibl[t], *)
-Ubz[t] == Rb * Ib[t] +  $\partial_t \psi_b + L0 * \partial_t (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) +$ 
R0 * (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) /  $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
Ubz[t] == RZ * Ibr[t] + LZs *  $\partial_t$  Ibr[t],
Ubz[t] == LZp *  $\partial_t$  Ibl[t],

D[Ic[t] == Icr[t] + Icl[t], t],
(*Ic[t]==Icr[t]+Icl[t], *)
-Ucz[t] == Rc * Ic[t] +  $\partial_t \psi_c + L0 * \partial_t (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) +$ 
R0 * (Ia[t] + Ib[t] + Ic[t]) /  $\varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
Ucz[t] == RZ * Icr[t] + LZs *  $\partial_t$  Icr[t],
Ucz[t] == LZp *  $\partial_t$  Icl[t],

RF * IF[t] +  $\partial_t \psi_F = -UF[t] / \varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RD * ID[t] +  $\partial_t \psi_D = -UD[t] / \varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ ,
RQ * IQ[t] +  $\partial_t \psi_Q = -UQ[t] / \varphi_m'[t] \rightarrow \omega_m[t]$ };
```

3.3.7 Moment SG

$$M_e = -\partial_{\varphi_m[t]} W_c;$$

3.4 Seznam neznámých SG

```
NeznameSGABC = {Ia[t], Ib[t], Ic[t], Iar[t], Ibr[t], Icr[t], Ial[t],
Ibl[t], Icl[t], IF[t], ID[t], IQ[t], Uaz[t], Ubz[t], Ucz[t]};
```

3.5 Počáteční podmínky SG

Počáteční podmínky proudů

$$\text{PocPodSGABC} = \left\{ \begin{pmatrix} \text{Ia}[0] & \text{Ib}[0] & \text{Ic}[0] \\ \text{Iar}[0] & \text{Ibr}[0] & \text{Icr}[0] \\ \text{Ial}[0] & \text{Ibl}[0] & \text{Icl}[0] \end{pmatrix} == \begin{pmatrix} -51.31529229203854 & 28.908486083210075 & 21.704209518766003 \\ -51.33432128769481 & 28.538293302238795 & 22.09569098304379 \\ 0.01845627809454925 & 0.36819197168275897 & -0.39390412979292755 \end{pmatrix}, \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & (\text{IF}[0] \text{ ID}[0] \text{ IQ}[0]) == (-280 \ 0 \ 0) \\ & (*, (\text{Uaz}[0] \ \text{Ubz}[0] \ \text{Ucz}[0]) == (-5144 \ 2572 \ 2572) *) \}; \end{aligned}$$

Upřesnění počátečních podmínek proudů - "zesymetřičení"

```
(*MatrixForm[PocPodProuduStare=
  (-51.31529229203854 28.908486083210075 21.704209518766003
  -51.33432128769481 28.538293302238795 22.09569098304379
  0.01845627809454925 0.36819197168275897 -0.39390412979292755)
Posun[funkce_] := (First[FindMaximum[funkce, {t, 0.040, 0.041}]] +
  First[FindMinimum[funkce, {t, 0.020, 0.022}]])/2
MatrixForm[PosunProudu=
  (Posun[Ia[t]/.reseni] Posun[Ib[t]/.reseni] Posun[Ic[t]/.reseni]
  Posun[Iar[t]/.reseni] Posun[Ibr[t]/.reseni] Posun[Icr[t]/.reseni]
  Posun[Ial[t]/.reseni] Posun[Ibl[t]/.reseni] Posun[Icl[t]/.reseni])
MatrixForm[PocPodProuduNove=PocPodProuduStare-PosunProudu*)
```

4 Dynamika pohybu (DP)

4.1 Hledané neznámé DP

```
NeznameDP = {φm[t], ωm[t];
```

4.2 Pohybová rovnice

```
KorekceMomentuDM = 1; (*40 pro 1válec, 10 pro 4válec*)
KorekceJr = 1;
```

```
RovniceDP = {φm'[t] == ωm[t],
  (Jsg + KorekceJr * FourierJr) * ωm'[t]
  + FourierDerivaceJr * ωm[t]^2
  + B * ωm[t]
  + (Me - KorekceMomentuDM * Mdm) == 0
};
```

4.3 Počáteční podmínky DP (úhel a úhlová rychlost)

```
PocPodDP = {ϕm[0] == 0, ωm[0] == ω0m, ϕm'[0] == ω0m};
```

5 Výpočet

5.1 Spojení všech rovnic a neznámých

Všechny rovnice a počáteční podmínky dohromady

```
Rovnice = Union[RovniceTDD, PocPodTDD, RovniceDP, PocPodDP, RovniceSGABC,
PocPodSGABC, RovniceMdms, RovniceRO, PocPodRO, RovniceRB, PocPodRB];
```

Neznámé

```
Nezname = Flatten[
{NeznameTDD, NeznameDP, NeznameSGABC, {Mdms[t]}, NeznameRO, NeznameRB}];
```

5.2 Řešení

NDSolve

```
(*1*)
PripravRovnice = First[NDSolve`ProcessEquations[
Rovnice, Nezname, t,
Method -> {"IndexReduction" -> {Automatic, "ConstraintMethod" -> None}},
(* ... aby to počítalo správně hmotnosti *)
StartingStepSize -> 0.000010, MaxSteps -> ∞,
(* ... aby to počítalo i pro delší STOPcas *)
PrecisionGoal -> 6 (*, AccuracyGoal -> 5 *)
(* ... aby se to vyrovnalo
i s ne zcela přesnými počátečními podmínkami *)
(* Například LZS musí být alespoň  $\frac{0.750}{\omega_0e}$ ,
aby proběhl výpočet i bez nastavení PrecisionGoal*)
(* With PrecisionGoal -> p and AccuracyGoal -> a,
Mathematica attempts to make the numerical error in
a result of of size xbe less than  $10^{-a} + |x| 10^{-p}$ .*
]];
```

```
(*2a*)
UsekVypoctu = 0.5 (* sekundy *);
UsekVypoctu * Range[STOPcas / UsekVypoctu]
```

```
{0.5, 1., 1.5, 2., 2.5, 3., 3.5, 4., 4.5, 5., 5.5, 6., 6.5, 7.}
```

```
(*2b*)
CasVypoctu = First[Timing[NDSolve`Iterate[
PripravRovnice, UsekVypoctu * Range[STOPcas / UsekVypoctu]]]];
PocetKroku = PripravRovnice["TimeStepsUsed"][Forward];
```

```
(*3*)
reseni = NDSolve`ProcessSolutions[PripravRovnice];
```

Report

```
If[PocetKroku == 0, EmitSound[Sound[SoundNote["C1"]]],
EmitSound[Sound[SoundNote["C"]]]];
```

```

MinutyVypoctu = Quotient[CasVypoctu, 60];
SekundyVypoctu = Round[Mod[CasVypoctu, 60]];
Print["Doba výpočtu je ", MinutyVypoctu, ":", SekundyVypoctu]
Print["Počet kroků je ", PocetKroku, "."]
PripravRovnice

```

Doba výpočtu je 45:7

Počet kroků je 365 677.

```
NDSolve`StateData[<0.,7.>]
```

Aktuální řešení například po pužití "Interrupt Evaluation" v aktuálním časovém okamžiku

```

(*
ReseniOkamziku=NDSolve`ProcessSolutions[PripravRovnice,"Forward"]
reseni=NDSolve`ProcessSolutions[PripravRovnice]
*)

```

6 Zpracování výsledků

6.1 Grafy výsledných veličin

6.1.1 Všechny neznámé pro 2 oběhy DM

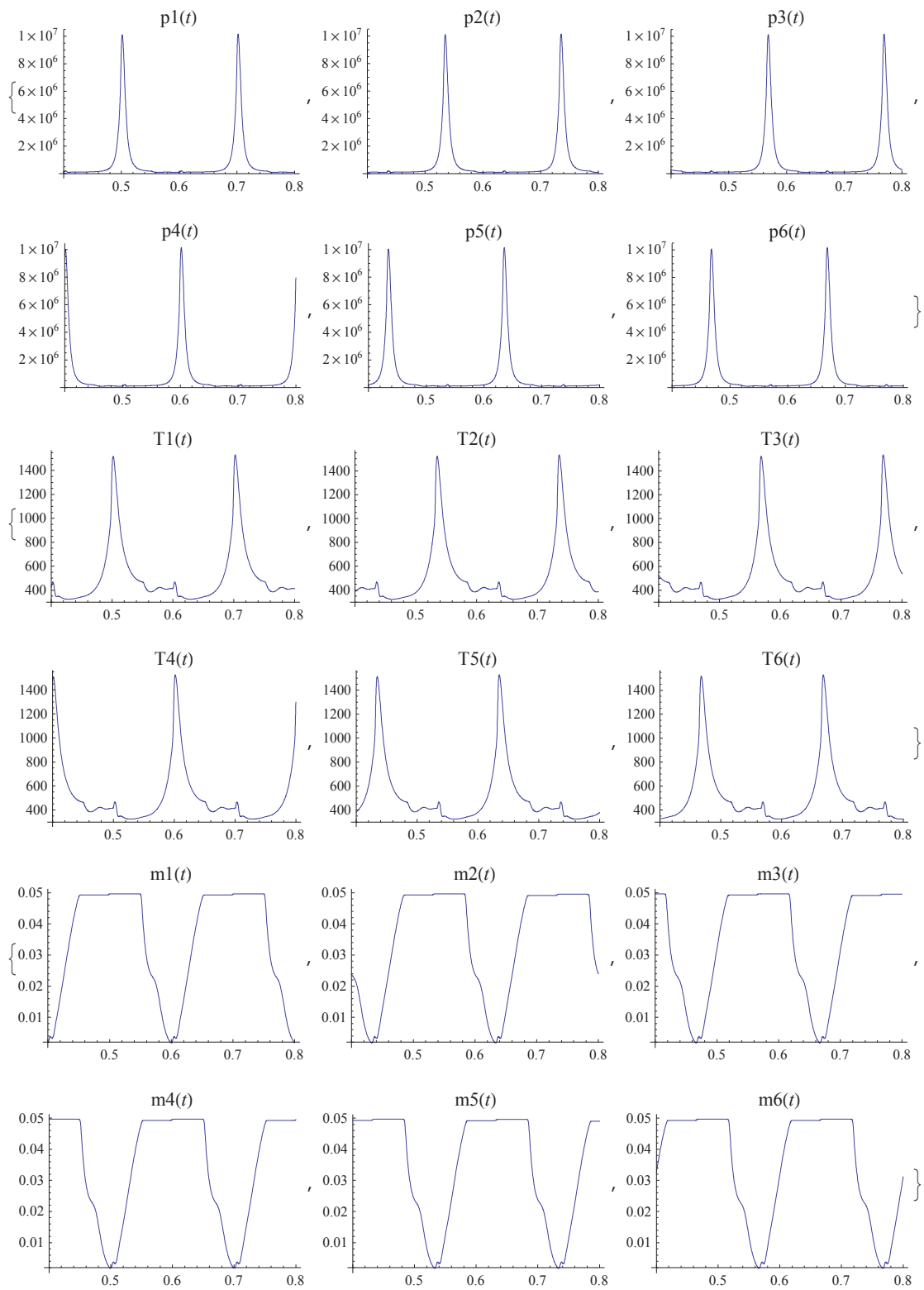
6.1.1.1 První okamžiky děje

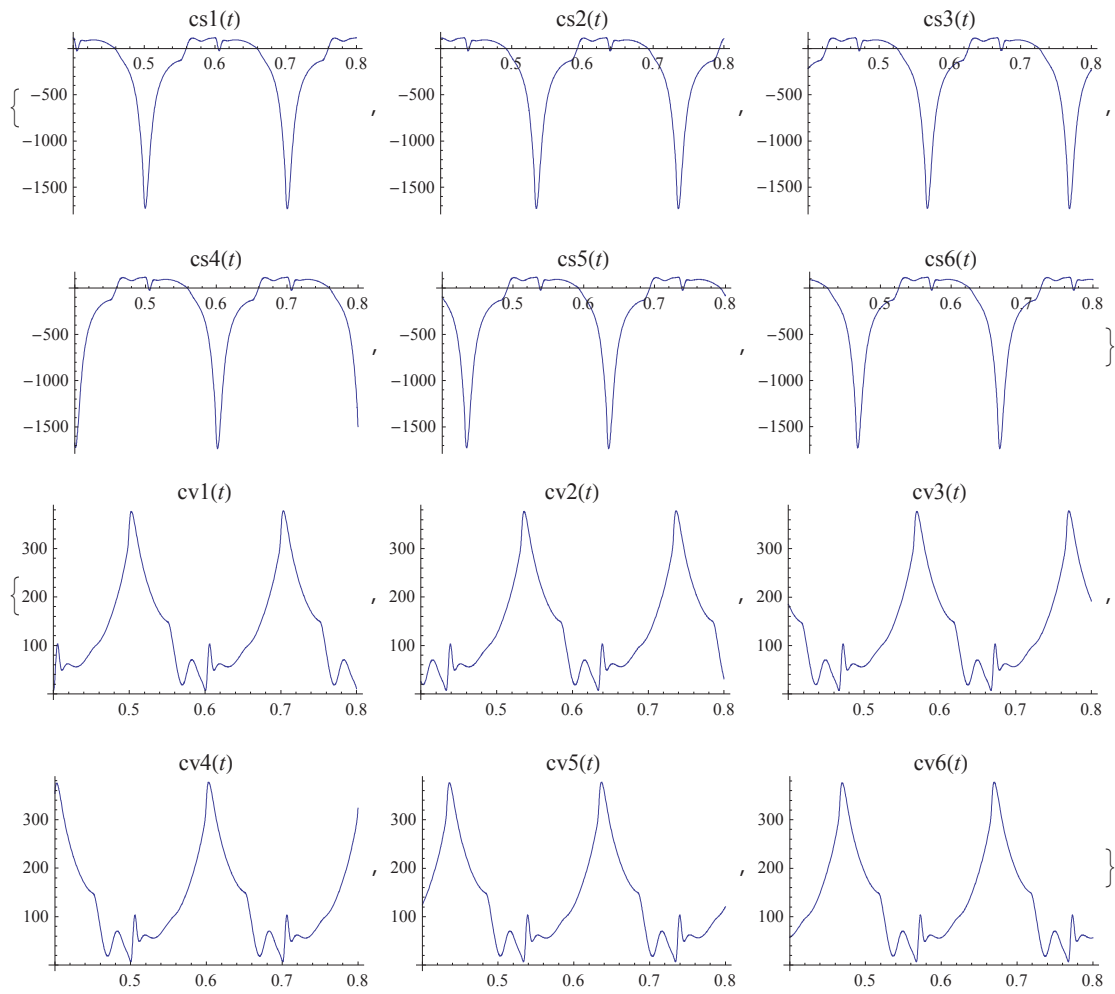
```

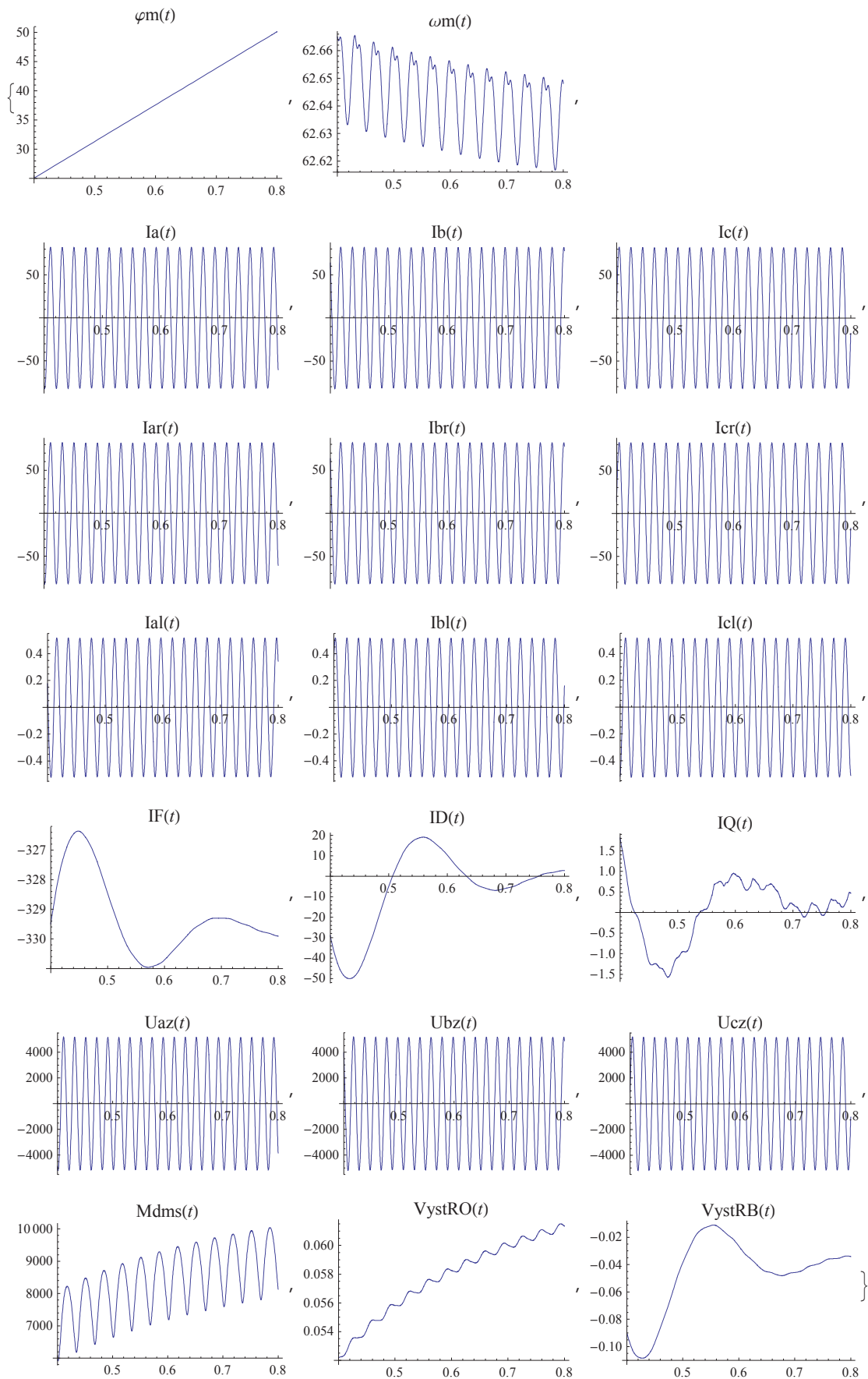
Tmin = 0.4; Tmax = 0.8;

Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 1, nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, nv + 1, 2 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 2 nv + 1, 3 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 3 nv + 1, 4 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 4 nv + 1, 5 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]],
  {PlotRange -> All}], {i, 5 nv + 1, Length[Nezname]}]

```

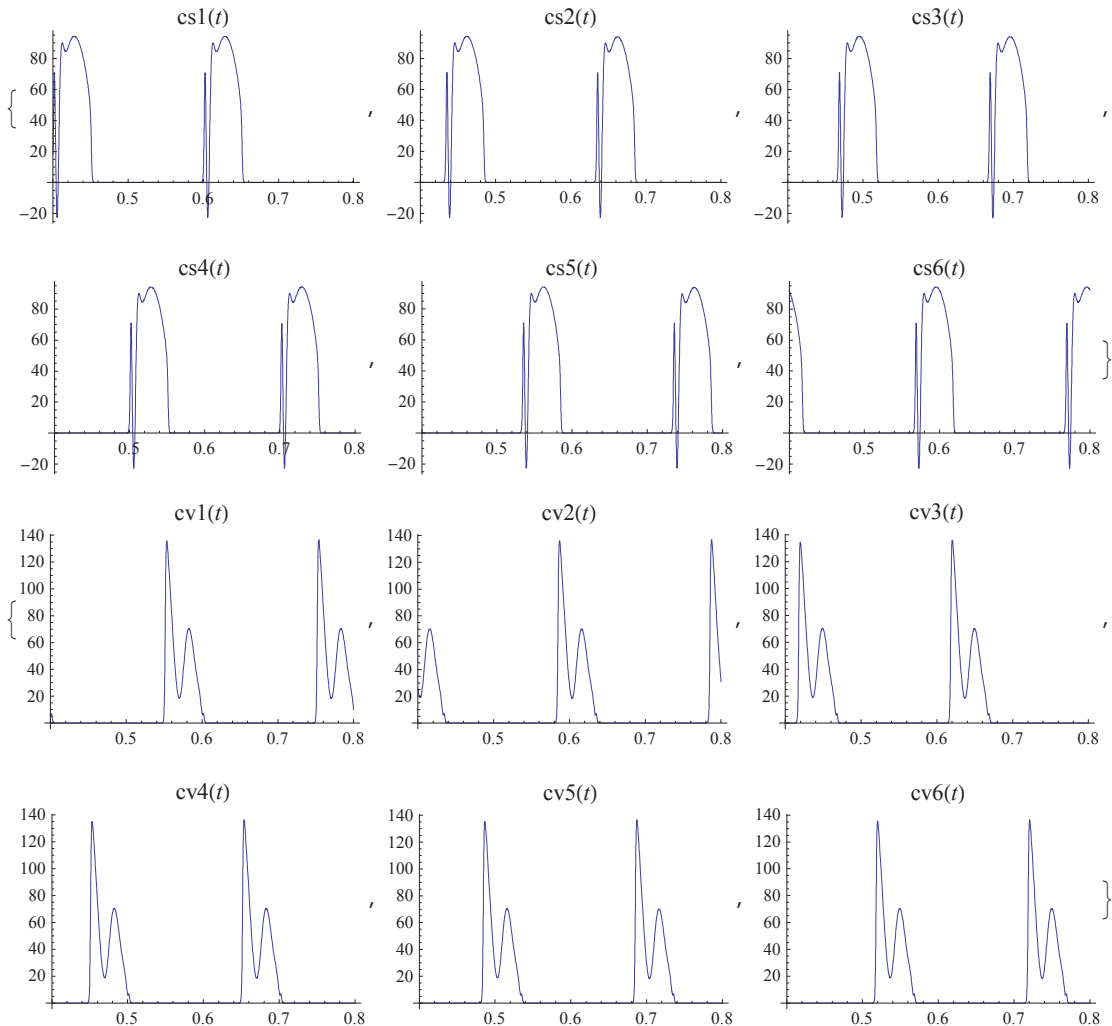







```

Table[Plot[fceVentilu[φm[t]][[1, i - 3 nv]] * Nezname[[i]] /. reseni,
{t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]],
{PlotRange -> All}], {i, 3 nv + 1, 4 nv}] (*sání*)
Table[Plot[fceVentilu[φm[t]][[2, i - 4 nv]] * Nezname[[i]] /. reseni,
{t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}],
{i, 4 nv + 1, 5 nv}] (*výfuk*)
    
```

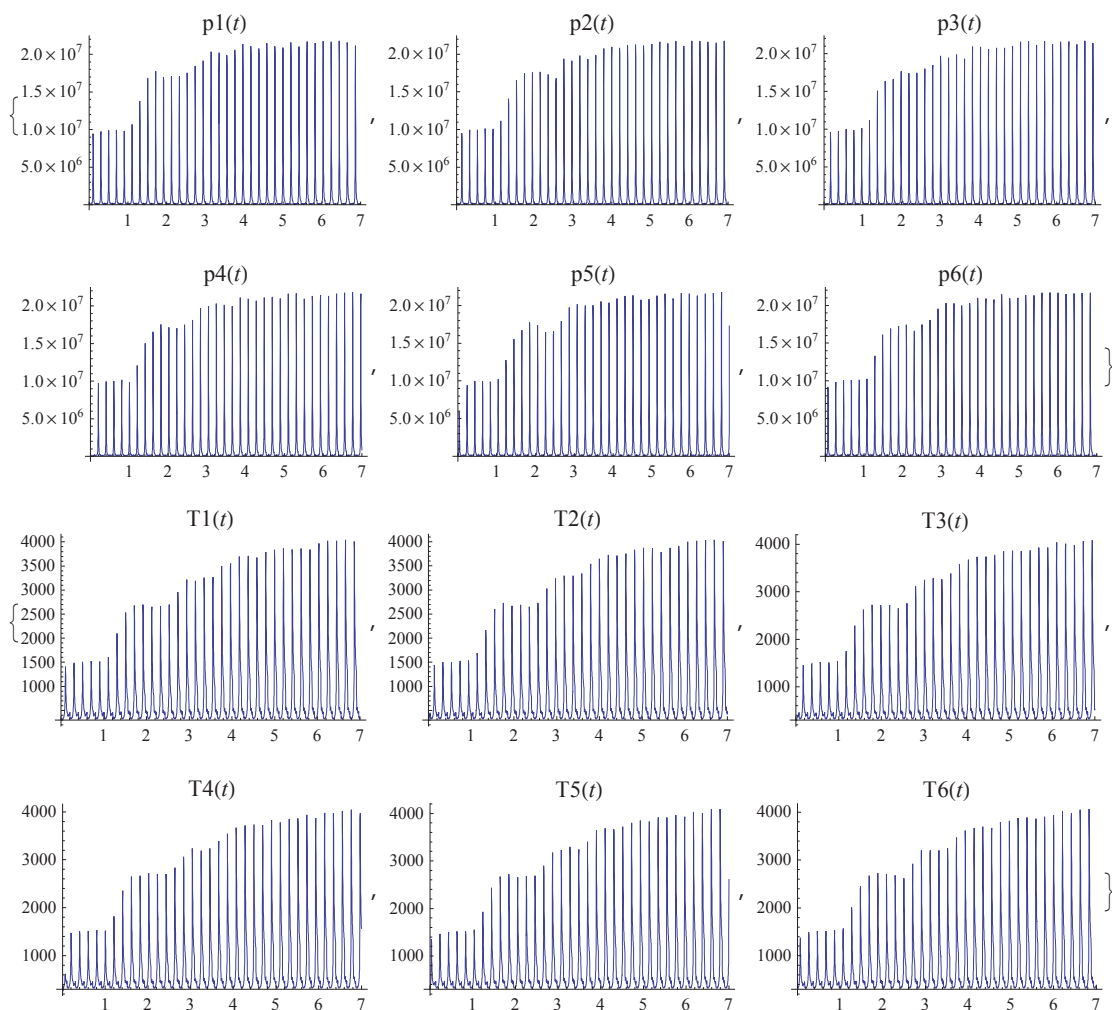


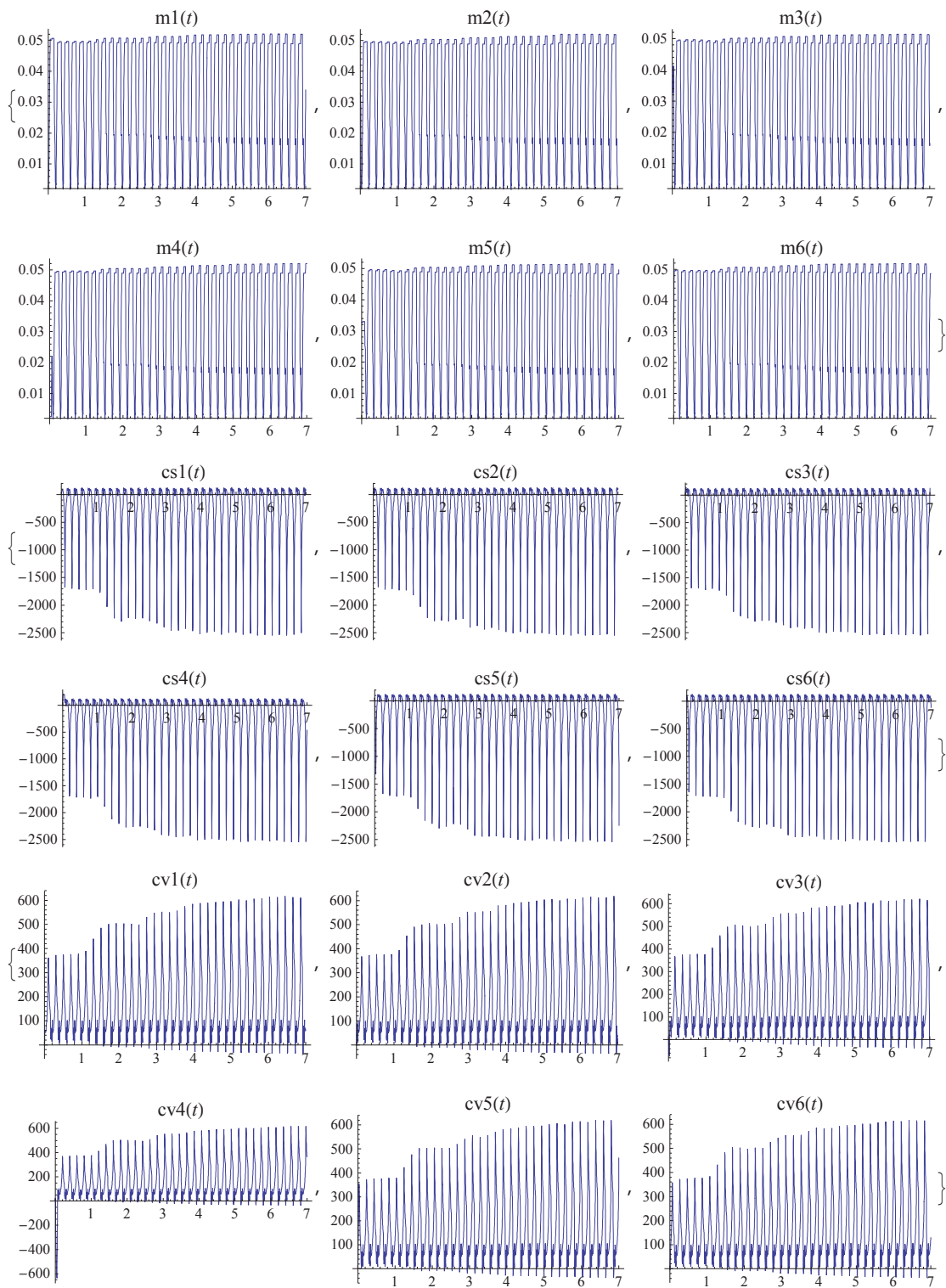
6.1.1.2 Poslední okamžiky děje

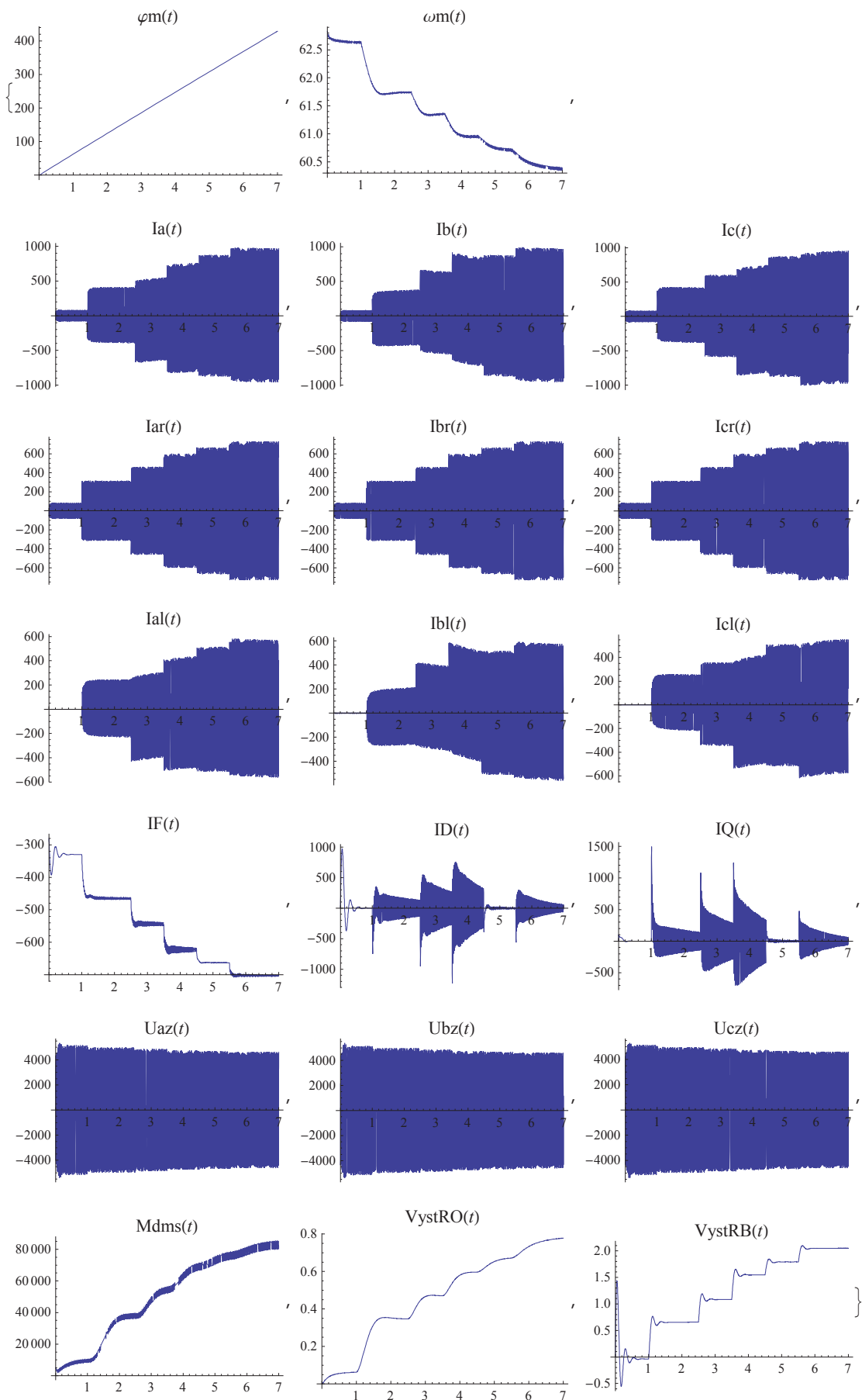
6.1.2 Všechny neznámé pro celý děj

```
Tmin = 0; Tmax = STOPcas;
```

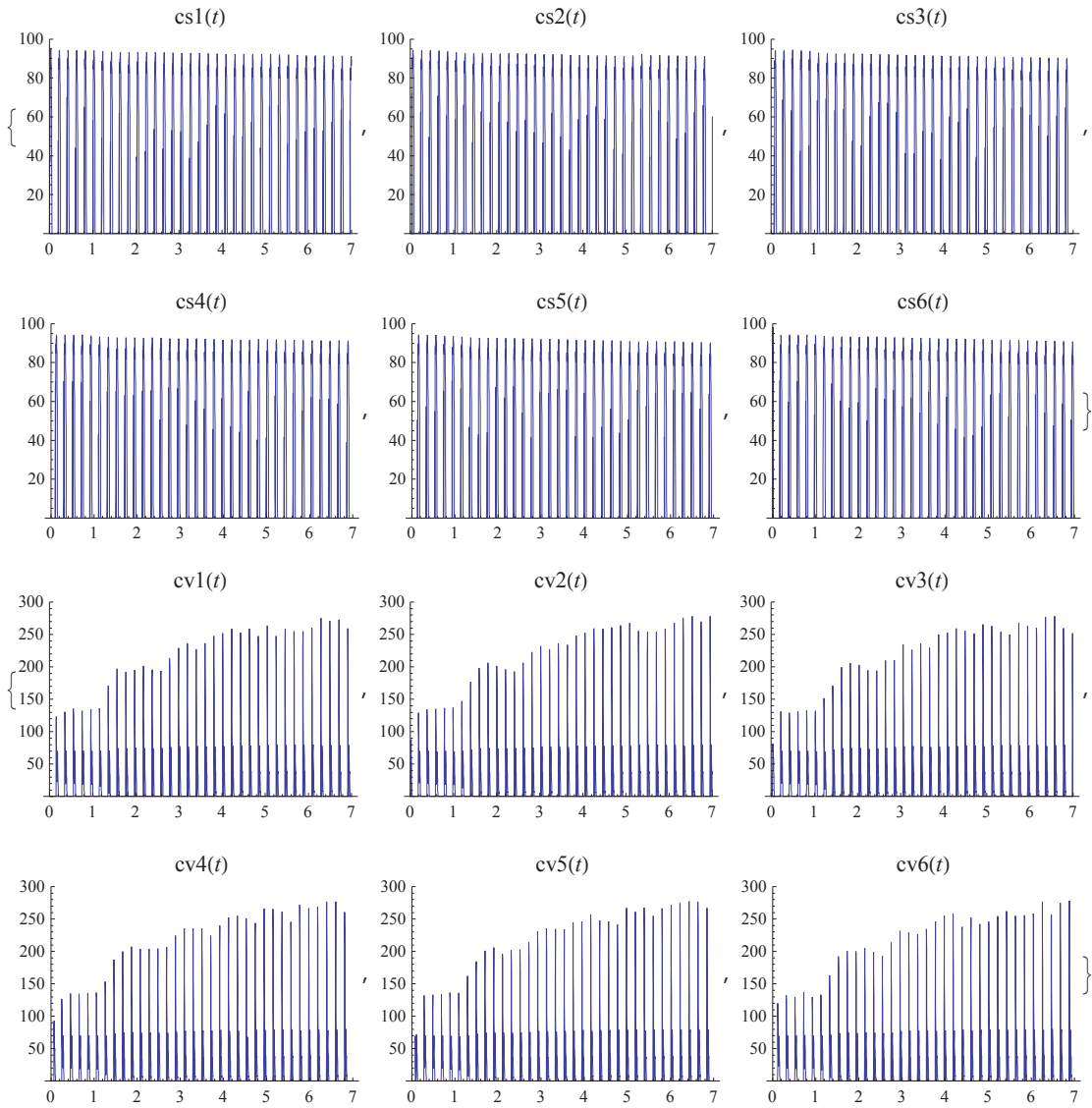
```
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 1, nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, nv + 1, 2 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 2 nv + 1, 3 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 3 nv + 1, 4 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax},
  PlotLabel -> Nezname[[i]], {PlotRange -> All}], {i, 4 nv + 1, 5 nv}]
Table[Plot[Nezname[[i]] /. reseni, {t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]],
  {PlotRange -> All}], {i, 5 nv + 1, Length[Nezname]}]
```







```
Table[Plot[fceVentilu[ $\varphi$ m[t]][[1, i - 3 nv]] * Nezname[[i]] /. reseni,
{t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]],
PlotRange -> {Automatic, {0, 100}}, {i, 3 nv + 1, 4 nv}] (*sání*)
Table[Plot[fceVentilu[ $\varphi$ m[t]][[2, i - 4 nv]] * Nezname[[i]] /. reseni,
{t, Tmin, Tmax}, PlotLabel -> Nezname[[i]],
PlotRange -> {Automatic, {0, 300}}, {i, 4 nv + 1, 5 nv}] (*výfuk*)
```



6.2 Příprava odvozených veličin

6.2.1 Proud

```

resIa[t_] = Ia[t] /. reseni;
resIb[t_] = Ib[t] /. reseni;
resIc[t_] = Ic[t] /. reseni;
resIF[t_] = IF[t] /. reseni;
resID[t_] = ID[t] /. reseni;
resIQ[t_] = IQ[t] /. reseni;

resdIa[t_] =  $\partial_t$  (Ia[t] /. reseni);
resdIb[t_] =  $\partial_t$  (Ib[t] /. reseni);
resdIc[t_] =  $\partial_t$  (Ic[t] /. reseni);
resdIF[t_] =  $\partial_t$  (IF[t] /. reseni);
resdID[t_] =  $\partial_t$  (ID[t] /. reseni);
resdIQ[t_] =  $\partial_t$  (IQ[t] /. reseni);

reseniID = {Ia'[t] -> resdIa[t], Ib'[t] -> resdIb[t], Ic'[t] -> resdIc[t],
  IF'[t] -> resdIF[t], ID'[t] -> resdID[t], IQ'[t] -> resdIQ[t]};
rozsirenereseni = Flatten[{reseniID, reseni}];

```

6.2.2 Napětí (interpolace)

```

resUabcg = Uabcg /. rozsirenereseni;
resU0dgg = U0dgg /. rozsirenereseni;

(*Toto je určeno pro výpočet
  InterpSsg při dlouhé době simulovaného děje*)
InterpResUag = Interpolation[
  Table[{t, resUabcg[[1]]}, {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];
InterpResUbg = Interpolation[Table[{t, resUabcg[[2]]},
  {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];
InterpResUcg = Interpolation[Table[{t, resUabcg[[3]]},
  {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];

```

6.2.3 Magnetické toky (interpolace)

```

resd $\psi$ a =  $\partial_t$  ( $\psi$ a /. reseni);
resd $\psi$ b =  $\partial_t$  ( $\psi$ b /. reseni);
resd $\psi$ c =  $\partial_t$  ( $\psi$ c /. reseni);

(*Toto je určeno pro výpočet
  InterpPsge při dlouhé době simulovaného děje*)
InterpResd $\psi$ a = Interpolation[Table[{t, resd $\psi$ a}, {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];
InterpResd $\psi$ b = Interpolation[Table[{t, resd $\psi$ b}, {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];
InterpResd $\psi$ c = Interpolation[Table[{t, resd $\psi$ c}, {t, 0, STOPcas, 0.0001}]];

```

6.2.4 Frekvence, úhel δ

```

res $\omega$ m =  $\omega$ m[t] /. reseni;
resf[t_] = Evaluate[ $\frac{\omega e[t]}{2 * \pi}$  /. reseni];
res $\delta$ [t_] = Evaluate[ $\varphi e[t] - \omega 0 e * t$  /. reseni];
(* představuje rozdíl skutečného úhlu otočení od fundamentálního  $\omega 0 e * t$  *)

```

6.2.5 Výkony

```
Pdm = KorekceMomentuDM * Mdm * ωm[t] /. reseni;
Pdms = KorekceMomentuDM * Mdms[t] * ωm[t] /. reseni;
```

```
Psgm = Me * resωm /. reseni;
Pa =
  ((Jsg + KorekceJr * FourierJr) * ∂t resωm + FourierDerivaceJr * resωm2) * resωm /.
  reseni;
Pb = (B * resωm) ∂t resωm;
```

```
(*Toto funguje jen pro krátké doby výpočtu,
jinak problém s výpočetní pamětí*)
(*Psg=-((Ia[t]/.reseni)*∂t(ψa/.reseni)+
(Ib[t]/.reseni)*∂t(ψb/.reseni)+(Ic[t]/.reseni)*∂t(ψc/.reseni));*)

(*Toto je určeno pro dlouhé doby výpočtu*)
InterpPsg = -(resIa[t] * InterpResdψa[t] +
resIb[t] * InterpResdψb[t] + resIc[t] * InterpResdψc[t]);
```

```
(*Toto funguje jen pro krátké doby výpočtu,
jinak problém s výpočetní pamětí*)
(*Ssg=-((Ia[t]* resUabcg[[1]]+Ib[t]* resUabcg[[2]]+Ic[t]* resUabcg[[3]])/.
reseni;*)

(*Qsg=√Abs[Ssg2-Psg2]; (*Pozor na výpočetní chybu,
kdy je Psg>Ssg *) *)

(*Toto je určeno pro dlouhé doby výpočtu*)
InterpSsg = -(resIa[t] * InterpResUag[t] +
resIb[t] * InterpResUbg[t] + resIc[t] * InterpResUcg[t]);
InterpQsg = √Abs[InterpSsg2 - InterpPsg2] (* Pozor na výpočetní chybu,
kdy je InterpPsg>InterpSsg *);
```

```
InterpPz = -(Iar[t] * InterpResUag[t] +
Ibr[t] * InterpResUbg[t] + Icr[t] * InterpResUcg[t]) /. reseni;
InterpQz = (Ial[t] * InterpResUag[t] + Ibl[t] * InterpResUbg[t] +
Icl[t] * InterpResUcg[t]) /. reseni;
InterpSz = √InterpPz2 + InterpQz2 ;
```

6.2.6 Impedance zátěže

```
resXLZs = LZs * ωe[t] /. reseni;
resXLZp = LZp * ωe[t] /. reseni;
```

6.3 Grafy odvozených veličin

6.3.1 Globální nastavení grafů

Časová osa grafů

```

Tmax = STOPcas;
Tzoom = 3.500;
Tminus = -0.100; Tplus = 0.400;
Tpred = -0.060; Tpo = 0.060;

Tlminus = Tzoom + Tminus;
Tlplus = Tzoom + Tplus;
T2minus = Tzoom + Tpred;
T2plus = Tzoom + Tpo;

```

Šablona grafů

```

Casy = {{t, 0, Tmax}, {t, Tlminus, Tlplus},
        {t, T2minus, Tzoom}, {t, Tzoom, T2plus}};
PopisOs = {Automatic, Automatic};
MeritkoOs = All;

SablonuGrafu[Veliciny_, Casy_,
              JmenoGrafu_, OznaceniOs_, PopisOs_, MeritkoOs_] :=
Plot[Veliciny, Casy, PlotLabel → JmenoGrafu, GridLines → Automatic,
     PlotStyle → {{RGBColor[1, 0, 0]}, {RGBColor[0, 0.5, 0]},
                  {RGBColor[0, 0, 1]}, {RGBColor[1, 0, 0], Dashing[{0.02, 0.02}]},
                  {RGBColor[0, 1, 0], Dashing[{0.02, 0.02}]},
                  {RGBColor[0, 0, 1], Dashing[{0.02, 0.02]}}}, {PlotRange → MeritkoOs},
     AxesLabel → OznaceniOs, Ticks → PopisOs, ImageSize → 130(*485*)];

VytvorGrafy := ReleaseHold[
  Thread[PomocnaFce[Hold[Veliciny], Casy, JmenoGrafu, Hold[OznaceniOs],
                  Hold[PopisOs], Hold[MeritkoOs]]] /. PomocnaFce → SablonuGrafu;

```

6.3.2 Příprava konkrétních grafů

6.3.2.1 Napětí ABC

```

Veliciny = {resUabcg[[1]], resUabcg[[2]], resUabcg[[3]]};
JmenoGrafu = {"Napětí ABC - Celý rozsah",
              "Napětí ABC - Detail", "Napětí ABC - Před", "Napětí ABC - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Uac, Ubc, Ucg [V]"};

GrafNapetiABC = VytvorGrafy;

```

6.3.2.2 Napětí 0dq

```

Veliciny = {resU0dqg[[1]], resU0dqg[[2]],
            resU0dqg[[3]],  $\sqrt{\text{resU0dqg}[[2]]^2 + \text{resU0dqg}[[3]]^2}$ };
JmenoGrafu = {"Napětí 0dq - Celý rozsah", "Napětí 0dq - Detail",
              "Napětí 0dq - Před", "Napětí 0dq - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Uo, Udq, Uqg,
              UabsG [V]"};

GrafNapeti0dq = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {resU0dqq[[3]],  $\sqrt{\text{resU0dqq}[[2]]^2 + \text{resU0dqq}[[3]]^2}$ };
JmenoGrafu = {"Napětí q - Celý rozsah",
  "Napětí q - Detail", "Napětí q - Před", "Napětí q - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "UqG, UabsG [V]"};

GrafNapetiQabs = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = { $\frac{1}{U_n} \sqrt{\text{resU0dqq}[[2]]^2 + \text{resU0dqq}[[3]]^2}$ };
JmenoGrafu =
  {"Napětí generátoru - Celý rozsah", "Napětí generátoru - Detail",
  "Napětí generátoru - Před", "Napětí generátoru - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "UabsG/Un [pu]"};

GrafNapetiabspu = VytvorGrafy;

```

6.3.2.3 Buzení a regulace U

```

Veliciny = {UF[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Buzení - Celý rozsah",
  "Buzení - Detail", "Buzení - Před", "Buzení - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "UF [V]"};

GrafBuzeniU = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {-IF[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Buzení - Celý rozsah",
  "Buzení - Detail", "Buzení - Před", "Buzení - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "-IF [A]"};

GrafBuzeniI = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {-Kbuz  $\frac{\text{Usvorkove} - \text{Uzad}}{U_n}$  /. rozsirenereseni,
  VystRB[t] /. reseni,  $\frac{U_F[t]}{U_{Fn}}$  /. reseni, Tbuz * D[VystRB[t] /. reseni, t]};
JmenoGrafu = {"Regulace buzení - Celý rozsah", "Regulace buzení - Detail",
  "Regulace buzení - Před", "Regulace buzení - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "-ΔU.Kbuz, RB,
 $\frac{U_F}{U_{Fn}}$ , RB' [p.u.]"};

GrafRB = VytvorGrafy;

```

6.3.2.4 Proudý generátoru

```

Veliciny = {Ia[t] /. reseni, Ib[t] /. reseni, Ic[t] /. reseni};
JmenoGrafu =
  {"Statorové proudy ABC - Celý rozsah", "Statorové proudy ABC - Detail",
  "Statorové proudy ABC - Před", "Statorové proudy ABC - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Ia, Ib, Ic [A]"};

GrafProudStatorABC = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {ID[t] /. reseni, IQ[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Rotorové proudy - Celý rozsah", "Rotorové proudy - Detail",
  "Rotorové proudy - Před", "Rotorové proudy - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "ID, IQ [A]"};

GrafProudRotor = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {Ia[t] /. reseni, Iar[t] /. reseni, Ial[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Obvodové proudy - Celý rozsah", "Obvodové proudy - Detail",
  "Obvodové proudy - Před", "Obvodové proudy - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Ia, IaR, IaL [A]"};

GrafProudGRL = VytvorGrafy;

```

6.3.2.5 Magnetické toky

```

Veliciny = {ψa /. reseni, ψb /. reseni, ψc /. reseni};
JmenoGrafu =
  {"Magnetické toky SG - Celý rozsah", "Magnetické toky SG - Detail",
  "Magnetické toky SG - Před", "Magnetické toky SG - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "ψa, ψb, ψc [Wb]"};

GrafTok = VytvorGrafy;

```

6.3.2.6 Zátěž

```

MeritkoOsMemory = MeritkoOs;
MeritkoOs = {0, 100};

Veliciny = {RZ, resXLZs, resXLZp};
JmenoGrafu =
  {"Impedance zátěže - Celý rozsah", "Impedance zátěže - Detail",
  "Impedance zátěže - Před", "Impedance zátěže - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "RZ, XZs, XZp [Ω]"};

GrafZatezSP = VytvorGrafy;

MeritkoOs = MeritkoOsMemory;

```

```

Veliciny = {RZ, resXLZs};
JmenoGrafu =
  {"Impedance zátěže - Celý rozsah", "Impedance zátěže - Detail",
  "Impedance zátěže - Před", "Impedance zátěže - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "RZ, XZs [Ω]"};

GrafZatezS = VytvorGrafy;

```

6.3.2.7 Frekvence, úhel δ , regulace otáček

```

Veliciny = {resf[t]};
JmenoGrafu = {"Frekvence - Celý rozsah",
  "Frekvence - Detail", "Frekvence - Před", "Frekvence - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "f [Hz]"};

GrafFrekvence = VytvorGrafy;

```

```

PopisOsMemory = PopisOs;
MeritkoOsMemory = MeritkoOs;

PopisOs = {Automatic, {-π, -π/2, 0, π/2, π}};
MeritkoOs = {-π, π};
Veliciny = {Mod[resδ[t] + π, 2π] - π};
JmenoGrafu = {"Úhel δ - Celý rozsah",
              "Úhel δ - Detail", "Úhel δ - Před", "Úhel δ - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "δ [rad]"};

GrafDelta = VytvorGrafy;

PopisOs = PopisOsMemory;
MeritkoOs = MeritkoOsMemory;

```

```

Veliciny = {-Kro *  $\frac{\omega_m[t] - \omega_{zad}}{\omega_{0m}}$  /. reseni, VystRO[t] /. reseni,
           Plyn /. reseni, Tehp * D[VystRO[t] /. reseni, t]};
JmenoGrafu = {"Regulace otáček - Celý rozsah", "Regulace otáček - Detail",
              "Regulace otáček - Před", "Regulace otáček - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "-Δωm.Kro, RO,
Plyn, RO' [p.u.]"};

GrafRO = VytvorGrafy;

```

6.3.2.8 Momenty

```

Veliciny = {Me /. reseni, KorekceMomentuDM * Mdms[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Momenty - Celý rozsah",
              "Momenty - Detail", "Momenty - Před", "Momenty - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Mel, Mmech.stř. [N.m]"};

GrafMoment = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny =
  {KorekceMomentuDM * Mdm /. reseni, KorekceMomentuDM * Mdms[t] /. reseni};
JmenoGrafu = {"Momenty - Celý rozsah", "Momenty - Detail",
              "Momenty - Před", "Momenty - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "Mmech., Mmech.stř. [N.m]"};

GrafMomentDM = VytvorGrafy;

```

6.3.2.9 Výkony

```

Veliciny = {Pdm, Pdms};
JmenoGrafu =
  {"Mechanické výkony DM - Celý rozsah", "Mechanické výkony DM - Detail",
   "Mechanické výkony DM - Před", "Mechanické výkony DM - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "PDM, PDM stř. [W]"};

GrafVykon1 = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {Pdms, Psgm, Pa / 10, 100 * Pb};
JmenoGrafu = {"Výkony v pohybové rovnici - Celý rozsah",
  "Výkony v pohybové rovnici - Detail",
  "Výkony v pohybové rovnici - Před", "Výkony v pohybové rovnici - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "PDM stř., PSGm,
Pa/10, Pb*100 [W]"} ;

GrafVykon2 = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {InterpPsge, InterpSsg, InterpQsg};
JmenoGrafu =
  {"Elektrické výkony SG - Celý rozsah", "Elektrické výkony SG - Detail",
  "Elektrické výkony SG - Před", "Elektrické výkony SG - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "PSGe, SSG, |QSG| [W, VA]"} ;

GrafVykon3 = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {InterpPz, InterpSz, InterpQz};
JmenoGrafu = {"Příkon zátěže - Celý rozsah", "Příkon zátěže SG - Detail",
  "Příkon zátěže SG - Před", "Příkon zátěže SG - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "PZ, SZ, QZ [W, VA]"} ;

GrafVykon4 = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {Pdms, Psgm, InterpPsge, InterpPz};
JmenoGrafu = {"Činné výkony DM, SG a na zátěži - Celý rozsah",
  "Činné výkony DM, SG a na zátěži - Detail",
  "Činné výkony DM, SG a na zátěži - Před",
  "Činné výkony DM, SG a na zátěži - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "-PDM stř., PSGm,
PSGe, PZ [W]"} ;

GrafVykon5 = VytvorGrafy;

```

```

Veliciny = {InterpQsg, InterpQz};
JmenoGrafu = {"Jalové výkony SG a na zátěži - Celý rozsah",
  "Jalové výkony SG a na zátěži - Detail",
  "Jalové výkony SG a na zátěži - Před",
  "Jalové výkony SG a na zátěži - Po"};
OznaceniOs = {"t [s]", "QSG, QZ, [VA]"} ;

GrafVykon6 = VytvorGrafy;

```

6.3.3 Tisk grafů

```

GrafNapetiABC

GrafNapeti0dq
GrafNapetiqabs
GrafNapetiabspu

GrafBuzeniU
GrafBuzeniI
GrafRB

GrafProudStatorABC
GrafProudRotor
GrafProudGRL

GrafTok

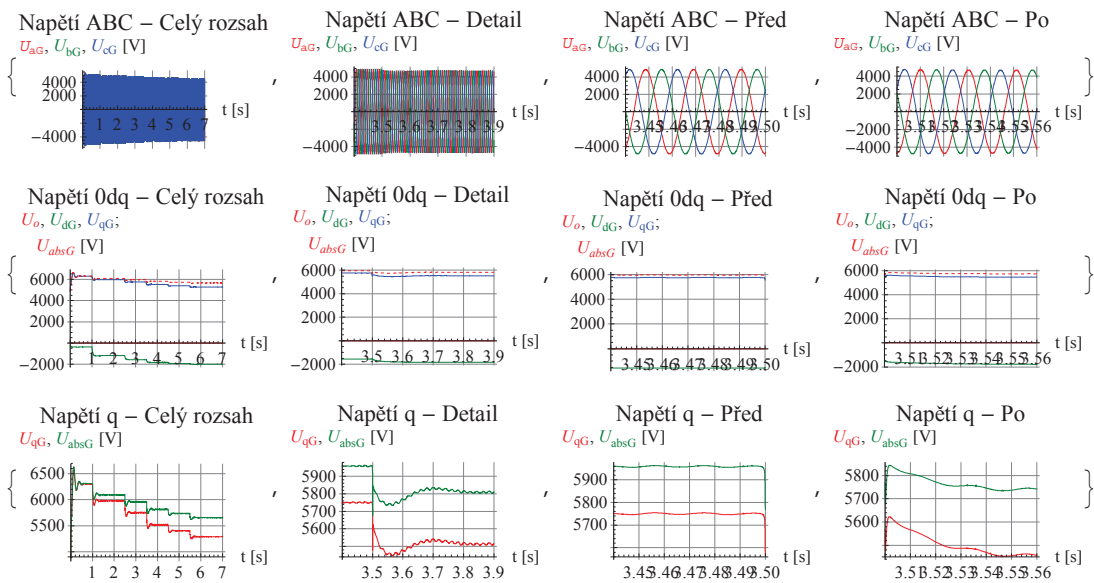
GrafZatezSP
GrafZatezS

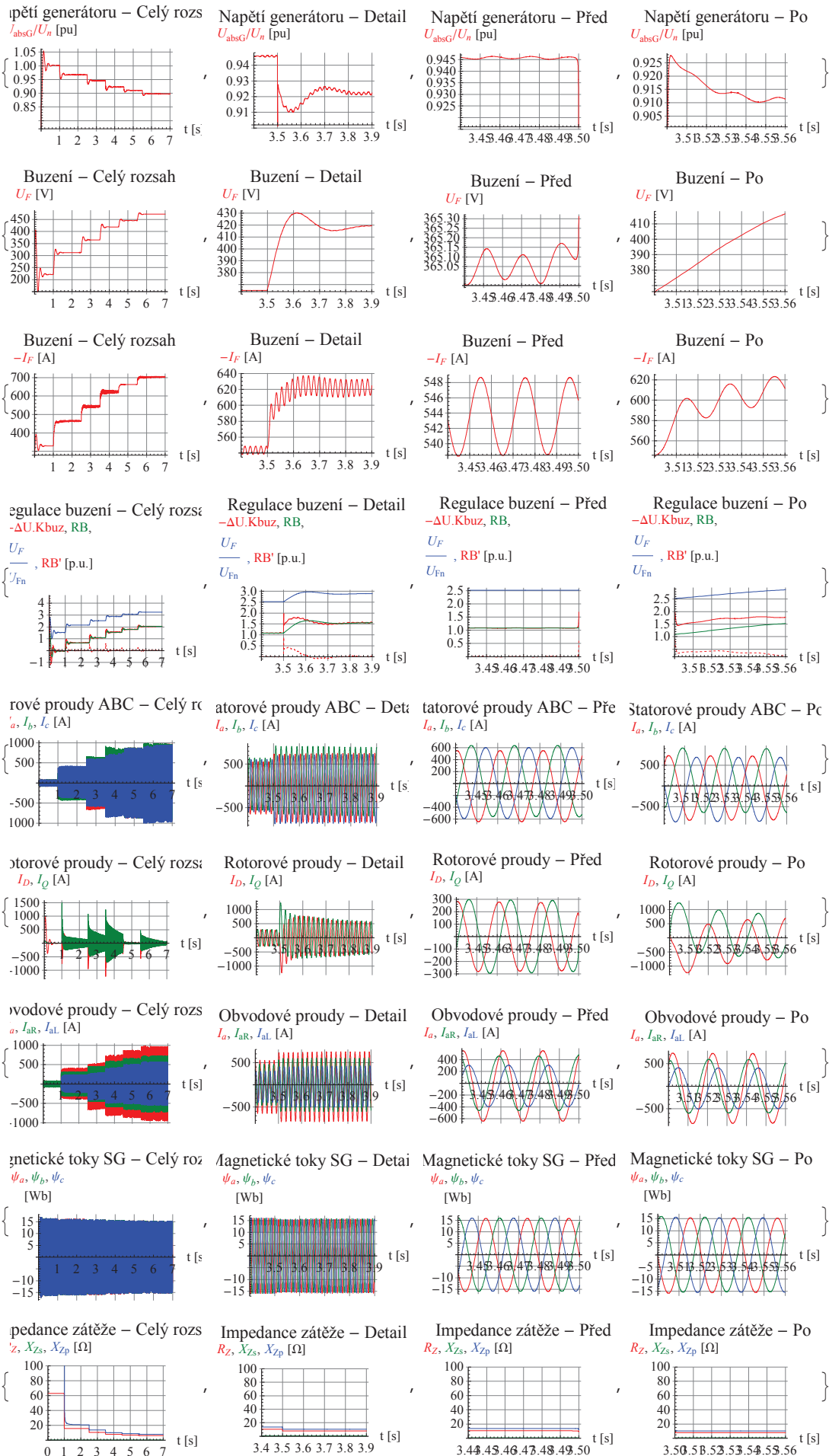
GrafFrekvence
GrafDelta
GrafRO

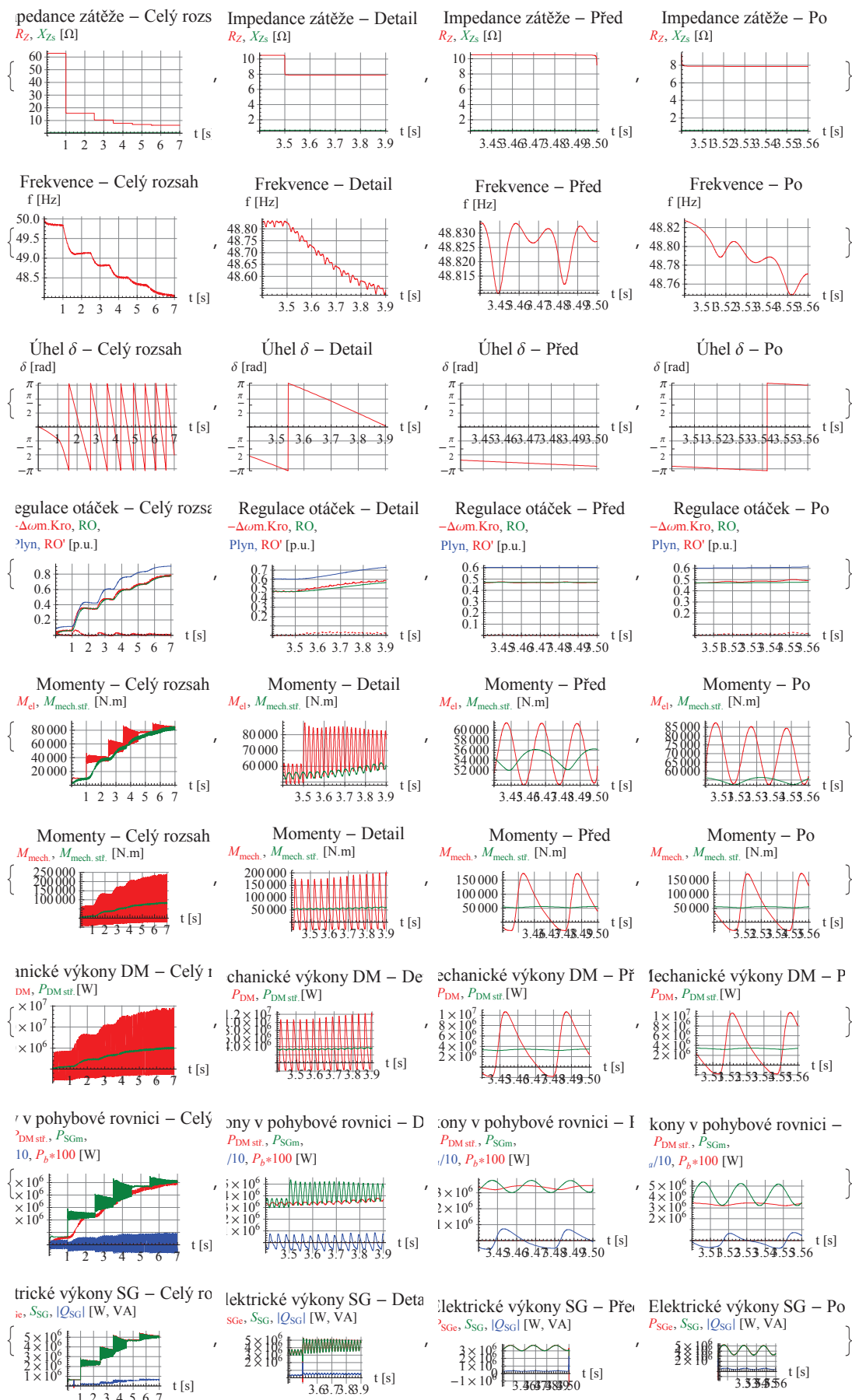
GrafMoment
GrafMomentDM

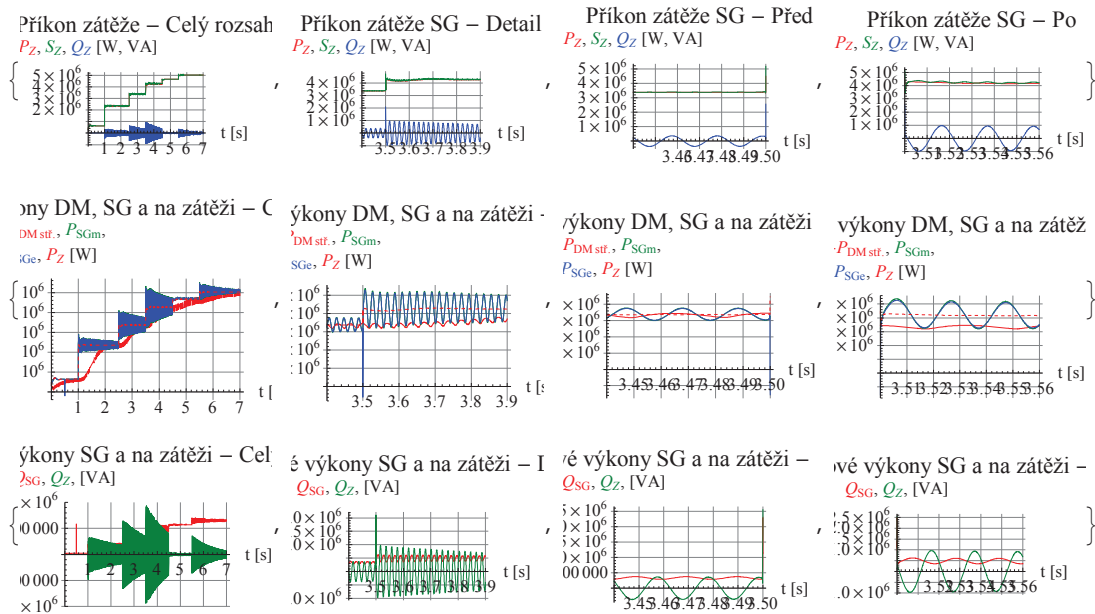
GrafVykon1
GrafVykon2
GrafVykon3
GrafVykon4
GrafVykon5
GrafVykon6

EmitSound[Sound[SoundNote["a"]]]
    
```









6.4 Čísla pro kontrolu

Kolik dělá zátěž výkonově?
... a další výpočty přes prsty

```

Uzs = 6300(**0.92*);
Uzf = Uzs / sqrt(3);
Uzfmax = Uzf * sqrt(2);
Print["Sdružené jmenovité efektivní napětí je ", N[Uzs/1000], " kV"]
Print["Fázové jmenovité efektivní napětí je ", N[Uzf/1000], " kV"]
Print["Fázové maximální napětí je ", N[Uzfmax/1000], " kV"]

Rzt = 63;
Pzt = Uzs^2 / Rzt;
Izf = Uzf / Rzt;
Izfmax = Izf * sqrt(2);
Print["
Příkon zátěže ", Rzt, "Ω při jmenovitém napětí je ",
N[Pzt/1000], " kW, t.j. ", N[Pzt/Pn], " Pn"]
Print["Proud zátěže (fázový, efektivní) při jmenovitém napětí je ",
N[Izf], " A"]
Print["Proud zátěže (fázový, maximální) při jmenovitém napětí je ",
N[Izfmax], " A"]

Rzt = 15.75;
Pzt = Uzs^2 / Rzt;
Izf = Uzf / Rzt;
Izfmax = Izf * sqrt(2);
Print["
Příkon zátěže ", Rzt, "Ω při jmenovitém napětí je ",
N[Pzt/1000], " kW, t.j. ", N[Pzt/Pn], " Pn"]
Print["Proud zátěže (fázový, efektivní) při jmenovitém napětí je ",
N[Izf], " A"]
Print["Proud zátěže (fázový, maximální) při jmenovitém napětí je ",
N[Izfmax], " A"]

```

Sdružené jmenovité efektivní napětí je 6.3 kV

Fázové jmenovité efektivní napětí je 3.63731 kV

Fázové maximální napětí je 5.14393 kV

Příkon zátěže 63Ω při jmenovitém napětí je 630. kW, t.j. 0.1 Pn

Proud zátěže (fázový, efektivní) při jmenovitém napětí je 57.735 A

Proud zátěže (fázový, maximální) při jmenovitém napětí je 81.6497 A

Příkon zátěže 15.75Ω při jmenovitém napětí je 2520. kW, t.j. 0.4 Pn

Proud zátěže (fázový, efektivní) při jmenovitém napětí je 230.94 A

Proud zátěže (fázový, maximální) při jmenovitém napětí je 326.599 A

PŘÍLOHA 6-1

Výchozí výpočtový případ

výsledky simulace

Přehled grafů

1. Technologické veličiny diesel motoru
 - 1.1. celý rozsah
 - 1.2. dva pracovní cykly na počátku děje
 - 1.3. dva pracovní cykly na konci děje
2. Elektrické veličiny SG (jeden graf celého děje a jeden graf v detailu)
 - 2.1. Napětí na SG
 - 2.2. Budicí systém SG – napětí, proud, regulace,
 - 2.3. Proudů SG
 - 2.4. Magnetické toky v SG
 - 2.5. Impedance zátěže
3. Elektro mechanické veličiny DG (jeden graf celého děje a jeden graf v detailu)
 - 3.1. Frekvence
 - 3.2. Regulace otáček
 - 3.3. Momenty
 - 3.4. Výkony

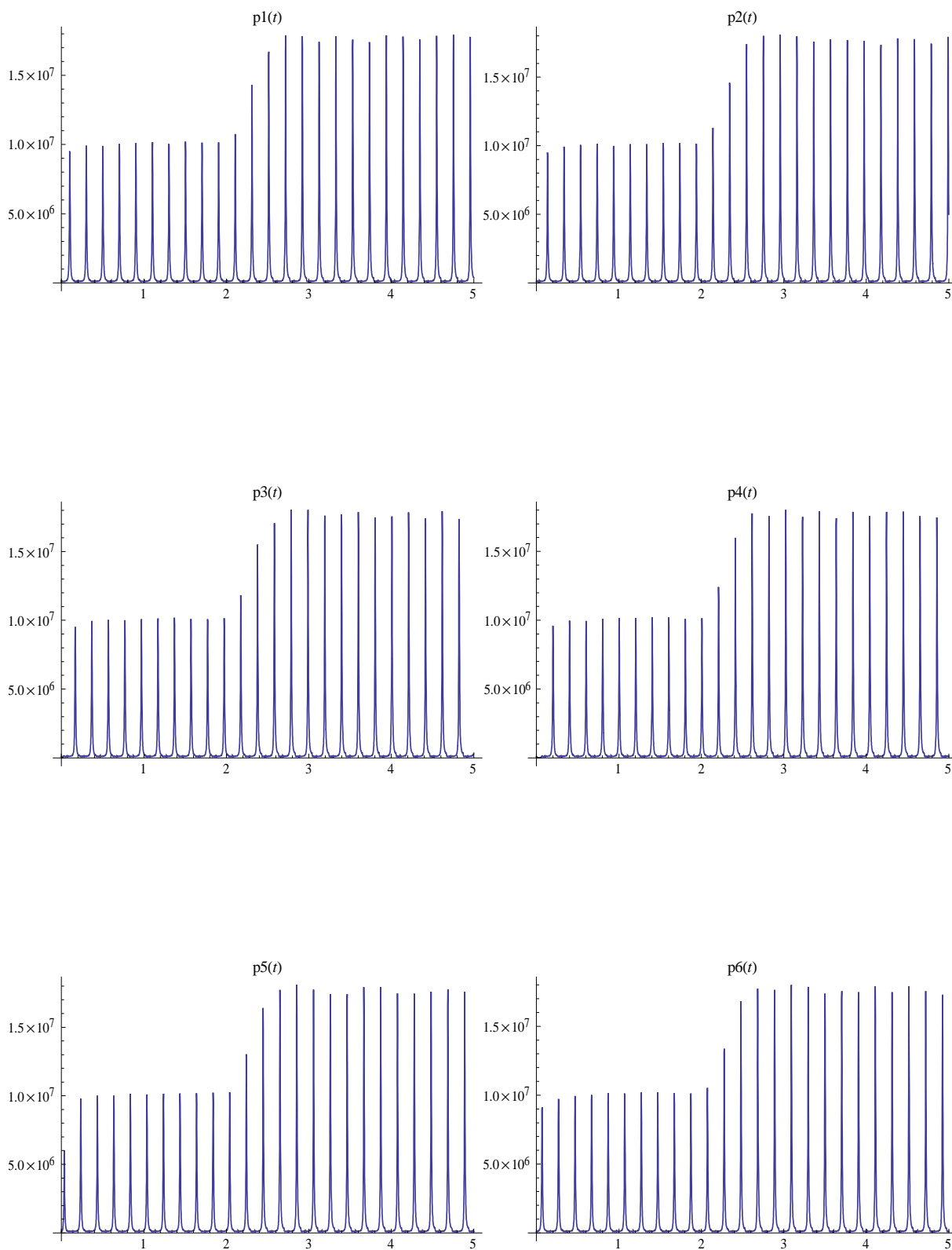
Použité symboly

Označení	MJ	Jméno	Poznámka
p1 - p6	Pa	Tlaky v jednotlivých válcích	
T1 - T6	K	Teploty v jednotlivých válcích	
m1 - m6	kg	Hmotnosti média v jednotlivých válcích	
cs1 - cs6	m.s ⁻¹	Rychlosti proudění v sání pro jednotlivé válce	
cv1 - cv6	m.s ⁻¹	Rychlosti proudění ve výfuku pro jednotlivé válce	
U_{aG}, U_{bG}, U_{cG}	V	Svorková napětí SG na jednotlivých fázích	
U_0, U_{dG}, U_{qG}	V	Napětí SG transformované do složek 0,d,q	
U_{abs}	V	Absolutní hodnota napětí SG	Vypočteno ze složek d, q
U_F	V	Budicí napětí	
I_F	A	Budicí proud	
$\Delta U, K_{buz}, RB$	-	Vnitřní proměnné buzení	
I_a, I_b, I_c	V	Proudy SG v jednotlivých fázích	

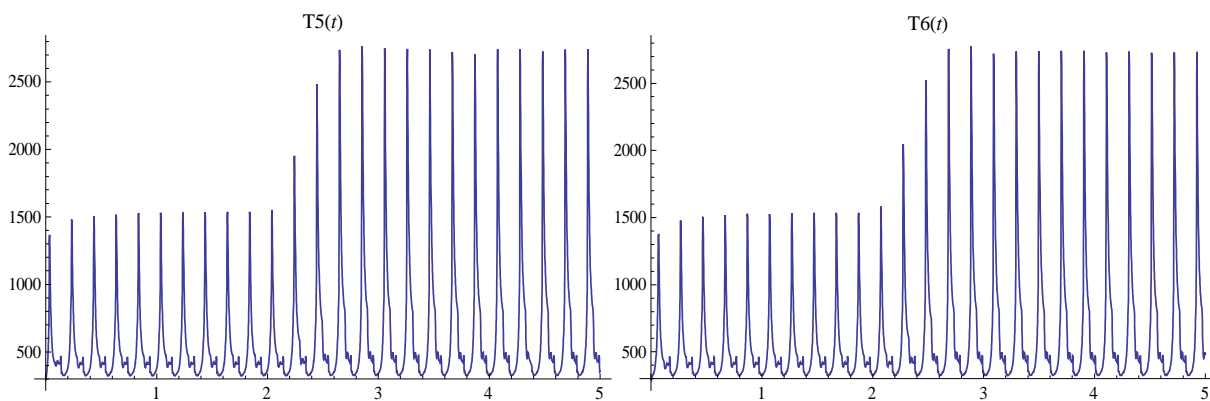
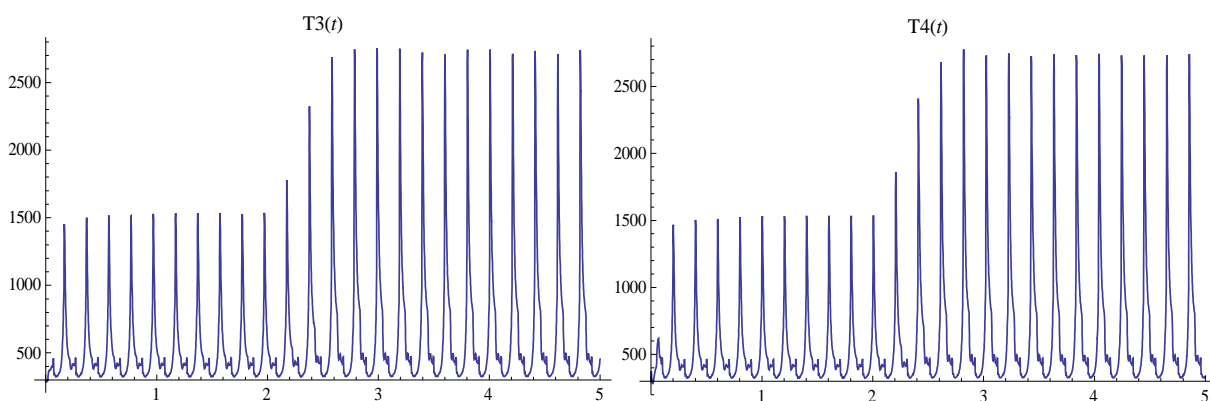
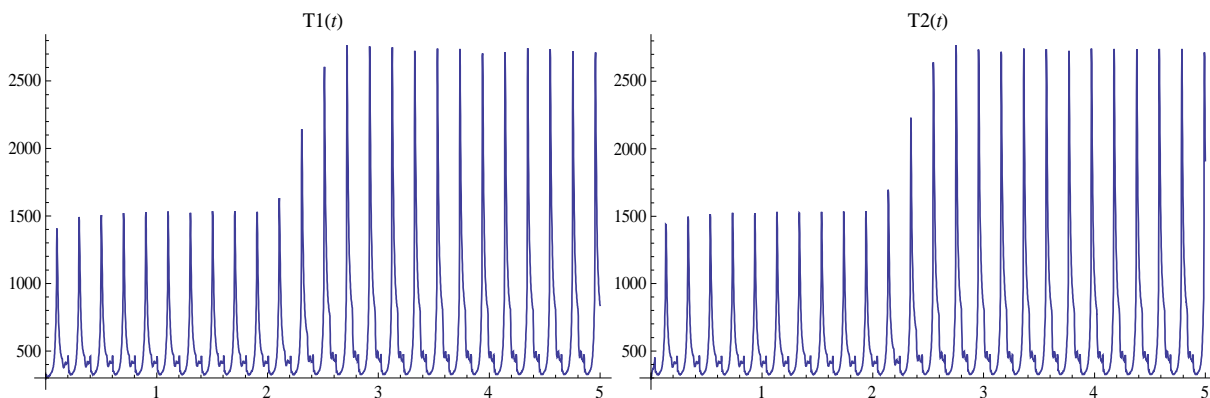
Označení	MJ	Jméno	Poznámka
I_D, I_Q	A	Rotorové proudy SG v náhradních vinutích D a Q	
I_{aR}, I_{aL}	A	Proudy protékající zátěží	Zátěž je tvořena paralelní RL kombinací. Uvedené proudy tečou větví R a L.
$\psi_a, \psi_b,$ $\psi_c,$	Wb	Magnetické toky statoru	
$R_Z, X_{Zs},$ X_{Zp}	Ω	Nastavený průběh impedance zátěže	R_Z, X_{Zs} jsou zapojeny v jedné větvi do série a k ní je paralelně připojena větev s X_{Zp}
f	Hz	Frekvence na svorkách SG	
Plyn	-	Požadavek na dodávku paliva	
$\Delta\omega_m, K_{ro},$ RO	-	Vnitřní proměnné regulace otáček	
M_{el}	N.m	Moment SG	$M_{el} = \frac{\partial W_C}{\partial \theta}, kde$ $W_C = \frac{1}{2} I_{SG}^T \Psi$
$M_{mech.},$ $M_{mech.stř.}$	Nm	Moment diesel motoru	$M_{mech.stř.}$ je zatížen chybou převodníku
$P_{DMstř.}$	W	Výkon diesel motoru	Spočten z otáček a momentu diesel motoru
P_{SGm}	W	Výkon SG mechanický	Spočten z otáček a momentu SG
P_{SGe}	W	Výkon SG elektrický	Spočten z proudů a magnetických toků SG
S_{SG}	W	Zdánlivý výkon SG	Spočten z proudů a napětí SG
Q_{SG}	W	„Jalový“ SG	Spočten z „vektorového“ rozdílu $\sqrt{S_{SGe}^2 - P_{SGe}^2}$
P_Z	W	Výkon na odporové zátěži	Spočten z proudu tekoucí větví zátěže s R_Z
Q_Z	W	Výkon na induktivní zátěži	Spočten z proudu tekoucí větví zátěže s X_{Zp}
S_Z	W	Výkon na zátěži	Spočten z P_Z a Q_Z
P_a	W	Akcelerační část momentu	Představuje 2. člen pohybové rovnice
P_b	W	Tlumicí část momentu	Představuje 3. člen pohybové rovnice

Pořadí barevného značení veličin: červená, zelená, modrá, červená čárkovaná, zelená čárkovaná a modrá čárkovaná.

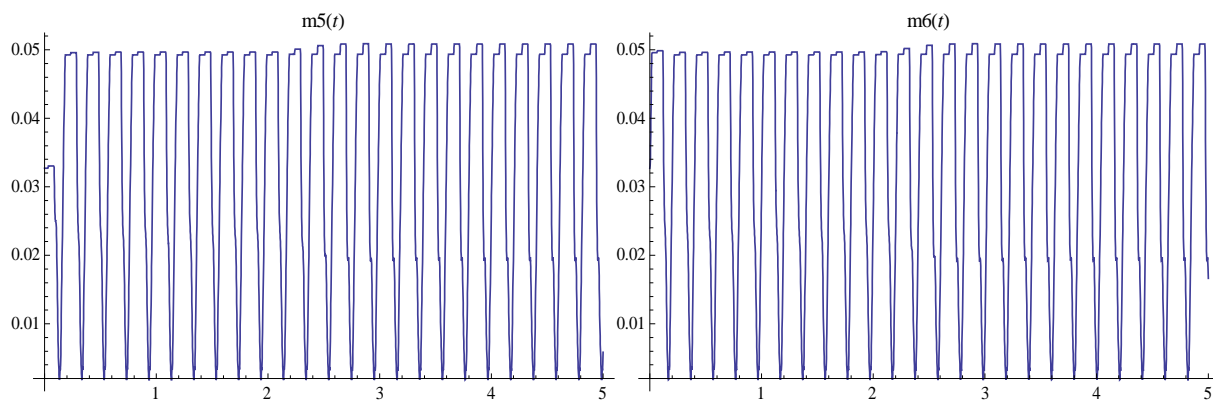
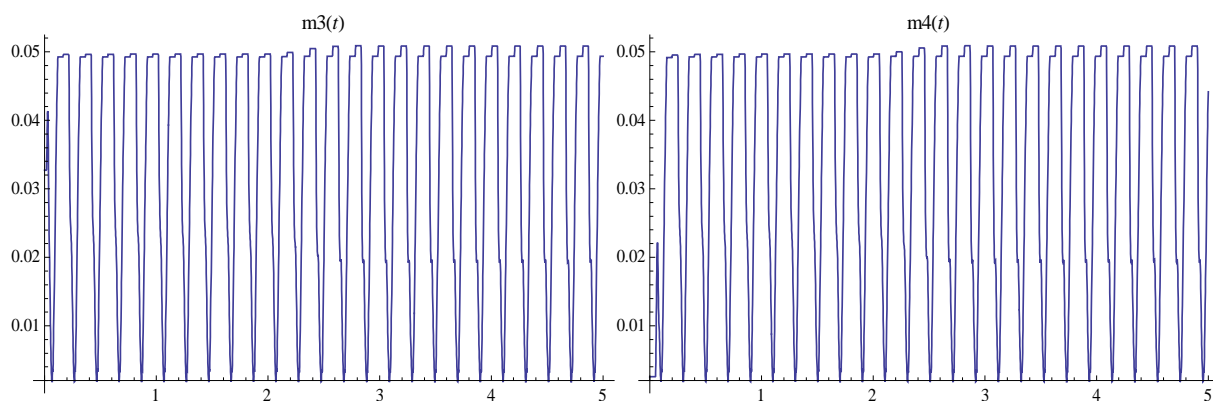
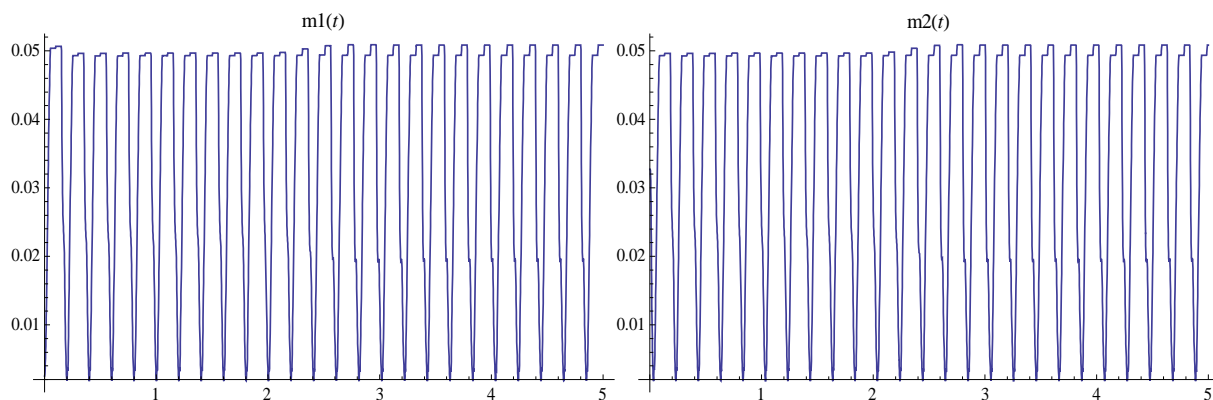
Tlaky v jednotlivých válcích v průběhu celé simulace [Pa]



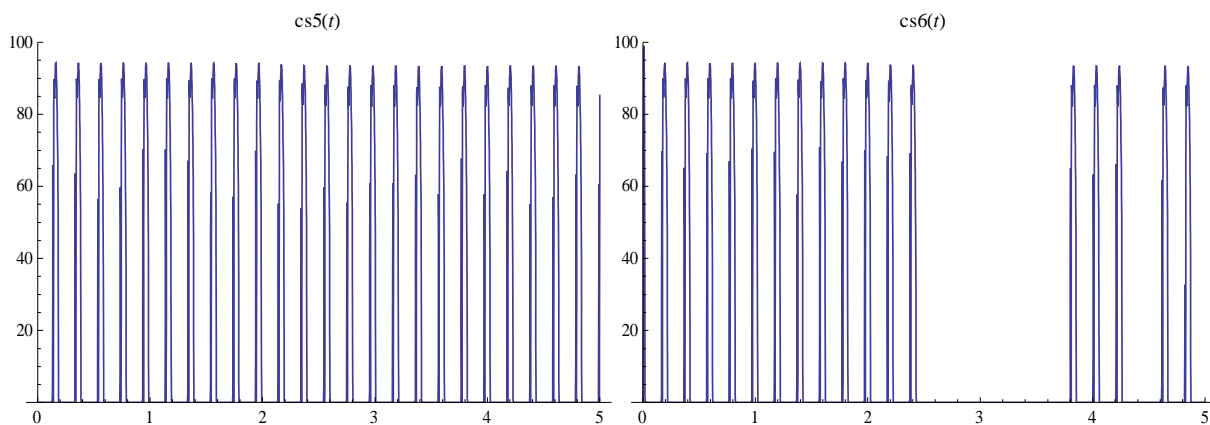
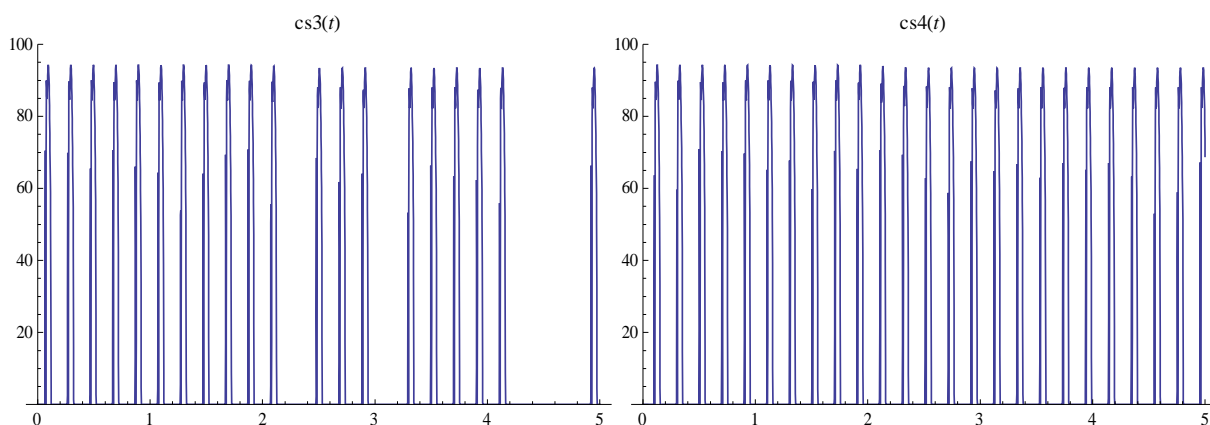
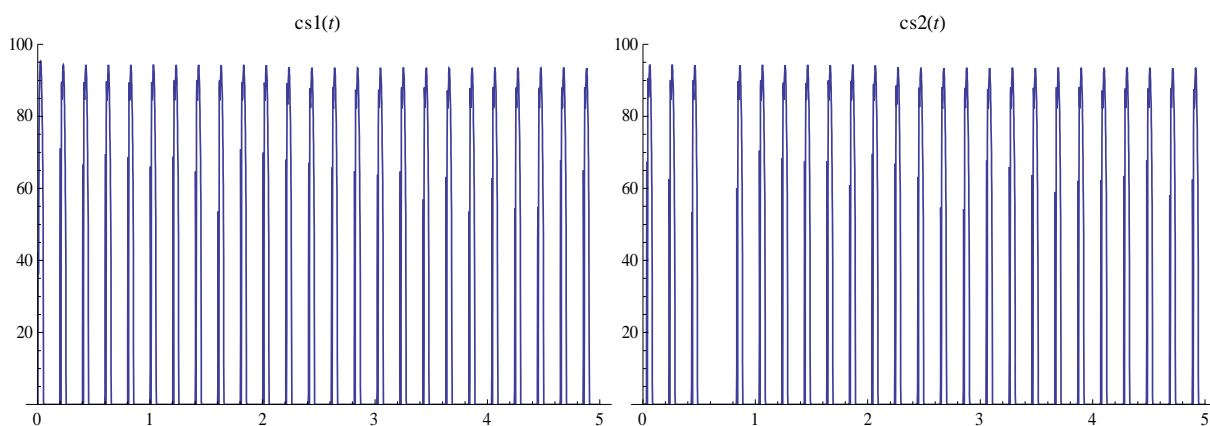
Teploty v jednotlivých válcích v průběhu celé simulace [K]



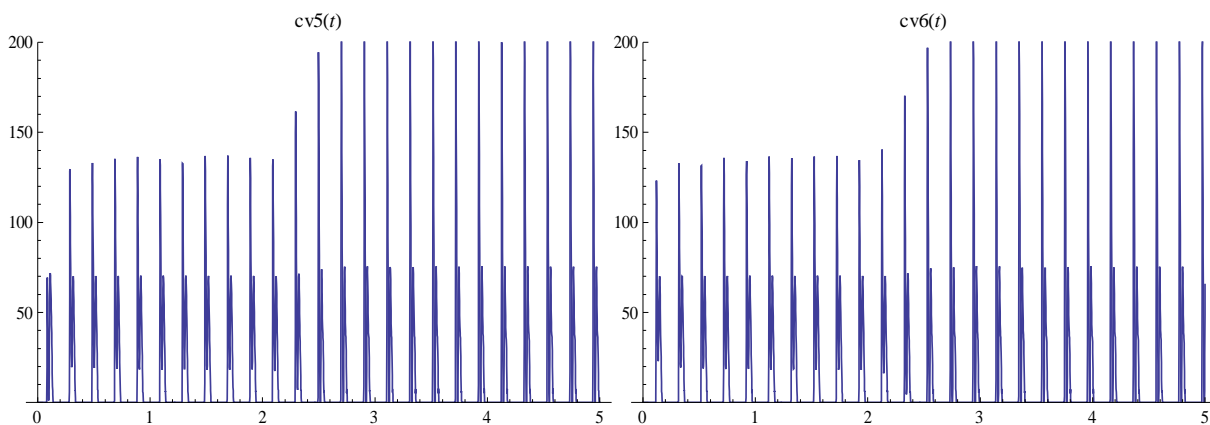
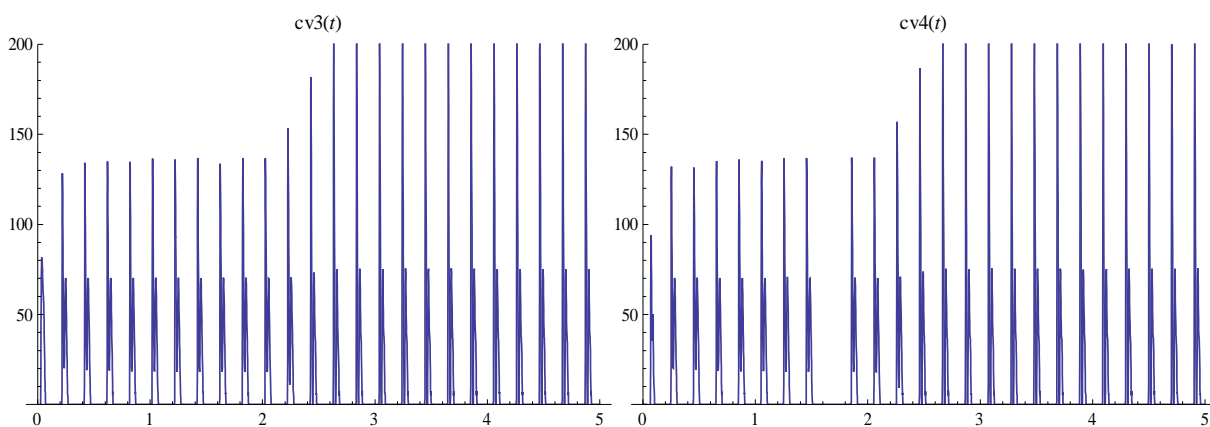
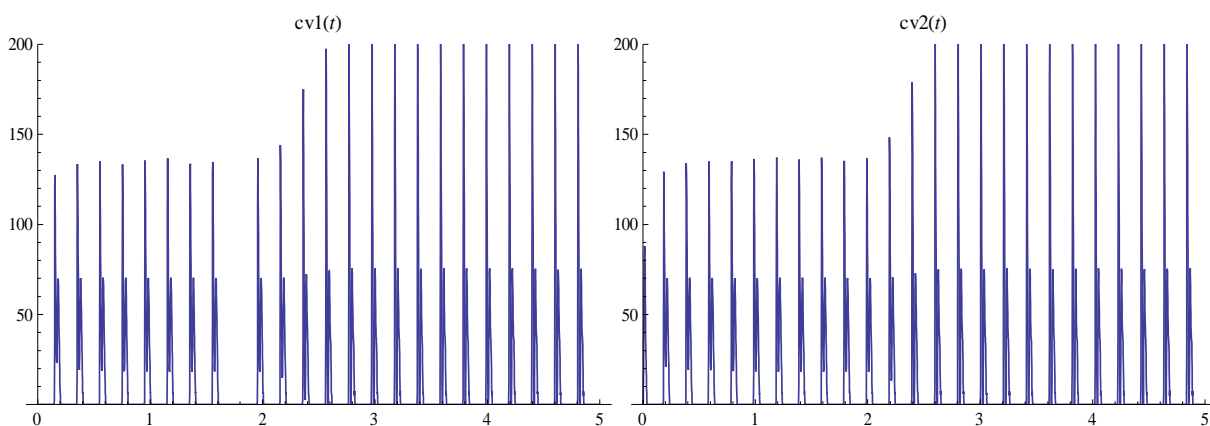
Hmotnosti v jednotlivých válcích v průběhu celé simulace [kg]



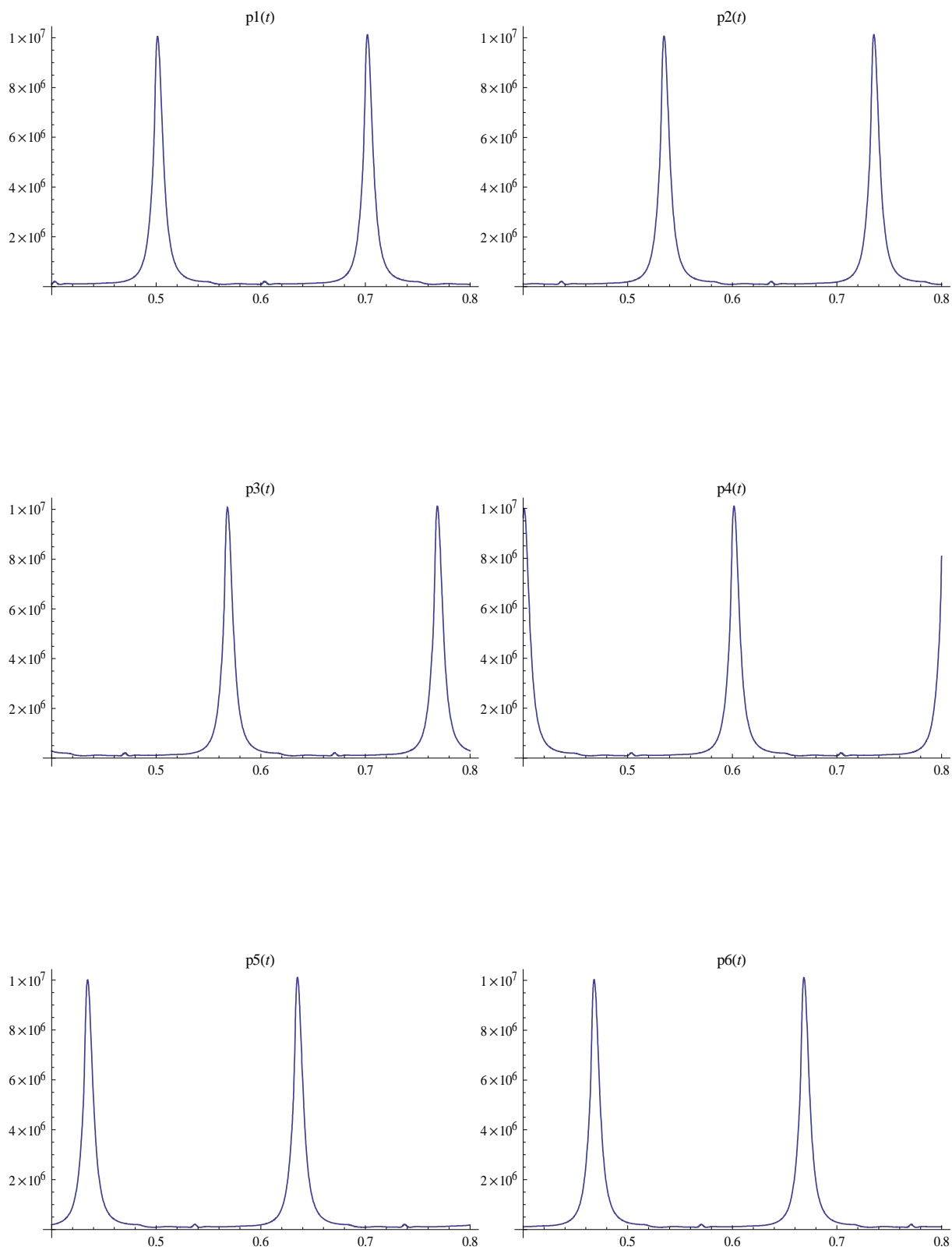
Rychlosti sání v jednotlivých válcích v průběhu celé simulace [m/s]



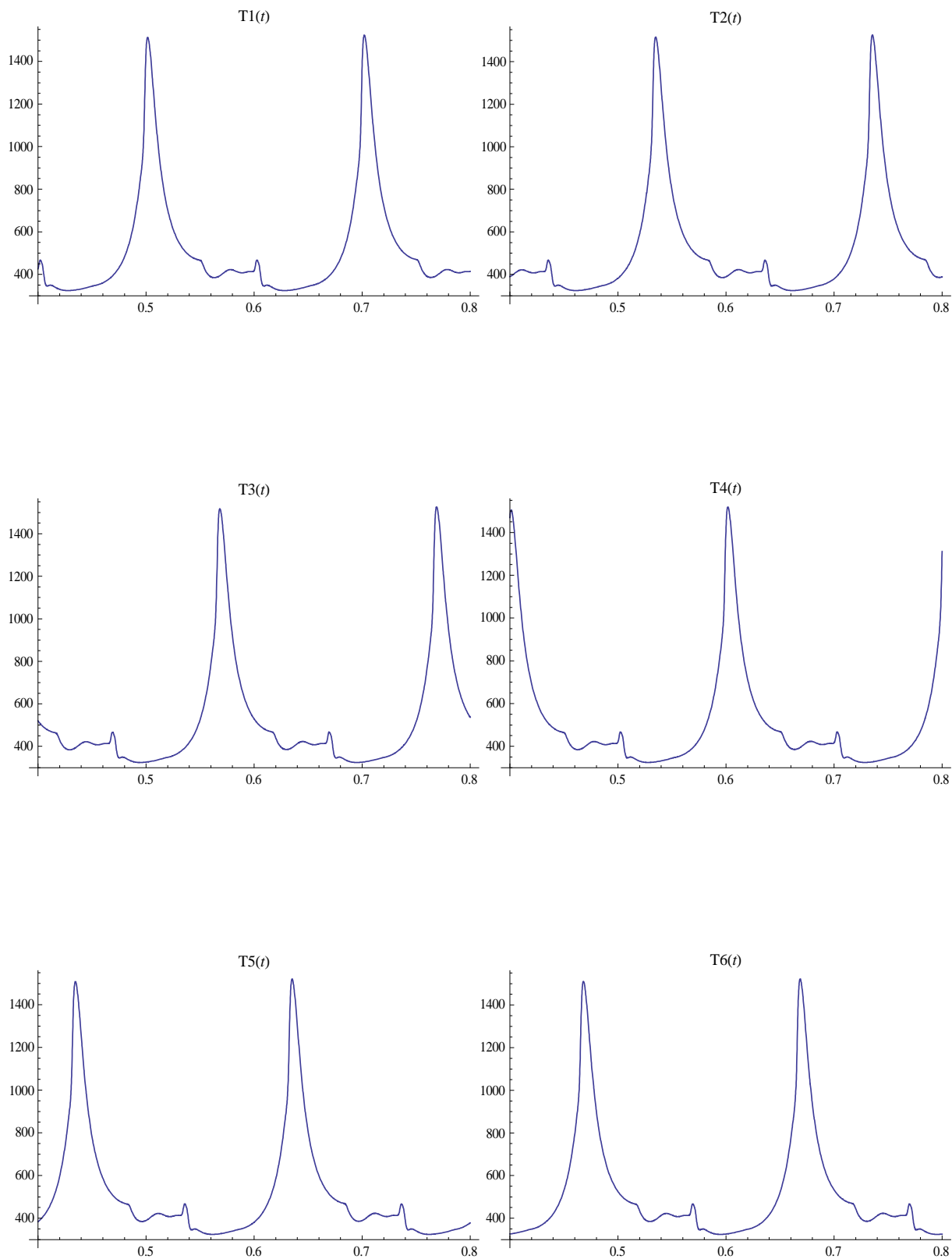
Rychlosti výfuku v jednotlivých válcích v průběhu celé simulace [m/s]



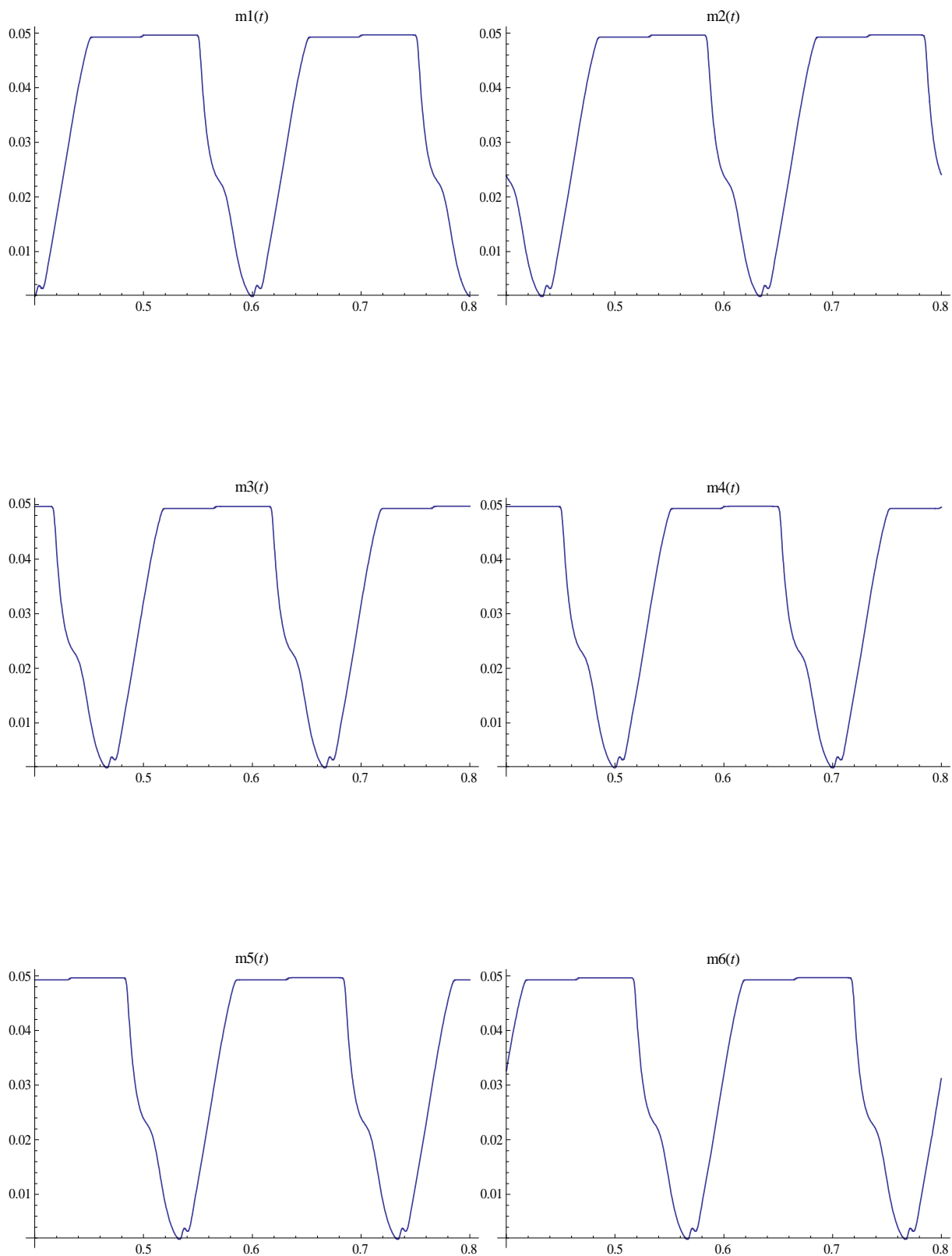
Tlaky v jednotlivých válcích na počátku simulace [Pa]



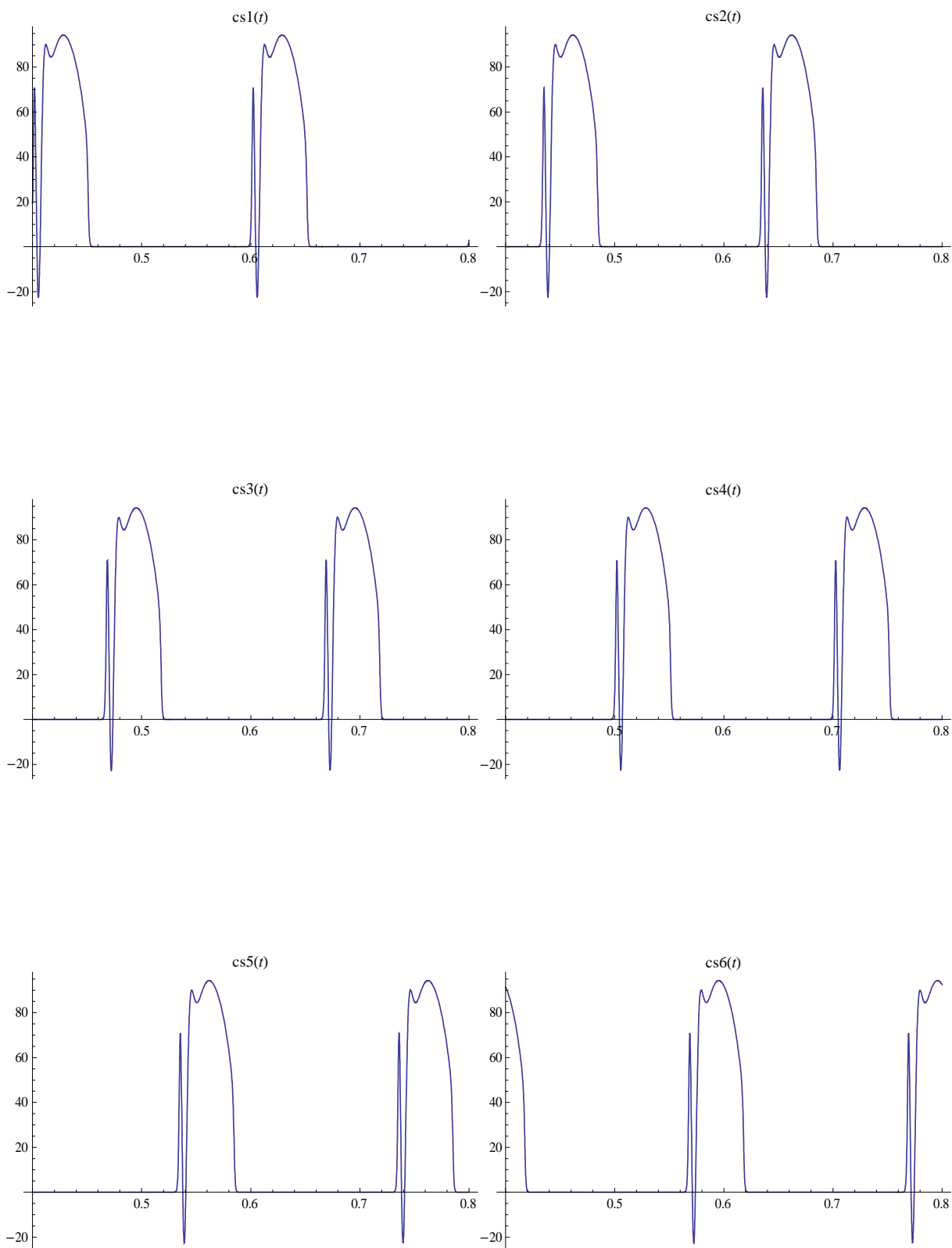
Teploty v jednotlivých válcích na počátku simulace [K]



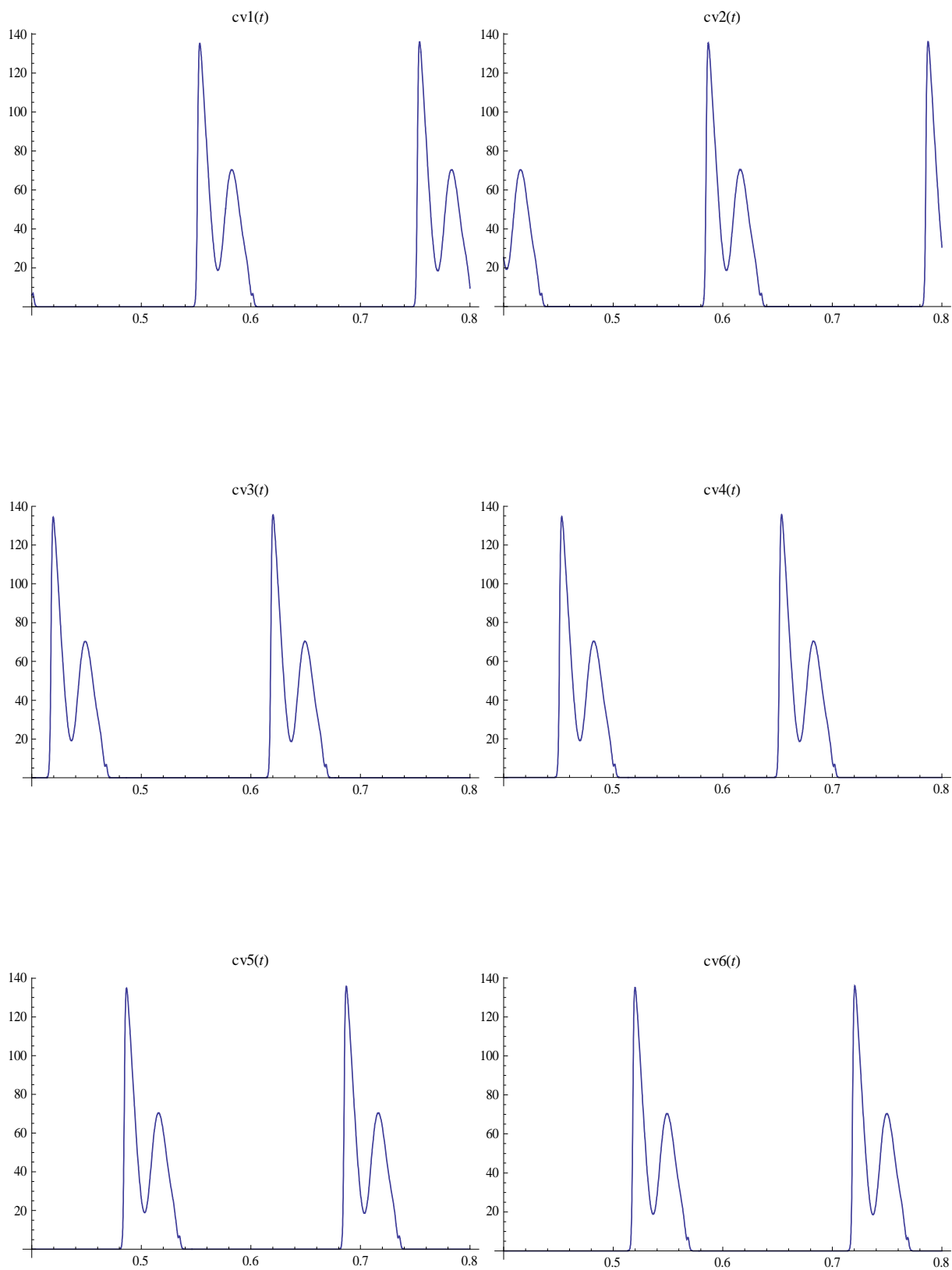
Hmotnosti v jednotlivých válcích na počátku simulace [kg]



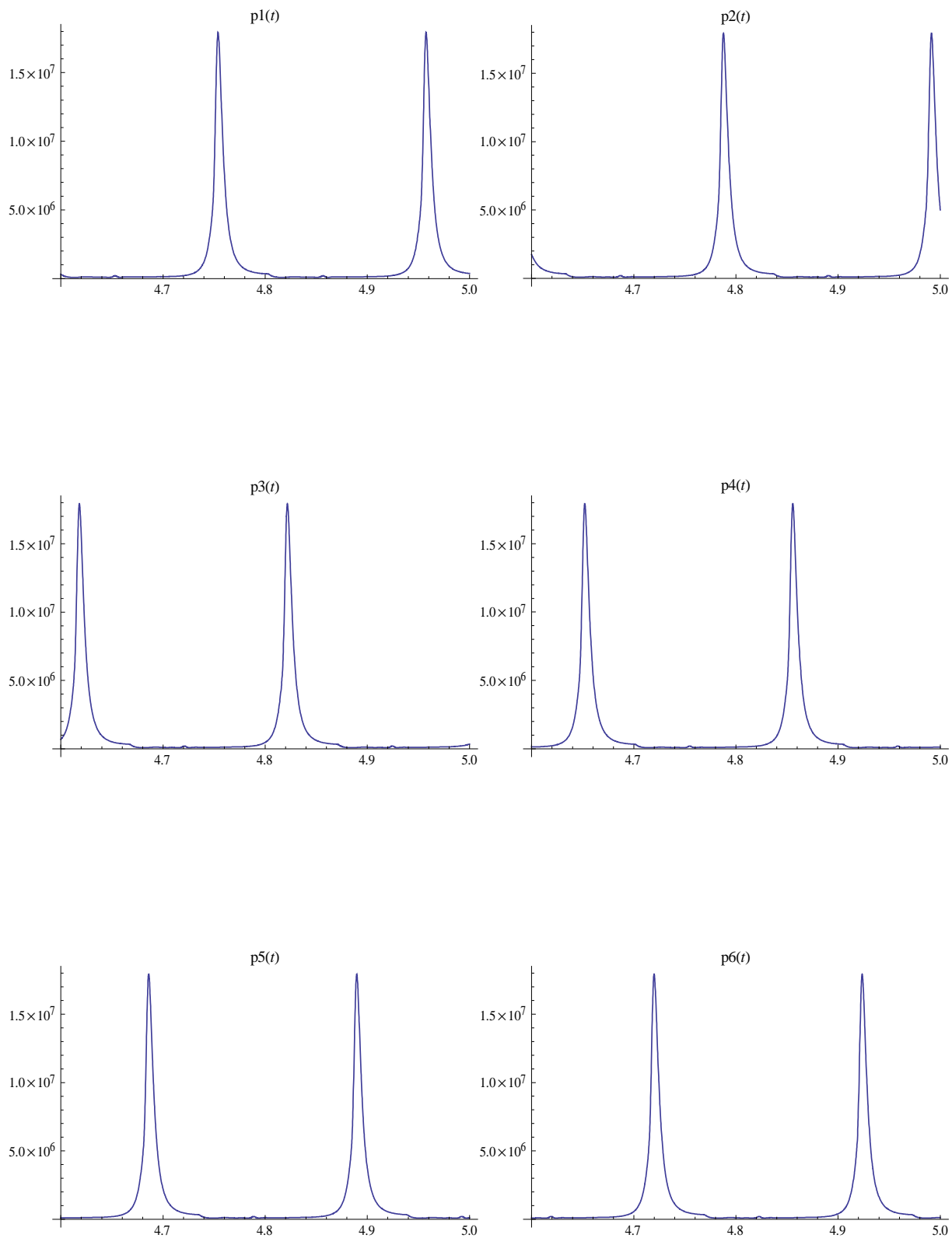
Rychlosti sání v jednotlivých válcích na počátku simulace [m/s]



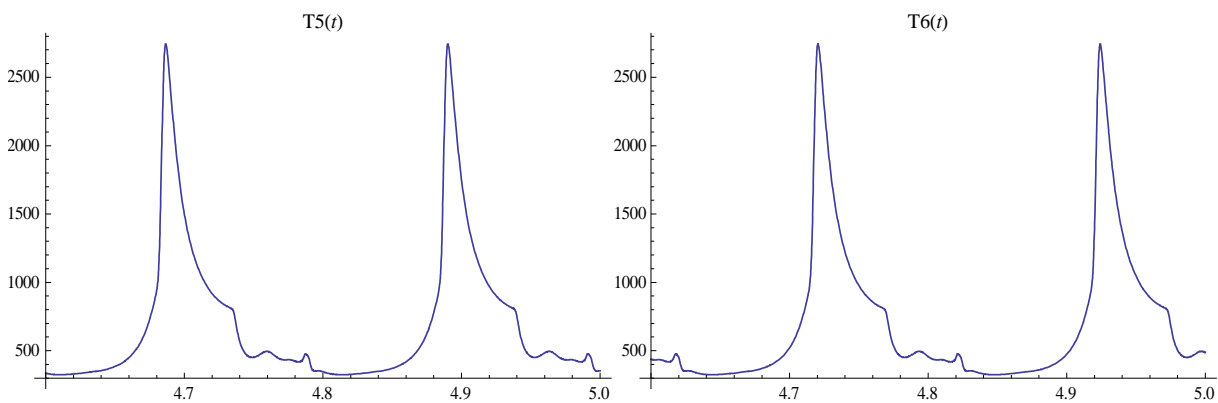
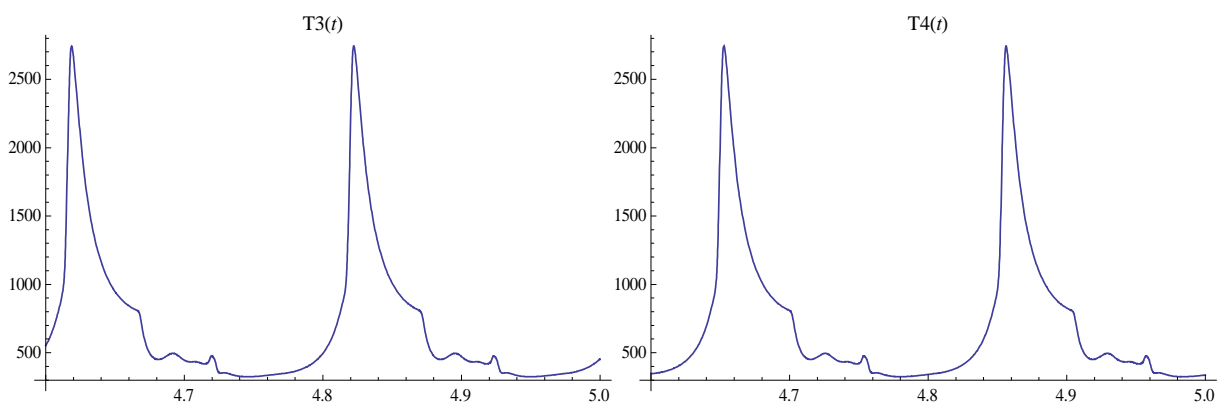
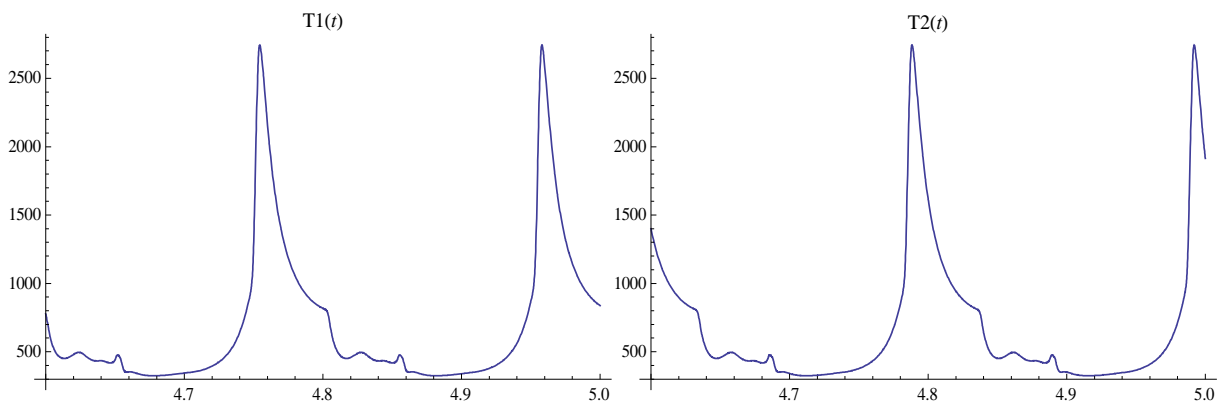
Rychlosti výfuku v jednotlivých válcích na počátku simulace [m/s]



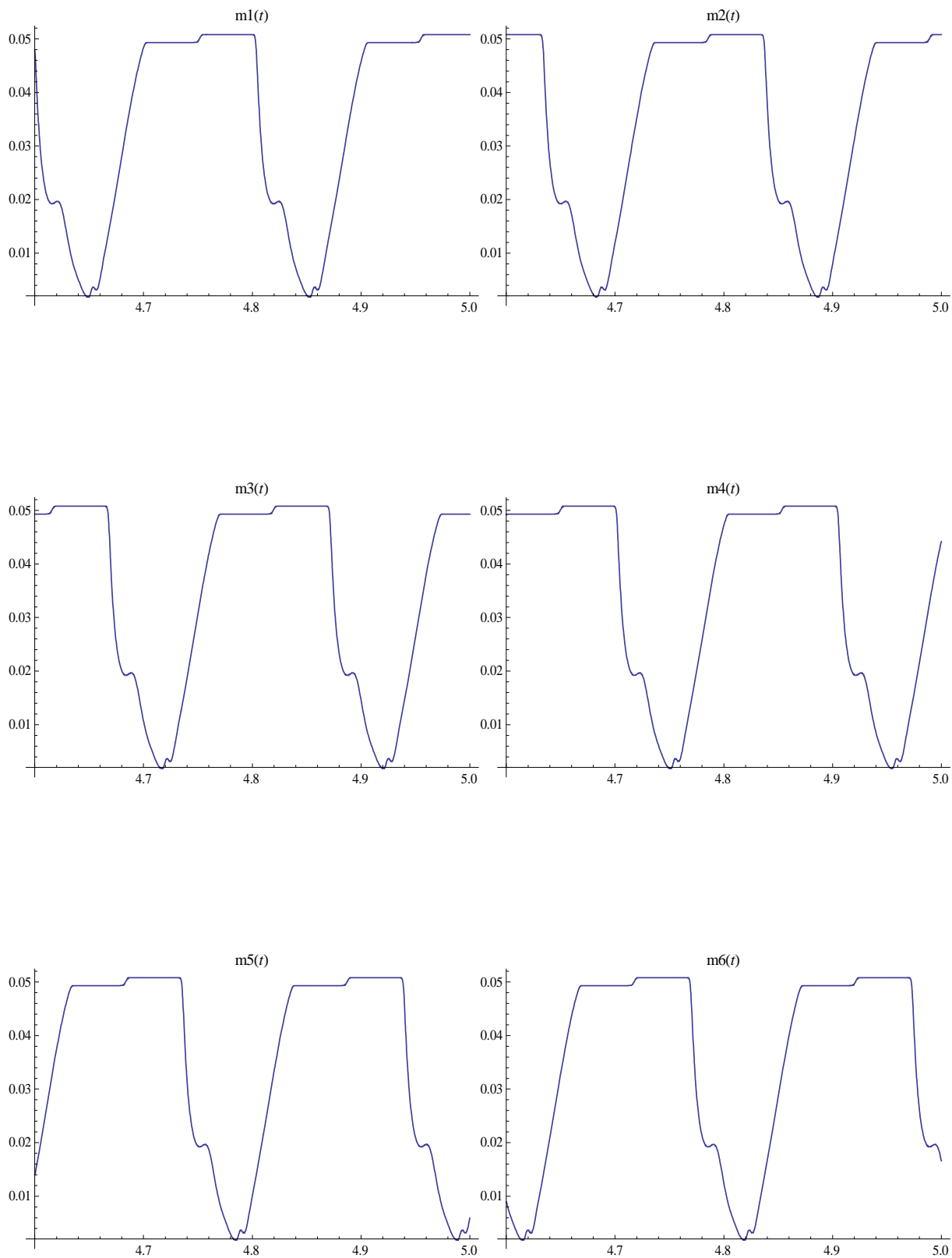
Tlaky v jednotlivých válcích na konci simulace [Pa]



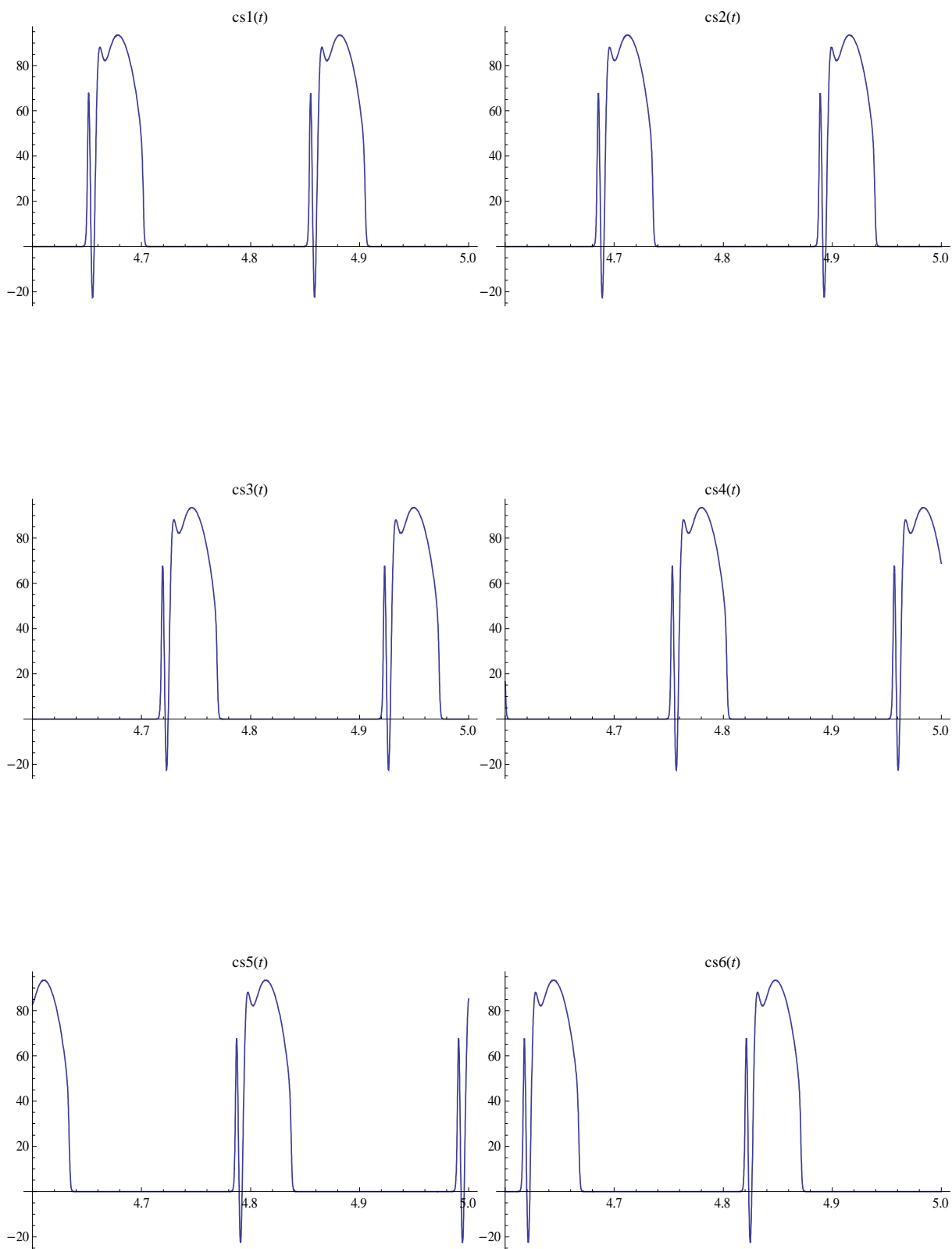
Teploty v jednotlivých válcích na konci simulace [K]



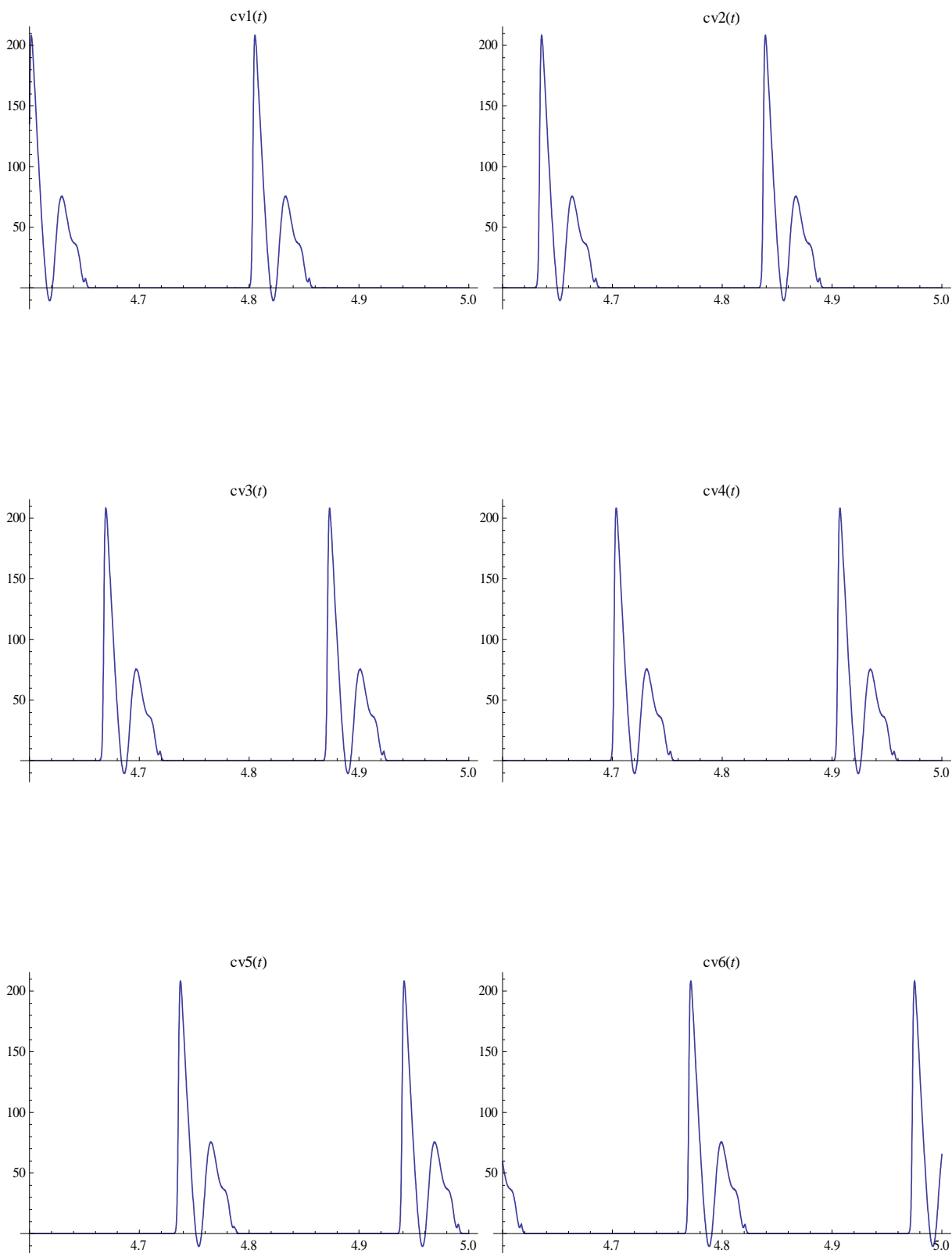
Hmotnosti v jednotlivých válcích na konci simulace [kg]

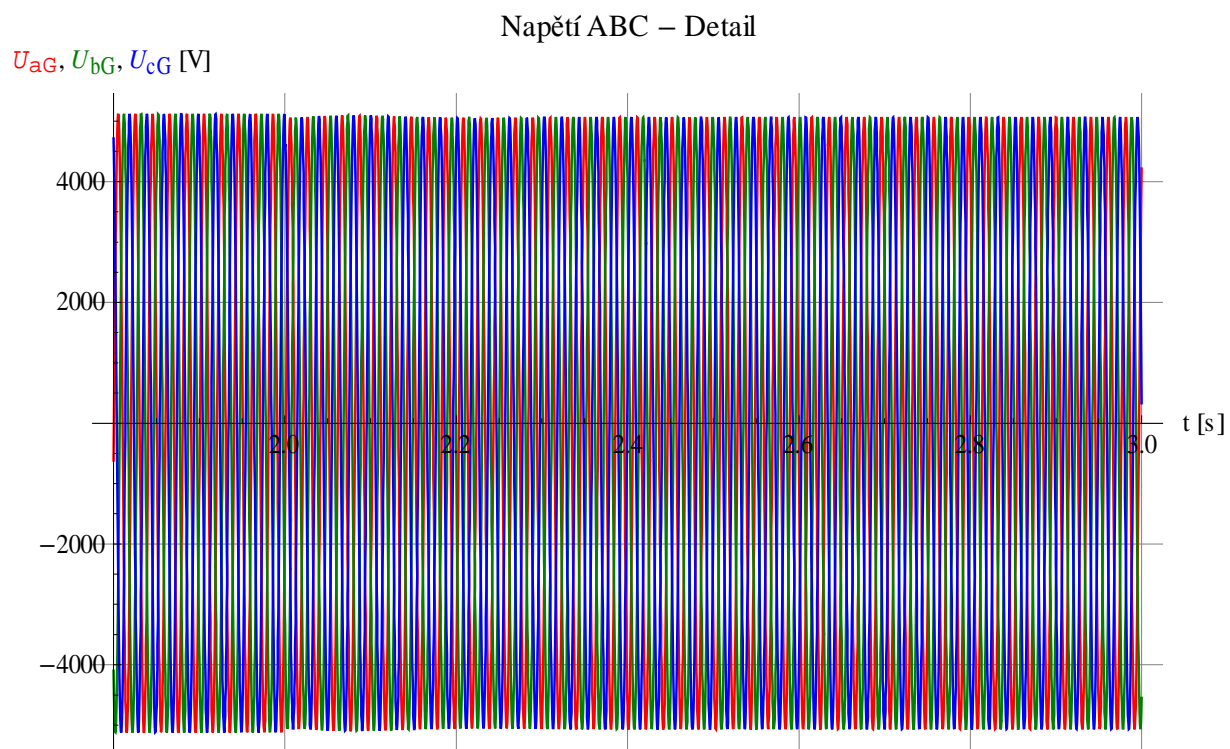
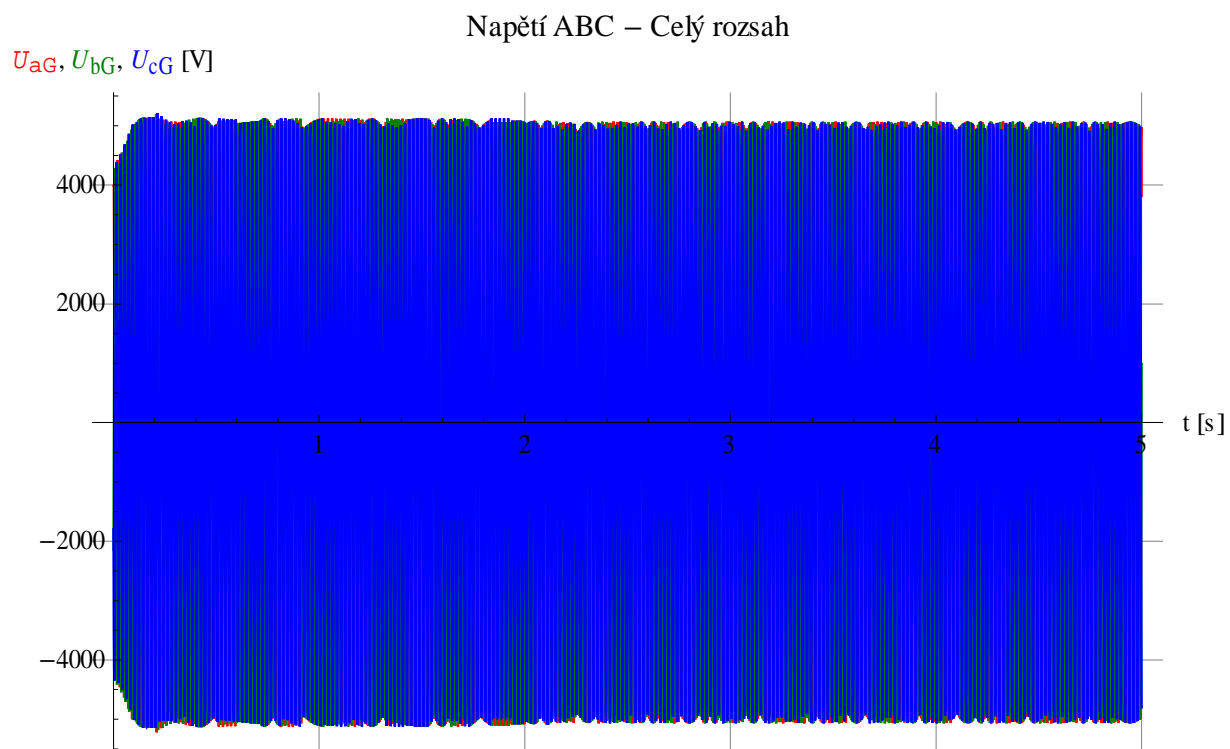


Rychlosti sání v jednotlivých válcích na konci simulace [m/s]

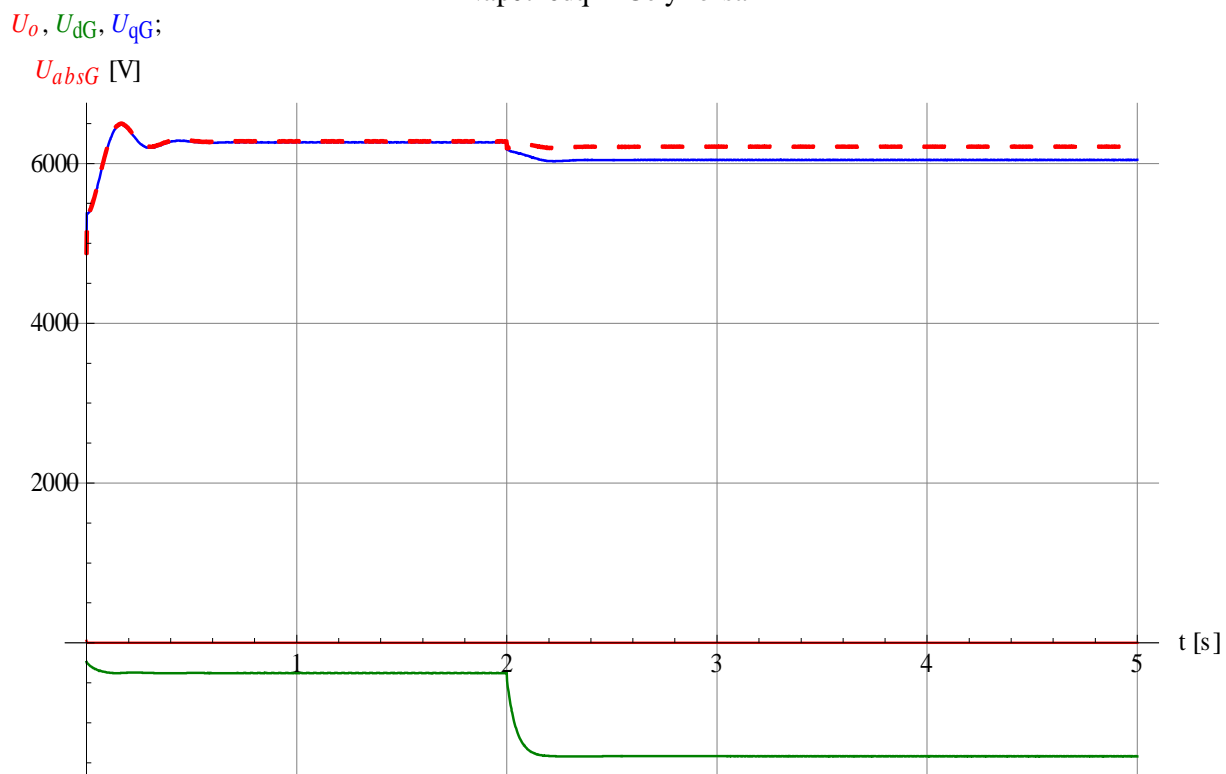


Rychlosti výfuku v jednotlivých válcích na konci simulace [m/s]

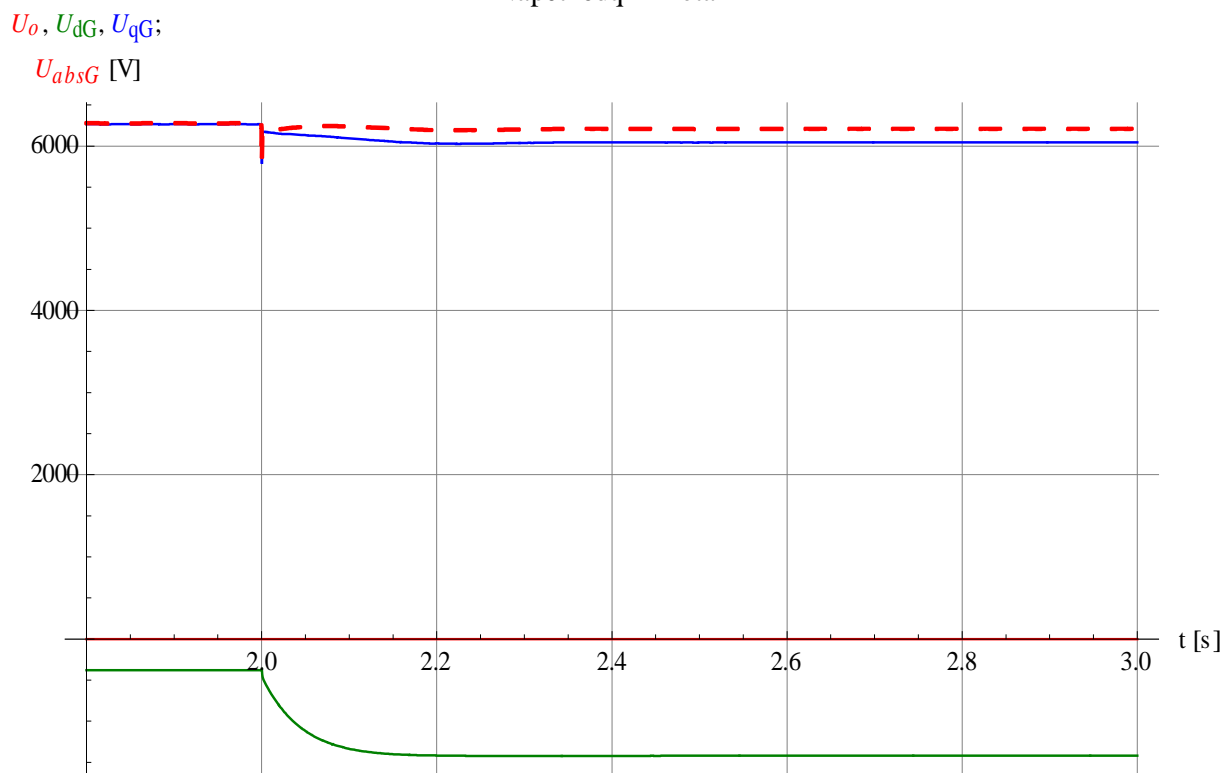




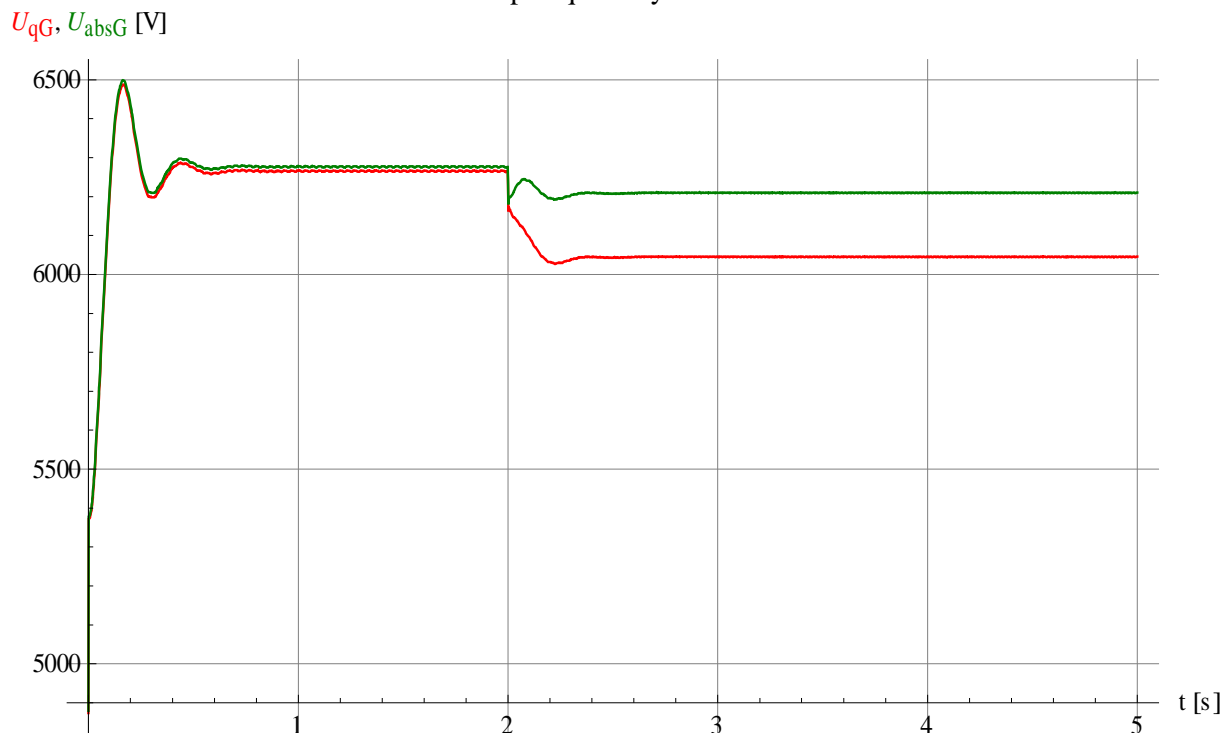
Napětí 0dq – Celý rozsah



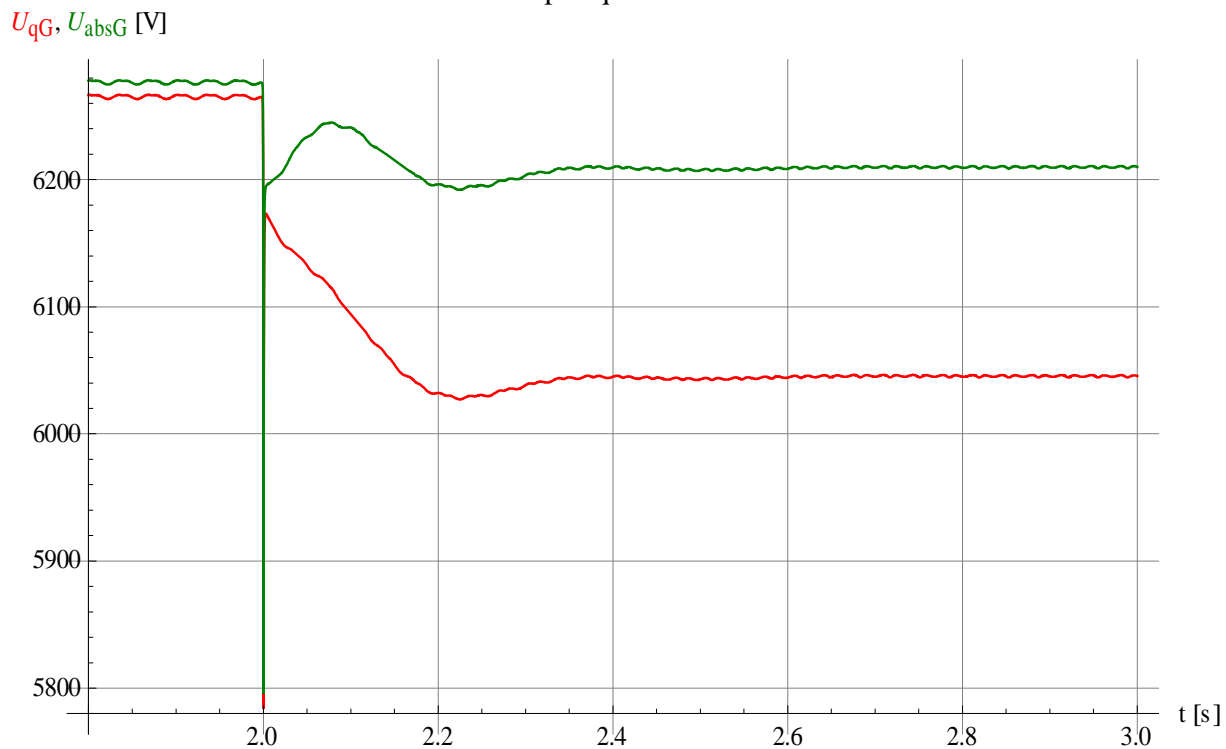
Napětí 0dq – Detail



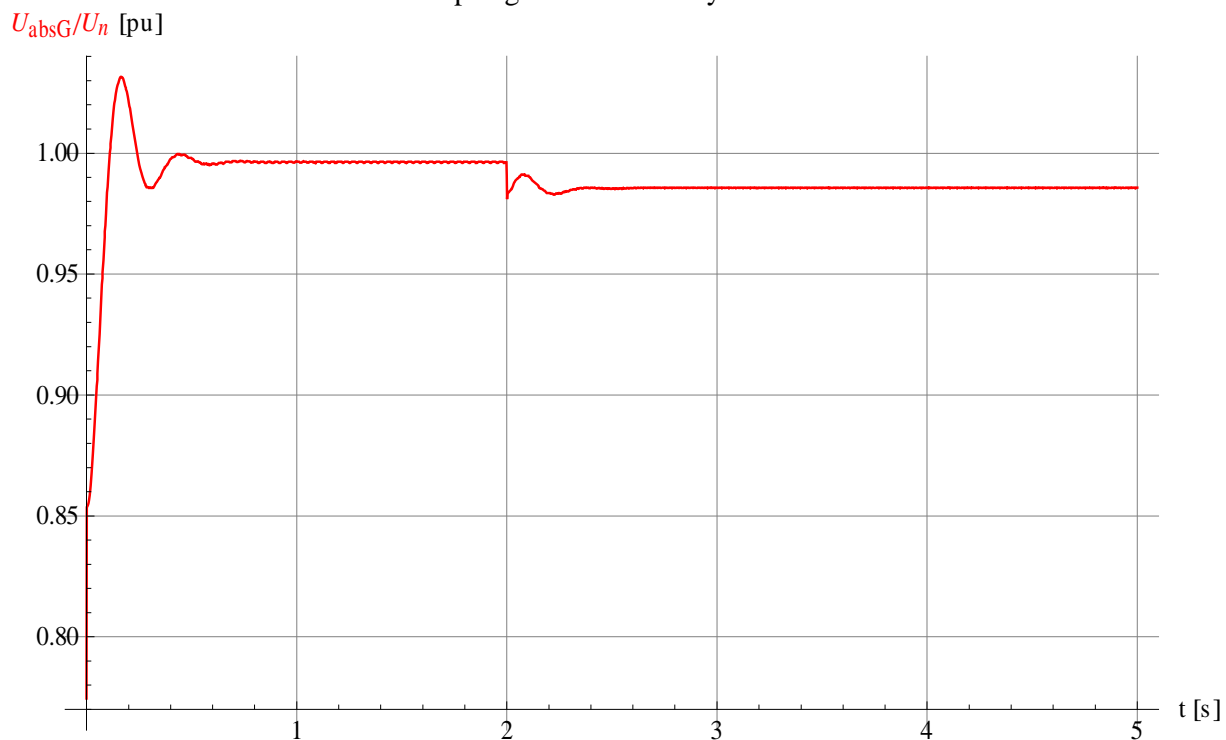
Napětí q – Celý rozsah



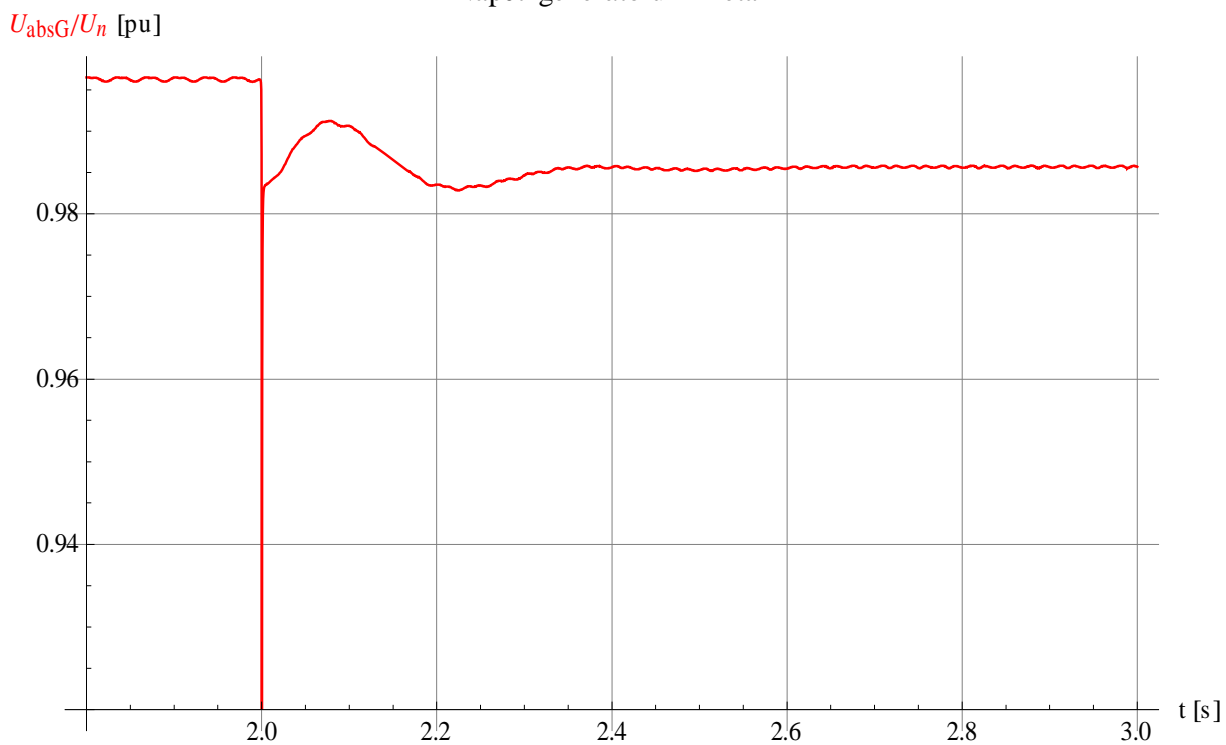
Napětí q – Detail



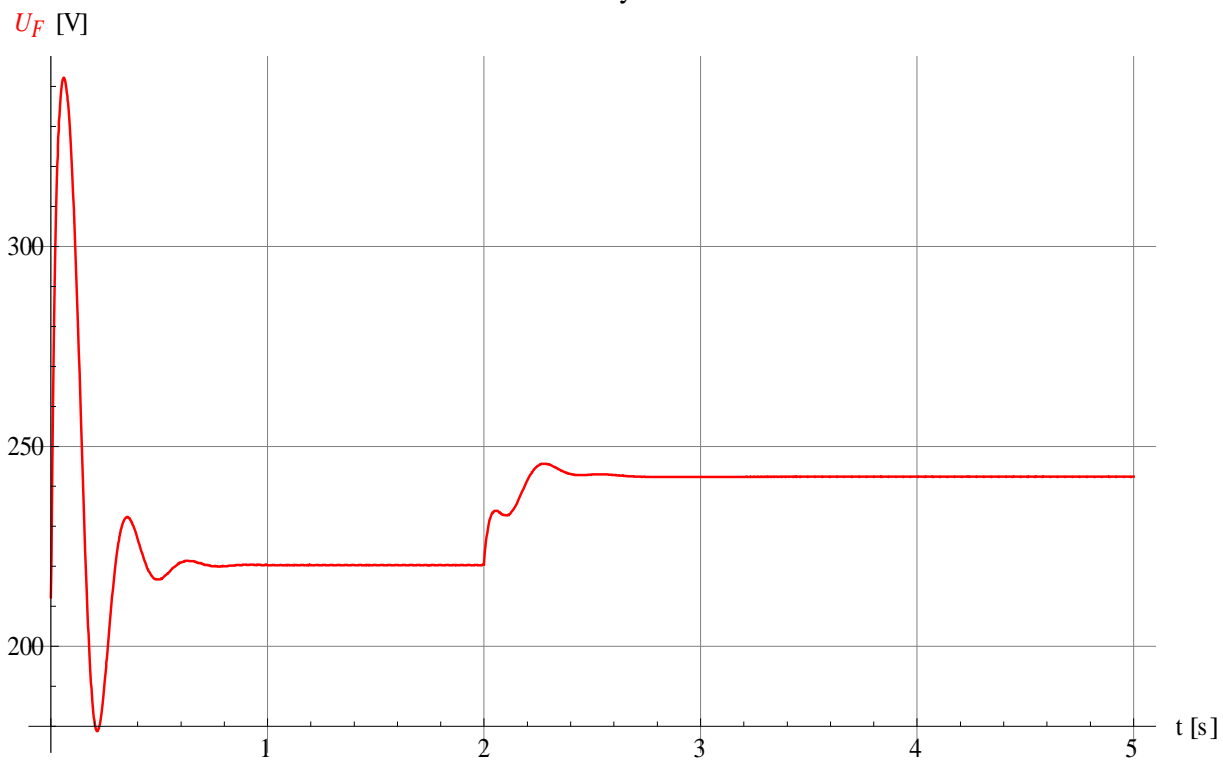
Napětí generátoru – Celý rozsah



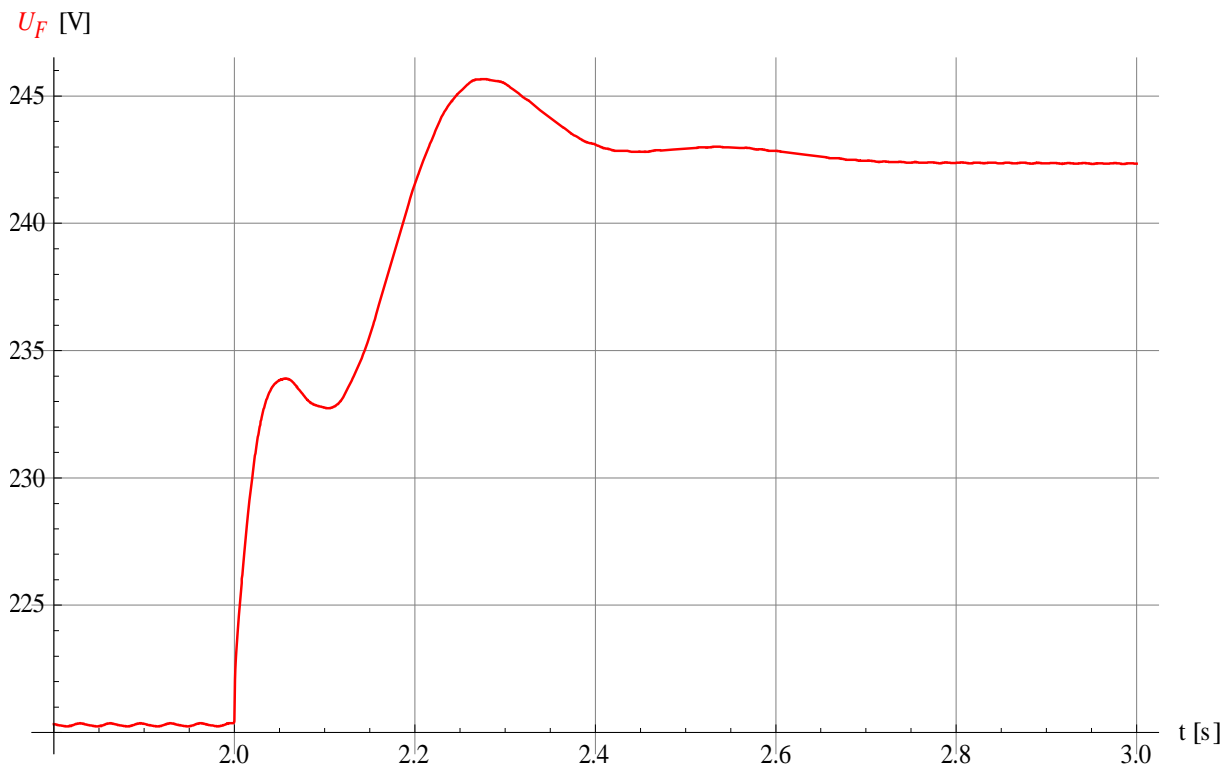
Napětí generátoru – Detail



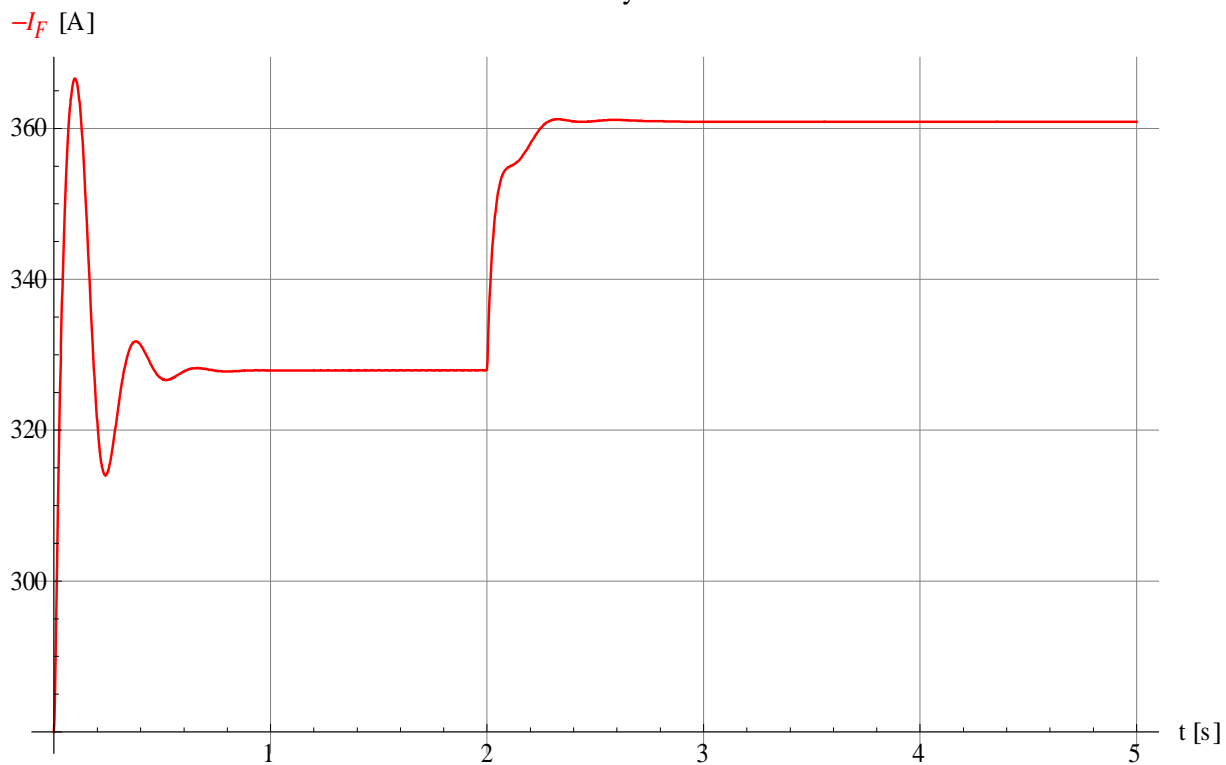
Buzení – Celý rozsah



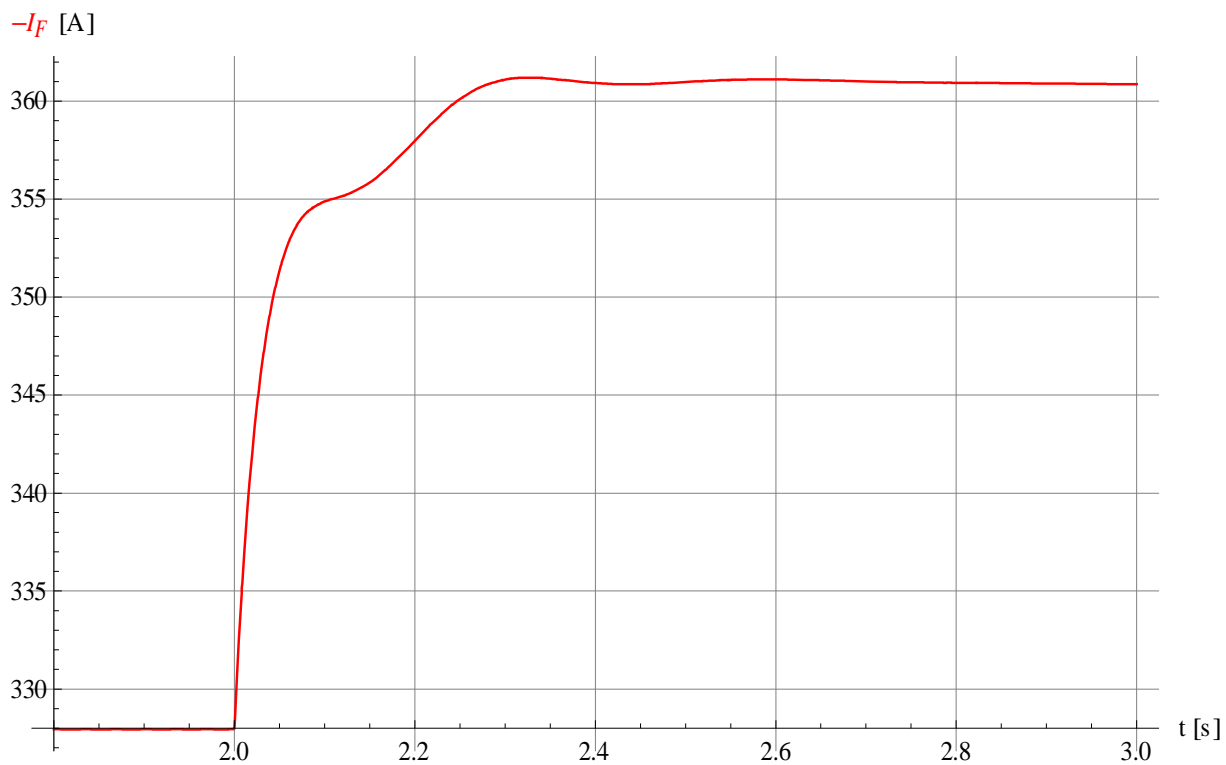
Buzení – Detail



Buzení – Celý rozsah

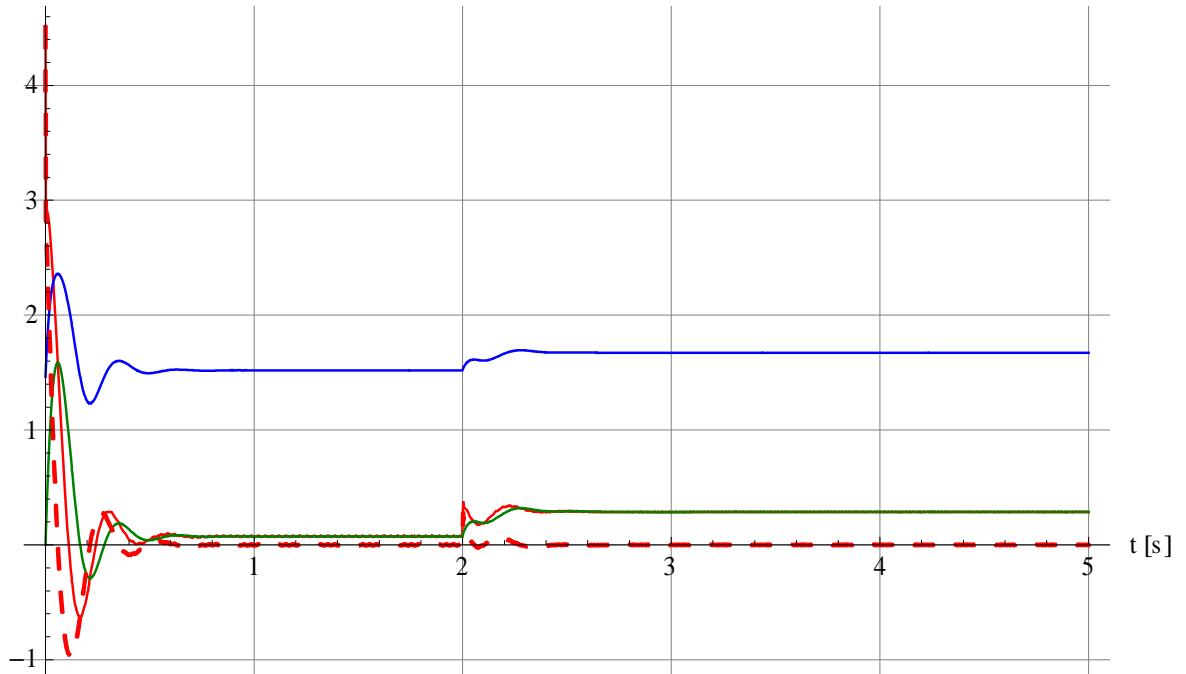


Buzení – Detail



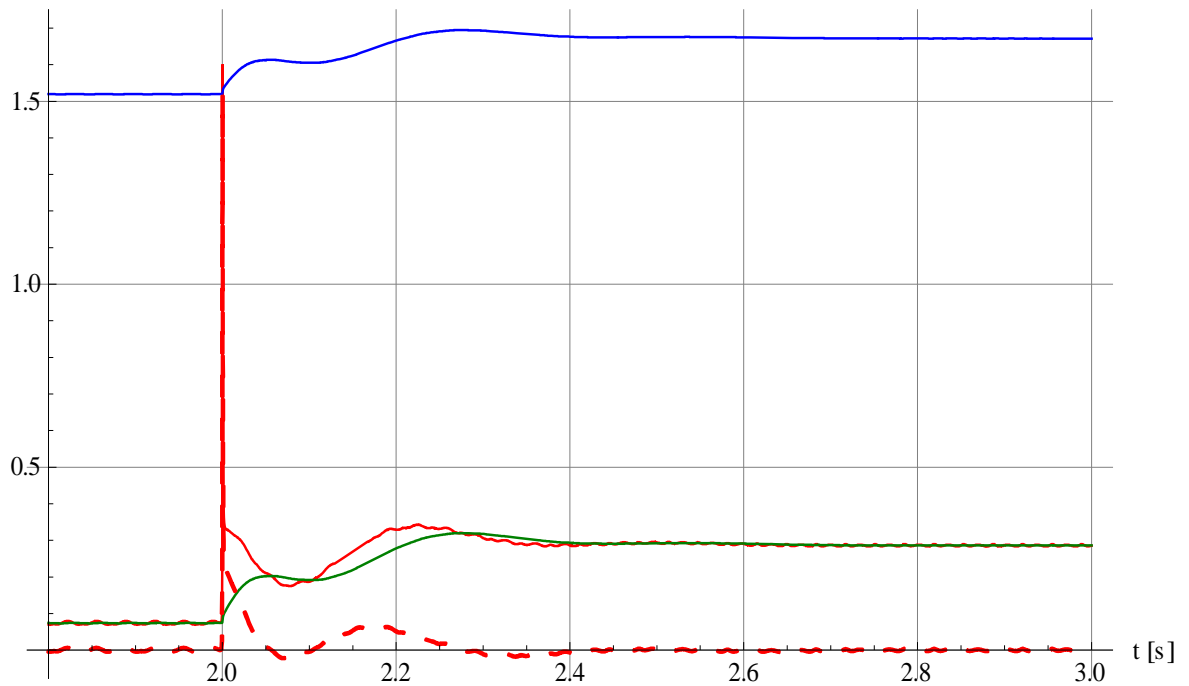
Regulace buzení – Celý rozsah

$-\Delta U.K_{buz}$, RB,
 $\frac{U_F}{U_{Fn}}$, RB' [p.u.]

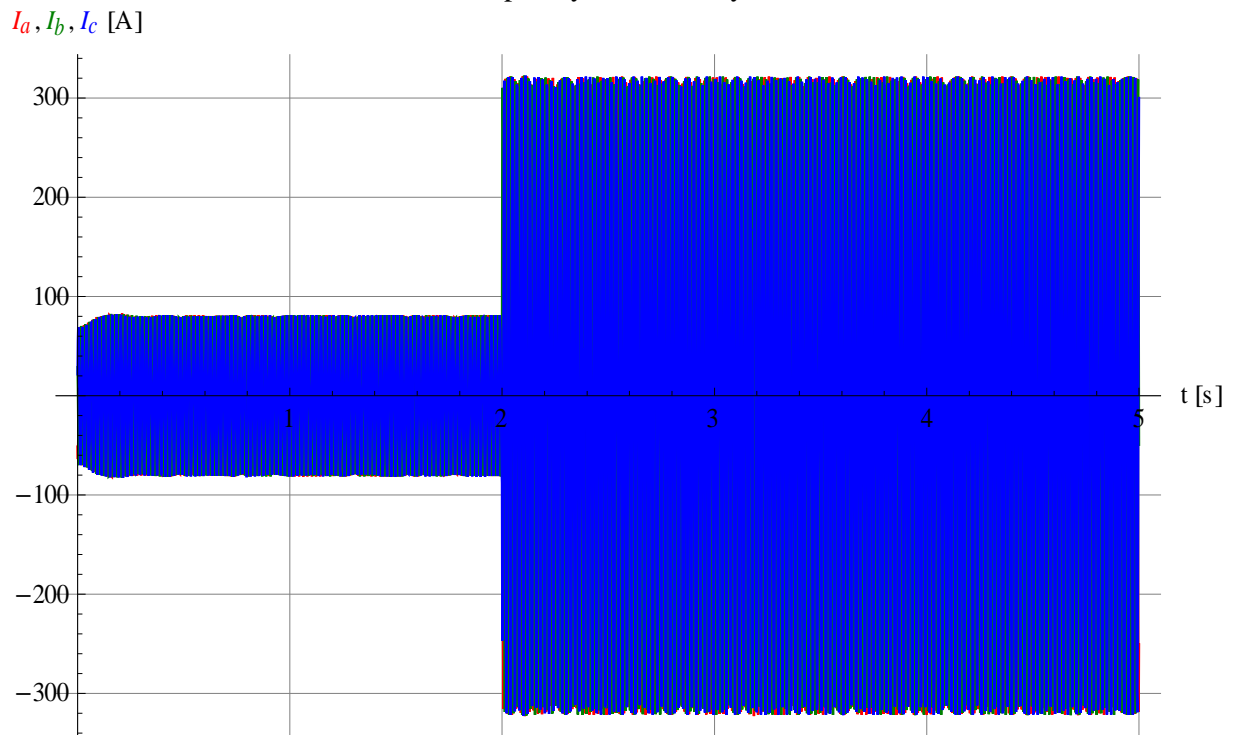


Regulace buzení – Detail

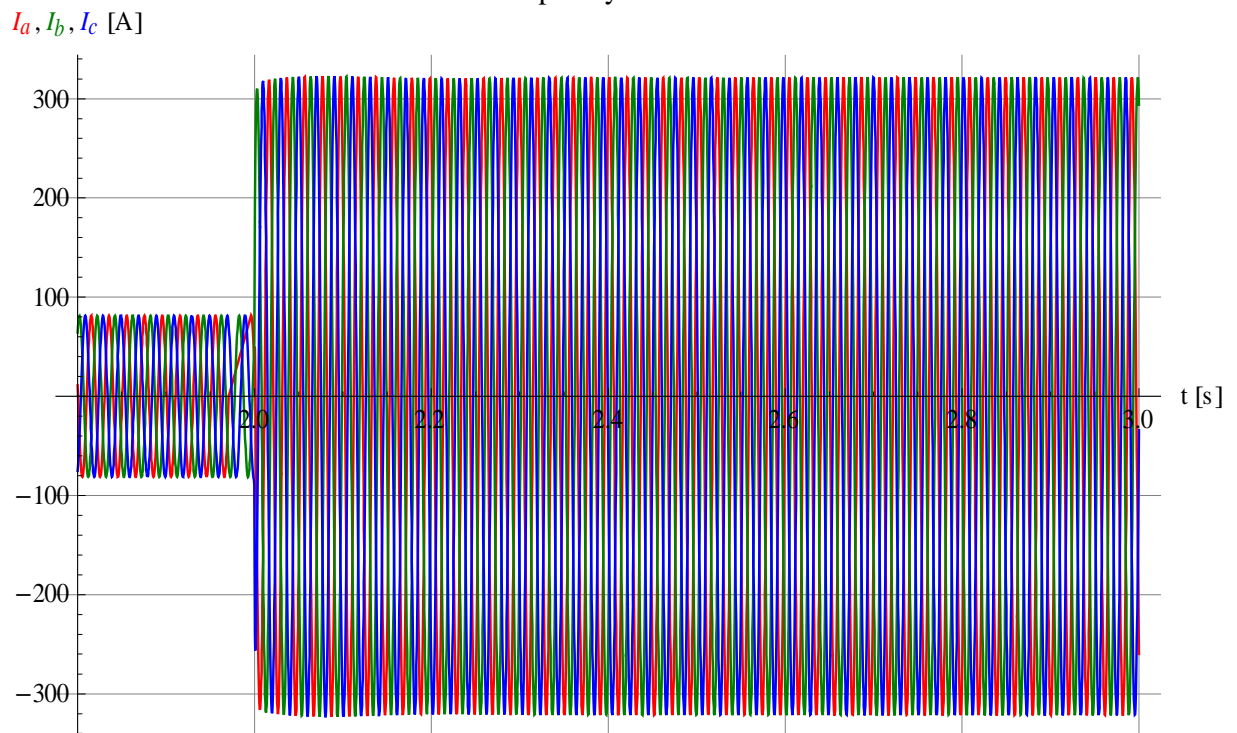
$-\Delta U.K_{buz}$, RB,
 $\frac{U_F}{U_{Fn}}$, RB' [p.u.]



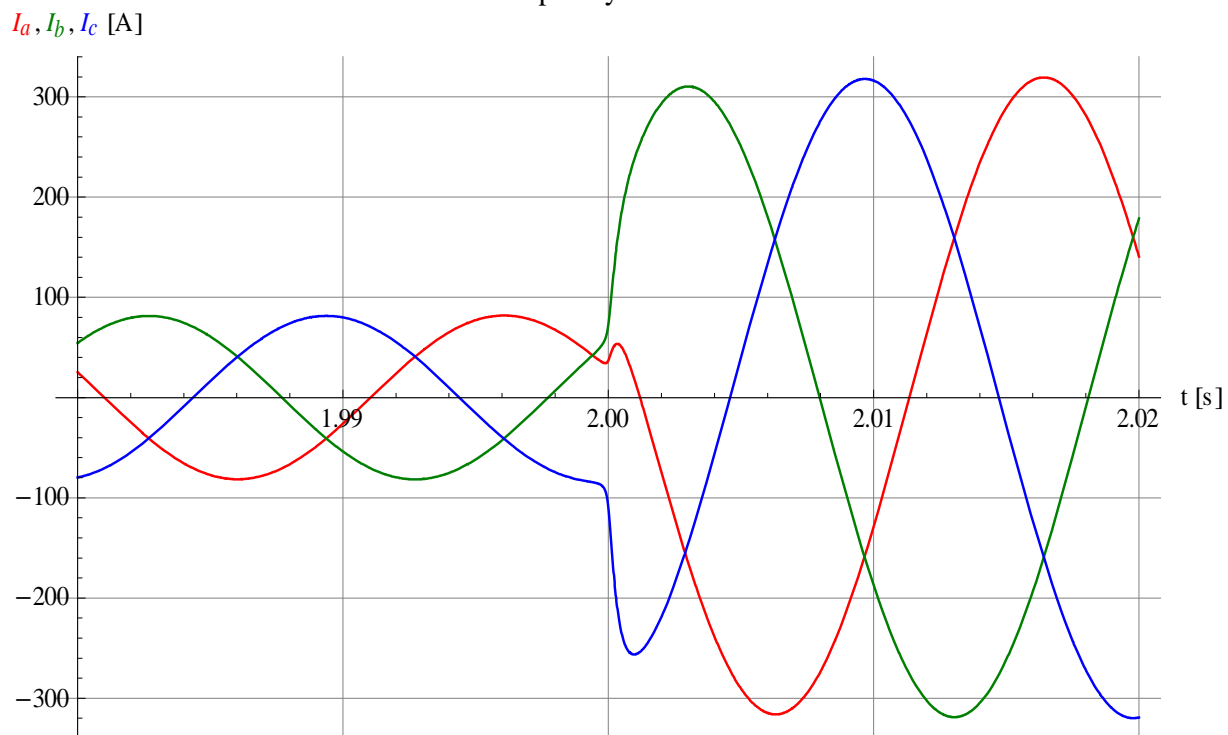
Statorové proudy ABC – Celý rozsah



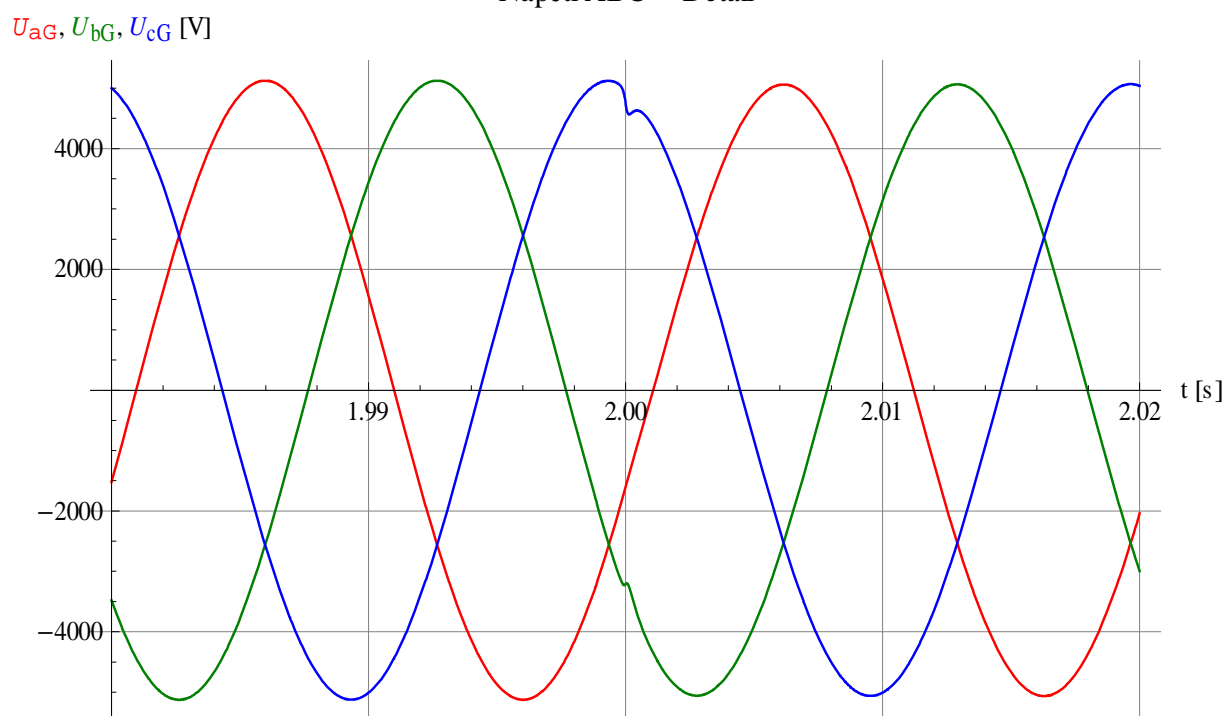
Statorové proudy ABC – Detail



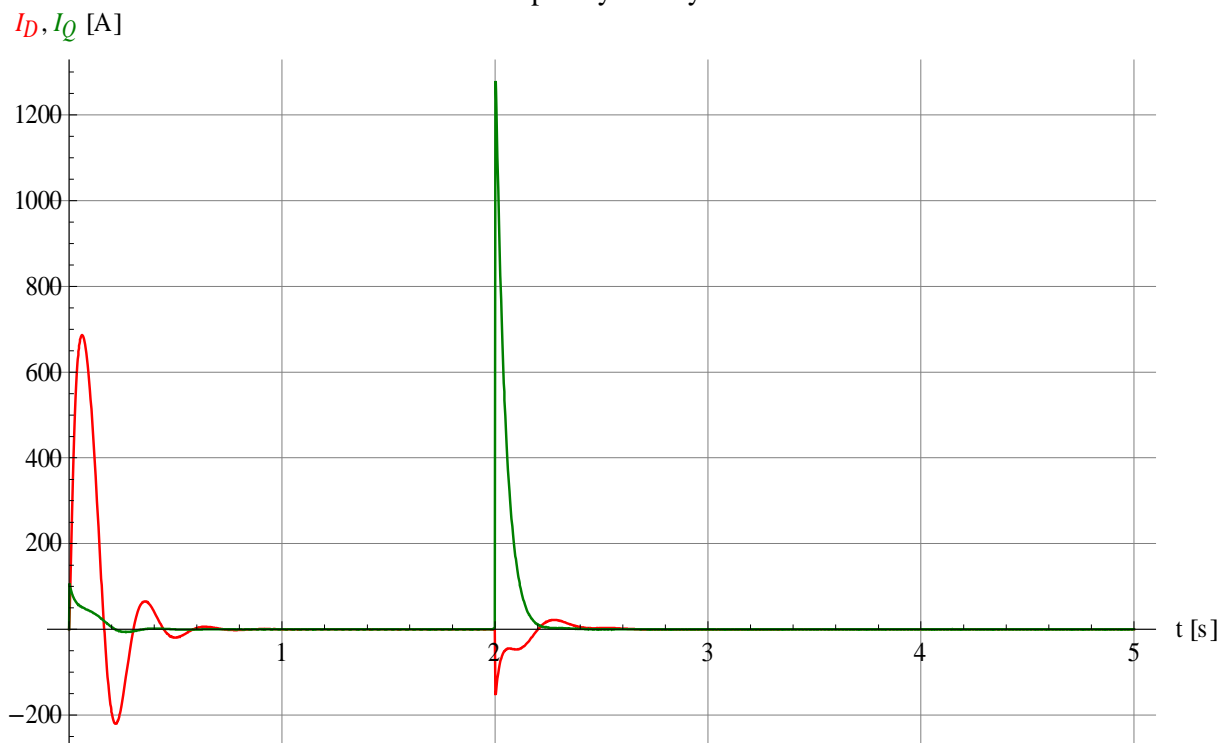
Statorové proudy ABC – Detail



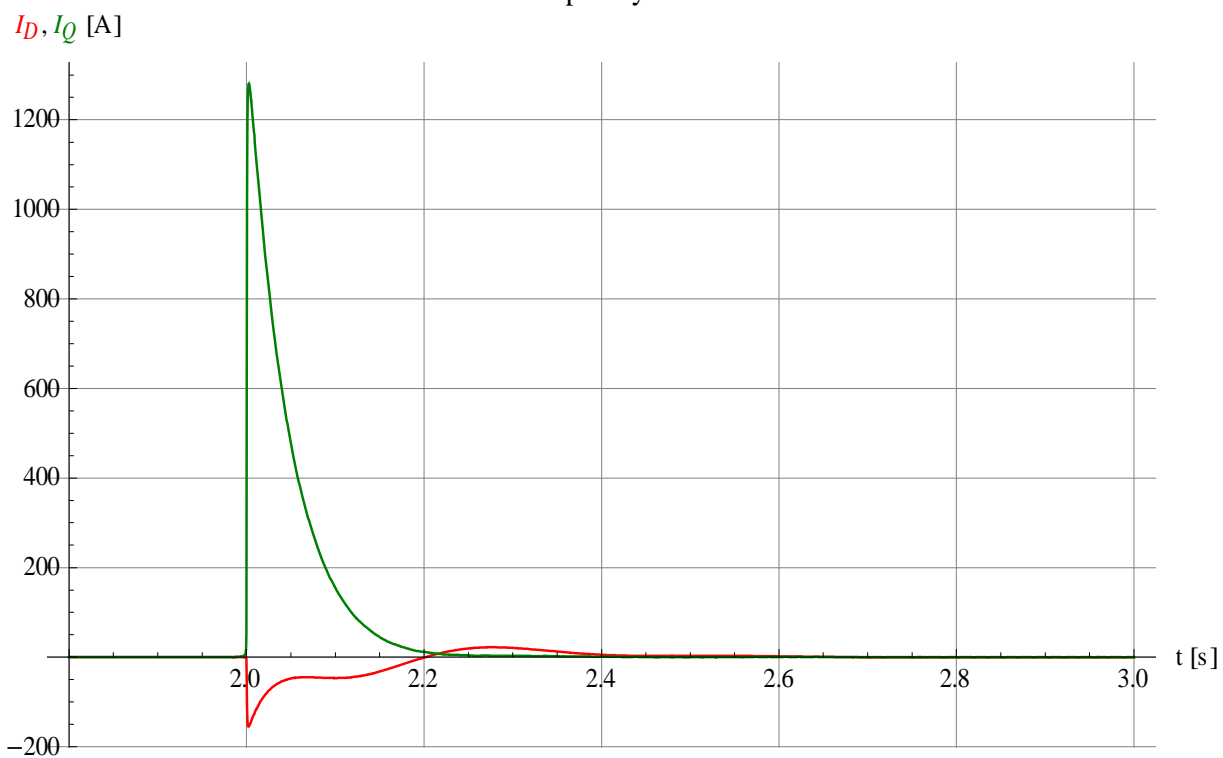
Napětí ABC – Detail



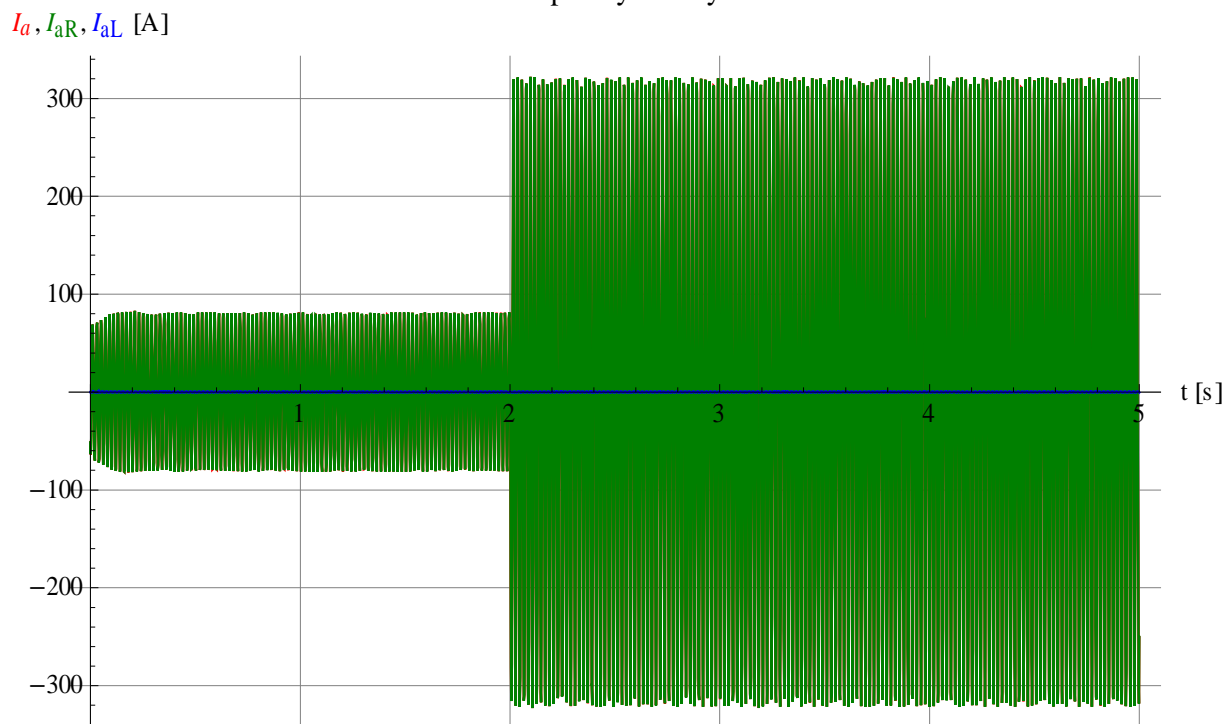
Rotorové proudy – Celý rozsah



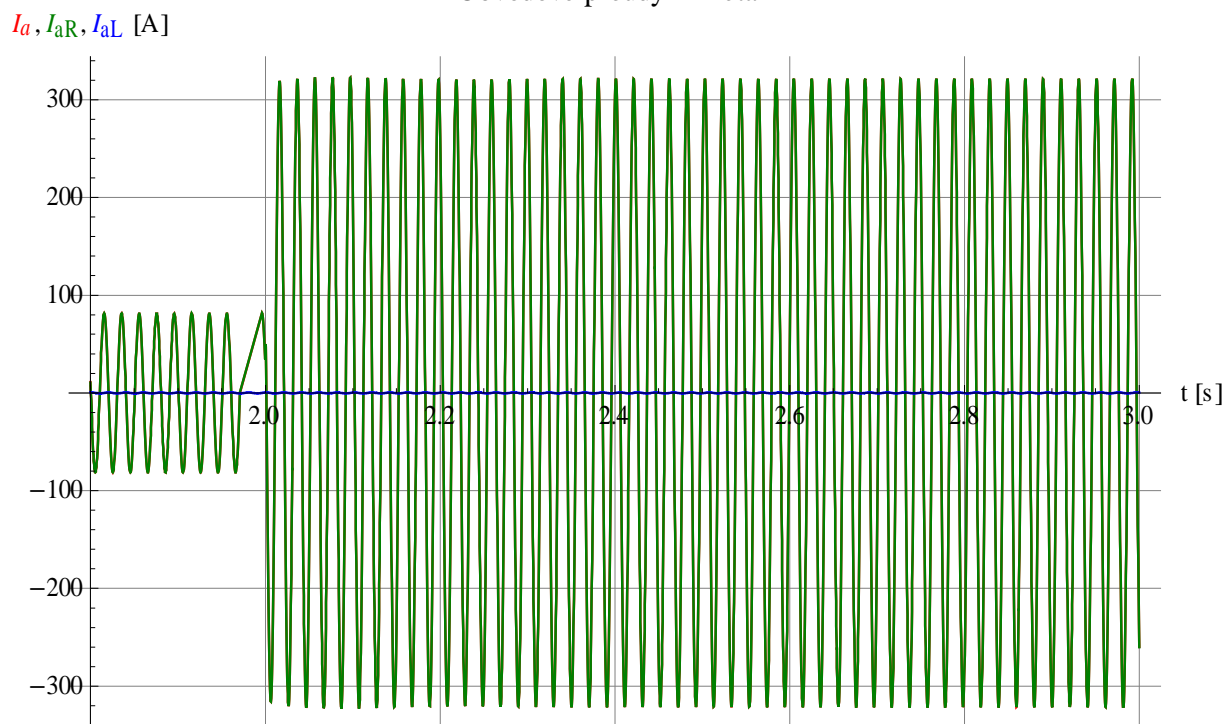
Rotorové proudy – Detail



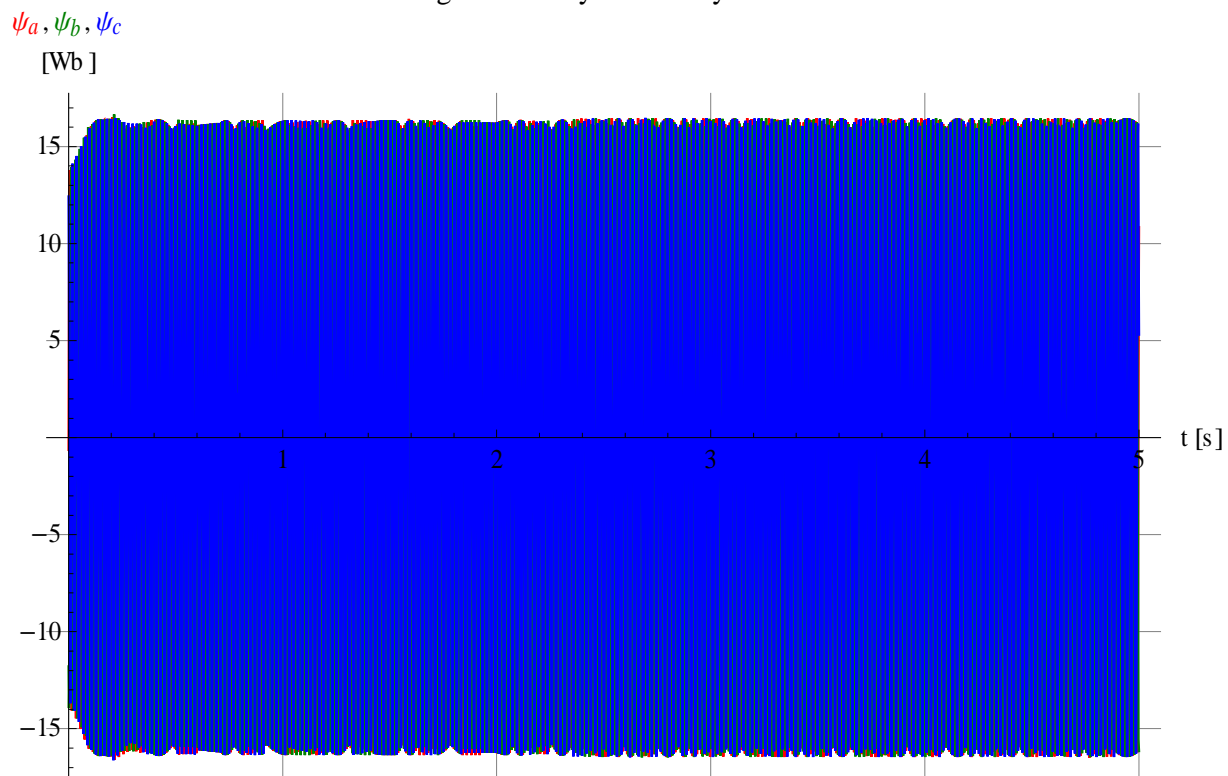
Obvodové proudy – Celý rozsah



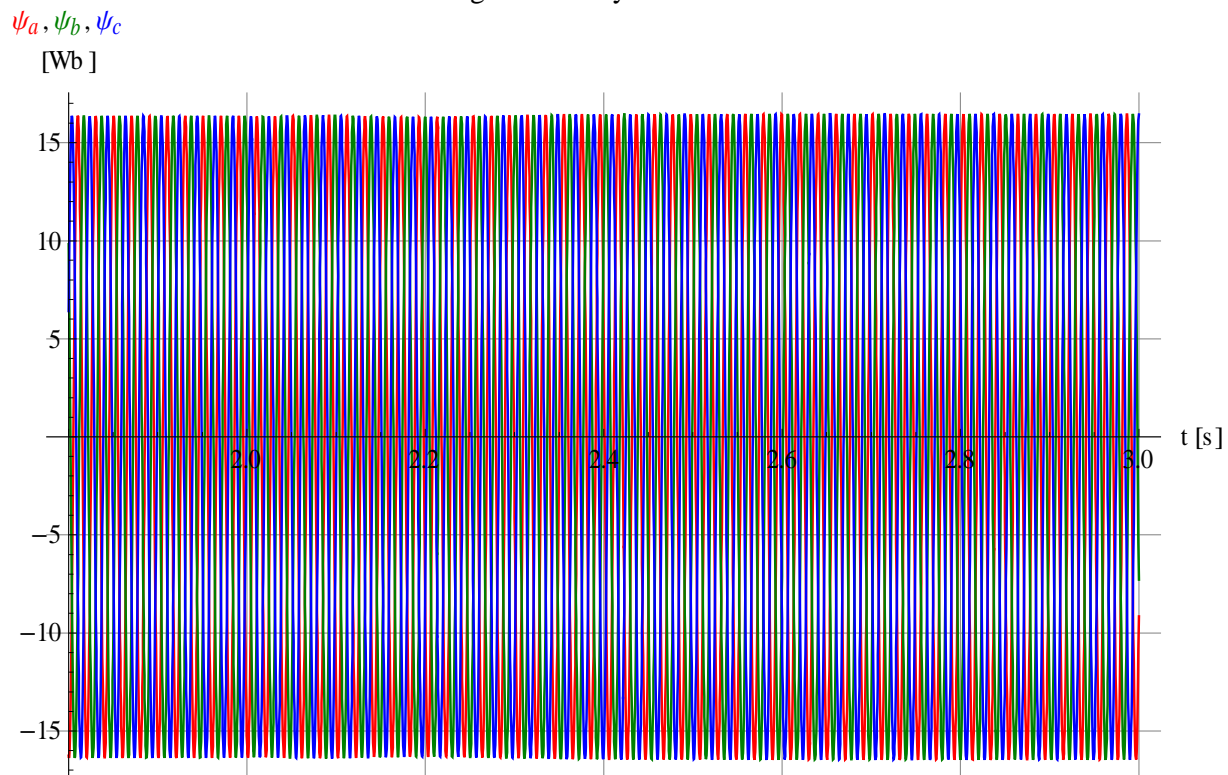
Obvodové proudy – Detail



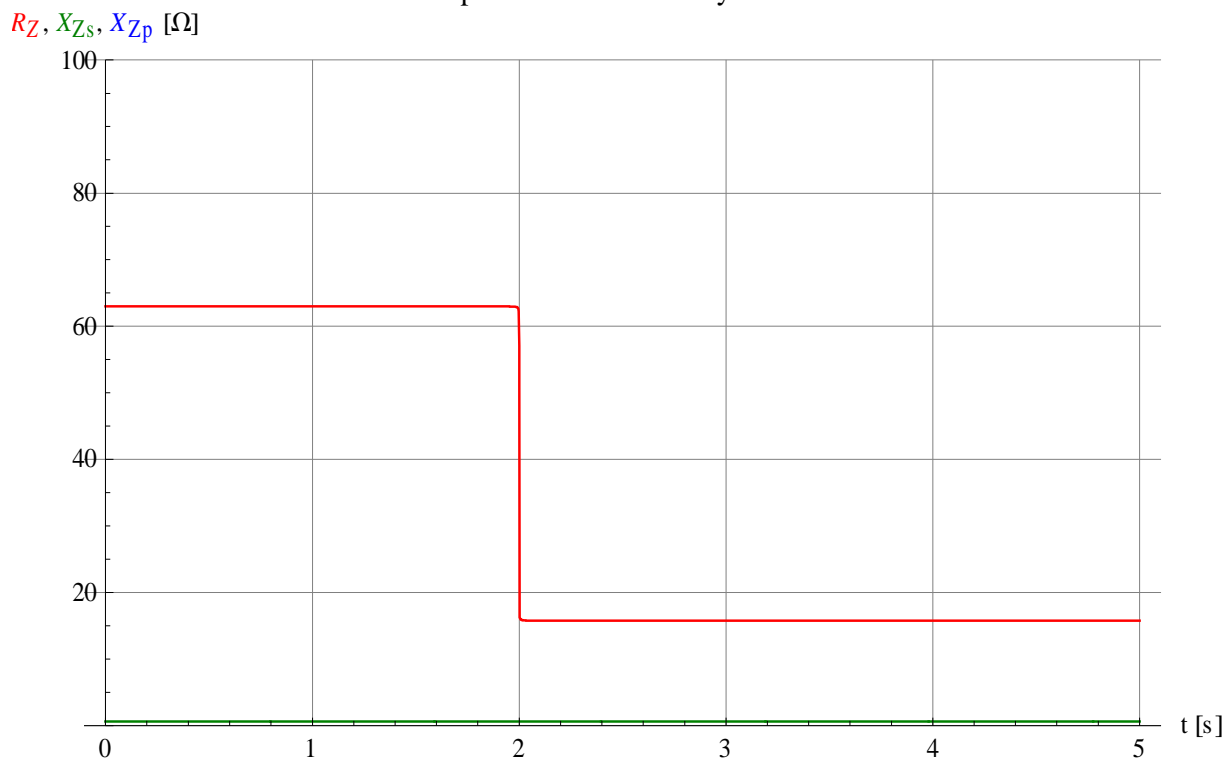
Magnetické toky SG – Celý rozsah



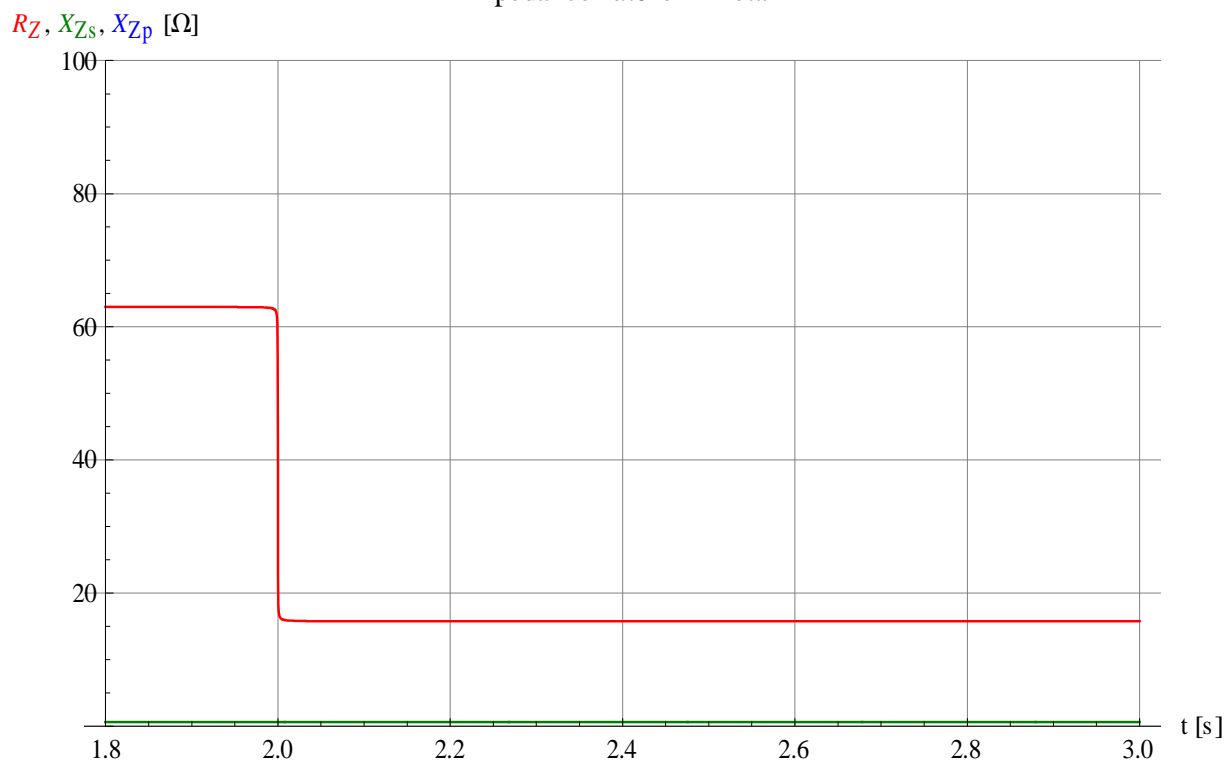
Magnetické toky SG – Detail



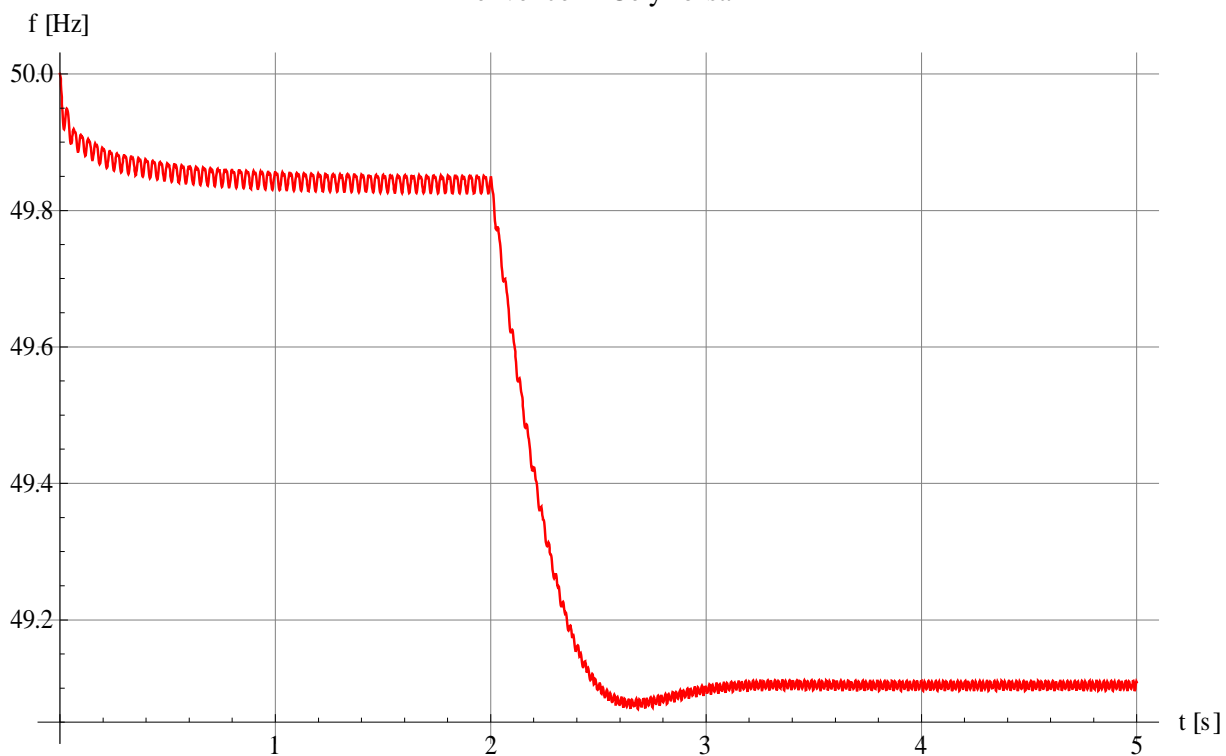
Impedance zátěže – Celý rozsah



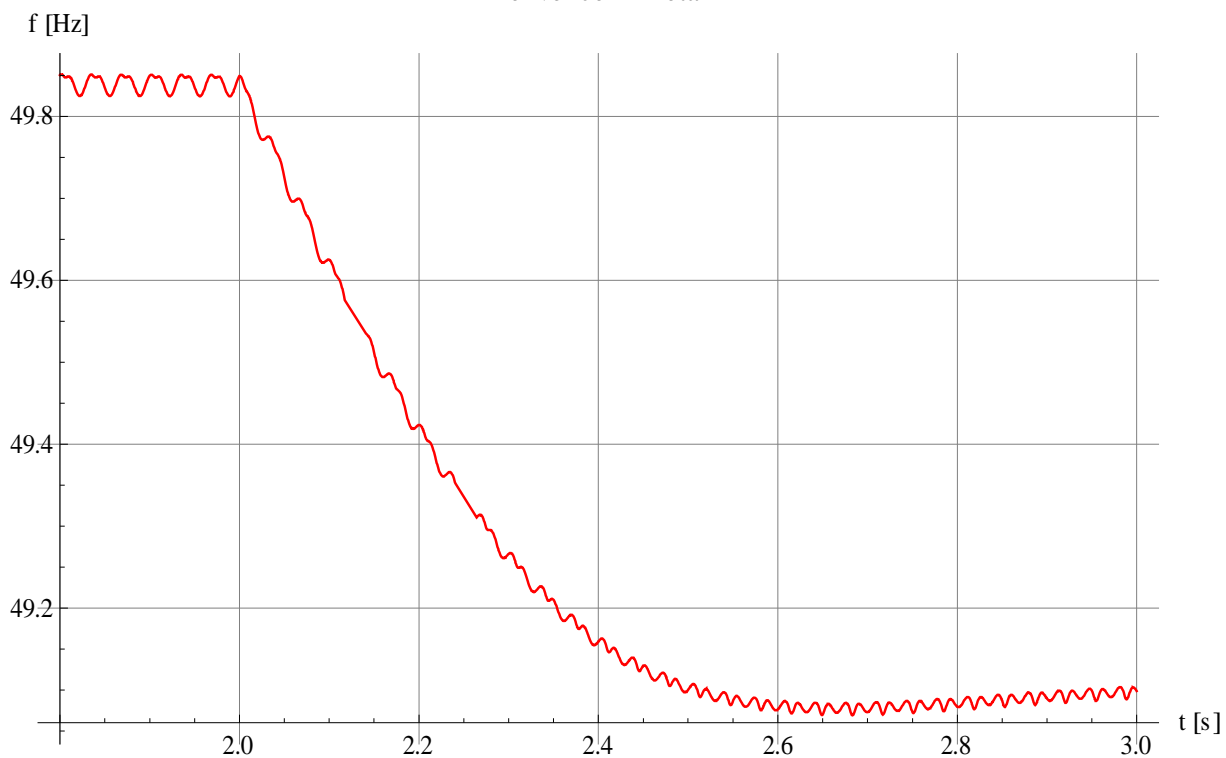
Impedance zátěže – Detail



Frekvence – Celý rozsah

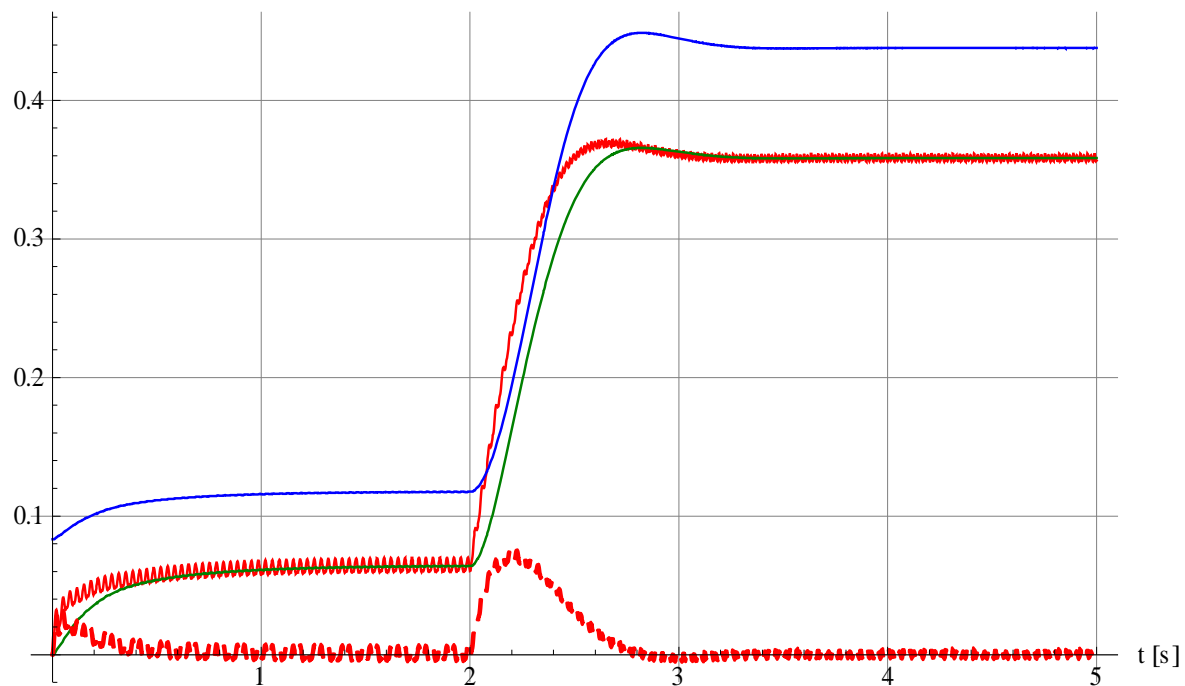


Frekvence – Detail



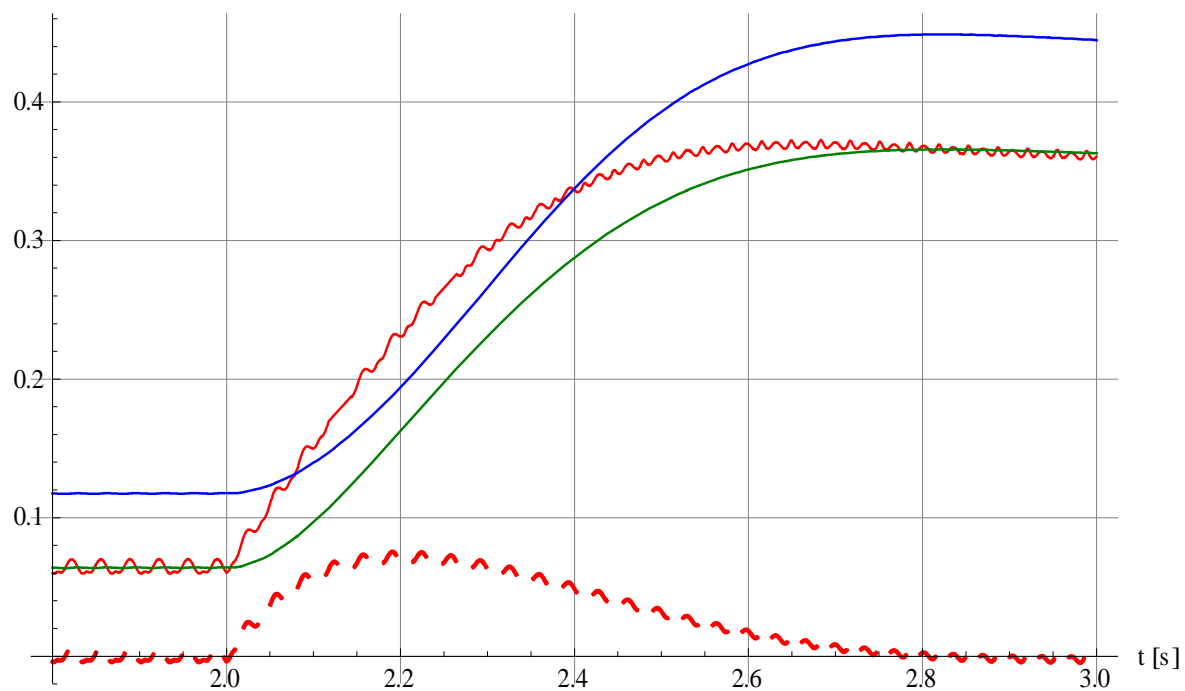
Regulace otáček – Celý rozsah

– $\Delta\omega$.Kro, RO,
Plyn, RO' [p.u.]

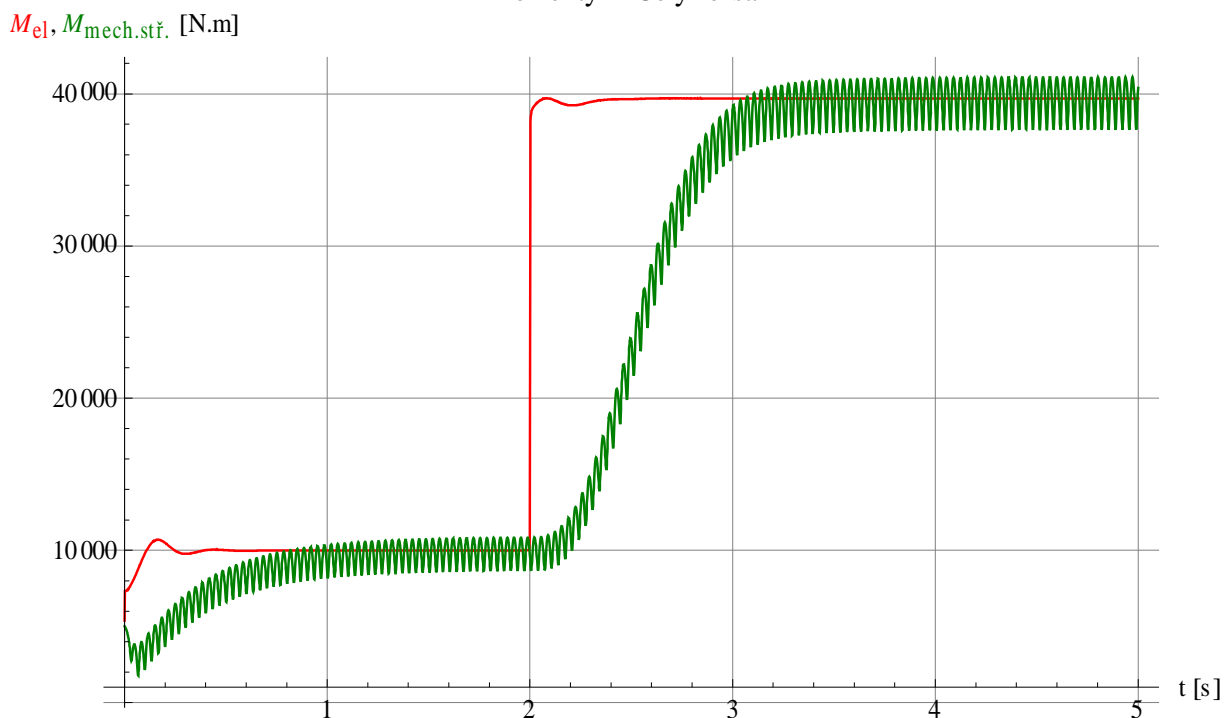


Regulace otáček – Detail

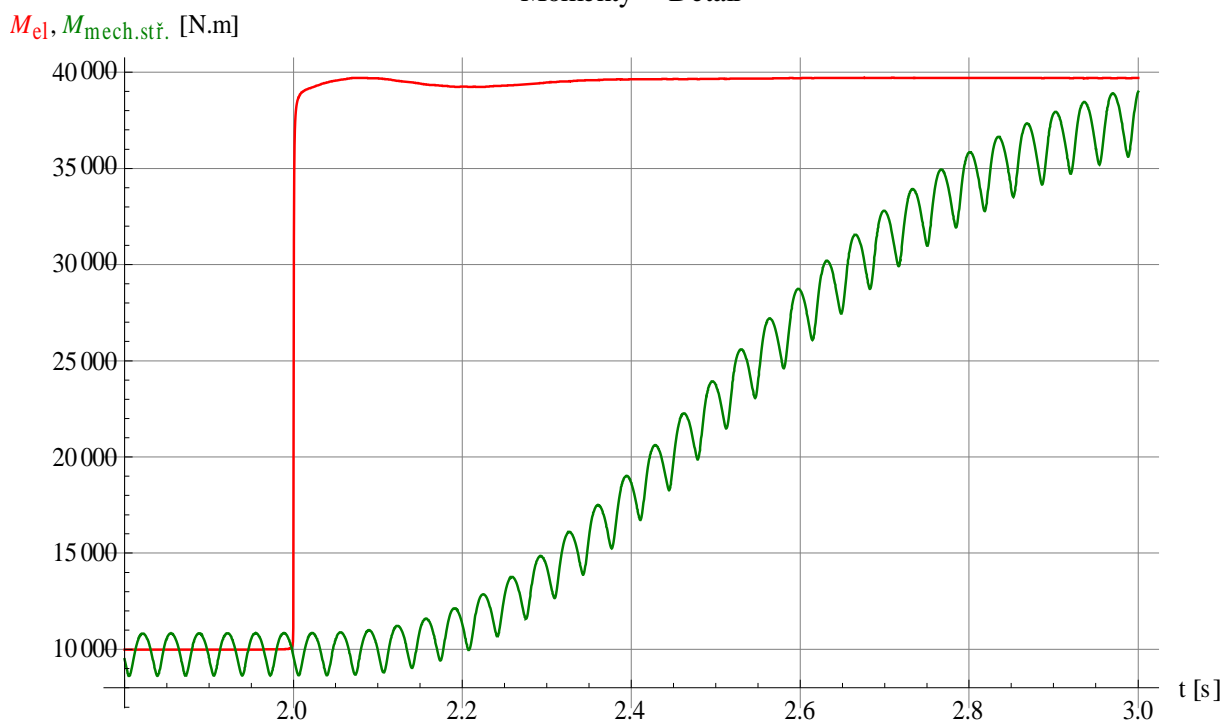
– $\Delta\omega$.Kro, RO,
Plyn, RO' [p.u.]

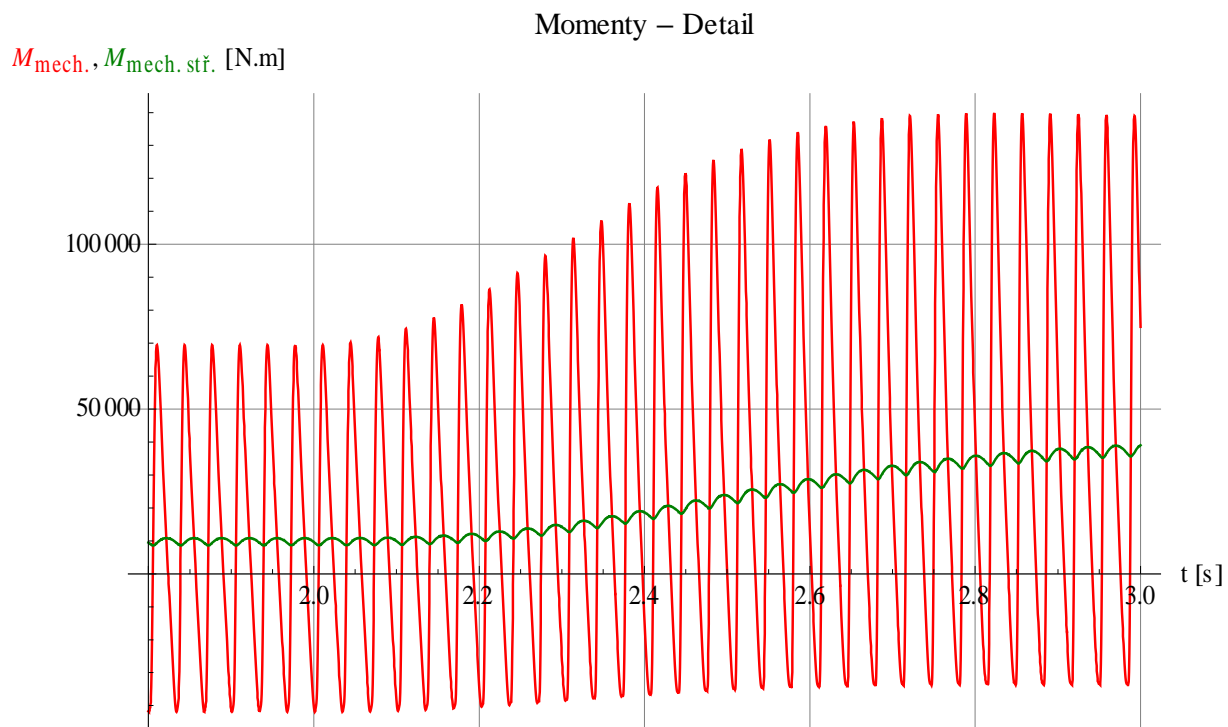
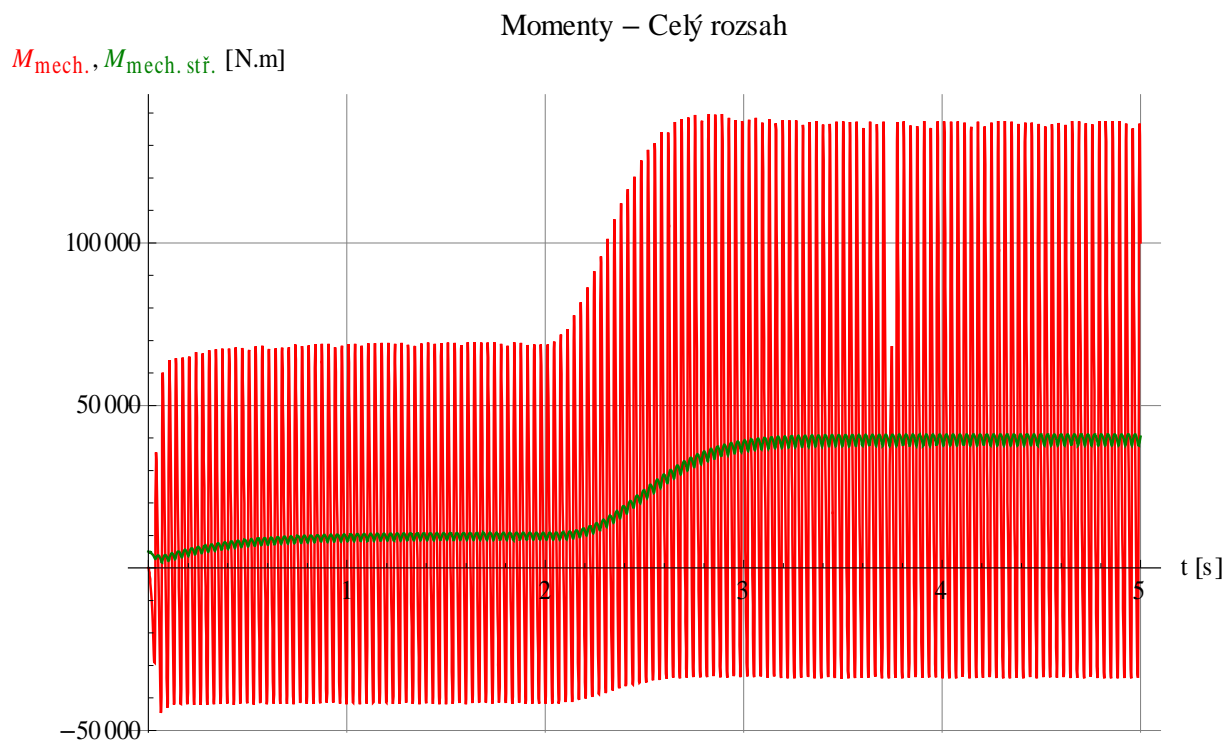


Momenty – Celý rozsah

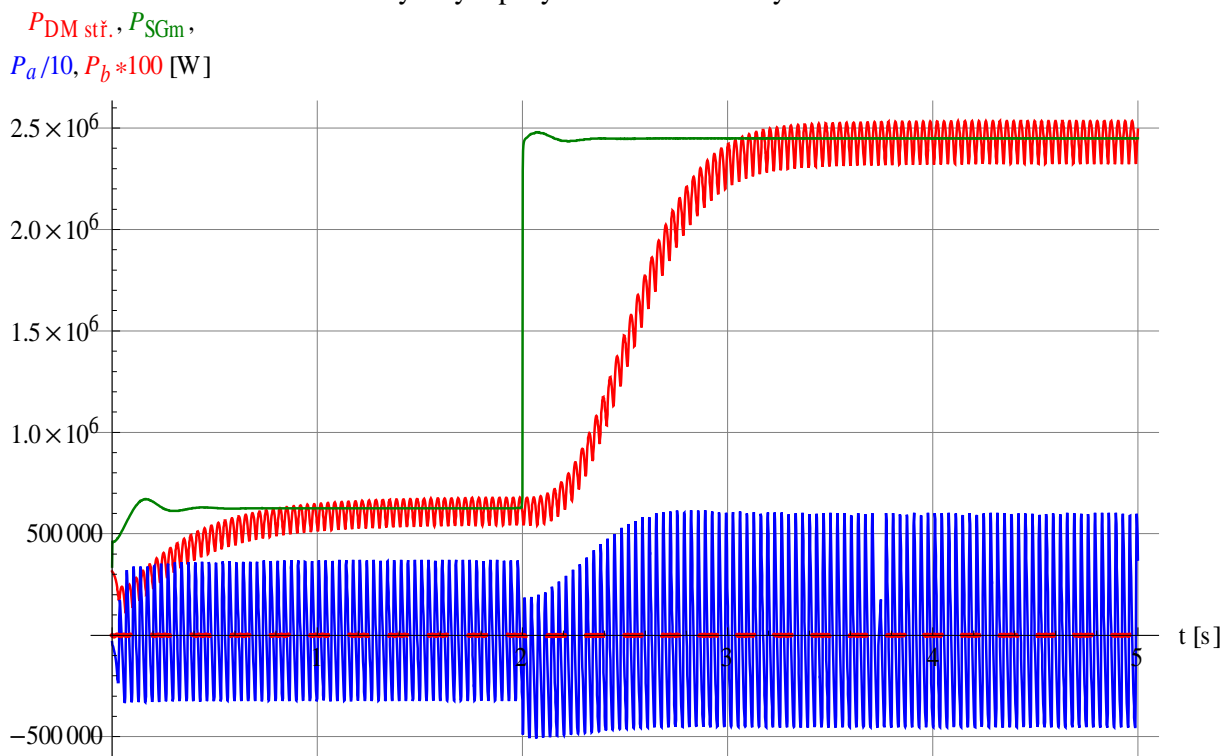


Momenty – Detail

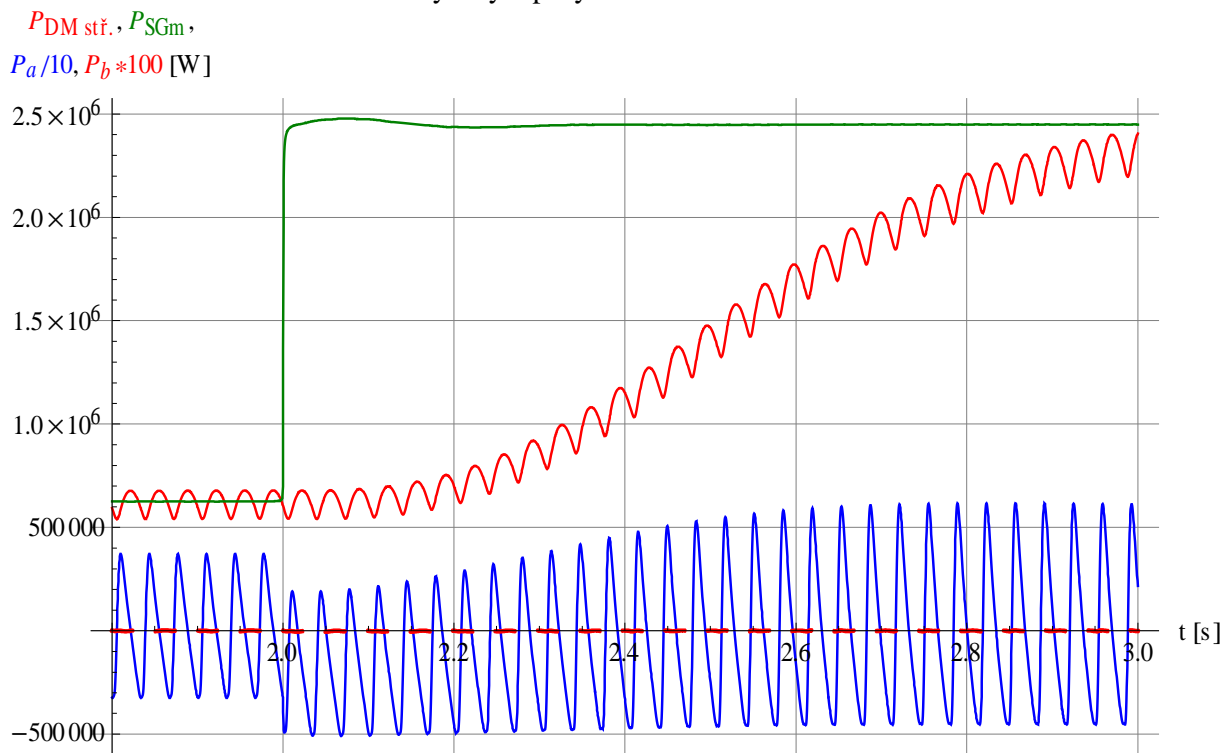




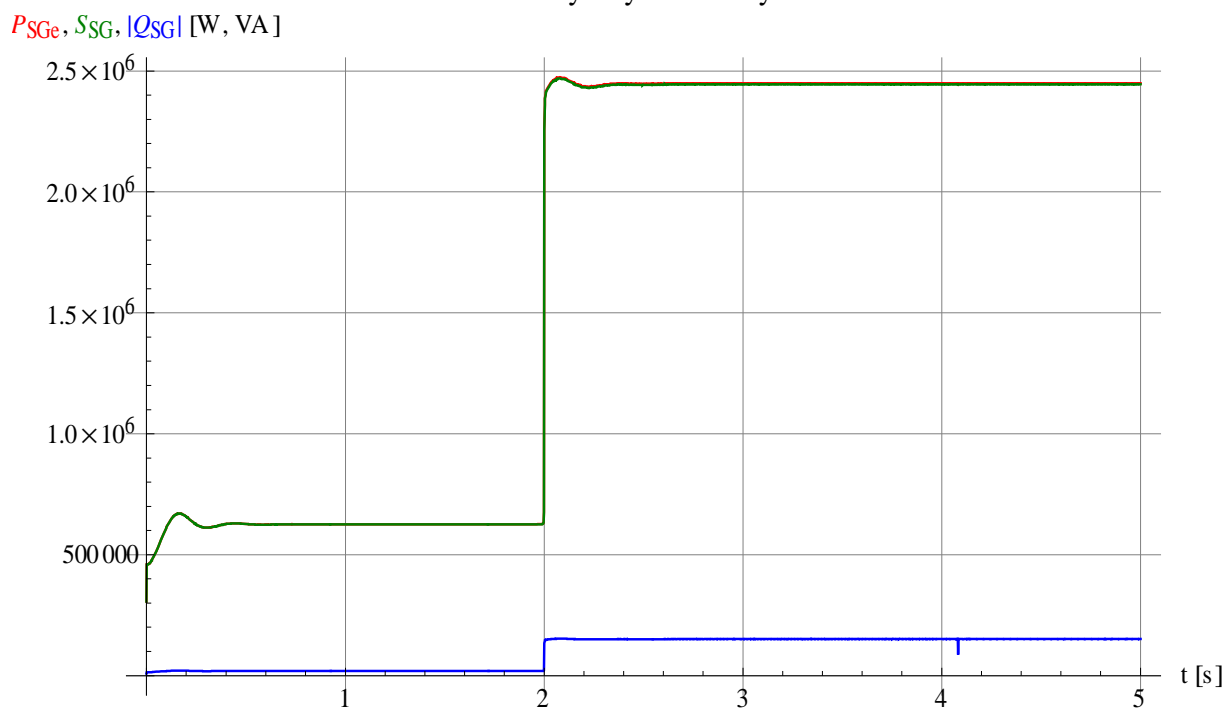
Výkony v pohybové rovnici – Celý rozsah



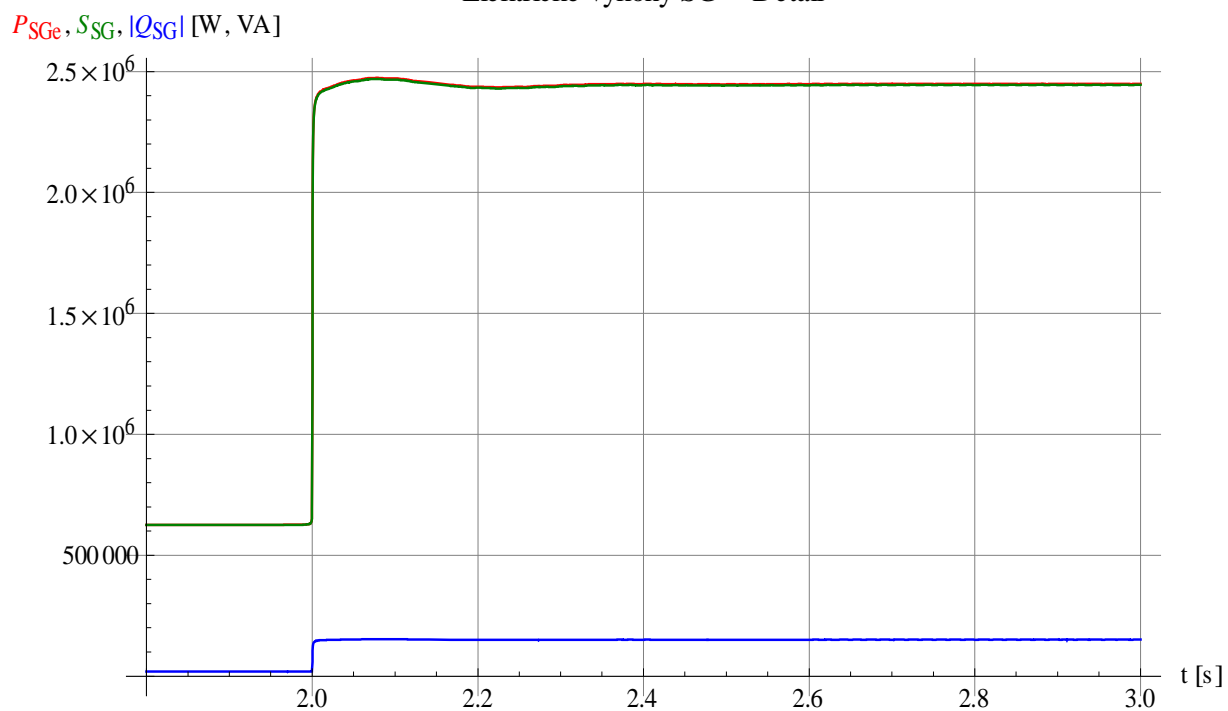
Výkony v pohybové rovnici – Detail

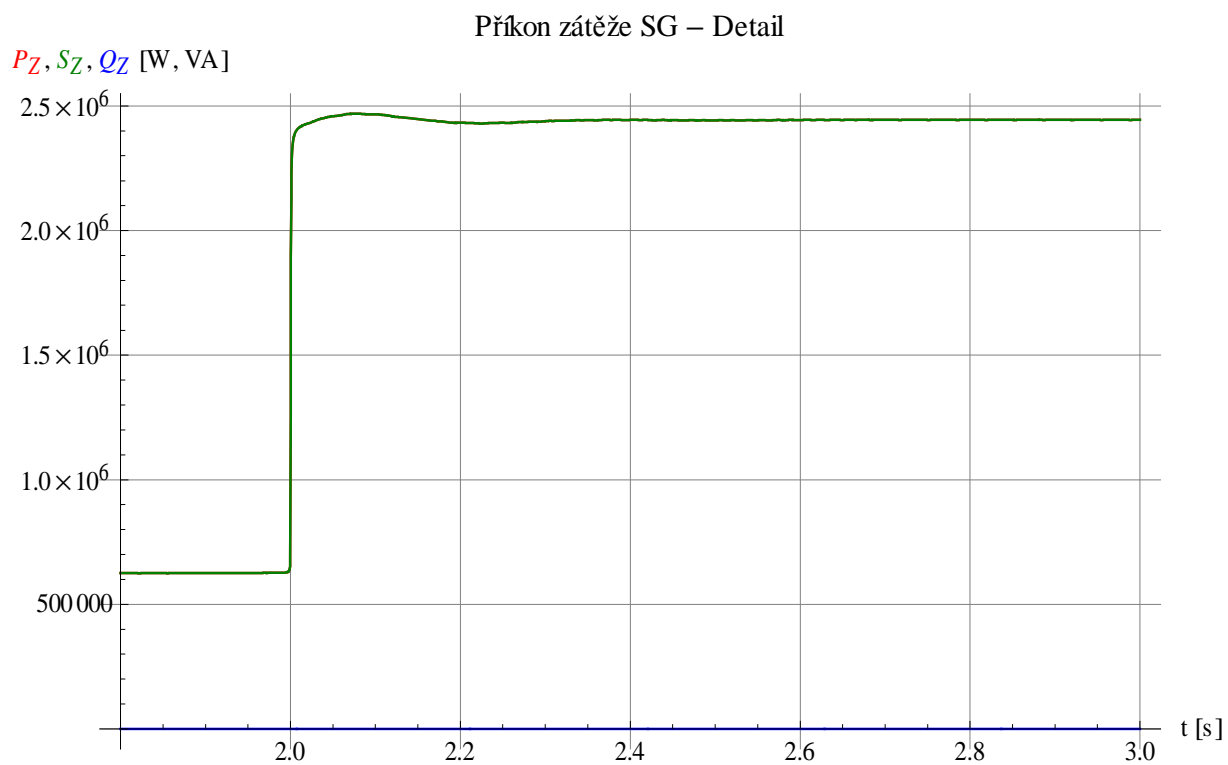
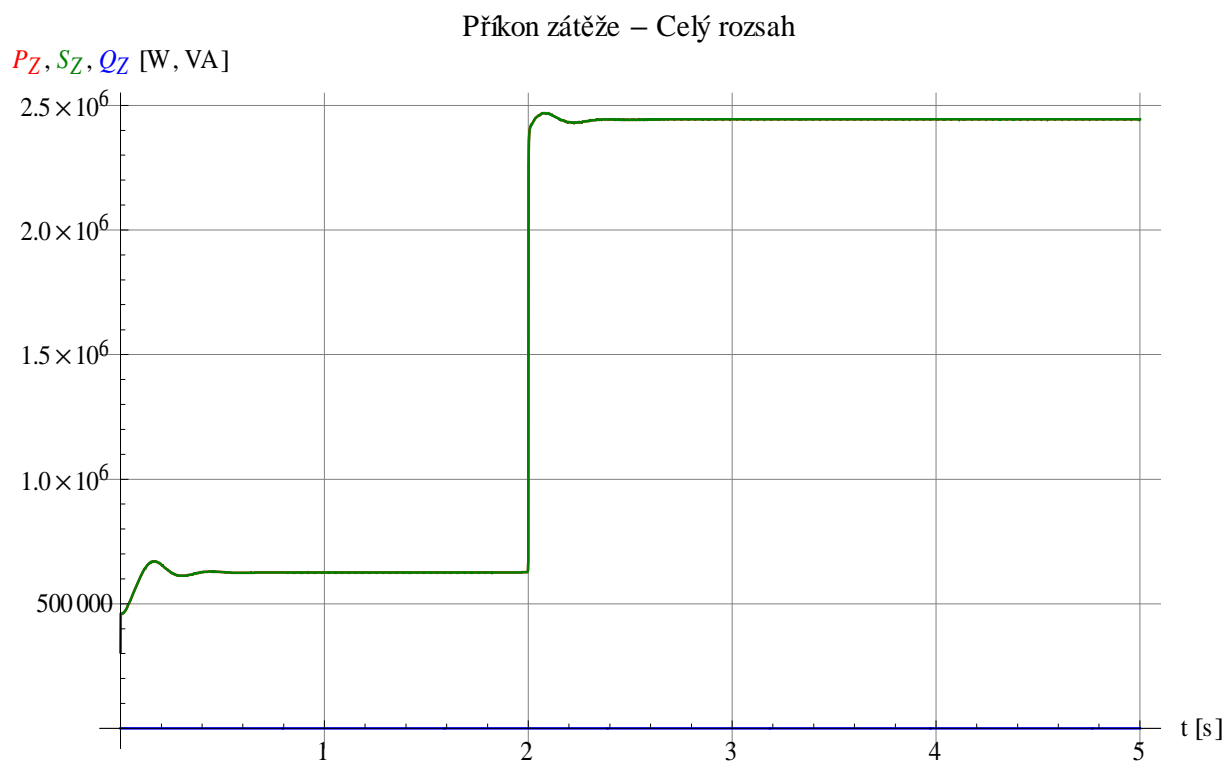


Elektrické výkony SG – Celý rozsah

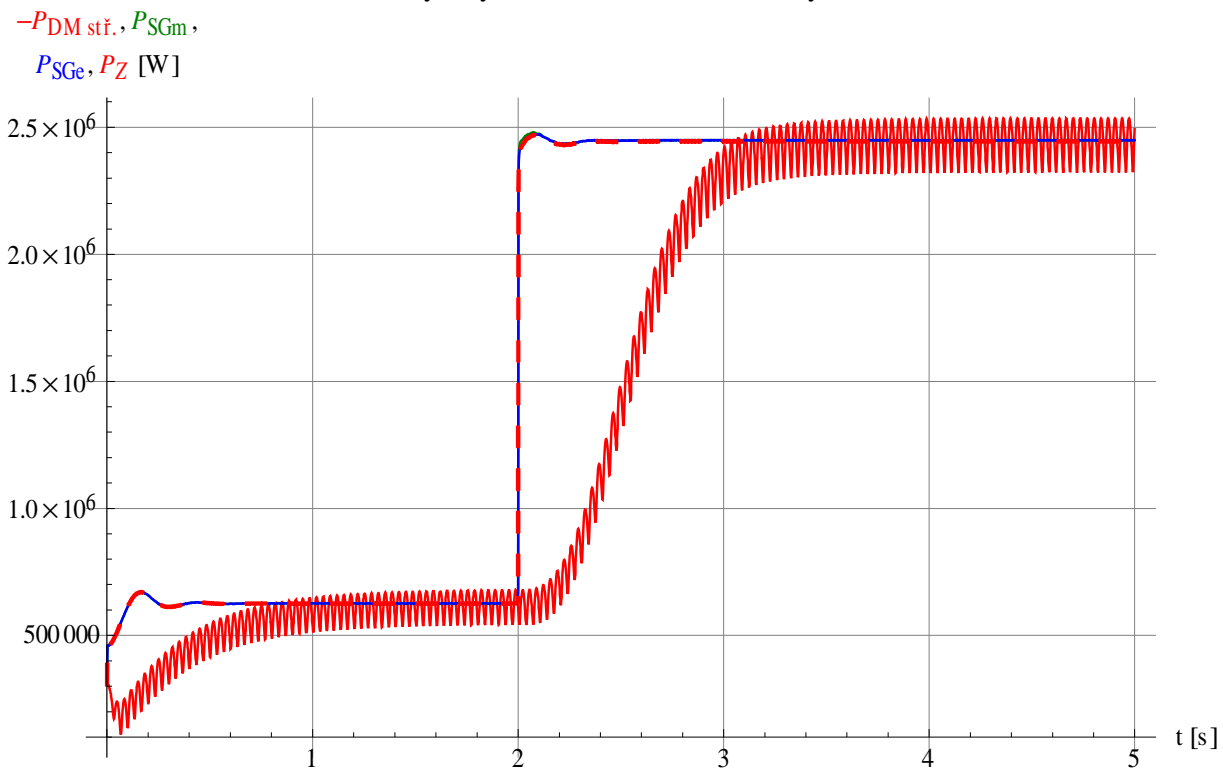


Elektrické výkony SG – Detail

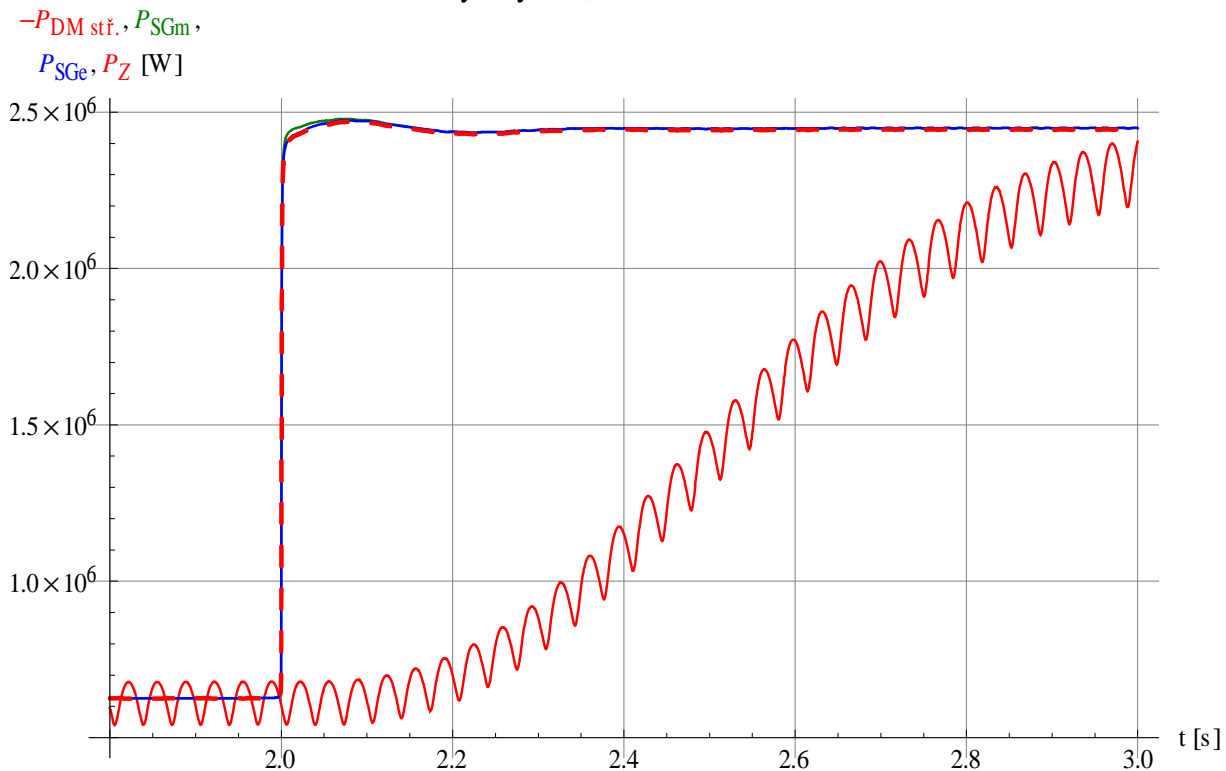




Činné výkony DM, SG a na zátěži – Celý rozsah



Činné výkony DM, SG a na zátěži – Detail



PŘÍLOHA 7-1

Zatěžování DG

výsledky simulací

Přehled výpočtových případů

7.1.1 Postupné zatěžování DG zátěží typu R

- Napětí na generátoru
- Obvodové proudy
- Impedance zátěže
- Výkony
- Frekvence
- Momenty

7.1.2 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL

- dtto 7.1.1

7.1.3 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, strop buzení = 6

- dtto 7.1.1

7.2.1 Skok zátěže +20%

- Napětí
- Výkon
- Frekvence

7.2.2 Skok zátěže +40%

- dtto 7.2.1

7.2.3 Skok zátěže +70%

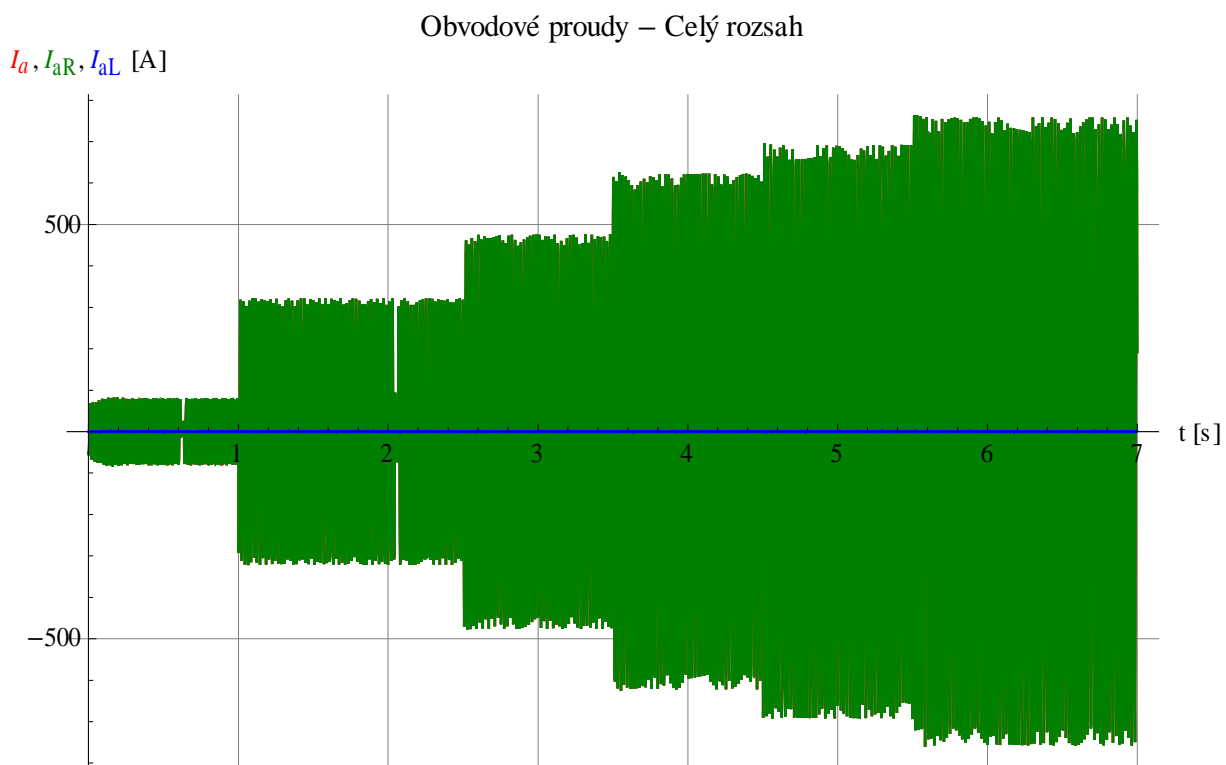
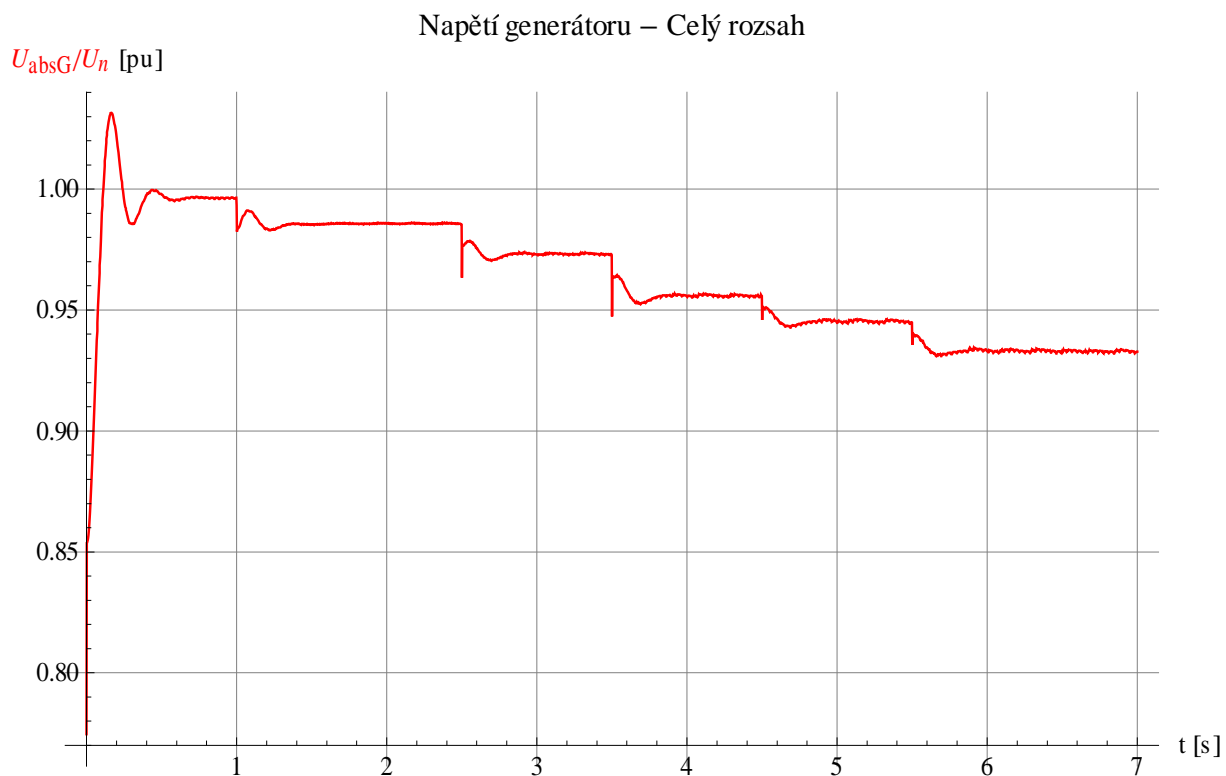
- dtto 7.2.1

Použité symboly

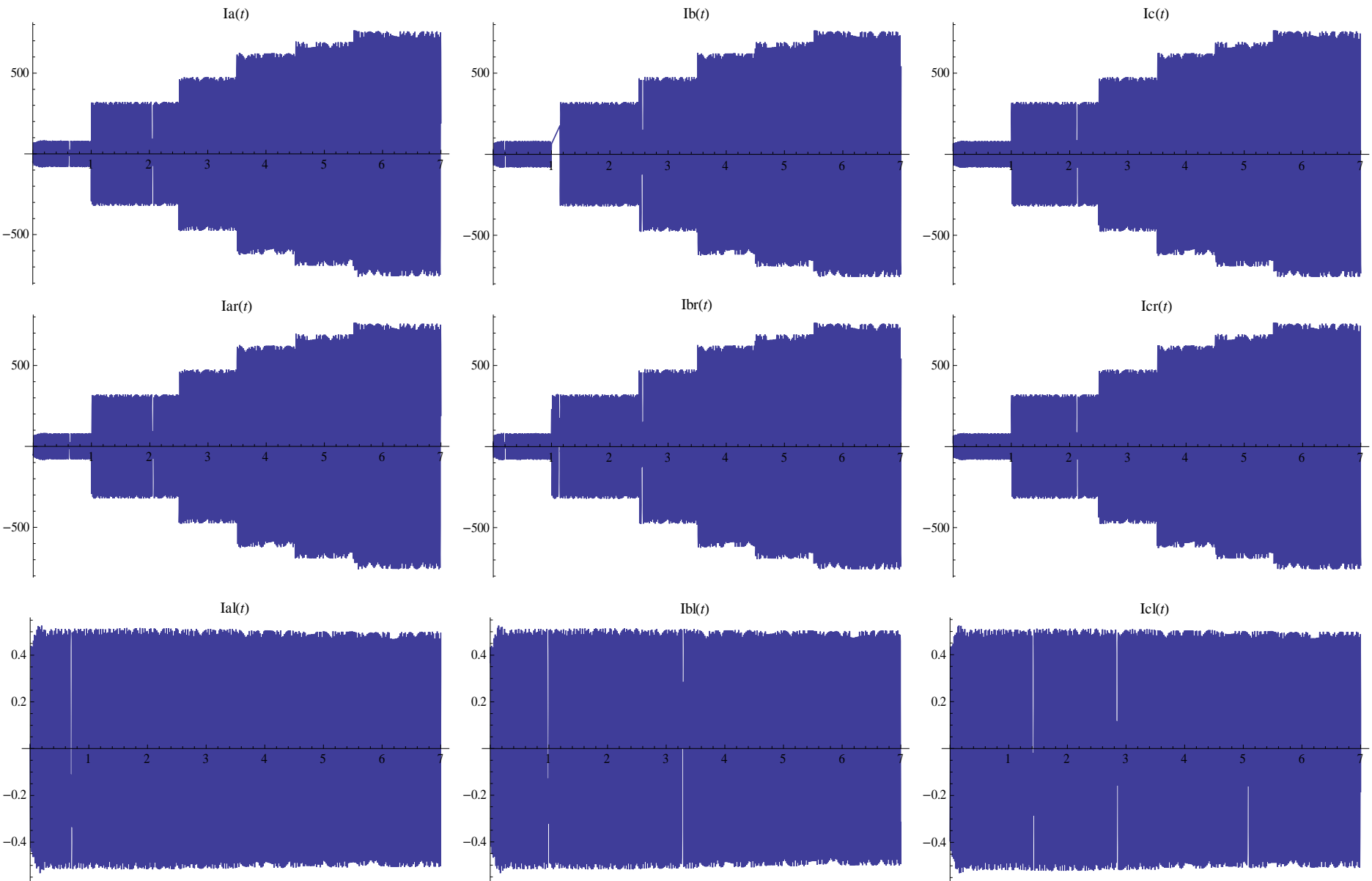
Označení	MJ	Jméno	Poznámka
U_{abs}	V	Absolutní hodnota napětí SG	Vypočteno ze složek d, q
I_a, I_b, I_c	V	Proudy SG v jednotlivých fázích	
I_{aR}, I_{aL}	A	Proudy protékající zátěží	Zátěž je tvořena paralelní RL kombinací. Uvedené proudy tečou větví R a L.
R_Z, X_{Zs}, X_{Zp}	Ω	Nastavený průběh impedance zátěže	R_Z, X_{Zs} jsou zapojeny v jedné větvi do série a k ní je paralelně připojena větev s X_{Zp}
f	Hz	Frekvence na svorkách SG	
M_{el}	N.m	Moment SG	$M_{el} = \frac{\partial W_C}{\partial \theta}$, kde $W_C = \frac{1}{2} I_{SG}^T \Psi$
$M_{mech.}, M_{mech.stř.}$	Nm	Moment diesel motoru	$M_{mech.stř.}$ je zatížen chybou převodníku
$P_{DMstř.}$	W	Výkon diesel motoru	Spočten z otáček a momentu diesel motoru
P_{SGm}	W	Výkon SG mechanický	Spočten z otáček a momentu SG
P_{SGe}	W	Výkon SG elektrický	Spočten z proudů a magnetických toků SG
P_Z	W	Výkon na odporové zátěži	Spočten z proudu tekoucí větví zátěže s R_Z
P_a	W	Akcelerační část momentu	Představuje 2. člen pohybové rovnice
P_b	W	Tlumicí část momentu	Představuje 3. člen pohybové rovnice

Pořadí barevného značení veličin: **červená**, **zelená**, **modrá**, **červená čárkovaná**, **zelená čárkovaná** a **modrá čárkovaná**.

7.1.1 Postupné zatěžování DG zátěží typu R

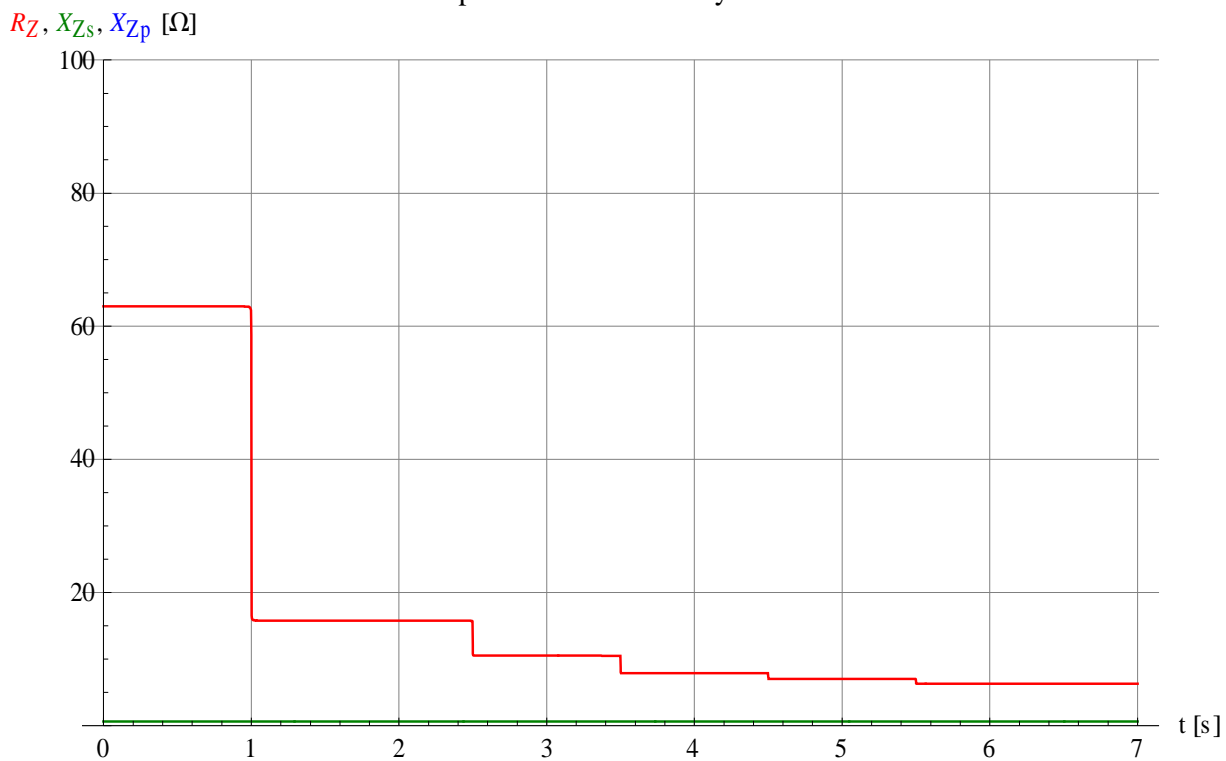


7.1.1 Postupné zatěžování DG zátěží typu R, proudy [A]

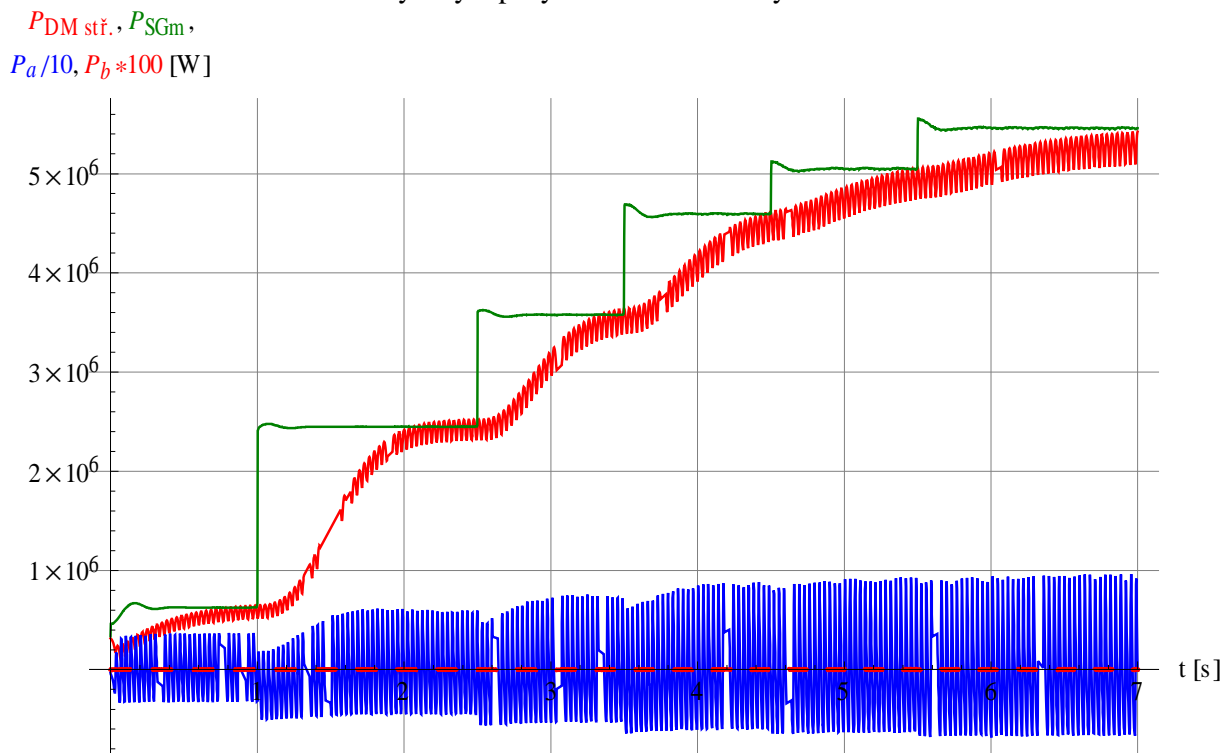


7.1.1 Postupné zatěžování DG zátěží typu R

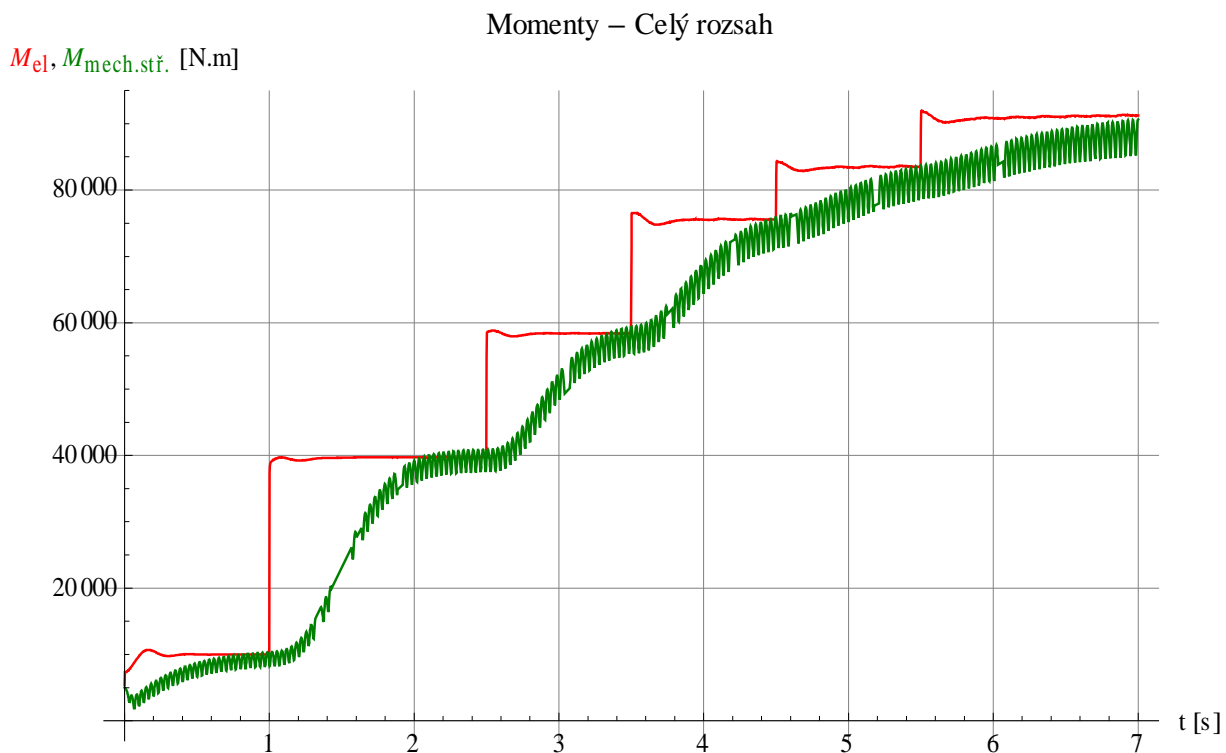
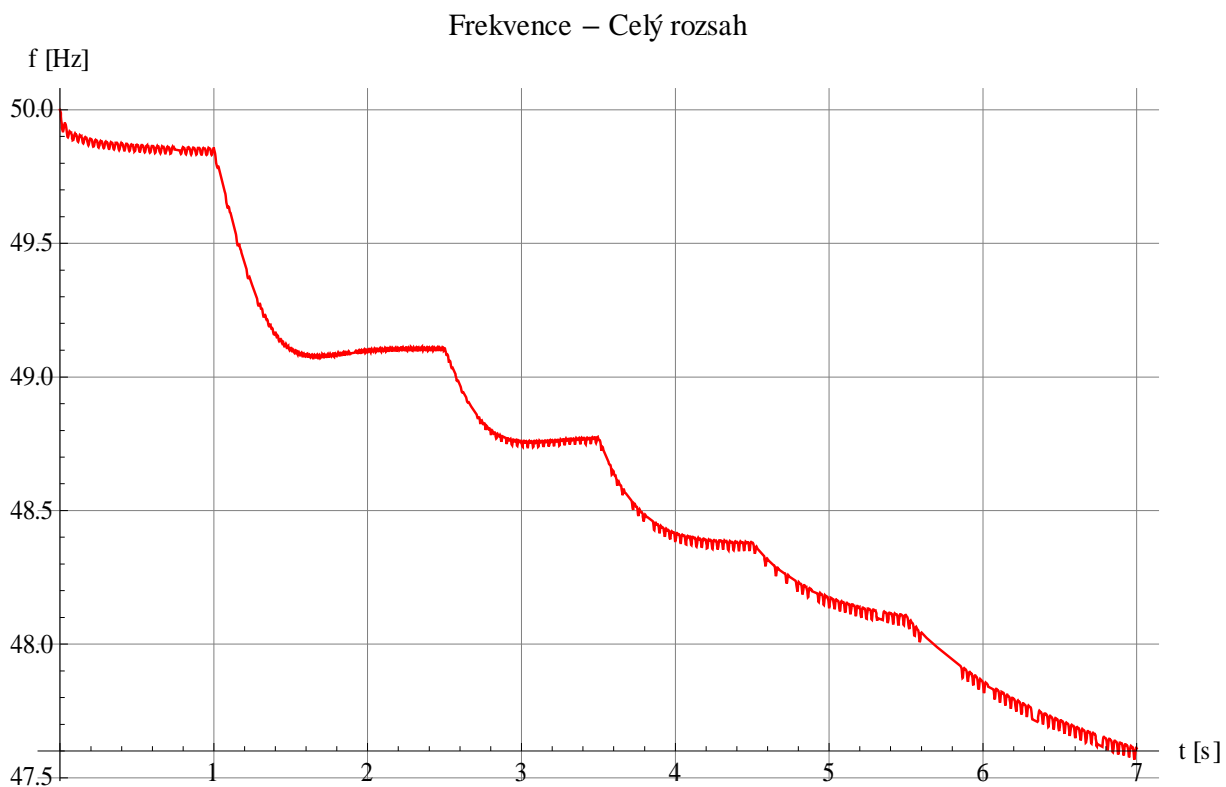
Impedance zátěže – Celý rozsah



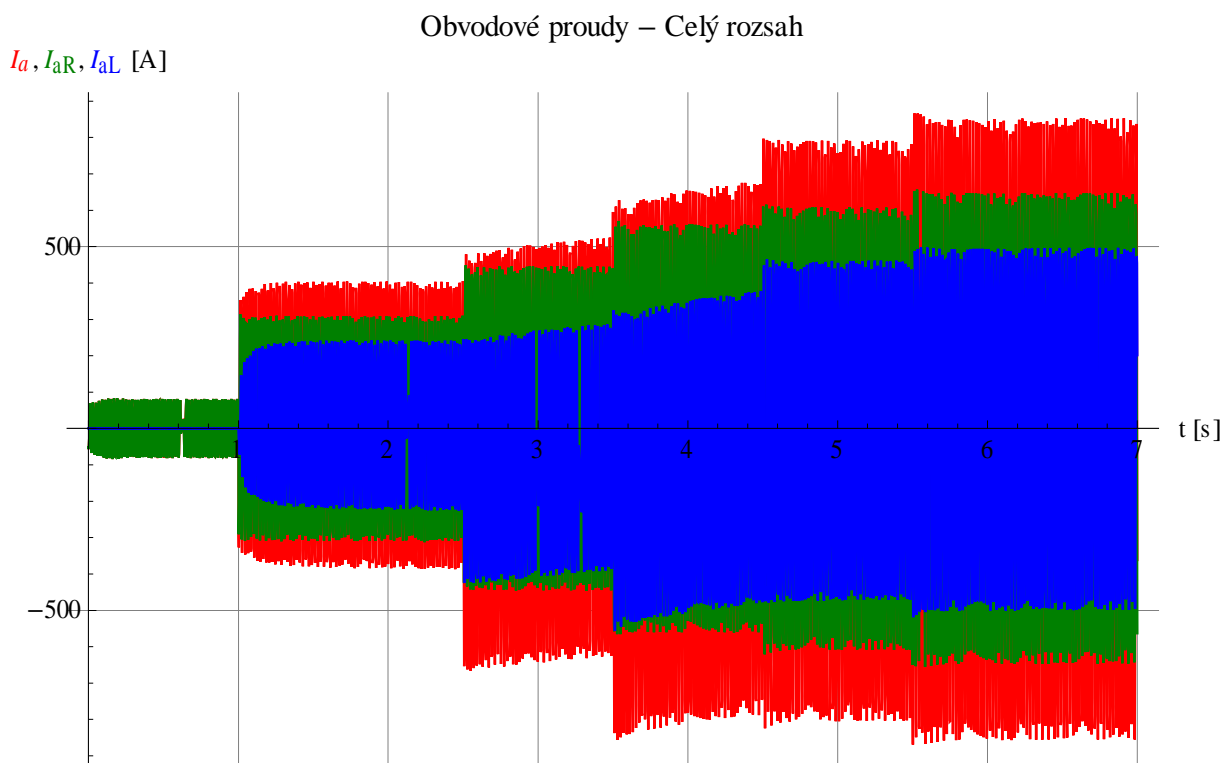
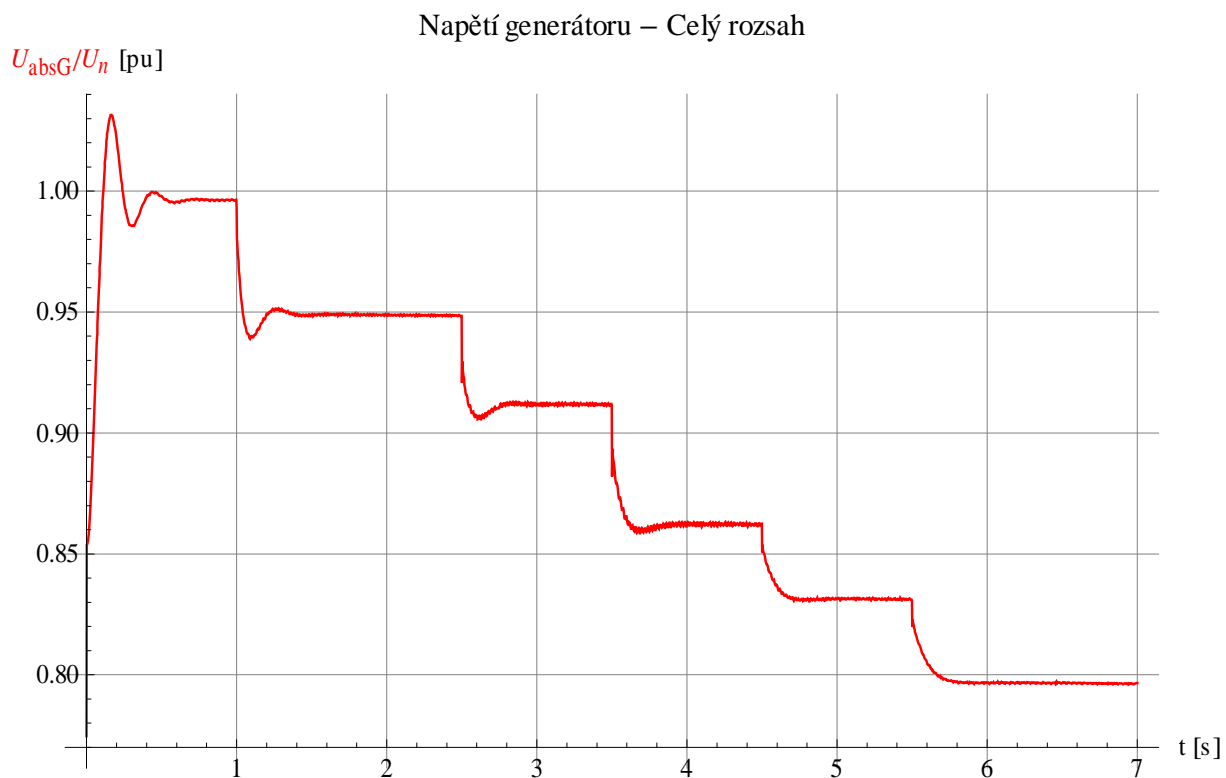
Výkony v pohybové rovnici – Celý rozsah



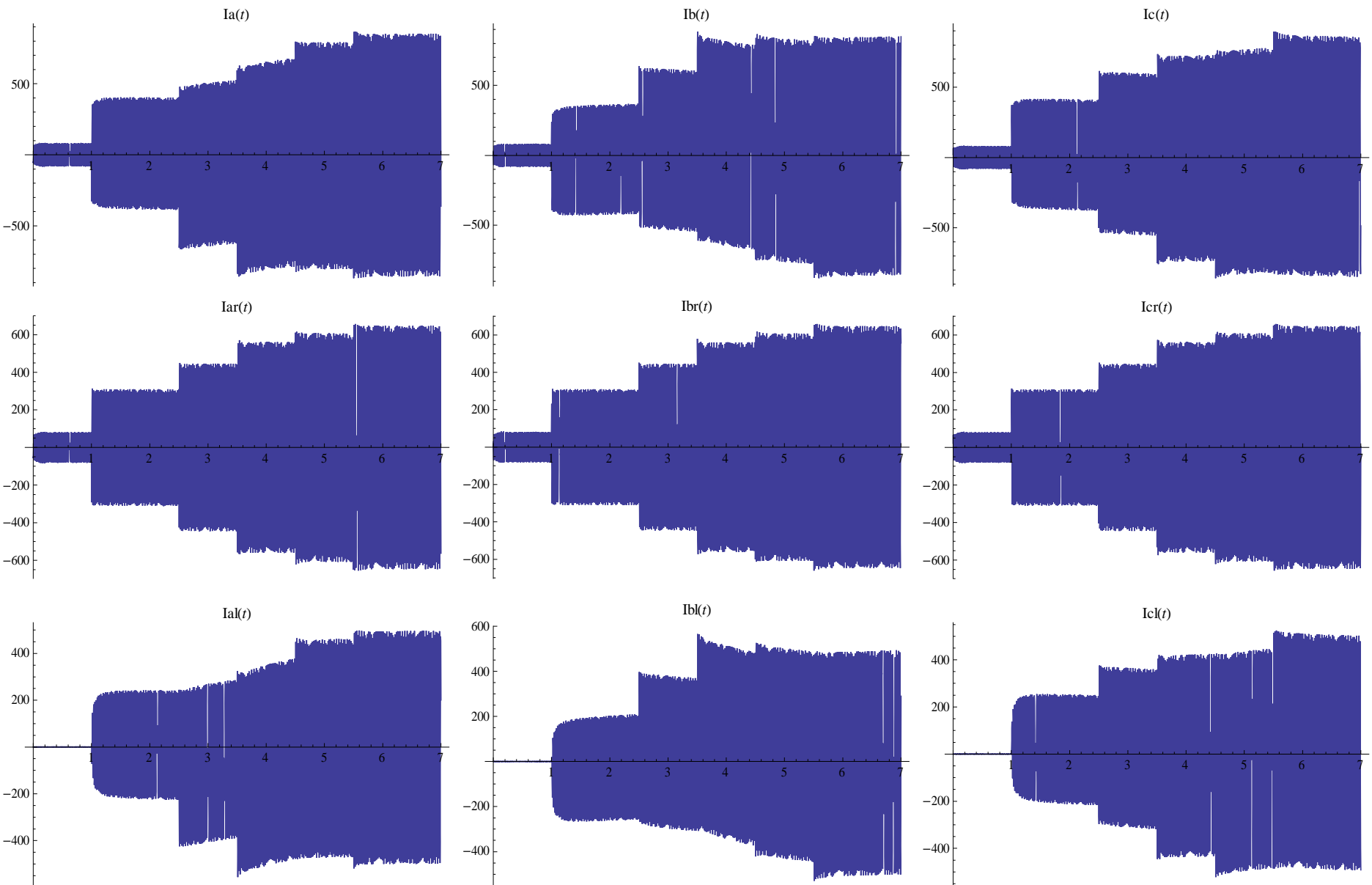
7.1.1 Postupné zatěžování DG zátěží typu R



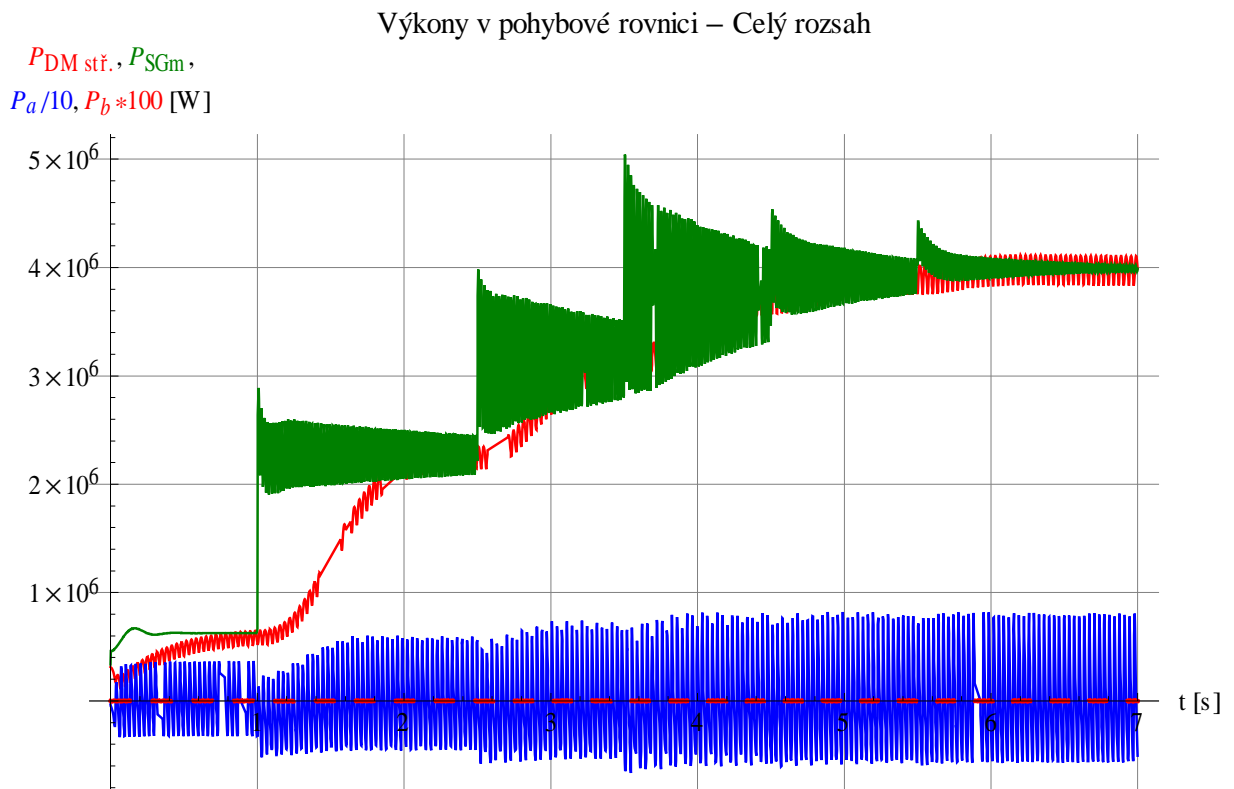
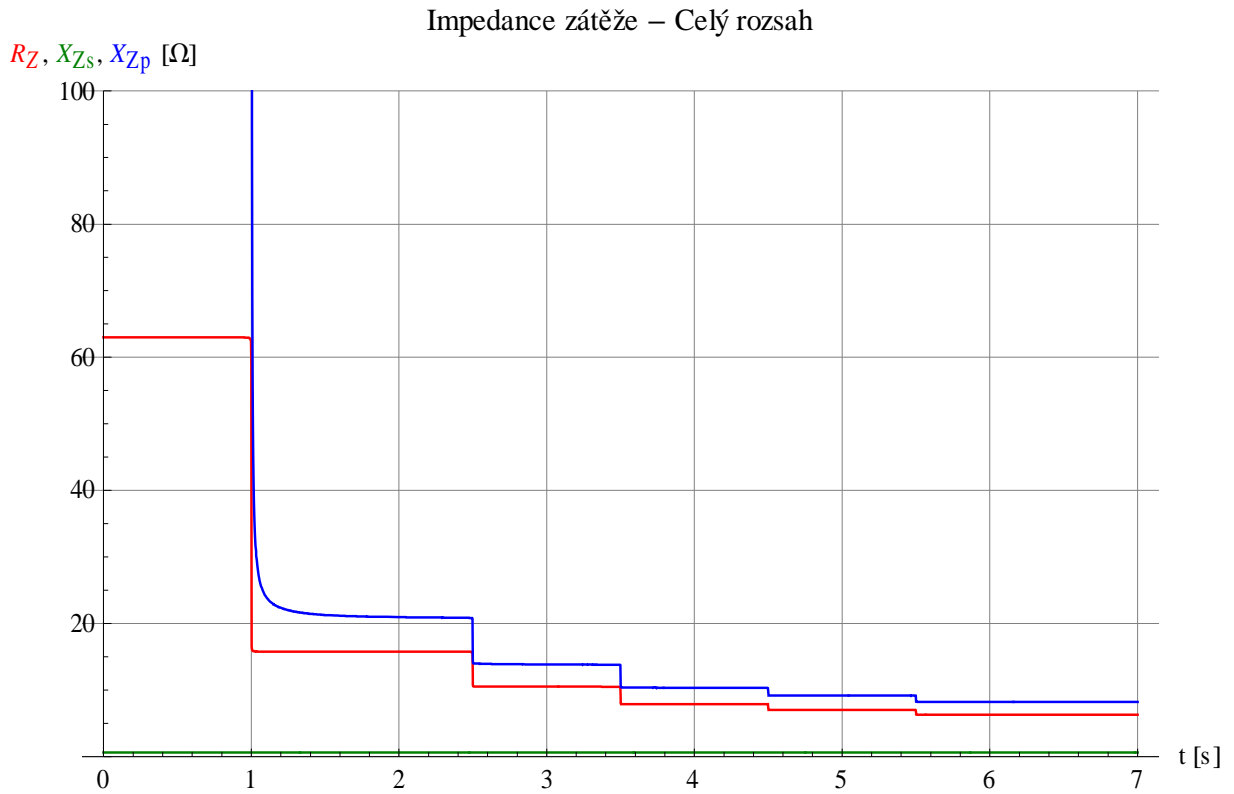
7.1.2 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL



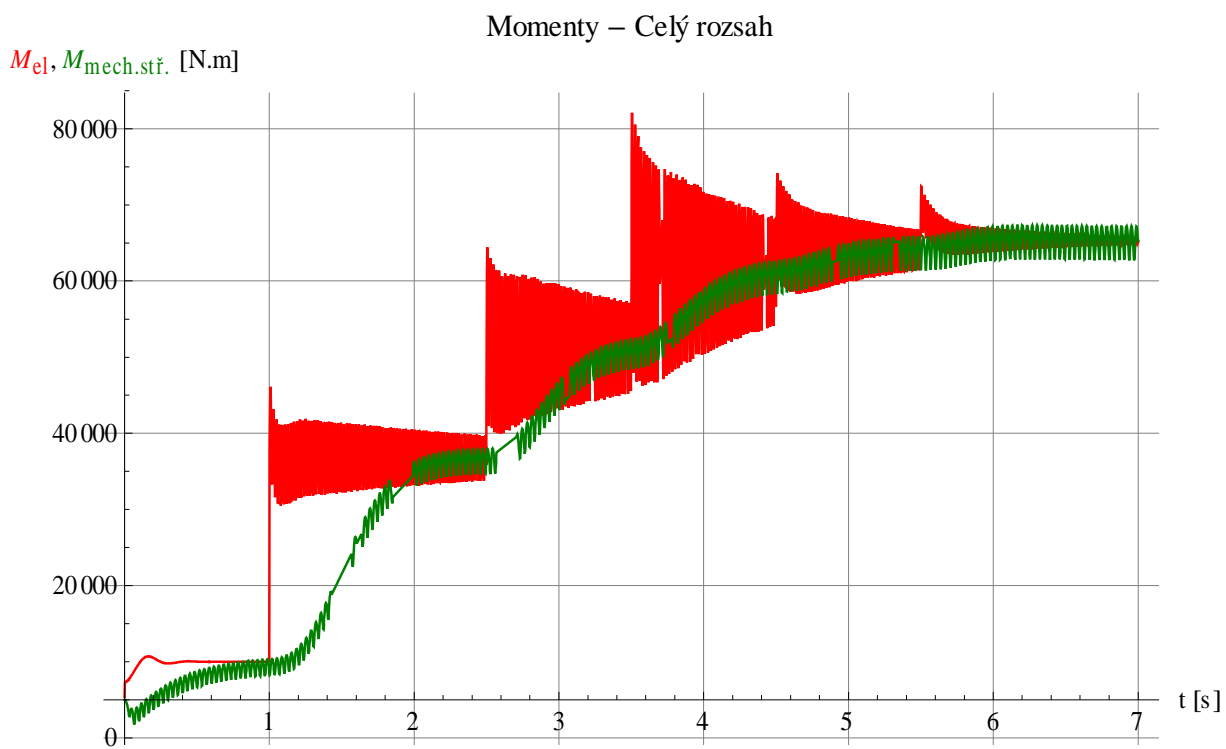
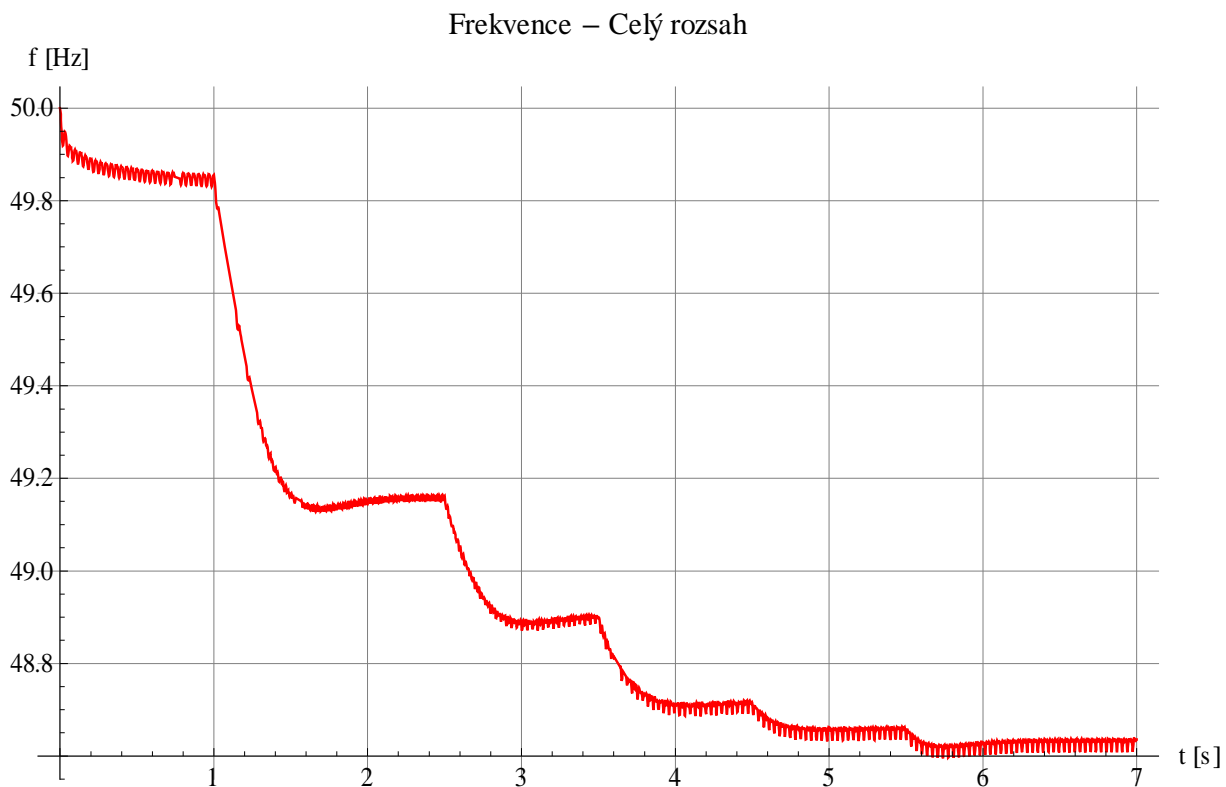
7.1.2 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, proudy [A]



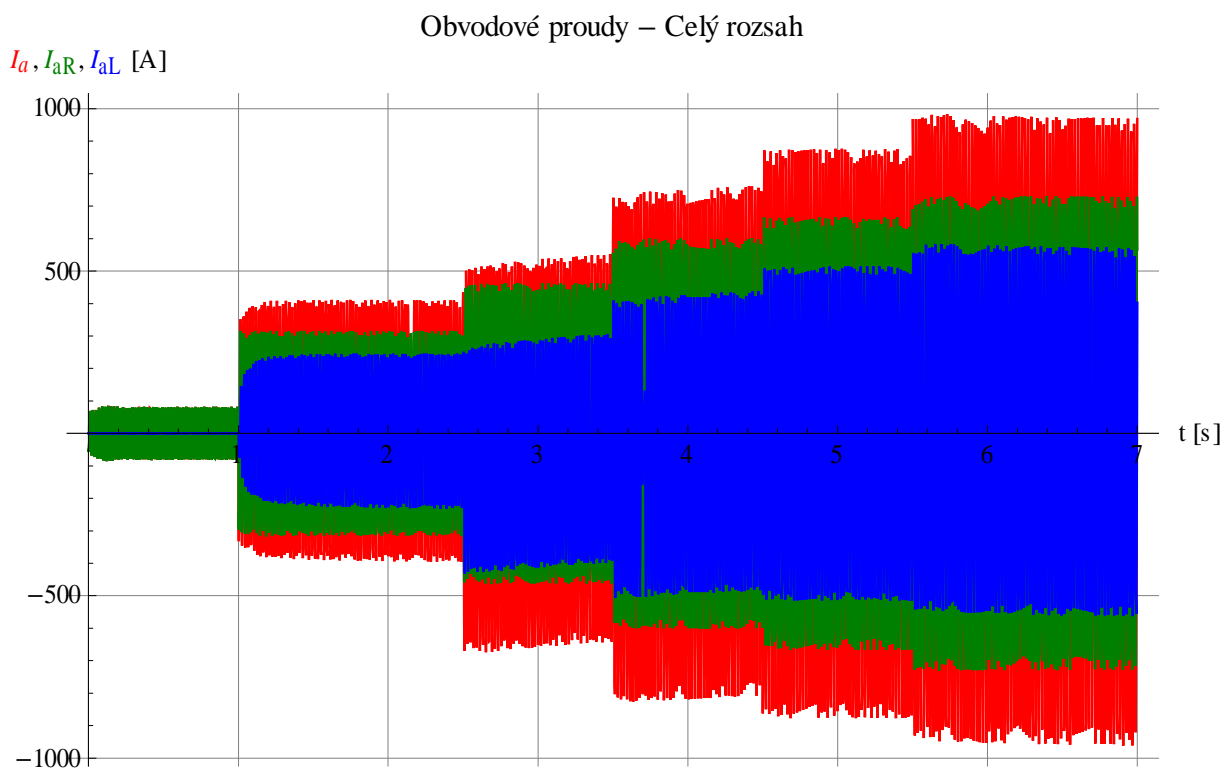
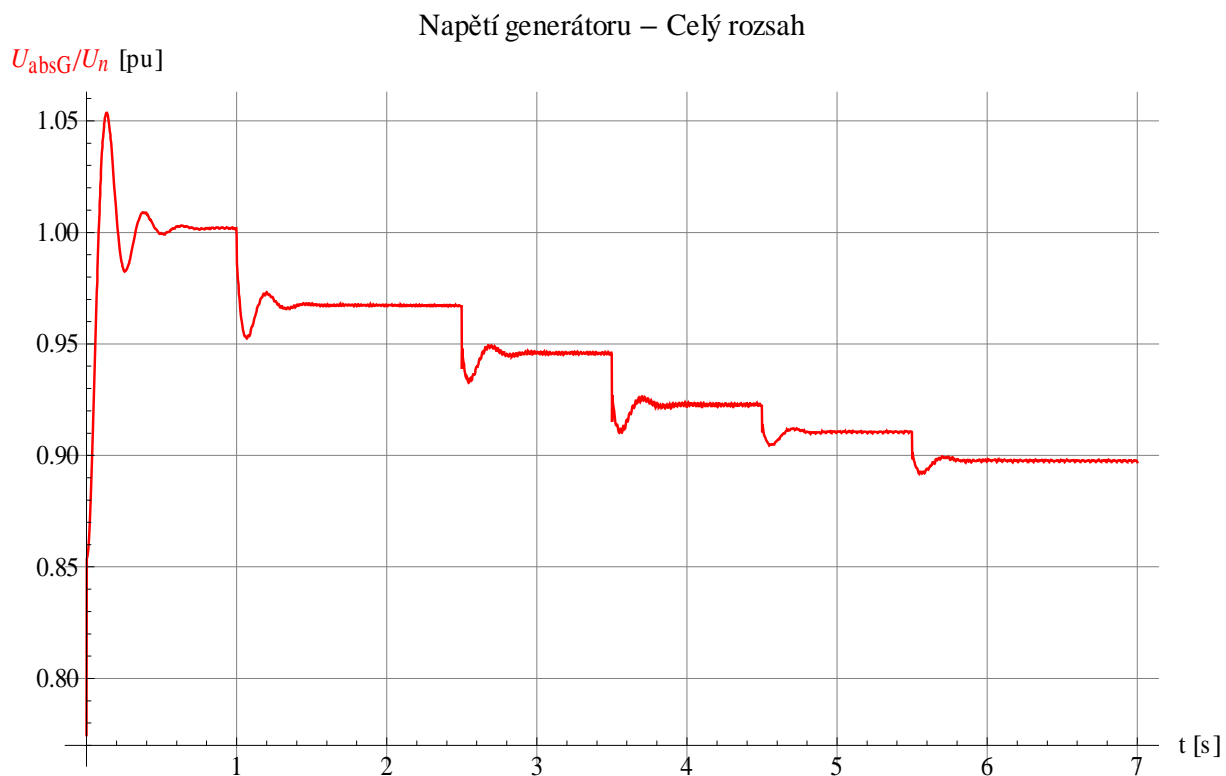
7.1.2 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL



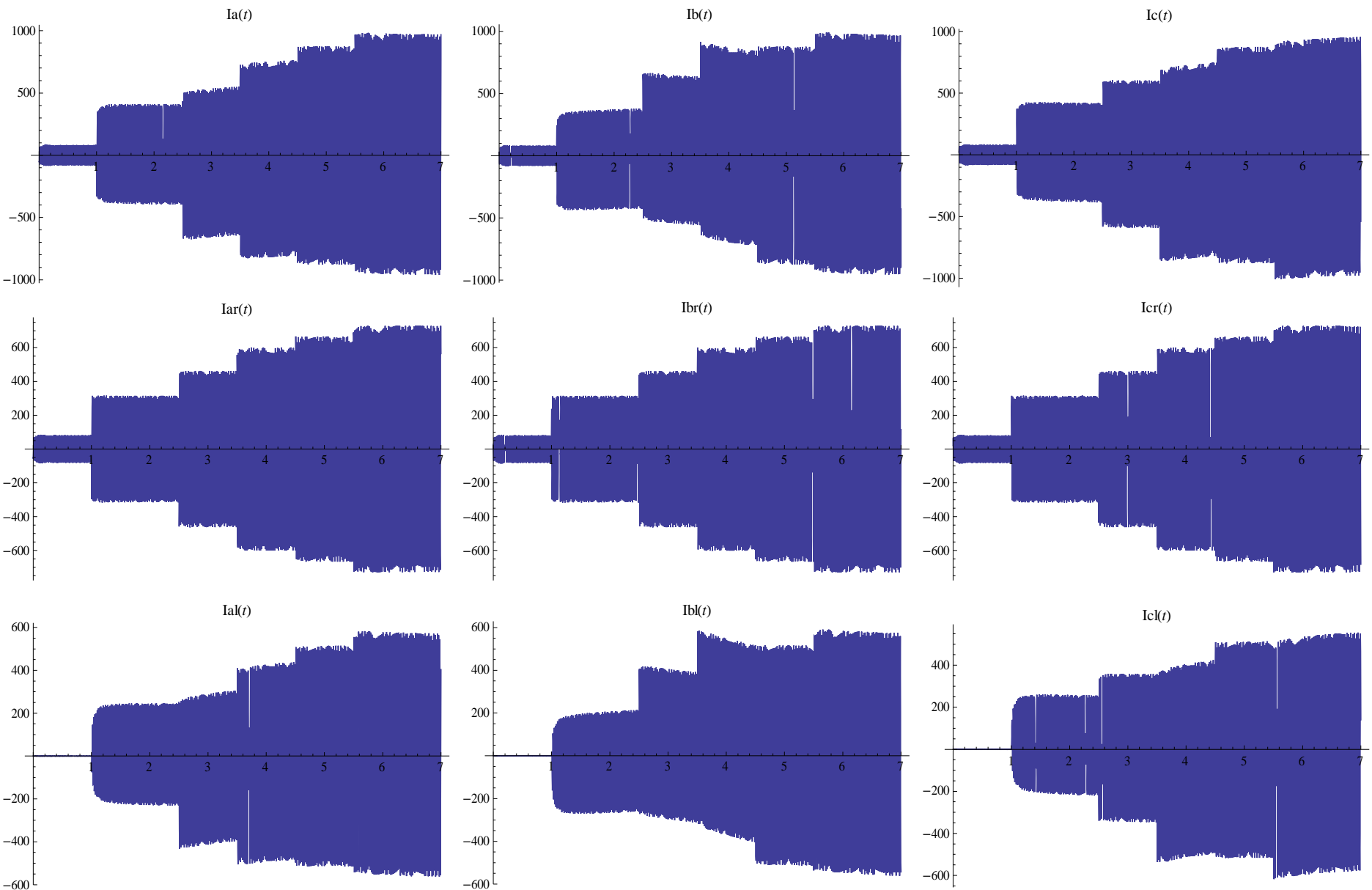
7.1.2 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL



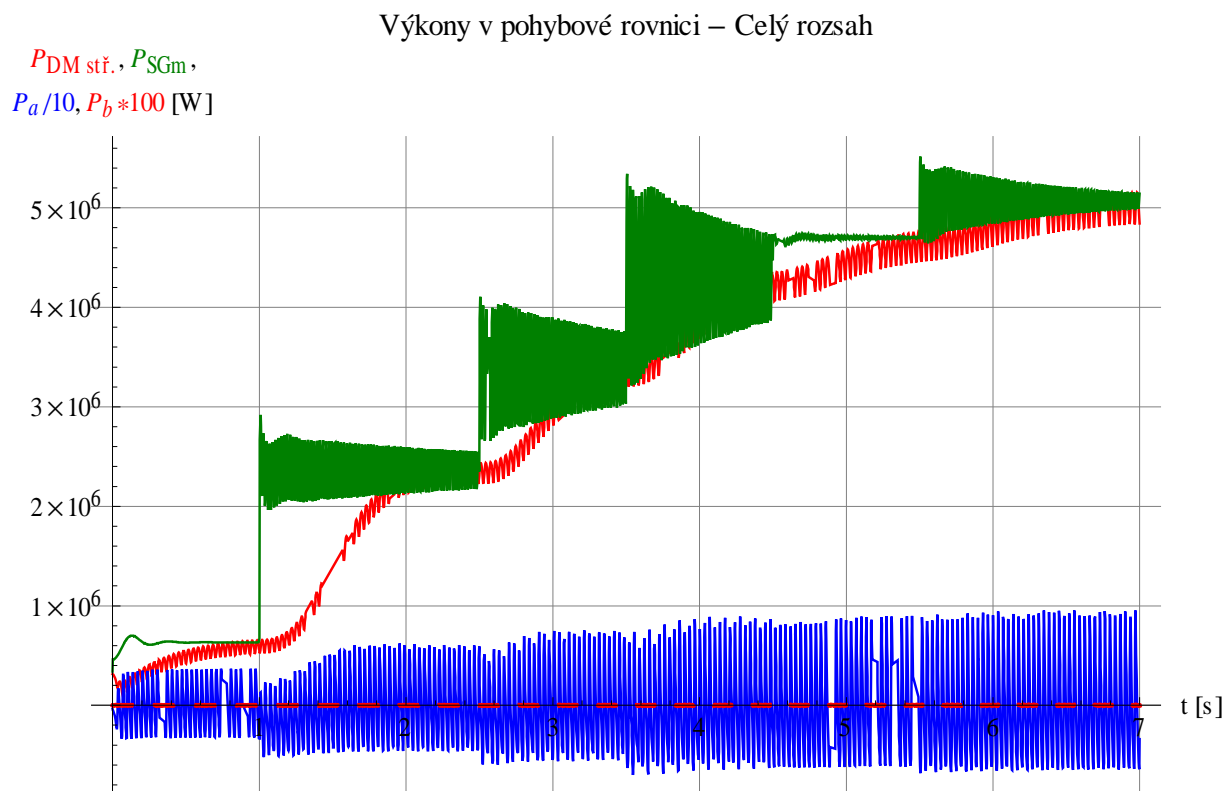
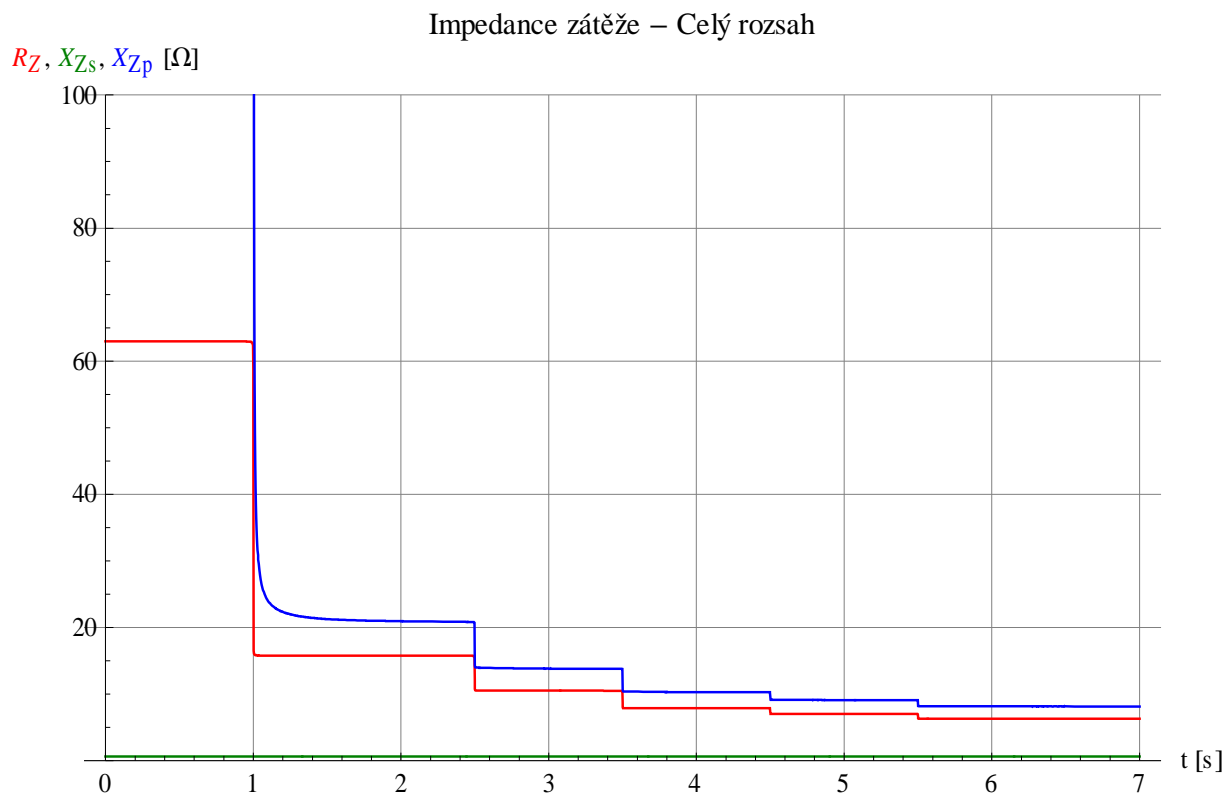
7.1.3 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, strop buzení = 6



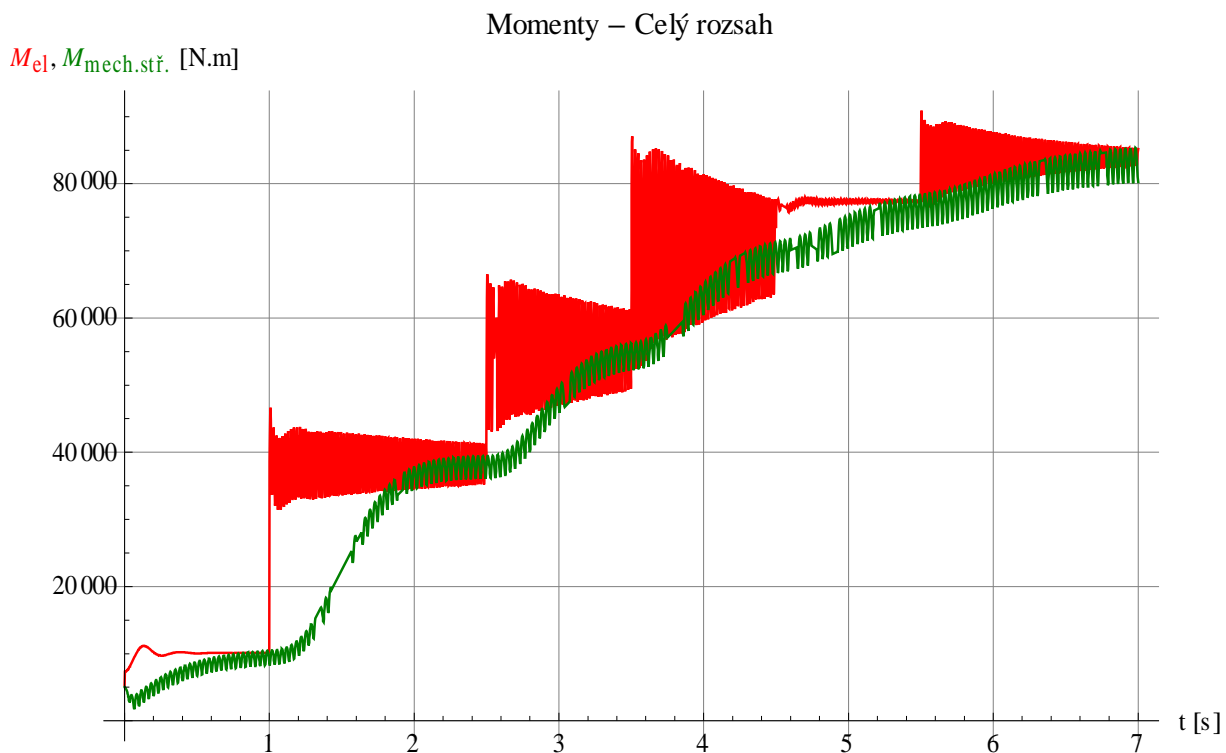
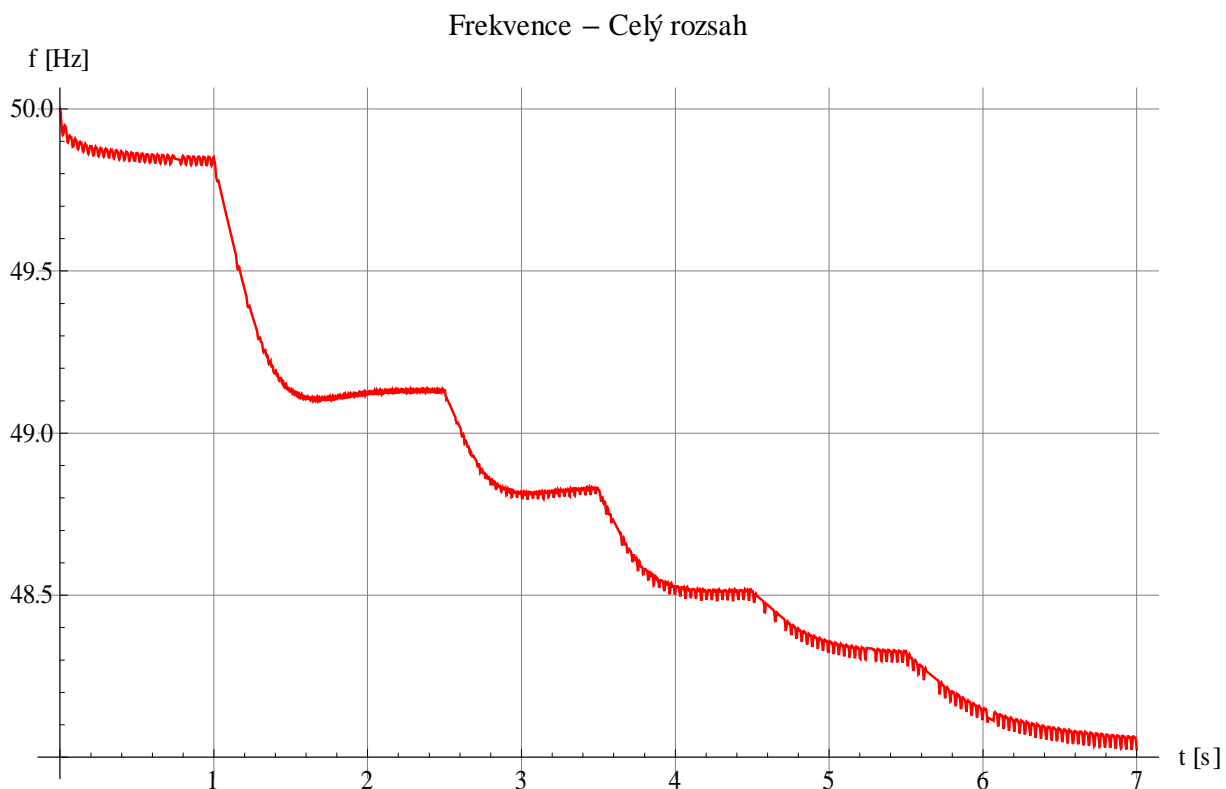
7.1.3 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, strop buzení = 6, proudy [A]



7.1.3 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, strop buzení = 6

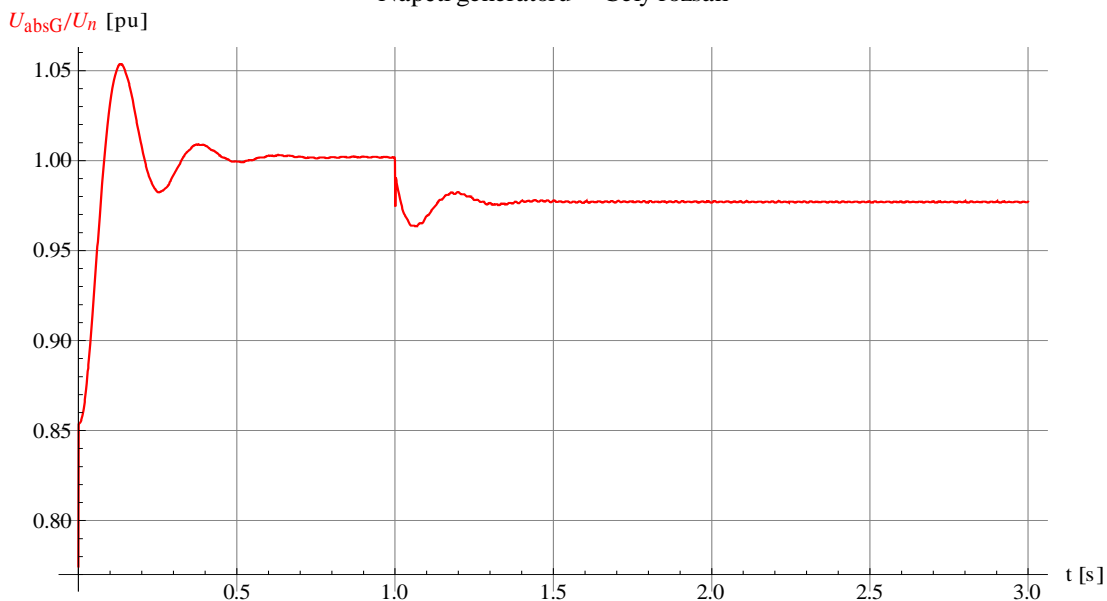


7.1.3 Postupné zatěžování DG zátěží typu RL, strop buzení = 6

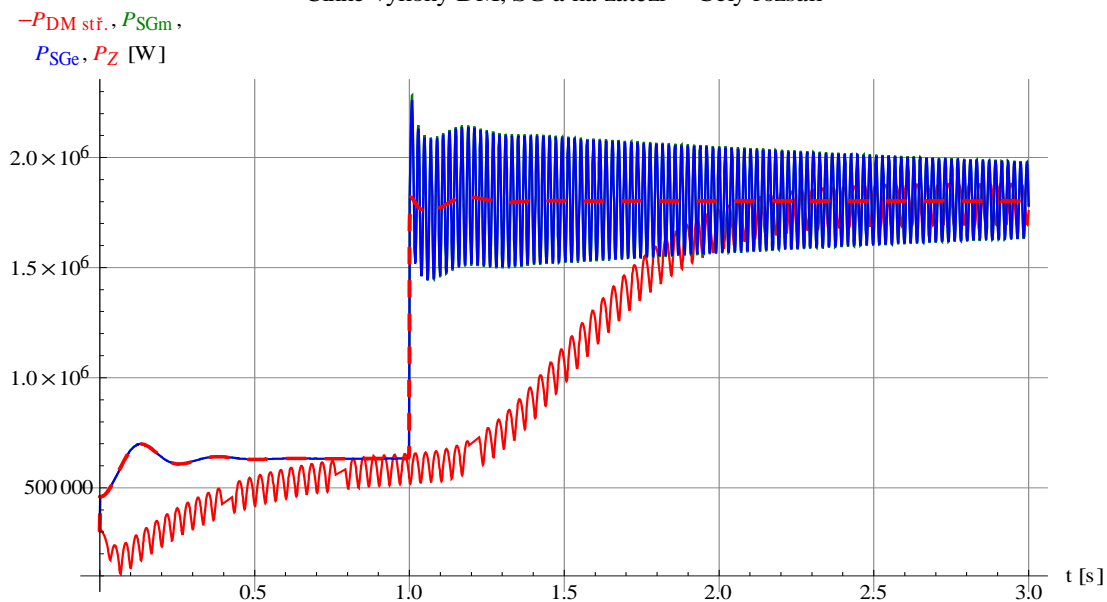


7.2.1 Skok zátěže +20%

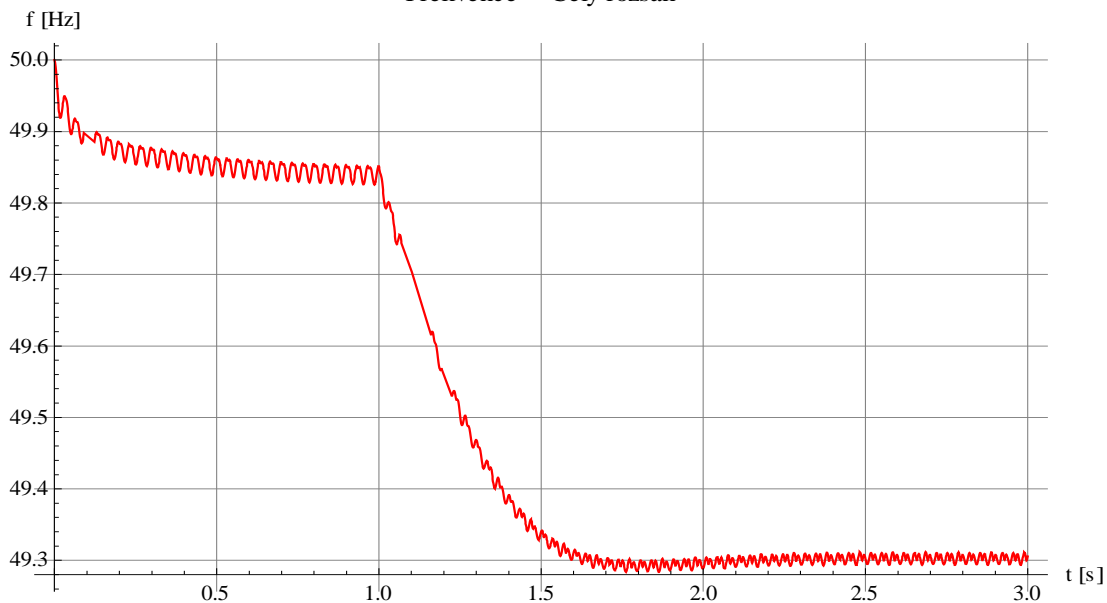
Napětí generátoru – Celý rozsah



Činné výkony DM, SG a na zátěži – Celý rozsah

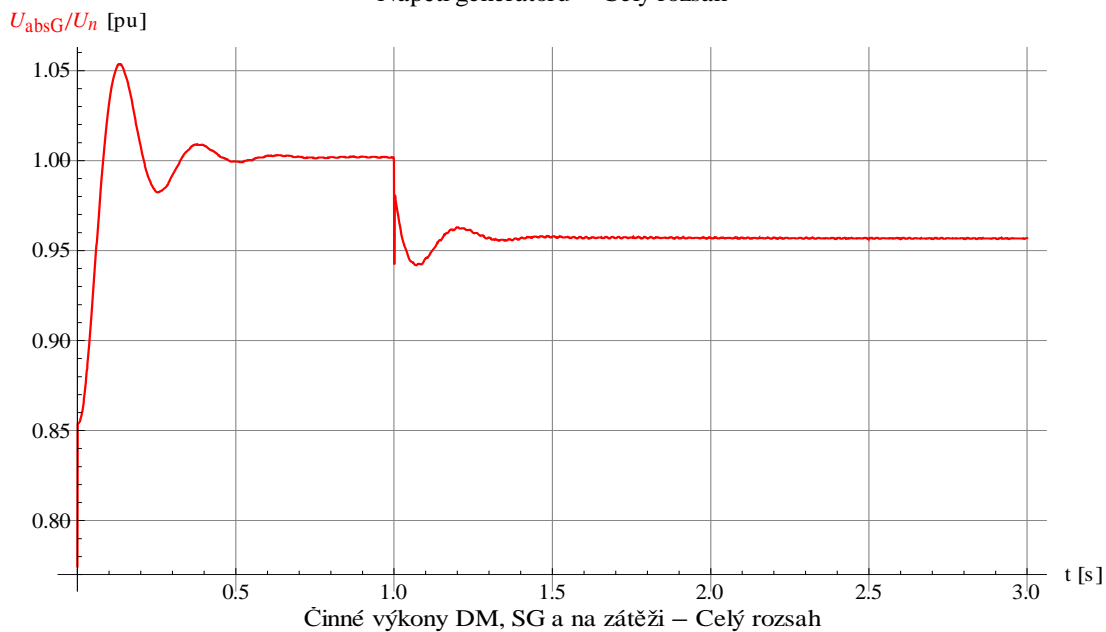


Frekvence – Celý rozsah

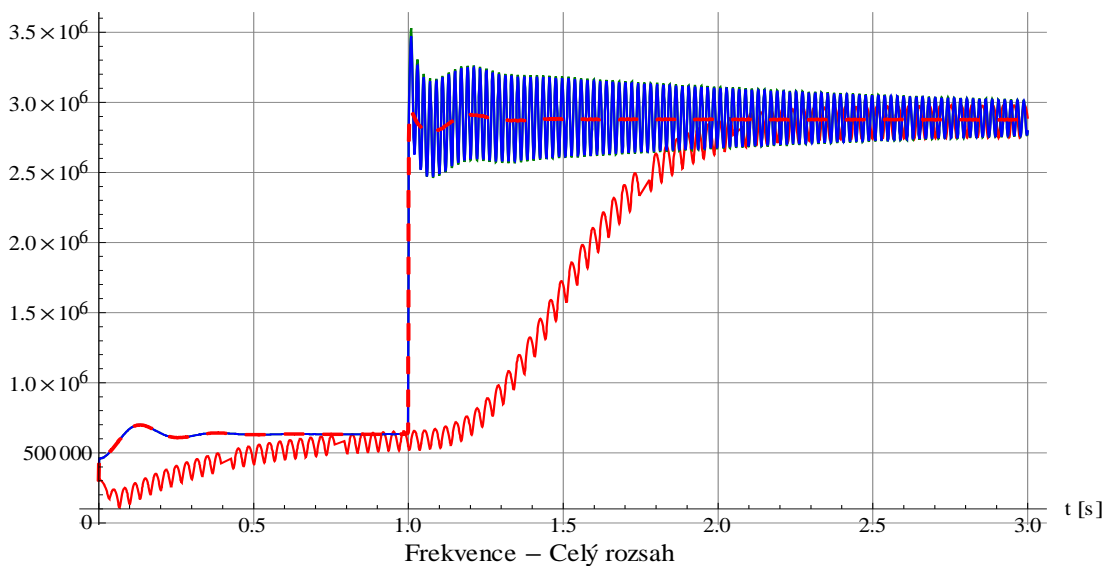


7.2.2 Skok zátěže +40%

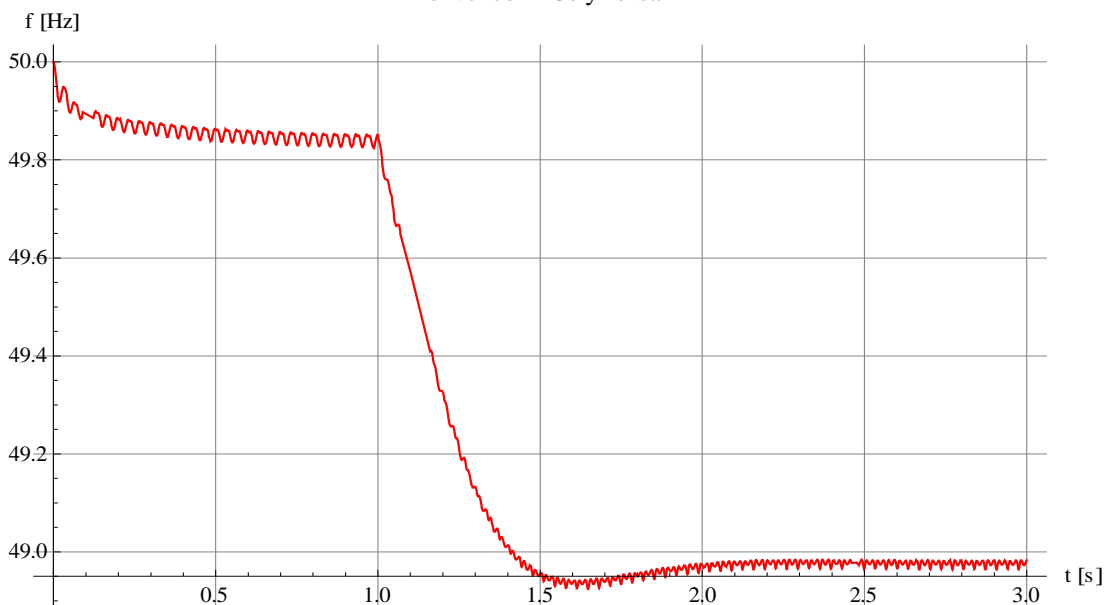
Napětí generátoru – Celý rozsah



Činné výkony DM, SG a na zátěži – Celý rozsah
 $-P_{DM}$ stě., P_{SGm} ,
 P_{SGe} , P_Z [W]

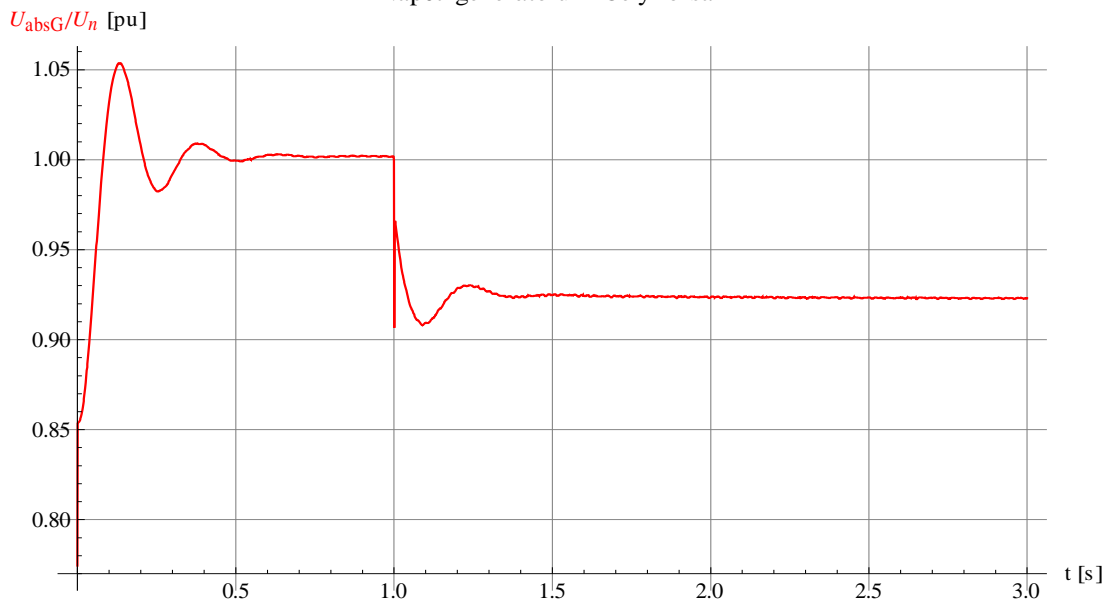


Frekvence – Celý rozsah

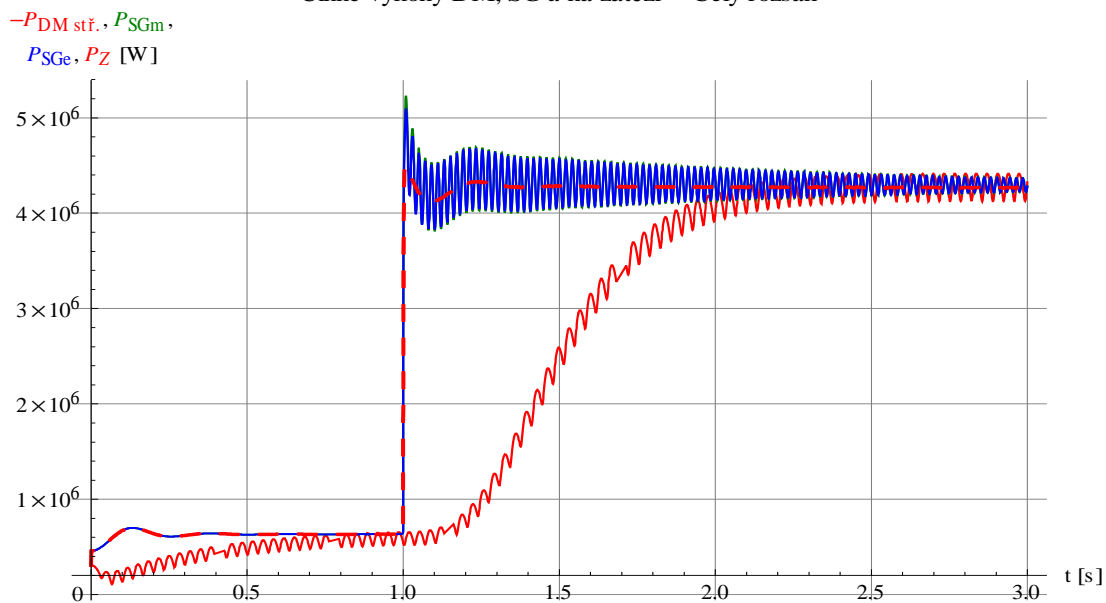


7.2.3 Skok zátěže +70%

Napětí generátoru – Celý rozsah



Činné výkony DM, SG a na zátěži – Celý rozsah



Frekvence – Celý rozsah

