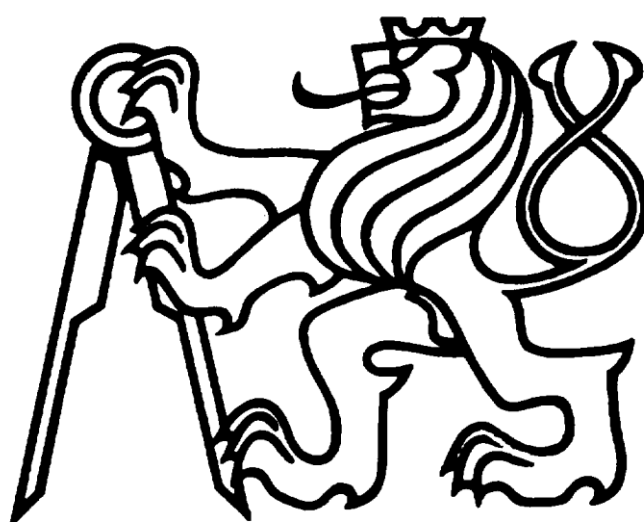


České vysoké učení technické v Praze

**Fakulta elektrotechnická**

# **Diplomová práce**



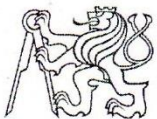
Bc. Jakub Suchý

**Automatické ladění PID regulátoru pro záložní motorgenerátor**

Katedra měření

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Praha 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jakub Suchý**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Obor: **Letecké a kosmické systémy**

Název tématu česky: **Automatické ladění PID regulátoru pro záložní motorgenerátor**

Název tématu anglicky: **Automatic Tuning of a PID Controller for an Auxiliary Power Generator**

### Pokyny pro vypracování:

Předmětem práce je navrhnout a otestovat SW, který umožní automatické nalezení regulačních konstant PID regulátoru pro diesellový záložní motorgenerátor (APU). SW bude využívat rozhraní TCP Modbus pro sběr dat a také ovládání generátoru. SW bude umožňovat pomocí série měření automatickou identifikaci připojeného generátoru, která poskytne řídicí konstanty. Identifikovány budou konstanty pro regulátor otáček i pro regulátor napětí. Ty se uloží do jednotky kontroléru motoru a SW následně provede ověření nastavení regulátoru včetně měření základních parametrů regulace (překmit, doba přejezdu, ustálená hodnota, kmitání, atd.). Výsledek práce bude možno použít v praxi pro nastavení pozemní pomocné napájecí jednotky (APU) pro startování letounu, nebo pro obecný motorgenerátor se spalovacím motorem.

### Seznam odborné literatury:

- [1] Cary R. Spitzer: Digital Avionics Handbook, 2006, CRC Press, ISBN-10: 0849384419
- [2] Bryson, A.: Control systems for aircraft and spacecraft. Princeton University Press, 1994, ISBN: 9780691087825

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Pavel Pačes, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10. prosince 2015

Platnost zadání do<sup>1</sup>: 30. září 2017

Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.  
vedoucí katedry



Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 10. 12. 2015

<sup>1</sup> Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.



## **Prohlášení autora práce**

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

V Praze dne .....

.....  
Podpis autora práce



## **Poděkování**

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Ing. Pavlu Pačesovi, Ph.D. za vedení práce a poskytování cenných rad. Dále bych rád poděkoval společnosti ComAp za poskytnutí řídicích jednotek a za možnost testování na motorgenerátorech.



## **Anotace**

Předmětem práce je navrhnout a otestovat algoritmus, který umožní automatické nalezení regulačních konstant PID regulátoru pro diesellový motorgenerátor (APU). Algoritmus bude využívat rozhraní TCP Modbus pro sběr dat a pro ovládání generátoru. Algoritmus bude umožňovat, pomocí série měření, automatickou identifikaci připojeného motorgenerátoru a následné navržení parametrů pro regulátor. Identifikovány budou konstanty pro regulátor otáček i pro regulátor napětí. Ty se uloží do jednotky kontroléru motoru a algoritmus následně provede ověření nastavení regulátoru včetně měření základních parametrů regulace (překmit, doba přejezdu, ustálená hodnota, atd.). Výsledek práce bude možno použít v praxi pro nastavení pozemní pomocné napájecí jednotky (GPU) pro startování letounu, nebo pro jakýkoliv motorgenerátor se spalovacím motorem.

## **Abstract**

The goal of this thesis is to design and test an auto-tuning algorithm for a PID regulator of gen-set or auxiliary power unit (APU). The algorithm will use the TCP Modbus communication channel for data collection and to commanding gen-set. The algorithm will be capable of making automatic identification of the connected gen-set and after will calculate the parameters for the speed governor and the voltage regulator. These parameters will be stored in a gen-set controller and the algorithm will make a verification of the regulator's settings basic parameters including (overshoot, settling time, stable value, etc.). Results of this work could be applied in aviation for setting ground auxiliary power unit (GPU) to start an airplane as well as other fields for any gen-set.



# Obsah

1	Úvod.....	7
2	Motivace.....	8
3	Motorgenerátor.....	9
3.1	Motor.....	9
3.1.1	ECU.....	10
3.2	Generátor.....	10
3.3	Stykač.....	10
4	Kontrolér.....	12
4.1	Schéma zapojení.....	12
4.2	Režimy motorgenerátoru.....	13
4.3	Kontrolér vs. ECU.....	14
4.4	Ochrany.....	14
4.5	Synchronizace.....	14
4.6	Power management.....	14
5	PID regulátor.....	16
5.1	Diskrétní forma.....	16
6	TCP Modbus.....	18
6.1	Příklady.....	19
6.1.1	Zápis.....	20
6.1.2	Čtení.....	20
6.1.3	Přihlášení.....	21
7	Matematický model.....	22
7.1	System 1. řádu.....	22
7.2	System 2. řádu.....	23
8	Metody identifikace.....	24
8.1	System 1. řádu.....	25
8.2	System 2. řádu.....	25
8.2.1	Měření překmitů.....	26
8.2.2	Překmit a podkmit.....	27
8.2.3	Pouze překmit.....	28
8.2.4	Tečna v inflexním bodě.....	30
8.2.5	Rozkmitání systému.....	30



9	Výpočet regulačních konstant .....	31
9.1	Stanovení parametrů tříparametrového modelu .....	31
9.2	Vyvážené nastavení .....	32
10	Implementace .....	34
10.1	Grafické rozhraní aplikace .....	34
10.1.1	Barevné značení.....	35
10.2	Filtrace.....	36
10.3	Nalezení význačných bodů systému.....	36
10.3.1	Dopravní zpoždění.....	36
10.3.2	Ustálená hodnota .....	36
10.3.3	Lokální extrémy.....	37
10.4	Identifikace .....	37
10.4.1	1. Řád.....	37
10.4.2	2. řád.....	38
11	Testování v praxi .....	49
11.1	Regulátor otáček, Engul .....	49
11.2	Regulátor napětí Engul.....	51
11.3	Regulátor otáček, Pramac.....	53
11.4	Regulátor napětí, Pramac.....	55
12	Závěr.....	56
13	Seznam obrázků .....	57
14	Seznam tabulek.....	58
15	Reference.....	60
16	Seznam příloh.....	61
16.1	Obsah CD .....	61



# 1 Úvod

Tato práce se zabývá problematikou regulátorů pro motorgenerátory. Motorgenerátor je zařízení se spalovacím motorem a generátorem elektrické energie, které se používá tam, kde je nutno mít nezávislý zdroj elektrické energie.

Výrobce dodává motorgenerátor s řídicí jednotkou motoru (ECU). Tato jednotka se stará o vstřikování paliva, chlazení, spínání čerpadel a další věci nutné pro spolehlivý běh motoru. Pomocí sběrnice se do jednotky posílá požadavek na otáčky a vyčítají se provozní informace o samotném motoru. Jelikož se ECU vůbec nestará o generátor a další elektrické veličiny je nutné používat další řídicí jednotku (kontrolér). Kontrolér má za úkol ovládat otáčky motoru pomocí ECU, řídit buzení generátoru, sledovat stav napájecí sítě (a v případě potřeby nastartovat nebo zastavit motor) a hlídat všechny provozní parametry motorgenerátoru (teplota, tlak oleje, otáčky, napětí, ...). Díky potřebě řídit otáčky a napětí, musí být kontrolér vybaven regulátory, nejčastěji PID. A tyto regulátory je nutno nastavit, v současné době je nastavování prováděno ručně na základě zkušeností a technického citu, což zdržuje uvedení do provozu, zvyšuje riziko chybného nastavení a v neposlední řadě zvyšuje nároky na znalosti servisních techniků. Proto vzniká nástroj na automatické ladění těchto konstant, kde bude potřeba „pouze stisknout tlačítko“ a nástroj pomocí série testů identifikuje připojený motorgenerátor a příslušné konstanty vypočítá automaticky.





## 2 Motivace

V praxi, při uvádění motorgenerátoru do provozu je nutno nastavit všechny parametry řídicí jednotky, tento proces je zdlouhavý a vyžaduje odborné znalosti obsluhy. Jednou z časově náročných operací je nastavení PID regulátorů, zejména regulátoru otáček a regulátoru napětí. Nastavení běžně probíhá stylem pokus-omyl, což značně prodlužuje dobu pro nalezení vyhovujícího nastavení a také zvyšuje náklady na uvedení do provozu. Motorgenerátor může mít spotřebu kolem 100 litrů nafty na hodinu a nastavení může trvat dvě hodiny, tedy jenom cena paliva pro nastavení se může vyšplhat na 6000 Kč, tyto náklady lze částečně redukovat použitím automatického ladění regulátoru. V praxi se můžeme setkat i s jiným přístupem k regulacím – použít výchozí nastavení, tímto přístupem lze sice redukovat čas strávený nastavováním, ale výsledek rozhodně není ideální. V oblasti motorgenerátorů neoptimální nastavení přináší nižší stabilitu dodávky elektrické energie, zvýšení spotřeby paliva, zvýšené opotřebení akčních členů, sníženou životnost připojených elektrických spotřebičů (kolísání napětí a frekvence) a mnohé další negativní projevy. Neoptimální nastavení také může vrhnout špatné světlo na celou značku, která vyrábí řídicí jednotky, proto se výrobce snaží minimalizovat možnosti udělat v nastavení chybu a právě automatické ladění regulátoru může část chyb odstranit.



### 3 Motorgenerátor

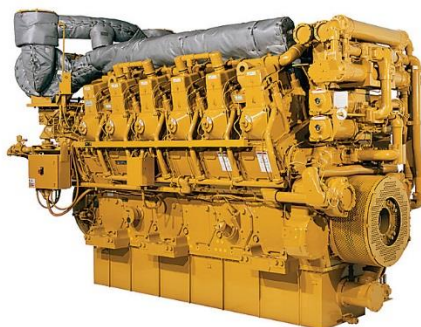
Motorgenerátor, častěji používaný termín gen-set, nebo v letectví GPU (Ground Power Unit), APU (Auxiliary Power Unit) je spojení spalovacího motoru a elektrického generátoru. Používá se všude tam, kde je zapotřebí elektrická energie, ale není k dispozici rozvodná síť (ostrovy, pouště, velké lodě, ropné plošiny), nebo je síť jiných parametrů (letectví 400 Hz/ 50 Hz), nebo v místech kde je rozvodná síť nestabilní (rozvojové země). Další velice časté použití jsou takzvané záskokové zdroje, tedy zdroje, které se spustí až v případě výpadku dodávky elektrické energie (nemocnice, data-centra, banky, telefonní ústředny, ...). V letectví je GPU preferovanější před APU nesenou na palubě, protože APU je součástí letounu, tedy provozní náklady jsou vyšší, dále není výhodné opakovaně startovat APU s ohledem na životnost.



Obrázek 1 - GPU motorgenerátor (1), gen-set (2)

#### 3.1 Motor

Pro motorgenerátory se nejčastěji používá turbo diesellový pístový motor. K vidění jsou také plynové motory, nebo tzv. hybridní (nafta+plyn). V letectví se pro palubní APU používá turbína (turbošaft), pro pozemní GPU se používají opět pístové motory. Výkony se pohybují od jednotek kW až do jednotek MW.



Obrázek 2 Caterpillar pístový motor (3)



### 3.1.1 ECU

Motor je řízen vlastní řídicí jednotkou (ECU – Engine Control Unit), zpravidla dodávanou výrobcem motoru, která se stará o vstřikovací čerpadla, regulaci plynu, ovládání klapek, zapalování a další věci nutné pro běh motoru. Malé, nebo staré motory ECU nemají, ale tyto motory již pomalu mizí, proto se jimi nebudu zde zabývat. Komunikace s ECU probíhá obvykle přes komunikační rozhraní CAN, komunikační protokol bývá obvykle použit SAE J1939. Pomocí tohoto protokolu se z ECU dají číst provozní veličiny, například: otáčky, spotřeba paliva, aktuální zatížení motoru, nominální a aktuální výkon, chybové kódy a další. Také je možno ECU ovládat, běžně je možno ovládat požadované otáčky nebo požadovaný moment motoru. V případě motorgenerátorů se používá výhradně ovládání otáček. Samotná ECU má regulátor otáček, tedy ovládá množství paliva, tak aby motor měl požadované otáčky.

## 3.2 Generátor

Generátory používané v motorgenerátorech jsou převážně synchronního třífázového typu. Pro generování střídavého napětí o frekvenci 50 Hz se používají čtyř-pólové generátory. Frekvence 50 Hz odpovídá 3000 otáčkám za minutu pro dvou-pólový generátor a vzhledem k provozním otáčkám diesellových motorů se volí čtyři póly a pracovní otáčky 1500 ot/min. Pro generování 400 Hz, používané v letectví, se používají 22-pólové generátory a opět diesellový motor s pracovními otáčkami 2182 ot/min nebo 28-pólové generátory s pracovními otáčkami 1714 ot/min (4).

Výkony generátorů jsou blízké výkonu motoru, tedy se pohybují od jednotek kVA až do jednotek MVA.

Změnou budicího proudu generátoru je možno regulovat výstupní napětí. Generátory mají obvykle vestavěnou výkonovou budicí část a vstupem je pak signál v rozsahu 0-10 V, kterým se ovládá výstupní napětí.

## 3.3 Stykač

Stykač je elektricky ovládaný vypínač, tedy funkčně to samé jako relé. Používá se mezi generátorem a zátěží pro provozní sepnutí i pro nouzové odpojení. Pokud by byl generátor připojen například k napájecí síti a došlo k poruše motoru, nebylo by možné motor zastavit, protože generátor je schopen pracovat i jako elektromotor, tak by neustále točil spalovacím motorem. Také se používá při startování motoru – stykač je rozepnutý a motor může startovat, po dosažení provozních parametrů se tímto stykačem může připnout zátěž. Stykače jsou nejčastěji třífázové a obsahují pomocný kontakt používaný pro kontrolu sepnutí. Tento kontakt je důležitý v případě poruchy stykače, nebo v případě manuálního sepnutí, nadřazený systém tak má kontrolu nad skutečným stavem stykače.



Obrázek 3 - Stykač (5)

Stykač v sobě má také nadproudovou a podpěťovou ochranu, kdy rozepne sám i bez pokynu nadřazeného systému, tedy funguje i jako jistič.



## 4 Kontrolér

Pro správnou a bezpečnou funkci motorgenerátoru je potřeba systém, který zajistí fungování celé soustavy. Jeden příklad je kontrolér IG-NT-BB od firmy ComAp. Kontrolér ovládá otáčky motoru, jedná se tedy o systém nadřazený ECU. Součástí kontroléru je PID regulátor, který udržuje frekvenci generátoru na nominální hodnotě tedy 400 Hz pro letectví, 50 Hz pro evropskou napájecí síť anebo 60 Hz pro americkou napájecí síť. Dále kontrolér ovládá buzení generátoru a tím je schopný měnit hodnotu výstupního napětí z generátoru. Pro napětí je použit další PID regulátor. S kontrolérem máme tedy zajištěno, že frekvence a napětí výstupu motorgenerátoru budou konstantní.

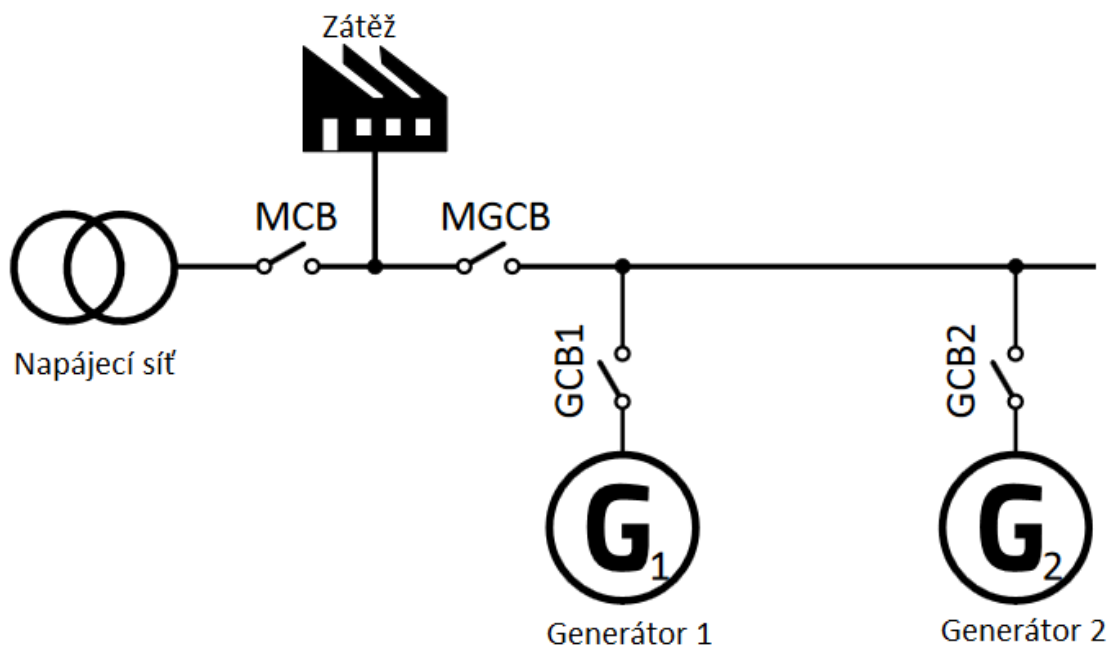


Obrázek 4 – kontroler IntelliGen ComAp (6)

Kontrolér se dále stará spínání startéru motoru, hlídá provozní parametry generátoru i motoru, umožňuje synchronizaci s napájecí sítí nebo jiným motorgenerátorem a v neposlední řadě zobrazuje provozní informace na displeji nebo na internetu.

### 4.1 Schéma zapojení

Každý generátor má svůj vlastní stykač, ve schématu označeno GCB1 a GCB2 (Generator circuit breaker). MCB (Mains circuit breaker). je stykač pro připojení k napájecí síti. MGCB (Master generator circuit breaker) se používá pouze v případě více generátorů, pokud je zátěž větší, než výkon jednoho generátoru, nebyl by tento generátor schopný zátěž zapnout. Tedy v případě výpadku sítě se nastartují oba motorgenerátory, jeden sepne svůj GCB, druhý se sesynchronizuje k prvnímu a až poté dojde k sepnutí MGCB a připojení k zátěži.



Obrázek 5 - Schema zapojení (6)

Toto je pouze příklad možného zapojení, v případě ostrovního systému (systému bez napájecí sítě) samozřejmě nebude použit MCB.

## 4.2 Režimy motorgenerátoru

Motorgenerátor může pracovat v různých režimech:

- Ostrovní režim (Island operation): Jeden samostatný motorgenerátor připojený k zátěži. V tomto režimu se regulátorem otáček udržuje výstupní frekvence konstantní. Regulátorem napětí se udržuje výstupní napětí na nominální hodnotě.
- Paralelní režim: Jeden motorgenerátor připojený k rozvodné síti (SPTM – single parallel to mains) nebo několik motorgenerátorů spojených paralelně (MINT – multiple island oper). V tomto režimu se regulátorem otáček ovládá dodávaný výkon. Jeden generátor nemá dostatečný výkon na zvýšení frekvence celé soustavy, proto když se pokusí o zvýšení otáček, začne dodávat vyšší výkon, ale otáčky se nezmění. Regulátorem napětí se v tomto případě ovládá jalový výkon, protože generátor opět nemá dostatečný výkon na zvýšení napětí celé sítě.
- Záskokový režim (AMF): Obvyklé použití tohoto režimu je v nemocnicích a datacentrech, kde je motorgenerátor většinu času vypnutý. Kontrolér hlídá, že je dostupné napětí v napájecí síti a v případě jeho výpadku nastartuje motorgenerátor pro zajištění dodávky elektrickou energií. Kontrolér pak pracuje v ostrovním režimu, po obnovení napájecí sítě, sesynchronizuje generátor se sítí a přejde do paralelního režimu. Následně snížením požadovaného výkonu dojde k přenesení zátěže z generátoru na síť a dále se generátor odepne a dochází k vychlazení a vypnutí motoru.



### 4.3 Kontrolér vs. ECU

Řídicí jednotka motoru (ECU) obsahuje regulátor otáček, tedy by se mohlo zdát redundantní mít druhý regulátor v kontroléru. Redundantní by byl pouze v případě jednoho samotného motorgenerátoru, v případě, že motorgenerátorů provozujeme více paralelně, nebo je připojen paralelně s napájecí sítí, je potřeba rozdělit výkon v nějakém poměru. Toho nelze dosáhnout jinak než regulátorem. Pokud motorgenerátor pracuje v paralelním režimu, nezpůsobí přidání plynu zvýšení otáček. Aby mohlo dojít ke zvýšení otáček, muselo by zákonitě dojít i ke zvýšení frekvence generátoru a vzhledem k paralelnímu spojení by se museli zvýšit otáčky všech generátorů stejně. To často v praxi není možné, jeden samostatný motorgenerátor nemá dostatečný výkon aby „přetlačil“ všechny ostatní. Tedy v paralelním režimu se požadavkem na otáčky ovládá dodávaný výkon generátorem.

### 4.4 Ochrany

Důležitou funkcí kontroléru jsou ochrany, jedná se o ochranu samotného motoru. Tedy v případě překročení například teploty motoru dojde k zastavení motoru. Dále se jedná o ochrany generátoru, například proti přetížení, kdy opět kontrolér může generátor odpojit. Ochrany se nastavují dvojího typu: varování a vypnutí. U ochrany typu „vypnutí“ je možno nastavit jakým způsobem motorgenerátor vypnout, zda okamžitě (v případě závažné chyby) nebo nejprve odpojit zátěž, přejít do volnoběžných otáček a počkat na vychlazení systému a až následně motor zastavit.

### 4.5 Synchronizace

Pokud potřebujeme generátor připojit do napájecí sítě, takzvaný paralelní provoz, nebo pokud potřebujeme spojit více generátorů dohromady pro dosažení většího výstupního výkonu, je nutno všechny spojované prvky synchronizovat. Synchronizace spočívá v eliminaci fázového posunu výstupní frekvence mezi spojovanými generátory. Tento proces je velice důležitý, v případě sepnutí dvou nesynchronizovaných generátorů dohromady může dojít v nejhorším případě ke zkratu, který může končit destrukcí celého motorgenerátoru, zpravidla zlomením klikové hřídele motoru.

Samotný proces synchronizace používá opět PID regulátor, který má jako vstup fázový posun mezi napájecí sítí a generátorem, kontrolér tedy řídí otáčky motoru tak, aby fázový posun byl nulový. Generátor i napájecí síť jsou v tu dobu ve fázi a je možno sepnout stykač.

### 4.6 Power management

Power management (6) je užitečnou funkcí v případě více motorgenerátorů připojených k jedné zátěži. Součet nominálních výkonů musí být vyšší, než maximální odběr zátěže, ale běžně je zátěž menší, tedy není nutno mít nastartovány všechny motorgenerátory. Power management se postará o vypnutí vhodných generátorů. Pro příklad: máme dva motorgenerátory o výkonu 100 KVA a další dva o výkonu 500 KVA. Pokud bude aktuální zátěž 50 KVA, systém bude mít nastartovaný pouze jeden motor 100



KVA, pokud zátěž vzroste na 90 KVA, systém nastartuje druhý 100 KVA motor. Po dalším růstu zátěže na hodnotu 400 KVA, systém nastartuje 500 KVA motor a oba 10 KVA motory zastaví. Po delším běhu 500 KVA motoru dojde k jeho výměně s jiným 500 KVA generátorem, to pro stejnoměrné opotřebení jednotlivých motorgenerátorů.





## 5 PID regulátor

Proporcionálně integračně derivační regulátor (PID) má, jak už název napovídá, tři složky:

- Proporcionální složka: tato složka vypočítá rozdíl žádané a aktuální hodnoty, vynásobí konstantou P a výsledek nastaví na výstup. Tato složka samostatně není schopna regulovat na nulovou regulační odchylku, protože, čím je blíže žádané hodnotě, tím menší hodnota se promítne na výstup.
- Integrační složka: tato složka integruje regulační odchylku, kterou po vynásobení konstantou I promítne na výstup. Integrační složka má jako vlastnost nulovou regulační odchylku. Pokud regulátor kmitá, je to obvykle díky příliš vysoké integrační složce.
- Derivační složka: provádí derivaci aktuální hodnoty a opět jí po vynásobení konstantou D promítne na výstup. Tato složka se používá jako tlumič regulátoru. Nevýhodou této složky je zesilování šumu.

Po kombinaci všech tří složek dostáváme PID regulátor. V praxi se používají i PI regulátory nebo jenom P regulátory.

Rovnice regulátoru se dá zapsat následujícím způsobem:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(T) dt + T_d \frac{e(t)'}{dt} \right) \quad 1)$$

Kde:

- $u(t)$  je výstup regulátoru
- $e(t)$  je odchylka od požadované hodnoty
- $K_p, T_i, T_d$  jsou konstanty regulátoru

### 5.1 Diskrétní forma

V diskrétní formě hovoříme o PSD regulátoru, ale běžně se používá název PID i pro diskrétní formu. Princip je stejný jako u PID regulátoru, pouze se místo integrování používá sčítání a místo derivace rozdíl sousedních hodnot.

Rovnice PSD regulátoru:

$$u(k) = K_p \left( e(k) + \frac{\Delta T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta T} \right) \quad 2)$$



Kde:

- $u(k)$  je výstup regulátoru
- $e(k)$  je odchylka od požadované hodnoty
- $K_p, T_i, T_d$  jsou konstanty regulátoru



## 6 TCP Modbus

Kontrolér komunikuje s nadřazenou aplikací (PID tuner) pomocí rozhraní TCP Modbus (7). Jedná se o protokol Modbus využívající fyzickou vrstvu TCP/IP a komunikace probíhá pomocí TCP paketů, díky tomu, že protokol TCP již obsahuje mechanismus pro kontrolu paketu (CRC) není nutné využívat CRC z Modbus protokolu. Pro tento protokol je zvykem používat port 502. Komunikace probíhá stylem dotaz-odpověď a požadovaná operace je zadána pomocí kódu:

Tabulka 1 – Modbus kódy operací (8)

Kód	Funkce
01	Přečíst cívku (binární vstup)
05	Zapiš cívku (binární výstup)
15	Zapiš více cívek
04	Přečíst vstupní registr
03	Přečíst uchovávací registr
06	Zapiš uchovávací registr
16	Zapiš více uchovávací registrů
20	Přečíst záznam ze souboru
21	Zapiš záznam do souboru

Kódy se uvádějí v desítkové soustavě.

Pro potřeby této práce jsou zajímavé pouze kódy 03 a 06 (16), protože v těchto registrech jsou uloženy informace o otáčkách, napětí a do těchto registrů se také ukládají pokyny pro změnu otáček, napětí a další povely.

Odpověď na dotaz obsahuje kód operace, pokud je kód posunutý o 80 (hex) jedná se o negativní odpověď, například z důvodu neexistence registru, nebo pro nedostatečné oprávnění.

Rámce dotazů i odpovědí se stávají ze dvou částí, první část obsahuje hlavičku zprávy (MBAP Header). Druhá část obsahuje data (PDU).

Hlavička (MBAP) má následující strukturu:

Tabulka 2 – Modbus hlavička

Byte	1	2	3	4	5	6	7
Význam	Identifikátor transakce MSB	Identifikátor transakce LSB	Identifikátor protokolu MSB	Identifikátor protokolu LSB	Délka paketu MSB	Délka paketu LSB	Adresa cílového zařízení



Každý sloupeček má velikost 1 byte, tedy hlavička obsahuje 7 bytů. Protokol nevyžaduje využívání těchto identifikátorů, v takovém případě lze vyplnit samé nuly. Délka paketu již vyplněna být musí. Délka paketu určuje, kolik bytů následuje, tedy skutečná délka je o 5 větší.

Datová část se skládá z kódu operace a dat:

Tabulka 3 – Modbus data

Byte	8	9 až N
Význam	Kód operace	Data

Kód operace je jeden byte, popsán v Tabulka 1

Data jsou skládána různě, podle typu operace, vždy ale v pořadí MSB, LSB. MSB (Most significant byte) je zkratka pro nejvýznamnější byte, LSB (Least significant byte) je zkratka pro nejméně významný byte.

Pro kód 06 (Zápis uchovávacího registru) je struktura dat následující:

Tabulka 4 – Modbus zápis dat

Byte	9	10	11	12
Význam	Registr MSB	Registr LSB	Hodnota MSB	Hodnota LSB

Pro kód 03 (Přečíst uchovávací registr) je struktura následující:

Tabulka 5 – Modbus čtení dat

Byte	9	10
Význam	Registr MSB	Registr LSB

Odpověď je stejná jako dotaz pokud se jedná o kladnou odpověď na zápis, pro čtení se liší data (kód operace je stejný). V případě záporné odpovědi je kód operace navýšen o 0x80 a za ním následuje podrobnější kód chyby.

Spojení je nutno aktivně udržovat, v případě že více jak 15 sekund nepřišla žádná zpráva, uzavírá se TCP/IP kanál.

## 6.1 Příklady

Čísla jsou uváděna v šestnáctkové soustavě, pokud není uvedeno jinak.



Čísla registrů jsou uvedena pro zařízení IG-NT-BB od firmy ComAp (6).

### 6.1.1 Zápis

Zápis veličiny „nominal power“:

Tabulka 6 – Modbus, zápis nominal power

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data			
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Registr	=	Hodnota	=
00	00	00	00	00	06	01	06	0B	C0	00	C8
								3008 (dec)		200 kW	

Pokud se zápis povede, je odpověď stejná jako dotaz.

Negativní odpověď bude vypadat následovně:

Tabulka 7 – Modbus negativní odpověď na zápis

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Kód chyby
00	00	00	00	00	03	01	86	XX

### 6.1.2 Čtení

Čtení veličiny „RPM“:

Tabulka 8 – Modbus čtení

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data			
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Registr	=	Počet bytů k přečtení	
00	00	00	00	00	06	01	03	01	3A	00	01
								314 (dec)			

Kladná odpověď na čtení veličiny „RPM“:



**Tabulka 9 – Modbus kladná odpověď na čtení**

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data			
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Počet přečtených bytů	Hodnota čtené veličiny 0x05DC = 1500 RPM		
00	00	00	00	00	05	01	03	02	05	DC	

V případě, že čteme více registrů, budou na konci další dva byty s hodnotou následujícího registru, tedy můžeme číst více registrů najednou, ale pouze pokud jdou za sebou. Délka paketu a počet přečtených bytů budou větší.

Záporná odpověď na čtení veličiny „RPM“:

**Tabulka 10 – Modbus záporná odpověď na čtení**

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data	
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Kód chyby	
00	00	00	00	00	03	01	83	XX	

### 6.1.3 Přihlášení

Přihlášení (login) se provede zapsáním (kód 06/16) ID uživatele do registru 6362 A dále zapsáním hesla do registru 6363. Pro tuto operaci je výhodné použít operaci 16 (Zapsání více registrů). Některé systémy vyžadují zapsání ID a hesla v oddělených paketech, tedy je nutno použít dvakrát operaci 06.

**Tabulka 11 – Modbus přihlášení**

Hlavička zprávy (MBAP Header).							Kód	Data					
Identifikátor transakce		Identifikátor protokolu		Délka paketu		Adresa cílového zařízení	Kód operace	Registr 0x18DA = 6362 (dec)	Uživatel		Heslo		
00	00	00	00	00	08	01	16	18	DA	00	00	00	00



## 7 Matematický model

Tato kapitola ukazuje matematický popis systému 1. a 2. řádu. Systémy jsou popsány v časové i obrazové oblasti.

### 7.1 Systém 1. řádu

Systém prvního řádu můžeme popsat přenosovou funkcí:

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad 3)$$

Tato přenosová funkce je Laplaceovým obrazem časové funkce:

$$y(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad 4)$$

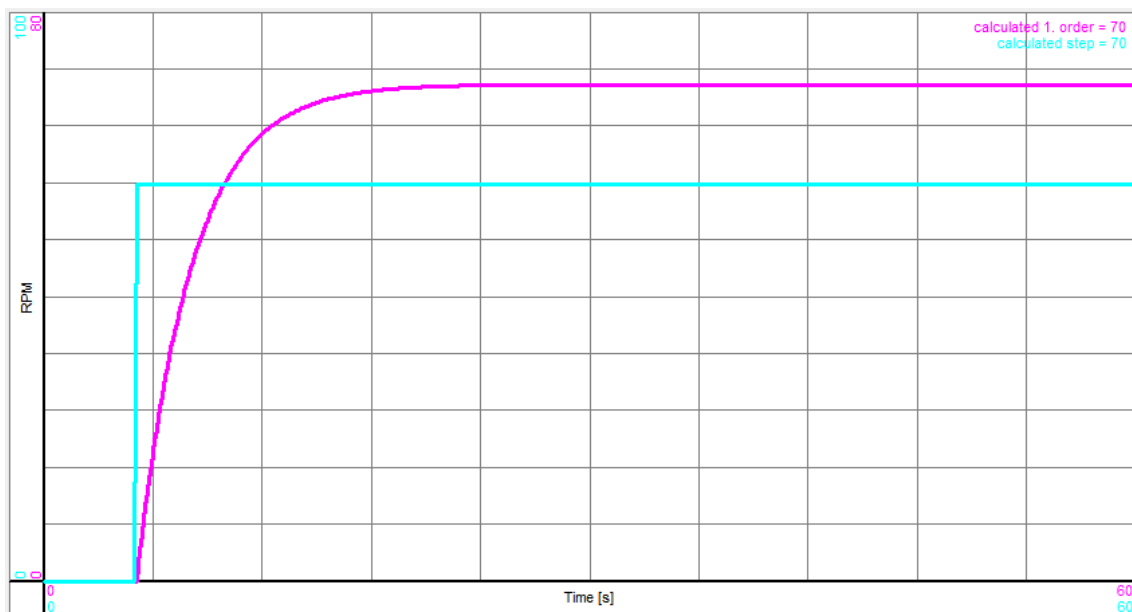
Kde:

- $K$  značí zesílení systému
- $T$  značí časovou konstantu
- $t$  je čas

Příkladem systému prvního řádu může být následující přenosová funkce:

$$H(s) = \frac{1}{3s + 1} \quad 5)$$

Tuto přenosovou funkci můžeme graficky vykreslit následujícím obrázkem:



Obrázek 6 – Přejchodová charakteristika systému 1. řádu



Příkladem systému prvního řádu je například spalovací motor bez řídicí jednotky (ECU). Pokud se jedná o motor s ECU, zpravidla se jde o systémy vyšších řádů.

## 7.2 Systém 2. řádu

Systém 2. řádu může být spojení motorgenerátoru s řídicí jednotkou motoru (ECU), tedy výsledný systém může být popsán například přenosovou funkcí ve tvaru:

$$H(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} \quad 6)$$

Přenosové funkci 6) odpovídá popis v časové oblasti:

$$y(t) = K \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\frac{\zeta}{T}t} \sin \left( \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{T} t + \arctg \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad 7)$$

Kde:

- $K$  značí zesílení systému
- $T$  značí časovou konstantu
- $\zeta$  značí tlumení systému
- $t$  je čas

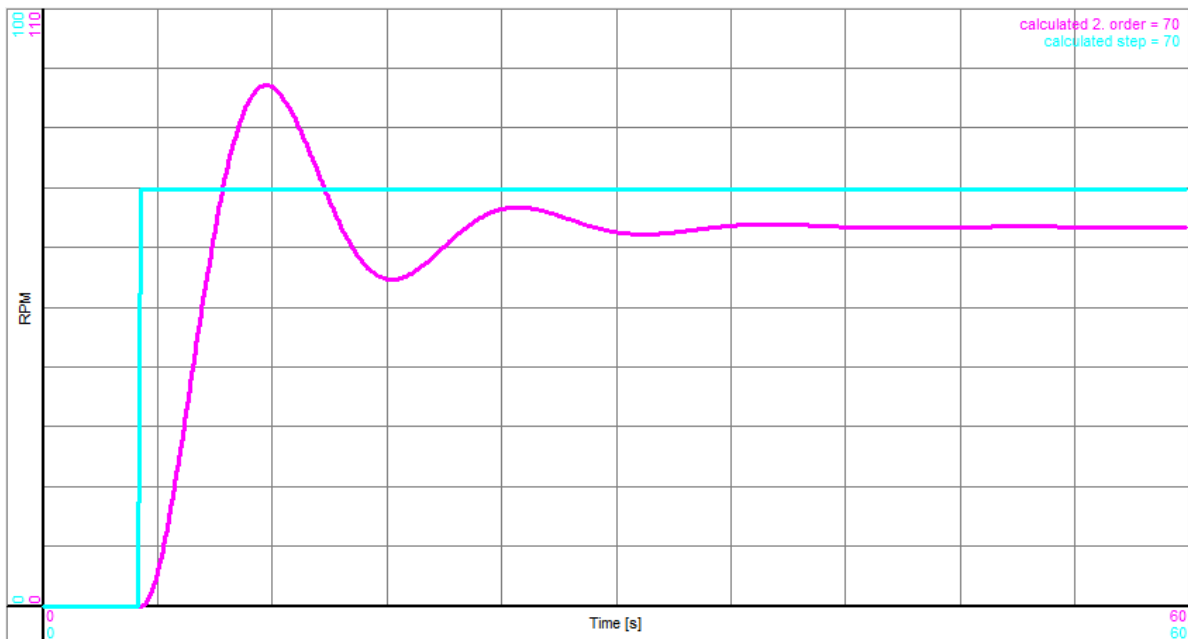
Tento tvar byl zvolen proto, že jsou jednotlivé parametry nezávislé. Pokud bychom udávali pouze parametry u první a druhé mocniny  $s$ , nebylo by možno jednoduše změnit například tlumení

Příkladem systému 2. řádu může být následující přenosová funkce:

$$H(s) = \frac{1}{4s^2 + 1.2s + 1} \quad 8)$$

Této funkci odpovídá  $\zeta = 0.3$ . Průběh této funkce je zobrazen na následujícím grafu:





Obrázek 7 - Přejchodová charakteristika systému 2. řádu

## 8 Metody identifikace

Pro identifikaci vstup systému skokově změníme a změříme odezvu systému. Velikost vstupu musí být tak velký, aby nedošlo ze zničení systému nebo k saturaci. V teorii se nejčastěji používá skoková funkce velikosti 1. V praxi to nemusí být dostatečné pro vybuzení systému dostatečným pro změření odezvy.

Pokud systém obsahuje dopravní zpoždění, je nutno ho odečíst před zpracováním. Pokud obsahuje offset (nezačíná v nule) je také třeba ho odečíst.

V následujících kapitolách bude použito následující značení:

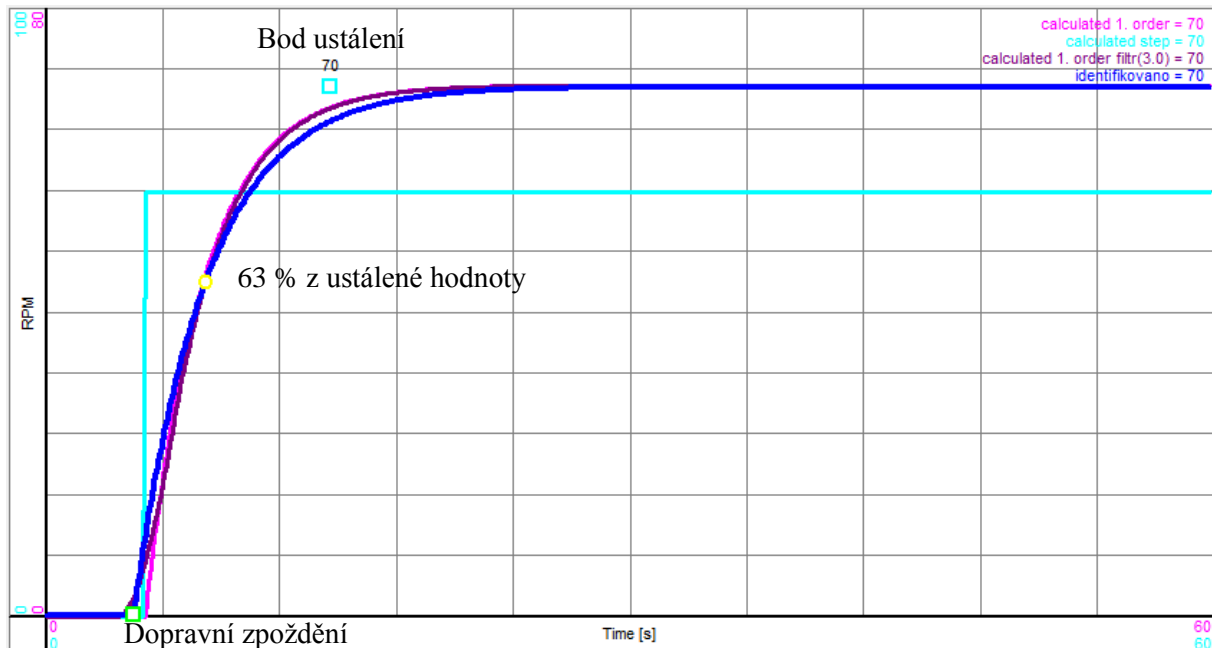
- $H(s)$  je obraz přenosové funkce
- $K$  značí zesílení systému.
- $T$  značí časovou konstantu systému.
- $\zeta$  značí poměrné tlumení, většina systémů je tlumených, tedy parametr  $\zeta$  se pohybuje v rozsahu 0 až 1.
- $u$  je vstup systému
- $y$  je výstup systému
- $\mu$  je logaritmický dekrement útlumu
- $A_1$  je hodnota prvního překmitu
- $A_2$  je hodnota druhého překmitu



## 8.1 Systém 1. řádu

Systém 1. řádu se obvykle identifikuje nalezením 63 % z ustálené hodnoty, pro tento bod nalezneme hodnotu na časové ose a přímo tato hodnota odpovídá parametru  $T$  v přenosu systému. Hodnota  $K$  odpovídá ustálené hodnotě vydělené velikostí skokové funkce. (9)

$$H(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad 9)$$



Obrázek 8 - Identifikovaný systém 1. řádu

Drobná nepřesnost identifikace vznikla nepřesným nalezením bodu dopravního zpoždění. Díky použité filtraci je „zaoblen“ začátek přechodové charakteristiky a to ztěžuje přesné nalezení bodu dopravního zpoždění. Nicméně pro potřeby autotunningu je to více než dostatečná přesnost.

## 8.2 Systém 2. řádu

Přenosová funkce systému 2 řádu může mít následující tvar:

$$H(s) = \frac{K}{T^2s^2 + 2T\zeta s + 1} \quad 10)$$

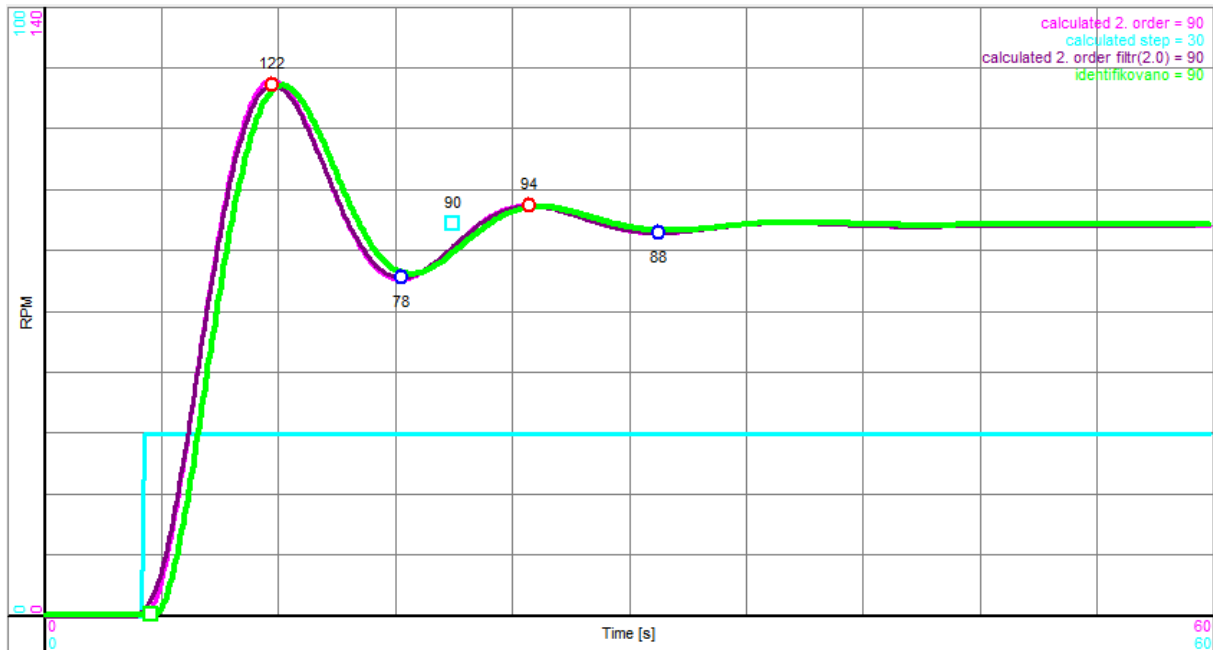
Parametr  $K$  lze vypočítat jako rozdíl počáteční a koncové hodnoty vydělený velikostí změny vstupu systému:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u(t)} \quad 11)$$



## 8.2.1 Měření překmitů

Systém 2. řádu se obvykle identifikuje změřením dvou po sobě jdoucích překmitů (9). Doba mezi překmity ovlivňuje parametr  $T$ . Podíl amplitud překmitů zase ovlivňuje  $\zeta$ . Hodnotu ustáleného stavu ovlivňuje parametr  $K$ .



Obrázek 9 - Měření dvou překmitů

Obrázek 9 ukazuje identifikaci pomocí měření dvou po sobě jdoucích překmitů (červeně označené body). Fialovou je vykreslen zadaný průběh s přenosem:

$$H(s) = \frac{3}{4s^2 + 1,2s + 1} \quad 12)$$

Zeleně je vykreslen identifikovaný průběh. Z grafu odečteme hodnotu prvního překmitu oproti ustálené hodnotě:  $A_1 = 122 - 90$  a hodnotu druhého překmitu:  $A_2 = 94 - 90$ . Dále spočítáme hodnotu logaritmického dekrementu útlumu:

$$\mu = \ln \frac{A_1}{A_2} = \ln \frac{122 - 90}{94 - 90} = 2,01 \quad 13)$$

Poměrné tlumení vypočítáme ze vztahu:

$$\zeta = \frac{\mu}{\sqrt{4\pi^2 + \mu^2}} = \frac{2,01}{\sqrt{39,48 + 4,06}} = 0,305 \quad 14)$$

Dále z grafu odečteme periodu kmitů  $T_0$ , nejlépe se odečte jako vodorovná vzdálenost prvního a druhého překmitu, tedy  $T_0 = 13,2$  s. Časovou konstantu systému pak spočítáme ze vztahu:



$$T = \frac{T_0 \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\pi} = \frac{13,2 \cdot 0,95}{6,28} = 1,997 \quad 15)$$

A zesílení je vypočítáno ze vztahu:

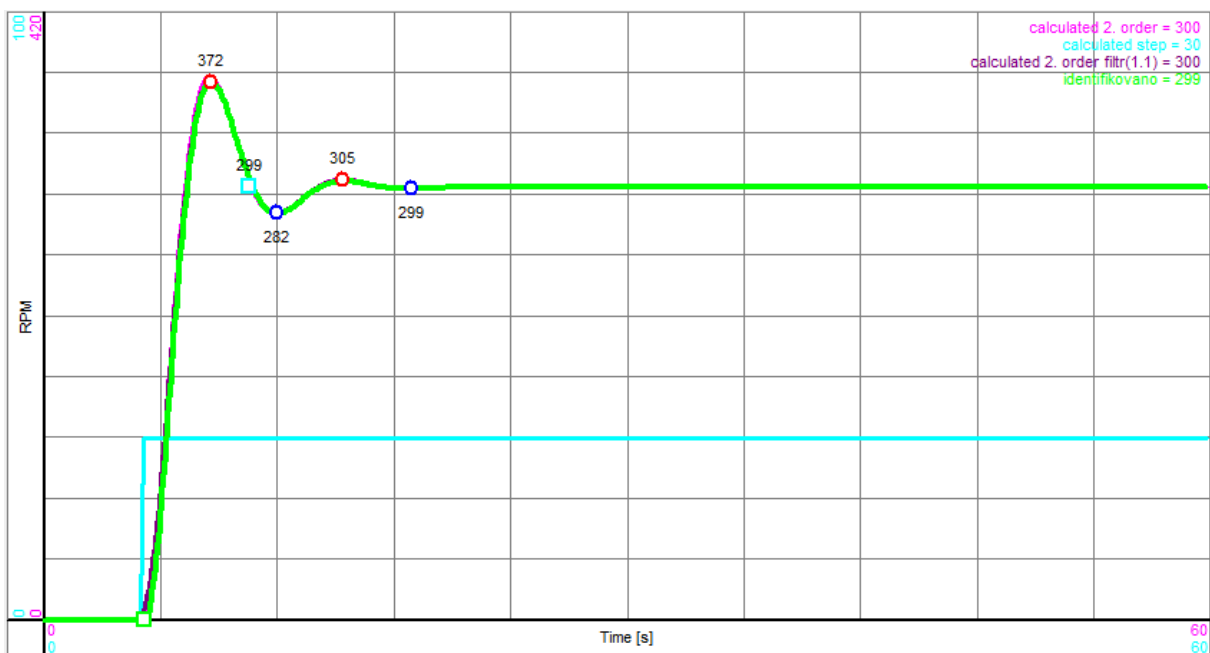
$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u(t)} = \frac{90}{30} = 3 \quad 16)$$

Tedy identifikovaný systém má přenosovou funkci:

$$H(s) = \frac{3}{3,988s^2 + 1,22s + 1} \quad 17)$$

## 8.2.2 Překmit a podkmit

V případě více tlumeného systému může být způsob měření dvou po sobě jdoucích překmitů špatně použitelný. Díky vzorkování a šumu nemusíme být schopni změřit druhý překmit dostatečně přesně. Proto je vhodnější pro identifikaci použít měření překmitu a následného podkmitu (10). Změření dat pro tento přístup je jednodušší.



Obrázek 10 – Měření překmitu a podkmitu

Obrázek 10 ukazuje měření překmitu a následného podkmitu. Fialovou (v zákrytu za zelenou) je značen zadaný systém s přenosem:

$$H(s) = \frac{10}{1s^2 + 0,8s + 1} \quad 18)$$



Zelenou je pak značen výsledný identifikovaný systém. Princip je podobný jako v předchozí kapitole. Opět odečteme hodnotu prvního překmitu oproti ustálené hodnotě:  $A_1 = 372 - 299$  a hodnotu prvního podkmitu:  $A_2 = \text{abs}(282 - 299)$ .

$$\zeta = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left(\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)\right)^2}} = \frac{\ln\left(\frac{73}{17}\right)}{\sqrt{9,87 + 1,457^2}} = \frac{1,457}{3,463} = 0,42 \quad 19)$$

Časovou konstantu změříme jako dvojnásobek vodorovné vzdálenosti mezi překmitem a podkmitem:  $T_0 = 2 \cdot 3,7$  a dále pokračujeme vzorcem nahoře jako v předchozí kapitole:

$$T = \frac{T_0 \sqrt{1 - \zeta^2}}{2\pi} = \frac{7,4 \cdot 0,82}{6,28} = 0,97 \quad 20)$$

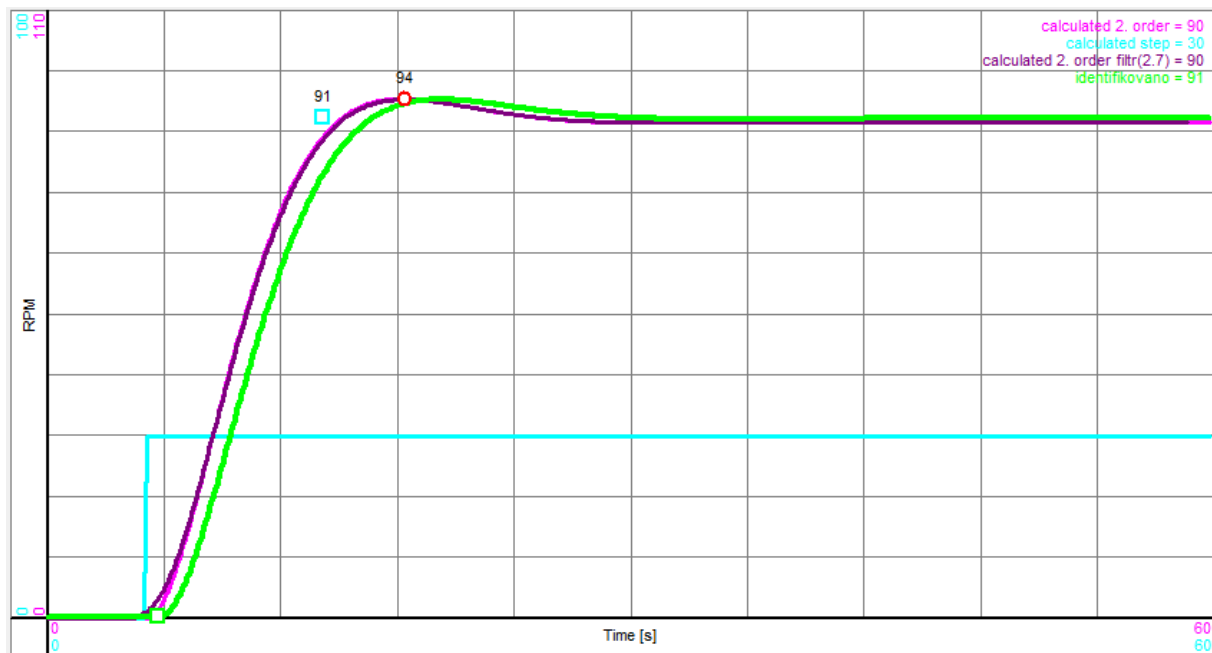
Zesílení je počítáno opět ze vztahu:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u(t)} = \frac{299}{30} = 9,97 \quad 21)$$

### 8.2.3 Pouze překmit

Ale ani měření překmitu a následného podkmitu nefunguje vždy optimálně. Například pro systémy s větším poměrným tlumením  $\zeta$  než je 0.5 je lepší použít pouze měření velikosti překmitu a času potřebného pro dosažení prvního překmitu. Fialovou je značen zadaný systém s přenosem:

$$H(s) = \frac{3}{9s^2 + 4,2s + 1} \quad 22)$$



Obrázek 11 – Měření překmitu

Pro velikost překmitu ( $OS$ ) platí rovnice: (10)

$$OS = e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (23)$$

Rovnici můžeme upravit do tvaru:

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\ln(OS)}{\pi}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\ln(OS)}{\pi}\right)^2 + 1}} \quad (24)$$

Z tohoto tvaru můžeme přímo spočítat parametr tlumení  $\zeta$  pouze na základě prvního překmitu. Pro  $\zeta = 1$  se překmit limitně blíží k nule.

Nyní stačí spočítat překmit  $OS = \frac{94}{90,6} - 1 = 0,0038$  a dosadit do rovnice:

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left(\frac{\ln(OS)}{\pi}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\ln(OS)}{\pi}\right)^2 + 1}} = \frac{3,3}{4,3} = 0,72 \quad (25)$$



Časovou konstantu systému spočítáme dle rovnice:

$$T = \frac{1}{4} T_0 \quad 26)$$

Kde:

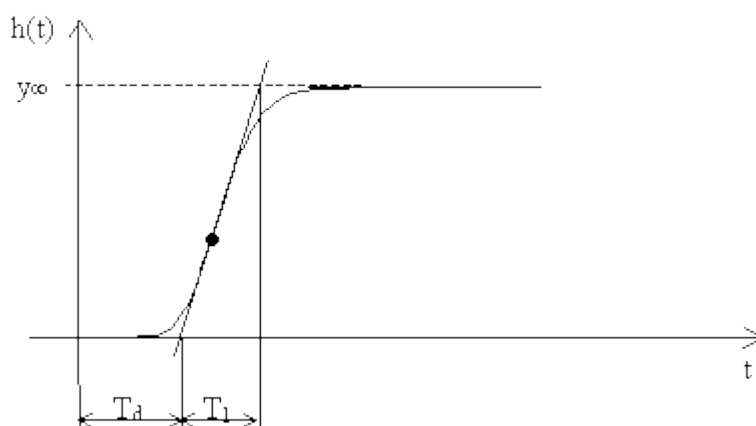
- $T_0$  je vodorovní vzdálenost mezi body dopravního zpoždění a prvním překmitem.

Tedy v tomto případě:  $T_0 = 12,7$  a  $T = 3,175$

Zesílení lze spočítat stejně jako v kapitolách: Měření překmitů, Překmit a podkmit.

### 8.2.4 Tečna v inflexním bodě

Další způsob je pomocí tečny v inflexním bodě. Tato metoda je jednoduchá, ale nelze ji použít pro systémy s výraznějším překmitem. A vzhledem k tomu, že motorgenerátory běžně mají v přechodové charakteristice překmit, nebude se zde tato práce metodou zabývat.



Obrázek 12 – Identifikace tečnou v inflexním bodě (11)

### 8.2.5 Rozkmitání systému

Systém lze také identifikovat pomocí rozkmitání. K tomu se praxi používá relé s hysterezí nebo proporcionální regulátor. Tedy je nutno systém zapojit zpětnovazebně s regulátorem. Regulátoru nastavíme takové zesílení, až systém přejde do ustáleného kmitání. Z periody kmitů lze vypočítat parametry systému. Tato metoda nemusí být v praxi přijatelná a to ze dvou důvodů: majitel systému tento test neschválí z obavy o životnost systému, nebo proto, že nelze nastavit takové zesílení (bez změny osazeného regulátoru), aby se systém rozkmital. Kontrolery firmy ComAp nedovolují nastavit potřebné zesílení potřebné pro ustálené kmitání systému. Ale lze použít obdobu relé s hysterezí. Nicméně metody popsány výše fungují spolehlivě, proto zde tato metoda nebude detailněji rozebírána. Tuto metodu navrhl pánové Åström and Hägglund v roce 1995.



## 9 Výpočet regulačních konstant

V této části se práce bude zabývat výpočtem regulačních konstant v případě známé přenosové funkce. Logiky tak navazuje na kapitolu 8, kde je popsán způsob nalezení přenosové funkce.

### 9.1 Stanovení parametrů tříparametrového modelu

Takzvaný tříparametrový model (FOPDT) (12) je často používán jako aproximace reálného procesu pro potřeby návrhu PID regulátoru. Model používá, jak už název napovídá, tři parametry:

- $L$  - doba průtahu
- $T_{ar}$  - průměrná doba ustálení
- $T$  - časová konstanta

Pro parametry platí vztahy:

$$L = T_{ar} - T \quad (27)$$

$$T = e \int_0^{T_{ar}} \frac{y(t) - y(0)}{y(\infty) - y(0)} dt \quad (28)$$

$$T_{ar} = \int_0^{\infty} \frac{y(\infty) - y(t)}{y(\infty) - y(0)} dt \quad (29)$$

Vzhledem k tomu, že již známe přenos systému motorgenerátoru, není potřeba hodnoty zjišťovat znovu z bodů na grafu, ale je možné je vypočítat přímo z přenosu. Tímto výpočtem se zabývá článek (12).

Nalezený přenos je ve tvaru:

$$H(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1} \quad (30)$$

Tento přenos je třeba porovnat s obecným přenosem ve tvaru:

$$H(s) = K \frac{1 + n_1 s + n_2 s^2 + \dots}{1 + d_1 s + d_2 s^2 + \dots} \quad (31)$$

Porovnáním koeficientů u stejných mocnin dostaneme následující vztahy:

$$n_1 = 0, n_2 = 0, d_1 = 2T\zeta, d_2 = T^2 \quad (32)$$

Dále platí vztahy:

$$n_1 = g_1 + d_1 \quad (33)$$





$$n_2 = g_2 + d_1 g_1 + d_2 \quad 34)$$

Po úpravě a dosazení platí:

$$g_1 = -d_1 = -T_{ar} = -2T\zeta \quad 35)$$

$$g_2 = n_2 - d_1 g_1 - d_2 = 4T^2\zeta^2 - T^2 \quad 36)$$

A z těch dále vypočítáme parametry modelu (značeny tučně):

$$T_{ar} = 2T\zeta \quad 37)$$

$$T = \sqrt{2g_2 - T_{ar}} = \sqrt{-T_{ar} - 2T^2 + 8T^2\zeta^2} \quad 38)$$

$$L = T_{ar} - T \quad 39)$$

K parametru  $L$  dále musíme připočíst dopravní zpoždění systému, neboť poměrně zásadně ovlivňuje výsledný projev s aktivním regulátorem.

## 9.2 Vyvážené nastavení

Vyvážené nastavení PI nebo PID regulátorů od autorů Klán, Gorez (13) popisuje metodu jak nastavit PID konstanty regulátoru, tak aby byly vyváženy zásahy proporcionální a integrační složky regulátoru. Toto nastavení v porovnání s nastavením Ziegler-Nicholsonovým poskytuje silnější I složku na úkor P složky. Vztahy pro vyvážené nastavení jsou:

$$K_p = \frac{1}{2}K \quad 40)$$

Kde:

- $K$  je zesílení systému
- $K_p$  je zesílení proporcionální složky regulátoru

$$T_I = \frac{1}{2}T_{CR} \quad 41)$$

Kde:

- $T_I$  je časová konstanta I složky regulátoru
- $T_{CR}$  je kritické zesílení regulátoru, tedy zesílení při kterém regulátor začne ustáleně kmitat.



Vzhledem k tomu, že v případě motorgenerátoru s kontrolérem není možno takové zesílení nastavit nelze tuto hodnotu jednoduše zjistit. Platí, ale i další vztah:

$$T_I = 2L \quad 42)$$

Kde:

- $L$  je jeden z parametrů tříparametrového modelu, viz kapitola 9.1

Z parametru  $L$  spočítáme časovou konstantu I složky regulátoru.

Zesílení D složky se v této metodě volí ručně v rozsahu od nuly až do  $\frac{1}{4}$  konstanty I.

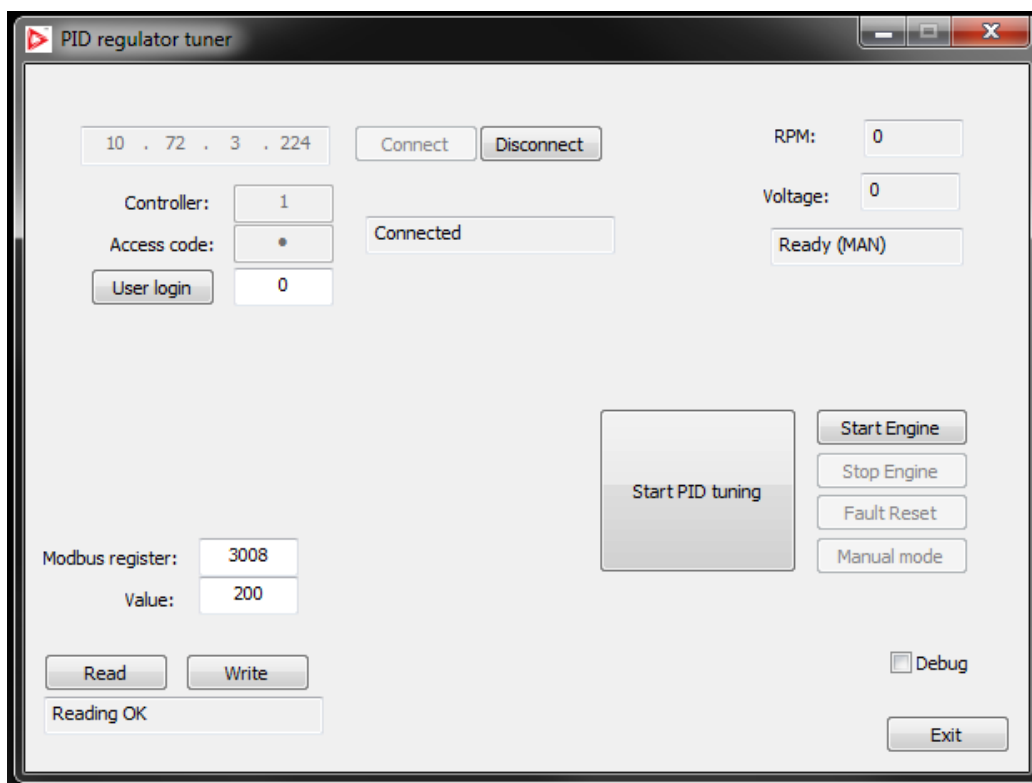


## 10 Implementace

Obsahem této kapitoly je popis použitých funkcí a metod algoritmu pro automatické ladění PID regulátoru. Dále je zde vyobrazeno několik příkladů identifikovaných systémů.

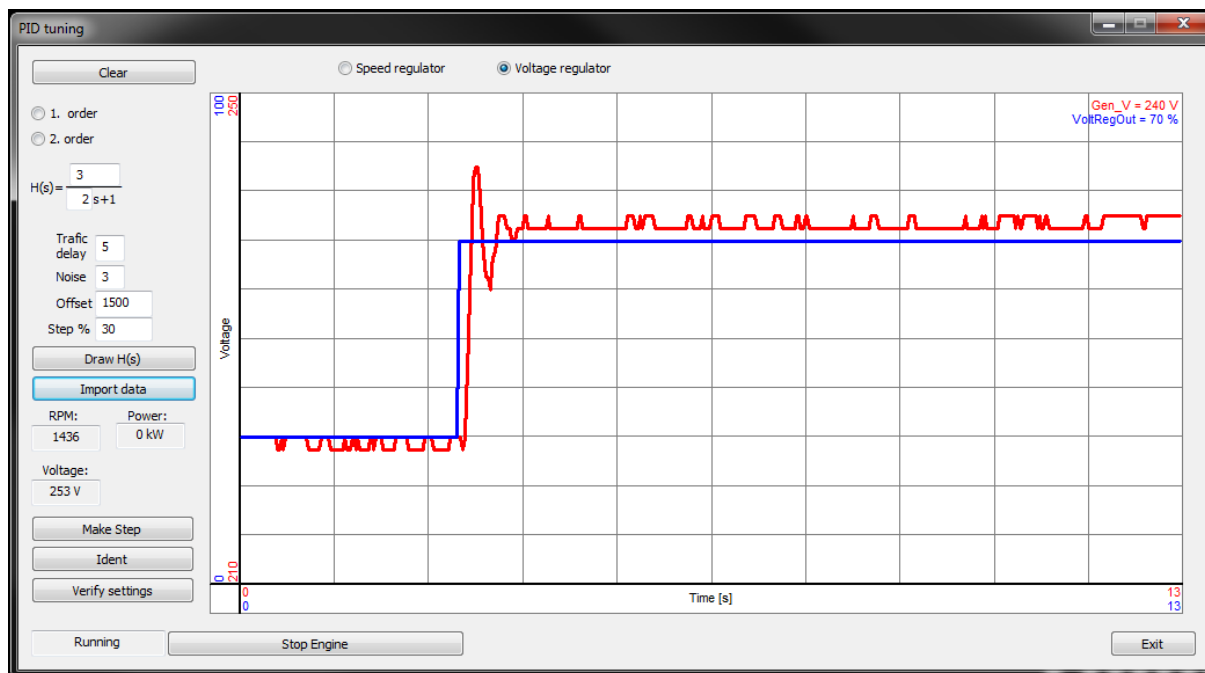
### 10.1 Grafické rozhraní aplikace

Úvodní okno aplikace obsahuje volby připojení ke kontroléru, jedná se možnost zadat IP adresu a Modbus adresu kontroléru. Dále je možnost z úvodního okna přepnout systém do manuálního módu. Manuální mód je jediný, ve kterém lze ručně nastartovat motor. Pro účely ladění je možno přečíst nebo zapsat libovolný Modbus registr.



Obrázek 13 – GUI

Po nastartování motoru je přístupné okno s monitorováním systému. Na následujícím obrázku je vidět odezva generátoru na skok řídicí veličiny (VoltRegOut).



Obrázek 14 – GUI PID tuning

Pro účely ladění byla přidána možnost (levá horní část okna) vygenerovat průběh systému zadaného přenosem a ten následně identifikovat. Nebo možnost importovat data z \*.csv souboru. Také je zde možnost zastavit motor pro případ nesprávného chování systému. Nad grafem se nachází přepínač pro výběr regulátoru napětí nebo regulátoru otáček. V praxi probíhá obsluha programu následovně: uživatel vyplní IP adresu kontroléru a připojí se, dále nastartuje motorgenerátor a spustí část programu viz Obrázek 14, kde pokračuje tlačítkem „Make Step“, čímž vygeneruje změnu referenční hodnoty. Po ustálení systému je možno pokračovat tlačítkem „Identify“, které spustí analýzu naměřených dat a navrhne regulační konstanty. Navržené konstanty je z bezpečnostních důvodů potřeba zapsat do kontroléru ručně. Poté je možno přistoupit k ověření parametrů regulace tlačítkem „Verify settings“, toto tlačítko vypne příslušný regulátor, počká na ustálení systému a následně se regulátor zapne a jsou vyhodnoceny parametry regulace jako například překmit nebo doba ustálení.

### 10.1.1 Barevné značení

V grafické části aplikace se používá jednotné barevné značení. Pro zjednodušení je vždy v pravém horním rohu legenda s názvem průběhu.

- Červený průběh: online měřená hodnota z kontroléru. Hodnota může být napětí nebo otáčky, záleží na vybraném typu regulátoru.
- Modrý průběh: online žádaná hodnota. Hodnota výstupu regulátoru. Rozsah je 0 až 100 %.
- Fialový průběh: vygenerovaná hodnota napětí nebo otáček. Tedy stejný význam jako červený průběh, pouze se nejedná o online data.
- Tyrkysový průběh: vygenerovaná žádaná hodnota. Význam je stejný jako modrý průběh.



- Zelený průběh: vygenerovaný průběh identifikovaného systému. Využití je pro kontrolu identifikace. V ideálním případě bude tento průběh stejný jako červený nebo fialový.
- Tmavě fialová, tmavě červená: těmito barvami je značena filtrované hodnota

Aplikace dále používá barevné rozlišení významných bodů:

- Červeným bodem je značeno lokální maximum. Kapitola 10.3.3
- Modrým bodem je značeno lokální minimum. Kapitola 10.3.3
- Zeleným čtverečkem je značeno místo dopravního zpoždění. Kapitola 10.3.1.
- Tyrkysovým čtverečkem je označeno místo ustálení. Kapitola 10.3.2
- Žlutým bodem je označen bod odpovídající 63 % z ustálené hodnoty, tento bod se používá pro identifikaci 1. řádu, viz kapitola 10.4.1.

## 10.2 Filtrace

Měřená data je nutno filtrovat. Pro filtraci je použit klouzavý průměr s dynamickým časovým oknem, ze kterého se počítá průměr. Toto okno je voleno jako třetina času mezi bodem dopravního zpoždění a mezi maximální hodnotou nebo bodem ustálení, podle toho co nastane dřív. Tento způsob filtrování se ukázal v praxi jako dostatečný. V případě většího šumu by bylo vhodnější použít sofistikovanější filtraci, například Kalmanův filtr. Vzhledem k tomu, že samotný kontrolér měřená data filtruje, není potřeba složitějšího filtrování na straně PC. Filtrovaný průběh je barevně odlišen tmavším odstínem barvy zdrojového průběhu.

## 10.3 Nalezení význačných bodů systému

Pro správnou identifikaci je nutno nalézt co nejpřesněji význačné body systému.

### 10.3.1 Dopravní zpoždění

Tento bod je nalezen jako místo, kde se signál poprvé vychýlí o více než 5 %. Hodnota průběhu v tomto bodě je zároveň offset signálu, který je nutno odečítat před samotnou identifikací systému. V případě vysokého šumu se tímto způsobem nemusí podařit nalézt správný bod, pokud tento případ nastane, je hranice pro potřebné vychýlení signálu rozšířena a hledání pokračuje znovu. Že se nepovedlo nalézt správný bod je detekováno nalezením bodu dopravního zpoždění, který je dříve než změna referenční hodnoty. Hodnota Y bodu dopravního zpoždění je pro vyšší přesnost počítána jako průměr ze všech vzorků od začátku grafu až po nalezenou X souřadnici tohoto bodu.

### 10.3.2 Ustálená hodnota

Bod ustálení je definován, jako bod kdy systém přejde do pásma  $\pm 2$  % od ustálené hodnoty a už se neodchýlí. Podobně jako v případě dopravního zpoždění, ani tento bod se nemusí podařit nalézt správně v případě vysokého šumu, pak je pásmo rozšířeno a hledání probíhá znovu. Hodnota Y bodu ustálené



hodnoty je pro vyšší přesnost počítána jako průměr ze všech vzorků od místa kde se signál ustálí až po konec grafu. Z této hodnoty se totiž počítá zesílení systému, je tedy potřeba hodnotu mít nalezenou co nejpřesněji.

### 10.3.3 Lokální extrém

Body jako první a druhý překmit jsou nalezeny jako lokální maximum změřeného průběhu. Inflexní body jsou nalezeny stejně, pouze se hledají na derivaci měřeného průběhu. Po nalezení těchto bodů je nutno ověřit, že nejsou dva body nalezeny těsně vedle sebe, to může nastat v případě zašuměného signálu.

## 10.4 Identifikace

Před identifikací je nutno ověřit, že systém není na svém limitu, tedy se musí porovnat žádaná veličina s maximální/minimální mezí pro vstup. Alternativně je možné žádanou hodnotu lehce změnit a zkontrolovat, že se výstup také změnil.

Samotná identifikace systému začíná skokovou změnou vstupní veličiny. Zaznamenáním odezvy systému dostaneme přechodovou charakteristiku, která je dále analyzována. Velikost skoku je nutno volit s ohledem na možnosti systému.

Před samotnou identifikací je nutno od charakteristiky odečíst počáteční hodnotu a dopravní zpoždění.

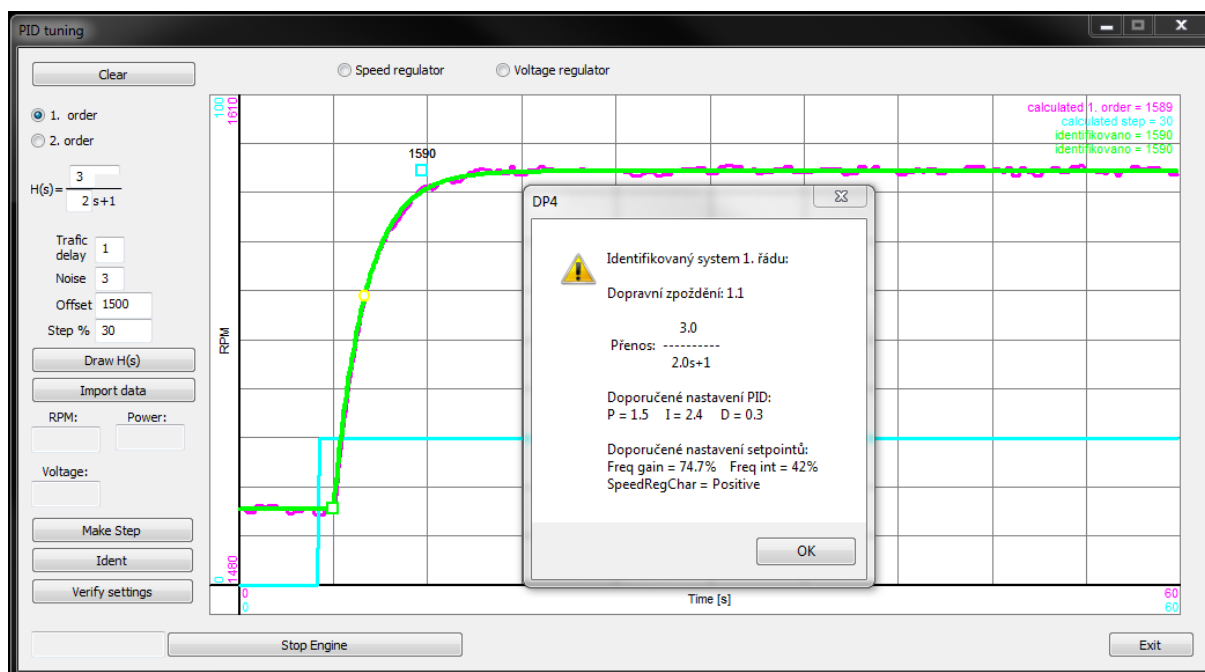
Identifikace systému 1. i 2. řádu začíná společně nalezením bodu dopravního zpoždění a bodu ustálení. Rozdíl hodnot v těchto bodech vydělený rozdílem vstupního signálu přímo udává zesílení systému.

Aplikace využívá identifikací popsaných v kapitolách: 8.1, 8.2.2, 8.2.3. Automaticky se vybírá vhodnější metoda. Identifikovat je možno jako reakci na skok směrem nahoru, tak směrem dolů.

### 10.4.1 1. Řád

Systém nalezne dopravní zpoždění a bod ustálení. Dále vypočítá 63 % (žlutý bod) z rozdílu ustálené hodnoty a počátkem. Pro tento bod je nalezena hodnota na časové ose a čas mezi dopravním zpožděním a 63% bodem je přímo hodnota  $T$  z přenosu.

Na závěr je vygenerován průběh odpovídající přenosové funkci pro kontrolu správnosti identifikace.



Obrázek 15 – Identifikace systému 1. řádu

Motorgenerátory se v praxi prakticky nikdy nechovají jako systém prvního řádu, proto jim zde nebude věnována větší pozornost.

## 10.4.2 2. řád

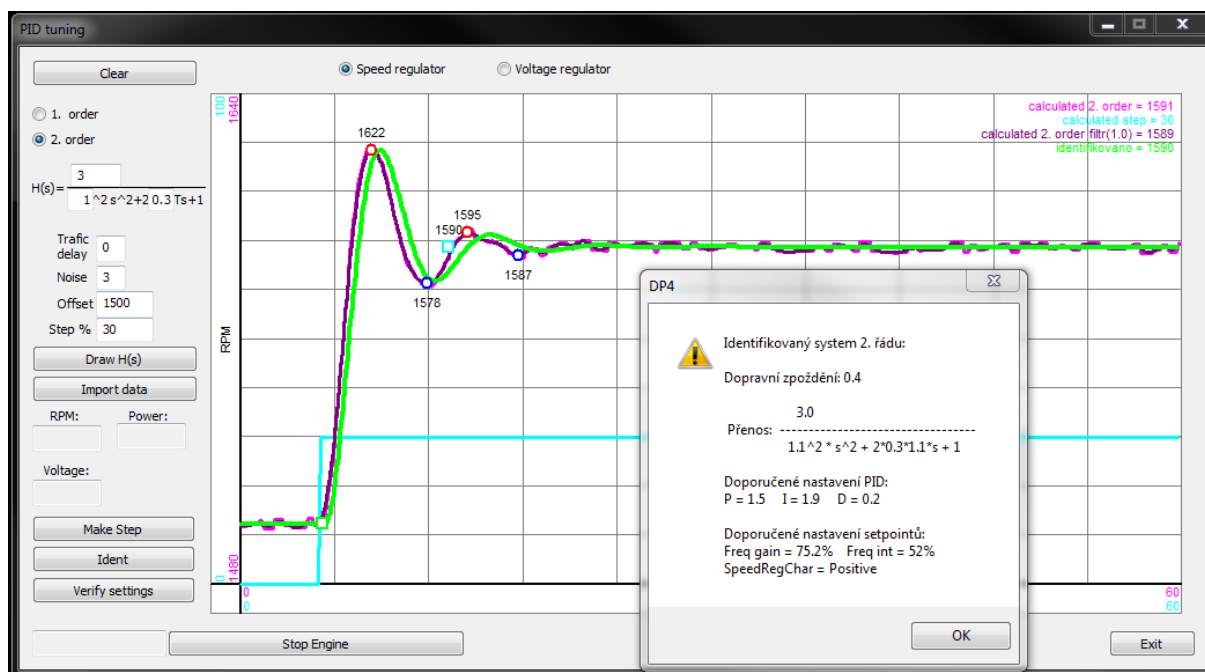
Začátek identifikace spočívá ve změření překmitu a vypočítání poměrného tlumení  $\zeta$  viz kapitola: 8.2.3

Pokud je  $\zeta$  větší než 0,5 je to považováno za nekmitavý systém. A systém pokračuje identifikací od kapitoly 8.2.3. Pokud je poměrné tlumení menší, pokračuje se identifikací popsanou v kapitole 8.2.2.

### 10.4.2.1 Kmitavý systém

Z přechodové charakteristiky nalezneme bod prvního překmitu a prvního podkmitu. Z jejich poměru je vypočítán parametr  $\zeta$  a  $T$ , viz kapitola: 8.2.2. Nalezené významné body jsou graficky znázorněny: zelená – dopravní zpoždění, červená – překmit, modrá – podkmit, tyrkysová – ustálení systému.

Následně je pro kontrolu vygenerován průběh dle identifikovaného přenosu.



Obrázek 16 – Identifikace kmitavého systému

Zadaný identifikovaný systém (růžový průběh) s přenosem:

$$H(s) = \frac{3}{1s^2 + 0,6s + 1} \quad 43)$$

Tento systém byl rozpoznán jako (zelený průběh):

$$H(s) = \frac{3}{1,1s^2 + 0,66s + 1} \quad 44)$$

Pro tento systém byl navržen PID regulátor dle kapitoly 9.2 s parametry:

Tabulka 12 – PID parametry, kmitavý systém

Význam	P	I	D
Hodnota	1,5	1,9	0,2

Tomu odpovídá nastavení kontroléru:

Tabulka 13 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém

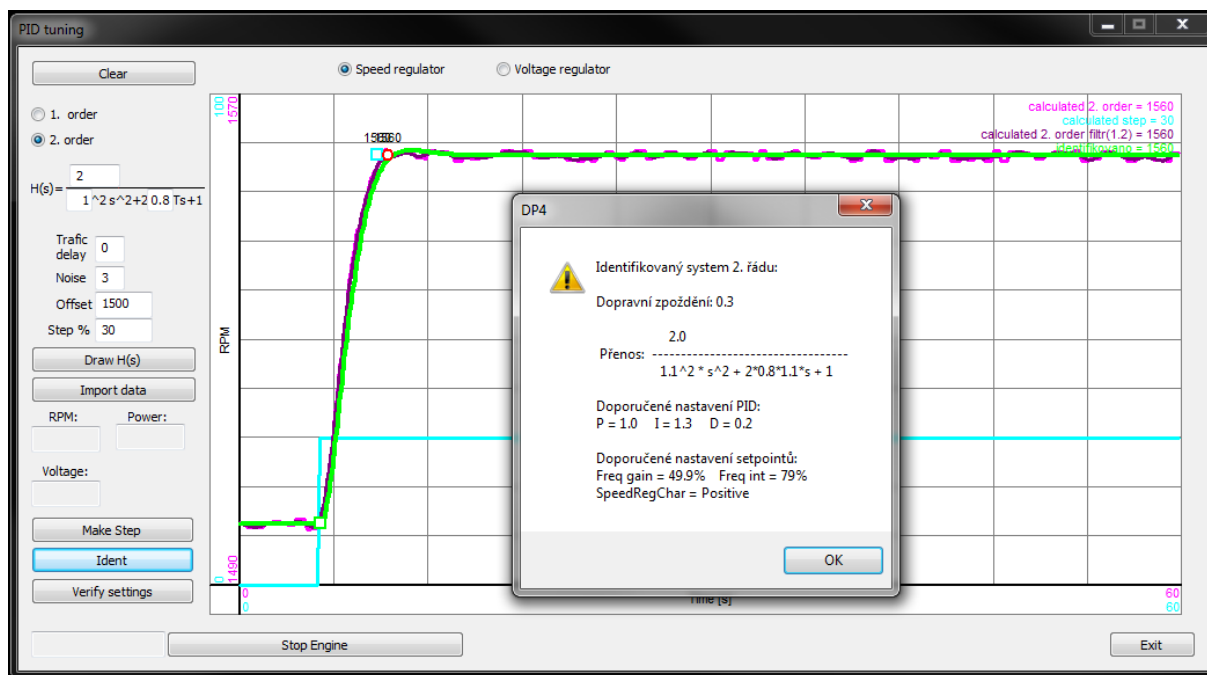
Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	75,2 %	52 %	positive





### 10.4.2.2 Nekmitavý systém

Tento způsob je volen pro tlumení systému větší než 0,5. Zde se hledá pouze dopravní zpoždění, maximum a bod ustálení. Parametr T je vypočítán jako čas mezi dopravním zpožděním a ustálením systému vydělený čtyřmi. Význačné body jsou opět zvýrazněny graficky: Zelenou je značeno místo dopravního zpoždění, červeně místo překmitu a tyrkysovou je místo ustálení.



Obrázek 17 – Identifikace nekmitavého systému

Zadán byl systém (růžový průběh) s přenosem:

$$H(s) = \frac{2}{1s^2 + 1,6s + 1} \tag{45}$$

Tento systém byl identifikován jako (zelený průběh):

$$H(s) = \frac{2}{1,1s^2 + 1,76s + 1} \tag{46}$$

Pro tento systém byl navržen PID regulátor s parametry:

Tabulka 14 – PID parametry, kmitavý systém

Význam	P	I	D
Hodnota	1	1,3	0,2

Tomu odpovídá nastavení kontroléru:



Tabulka 15 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	49,9 %	79 %	positive

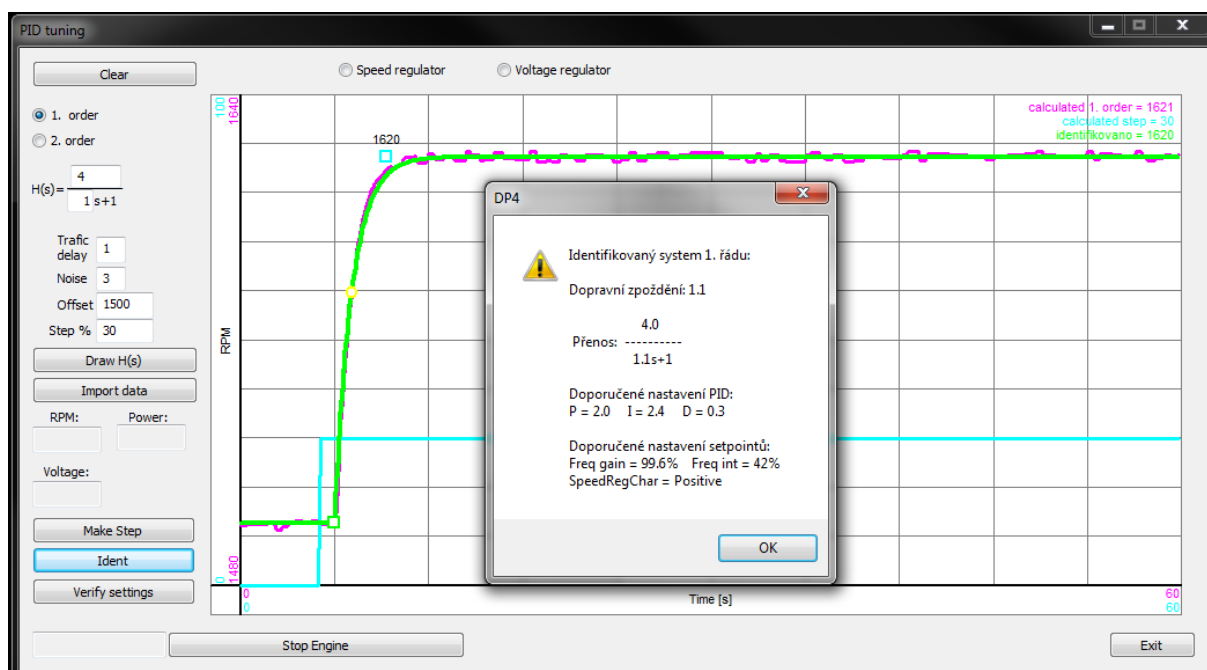
### 10.4.2.3 Příklady identifikace otáček

V této kapitole jsou ukázky jednotlivých identifikací. Identifikace jsou prováděny na průběhu otáček motoru. Identifikace průběhu napětí je popsána v kapitole 10.4.2.4

#### 10.4.2.3.1 1.řád

Přenos zadaného systému byl zvolen:

$$H(s) = \frac{4}{1s + 1} \quad 47)$$



Obrázek 18 – Příklad identifikace systému 1. řádu

Tento systém byl identifikován jako:

$$H(s) = \frac{4}{1,1s + 1} \quad 48)$$

A byl navržen regulátor s následujícími parametry:

Tabulka 16 – PID parametry, 1. řád

Význam	P	I	D
Hodnota	2	2,4	0,3



Tomu odpovídá nastavení kontroléru:

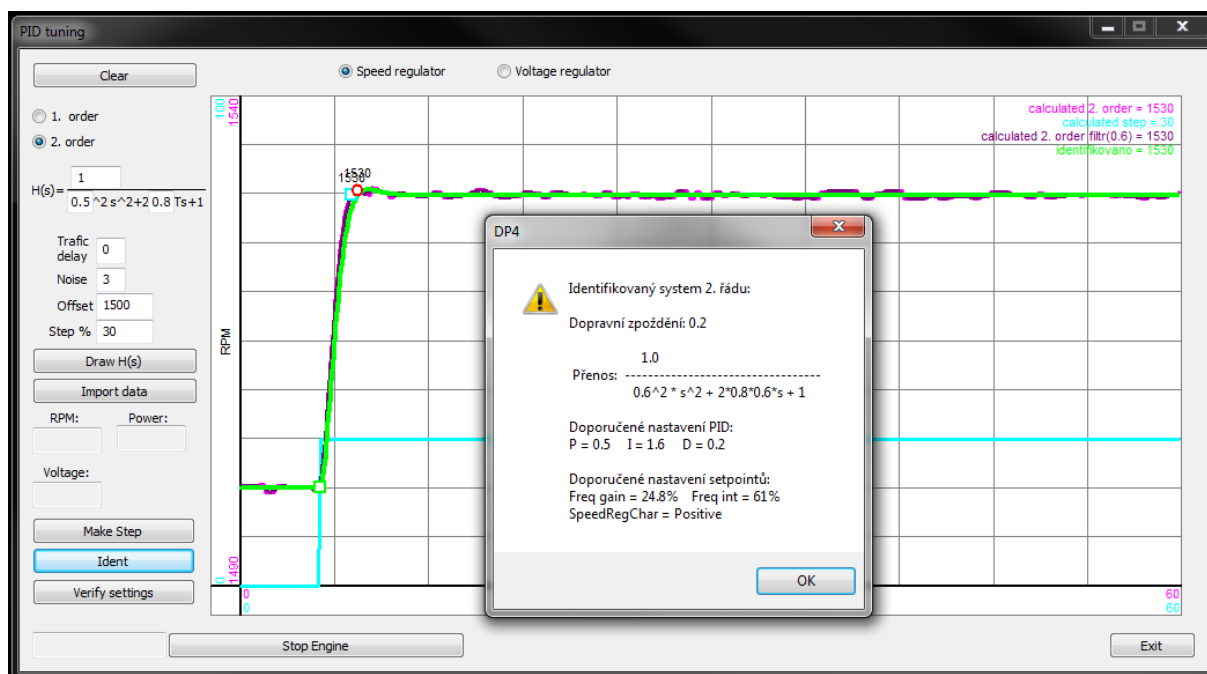
Tabulka 17 – Nastavení kontroléru, 1.řád

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	99,6 %	42 %	positive

### 10.4.2.3.2 2. řád, nekmitavý případ

Přenos zadaného systému:

$$H(s) = \frac{1}{0,25s^2 + 1,6s + 1} \quad 49)$$



Obrázek 19 – Příklad identifikace systému 2.řádu

Identifikován jako:

$$H(s) = \frac{1}{0,6s^2 + 1s + 1} \quad 50)$$

Pro tento systém byl navržen regulátor s parametry:

Tabulka 18 – PID parametry, nekmitavý systém

Význam	P	I	D
Hodnota	0,5	1,6	0,2



Tomu odpovídá nastavení kontroléru:

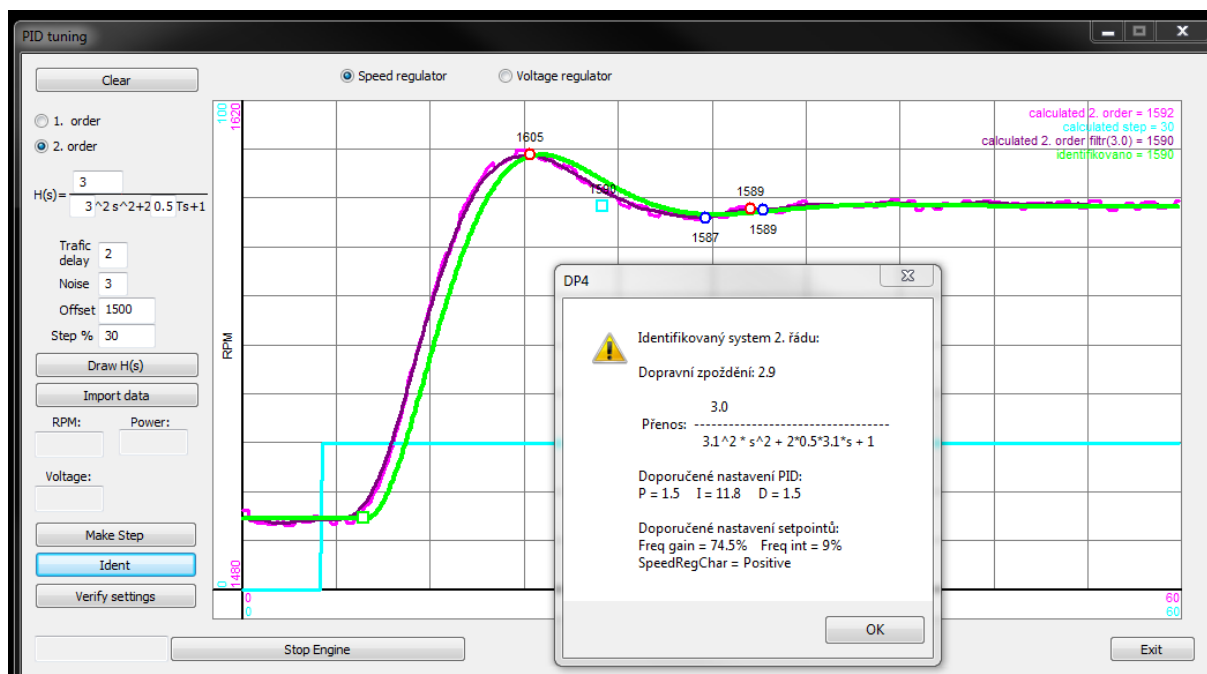
**Tabulka 19 – Nastavení kontroléru, nekmitavý systém**

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	24,8 %	61 %	positive

### 10.4.2.3.3 2. řád, kmitavý případ

Jiný příklad zadaného systému s dopravním zpožděním 3 sec:

$$H(s) = \frac{3}{9s^2 + 3s + 1} \quad 51)$$



**Obrázek 20 - Příklad identifikace systému 2.řádu**

Tento systém byl identifikován jako:

$$H(s) = \frac{3}{9,6s^2 + 3,1s + 1} \quad 52)$$

A byl navržen regulátor s parametry:

**Tabulka 20 – PID parametry, kmitavý systém**

Význam	P	I	D
Hodnota	1,5	11,8	1,5

Tomu odpovídá nastavení kontroléru:



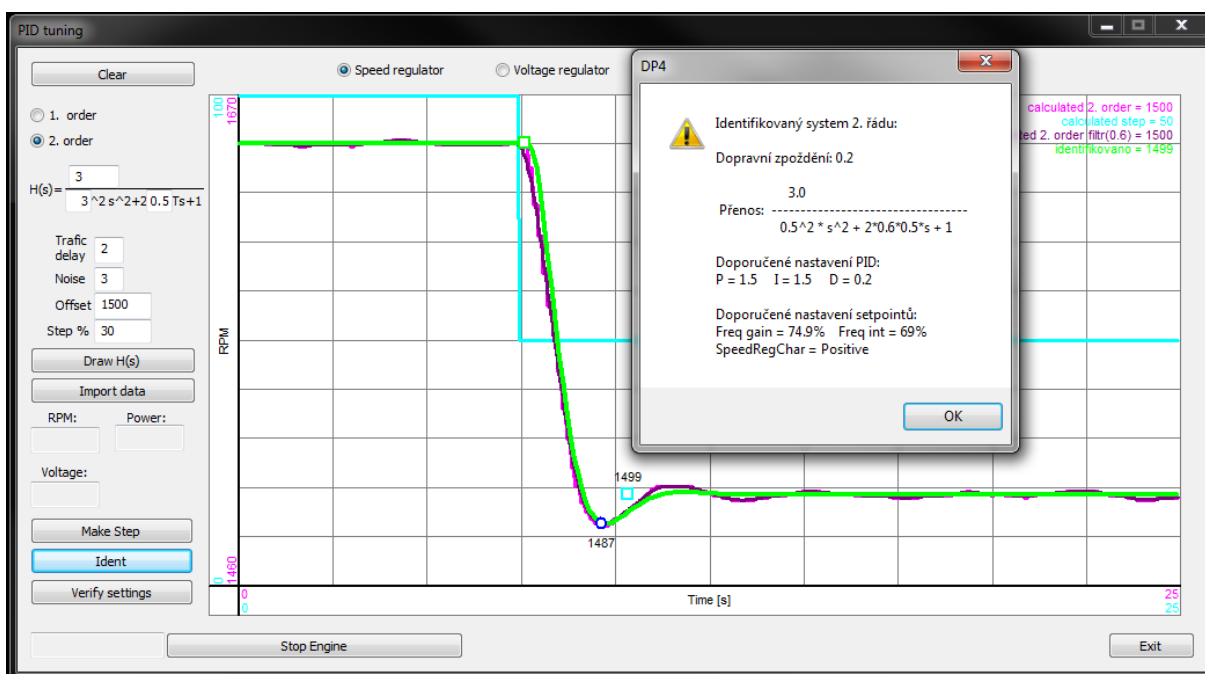
Tabulka 21 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	74,5 %	9 %	positive

Na tomto příkladu je hezky vidět, že pomalý systém s dopravním zpožděním vyžaduje regulátor s nízkým zesílením integrační složky, v opačném případě by to vedlo na kmitavou odezvu regulovaného systému.

### 10.4.2.3.4 Reálná data

Tato identifikace je z načtených hodnot z \*.csv souboru. Hodnoty byly naměřeny na motoru Volvo Penta.



Obrázek 21 – Identifikace Volvo Penta

Tento motorgenerátor byl identifikován jako:

$$H(s) = \frac{3}{0,25s^2 + 0,6s + 1} \quad (53)$$

A byl navržen regulátor s parametry:

Tabulka 22 – PID parametry, Volvo Penta

Význam	P	I	D
Hodnota	1,5	1,5	0,2



Tomu odpovídá nastavení kontroléru:

**Tabulka 23 – Nastavení kontroléru, Volvo Penta**

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	74,9 %	69 %	positive

Servisní technik, který uváděl motor do provozu, nastavil do regulátoru následující parametry:

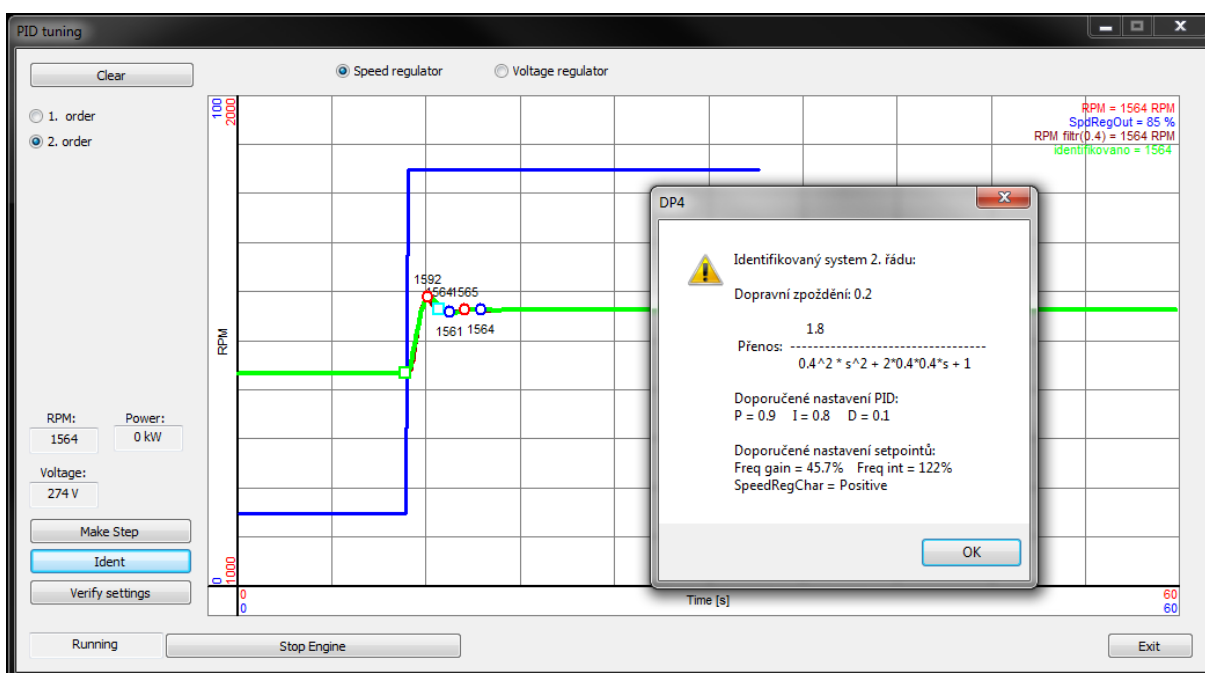
**Tabulka 24 – Ruční nastavení kontroléru, Volvo penta**

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	60 %	50 %	positive

Bohužel, nebyla možnost změřit data se zapnutou regulací, tedy se tato identifikace nedá považovat za ověření funkčnosti. Proto proběhlo ještě testování na jiném motorgenerátoru.

### 10.4.2.3.5 Online identifikace

Tento průběh je měřen přímo z kontroléru. V době měření měl motorgenerátor rozepnutý stykač, tedy byl měřen nezatížený motor. Ke kontroléru byl připojen simulátor motorgenerátoru.



**Obrázek 22 – Online identifikace otáček**

Přenos odpovídající tomuto měření byl:

$$H(s) = \frac{1,8}{0,16s^2 + 0,32s + 1} \quad 54)$$



K tomuto přenosu byl navržen regulátor s parametry:

Tabulka 25 – PID parametry, online měření

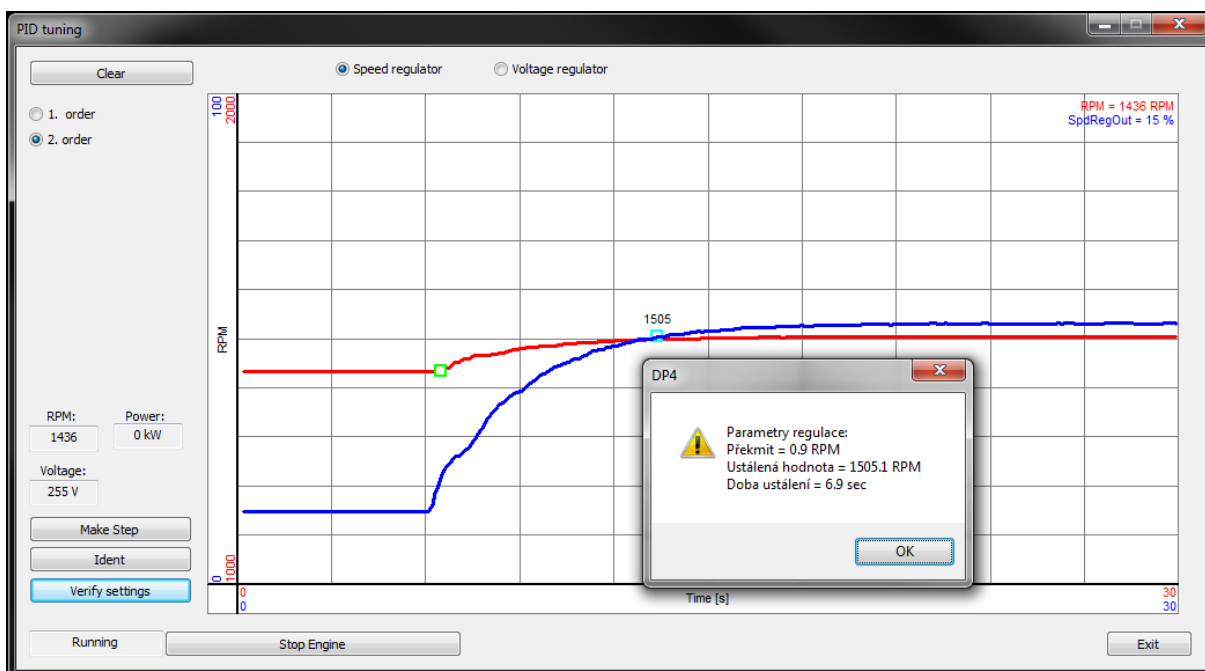
Význam	P	I	D
Hodnota	0,9	0,8	0,1

Tomu odpovídá nastavení kontroléru:

Tabulka 26 – Nastavení kontroléru, online měření

Význam	Freq gain	Freq int	SpeedRegChar
Hodnota	45,7 %	122 %	positive

Vzhledem k tomu, že toto měření bylo provedeno online, je možno vypočítané hodnoty ověřit. Na následujícím obrázku je výsledek ověřovacího měření.



Obrázek 23 – Ověření parametrů regulátoru

Systém v čase  $t=6\text{sec}$  zapnul regulátor otáček a počkal na dosažení žádaných otáček. Z naměřených dat vypočetl překmit, ustálenou hodnotu a dobu potřebnou pro ustálení.

Tabulka 27 - Ověření parametrů regulace

Význam	Překmit	Ustálená hodnota	Doba ustálení
Hodnota	0,9 RPM	1505,1 RPM	6,9 sec

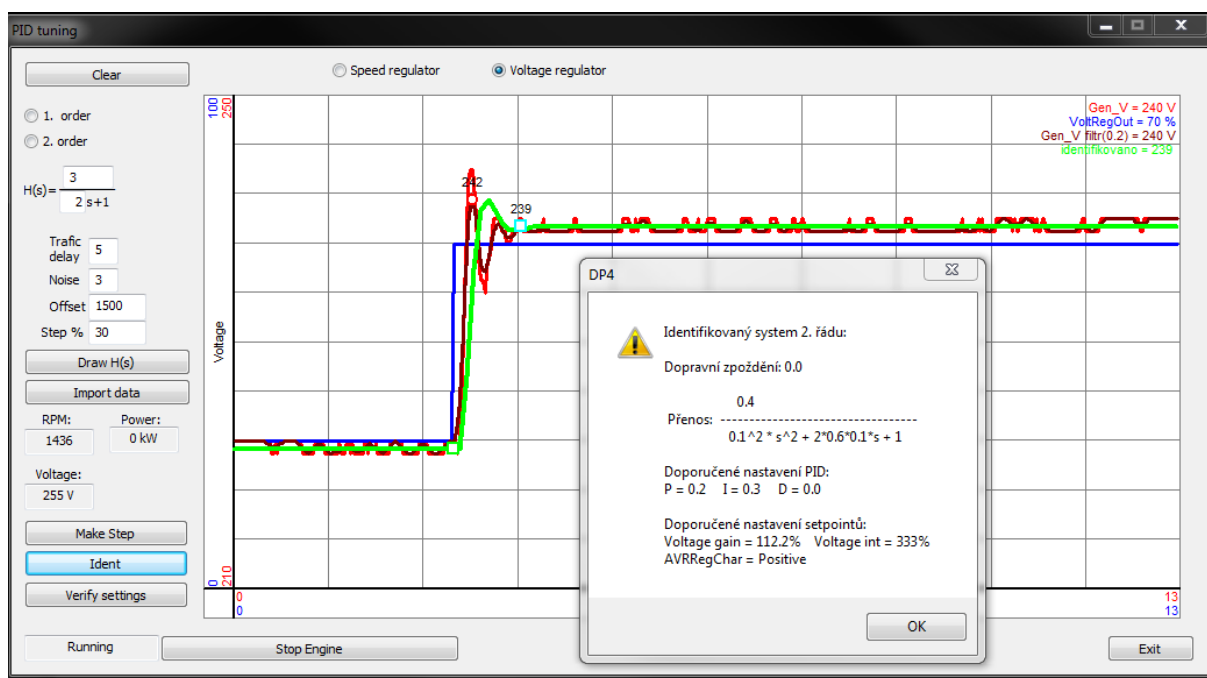


### 10.4.2.4 Identifikace napětí

Identifikace napětí probíhá stejně jako v případě identifikace otáček, pouze průběhy jsou rychlejší, protože probíhá pouze změna elektrických parametrů, kde se neuplatňují setrvačné síly. Z toho důvodu je použito jiné měřítko časové osy.

#### 10.4.2.4.1 Reálná data

Zde je vidět identifikace naměřených a uložených dat ve formátu .csv. Měření probíhalo na motoru Volvo Penta, který byl osazen generátorem Leroy Somer.



Obrázek 24 – Reálná data

Tato data byla identifikována přenosem:

$$H(s) = \frac{0,4}{0,01s^2 + 0,12s + 1} \quad 55)$$

Pro tento přenos byly navrženy parametry PID regulátoru:

Tabulka 28 – PID parametry, online měření

Význam	P	I	D
Hodnota	0,2	0,3	0

Tomu odpovídá nastavení kontroléru:



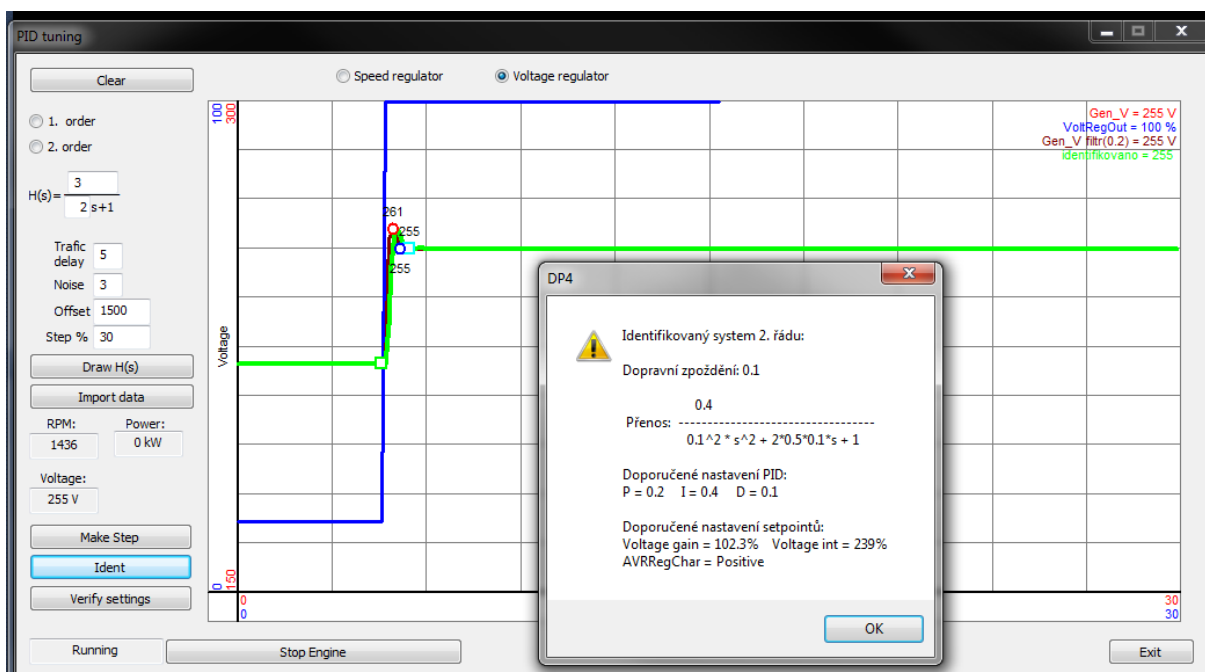


Tabulka 29 – Nastavení kontroléru, online měření

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	112,2 %	333 %	positive

### 10.4.2.4.2 Online identifikace napětí

Průběh napětí na generátoru, zobrazený na následujícím obrázku byl měřen přímo z kontroléru. Stykač byl v tu dobu rozeptný, tedy měření probíhalo na nezatiženém generátoru. Kontroler byl připojen k simulátoru motorgenerátoru.



Obrázek 25 – Online identifikace napětí

Systém byl identifikován jako:

$$H(s) = \frac{0,4}{0,01s^2 + 0,1s + 1} \quad (56)$$

K tomuto přenosu byl navržen regulátor s parametry:

Tabulka 30 – PID parametry, online měření

Význam	P	I	D
Hodnota	0,2	0,4	0,1

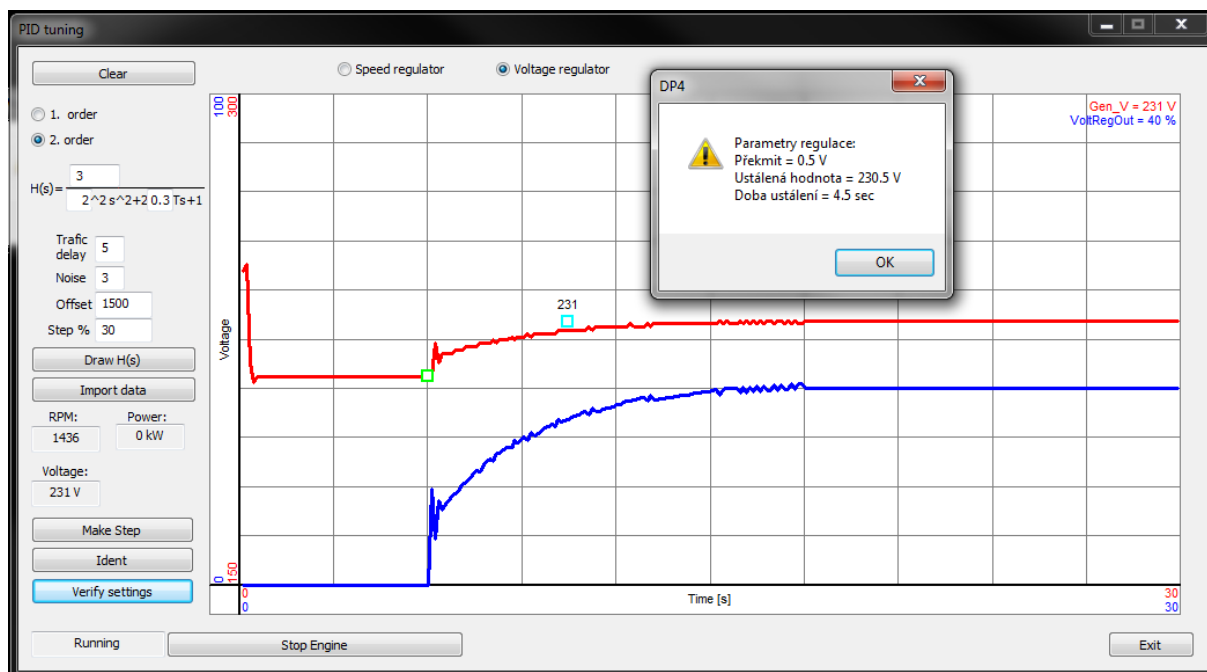
Tomu odpovídá nastavení kontroléru:



Tabulka 31 – Nastavení kontroléru, online měření

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	102,3 %	239 %	positive

Pro ověření je v tomto případě možno zapnout regulátor.



Obrázek 26 – Identifikace napětí, ověření regulaci

Maximální hodnota, kterou lze do kontroléru nastavit je: Voltage int=100 %. Díky tomu je odezva s regulátorem pomalejší, než bylo navrženo automatickou detekcí nastavení. Nicméně to v praxi nevádí, cílem je mít regulátory raději pomalé, než aby kmitali.

Tabulka 32 - Ověření parametrů regulace

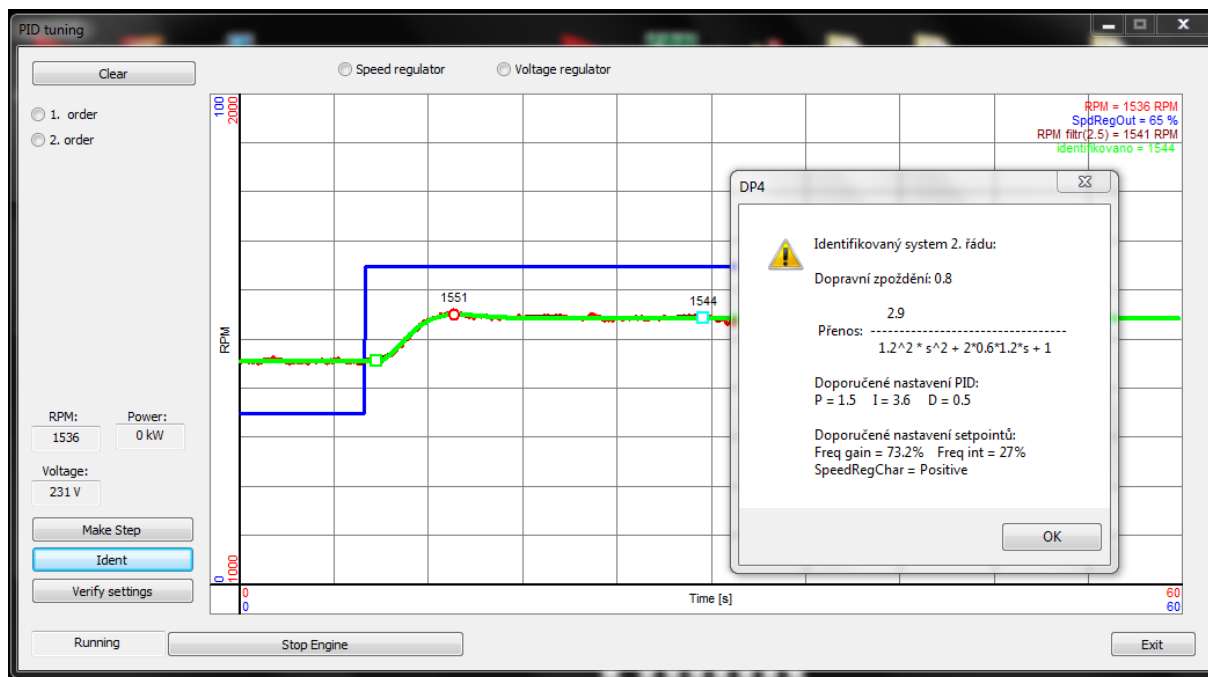
Význam	Překmit	Ustálená hodnota	Doba ustálení
Hodnota	0,5 V	230,5 V	4,5 sec

## 11 Testování v praxi

Zde je popsáno testování na motorgenerátorech Engul a Pramac.

### 11.1 Regulátor otáček, Engul

Motorgenerátor Engul je plynový čtyřválcový motor s výkonem 30 kW. Motor má velmi pomalou odezvu na změnu otáček, díky tomu se obtížně reguluje. V případě paralelního provozu to ničemu vadit nebude, ale v ostrovním zapojení nebude napájení ideální.



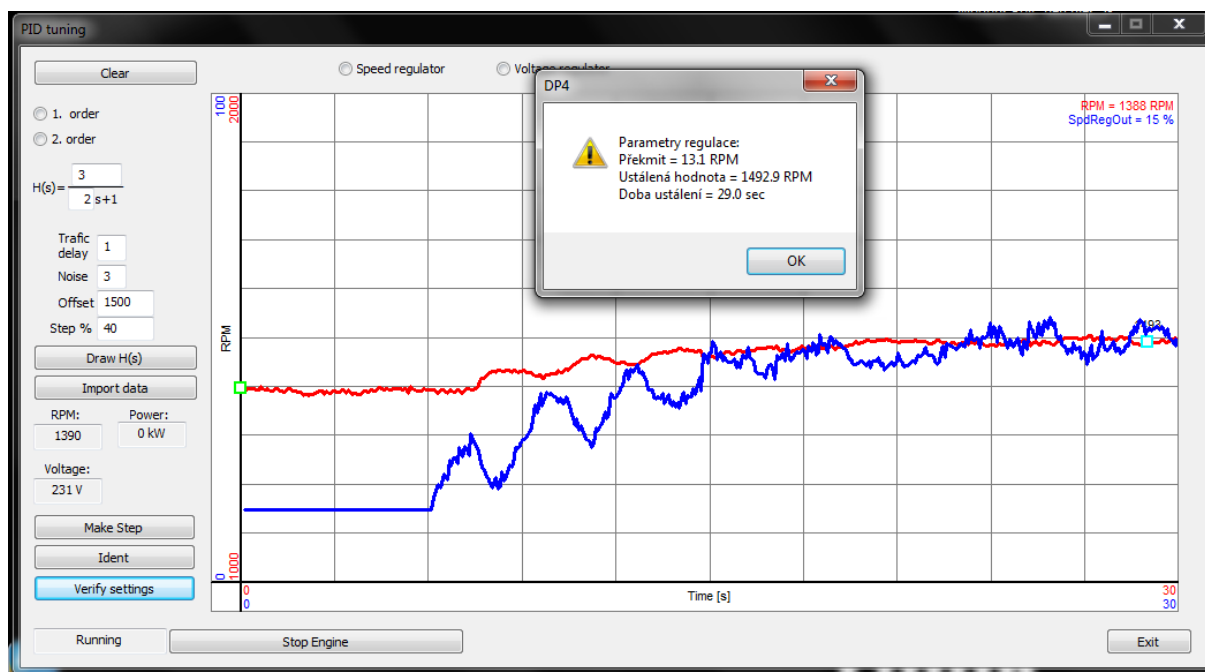
Obrázek 27 – Engul, identifikace otáček

Na obrázku výše je vidět již zmíněná pomalá reakce na změnu otáček. To se promítlo i do navržených regulačních konstant, které jsou nižší než je běžné.

Tabulka 33 – Nastavení kontroléru, online měření

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	73,2 %	27 %	positive

Po nastavení vypočítaných hodnot proběhlo závěrečné ověření se zapnutým regulátorem, jeho odezva je vidět na následujícím obrázku



Obrázek 28 – Engul, ověření regulátoru otáček

Tabulka 34 - Ověření parametrů regulace Engul

Význam	Překmit	Ustálená hodnota	Doba ustálení
Hodnota	13,1 RPM	1492,9 RPM	23 sec

Ověření nedopadlo nejlépe, nicméně i v tomto případě je regulace použitelná. Ručně nalezené nastavení mělo následující parametry:

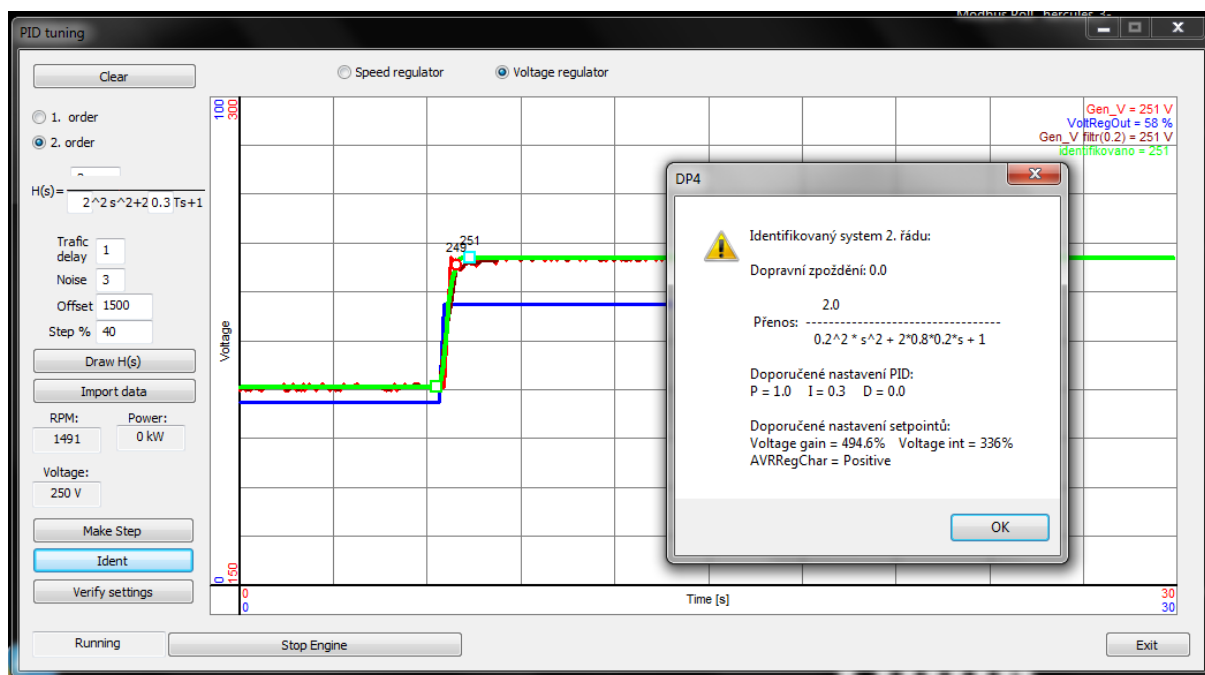
Tabulka 35 – Nastavení regulátoru otáček ručně, Engul

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	40 %	10 %	positive

S ručním nastavením sice nekmitá řídicí veličina, ale regulátor je pomalejší.

## 11.2 Regulátor napětí Engul

U regulátoru napětí není výše zmíněný problém s rychlostí odezvy, tedy nalezené konstanty regulátoru jsou vyšší.



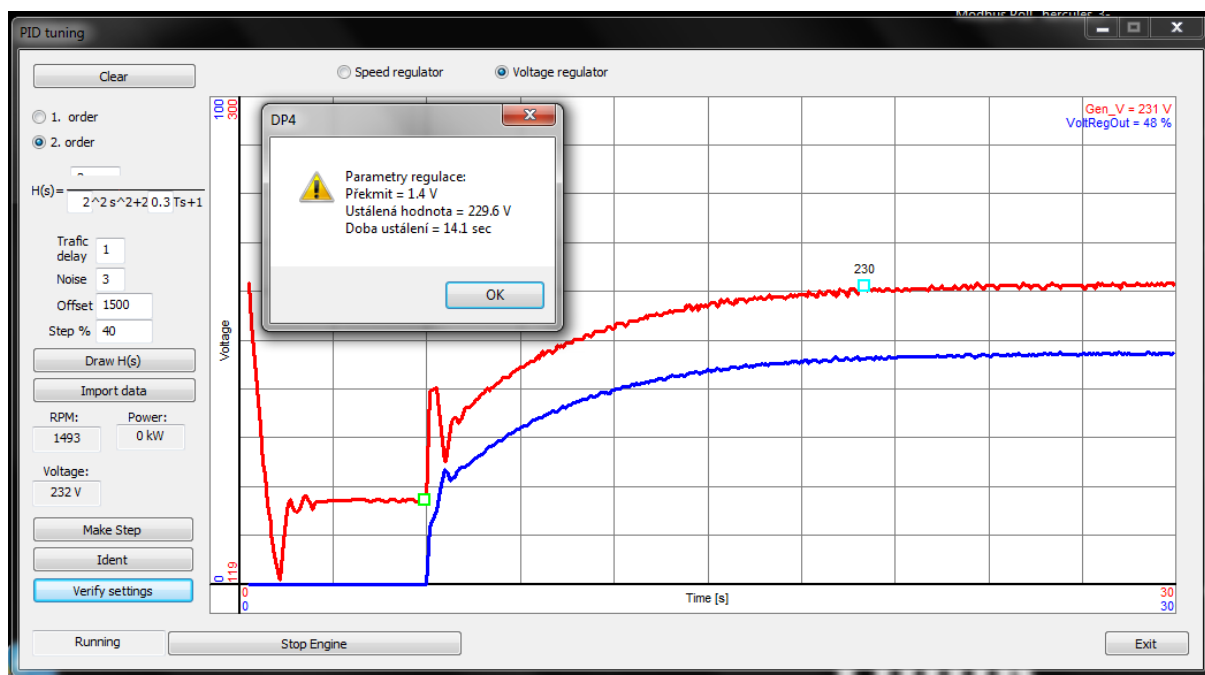
Obrázek 29 – Engul, regulátor napětí

Nalezené nastavení regulátoru je následující:

Tabulka 36 – Nastavení regulátoru napětí, Engul

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	494,6 %	336 %	positive

Tyto hodnoty jsou mimo povolený rozsah, tedy je možno maximálně nastavit Voltage gain = 200 %, Voltage int = 100 %. Díky tomu bude regulátor pomalejší než by bylo možné, ale zase omezení rozsahu minimalizuje možné špatné nastavení.



Obrázek 30 – Engul, ověření regulátoru otáček

Na grafu s ověřením regulace je vidět, že by regulátor mohl být nastaven agresivněji, příliš vysoké nastavení regulátoru by se projevilo kmitáním, které ovšem na grafu patrné není.

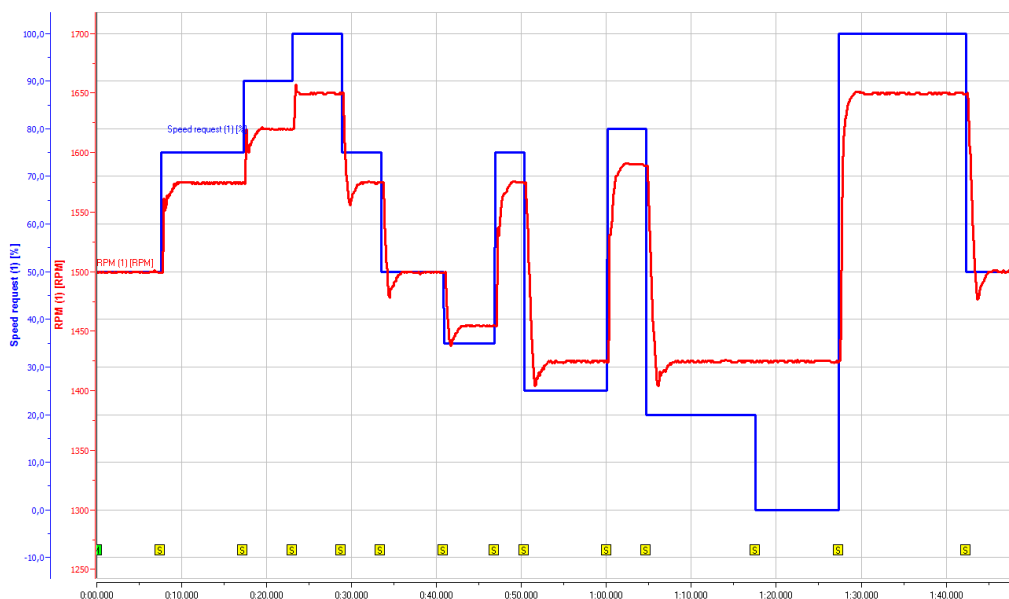
Tabulka 37 - Ověření parametrů regulace Engul

Význam	Překmit	Ustálená hodnota	Doba ustálení
Hodnota	1,4 RPM	229,6 RPM	14,1 sec

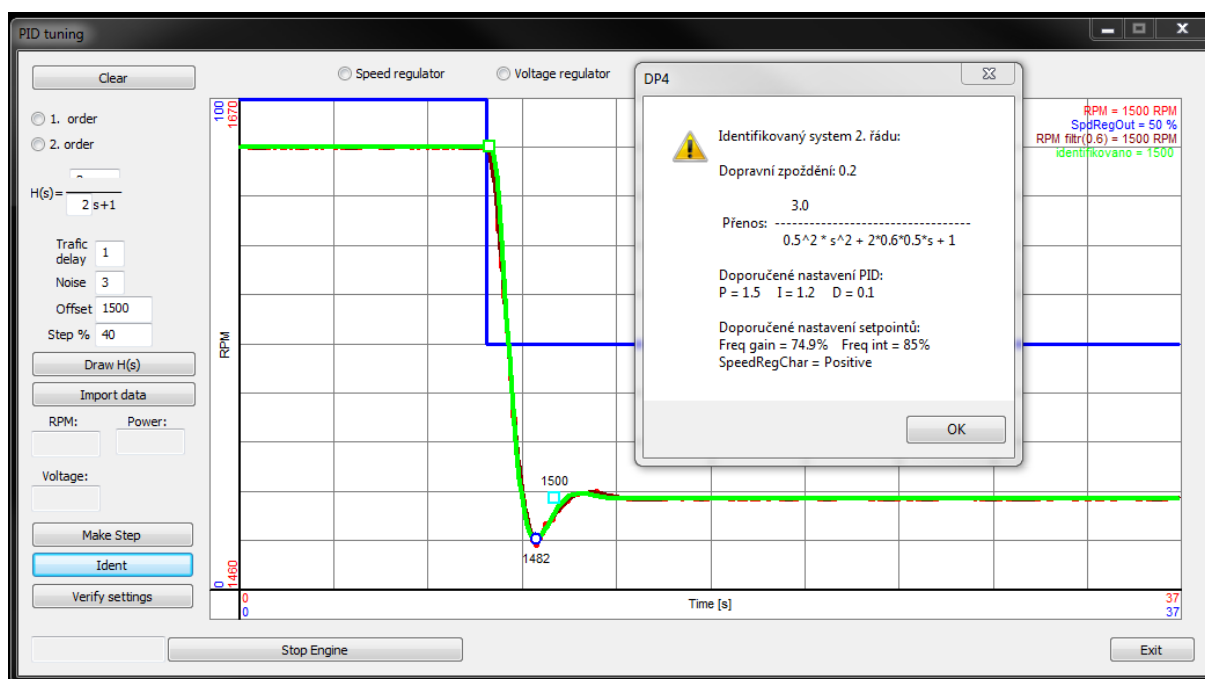
### 11.3 Regulátor otáček, Pramac

Testování probíhalo na motorgenerátoru značky Pramac. Tento motorgenerátor používá řídicí jednotku motoru (ECU) Deutz EMR2, je osazen čtyřválcovým motorem o výkonu 40 kW, jedná se tedy o poměrně malý motor.

Na následujícím obrázku je změřený průběh otáček s vypnutou regulací, z viditelných překmitů je jasné, že je systém nutno identifikovat jako systém druhého řádu. Průběh byl měřen interním nástrojem firmy ComAp WinScope. Je zřetelně vidět nesymetričnost přechodu mezi otáčkami v různém směru, pro identifikaci je lepší použít změnu otáček směrem dolů, pak je podkmit výraznější. A vzhledem k jednotnému nastavení regulátoru pro oba směry je vhodnější použít ten směr, kdy se systém chová hůře. V době testování nebyl tento motorgenerátor k dispozici, proto je identifikace provedena na datech uložených v souboru.



Obrázek 31 – přechod otáček Pramac



Obrázek 32 – Identifikace otáček, Pramac

Bohužel, ověření nastavení s aktivním regulátorem nebylo možné. Motorgenerátor nebyl dostupný v době testování. Proto jsou použita uložená data pro identifikaci.

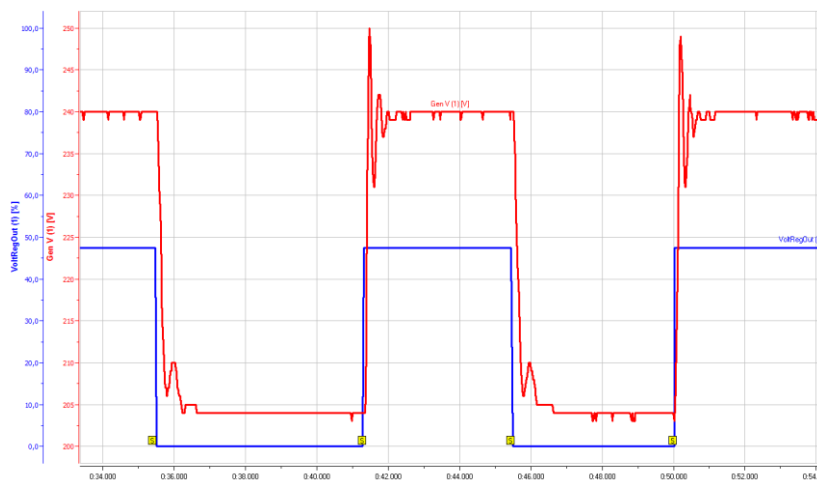
Tabulka 38 – Nastavení regulátoru napětí, Pramac

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	74,9 %	85 %	positive

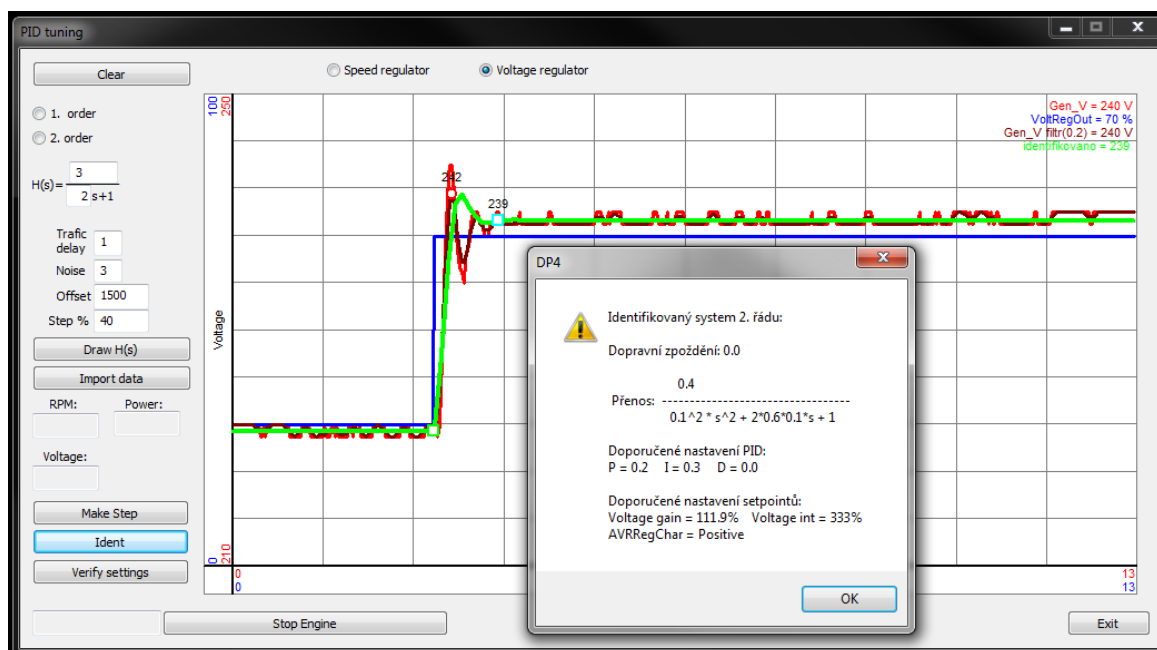


## 11.4 Regulátor napětí, Pramac

Stejně jako u regulátoru otáček vidíme výrazné překymty a podkymty, tedy musíme na systém pohlížet jako na systém druhého řádu. Na obrázku je opět vidět nesymetričnost přechodu napětí směrem k vyššímu nebo nižšímu. Zde je vhodnější identifikovat změnu směrem k vyššímu napětí, tam se více projeví tendence systému kmitat.



Obrázek 33 - přechod napětí



Obrázek 34 – Regulátor napětí Pramac

Tabulka 39 – Nastavení regulátoru napětí, Pramac

Význam	Voltage gain	Voltage int	AVRRegChar
Hodnota	111,9 %	333 %	positive

Ověření tohoto nastavení opět nemohlo být provedeno z důvodu nedostupnosti Pramac Motorgenerátoru. Proto proběhla identifikace na dříve uložených datech.





## 12 Závěr

Práce se v začátku zabývá popisem motorgenerátoru a jeho součástí včetně schémat zapojení a jednotlivých režimů práce. Dále popisuje k čemu je v motorgenerátoru nutný kontrolér, jaké obsahuje regulátory a jaké má funkce. Práce pokračuje popisem komunikačního protokolu TCP Modbus, který je využíván pro komunikaci autotuning aplikace s kontrolérem.

V další části je popsána teorie automatického ladění regulátorů. Zejména je popsán návrh regulátoru pro systému 2. řádu metodou vyváženého nastavení. Tato metoda nastavení umožňuje ze známého přenosu systému navrhnout parametry pro PID regulátor.

V závěrečné části se práce věnuje samotné implementaci algoritmu pro automatické naladění PID regulátoru, který je součástí kontroléru motorgenerátoru. V této části je několik příkladů konkrétních identifikací a konkrétních navržených regulátorů.

Na závěr proběhlo testování na plynovém motorgenerátoru značky Engul. Tento motor se ukázal jako velice obtížný na regulování, ale i tak se povedlo použítelné nastavení nalézt. Dále proběhlo testování na uložených datech z motorgenerátoru značky Pramac, tento motorgenerátor vykazuje standardní chování, tomu odpovídají i nalezené regulační konstanty, bohužel motorgenerátor nebyl dostupný pro ověření se zapnutým regulátorem.

Metoda vyváženého nastavení se ukázala jako použitelná, navržený regulátor nevykazuje kmitavé průběhy, díky tomu šetří akční členy a nemá tendenci destabilizovat napájecí síť. V několika případech bylo navržené nastavení větší, než je možno v kontroléru nastavit, díky tomu je regulátor pomalejší, než by bylo možné nastavit, ale díky tomu je nastavení bezpečnější. Nastavení pro regulátor napětí je určováno s menší přesností, to je z důvodu nízké vzorkovací frekvence, kontrolér není schopen poskytovat data častěji než 50 ms a vzhledem k rychlosti přechodových dějů nelze získat ideální počet vzorků. Nicméně regulátor musí stejně mít bezpečné rezervy, do kterých se toto omezení vejde.

Výsledek práce bude ve firmě ComAp dále rozvíjen a je plánována integrace automatického ladění regulátorů do některého ze servisních nástrojů firmy ComAp. Díky tomu bude možno snížit čas potřebný pro nastavení motorgenerátoru, tím lze i snížit výslednou cenu uvedení do provozu. V neposlední řadě tato metoda může předejít chybnému nastavení, které by mohlo vyústit ve výpadky nebo zničení motorgenerátoru.



## 13 Seznam obrázků

Obrázek 1 - GPU motorgenerátor (1), gen-set (2).....	9
Obrázek 2 Caterpillar pístový motor (3) .....	9
Obrázek 3 - Stykač (5).....	11
Obrázek 4 – kontroler InteliGen ComAp (6) .....	12
Obrázek 5 - Schema zapojení (6) .....	13
Obrázek 6 – Přejchodová charakteristika systému 1. řádu .....	22
Obrázek 7 - Přejchodová charakteristika systému 2. řádu.....	24
Obrázek 8 - Identifikovaný systém 1. řádu .....	25
Obrázek 9 - Měření dvou překmitů .....	26
Obrázek 10 – Měření překmitu a podkmitu .....	27
Obrázek 11 – Měření překmitu.....	29
Obrázek 12 – Identifikace tečnou v inflexním bodě (11).....	30
Obrázek 13 – GUI .....	34
Obrázek 14 – GUI PID tuning.....	35
Obrázek 15 – Identifikace systému 1. řádu .....	38
Obrázek 16 – Identifikace kmitavého systému .....	39
Obrázek 17 – Identifikace nekmitavého systému.....	40
Obrázek 18 – Příklad identifikace systému 1. řádu.....	41
Obrázek 19 – Příklad identifikace systému 2.řádu.....	42
Obrázek 20 - Příklad identifikace systému 2.řádu.....	43
Obrázek 21 – Identifikace Volvo Penta.....	44
Obrázek 22 – Online identifikace otáček .....	45
Obrázek 23 – Ověření parametrů regulátoru .....	46
Obrázek 24 – Reálná data.....	47
Obrázek 25 – Online identifikace napětí.....	48
Obrázek 26 – Identifikace napětí, ověření regulací.....	49
Obrázek 27 – Engul, identifikace otáček.....	50
Obrázek 28 – Engul, ověření regulátoru otáček .....	51
Obrázek 29 – Engul, regulátor napětí.....	52
Obrázek 30 – Engul, ověření regulátoru otáček .....	53
Obrázek 31 – přechod otáček Pramac .....	54
Obrázek 32 – Identifikace otáček, Pramac .....	54
Obrázek 33 - přechod napětí.....	55
Obrázek 34 – Regulátor napětí Pramac .....	55



## 14 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Modbus kódy operací (8) .....	18
Tabulka 2 – Modbus hlavička .....	18
Tabulka 3 – Modbus data .....	19
Tabulka 4 – Modbus zápis dat.....	19
Tabulka 5 – Modbus čtení dat .....	19
Tabulka 6 – Modbus, zápis nominal power.....	20
Tabulka 7 – Modbus negativní odpověď na zápis.....	20
Tabulka 8 – Modbus čtení .....	20
Tabulka 9 – Modbus kladná odpověď na čtení .....	21
Tabulka 10 – Modbus záporná odpověď na čtení .....	21
Tabulka 11 – Modbus přihlášení .....	21
Tabulka 12 – PID parametry, kmitavý systém .....	39
Tabulka 13 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém .....	39
Tabulka 14 – PID parametry, kmitavý systém .....	40
Tabulka 15 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém .....	41
Tabulka 16 – PID parametry, 1. řád .....	41
Tabulka 17 – Nastavení kontroléru, 1.řád .....	42
Tabulka 18 – PID parametry, nekmitavý systém .....	42
Tabulka 19 – Nastavení kontroléru, nekmitavý systém .....	43
Tabulka 20 – PID parametry, kmitavý systém .....	43
Tabulka 21 – Nastavení kontroléru, kmitavý systém .....	44
Tabulka 22 – PID parametry, Volvo Penta .....	44
Tabulka 23 – Nastavení kontroléru, Volvo Penta .....	45
Tabulka 24 – Ruční nastavení kontroléru, Volvo penta .....	45
Tabulka 25 – PID parametry, online měření .....	46
Tabulka 26 – Nastavení kontroléru, online měření .....	46
Tabulka 27 - Ověření parametrů regulace .....	46
Tabulka 28 – PID parametry, online měření .....	47
Tabulka 29 – Nastavení kontroléru, online měření .....	48
Tabulka 30 – PID parametry, online měření .....	48
Tabulka 31 – Nastavení kontroléru, online měření .....	49
Tabulka 32 - Ověření parametrů regulace .....	49
Tabulka 33 – Nastavení kontroléru, online měření .....	50
Tabulka 34 - Ověření parametrů regulace Engul.....	51
Tabulka 35 – Nastavení regulátoru otáček ručně, Engul.....	51



Tabulka 36 – Nastavení regulátoru napětí, Engul .....	52
Tabulka 37 - Ověření parametrů regulace Engul.....	53
Tabulka 38 – Nastavení regulátoru napětí, Pramac.....	54
Tabulka 39 – Nastavení regulátoru napětí, Pramac.....	55



## 15 Reference

1. **Epicos.** [Online] <http://www.epicos.com/EPCCompanyProfileWeb/Content/pbsvb/gpu-17.jpg>.
2. **Pramac.** [Online] <http://www.pramac.com>.
3. **Caterpillar.** [Online] [http://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/oil-and-gas/gas-compression-engines/18458056.html](http://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/oil-and-gas/gas-compression-engines/18458056.html).
4. **Guinault-Lebrun.** [Online] [http://www.guinault.com/upload/802\\_GL-GA-EN.pdf](http://www.guinault.com/upload/802_GL-GA-EN.pdf).
5. **ABB.** [Online] [http://www07.abb.com/images/librariesprovider84/Products/Circuit-breakers/highlights/emax2\\_e4\\_ul.jpg?sfvrsn=1](http://www07.abb.com/images/librariesprovider84/Products/Circuit-breakers/highlights/emax2_e4_ul.jpg?sfvrsn=1).
6. **ComAp.** [Online] [http://cdn.comap.cz/files\\_temporary/manuals/IGS-NT-MINT-3.1.0%20Reference%20Guide%20r2.pdf](http://cdn.comap.cz/files_temporary/manuals/IGS-NT-MINT-3.1.0%20Reference%20Guide%20r2.pdf).
7. **Modbus.** [Online] <http://www.modbus.org/>.
8. **Honeywell.** [Online] <https://www.honeywellprocess.com/library/support/Public/Documents/51-52-25-121.pdf>.
9. **Šebek, Michael.** Automatické řízení. [Online] ČVUT. [http://www.polyx.com/\\_ari/slajdy/Bas-ARI-05-Identification.pdf](http://www.polyx.com/_ari/slajdy/Bas-ARI-05-Identification.pdf).
10. **Balátě Jaroslav, Navrátil Pavel.** Computer Aided Automatic Control. [Online] 2007. [http://195.178.94.43/CAAC\\_PHP/CAAC/cesky/skripty/tisk.php? subsystem=identifikace& zakl\\_submo dul=apr\\_ksvr](http://195.178.94.43/CAAC_PHP/CAAC/cesky/skripty/tisk.php? subsystem=identifikace& zakl_submo dul=apr_ksvr).
11. **Katedra automatizační techniky a řízení.** VŠB - Technická univerzita Ostrava. [Online] [http://www.352.vsb.cz/uc\\_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma8](http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma8).
12. **Klán, Doc. Petr.** *Přehledný kalkul tříparametrových modelů.* [Online] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44344.pdf>.
13. **doc. Petr Klán, Prof. Raymond Gorez.** [Online] Ústav informatiky AV ČR Praha a Univerzita Pardubice, Centre for Systems Engineering and Applied Mechanics, University de Louvain. <http://automa.cz/download/au040049.pdf>.



## **16 Seznam příloh**

CompactDisc s elektronickou verzí této práce

### **16.1 Obsah CD**

DP\_Suchy.pdf – tato práce ve formátu pdf

Obrázky – složka s obrázky