

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Laboratorní úloha pro RC Didactic**  
**Laboratory measurement for RC Didactic**

2018

Tomáš Mička

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Mička**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: **Laboratorní úloha pro RC Didactic**  
**Laboratory measurement for RC Didactic**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- o Teoretický popis regulátorů.
- o Charakterizujte model motorgenerátoru.
- o Vytvoření fyzikálního modelu v laboratoři.
- o Vypracování návodu a vzorového protokolu.
- o Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- o Hlava, J. PID regulátory – jejich vlastnosti, modifikace a číslicová implementace. Liberec: Technická univerzita v Liberci
- o Máslo, K. a kol.: Řízení a stabilita elektrizační soustavy, AEM 2013, ISBN 987-80-260-44671-1
- o Vavřín, P. Teorie automatického řízení I. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1989
- o Výukový systém rc2000 –  $\mu$ LAB, Regulační technika. RC DIDACTIC SYSTEMS
- o Další podle pokynů vedoucího práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

*„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“*

V Ostravě dne: 27. 4. 2018

*Mička*

.....  
Tomáš Mička

**Poděkování:**

*„Touto cestou bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D.. za konzultace, cenné rady a připomínky, které mi poskytl při řešení mé bakalářské práce.“*

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce je sestavení výukového laboratorního modelu pro řízení bloku motor-generátoru. První část práce je zaměřena na teoretický popis různých typů regulátorů používaných v tepelných, jaderných, vodních a větrných elektrárnách. Dále je zaměřena na popis a nastavování parametrů PID regulátoru. Druhá část je praktická a obsahuje sestavení modelu motor-generátor s regulátorem v laboratoři.

## **Klíčová slova**

Laboratorní úloha, RC didactic, regulátory, PID regulátor, motor, generátor, turbína

## **Abstact**

The aim of this bachelor thesis is to build a study laboratory model for motor-generator block control. The first part of the thesis is focused on the theoretical description of various types of regulators used in thermal, nuclear, water and wind power plants. It is also focused on description and setting of parameters of the PID controller. The second part is practical and includes the assembly of a motor-generator model with a controller in the laboratory.

## **Keywords**

Laboratory task, RC didactic, controllers, PID controler, electric motor, generator, turbine

# OBSAH

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

## SEZNAM ILUSTRACÍ A SEZNAM TABULEK

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÝ POPIS REGULÁTORU	7
2.1	<b>Regulace generátoru</b>	<b>7</b>
2.1.1	Synchronní generátory	7
2.1.2	Turbíny	7
2.1.2.1	Parní turbíny	8
2.1.2.2	Vodní turbíny	10
2.1.2.3	Větrné turbíny	10
2.2	<b>PID regulátory</b>	<b>12</b>
2.2.1	Popis jednotlivých PID regulátorů	12
2.2.2	Nastavení parametrů regulátoru Ziegler-Nicholsovou metodou	13
2.2.3	Nastavení parametrů regulátoru vyhodnocením odezvy na skokovou změnu	16
3	CHARAKTERIZACE MODELU MOTORGENERÁTORU	18
3.1	<b>Výukový systém rc2000</b>	<b>18</b>
3.2	<b>Moduly stavebnice RC Didactic</b>	<b>19</b>
4	VYTVOŘENÍ FYZIKÁLNÍHO MODELU V LABORATOŘI	25
5	VYPRACOVÁNÍ NÁVRHU VZOROVÉHO PROTOKOLU	29
6	ZÁVĚR	38
	LITERATURA	39
	SEZNAM PŘÍLOH	1

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$A$	ampér, základní jednotka elektrického proudu
$ADDU$	měřicí jednotka rc didactic
$C$	<i>kapacita</i>
$D$	derivační člen regulátoru
$I$	integrační člen regulátoru
$K_D$	zesílení derivačního členu
$K_i$	zesílení integračního členu
$K_k$	kritické zesílení
$K_P$	zesílení proporcionálního členu
$K_{p1}$	koeficient závislý na hustotě vzduchu a ploše větrné vrtule
$M_T$	průtok páry regulačními ventily
$P$	proporcionální člen regulátoru
$PD$	proporcionálně-derivační regulátor
$PI$	proporcionálně-integrační regulátor
$PID$	proporcionálně-integračně-derivační regulátor
$P_v$	výkon větrné turbíny
$PLC$	programovatelný logický automat
$R$	<i>odpor</i>
$R_1, R_2$	rezistory pro sestavení regulátoru
$R_T$	otevření regulačních ventilů
$T_k$	doba jedné periody signálu kritického zesílení
$TTL$	tranzistorově tranzistorová logika
$USB$	universální sériová sběrnice
$V$	volt, základní jednotka napětí
$c_p$	konstanta respektující účinnost větrné turbíny

$ms$	mili-sekunda, jednotka času
$n$	počet otáček za minutu
$nF$	nano-farad, jednotka kapacity
$t_1, t_2$	časy začátku a konce jednoho kmitu
$v_e$	rychlost větru
$\tau$	časová konstanta



## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obrázek 1 Regulační schéma turbíny u jaderné elektrárny.....	8
Obrázek 2 Schéma regulátoru parní turbíny.....	9
Obrázek 3 Schéma regulátoru vodní turbíny.....	10
Obrázek 4 Schéma regulátoru větrné turbíny.....	11
Obrázek 5 Invertující operační zesilovač.....	13
Obrázek 6 Zesilovač v integračním zapojení.....	13
Obrázek 7 Zesilovač v derivačním zapojení.....	13
Obrázek 8 Obecné zobrazení jedné periody.....	14
Obrázek 9 Odečítání jedné periody v programu rc2000.....	14
Obrázek 10 Odečítání parametrů odezvy soustavy na skokový signál.....	16
Obrázek 11 Měřicí jednotka ADDU.....	19
Obrázek 12 Programovatelný stejnosměrný zdroj.....	19
Obrázek 13 Modul rozdílového členu.....	20
Obrázek 14 Odporová dekáda.....	20
Obrázek 15 Kapacitní dekáda.....	21
Obrázek 16 Modul PID regulátoru.....	21
Obrázek 17 Soustava motor-generátor.....	22

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce je věnována regulaci generátorů v elektrárnách. Cílem této práce je sestavení výukového laboratorního modelu pro řízení soustavy motor-generátoru. Práce je rozdělena do několika kapitol.

K vypracování bakalářské práce bylo zapotřebí absolvovat odborné školení konané ve firmě RC společnost s.r.o. přístroje pro vědu a vzdělání.

První kapitola podrobně popisuje regulaci buzení u synchronních generátorů, jednotlivé regulátory používané u parní turbíny v tepelných a jaderných elektrárnách, regulátory pro vodní a větrné turbíny. U parních turbín pojednává o rozdílu turbíny vysokotlaké části a části středotlaké a nízkotlaké. U vodních turbín se rozebírají základní rozdíly v regulaci nejpoužívanějších turbín. A to Peltonovy, Kaplanovy a Francisovy turbíny. U větrných turbín zase jednotlivé způsoby zapojení za pomoci asynchronního a synchronního motoru. Ty umožňují různé způsoby regulace otáček, které jsou důležité pro celkovou účinnost přeměny energie. Také popisuje různé způsoby výroby potřebného jalového výkonu.

Druhá kapitola pojednává o PID regulátorech. Popisuje jejich postupný historický vývoj, teoretický rozbor PID regulátoru a jeho jednotlivých složek P, I a D, a to i jejich kombinace a možnosti použití v praxi. Dále rozebírá možnosti řešení při jejich sestavování.

Třetí kapitola je charakterizace soustavy motor-generátor. Obsahuje stručný popis činnosti firmy zabývající se výrobou této soustavy a mnoha dalších výukových modelů sloužících pro výuku v různých oblastech elektrotechniky a elektroniky. Podrobněji se věnuje popisu vlastností jednotlivých bloků a součástek potřebných k sestavení laboratorního modelu.

Čtvrté kapitola se věnuje fyzickému sestavení modelu motor-generátoru v laboratoři.

Pátá kapitola obsahuje protokoly s výsledky z měření modelu motor-generátoru, s grafy a výpočty.

## 2 Teoretický popis regulátoru

Tato kapitola je zaměřena na teoretický popis regulátoru. První podkapitola popisuje regulace generátoru, regulaci buzení synchronního generátoru a regulátory jednotlivých základních typů turbín. Druhá kapitola se věnuje PID regulátorům, jejich popisem a nastavování parametrů pro regulaci soustav.

### 2.1 Regulace generátoru

Regulátor je součástí systému pro automatickou regulaci zařízení, na kterém je potřeba udržet požadovaný stav. Aby mohl regulátor odstranit odchylku od požadovaného stavu, je zapotřebí použít zápornou zpětnou vazbu. Ta je realizována jako signál přivedený z výstupu na vstup regulátoru přes rozdílový člen. Zpětná vazba tedy slouží ke zlepšení kvality regulace. Požadovaná hodnota je přivedena na vstup rozdílového členu a na druhý vstup zápornou zpětnou vazbu. Tím vzniká regulační odchylka přivedená na vstup regulátoru. Z regulátoru vystupuje jako akční veličina, která působí na regulované zařízení, kde je zároveň měřena i zpětná vazba [1].

#### 2.1.1 Synchronní generátory

Synchronní generátory jsou nejčastěji používané stroje pro výrobu elektrické energie v elektrárnách. Hlavní části tohoto stroje jsou statorové vinutí, ze kterého je odebrána energie, rotor, který pohání turbína, a budící vinutí sloužící pro nastavení otáček stroje. Aby stroj dodával do sítě elektrinu o konstantním napětí a frekvenci, je důležitá kvalitní regulace budícího vinutí a turbíny. Regulátor může také ovlivňovat činný a jalový výkon dodávaný do sítě [1].

Budící systém synchronního generátoru je tvořen buď z rotujícího nebo ze statického budiče a regulátoru buzení. Budič vytváří potřebný výkon pro vytvoření rotujícího magnetického pole stroje. Tento výkon bývá malý, obvykle 0,2 až 0,8 % výkonu stroje. Rotační budiče jsou tvořeny stejnosměrnými generátory, které se nazývají dynamo. Další možností je střídavý generátor s usměrňovačem. Statické buzení je napájeno z usměrňovače, který je tvořen elektronickým obvodem. Napětí se odebrá buď přímo na svorkách generátoru, to je závislé buzení, nebo z jiného stroje, tedy nezávislé buzení [1].

Úkolem regulátoru buzení je udržet potřebné napětí. S napětím se mění dodávaný jalový výkon, můžeme tedy regulátor použít přímo i k regulaci jalového výkonu. Tento regulátor je složen jako proporcionalně – integrační. Může plnit i vedlejší funkce, jako například omezovač statorového a rotorového proudu, sekundární regulátor jalového výkonu, systémový stabilizátor nebo hlídání stavu podbuzení, které by mohlo zapříčinit ohrožení stability stroje [1].

#### 2.1.2 Turbíny

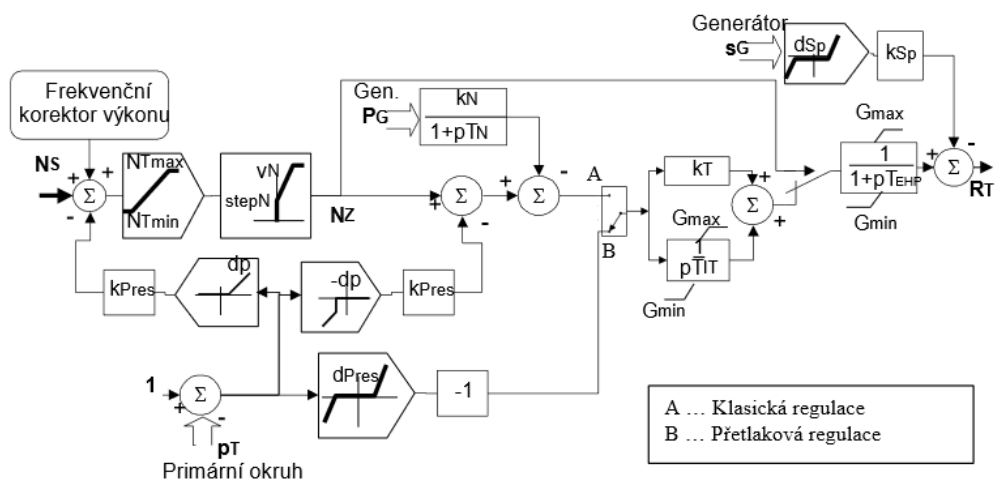
Část soustrojí pohybující rotorem generátoru se nazývá turbína. Tu dělíme podle druhu energie, která ji uvádí do pohybu. Hlavní druhy jsou parní, vodní a větrná turbína. Parní turbína využívá energii proudící páry z kotle tepelné elektrárny nebo z reaktoru atomové elektrárny. Vodní zase mění tlakovou energii proudící vody na pohybovou a větrná využívá přímo pohyb vzduchu, tedy vítr. Všechny tyto veličiny jsou proměnlivé a je potřeba kvalitní regulace kvůli zajištění stabilního chodu generátoru [1].

### 2.1.2.1 Parní turbíny

Parní turbína je poháněna parou. Ta je přivedena na lopatky turbíny přes regulační ventily do vysokotlaké části. U turbín s vyšším výkonem může být vícestupňové provedení. Po expanzi ve vysokotlaké části se pára vrací na přehřívání zpět do kotle. Po přehřátí prochází přes záchytné ventily do středotlaké a nízkotlaké části turbíny. Záchytné ventily slouží k regulaci průtoku páry při velkých výkonových změnách. Při normálním provozu jsou naplno otevřeny. Když dojde k razantnímu snížení výkonu, přiškrtí ventily průtok páry a zvedá se admisní tlak. Na zvýšení tlaku zareagují prepouštěcí stanice a ty odvedou část páry mimo turbínu. Dynamický model je odvozen z předpokladu, že výkon turbíny je závislý na součinu průtoku páry, izoentropického tepelného spádu a vnitřní termodynamické účinnosti [1].

V dřívějších dobách byly regulátory parní turbíny pouze mechanické nebo hydraulické. Jejich funkcí bylo pouze udržovat požadované otáčky turbíny, jednalo se tedy o primární regulaci. Později došlo k propojení elektrizačních soustav a tato funkce regulátoru byla potlačena, protože při spolupráci generátoru s rozsáhlou elektrickou sítí určuje frekvence této sítě otáčky turbíny. Regulátor tak začal sloužit především k regulaci činného výkonu [1].

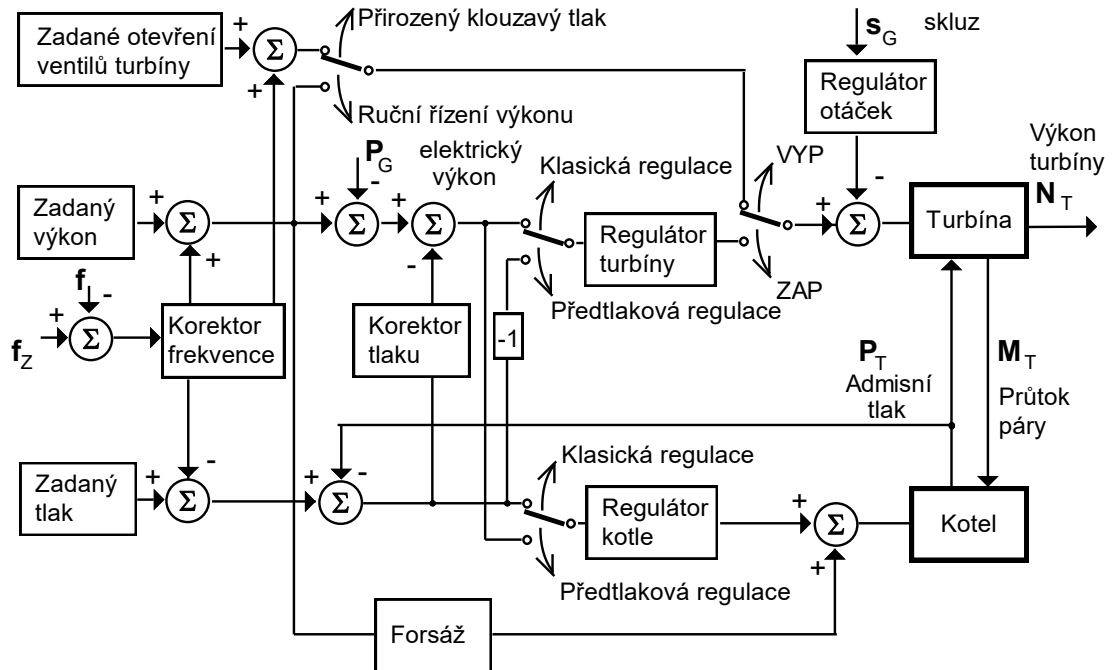
Postupným vývojem vznikla dvě základní propojení, sériové a paralelní. Starší, mechanicko-hydraulické regulátory, měly hlavně sériové zapojení, kdy elektronický regulátor turbíny řídil funkci hydraulického regulátoru otáček. Moderní regulátory využívají hlavně paralelní zapojení, kdy hydraulický regulátor otáček tvoří pouze zálohu elektronickému regulátoru pro případ poruchy. Používá se i paralelní provoz regulátoru výkonu a elektronického regulátoru otáček, ten ovšem musí mít proporcionální, případně proporcionálně-derivační charakter. Používá se tedy P nebo PD regulátor. Jelikož byla původní funkce primární regulace potlačena, musí být nahrazena zařízením zvaným korektor frekvence nebo kmitočtový korektor výkonu, který udává statiku primární regulace. Ta je určena sklonem statické charakteristiky, což je závislost výkonu turbíny na odchylce otáček [1].



Obrázek 1 Regulační schéma turbíny u jaderné elektrárny

Hlavní funkce, kterou plní moderní elektronické regulátory parní turbíny, jsou regulace otáček, regulace výkonu a předtlaková regulace. Regulace otáček se používá pro najíždění a po zapůsobení

regulátoru přeběhu nebo pro zvláštní režim. Při regulaci výkonu je potřebný tlak páry udržován kolem požadované hodnoty a výkon je regulován za pomoci ventilů turbíny. U předtlakové regulace je výkon dán vývinem tepla při dodávce paliva do kotle a tlak páry je naopak udržován ventily turbíny. Mimo základní funkce obsahují regulátory i elektronický urychlovač, který se uvádí do činnosti při odpojení bloku od sítě. Jeho funkce je způsobit dočasnou ztrátu tlaku v oleji, aby k zavírání regulačních a záchytných ventilů mohlo dojít s maximální rychlostí. Tím soustrojí chrání před nebezpečným navýšením otáček, při kterých by mohlo dojít k poškození částí strojů [1].



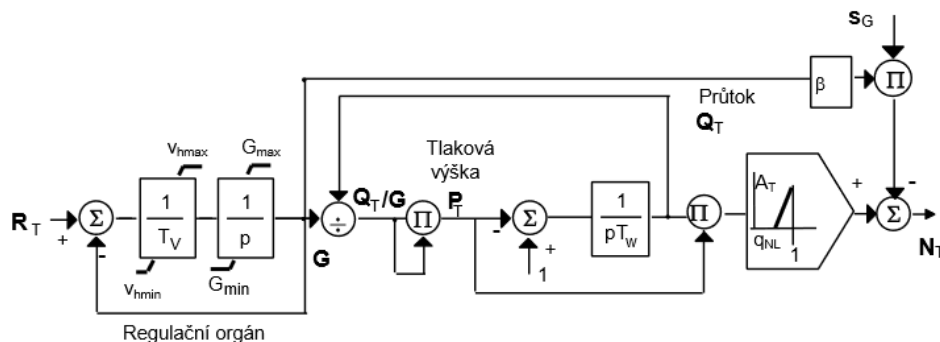
Obrázek 2 Schéma regulátoru parní turbíny

Ten model popisuje strukturu regulátoru pohonu. Podle druhu odchylky se může jednat jak o regulaci klasickou, tak o regulaci předtlakovou. Tato turbína tedy může pracovat v režimech klasické nebo předtlakové regulace, a to ve stavu zapnutém a vypnutém regulátoru. Zobrazeny jsou i vzájemné vazby mezi turbínou, regulátory turbíny a kotlem. Jedná se například o forsáž a korekci tlaku. Jeden případ ukazuje možnost odstranění rozdílů mezi klasickou a předtlakovou regulací, protože na vstup regulátoru se dostávají jak hodnoty výkonu, tak i tlaku. V tomto případě dochází ke koordinované regulaci. Forsáž a korektor tlaku jsou do systému instalovány pro stabilitu regulace, zlepšení dynamiky a ke zmenšení kolísání tlaku při změnách ve výkonu. Druhý případ nastává při vypnutém regulátoru turbíny. Když je kotel v režimu tlakové regulace, jedná se o řízení v rozpojené smyčce, kdy kotel udržuje jmenovitý tlak a otevření ventilů ukazuje zadanou hodnotu výkonu. Primární regulaci můžeme vytvořit za pomoci hydraulického regulátoru otáček. Když je kotel naopak v režimu výkonové regulace, dochází ke klouzavému tlaku. Při otevření regulačních ventilů je tlak určován množstvím páry, která vzniká v kotli. Regulační ventily mohou být využity k primární regulaci za pomoci korektoru frekvence [1].

Vstup do modelu regulace je požadované otevření ventilů  $R_T$ , které určuje regulátor turbíny. Součin admisního tlaku páry a otevření ventilů určuje průtok páry regulačními ventily  $M_T$ . Model respektuje i omezení rychlosti regulačních a záchytných ventilů. Časové konstanty symbolizují zpoždění páry při průchodu jednotlivými částmi turbíny [1].

### 2.1.2.2 Vodní turbíny

Vodní turbínou hýbe voda přitékající z nádrže přes regulační zařízení na lopatky. Vodních turbín existuje velké množství druhů. Tři nejpoužívanější jsou Peltonova, Kaplanova a Francisova. Peltonova je takzvaná rovnotlaká turbína, ve které se veškerá pohybová energie vody v regulačním zařízení mění na pohybovou. Ve zbylých dvou turbínách se mění pouze část tlakové energie na pohybovou, jedná se tedy o turbínu přetlakovou. Dynamický model je sestaven zase z předpokladu, že výkon turbíny je závislý na součinu průtoku, spádu, zrychlení a hustoty. Abychom dostali skutečný výkon, musíme do vzorce zahrnout i ztráty. Ty mohou být třecí, vznikající v přivaděči vody, mechanické a ventilační ztráty, ztráty obtokem oběžného kola, ztráty vířením a zkřivením vodního proudu. Ztráty zakřivením vodního proudu a vířením závisí kvadraticky na průtoku turbínou. Ztráty rázem jsou zase nejmenší pouze pro optimální hodnotu průtoku. Pro větší nebo i menší průtoky rostou s kvadrátem odchylky průtoku od optimální hodnoty. Peltonova turbína ztráty rázem nemá. U Kaplanovi turbíny je poměr maximálního a optimálního průtoku přibližně 0,75. Průběh účinnosti je plochý, protože vhodnou regulací úhlu oběžného a rozvodného kola se může vliv rázových ztrát odstranit. U Francisovi turbíny zase tento poměr závisí na měrných otáčkách a bává 0,75 pro velké a 0,9 pro malé spády [1].



Obrázek 3 Schéma regulátoru vodní turbíny

### 2.1.2.3 Větrné turbíny

Nejjednodušší provedení větrné turbíny je asynchronní motor s kotvou nakrátko použitý jako generátor a přes převodovku propojený s turbínou. Potřebná jalová složka výkonu je vyrobena

kondenzátorovými bateriemi přímo na místě. Skluz generátoru udává rychlost otáčení rotoru a změny otáček mohou být pouze v úzkých mezích, tedy 1-2 % [1].

V tomto směru výhodnější je použití asynchronního generátoru s vinutým rotorovým vinutím, na které je připojen plynule laditelný odpor. To umožňuje měnit otáčky až do 10 % [1].

Další možné řešení je asynchronní generátor s vinutou kotvou, ale vinutí rotoru je napájeno z frekvenčního měniče. Jalový výkon dodává přímo frekvenční měnič a kondenzátorové baterie tedy nejsou vůbec potřeba. Tento způsob provedení umožňuje měnit otáčky až o 30 %. Tím dochází k daleko lepšímu přizpůsobení se charakteristice větrné turbíny [1].

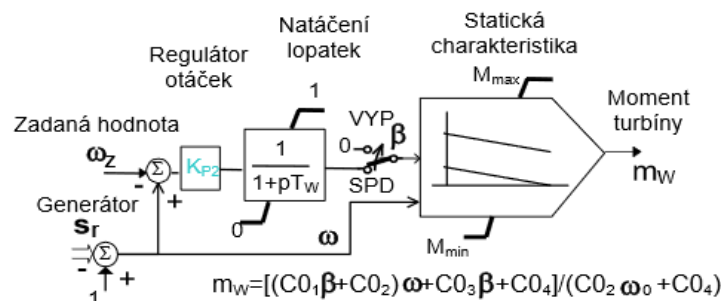
Použit může být i synchronní generátor s permanentními magnety, který je do sítě připojen přes stejnosměrnou spojku. Kvůli možnosti mnohapólového provedení stroje dovoluje přizpůsobit otáčky generátoru přímo otáčkám turbíny. Z toho důvodu nemusí být v soustrojí použita převodovka [1].

Výkon turbíny závisí hlavně na rychlosti větru, a to podle vztahu:

$$P_v = K_{p1} \cdot v_e^3 \cdot c_p \quad (1)$$

Ze vzorce je patrné, že výkon je na rychlosti větru značně závislý, protože je závislý na třetí mocnině rychlosti větru. Dalšími prvky vzorce je koeficient  $K_{p1}$ , což je konstanta závislá na hustotě vzduchu a ploše vrtule. A koeficient  $c_p$  přibližně určuje účinnost turbíny a je funkcí činitele rychloběžnosti a úhlu natočení lopatek turbíny. Činitel rychloběžnosti je podíl rychlosti větru a koncového bodu vrtule [1].

Z průběhů účinnosti větrné turbíny v závislosti na úhlu natočení je vidět, kde dosahuje nejvyšší účinnost. Teoretické maximum je přibližně 57 %. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti je důležitá možnost regulace otáček rotoru [1].



Obrázek 4 Schéma regulátoru větrné turbíny

Při regulaci u menších rychlostí větru u větrných turbín s natáčením lopatek se reguluje úhel natočení, aby turbína pracovala s maximální možnou účinností. Naopak při vysokých hodnotách proudu větru jsou lopatky natáčeny na úhel, při kterém turbína vytváří výkon přibližně kolem svého jmenovitého výkonu [1].

## 2.2 PID regulátory

Tato podkapitola se zabývá popisem jednotlivých členů PID regulátoru a nastavením jejich parametrů.

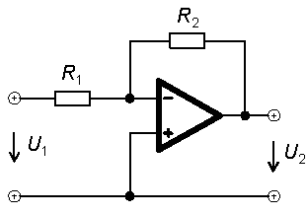
### 2.2.1 Popis jednotlivých PID regulátorů

PID regulátory, ale hlavně PI regulátory jsou nejčastějším použitím při automatické regulaci v praxi. První regulátory vznikly jako pneumatické nebo hydraulické, později jako elektromechanické zařízení. Nejstarší historický záznam o P regulátoru je už z roku 1788, kdy James Watt sestavil odstředivý regulátor otáček u parního stroje. Spojení P a I složky u regulátoru přichází v 1868, kdy James Cleck Maxwell pokračoval v práci na odstředivém regulátoru otáček a sestavil jeho matematický popis. Regulátory s D složkou se objevují kolem roku 1935 a první spojení PID regulátoru až v roce 1939. Po roce 1960 byly tyto regulátory s rozvojem polovodičových součástek nahrazeny analogovými elektronickými regulátory za pomoci tranzistorových operačních zesilovačů. Dnes jsou PID regulátory realizovány hlavně číslicově, a to jako kvazispojité bloky programovatelných logických automatů PLC [2].

Regulátory PID mohou být rozděleny na jednotlivé složky. P člen symbolizuje proporcionální složku, která určuje reakci reaktoru na velikost regulační odchylky. I člen zase symbolizuje integrační složku a ta určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky. Poslední je derivační složka D, která určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky. Regulační odchylkou rozumíme rozdíl mezi regulovanou veličinou a žádanou hodnotou. Proces od okamžiku vzniku regulační odchylky, způsobené například chybou nebo změnou žádané hodnoty, po její odstranění regulátorem, nazýváme regulačním pochodem. Členy regulátoru se mohou kombinovat podle vhodnosti jejich využití. P regulátor se používá hlavně pro jednoduché aplikace, kde nám nevadí trvalá regulační odchylka a je požadováno levné řešení. PI regulátor je nejpoužívanějším typem. Je řešením pro náročnější aplikace, kde je důležité odstranění trvalé regulační odchylky. PD regulátor není v praxi moc používán, protože se chová velice podobně jako P regulátor, kde pouze zvyšuje rychlost jeho reakce na změnu regulační odchylky. Takže je vhodný pro nenáročné aplikace při regulaci rychlých dějů. PID regulátor má výhody PD i PI regulátoru. Tedy dokáže regulovat rychlé děje i v náročných aplikacích, a to s nulovou regulační odchylkou. Dříve rozhodovala o typu regulátoru také cena, ale dnes je regulátor sestavován především mikropočítačem pomocí programu [2].

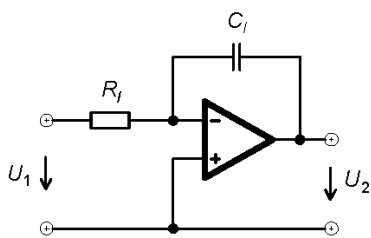
P regulátor můžeme analogicky sestavit pomocí zesilovače v invertujícím zapojení. Zesílení a tím i výsledné parametry regulace nastavujeme pomocí rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  [4].





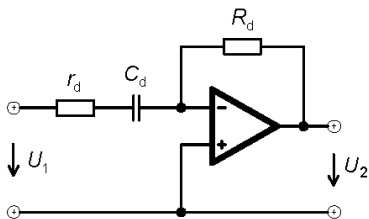
Obrázek 5 Invertující operační zesilovač

Integrační složku regulátoru vytvoříme integračním zapojením zesilovače pomocí rezistoru a kondenzátoru [3].



Obrázek 6 Zesilovač v integračním zapojení

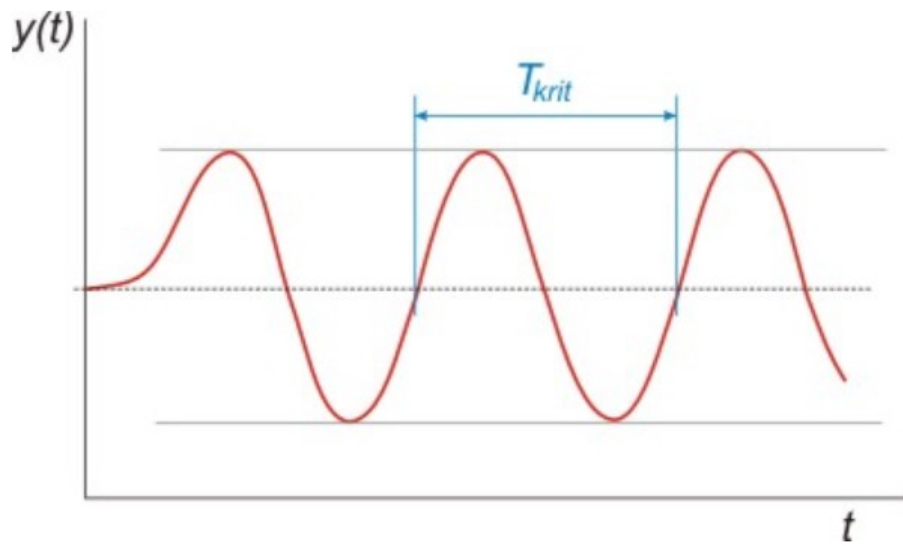
Derivační složka regulátoru se používá pouze se zpožďovacím členem, protože samotná derivační složka je silně nestabilní pro vysoké frekvence. Zpožďovací člen se realizuje pomocí předřadného rezistoru před obvodem regulátoru, který je realizován zesilovačem a rezistorem s kondenzátorem v obráceném zapojení, jako integrační regulátor [4].



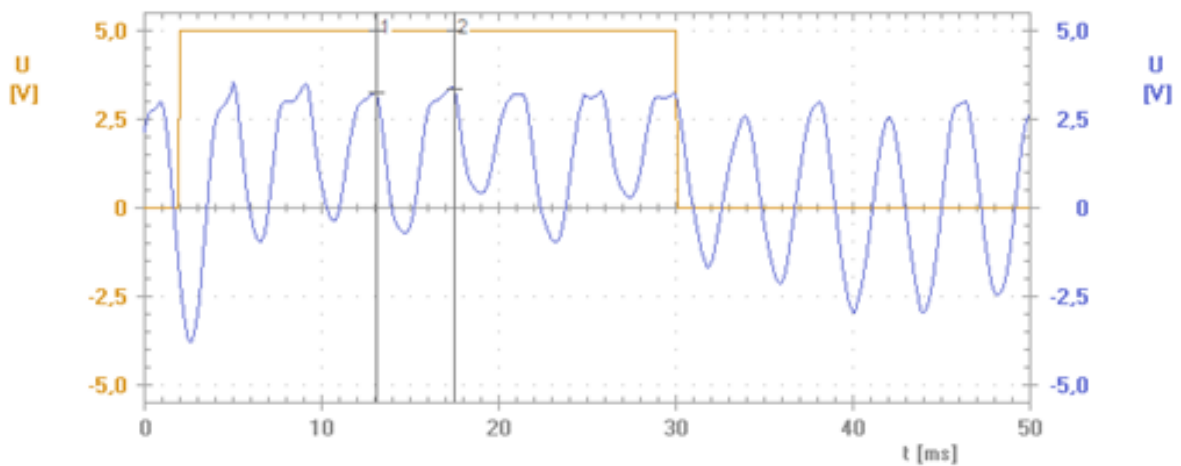
Obrázek 7 Zesilovač v derivačním zapojení

## 2.2.2 Nastavení parametrů regulátoru Ziegler-Nicholovou metodou

Z regulátoru se vyřadí I a D složku a nechá se zapojený pouze P regulátor. Nastavováním zesílení na regulátoru, které je prováděno u analogově složeného regulátoru pomocí dvou rezistorů, se zvyšuje zesílení až do hodnoty kritického zesílení, kdy obvod začne kmitat netlumenými kmity. Změří se průběh regulované veličiny a odečte se z ní doba jednoho kmitu  $T_k$ . [3].



Obrázek 8 Obecné zobrazení jedné periody



Obrázek 9 Odečítání jedné periody v programu rc2000

U analogového regulátoru se poté vypočítá hodnota kritického zesílení  $K_k$  podílem hodnot odporu dvou rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ , tedy:

$$K_k = \frac{R_2}{R_1} \quad (2)$$

Dále se z naměřeného průběhu zjistí doba jedné periody:

$$T_k = t_2 - t_1 \quad (3)$$

Výpočet parametrů jednotlivých součástek je proveden za pomoci tabulkových konstant a vzorců:

*Tabulka 1. Vzorce pro výpočet parametrů PID regulátoru pomocí metody Ziegler-Nicholsovou metodou*

Typ regulátoru	$K_P$	$K_i$	$K_D$
<b>P</b>	$0,5 \cdot K_k$	-	-
<b>PI</b>	$0,45 \cdot K_k$	$\frac{1,2 \cdot K_P}{T_k}$	-
<b>PD</b>	$0,8 \cdot K_k$	-	$\frac{K_P \cdot T_k}{8}$
<b>PID</b>	$0,6 \cdot K_k$	$\frac{2 \cdot K_P}{T_k}$	$\frac{K_P \cdot T_k}{8}$

Vyjádřením hodnot ze vzorců jsou získány parametry součástek, například:

P regulátor:

$$R_2 = R_1 \cdot K_P \quad (4)$$

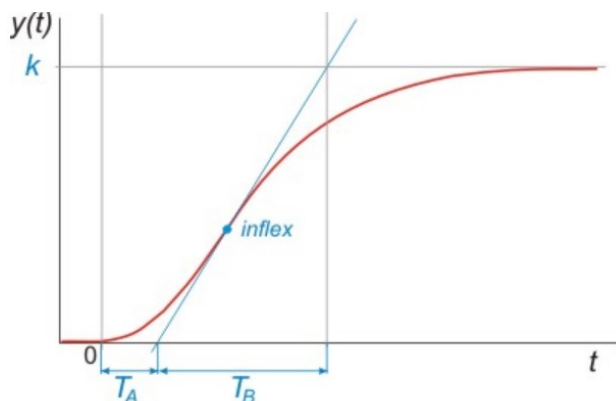
PI regulátor:

$$R_2 = R_1 \cdot K_P \quad (5)$$

$$C_i = \frac{K_i}{R_i} \quad (6)$$

### 2.2.3 Nastavení parametrů regulátoru vyhodnocením odezvy na skokovou změnu

Tato metoda je založena na principu experimentálního měření, pomocí kterého mohou být určeny parametry pro nastavení regulátoru. Z tohoto důvodu může být metoda použita pouze u statických soustav. Nejprve se vyřadí celý PID regulátor z činnosti. Poté je přiveden přímo na vstup soustavy, kterou chceme regulovat, jednotkový skok. Tímto signálem je zjištěna odezva soustavy na skokovou změnu. Naměřený signál z výstupu ze soustavy se vynese do grafu. Na výsledné křivce se vyznačí inflexní bod. Inflexní bod na křivce je část, kde se mění směr křivosti průběhu ze záporného na kladný nebo naopak [3].



Obrázek 10 Odečítání parametrů odezvy soustavy na skokový signál

Následně se bodem provede tečna na změřený průběh. Tímto způsobem je stanoveno trvání doby  $T_A$  a  $T_B$ . Potom se odečte z grafu zesílení soustavy  $k$ . Hodnoty se dosadí do příslušných vzorců pro jednotlivé kombinace regulátorů a mohou se vypočítat hodnoty pro konečné nastavení regulátoru [3].

Tabulka 2. Vzorce pro výpočet parametrů PID regulátoru vyhodnocením odezvy na skokovou změnu signálu

Typ regulátoru	$K_P$	$K_i$	$K_D$
<b>P</b>	$\frac{1}{k} \cdot \frac{T_B}{T_A}$	-	-
<b>PI</b>	$0,9 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{T_B}{T_A}$	$3,5 \cdot T_A$	-
<b>PID</b>	$1,25 \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{T_B}{T_A}$	$2 \cdot T_A$	$0,5 \cdot T_A$

### 3 Charakterizace modelu motorgenerátoru

RC společnost s.r.o. přístroje pro vědu a vzdělání navazuje na zkušenosti ve vzdělávání zakladatelů, pana Ing. Václava Černocho a pana RNDr. Ivana Runczika, v oboru elektrotechniky a elektroniky. Založena byla roku 1990 v Praze. Předmětem jejího podnikání se stala poradenská činnost, vývoj a výroba výukových přístrojů. Dále potom pořádání odborných kurzů, školení a jiná lektorská a laboratorní činnost. Jejich výukový systém je používán na více než třech stech školách v České republice, ale i v zahraničí. Za dobu svého působení společnost získala řadu ocenění a účastnila se mnoha odborných výstav, jako Ampér, Schola Nova, Medacta, Bildungsmesse Didacta a podobně [5].

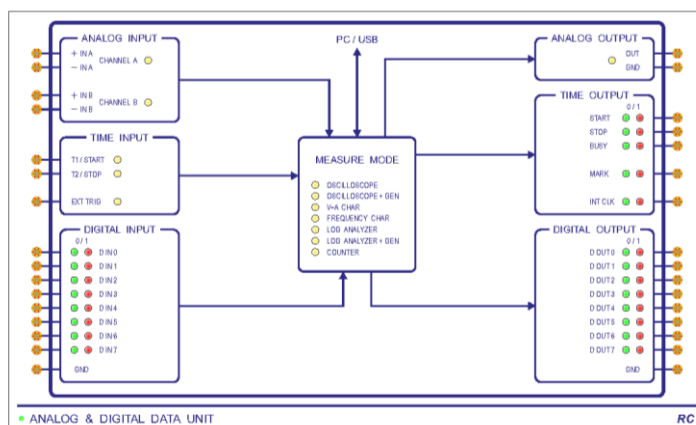
#### 3.1 Výukový systém rc2000

Výukový systém rc2000 -  $\mu$ LAB je složen z velkého množství navzájem propojitelných modulů. Jejich vysoká kvalita provedení a kvalita jednotlivých součástí umožňuje přesné ověření teoretických znalostí při výuce nebo všude tam, kde je kladen důraz na přesné měření. Při experimentech výsledky měření nejsou zkreslovány nepřesnostmi modulů a ani přídatnými odpory na kontaktech, které jsou pro tyto účely pozlacené. Zároveň jsou jednotlivé moduly odolné proti poškození při práci a chybách studentů, například při nastavení vyššího proudu, napětí nebo zkratování obvodu. Proto jsou moduly vybaveny systémem ochrany a jsou napájeny z jednoho společného zdroje nízkého napětí +5 voltů. To klade ještě větší nároky na přesnost, protože při této hladině napětí mohou chyby a nepřesnosti přístrojů značně ovlivnit výsledek měření [5].

Měřicí stavebnice je složena ze základního panelu, na kterém je rozvedeno napájení a uzemnění pro připojení jednotlivých modulů. Dále z plynule nastavitelného zdroje a z měřicí jednotky ADDU, přes kterou je možné propojit měřicí úlohu pomocí programu rc2000 s počítačem. Další součástí jsou jednotlivé moduly s laditelnými parametry, například odporová a kapacitní dekáda, blok pro sestavení PID regulátoru, motor-generátor, modul výkonového zesilovače, modul třífázové soustavy a mnoho dalších, umožňující pokrytí širokého spektra úloh elektroniky a elektrotechniky [5].

Stavebnice použitá v laboratoři je složena z panelu, programovatelného napětového zdroje stejnosměrného napětí, měřicí jednotky ADDU, modulu pro sestavení PID regulátoru, soustavy motor-generátor, odporové a kapacitní dekády pro sestavení jednotlivých regulátorů a z rozdílového členu [5].

Měřicí jednotka lze připojit k počítači USB kabelem. Umožňuje generovat jak analogové, tak číslicové signály. Obsahuje dva diferenciální analogové vstupy, analogový výstup, digitální vstupy a výstupy TTL. Pracovat můžeme v módech oscilloscope (dvoukanálové diferenciální měření napětí), oscilloscope + gen (jednokanálový generátor funkcí a jednokanálový osciloskop), V-A characteristic (měření voltampérových charakteristik), frequency characteristic (amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky), logic analyzer (osmikanálový logický analyzátor), logic analyzer + gen (osmikanálový logický generátor a osmikanálový logický analyzátor) a jako poslední counter (dvoukanálový čítač) [5].

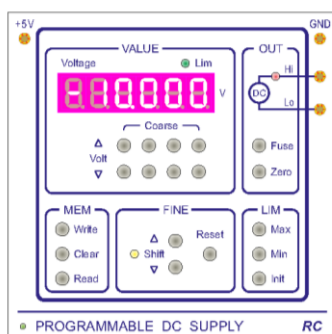


Obrázek 11 Měřicí jednotka ADDU

Program pro měření rc2000, který komunikuje přes jednotku ADDU, umožňuje i generování digitálních i analogových signálů pro přivedení na vstupy jednotlivých modulů a následné měření jejich odezvy na daný signál. Ten může být ihned zobrazen do grafu nebo fázorového diagramu. Naměřené hodnoty mohou být odečítány i přímo z grafu pomocí kurzoru. Kurzorem je nastavován i tvar a parametry signálu, který obsluha požaduje generovat. Myší lze ovládat i ostatní funkce programu, takže není potřeba klávesnice. Vytvořené grafy je možné libovolně ukládat nebo rovnou vytisknout [5].

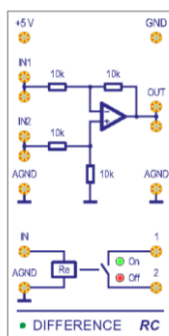
### 3.2 Moduly stavebnice RC Didactic

Programovatelný stejnosměrný zdroj je řízen procesorem a generuje vysoce stabilní, nekolísající napětí. Hodnoty výstupu se nastavují tlačítky coarse a fine, pro citlivější ladení. Zdroj je chráněn elektronickou pojistkou proti přetížení. Jeho výstupní odpor je menší než  $100 \text{ m}\Omega$ , takže se chová skoro jako ideální zdroj napětí [5].



Obrázek 12 Programovatelný stejnosměrný zdroj

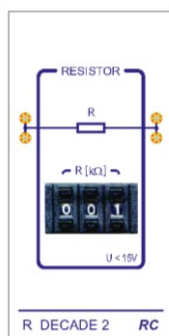
Modul rozdílového členu je sestaven pro vytvoření regulační odchylky. Rozkmit výstupního napětí ze zesilovače je maximálně  $\pm 13 \text{ V}$ . Zesílení je rovno jedné. Maximální průchozí proud rozdílovým členem je  $\pm 22 \text{ mA}$  a výstupní odpor je menší než  $0,1 \Omega$ . Spínací relé může být použito například pro realizaci spínacích pulzů nebo pro nastavení počáteční podmínky I členu u PID regulátoru. Relé je řízeno TTL logikou a je chráněno proti proudovému přetížení, kde maximální velikost proudu je  $0,5 \text{ A}$  [5].



Obrázek 13 Modul rozdílového členu

Odporová dekáda je dvojího druhu. První má nastavitelný rozsah odporu od  $20 \Omega$  do  $1019 \Omega$ . Hodnota menší než  $20 \Omega$  nelze nastavit, kvůli předřadnému odporu o této velikosti. Minimální krok nastavení odporu je  $1 \Omega$  a jeho hodnota se nastavuje pomocí šesti tlačítek. Každé pro příslušnou váhu, tedy jednotky, desítky a stovky ohmů, a pro přičítání a odečítání hodnoty. Přesnost nastavení odporu dosahuje dokonce  $0,1 \%$  při odporu větším než  $100 \Omega$  a teplotním rozsahu  $15$  až  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dále je tato dekáda vybavena akustickou ochranou při překročení maximálních hodnot, a to napětí  $15 \text{ V}$  a proudu  $250 \text{ mA}$  [5].

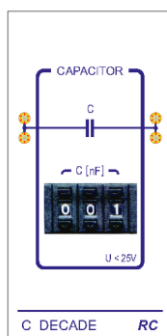
Druhý typ odporové dekády má stejné parametry, jako dekáda první. Pouze její rozsah je od  $1 \text{ k}\Omega$  do  $999 \text{ k}\Omega$  a nejmenší možný nastavitelný krok je  $1 \text{ k}\Omega$ . Přesnost nastavení  $0,1 \%$  splňuje v celém svém rozsahu při teplotě  $15$  až  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Maximální možná hodnota proudu přivedená na dekádu je  $250 \text{ mA}$  a napětí  $15 \text{ V}$ . I tato dekáda signalizuje akustickou ochranou překročení těchto hodnot [5].



Obrázek 14 Odporová dekáda

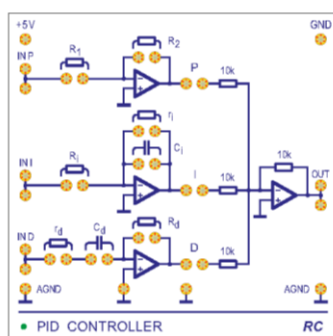
Další potřebnou dekádou pro nastavení PID regulátoru je kapacitní dekáda. Hodnoty kapacity se opět nastavují pomocí šesti tlačítek po minimálním kroku  $1 \text{ nF}$ . Nastavitelný rozsah je  $1 \text{ nF}$  až  $999 \text{ nF}$ . Přesnost dosahuje  $0,8 \%$  při teplotách od  $15$  do  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Dekáda obsahuje kvalitní polypropylenové kondenzátory. Maximální hodnota napětí je až  $25 \text{ V}$  [5].





Obrázek 15 Kapacitní dekáda

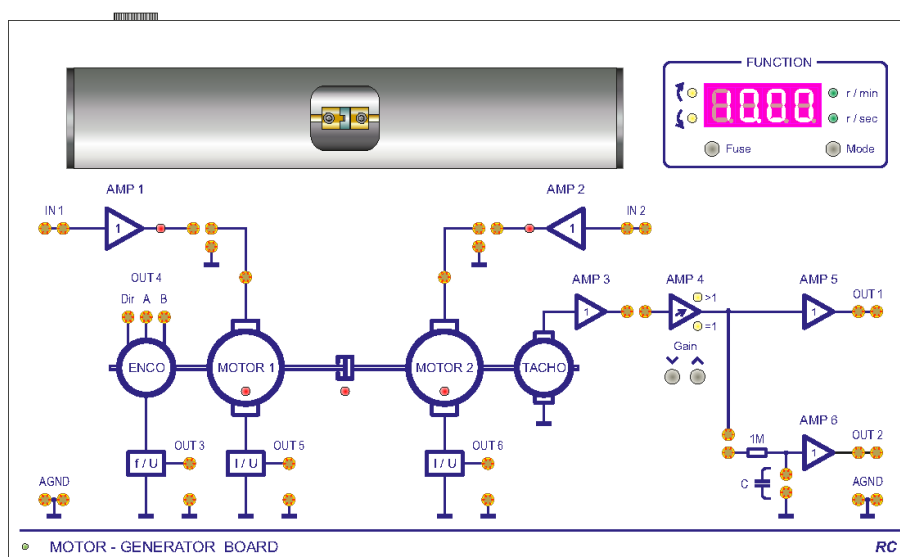
Nedílnou součástí pro regulaci soustavy je modul pro sestavení PID regulátoru. Modul umožňuje samostatné nastavení regulačních členů P, I a D. Kde P znamená proporcionální, I integrační a D derivační regulační člen a jejich parametry se nastavují pomocí zapojení odporových a kapacitních dekád, dle nakresleného zapojení. Regulátory lze tedy různě kombinovat, buď zapojením pouze jednotlivého P, I nebo D členu s možností kaskádního i paralelního řazení. Dále spojení PI, PD či PID regulátoru. Na jednotlivých členech můžeme nezávisle nastavovat parametry, jako jsou zesílení a časové konstanty. Pro potřeby napájení celého modulu je přivedeno společné napájecí napětí +5 voltů a společné uzemnění. Na výstupu z P, I a D členu je proud maximálně  $\pm 22$  mA. Následuje třívstupový sumátor s jednotkovým koeficientem přenosu pro všechny vstupy, tedy jeho zesílení je rovno jedné. To znamená, že maximální proud na výstupu modulu je roven  $\pm 22$  mA. Maximální rozkmit výstupního napětí je  $\pm 12$  V. Všechny výstupy, jak jednotlivých členů P, I a D, tak i výstup sumátoru jsou odolné proti zkratu [5].



Obrázek 16 Modul PID regulátoru

Hlavním členem sestavy je blok motor-generátor. Základem sestavy jsou dva stejnosměrné motorky souose spojené pružnou spojkou. Tyto motorky jsou vyrobeny ve velmi kvalitním provedení s technologií bezželezového rotoru. Ta zaručuje motorkům nízké tření, velmi malé rozběhové napětí a vysokou účinnost. Precizně provedená mechanika způsobuje, že motorek má velmi malé i ostatní ztráty. Tím je tato soustava určena pro široké použití při velmi přesném měření jednotlivých úloh. Nezávislé

buzení obou motorků ze zesilovačů AMP 1 a AMP 2, s vlastní ochranou proti přetížení, umožňuje použít jeden motor jako zátěž pro druhý s libovolným způsobem řízení. Motor 1 má jmenovitý výkon 4,05 W, maximální otáčky dosahují 7 800 r/min., maximální trvalý proud procházející motorkem je 0,52 A. Napětí potřebuje minimálně 0,2 V a maximální hodnota přivedeného napětí je 12 V. Motor 2 má jmenovitý výkon 3,69 W, otáčky maximálně 8 200 r/min., trvalý proud protékající motorkem může být maximálně 0,43 A a napětí v rozmezí 0,2 až 12 V. Celá soustava má jmenovitý výkon 3,5 W, rozběhové napětí 0,5 V, časovou konstantu 16 ms a otáčky maximálně 5 000 ot/min. Snímání otáček je zajištěno pomocí tachodynamy s velmi malým momentem setrvačnosti, aby nedocházelo k velkému ovlivňování měření. Za ním je zařazen převodník  $f/U$ . Otáčky jsou zobrazeny v bloku FUNCTION, buď jako r/min. nebo r/sek. a to včetně směru otáčení. Display v bloku FUNCTION zobrazují též chybové stavy. Změnou zesílení na zesilovači AMP 4 můžeme měnit přechodové charakteristiky. Kromě toho může filtrovat výstupní napětí z tachodynamy [5].



Obrázek 17 Soustava motor-generátor














Tabulka 3. Ovládání funkcí soustavy motor-generátor

FUNCTION	Zobrazení otáček, restart jistění
AMP 1, 2	Budič prvního resp. druhého motoru
MOTOR 1, 2	Bezželezové DC motory
I/U	Převodník proudu vinutím motoru na napětí
ENCO	Snímač otáček
f/U	Převodník frekvence pulsů snímače otáček na napětí
TACHO	Tachodynamo s velmi malým momentem setrvačnosti
AMP 3	Sledovač signálu z výstupu tachodynamu
AMP 4	Zesilovač pro normování přechodových charakteristik
AMP 5	Oddělovací zesilovač výstupu AMP 4
AMP 6	Filtr umožňující úpravu signálu tachodynamu

Tabulka 4. Zobrazení jednotlivých chyb

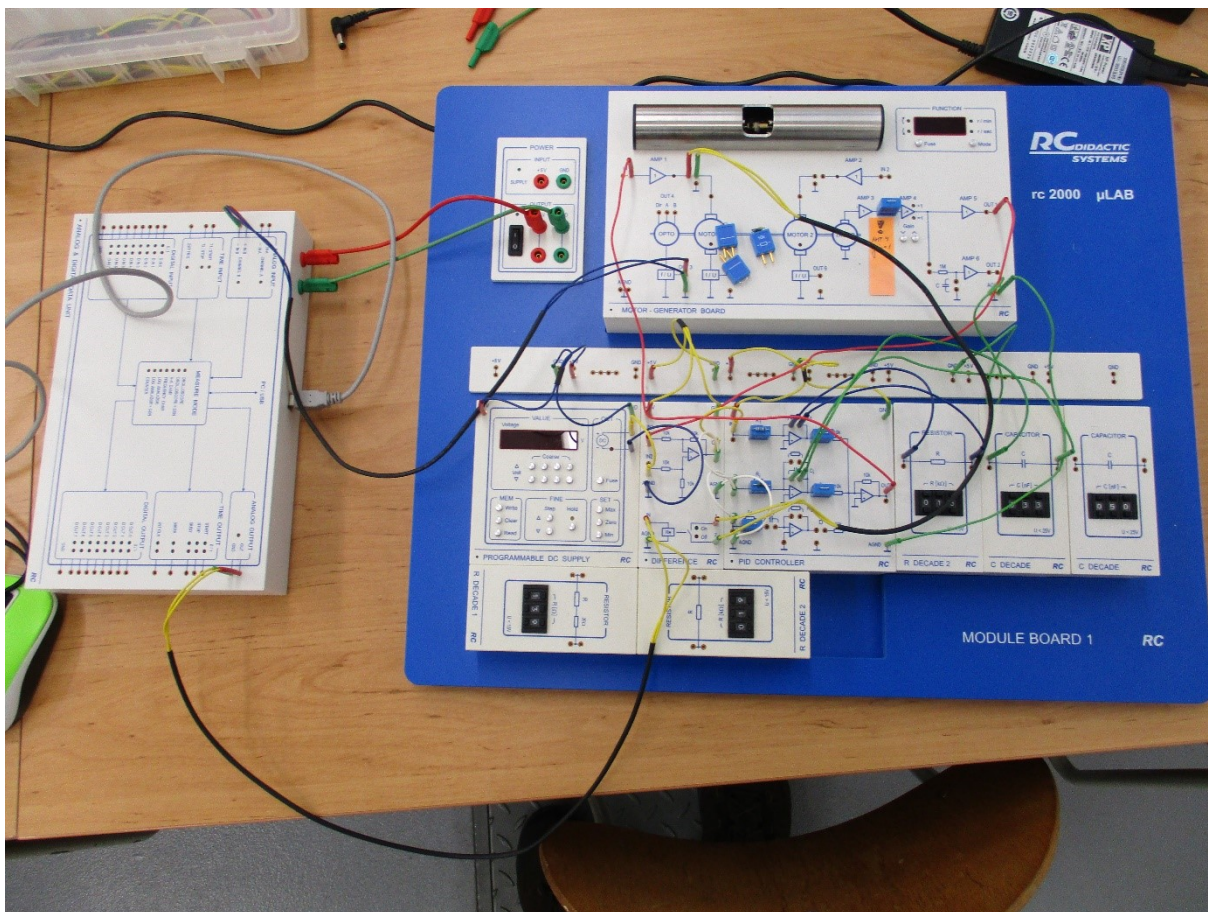
E-01	MOTOR 1	Zatížení > 3,5 W
E-02	MOTOR 1	Napětí na motoru > 14 V
E-03	AMP 1	Teplotní přetížení
E-04	spojka	Otáčky > 5000 r/min
E-05	MOTOR 2	Zatížení > 3,5 W
E-06	MOTOR 2	Napětí na motoru > 14 V
E-07	AMP 2	Teplotní přetížení

Tabulka 5. Význam ovládacích prvků

FUNCTION		Indikace směru otáčení soustavy motorů
		
	 r / min	Indikace jednotky zobrazení
	 r / sec	
	 Mode	Přepíná jednotku zobrazení, vypíná displej
 Fuse	Restartuje veškeré jištění v modulu	
AMP 1, 2		Teplotní přetížení zesilovače, výstup odpojen
MOTOR 1, 2	 MOTOR	Motor odpojen z důvodu napěťového nebo výkonového přetížení
		Motor odpojen z důvodu překročení povolených otáček za minutu
AMP 4	 >1	Zesílení AMP 4 je vyšší než 1
	 =1	Zesílení AMP 4 je rovno 1
	Gain  	Změna zesílení zesilovače AMP 4 o +/- 1 krok

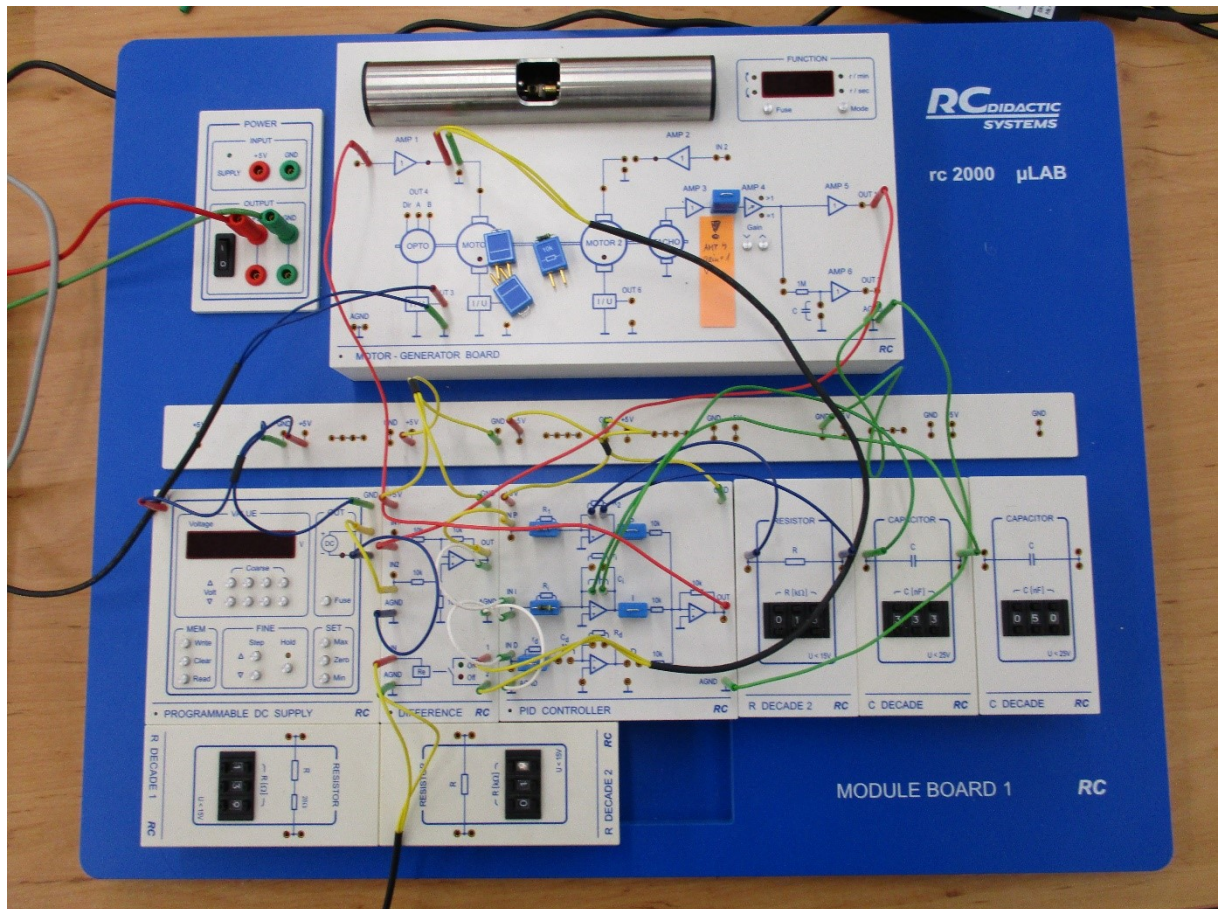
## 4 Vytvoření fyzikálního modelu v laboratoři

Celkový pohled na laboratorní soustavu

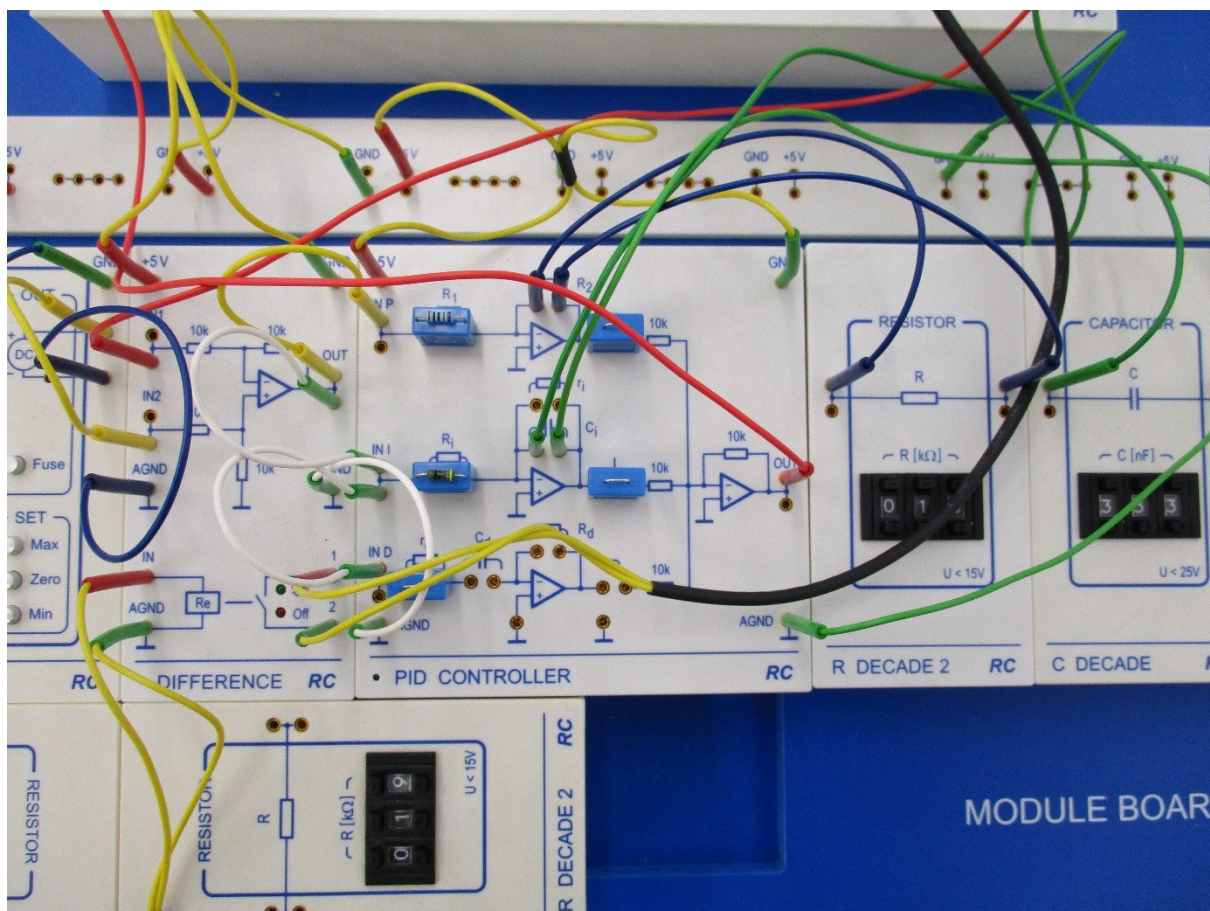




Modulová deska

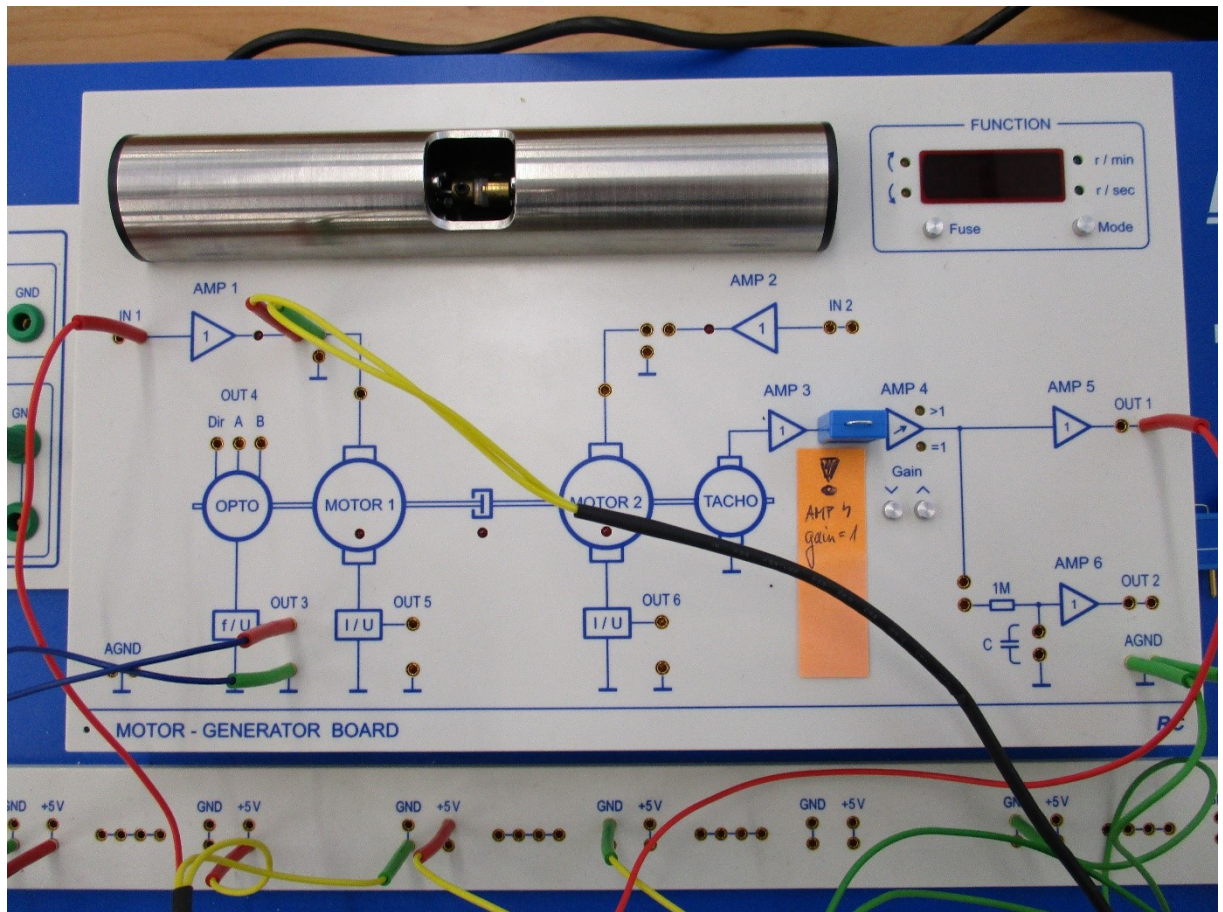


## PID regulátor a rozdílový člen





# Motor-generátor





## 5 Vypracování návrhu vzorového protokolu

### Zadání:

Zapojte simulační modely RC Didactic pomocí schéma zapojení na obrázku 1. Zesilovač AMP 4 nastavte na hodnotu zesílení 1. Pomocí napětí z regulovaného DC zdroje nastavte otáčky motor-generátoru na  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Tuto hodnotu kontrolujte při každém přepojování obvodu, např. při zapojování jednotlivých regulátorů do obvodu. Spusťte si v programu RC 2000 měřící blok Oscilloscope + generator a nastavte časovou osu na hodnotu 50 ms, kvůli snazšímu odečítání hodnot při rozkmitání proudu. Toho docílíme zvyšováním hodnoty na odporové dekádě  $R_2$  u P členu, až dosáhneme hodnoty kritického zesílení. Dále pomocí kurzorů změříme dobu jednoho kmitu  $T_k$ . Průběh s vyznačenou dobou  $T_k$  uložte a přiložte k protokolu. Pomocí naměřené hodnoty  $T_k$  a odporu  $R_2$  vypočítáme hodnoty jednotlivých regulátorů.

V druhé části měření si obvod zapojíme pomocí schéma na obrázku 2. V programu RC 2000 nastavíme časovou osu na 250 ms a pomocí funkce edit si vytvoříme obdélníkový impulz o velikosti napětí 5 V a trvání přibližně 150 ms. V režimu sequence si změříme rozběhové proudy soustrojí. Pro každou barvu přiřadíme jiný průběh (bez regulace, P regulátor, I člen a PI regulátor) a průběhy zobrazíme do jednoho grafu. Stejným postupem změříme dále otáčky při rozběhu soustrojí. Výsledek měření přiložíme k protokolu a okomentujeme v závěru vliv jednotlivých členů na rozběh soustavy.

### Vzorce pro výpočet regulačních členů:

Kritické zesílení:

$$K_K = \frac{R_2}{R_1}$$

Doba periody při  $K_K$ :

$$T_K = t_2 - t_1$$

P regulátor:

$$k_p = 0,5 \cdot K_K$$

PI regulátor:

$$k_p = 0,45 \cdot K_K$$

P regulátor, odpor  $R_2$ :

$$k_p = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = R_1 \cdot k_p$$

PI regulátor:

$$R_2 = R_1 \cdot k_p$$

$$\tau_i = R_i \cdot C_i \Rightarrow C_i = \frac{\tau_i}{R_i}$$

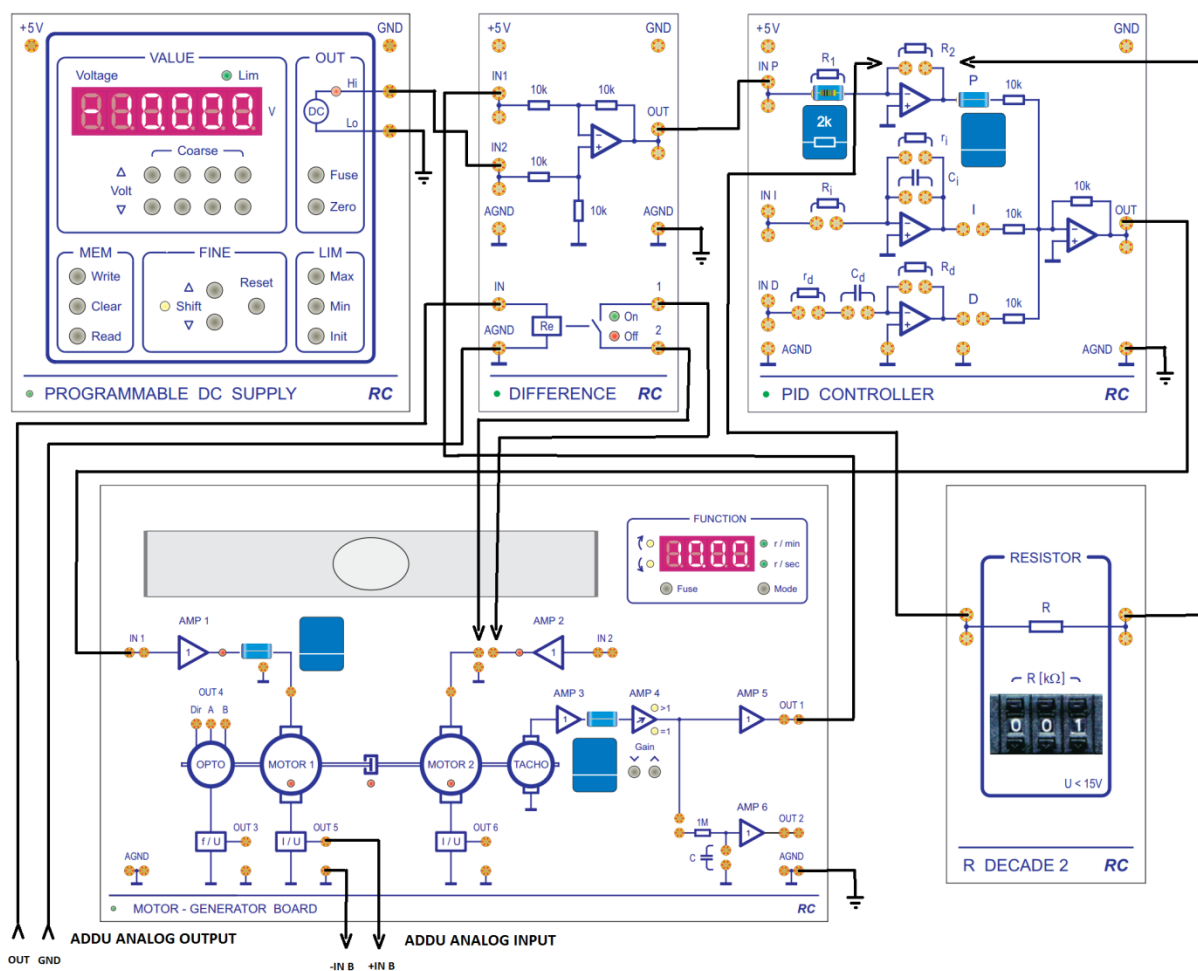
$K_K$  je kritické zesílení

$T_K$  perioda kmitů při kritickém zesílení

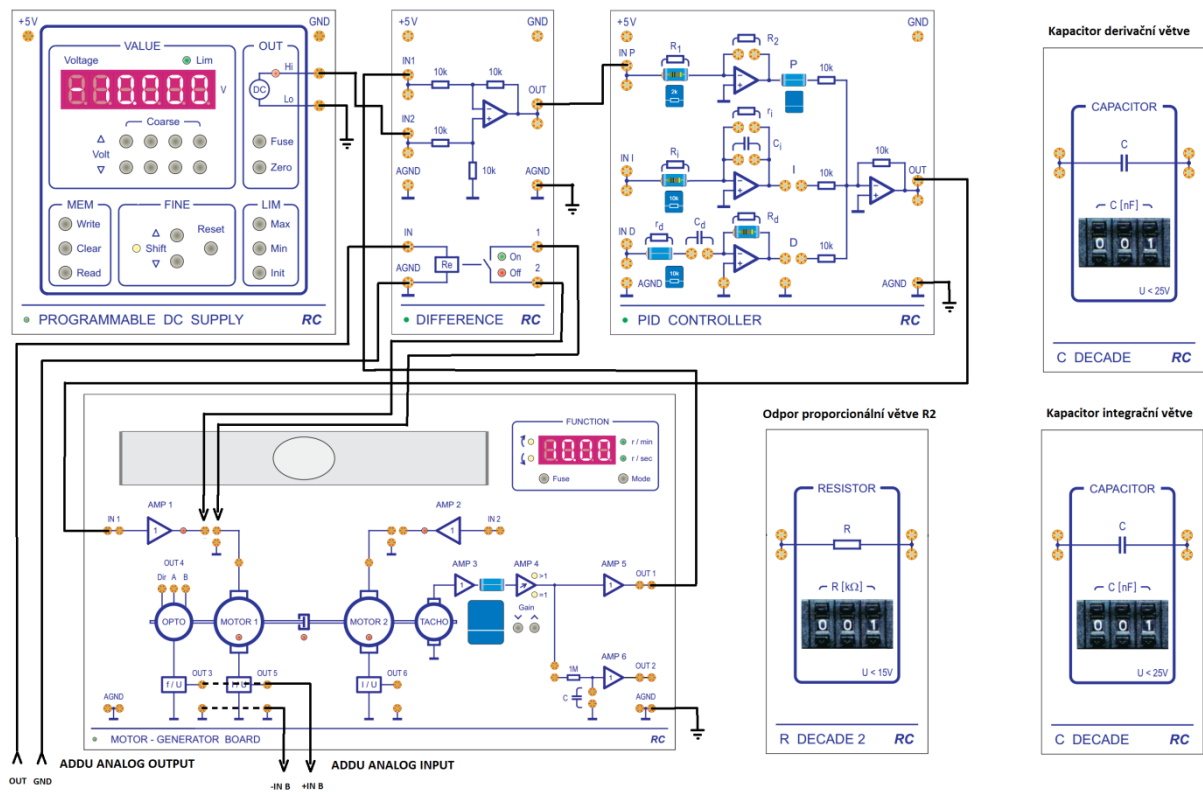
$\tau$  příslušné časové konstanty RC členů

$k_p$  provozní zesílení

### Schéma zapojení:



Obr. 1. schéma zapojení simulačního modelu pro 1. bod zadání



Obr. 2. schéma zapojení druhé části simulačního modelu

Datum měření	<b>Regulace modelu elektrárenského bloku</b>	Osobní číslo	Jméno a příjmení
Rozvrhová skupina (den čas)			

### Zadání:

Zapojte simulační modely RC Didactic pomocí schéma zapojení na obrázku 1. Zesilovač AMP 4 nastavte na hodnotu zesílení 1. Pomocí napětí z regulovaného DC zdroje nastavte otáčky motor-generátoru na  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Tuto hodnotu kontrolujte při každém přepojování obvodu, např. při zapojování jednotlivých regulátorů do obvodu. Spusťte si v programu RC 2000 měřicí blok Oscilloscope + generator a nastavte časovou osu na hodnotu 50 ms, kvůli snazšímu odečítání hodnot při rozkmitání proudu. Toho docílíme zvyšováním hodnoty na odporové dekádě  $R_2$  u P členu, až dosáhneme hodnoty kritického zesílení. Dále pomocí kurzorů změříme dobu jednoho kmitu  $T_k$ . Průběh s vyznačenou dobou  $T_k$  uložte a přiložte k protokolu. Pomocí naměřené hodnoty  $T_k$  a odporu  $R_2$  vypočítáme hodnoty jednotlivých regulátorů.

V druhé části měření si obvod zapojíme pomocí schéma na obrázku 2. V programu RC 2000 nastavíme časovou osu na 250 ms a pomocí funkce edit si vytvoříme obdélníkový impulz o velikosti napětí 5 V a trvání přibližně 150 ms. V režimu sequence si změříme rozběhové proudy soustrojí. Pro každou barvu přiřadíme jiný průběh (bez regulace, P regulátor, I člen a PI regulátor) a průběhy zobrazíme do jednoho grafu. Stejným postupem změříme dále otáčky při rozběhu soustrojí. Výsledek měření přiložíme k protokolu a okomentujeme v závěru vliv jednotlivých členů na rozběh soustavy.

### Parametry modelu a konstanty:

$$n = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$P_N = 30 \text{ MW}, m_p = 1 \cdot 10^{-7}$$

konstanta proudového čidla  $1 \text{ A} = 5 \text{ V}$

konstanta čidla otáček  $1000 \text{ min}^{-1} = 1 \text{ V}$

### Vzorce pro výpočet regulačních členů:

P regulátor:

$$k_p = 0,5 \cdot K_K$$

PI regulátor:

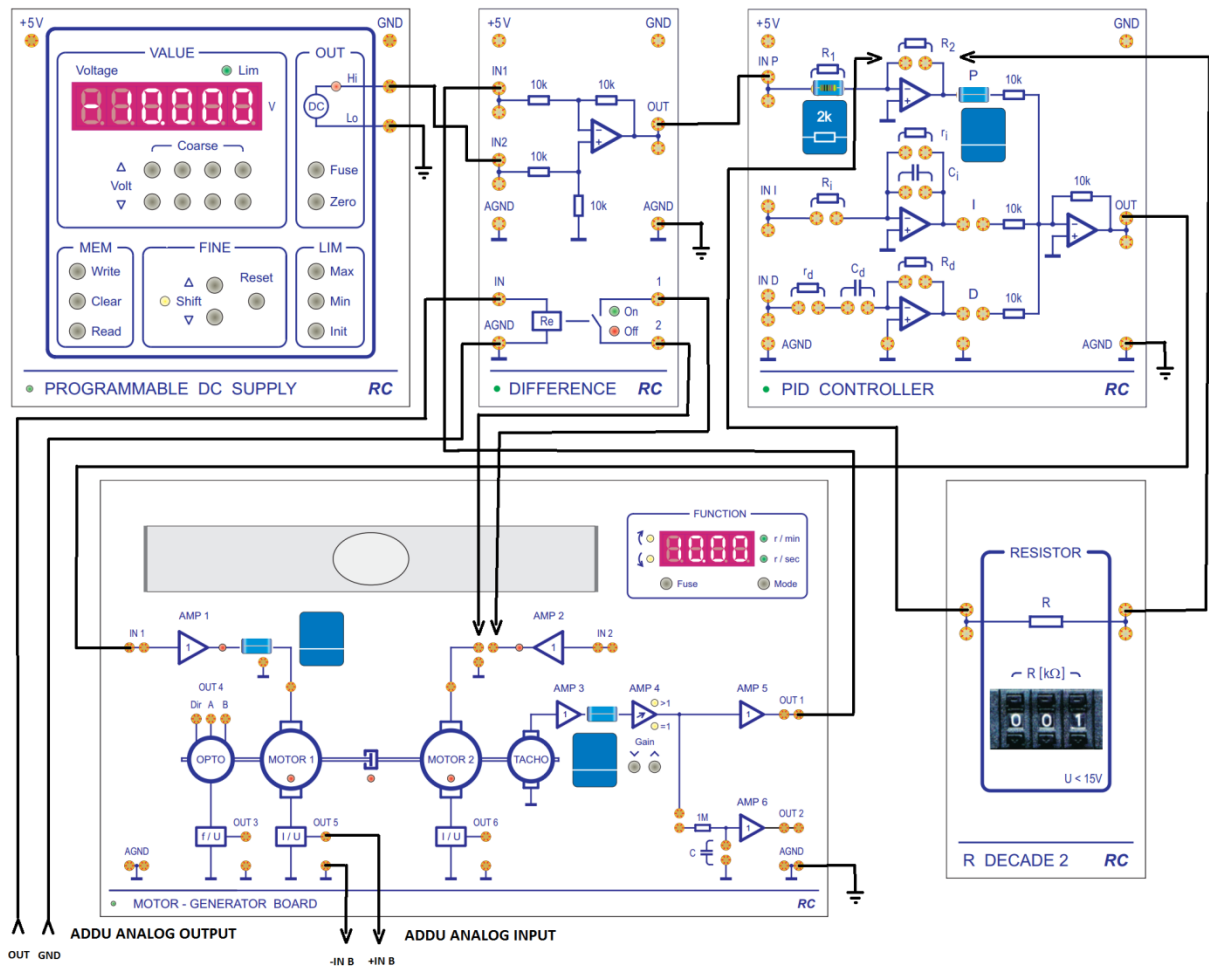
$$k_p = 0,45 \cdot K_K \quad \tau_i = \frac{T_K}{1,2}$$

$K_K$  je kritické zesílení

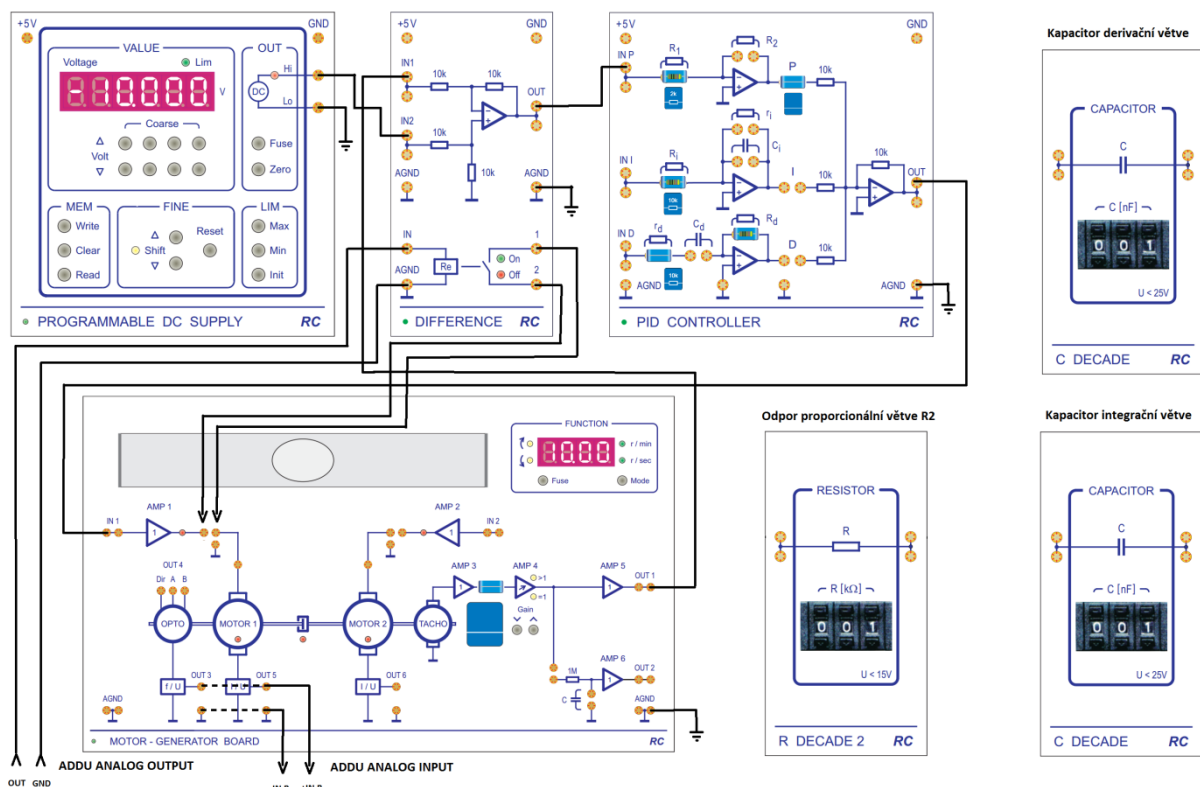
$T_K$  perioda kmitů při kritickém zesílení

$\tau$  příslušné časové konstanty RC členů  
 $k_p$  provozní zesílení

### Schéma zapojení:



Obr. 1. schéma zapojení simulačního modelu pro 1. bod zadání

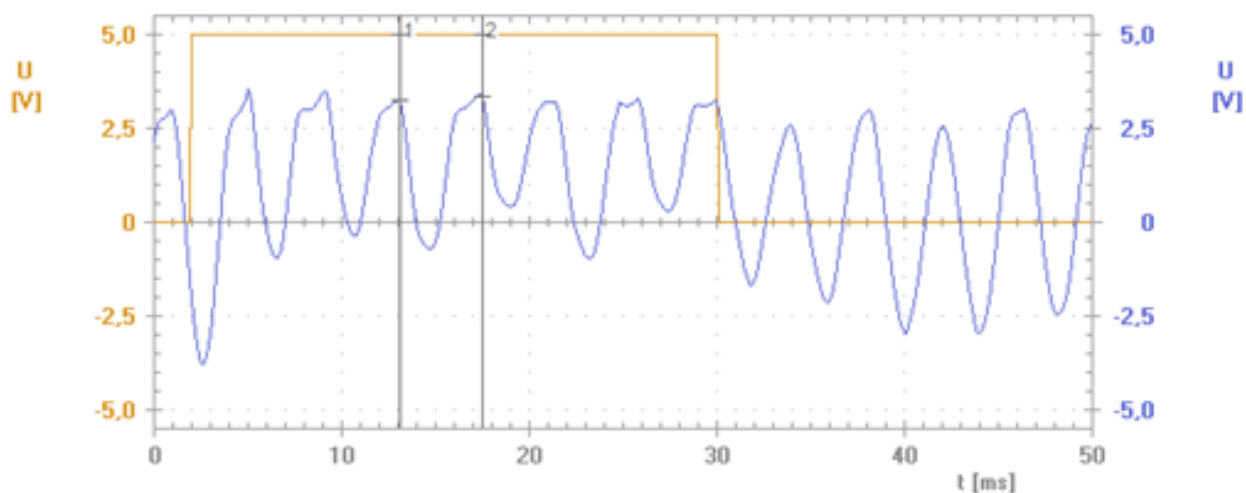


Obr. 2. schéma zapojení druhé části simulačního modelu

### Seznam použitých přístrojů:

Programovatelný zdroj (PROGRAMMABLE DC SUPPLY)	- 1x
Rozdílový člen (DIFFERENCE)	- 1x
PID regulátor (PID CONTROLLER)	- 1x
Motor – generátor (MOTOR – GENERATOR BOARD)	- 1x
Odporová dekáda (R DECADE 2)	- 1x
Odpor 2 kΩ	- 1x
Odpor 10 kΩ	- 2x
Kapacitní dekáda (C DECADE)	- 2x
Propojka	- 3x
Propojovací vodiče	- dle potřeby

## Vypracování:



Obr. 3. Kritické zesílení podle metody Zieglera a Nicholse.

### Výpočty PI regulátoru:

Kritické zesílení:

$$K_K = \frac{R_2}{R_1} = \frac{39}{2} = 19,5$$

Doba periody při  $K_K$ :

$$T_K = t_2 - t_1 = 17,1 - 13,1 = 4 \text{ ms}$$

P regulátor:

$$k_p = 0,5 \cdot K_K = 0,5 \cdot 19,5 = 9,75$$

PI regulátor:

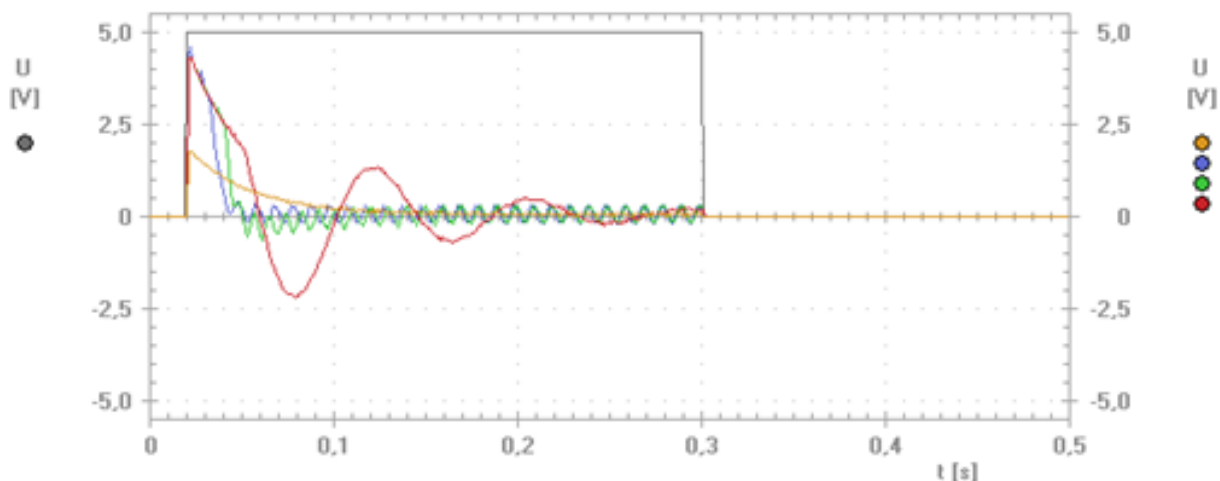
$$k_p = 0,45 \cdot K_K = 0,45 \cdot 19,5 = 8,775 \quad \tau_i = \frac{T_K}{1,2} = \frac{4}{1,2} = 3,33 \text{ ms}$$

P regulátor, odpor  $R_2$ :

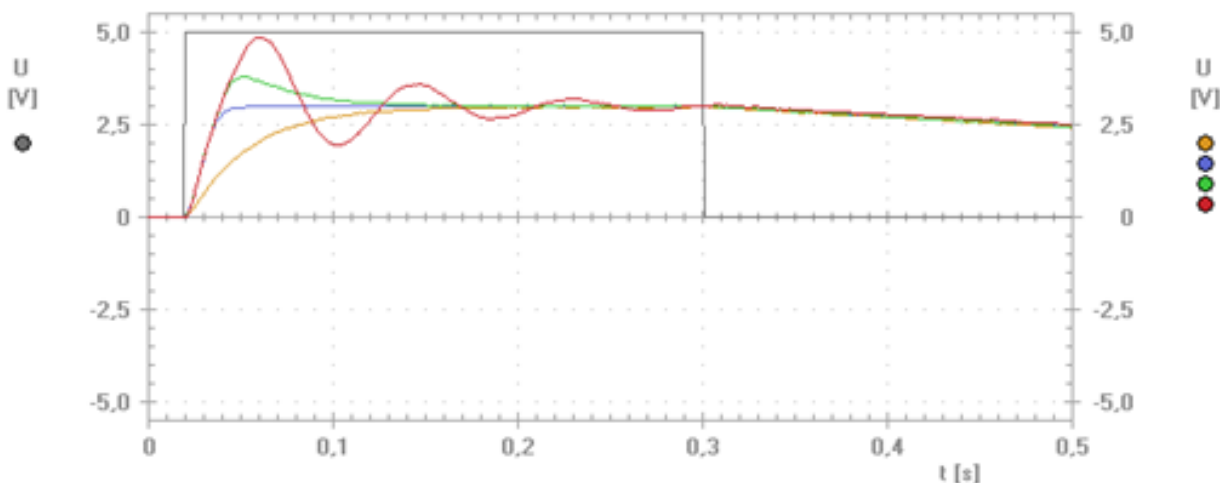
$$k_p = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = R_1 \cdot k_p = 2 \cdot 9,75 = 19,5 \text{ k}\Omega$$

PI regulátor:

$$R_2 = R_1 \cdot k_p = 2 \cdot 8,775 = 17,55 \text{ k}\Omega \quad \tau_i = R_i \cdot C_i \Rightarrow C_i = \frac{\tau_i}{R_i} = \frac{0,00333}{10000} = 333 \text{ nF}$$



Obr. 4. Rozběhové proudy soustrojí pro: bez regulace (žlutá), P (modrá), PI (zelená), I (červená).



Obr. 5. Otáčky soustrojí při rozběhu pro: bez regulace (žlutá), P (modrá), PI (zelená), I (červená).

Přibližný čas potřebný pro rozběh soustrojí na jmenovité otáčky:

P regulátor:	- 50 ms
PI regulátor:	- 140 ms
I člen:	- 260 ms
Bez regulátoru:	- 150 ms

### **Závěr:**

Po nastavení odporu  $R_2$  do bodu kritického zesílení jsem změřil hodnotu  $T_k$ , která byla cca 4 ms. Dále jsem pomocí Ziegler-Nicholsovy metody vypočítal parametry regulátorů. Při měření rozběhu této soustavy jsou vlivy jednotlivých složek jasně patrné. Soustava bez regulátoru dosahuje jmenovitých otáček jen velmi pomalu, ale nemá patrně žádné překmity. Její rozběhový proud je ale podstatně nižší. Soustavy s regulátory mají vyšší záběrný proud, zato však dosahují jmenovitých otáček výrazně rychleji. Nejlépe asi reagoval P regulátor, který dosáhl jmenovité hodnoty a dále už nijak výrazně hodnota nekmitala. I člen reagoval ze všech nejrychleji, zato



ustálení hodnoty bylo velice pomalé. PI regulátor fungoval jako kombinace dvou výše zmíněných druhů regulátorů, tlumil výrazné kmitání I členu a zachoval i potřebnou rychlost.

## 6 Závěr

Cílem této práce bylo sestavení laboratorního modelu motor-generátoru regulovaného blokem pro sestavení PID regulátoru, který může být využit k výuce. Odborné školení konané ve firmě RC společnost s.r.o. přístroje pro vědu a vzdělání bylo důležité pro seznámení se jak s konkrétním modelem, tak i s ostatními možnostmi výukové stavebnice RC Didactic, která pokrývá široké pole možností ověřování principů elektrotechniky.

Na začátku práce je teoretický popis regulace při výrobě elektrické energie, kde automatické regulátory nacházejí velké uplatnění a pro mnoho aplikací jsou nepostradatelné. Například regulátory buzení synchronních generátorů a regulátory turbín jsou velice důležité pro udržení stabilních parametrů elektrické energie, jako jsou napětí a frekvence. Dále jimi lze regulovat činný a jalový výkon dodávaný do sítě. Jednotlivé části popisují jejich rozdílné provedení u parních, vodních a větrných turbín. Zbylá část teoretické části pojednává o široce využívaných PID regulátorech.

Praktická část rozebírá potřebné bloky k sestavení laboratorní úlohy, jejich technický popis a možnosti při nastavování parametrů, případně jejich maximální možnosti nastavení a ochrany před chybovými stavy. Bloky jsou velice přesně zkonstruované s jemným nastavováním a velice odolné proti zničení, ať už fyzickému nebo zkratem. Tyto vlastnosti je předurčují pro použití ve výuce v oborech elektrotechniky s možností sestavení velkého množství nejrůznějších úloh od elektroniky až po energetiku. Konkrétně laboratorní úloha měření modelu motor-generátor ukazuje možnosti použití regulátorů v elektrárenských blocích, kde je na místo turbíny řízen motor, který turbínu pro účely výuky v laboratoři nahrazuje. Úloha zadává, sestavení PID regulátoru pro řízení motoru pohánějícího generátor, za pomoci metody Zieglera a Nicholse nastavit jednotlivé části regulátoru a vyzkoušet jednotlivé složky P a I při regulaci. Následně porovnat s průběhy startu soustrojí bez regulace a s PI regulátorem, který se pro účely regulace turbíny používá nejčastěji.

## Literatura

- [1] MÁSLŮ, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů (AEM), 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [2] HUBA, Mikuláš. *Teória automatického riadenia 3: PID-regulátory s obmedzeniami*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2006. ISBN 80-227-2465-3.
- [3] *ÚSTAV POČÍTAČOVÉ A ŘÍDÍCÍ TECHNIKY: Spojité regulátory* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k34-sprg.htm>
- [4] HLAVA, Jaroslav. PID regulátory – jejich vlastnosti, modifikace a číslicová implementace. Liberec: Technická univerzita v Liberci.
- [5] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výukový systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)

## Obrázky

- [Obr. 1] *DOCPLAYER: Vstupní data pro dynamické výpočty* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6625093-1-uvod-vstupni-data-pro-dynamicke-vypocty-rev-01-cervenec-2005-str-1.html>
- [Obr. 2] *DOCPLAYER: Vstupní data pro dynamické výpočty* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6625093-1-uvod-vstupni-data-pro-dynamicke-vypocty-rev-01-cervenec-2005-str-1.html>
- [Obr. 3] *DOCPLAYER: Vstupní data pro dynamické výpočty* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6625093-1-uvod-vstupni-data-pro-dynamicke-vypocty-rev-01-cervenec-2005-str-1.html>
- [Obr. 4] *DOCPLAYER: Vstupní data pro dynamické výpočty* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/6625093-1-uvod-vstupni-data-pro-dynamicke-vypocty-rev-01-cervenec-2005-str-1.html>
- [Obr. 5] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výukový systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 6] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výukový systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 7] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výukový systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: [https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 8] *ÚSTAV POČÍTAČOVÉ A ŘÍDÍCÍ TECHNIKY: Spojité regulátory* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k34-sprg.htm>

- [Obr. 9] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 10] *ÚSTAV POČÍTAČOVÉ A ŘÍDÍCÍ TECHNIKY: Spojité regulátory* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3k34-sprg.htm>
- [Obr. 11] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 12] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 13] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 14] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 15] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 16] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)
- [Obr. 17] *RC DIDACTIC SYSTEMS: Výchovný systém rc2000* [online]. [cit. 2018-04-17].  
Dostupné z:  
[https://docs.wixstatic.com/ugd/947612\\_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/947612_9282f40c50d84502b1a09f718728f75a.pdf)

## **Seznam příloh**

[A] Zadání laboratorní úlohy (3 strany)

## [A] Zadání laboratorní úlohy

Datum měření	<b>Regulace modelu elektrárenského bloku</b>	Osobní číslo	Jméno a příjmení
Rozvrhová skupina (den čas)			

### Zadání:

1. Zapojte simulační modely RC Didactic pomocí schéma zapojení na obrázku 1. Zesilovač AMP 4 nastavte na hodnotu zesílení 1. Pomocí napětí z regulovaného DC zdroje nastavte otáčky motor-generátoru na  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Tuto hodnotu kontrolujte při každém přepojování obvodu, např. při zapojování jednotlivých regulátorů do obvodu. Spusťte si v programu RC 2000 měřicí blok Oscilloscope + generator a nastavte časovou osu na hodnotu 50 ms, kvůli snazšímu odečítání hodnot při rozkmitání proudu. Toho docílíme zvyšováním hodnoty na odporové dekádě  $R_2$  u P členu, až dosáhneme hodnoty kritického zesílení. Dále pomocí kurzorů změříme dobu jednoho kmitu  $T_k$ . Průběh s vyznačenou dobou  $T_k$  uložte a přiložte k protokolu. Pomocí naměřené hodnoty  $T_k$  a odporu  $R_2$  vypočítáme hodnoty jednotlivých regulátorů.
2. V druhé části měření si obvod zapojíme pomocí schéma na obrázku 2. V programu RC 2000 nastavíme časovou osu na 250 ms a pomocí funkce edit si vytvoříme obdélníkový impulz o velikosti napětí 5 V a trvání přibližně 150 ms. V režimu sequence si změříme rozběhové proudy soustrojí. Pro každou barvu přiřadíme jiný průběh (bez regulace, P regulátor, I člen a PI regulátor) a průběhy zobrazíme do jednoho grafu. Stejným postupem změříme dále otáčky při rozběhu soustrojí. Výsledek měření přiložíme k protokolu a okomentujeme v závěru vliv jednotlivých členů na rozběh soustavy.

### Vzorce pro výpočet regulačních členů:

Kritické zesílení:

$$K_K = \frac{R_2}{R_1}$$

Doba periody při  $K_K$ :

$$T_K = t_2 - t_1$$

P regulátor:

$$k_p = 0,5 \cdot K_K$$

PI regulátor:

$$k_p = 0,45 \cdot K_K$$

P regulátor, odpor  $R_2$ :

$$k_p = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = R_1 \cdot k_p$$

PI regulátor:

$$R_2 = R_1 \cdot k_p$$

$$\tau_i = R_i \cdot C_i \Rightarrow C_i = \frac{\tau_i}{R_i}$$

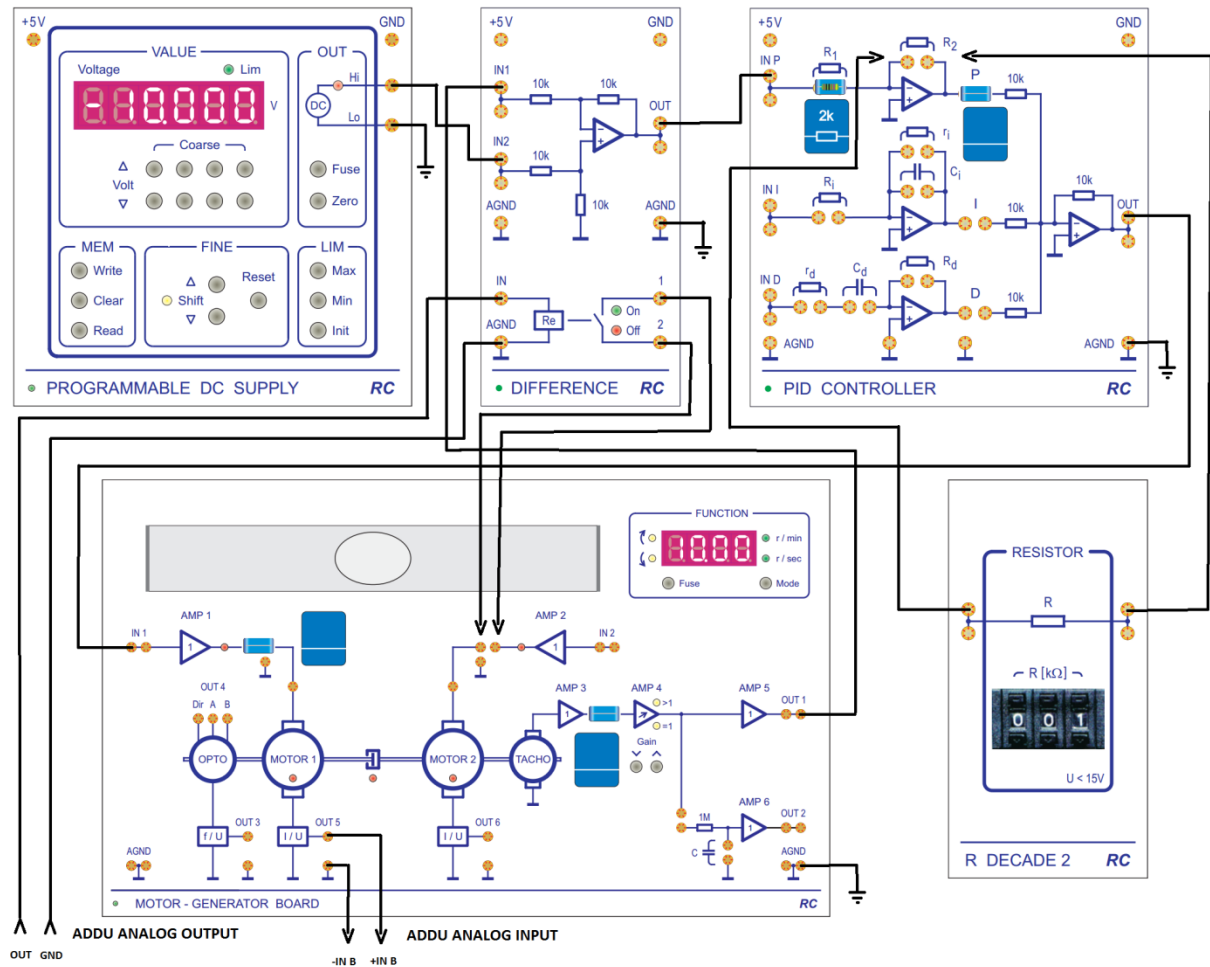
$K_K$  je kritické zesílení

$T_K$  perioda kmitů při kritickém zesílení

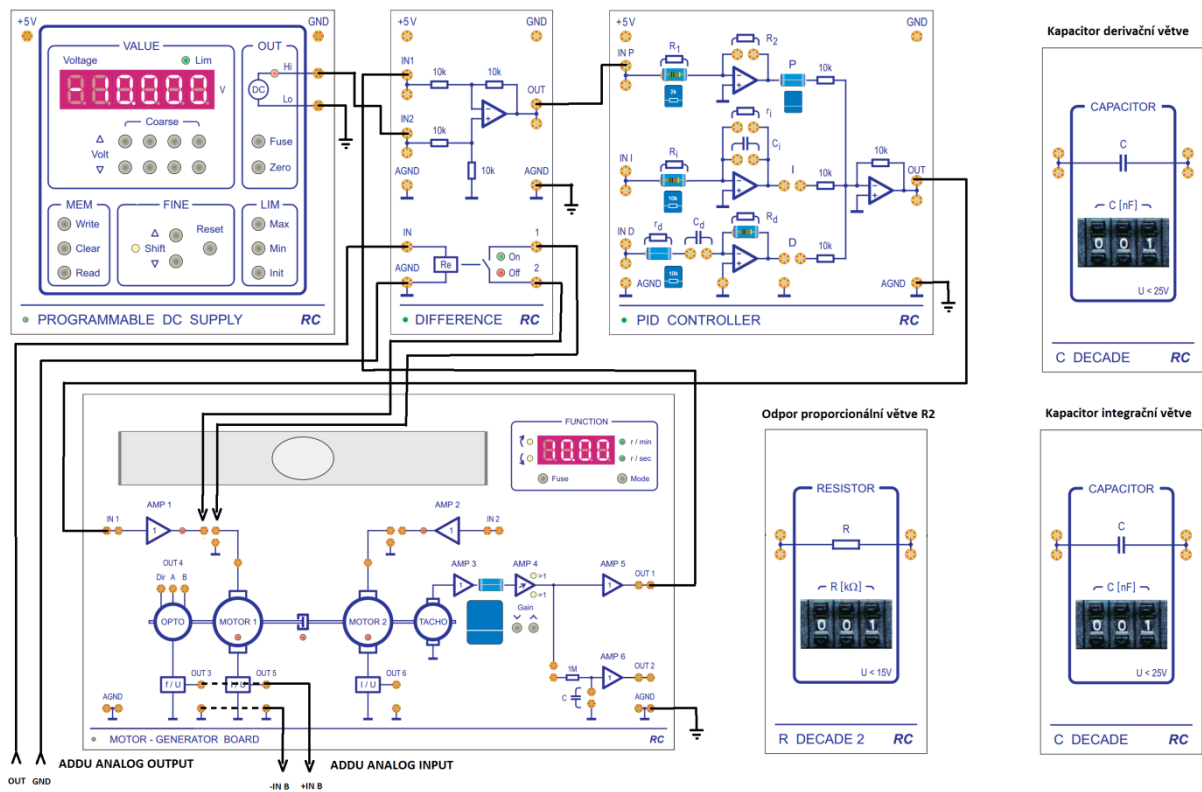
$\tau$  příslušné časové konstanty RC členů

$k_p$  provozní zesílení

### Schéma zapojení:



Obr. 1. schéma zapojení simulačního modelu pro 1. bod zadání



Obr. 2. schéma zapojení druhé části simulačního modelu

## Vypracování:

## Závěr: