

VYŠŠÍ ODBORNÁ ŠKOLA, STŘEDNÍ ŠKOLA,
CENTRUM ODBORNÉ PŘÍPRAVY



ABSOLVENTSKÁ PRÁCE

Řízení otáček turbíny pomocí Wattova
odstředivého regulátoru

Sezimovo Ústí, 2015

Autor: Patrik Pavlát



ZADÁNÍ ABSOLVENTSKÉ PRÁCE

Student: **Patrik Pavlát**
Obor studia: 26-41-N/01 Elektrotechnika – mechatronické systémy
Název práce: **Řízení otáček turbíny pomocí Wattova odstředivého regulátoru**
Anglický název práce: **Control of turbine rotation speed by centrifugal governor**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte problematiku Wattova odstředivého regulátoru a popište jeho význam v regulační technice v historickém kontextu.
2. Nasimulujte v prostředí Matlab/Simulink Wattův odstředivý regulátor a navrhnete jeho konstrukční parametry pro řízení otáček turbíny v Systému vodní elektrárny v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky.
3. Vyrobtte Wattův odstředivý regulátor se stavitelnou polohou kuliček a připojte ho k systému vodní elektrárny tak, aby jím bylo demonstrováno zpětnovazební řízení otáček turbíny.
4. Vytvořte videozáznam prezentující činnost Wattova odstředivého regulátoru na tomto systému.
5. Absolventskou práci vypracujte problémově ve struktuře odpovídající vědecké práci.


Doporučená literatura:

- [1] MAXWELL, J. C., On Governors, *Proceedings of the Royal Society* 2(100), 1868, 270–283.
- [2] ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. *Regulační technika v příkladech*. Praha: BEN – technická literatura, 2011, ISBN 978-80-7300-260-2.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Roubal, Ph.D., VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Odborný konzultant práce: Ing. Jaroslav Svoboda, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí
Oponent práce: Ing. Antonín Juránek, VOŠ, SŠ, COP, Sezimovo Ústí


Datum zadání absolventské práce: **1. 9. 2014**

Datum odevzdání absolventské práce: **1. 9. 2014**


.....
Ing. Jiří Roubal, Ph.D.
(vedoucí práce)



V Sezimově Ústí dne 1. 9. 2014


.....
Ing. František Kamlach
(ředitel školy)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou absolventskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Sezimově Ústí dne 7.5. 2015



_____ podpis

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval vedoucímu absolventské práce Ing. Jiřímu Roubalovi, Ph.D. za čas, který věnoval tomuto projektu a tomuto textu. Jsem si jist, že bez jeho rad, zkušeností a pomoci by tato práce nevznikla. Dále bych rád poděkoval Danielu Kržovi, Jaromíru Chaloupkovi a Josefu Hrstkovi z VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, kteří mi velmi pomohli s výrobou některých dílů pro mou práci. Mé další poděkování patří Ing. Jaroslavu Svobodovi, Ing. Josefu Macháčovi a Ing. Zdeňku Stuchlíkovi za cenné rady a pomoc při tvorbě Wattova regulátoru a jeho výkresové dokumentace. Nemalé poděkování patří Mgr. Jitce Kuchařové za jazykovou korekturu a doc. Ing. Petru Huškovi, Ph.D. z ČVUT v Praze, Fakulty elektrotechnické za konzultace a kontrolu matematicko-fyzikálního modelu Wattova regulátoru.

Velké poděkování patří vedení školy za poskytnutí finančních prostředků na stavbu laboratorního modelu. Firmě EFAFLEX – CZ, s.r.o. děkuji za výrobu součástí pálené na laseru. A také chci poděkovat Tomášovi Pechánkovi a Jířímu Boštičkovi za vyrobení modulu Vodní elektrárny. Nesmím zapomenout poděkovat Ladislavu Kadlecovi za natočení a setřihání dokumentu o výrobě Wattova regulátoru a všem účinkujícím, kteří se na tomto dokumentu podíleli. V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům a blízkým za podporu při studiu.

Anotace

Absolventská práce se zabývá návrhem a výrobou Wattova odstředivého regulátoru, který bude řídit otáčky turbíny na modelu Vodní elektrárny, který se nachází v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole, Střední škole, Centru odborné přípravy v Sezimově Ústí. Regulátor bude sloužit jako učební pomůcka demonstrující principy zpětné vazby při regulaci. Jako první krok je provedena teoretická analýza chování regulátoru v programu Matlab/Simulink. Poté jsou výsledky teoretické analýzy ověřeny na zkušebním modelu ze stavebnice Merkur. Posledním krokem je výroba samotného regulátoru a jeho připojení k modelu Vodní elektrárny. Práce obsahuje kompletní výkresovou dokumentaci.

Klíčová slova: Wattův odstředivý regulátor, výkresová dokumentace, regulace, matematicko-fyzikální model, Matlab/Simulink, modelování, 3D model, mechanika, Merkur, odstředivá síla.

Annotation

The graduated thesis describes the design and manufacture of Watt's centrifugal governor, which will control the rotation speed of a turbine on a model of water power plant, which is located in the Laboratory of applied informatics and physics at Tertiary professional school, Secondary school, The centre of professional training in Sezimovo Ústí. The governor will be serve like a teaching utility demonstrating principles of feedback by regulation. The first step is a theoretical analysis of behavior of the governor in Matlab/Simulink application. The results of theoretical analysis are thereafter tested on a trial model from brick-box Merkur. The last step is production of the governor itself and its connection to the model of water plant. The work includes complete drawing documentation.

Key words: Watt's centrifugal governor, drawing documentation, control, mathematical-physical model, Matlab/Simulink, modelling, 3D model, mechanics, Merkur, centrifugal force.

Obsah

Seznam použitých symbolů	ix
Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
1 Úvod	1
2 Wattův odstředivý regulátor – historie	3
2.1 James Watt – vynálezce odstředivého regulátoru	3
2.2 Použití Wattova regulátoru	5
2.3 Popis Wattova regulátoru	7
3 Model Wattova regulátoru	9
3.1 Matematický model Wattova regulátoru	10
3.1.1 Simulinkový model Wattova regulátoru	11
3.1.2 Kvalitativní analýza chování modelu Wattova regulátoru	13
3.1.3 Analýza chování testovacího modelu Wattova regulátoru	17
4 Výroba Wattova regulátoru	19
4.1 Wattův regulátor	20
4.2 Připojení Wattova regulátoru k tachodynamu	21
4.2.1 Řemenový převod s ozubeným řemenem	21
4.2.2 Kuželový převod	22
4.3 Mechanismus pro ovládání vodního paprsku	24
4.3.1 Jehla pro narušování vodního paprsku	24
4.3.2 Kulisový mechanismus	24
4.3.3 Lineární vedení	25

4.4	Krabička na náhradní díly	26
5	Závěr	27
	Literatura	32
A	Obsah přiloženého DVD	I
B	Použitý software	III
C	Časový plán absolventské práce	V
D	Tvorba modelu v čase	VII
E	Rozpočet projektu	IX
F	Výkresová dokumentace	XI

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
i	elektrický proud	A
l	délka ramene	m
m	hmotnost kuličky	kg
r	poloměr kuličky	m
u	elektrické napětí	V
δ	koeficient tření	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$
ω	otáčky	min^{-1}

Seznam obrázků

2.1	Wattův odstředivý regulátor	4
2.2	Regulace tlaku plynu pomocí Wattova odstředivého regulátoru	5
2.3	Wattův regulátor	5
2.4	Použití Wattova odstředivého regulátoru pro řízení parního stroje	6
2.5	Použití Wattova odstředivého regulátoru pro řízení domu	6
2.6	Wattův odstředivý regulátor – schématický náčrt	7
3.1	Wattův regulátor – principiální náčrt	10
3.2	Wattův regulátor – simulinkový model	12
3.3	Wattův regulátor – maska simulinkového modelu	12
3.4	Průběh otáček Wattova odstředivého regulátoru	13
3.5	Odezva modelu – vliv hmotnosti balančních kuliček	14
3.6	Odezva modelu – vliv délky nosných ramen	14
3.7	Odezva modelu – vliv poloměru kuliček	15
3.8	Odezva modelu – vliv koeficientu tření	15
3.9	Odezva modelu – vliv rychlosti otáčení	16
3.10	Statická převodní charakteristika $\omega \rightarrow \alpha$	16
3.11	Wattův odstředivý regulátor – testovací model	17
4.1	3D model Wattova regulátoru	19
4.2	Wattův regulátor – 3D model z prostředí Solid	20
4.3	Připojení regulátoru k soukolí turbína – tachodynamo	21
4.4	Náčrt řemenice a řemenu	21
4.5	Řemenový převod	22
4.6	Domeček s kuželovým převodem a ložisky	23
4.7	Kuželové kolo	23
4.8	Jehla pro narušování vodního paprsku	24
4.9	Kulisový mechanismus	25

4.10	Lineární vedení	25
4.11	Krabička na náhradní díly	26
4.12	Krabička na náhradní díly	26
5.1	Závislost otáček turbíny na otevření proporcionálního ventilu	28
5.2	Fotografie vyrobeného Wattova regulátoru	29
5.3	Dokumentární film o výrobě Wattova regulátoru	30

Seznam tabulek

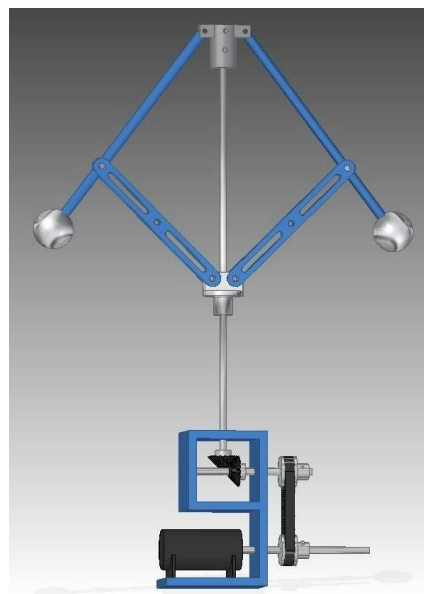
3.1	Hodnoty veličin pro kvalitativní ověření simulinkového modelu	13
3.2	Srovnání testovacího a simulinkového modelu Wattova regulátoru	18
4.1	Parametry použité řemenice	22
4.2	Parametry použitého řemenu s uzavřenou délkou 200 mm	22
4.3	Rozměry použitého kuželového kola	23
5.1	Závislost otáček turbíny na otevření proporcionálního ventilu	28
E.1	Finanční rozpočet projektu	IX
E.2	Hodinový rozpočet projektu	X

Kapitola 1

Úvod

Řídicí technika je takzvanou skrytou technologií – je všude kolem nás, každý ji využíváme, ale málokdo si to uvědomuje, natož aby chápal, jak všechno funguje. Příkladem může být tempomat v osobním automobilu, jehož úkolem je regulovat (udržovat) požadovanou rychlost automobilu, aniž by musel řidič v tomto směru vykonávat jakoukoli činnost. Jádrem tohoto tempomatu je takzvaný regulátor, který získává informaci o rychlosti automobilu ze senzoru rychlosti (regulovaná veličina), dále vypočítává pomocí naprogramovaného algoritmu, jaké množství paliva má vstříkovat do válce motoru (řídící/akční veličina). Regulátor musí samozřejmě „věděť“ požadovanou rychlost automobilu, kterou mu „řekne“ řidič (ROUBAL, J. et al., 2011).

Když se dnes někdo setká s problémem, kdy je potřeba řídit nějakou technologii (fotovoltaickou, fototermickou, klimatizační, mechanickou, pneumatickou, hydraulickou atd.), zcela jistě použije k řešení počítač, mikroprocesor atd. V dnešní době si skoro nikdo nedokáže představit fungování těchto systémů bez elektroniky a výpočetní techniky. Málokdo by dnes dokázal navrhnout pákový mechanismus, kterým by reguloval nějaký systém bez použití počítače s programem, jako to dokázal James Watt, když ve druhé polovině 18. století vynalezl a sestrojil odstředivý regulátor pro řízení otáček parního stroje (LEPIL, O. et al., 2012). V dnešní době se koupí inteligentní senzor, připojí se k počítači, do kterého se naprogramuje příslušný algoritmus a problém regulace je „vyřešen“. Touto oblastí se zabývá věda zvaná automatizace.



V Sezimově Ústí na Vyšší odborné škole, Střední škole a Centru odborné přípravy (<http://www.copsu.cz/>) se nachází Laboratoř aplikované informatiky a fyziky. Laboratoř je vybavena učebními pomůckami z různých fyzikálních oblastí (ROUBAL, J., 2012). Některé pomůcky byly zakoupeny, ale převážná většina byla vytvořena v rámci absolventských prací studentů Vyšší odborné školy jako například model Vodního hospodářství (ŠIKÝŘ, T., 2011), model Vodní elektrárny (BOŠTIČKA, J., 2014; PECHÁNEK, T., 2015) a model Vytápěného domku (RABIŇÁK, P., 2014; PECHÁNEK, T., 2015). Studenti zde mohou pozorovat různé fyzikální jevy, vytvářet počítačové modely reálných technologií a následně navrhovat řídicí algoritmy (ROUBAL, J. et al., 2011).

Cílem této práce je navrhnout a vyrobit Wattův odstředivý regulátor pro řízení otáček turbíny na modelu Vodní elektrárny (BOŠTIČKA, J., 2014; PECHÁNEK, T., 2015), který obohatí Laboratoř aplikované informatiky a fyziky o učební pomůcku z oblasti spojitě regulace.

Struktura této práce, která je napsána v $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ ¹ (SCHENK, C., 2009) je následující: V kapitole 2 se čtenář dozví něco o historii Wattova odstředivého regulátoru a o jeho vynálezcí. Dále je zde popsáno, ze kterých součástí se regulátor skládá. Kapitola 3 popisuje tvorbu simulinkového modelu odstředivého regulátoru, jeho analýzu a následné ověření na zkušebním prototypu vytvořeného ze stavebnice Merkur. V kapitole 4 se řeší problematika připojení Wattova regulátoru k turbíně modelu Vodní elektrárny. Dále se zde pojednává o vlastní výrobě a instalaci regulátoru. V kapitole 5 se nachází zhodnocení této práce. V příloze práce je uveden obsah příloženého DVD, použitý software, časový plán AP, tvorba laboratorního modelu v čase, rozpočet a kompletní výkresová dokumentace.

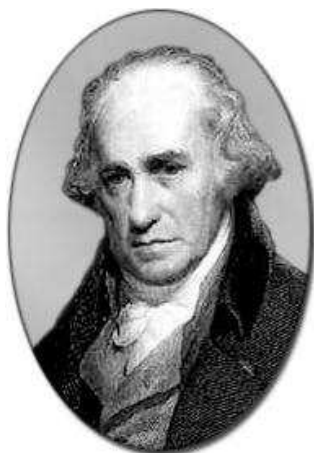
¹ $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ je rozšíření systému \LaTeX , což je kolekce maker pro \TeX . \TeX je ochranná známka American Mathematical Society. \LaTeX čti [l^at_ech].

Kapitola 2

Wattův odstředivý regulátor v historických souvislostech

V této kapitole bude uvedeno něco málo o životě Jamese Watta, zejména to, co úzce souvisí s jeho vynálezem odstředivého regulátoru. Dále zde bude popsán princip tohoto regulátoru a jeho přínos pro svět automatizace. Na závěr kapitoly bude popsáno, z jakých součástí se regulátor skládá a k čemu tyto části slouží.

2.1 James Watt – vynálezce odstředivého regulátoru



James Watt¹ byl vynálezcem a inženýrem pocházejícím ze Skotska. Celý svůj život se věnoval zdokonalování konstrukce parního stroje. Lidstvo díky němu získalo výkonný zdroj energie pro pohon různých zařízení v dopravě. To předznamenalo revoluční rozmach průmyslové výroby (LEPIL, O. et al., 2012, příloha CD).

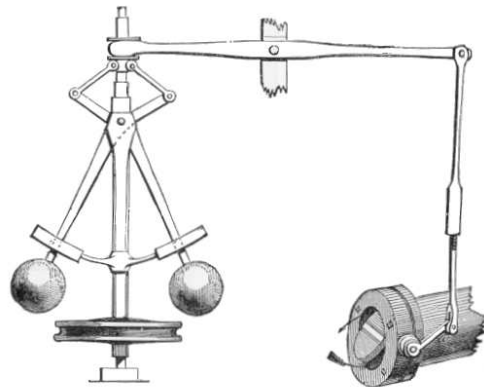
James Watt se začal zajímat o parní stroj v roce 1764. Všechno to začalo, když opravoval model Newcomenova stroje (JÍLEK, F., 1988). Rok poté začal tento stroj systematicky zdokonalovat. Pracovní válec s pístem je základem

¹Obrázek převzat z <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/pioneers/watt.html>.

parního stroje. Píst se pohybuje působením horké páry přiváděné do válce. Watt opatřil stroj zvláštním kondenzátorem umístěným mimo pracovní válec a tím se činnost parního stroje podstatně zlepšila. V tomto kondenzátoru se pára po vykonání práce změnila zpět na vodu.

Použití setrvačnicku byl další pokrok. Setrvačnick převáděl posuvný pohyb pístu na pohyb otáčivý. Pro plynulý pohon dalších strojních zařízení je to nezbytné. Dvojitý parní stroj zkonstruoval Watt v letech 1782 až 1784. Zde působí pára na píst střídavě z obou stran. Dalšími důležitými vynálezy Jamese Watta, které přispěly velkou měrou k vývoji a zdokonalení parního stroje, jsou čtyř kloubový mechanismus pro vedení pístu, setrvačnickový regulátor a planetové soukolí pro převod posuvného pohybu na pohyb rotační (LEPIL, O. et al., 2012, příloha CD).

Poté přišlo na řadu důmyslné zařízení pro regulaci otáček parního stroje takzvaný *Wattův odstředivý regulátor*.² Jeho princip spočívá ve využití odstředivé síly, která působí na dvojici rotujících závaží upevněných na konci pákového mechanismu. Jestliže otáčky parního stroje vzrostly, zvětšila se odstředivá síla, závaží se oddálila od osy otáčení a pákový mechanismus přivřel ventil, kterým se ovládal přívod páry do pracovního válce parního stroje. To způsobilo zmenšení otáček stroje, opět pokles závaží a otevření ventilu. Tak byl prakticky využit princip automatické regulace na základě zpětného působení, který je dnes součástí mnoha automatizovaných strojů a zařízení.



Obrázek 2.1: Wattův odstředivý regulátor

Na univerzitě v Gasgowě působil James Watt jako univerzitní mechanik. Tam měl klid a prostředky na práci. Je zajímavostí, že Watt byl odpůrcem využití parního stroje pro pohon dopravních prostředků. Za svůj život dostal také mnoho vyznamenání za to, co dokázal světu dát. Bylo mu nabídnuto povýšení do šlechtického stavu, ale těsně před smrtí ho odmítl. Na jeho počest je jednotka výkonu pojmenována watt, W. James Watt zemřel 25. srpna 1819 ve svém domě v Heatfieldu u Birminghamu a je pochován na hřbitově ve Westminsterském opatství mezi velikány anglické historie s epitafem: „Zdroje své země rozšířil, člověka moc rozmnožil.“ (LEPIL, O. et al., 2012, příloha CD).

²Obrázek převzat z (*Wikipedie – Otevřená encyklopedie* [online], 2014, Wattův odstředivý regulátor).

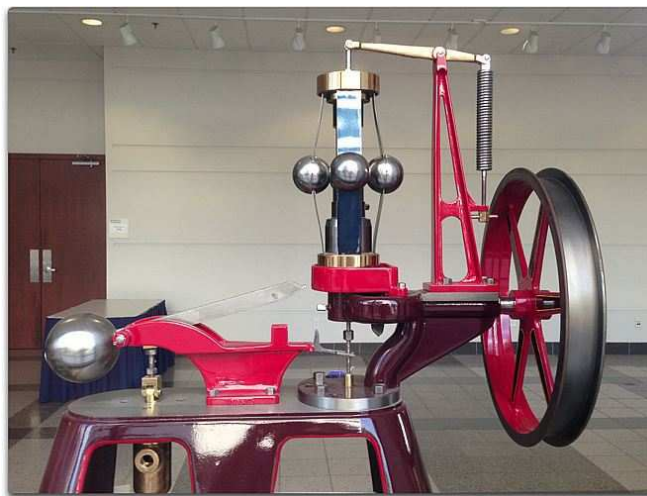
2.2 Použití Wattova regulátoru

Na následujícím obrázku je vidět Wattův odstředivý regulátor sloužící k regulaci tlaku plynu v kotli parního stroje. Princip spočíval v tom, že jakmile byla hodnota tlaku v kotli zvýšená nad přípustnou mez, začal plyn konat práci. Zvedl píst a unikající plyn roztočil závaží na dvou ramenech. Tím byla část vnitřní energie plynu v kotli přeměna na mechanickou energii. Poté se snížila hodnota tlaku pod danou mez, mechanismus držící závaží klesl, a proto klesl i píst do počáteční polohy.



Obrázek 2.2: Regulace tlaku plynu pomocí Wattova odstředivého regulátoru – čerpáno z <http://fyzika/jreichl.com>

Na dalším obrázku je znázorněno další použití Wattova odstředivého regulátoru, které bylo možno vidět na konferenci v Knoxville, Tennessee.



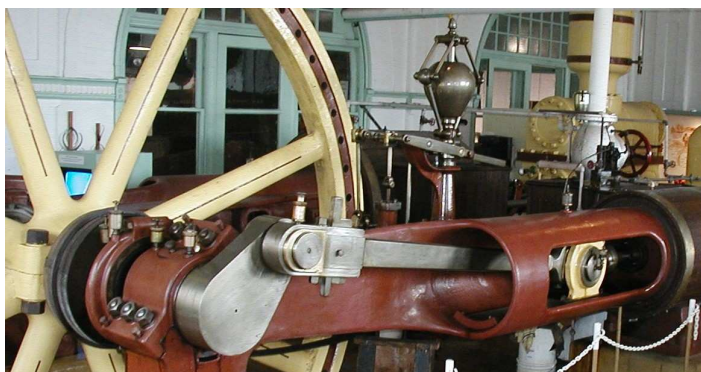
Obrázek 2.3: Wattův regulátor – čerpáno z <http://wattsupwiththat.com>

Na obrázku 2.4 je vidět další použití Wattova odstředivého regulátoru. Parní motor otáčí velkými červenými koly, která jsou připojena k motoru pomocí dlouhého pásu. Rychlost otáčení je řízena odstředivým regulátorem.



Obrázek 2.4: Použití Wattova odstředivého regulátoru pro řízení parního stroje – čerpáno z (<http://montessorimuddle.org/>)

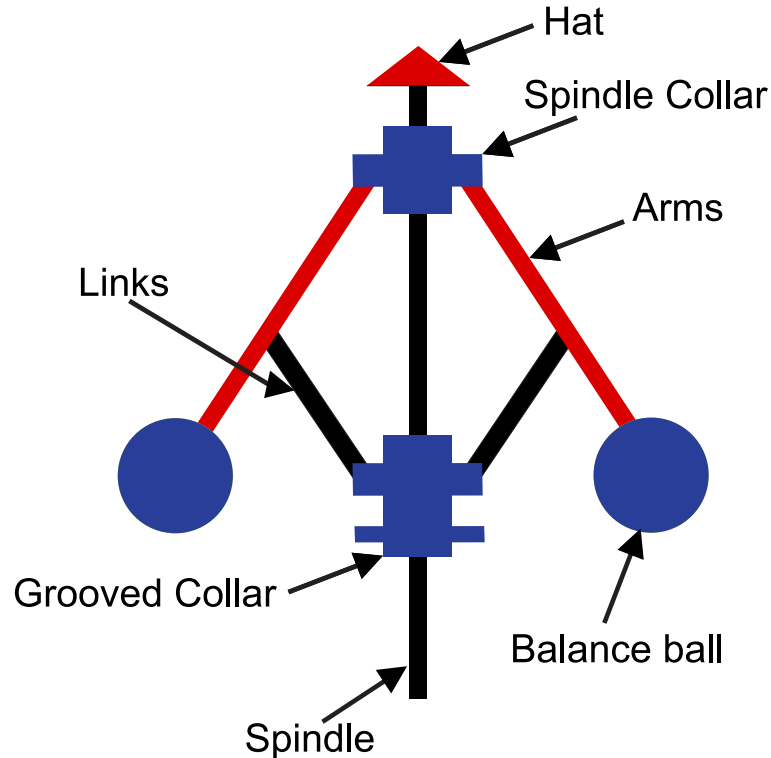
Níže uvedený obrázek 2.3 představuje Wattův regulátor, který byl použit v roce 1887 v domě, který měl dvě velká čerpadla řízená párou. Na obrázku je vidět vysokotlaký válec, který je zapouzdřen v červeném leštěném dřevě z mahagonu, které slouží jako izolace. Na pravé straně jsou vidět čerpadla. Dále jsou zde velké nádoby v horní části čerpadel, které jsou částečně naplněné vzduchem a působí jako tlumiče k vyrovnání tlakových rozdílů během každého zdvihu čerpadla.



Obrázek 2.5: Použití Wattova odstředivého regulátoru pro řízení domu – čerpáno z (<https://magicofsteam.wordpress.com/>)

2.3 Popis Wattova regulátoru

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé komponenty, ze kterých se Wattův regulátor skládá, viz následující obrázek.



Obrázek 2.6: Wattův odstředivý regulátor – schématický náčrt

Komponenty Wattova odstředivého regulátoru jsou:

- **Hlavička (Hat)**, která nemá žádnou funkci a pouze vylepšuje vzhled Wattova regulátoru. V tomto projektu nebyla použita.
- **Osová tyč (Spindle)** je osou celého Wattova regulátoru. Všechno se točí s ní.
- **Držák nosných ramen (Spindle Collar)** je pevně připevněn k osově tyči, to znamená, že otáčí-li se osová tyč, otáčí se také tento držák včetně ostatních komponent. Držák má soustředěnou vazbu s osovou tyčí.
- **Nosná ramena (Arms)** jsou shora uchycena za držák nosných ramen a ze středu je podpírají podpěrná ramena.

- **Podpěrná ramena (Links)** slouží jako podpěra nosných ramen a držák podpěrných ramen vytahují směrem vzhůru.
- **Držák podpěrných ramen (Grooved Collar)** je uchycen za podpěrná ramena a způsobuje změnu akčního zásahu (škrťící klapky). Má soustředěnou vazbu s osovou tyčí.
- **Balanční kuličky (Ballance ball)** slouží jako závaží. Jsou upevněny na nosných ramenou.

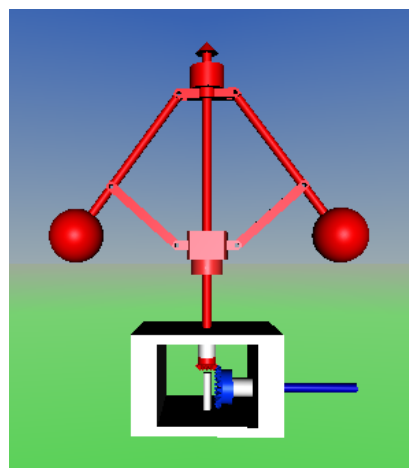
Kapitola 3

Model Wattova regulátoru

Ještě předtím, než bude přikročeno k samotné výrobě laboratorního modelu, který bude samočinně řídit otáčky turbíny na systému vodní elektrárny (BOŠTIČKA, J., 2014; PECHÁNEK, T., 2015) v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky, je třeba provést teoretickou analýzu chování Wattova regulátoru. Tato analýza poskytne parametry pro návrh konstrukce vyráběného laboratorního systému.

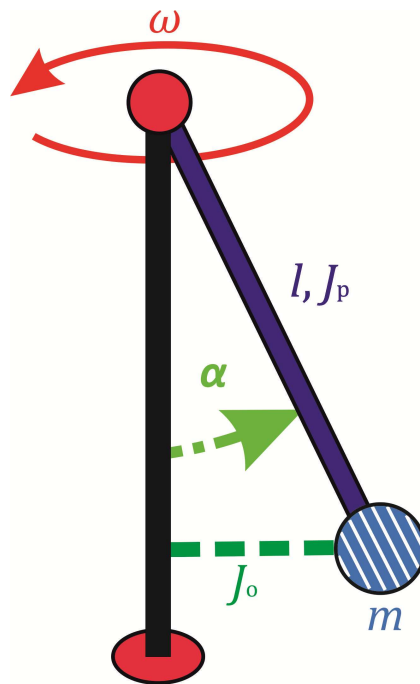
Je důležité zajistit, aby byl regulační obvod (Wattův odstředivý regulátor s Peltonovou turbínou na vodní elektrárně) stabilní, to znamená, že při proměnném zatížení generátoru připojeného na turbínu budou otáčky tohoto soustrojí udržovány přibližně na stejné hodnotě. Zde je zajímavé uvést, že prvním člověkem, který se zabýval teoretickou analýzou stability Wattova odstředivého regulátoru, byl již v roce 1868 James Clerk Maxwell – jeden z nejvýznamnějších fyziků. Jeho článek (MAXWELL, J. C., 1868) je považován za první teoretický počín v oblasti řízení a regulace.

V této kapitole bude nejprve vytvořen v prostředí MATLAB/Simulink (ROUBAL, J. et al., 2011; KUPKA, L., 2007) teoretický počítačový model vycházející z matematicko-fyzikálních rovnic popisující chování Wattova odstředivého regulátoru (HONN, T. a STONE, S., 2003). Poté bude provedena jeho analýza, tzn. budou zkoumány časové odezvy mechanických veličin modelu. Výsledky této kapitoly poskytnou vedle podkladů pro výrobu reálného systému také počítačový model, který je opatřen maskou umožňující snadné ovládání tohoto počítačového modelu.



3.1 Matematický model Wattova regulátoru

Při odvozování matematicko-fyzikálního modelu Wattova regulátoru bude čerpáno z prezentace (HONN, T. a STONE, S., 2003). Hmotnost jednotlivých komponent, vyjma balančních kuliček z nichž každá má hmotnost m [kg], bude zanedbána. Schématický náčrt, ze kterého je vyvozena výsledná diferenciální rovnice popisující chování Wattova regulátoru, je na následujícím obrázku.



Obrázek 3.1: Wattův regulátor – principiální náčrt

Pro následující odvození bude uvažována pouze polovina Wattova regulátoru. Kinetická energie kývajících se kuliček na rameni je

$$E_{\text{kp}}(t) = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2(t),$$

kde α [rad] je úhel, který svírá rameno kuličky se svislou osou, $J_p = ml^2$ [kg m²] je moment setrvačnosti kuličky o hmotnosti m [kg] na nehmotném rameni o délce l [m]. Kinetická energie rotující kuličky okolo svislé osy je

$$E_{\text{ko}}(t) = \frac{1}{2} J_o \omega^2(t),$$

kde ω [rad s⁻¹] je úhlová rychlost Wattova regulátoru a $J_o = m(l \sin \alpha(t))^2$ [kg m²] je moment setrvačnosti kuličky o hmotnosti m [kg] rotující kolem svislé osy (MIKULČÁK, J., 2012).

Odtud je celková kinetická energie „polovičního“ Wattova regulátoru

$$E_k(t) = E_{kp}(t) + E_{ko}(t) = \frac{1}{2} ml^2 \dot{\alpha}^2(t) + \frac{1}{2} ml^2 \omega^2(t) \sin^2 \alpha(t). \quad (3.1)$$

Celková potenciální energie „polovičního“ Wattova regulátoru je

$$E_p(t) = -mgl \cos \alpha(t), \quad (3.2)$$

kde $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ je tíhové zrychlení.

Poté je možno zapsat Lagrangerovu funkci (NOSKIEVIČ, P., 1999; ROUBAL, J. et al., 2011) celého Wattova regulátoru

$$L(t) = 2E_k(t) - 2E_p(t) = ml^2 \dot{\alpha}^2(t) + ml^2 \omega^2(t) \sin^2 \alpha(t) + 2mgl \cos \alpha(t). \quad (3.3)$$

Tato funkce je dosazena do vztahu (NOSKIEVIČ, P., 1999; ROUBAL, J. et al., 2011)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(t)}{\partial \dot{\alpha}(t)} \right) - \frac{\partial L(t)}{\partial \alpha(t)} = 0,$$

čímž vznikne výsledná diferenciální rovnice popisující dynamiku Wattova regulátoru bez uvažování tření

$$2ml^2 \ddot{\alpha}(t) - 2ml^2 \omega^2(t) \sin \alpha(t) \cos \alpha(t) + 2mgl \sin \alpha(t) = 0. \quad (3.4)$$

Dále bude uvažováno tření úměrné rychlosti kývajících se ramen. Tím se rovnice (3.4) změní na

$$2ml^2 \ddot{\alpha}(t) - 2ml^2 \omega^2(t) \sin \alpha(t) \cos \alpha(t) + 2mgl \sin \alpha(t) = -\delta \dot{\alpha}(t), \quad (3.5)$$

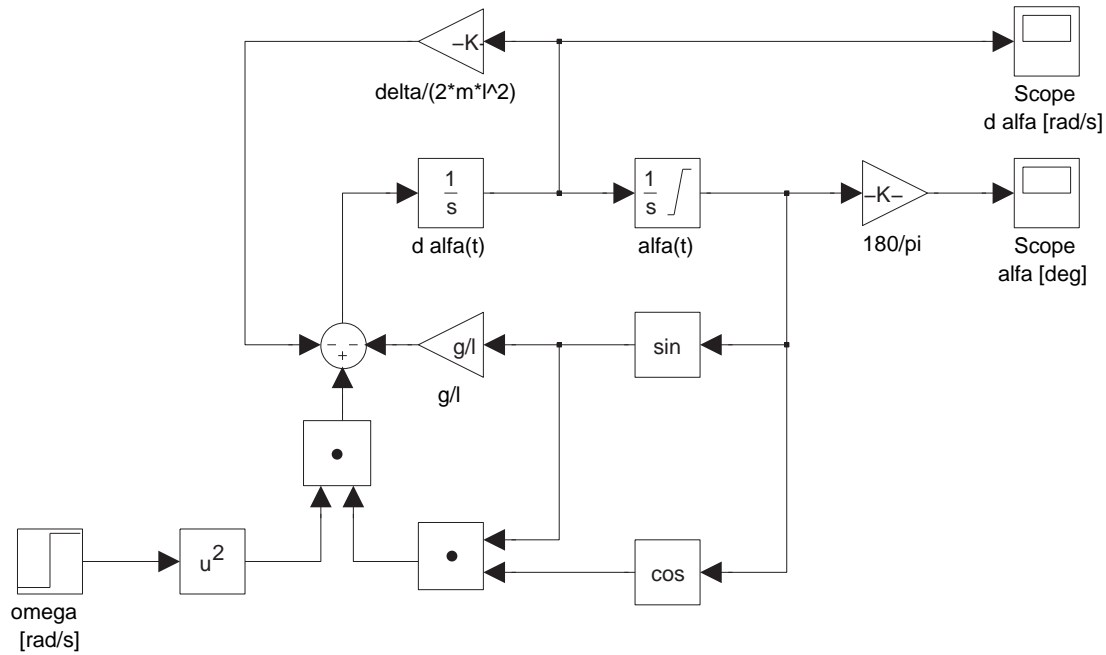
kde $\delta [\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}]$ je koeficient tření kývajících se ramen.

3.1.1 Simulinkový model Wattova regulátoru

Pro vytvoření simulinkového modelu, který je na následujícím obrázku, je třeba vyjádřit z rovnice (3.5) nejvyšší derivaci úhlu ramene

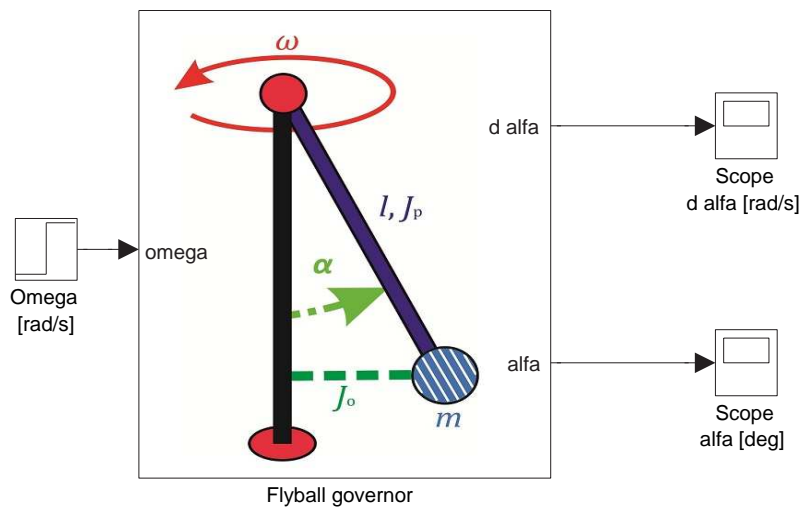
$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}(t) &= \frac{2ml^2 \omega^2(t) \sin \alpha(t) \cos \alpha(t) - \delta \dot{\alpha}(t) - 2mgl \sin \alpha(t)}{2ml^2} = \\ &= \omega^2(t) \sin \alpha(t) \cos \alpha(t) - \frac{\delta}{2ml^2} \dot{\alpha}(t) - \frac{g}{l} \sin \alpha(t). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Pak je tato rovnice přepsána na simulinkové schéma přesně podle postupu z (ROUBAL, J., 2012, strana 14 až 16).



Obrázek 3.2: Wattův regulátor – simulinkový model

Dále byl model z obr. 3.2 opatřen maskou, která slouží pro jednodušší zadávání konstant modelu. Masku byla pojmenována *Flyball governor* a byl do ní přidán obrázek znázorňující Wattův regulátor, viz následující obrázek. Vstupem této masky jsou otáčky osové tyče Wattova regulátoru ω a výstupem je úhel nosných ramen α a jejich rychlost otáčení $\dot{\alpha}$.



Obrázek 3.3: Wattův regulátor – maska simulinkového modelu

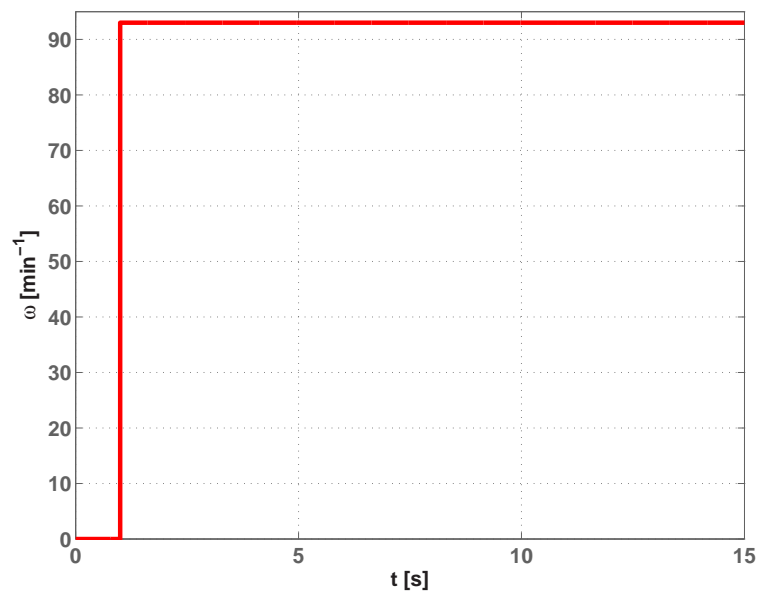
3.1.2 Kvalitativní analýza chování simulinkového modelu Wattova regulátoru

Pokud má být předchozí teoretický model z obr. 3.2 využit při návrhu konstrukce Wattova regulátoru, je zapotřebí ověřit kvalitativní správnost tohoto modelu. Pro tuto analýzu byly použity hodnoty z následující tabulky. Dále byl zkoumán vliv každého z těchto parametrů (ostatní nebyly měněny) na chování Wattova regulátoru. Toto testování bylo provedeno vždy pro tři hodnoty daného parametru.

Tabulka 3.1: Hodnoty veličin pro kvalitativní ověření simulinkového modelu Wattova regulátoru

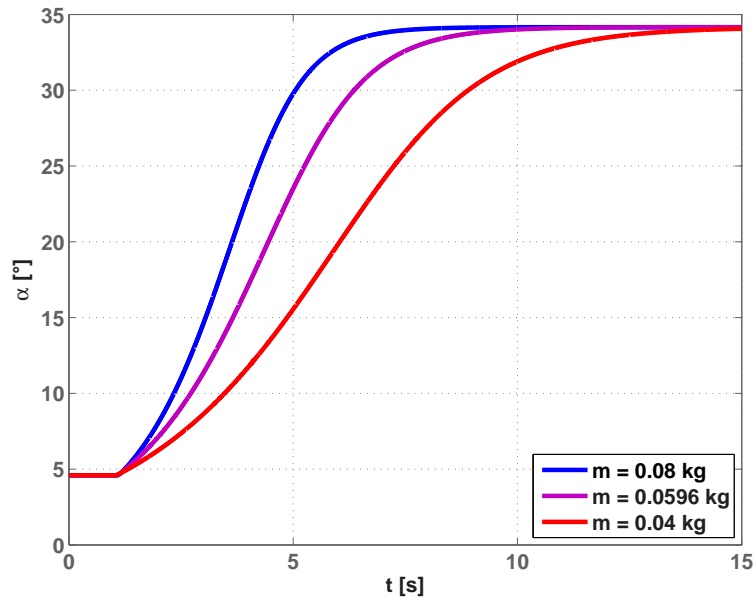
veličina	označení	hodnota	jednotka
hmotnost kuliček	m	0,0596	kg
délka nosných ramen	l	0,125	m
poloměr kuliček	r	0,01	m
koeficient tření	δ	0,06	kg m ² s ⁻¹
rychlost otáčení	ω	93	min ⁻¹

Pro následující čtyři experimenty (vliv hmotnosti kuliček, vliv délky nosných ramen, vliv poloměru kuliček a vliv koeficientu tření na chování Wattova regulátoru) byl použit průběh otáček podle následujícího obrázku.



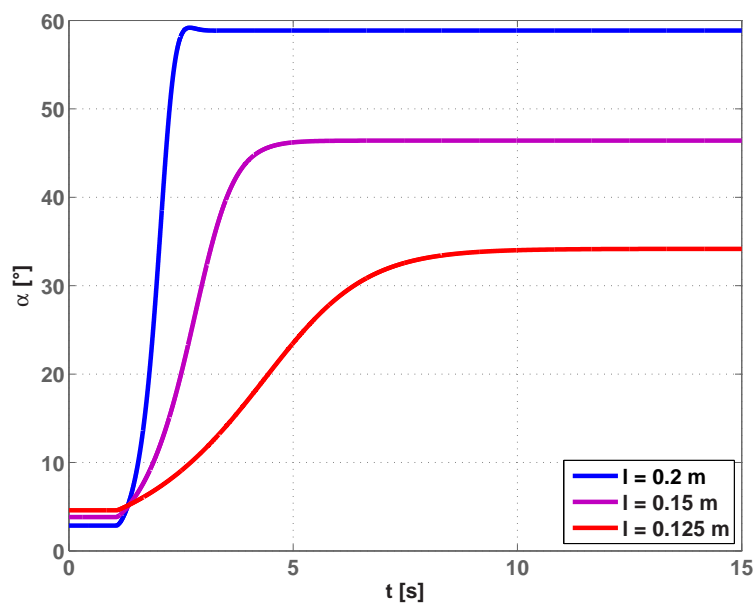
Obrázek 3.4: Průběh otáček Wattova odstředivého regulátoru

Na následujícím obrázku je znázorněn vliv hmotnosti balančních kuliček na chování regulátoru. Ze simulací vyplývá, že hmotnost kuliček nemá vliv na ustálené hodnoty úhlu nosných ramen. Dále je vidět, že lehčí kulička způsobí pomalejší zvedání ramen.



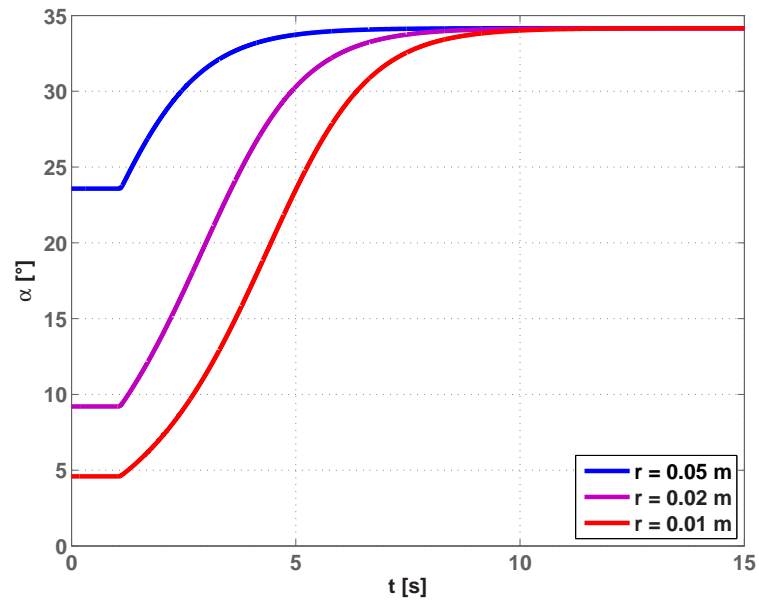
Obrázek 3.5: Odezva modelu – vliv hmotnosti balančních kuliček

Obrázek 3.6 představuje vliv délky nosných ramen na chování Wattova regulátoru. Ze simulací je patrné, že delší rameno způsobí větší ustálený úhel. Také je zde vidět, že delší rameno způsobí rychlejší ustálení nosných ramen.



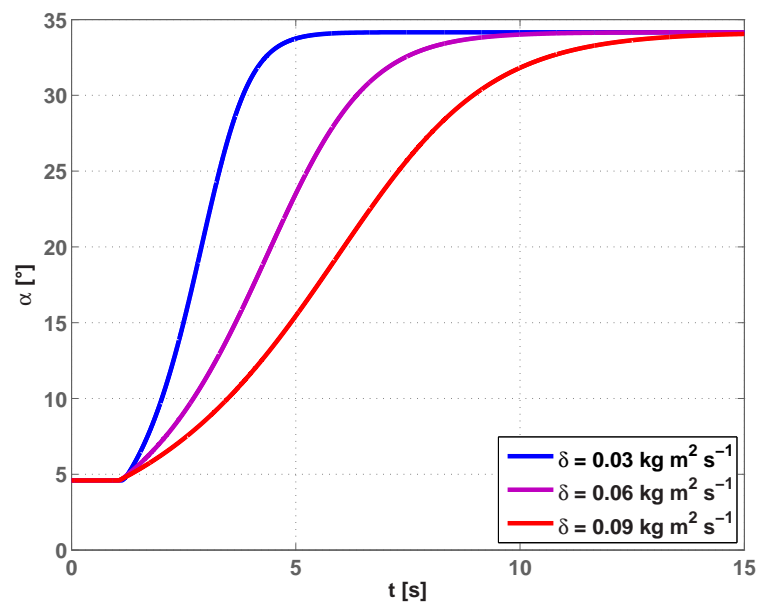
Obrázek 3.6: Odezva modelu – vliv délky nosných ramen

Na dalším obrázku je znázorněn vliv poloměru balančních kuliček na chování Wattova regulátoru. Ze simulací vyplývá, že poloměr kuliček nemá vliv na ustálené hodnoty úhlu nosných ramen ani na rychlost ustálení.



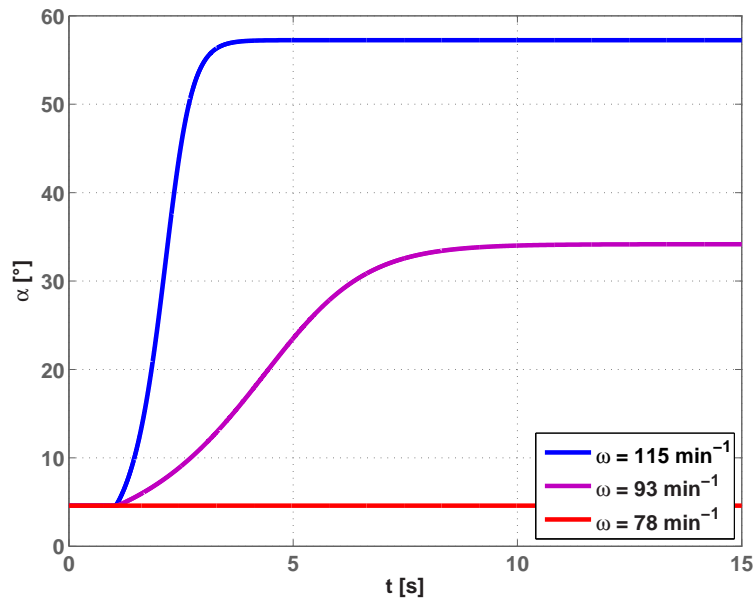
Obrázek 3.7: Odezva modelu – vliv poloměru kuliček

Niže uvedený obrázek 3.8 ukazuje vliv koeficientu tření nosných ramen na chování regulátoru. Koeficient tření nemá vliv na ustálenou hodnotu úhlu nosných ramen. Rychlost pohybu ramen závisí na koeficientu tření takto: čím je tření menší, tím je pohyb rychlejší.



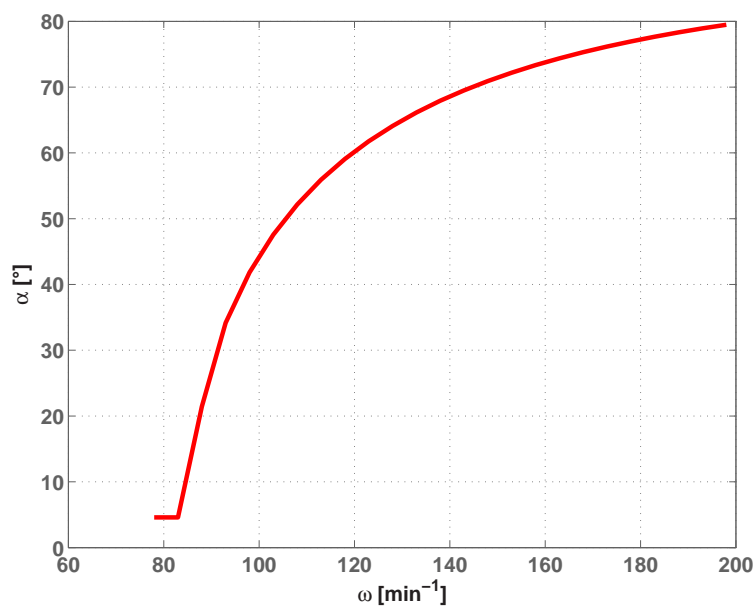
Obrázek 3.8: Odezva modelu – vliv koeficientu tření

Na následujícím obrázku je znázorněn vliv otáček osově tyče na chování Wattova regulátoru. Při tomto experimentu měly otáčky průběh podle obr. 3.4, jen ustálené hodnoty byly 78, 93 a 115 ot/min. Odtud vyplynulo, že úhel ramen závisí na rychlosti otáček takto: čím jsou otáčky větší, tím větší je ustálený úhel ramen a ustálení ramen je rychlejší. Též bylo zjištěno, že pro zvednutí ramen je zapotřebí minimálně 85 ot/min.



Obrázek 3.9: Odezva modelu – vliv rychlosti otáčení

Obrázek 3.10 znázorňuje závislost ustáleného úhlu ramen modelu regulátoru (3.6) na vstupních otáčkách, která bude zásadní pro výrobu reálného Wattova regulátoru.



Obrázek 3.10: Statická převodní charakteristika $\omega \rightarrow \alpha$

3.1.3 Analýza chování testovacího modelu Wattova regulátoru

Na níže uvedeném obrázku je vidět testovací model, který byl vyroben ze stavebnice Merkur (<http://www.merkurtoys.cz/>) a který posloužil jako prototyp pro ověření výsledků simulací z předchozí podkapitoly. Merkur je lehký a hlavně jednoduše smontovatelný a demontovatelný, proto byla práce hodně usnadněna při výměně jednotlivých komponentů – při testování. Testovací model byl poháněn stejnosměrným motorem s maximálním napětím 4,5 V. Otáčky testovacího modelu byly nastavovány pomocí napětí zdroje.



Obrázek 3.11: Wattův odstředivý regulátor – testovací model

Testování probíhalo následujícím způsobem. Testovací model Wattova regulátoru byl natočen kamerou a následně bylo video uloženo do počítače. Pomocí programu Matlab bylo rozděleno na jednotlivé snímky. Z těchto snímků byl pomocí goniometrických funkcí určen ustálený úhel nosných ramen a dále byly určeny otáčky testovacího modelu. Tento test byl proveden pro různá napětí (různé otáčky).

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty z tohoto testování spolu s hodnotami ze simulací v Simulinku (poslední sloupec). Z tabulky je patrné, že se naměřené a nasimu-

lované hodnoty ustálených úhlů nosných ramen příliš neliší. Tím je správnost Simulinkového modulu pro potřeby této práce dostatečně potvrzena.

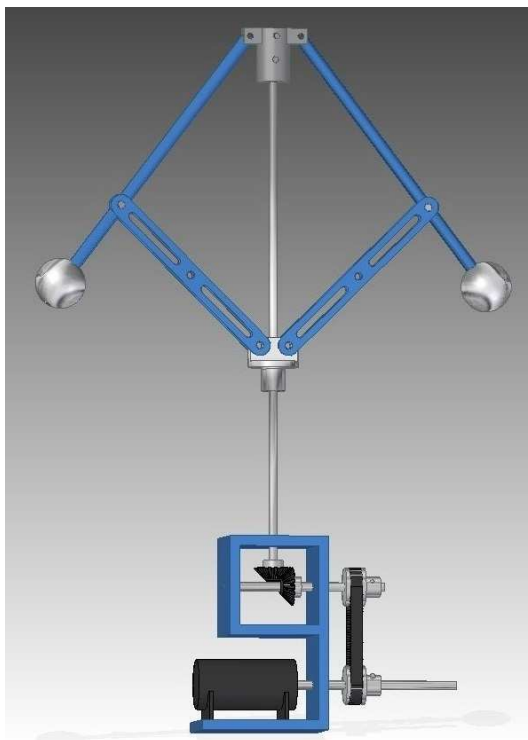
Tabulka 3.2: Srovnání testovacího a simulinkového modelu Wattova regulátoru

u [V]	Počet snímků	ω [ot/mim]	α_{Merkur} [°]	α_{Simulink} [°]
2,3	11	136,4	61,5	67,24
2,1	13	115,4	54,3	57,24
2,0	16	93,8	34,3	34,16

Kapitola 4

Výroba Wattova regulátoru

Tato kapitola popisuje vlastní výrobu Wattova regulátoru a jeho připojení k modelu Vodní elektrárny (BOŠTIČKA, J., 2014; PECHÁNEK, T., 2015). Nejprve bude popsána výroba vlastního regulátoru (rotujících kuliček na nosných ramenou) na základě simulací z kapitoly 3. Výkresová dokumentace k jeho výrobě je součástí přílohy F. Dále bude řešeno připojení regulátoru k soukolí turbína – tachodynamo. Nakonec bude navržen pákový mechanismus pro ovládání vodního paprsku, který otáčí turbínou.



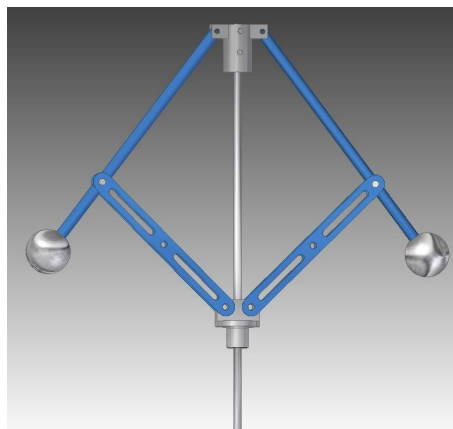
Obrázek 4.1: 3D model Wattova regulátoru

4.1 Wattův regulátor

Podle poznatků z kapitoly 3 byla navržena ramena Wattova regulátoru o délce 16 cm. Dále byla snaha vyrobit regulátor tak, aby neměl moc velký odpor vzduchu a zároveň neměl velkou hmotnost, to znamená, aby co nejvíce odpovídal teoretickým simulacím z kapitoly 3. Proto byl držák nosných a podpěrných ramen vyroben z duralu.

Výkresová dokumentace pro výrobu hlavní části Wattova regulátoru, která se skládá z následujících šesti částí, je v příloze F.

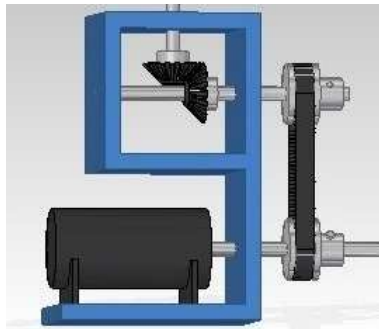
- Držák nosných ramen (výkres WATT-15/01A4) je k osově tyči uchycen dvěma otláčovacími šrouby.
- Držák podpěrných ramen (výkres WATT-15/02A4) je opatřen závitem, na který je vsazen prstenec, který ovládá pákový mechanismus viz podkapitola 4.3.
- Nosná ramena (výkres WATT-15/03A4, WATT-15/04A4, WATT-15/05A4) jsou uchycena na držáku nosných ramen pomocí šroubového spoje.
- Podpěrná ramena (výkres WATT-15/06A4, WATT-15/07A4) mají v sobě otvory z důvodu menšího odporu vzduchu. Jsou uchycena k držáku podpěrných ramen pomocí šroubovitého spoje a podpírají nosná ramena.
- Balanční kuličky (výkres WATT-15/08A4) musí být nejtěžší část Wattova regulátoru. Jsou uchyceny k nosným tyčím pomocí šroubového spoje, který umožní lehkou výměnu balančních kuliček.
- Osová tyč (výkres WATT-15/09A4)



Obrázek 4.2: Wattův regulátor – 3D model z prostředí Solid

4.2 Připojení Wattova regulátoru k tachodynamu

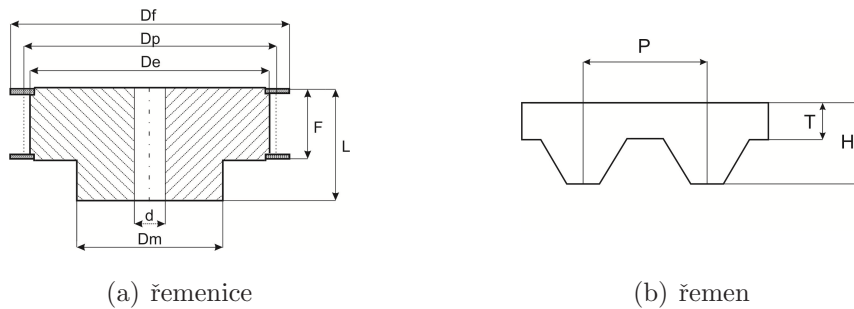
Připojit Wattův regulátor k tachodynamu byla celkem složitá úloha. Musely by být použity součásti, které pasují na již použité hřídele. Prvním návrhem bylo připevnit na hřídel tachodynamu kuželové kolo a druhé kuželové kolo umístit na osovou tyč Wattova regulátoru. Tak by byla převedena rotace v horizontální ose na rotaci v ose vertikální pouze pomocí kuželových kol. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné z důvodu nutnosti použití příliš dlouhé osově tyče regulátoru. Proto bylo přistoupeno k použití klínového převodu a kuželových kol, viz obr. 4.3. Nejprve však musela být vyrobena součást pro uchycení celého regulátoru na stávající systém (výkres WATT-15/13A4).



Obrázek 4.3: Připojení regulátoru k soukolí turbína – tachodynamo

4.2.1 Řemenový převod s ozubeným řemenem

Řemenový převod s ozubeným řemenem je tvořen minimálně dvěma řemenicemi a ozubeným řemenem. Převodový poměr je pevně dán poměrem zubů hnané a hnací řemenice (hřídele). Tento převod nemá žádný skluz, má konstantní úhlovou rychlost. Mezi velké výhody patří velmi vysoká účinnost (až 98% při dvouhřídelovém provozu).



(a) řemenice

(b) řemen

Obrázek 4.4: Náskres řemenice a řemenu

Na obr. 4.4(a) je náčrt řemenice s jejími parametry jako je průměr vnitřní díry (d), malý průměr, střední průměr a velký průměr (D_e , D_p a D_f), šířka věnce (F) a šířka řemenice (L). Všechny tyto parametry jsou důležité při výběru vhodné řemenice. V tabulce 4.1 jsou parametry řemenice, která byla použita pro připojení regulátoru k soukolí turbína – tachodynamo.

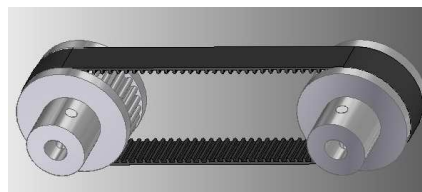
Tabulka 4.1: Parametry použité řemenice

Parametr	d	D_e	D_f	D_m	D_p	F	L
Hodnota [mm]	4	18	21,5	8	18,55	8	18

Na obr. 4.4(b) je schématický náčrt řemenu s jeho parametry: výškou řemenu (H), roztečí zubů (P) a výškou zubů (T). Dalším důležitým parametrem je šířka řemenu. V tabulce 4.2 jsou parametry řemenu, který byl použit pro připojení regulátoru k soukolí turbína – tachodynamo.

Tabulka 4.2: Parametry použitého řemenu s uzavřenou délkou 200 mm

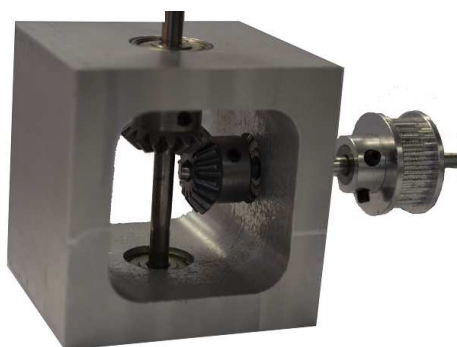
Parametr	šířka	H	P	T
Hodnota [mm]	6	1,38	2	0,63



Obrázek 4.5: Řemenový převod

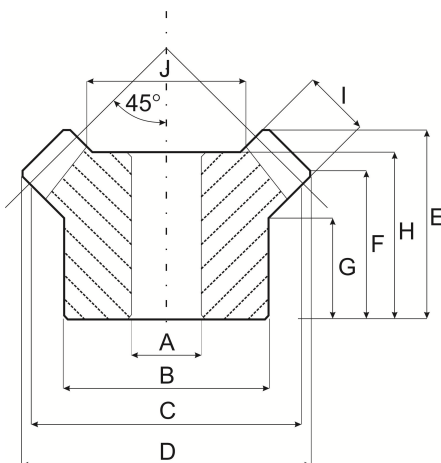
4.2.2 Kuželový převod

Pro kuželový převod byl sestaven domeček nejprve ze stavebnice Merkur. Toto řešení se ukázalo jako nevhodné z důvodu nepřesného uložení kuželového soukolí a měkkosti materiálu, který se časem velmi rychle opotřeboval. Proto byl nakonec tento domeček vyroben z duralu (výkres WATT-15/12A4) a osazen třemi kuličkovými ložisky s vnitřním průměrem 4 mm, vnějším průměrem 16 mm a výškou 5 mm. Ložiska byla do domečku nalisována za tepla (domeček byl zahřán a ložiska do něho byla vtlačena).



Obrázek 4.6: Domeček s kuželovým převodem a ložisky

Kuželový převod převádí rotaci ve vertikální ose na rotaci v ose horizontální v poměru 1:1. Na obr. 4.7 je znázorněn schématický náčrt kuželového kola s jeho parametry jako je průměr vnitřní díry (A), roztečný průměr (C), hlavový průměr (D), šířka ozubení (I) atd. Tyto parametry je nezbytné znát při výběru kuželového kola.



Obrázek 4.7: Kuželové kolo

Pro model Wattova regulátoru byla použita kuželová kola z oceli s parametry, které jsou uvedeny v následující tabulce. Do kuželových kol musely být vyvrtány otvory a vyříznuty závity pro otláčovací šrouby.

Tabulka 4.3: Rozměry použitého kuželového kola

Parametr	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Hodnota [mm]	4	13,3	16	17,4	11,2	7	6,5	11,2	4

4.3 Mechanismus pro ovládání vodního paprsku

Posledním problémem bylo vytvořit mechanismus, který převede svislý pohyb odstředivého regulátoru, respektive držáku podpěrných ramen, na vodorovný pohyb způsobující ovládání vodního paprsku. Nabízelo se hned několik možností, jak toho docílit. První možnost byla použít nějaký pákový mechanismus. Další způsob řešení bylo použití ozubených a lanových převodů nebo kulisového mechanismu. Největší problém bylo vyřešit poměr pohybů. Bylo potřeba převést 120 mm pohybu držáku podpěrných ramen na 20 mm pohybu škrtkového prvku. K tomu byl k dispozici prostor o rozměrech 60 × 60 × 50 mm. Na základě mnoha experimentů byl nakonec sestaven kulisový mechanismus s lineárním vedením a jehlou, která bude zasouvána do vodního paprsku.

4.3.1 Jehla pro narušování vodního paprsku

Jehla je ta část regulátoru, která má za úkol narušovat paprsek vody a tím zpomalovat otáčky turbíny na modelu Vodní elektrárny. Při experimentech bylo zjištěno, že i sebemenší narušení paprsku vody má velký vliv na otáčky turbíny. Proto bylo důležité vyrobít jehlu tak, aby byl paprsek při zasouvání jehly narušován plynule. Vyrobená jehla je na následujícím obrázku.



Obrázek 4.8: Jehla pro narušování vodního paprsku

4.3.2 Kulisový mechanismus

Pro převod pohybu držáku nosných ramen ve svislém směru na pohyb jehly ve vodorovném směru byl nakonec použit kulisový mechanismus. Ten je tvořen uhlíkovou tyčí a prstencem (výkres WATT-15/14A4), který je pomocí axiálního ložiska vložen mezi dr-

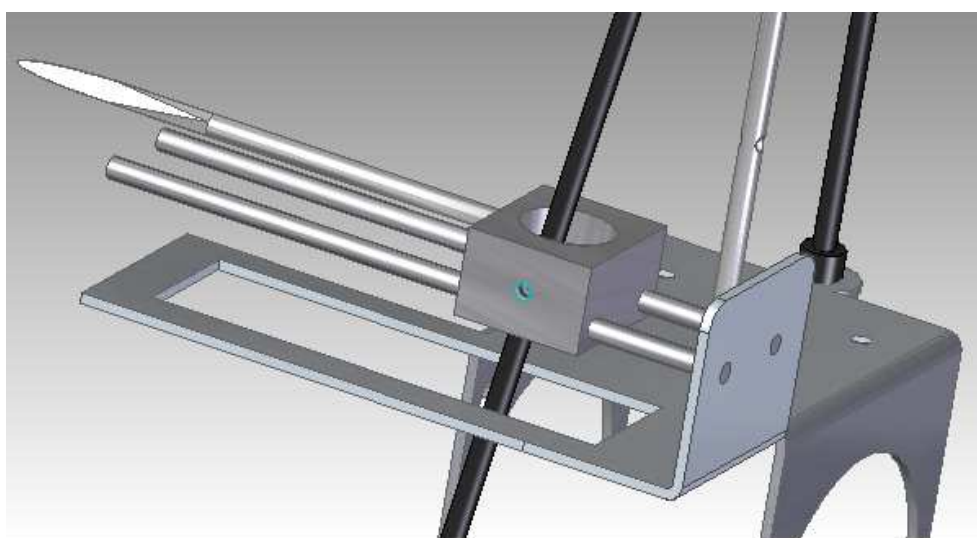
žák podpěrných ramen a matici na držák (výkres WATT-15/11A4). Sklonem uhlíkové tyče lze doladit poměr pohybů ve svislém a vodorovném směru. Aby se prstenec neotáčel s držákem podpěrných ramen, je na druhé straně prstenec zajištěn vodící tyčí, která prochází lineárním ložiskem. Fotografie kulisového mechanismu je na obr. 4.9.



Obrázek 4.9: Kulisový mechanismus

4.3.3 Lineární vedení

Na následujícím obrázku je vidět, jak je pomocí kulisy ovládána jehla. Je použito lineární vedení, po kterém se pohybuje vozík (výkres WATT-15/15A4). Vozík má uprostřed kruhový otvor, s možností natočení, kterým prochází kulisa (uhlíková tyč). Ta tlačí na vozík a tím ho posouvá po vodících tyčích. Na vozíku je připevněna jehla, která se s ním posouvá a tím rozráží paprsek vody.



Obrázek 4.10: Lineární vedení

4.4 Krabička na náhradní díly

Jako poslední krok byla udělána takzvaná „třešnička na dortu“ neboli krabička na náhradní díly. Byla zakoupena okrasná dřevěná krabička, na kterou byl ve škole na gravírovacím laserovém stroji vypálen potisk s obrázkem. Poté byla krabička nalakována bezbarvým lakem, aby nedošlo k poškození potisku. Krabička je na následujících obrázcích.



Obrázek 4.11: Krabička na náhradní díly

Nakonec byla do krabičky vyrobena pěna, která byla navržena v programu Solid Edge přesně na míru krabičky. Do výroby byl poslán model ve formátu `.stp`, podle kterého byla pěna vyrobena.



Obrázek 4.12: Krabička na náhradní díly

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit Wattův odstředivý regulátor, který bude řídit otáčky turbíny na modelu Vodní elektrárny. Tento regulátor bude využíván jako názorná učební pomůcka a bude umístěn v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky na Vyšší odborné škole, Střední škole a Centru odborné přípravy v Sezimově Ústí (<http://www.copsu.cz/>).

Nejprve bylo uvedeno něco málo z historie o parním stroji, Wattovu odstředivém regulátoru a jeho vynálezci. Také bylo popsáno několik příkladů, kde se Wattův regulátor dříve používal, aby si čtenář vytvořil představu, jak regulátor vypadal.

Poté byl, za veliké pomoci vedoucího práce a doc. Ing. Petra Huška, Ph.D. z ČVUT v Praze, Fakulty elektrotechnické, sestaven matematicko-fyzikální model odstředivého regulátoru. Tento model byl následně naprogramován do prostředí Simulink. Tím bylo umožněno testovat vliv parametrů (délka nosných ramen, hmotnost a poloměr balančních kuliček atd.) regulátoru na jeho chování. Následně byl vytvořen zkušební model ze stavebnice Merkur, na kterém byl matematicko-fyzikální model experimentálně ověřen. Srovnání teoretického modelu s jeho zkušební verzí je uveden v závěru kapitoly 3.

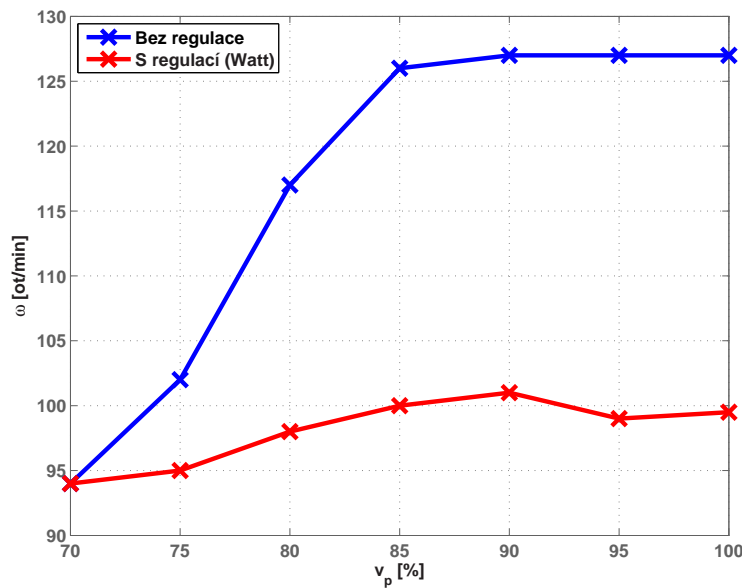
Následujícím krokem bylo pomocí řemenového převodu a kuželového převodu přenést otáčky ze soukolí turbína-tachodynamo na Wattův regulátor. Byl vyroben držák, na který byl uchycen domeček pro kuželový převod. Poté byla zahájena výroba regulátoru včetně odlišných náhradních dílů umožňujících změnu konfigurace a potažmo i změnu vlastností regulátoru. Nakonec byl navržen a sestaven kulisový mechanismus s lineárním vedením, který převádí pohyb držáku podpěrných ramen na pohyb jehly, která narušuje paprsek vody, a tím reguluje otáčky soukolí turbína-tachodynamo.

Na závěr byla ověřena funkce vyrobeného Wattova regulátoru. V horní nádrži byla pomocí odstředivého čerpadla udržována konstantní hladina (33 cm). V této situaci byla

změřena závislost otáček soukolí turbína-tachodynamo na otevření proporcionálního ventilu, který byl otevírán v rozsahu 70 až 100%. Toto měření bylo provedeno s regulací otáček pomocí Wattova regulátoru i bez regulace otáček (byla demontována uhlíková tyč z kulisového mechanismu). Výsledky těchto experimentů jsou shrnuty a znázorněny v následující tabulce a grafu.

Tabulka 5.1: Závislost otáček turbíny na otevření proporcionálního ventilu

v_p [%]	70	75	80	85	90	95	100
ω [min^{-1}] bez regulace	94	102	117	126	127	127	127
ω [min^{-1}] s regulací	94	95	98	100	101	99	99,5

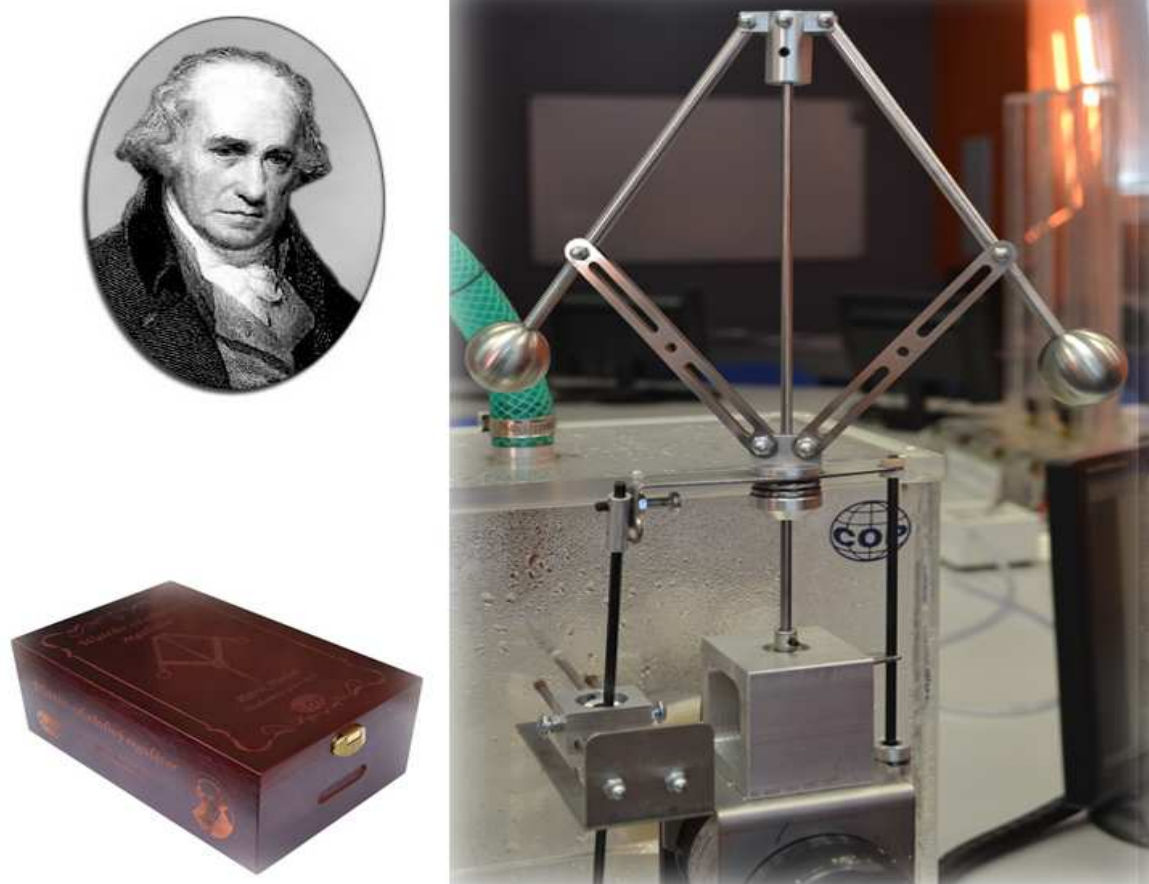


Obrázek 5.1: Závislost otáček turbíny na otevření proporcionálního ventilu

Z obr. 5.1 je patrný vliv Wattova regulátoru na otáčky soukolí turbína-tachodynamo. Při otevírání proporcionálního ventilu (zvyšování kinetické energie vodního paprsku dopadajícího na lopatky turbíny), Wattův regulátor stabilizuje otáčky tohoto soukolí (červený průběh) na rozdíl od situace, kdy je demontována uhlíková tyč z kulisového mechanismu (modrý průběh).

Závěrem lze bez nadsázky konstatovat, že odměnou za tvrdou práci je model, který výborně funguje a splnil očekávání na něj kladená. Regulátor bude sloužit jako učební

pomůcka v Laboratoři aplikované informatiky a fyziky. Narozdíl od počítačů nepotřebuje ke své funkci elektrickou energii jako je tomu při řízení všech ostatní modelů v laboratoři. Stačí mu pouze otáčky turbíny na modelu Vodní elektrárny. Jako bonus byly také vyrobeny náhradní díly s odlišnými parametry a z odlišných materiálů, které jsou uloženy v boxu na obr. 4.12. Tak bude možno regulátor upravovat, a tím měnit jeho vlastnosti při regulaci. Z toho bude patrné, jaký vliv na regulaci mají jednotlivé součásti, ze kterých je Wattův regulátor složen.



Obrázek 5.2: Fotografie vyrobeného Wattova regulátoru

Po dokončení výroby a instalace Wattova regulátoru na modelu Vodní elektrárny byl podle scénáře, který je na příloženém DVD, natočen a sestříhán Ladislavem Kadlecem dokumentární film o této absolventské práci. Dokument může posloužit jako náborové video pro studium na vyšší odborné škole. Tento soubor s názvem C227_Watt.mp4 se nachází se na příloženém DVD.



Obrázek 5.3: Dokumentární film o výrobě Wattova regulátoru

Literatura

- BOŠTIČKA, J. (2014), Model vodní elektrárny – elektronika, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- HONN, T. A STONE, S. (2003), A Differential Look at the Watt's Governor. [cit. 2014-11-01], <http://online.redwoods.edu/instruct/darnold/deproj/>.
- JÍLEK, F. (1988), *Zrození velkých vynálezů. Příběhy mužů, kteří změnili svět*, Praha: Práce. ISBN 24-001-88.
- KUPKA, L. (2007), *MATLAB & Simulink úvod do použití*, Lanškroun: JSRINT CZ s.r.o. ISBN 978-80-239-8871-0.
- LEPIL, O., BEDNAŘÍK, M. A HÝBLOVÁ, R. (2012), *Fyzika pro střední školy II*, 4. přepracované vydání s cd edn, Praha: PROMETHEUS. ISBN 978-80-7196-429-2.
- MAXWELL, J. C. (1868), 'On Governors', *Proceedings of the Royal Society* **2**(100), 270–283.
- MIKULČÁK, J. (2012), *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*, Praha: PROMETHEUS. ISBN 8085849844.
- NOSKIEVIČ, P. (1999), *Modelování a identifikace systémů*, Montanex, a.s., Ostrava. ISBN 80-7225-030-2.
- PECHÁNEK, T. (2015), Konstrukce modelů vytápěného domku a vodní elektrárny, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- RABIŇÁK, P. (2014), Model vytápěného domku – elektronika, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.
- ROUBAL, J. (2012), Výukové materiály pro Laboratoř aplikované informatiky na VOŠ, (Bakalářská práce), ČVUT v Praze, MUVS, Praha.

ROUBAL, J., HUŠEK, P. A KOL. (2011), *Regulační technika v příkladech*, Praha: BEN – technická literatura. ISBN 978-80-7300-260-2.

SCHENK, C. (2009), MiKTeX [online]. [cit. 2009-06-16], [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/).

ŠIKÝŘ, T. (2011), Systém vodního hospodářství – laboratorní model, (Absolventská práce), VOŠ, SŠ, COP Sezimovo Ústí, Sezimovo Ústí.

Wikipedie – Otevřená encyklopedie [online] (2014). [cit. 2014-12-01], [⟨http://wikipedia.org/⟩](http://wikipedia.org/).

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

K této práci je přiloženo DVD s následující adresářovou strukturou.

- Absolventská práce v \LaTeX 2 ϵ
- Fotodokumentace
- Informační štítek modelu regulátoru
- Matlab: simulinkové schéma a zdrojové kódy pro tvorbu grafů (umístění v adresáři Absolventská práce v \LaTeX 2 ϵ /03_Chapter3)
- Objednávky a faktury
- Simulinkový model Wattova regulátoru
- Video záznamy
 - 3D model Wattova regulátoru
 - Řízení turbíny Wattovým regulátorem
 - Testovací model Wattova regulátoru - Merkur
 - Wattův regulátor - dokument
 - * Watt - scénář.pdf: scénář k dokumentárnímu filmu
 - * C227_Watt.mp4: dokumentární film
- Výkresová dokumentace a 3D model
 - 3D Model

– Výkresy

- * DFT: formát ze Solid Edge pro jednoduchou úpravu výkresů
 - * PDF: export výkresů do PDF formátu
- Pavlat_AP_2015.pdf – absolventská práce ve formátu PDF

Příloha B

Použitý software

Corel Draw [⟨http://apps.corel.com/int/cz/products/cdgs/⟩](http://apps.corel.com/int/cz/products/cdgs/)

L^AT_EX2e [⟨http://www.miktex.org/⟩](http://www.miktex.org/)

MATLAB/Simulink R2010b [⟨http://www.mathworks.com/⟩](http://www.mathworks.com/)

Solid Edge ST7 [⟨http://www.siemens.com/plm/⟩](http://www.siemens.com/plm/)

WinEdt 6.0 [⟨http://www.winedt.com/⟩](http://www.winedt.com/)

Software z výše uvedeného seznamu je buď volně dostupný, nebo je toho času jeho vlastníkem Vyšší odborná škola, Střední škola, Centrum odborné přípravy, Sezimovo Ústí, Budějovická 421, kde autor téhož času studoval a vytvořil tuto absolventskou práci.

Příloha C

Časový plán absolventské práce

Činnost	Časová náročnost	Termín ukončení	Splněno
Návrh modelu Wattova regulátoru	1 týden	02.09.2014	04.09.2014
Tvorba matematického modelu	1 měsíc	23.10.2014	20.10.2014
Testování matematického modelu	4 týdny	20.11.2014	14.11.2014
Testování zkušebního modelu	2 týdny	04.12.2014	16.12.2014
3D model	6 týdnů	23.01.2015	17.01.2015
Pořízení součástí na Wattův regulátor	3 týdny	18.03.2015	15.04.2015
Vyrobení součástek	2 týdny	19.03.2015	17.04.2015
Montáž Wattova regulator	1 měsíc	20.03.2015	17.04.2015
AP: kompletní text	8 měsíců	30.04.2015	01.05.2015
Sestavení kulisového mechanismu	1 měsíc	20.04.2015	04.05.2015

Příloha D

Tvorba modelu v čase

- 22.05.2013** Nápad p. Roubala vyrobit Wattův regulátor
- 29.05.2013** Diskuze nad konkrétním zadáním AP
- 04.09.2014** První 3D model Wattova regulátoru
- 14.09.2014** Začátek psaní kapitoly 2
- 06.10.2014** Sestavení matematicko-fyzikálního modelu (rovnice)
- 08.10.2014** Vytvoření simulinkového modelu
- 20.11.2014** Začátek psaní kapitoly 3
- 09.03.2015** Dokončena kapitola 2
- 13.03.2015** Předaný kompletní model vodní elektrárny (PECHÁNEK, T., 2015)
- 18.03.2015** Testování na zkušebním modelu (Merkur)
- 23.03.2015** Dokončena kapitola 3
- 24.03.2015** Začátek psaní kapitoly 4
- 30.03.2015** Finální 3D model Wattova regulátoru
- 31.03.2015** Objednávka řemenů a řemenic
- 03.04.2015** Dorazily řemeny a řemenice
- 07.04.2015** Vyrobená nosná ramena

- 09.04.2015** Instalace řemenu a řemenic
- 10.04.2015** Objednávka balančních kuliček
- 14.04.2015** Dorazily balanční kuličky
- 17.04.2015** Vyroben držák nosných ramen a držák podpěrných ramen
- 17.04.2015** Sestaven Wattův regulátor
- 23.04.2015** Dokončena kapitola Úvod
- 23.04.2015** Dorazil duralový material a krabička na náhradní díly
- 24.04.2015** Objednávka kuželových kol
- 29.04.2015** Nákup ložisek
- 29.04.2015** Dorazila pěna do krabičky
- 29.04.2015** Vyroben kulisa
- 30.04.2015** Dorazila kuželová kole
- 30.04.2015** Vyroben domeček na kuželový převod
- 01.05.2015** Dokončena kapitola 4
- 01.05.2015** Dokončena kapitola Závěr
- 04.05.2015** Sestaven kulisový mechanismus
- 17.06.2015** Natočeny záběry pro videozáznam o výrobě Wattova regulátoru
- 26.06.2015** Dokumentární film o výrobě Wattova regulátoru

Příloha E

Rozpočet projektu

Následující tabulka uvádí finanční rozpočet modelu zahrnující nákupy jednotlivých součástí a zakázky realizované mimo školu. Ceny jsou uvedeny za standardní metráž včetně DPH bez poštovního a balného.

Tabulka E.1: Finanční rozpočet projektu

Komponenta	Kusů	Cena za kus	Cena celkem
Duralová tyč 1 m Ø6 mm	1	25,-	25,-
Duralový materiál na domeček	1	50,-	50,-
Koule plná Ø20 mm se závitem M6	2	55,-	110,-
Koule plná Ø25 mm se závitem M6	4	83,-	332,-
Koule plná Ø30 mm se závitem M6	2	107,-	214,-
Krabička na náhradní díly	1	35,-	35,-
Kuželová kola 16 zubů, Ø4 mm	2	241,-	482,-
Ložisko 624 a 634	1+3	44+78,-	274,-
Ložisko axiální 5110	2	67,-	134,-
Ložisko lineární LM4UU	1	32,-	32,-
Ocelová tyč Ø4 mm ocel 17	1	97,-	97,-
Ocelová tyč Ø4 mm ocel 19	1	78,-	78,-
Řemen GT2 /š.6/ délka 200 mm	2	39,-	78,-
Řemenice GT2 /š.6/ 30 zubů, Ø5 mm	2	110,-	220,-
Řemenice GT2 /š.6/ 15 zubů, Ø5 mm	2	79,-	158,-
Uhlíková kulatina Ø4 mm	1	95,-	95,-
Celková částka	-	-	2 418,-

Následující tabulka uvádí hodinový rozpočet práce na výrobě modelu realizované v rámci školy. Tabulka obsahuje zkratky, které znamenají: AP – absolventská práce, OV – úsek odborného výcviku, E – úsek elektro, AM – aplikovaná mechanika.

Tabulka E.2: Hodinový rozpočet projektu

Práce	Člověko- hodin	Pracovník
Návrh modelu Wattova regulátoru	45	autor AP
Tvorba matematického modelu	70	autor AP, vedoucí AP
Testování matematického modelu	35	autor AP, vedoucí AP
Testování zkušebního modelu	30	autor AP, vedoucí AP
3D model	55	autor AP
Vyrobení součástek	30	autor AP, učitel OV
Montáž Wattova regulátoru	55	autor AP, vedoucí AP
Sestavení kulisového mechanismu	150	autor AP, vedoucí AP, učitel AM
Text AP	235	autor AP, vedoucí AP
Celkem	705	-

Jen pro ilustraci předpokládejme taxu 150,- Kč za hodinu, poté je celková cena práce 105 750,- Kč. Laboratorní model tedy celkově vyjde na 108 168,- Kč. Jen pro srovnání cena profi modelu jedné německé firmy činí 84 990,- Kč. Tento model ale nic nereguluje a je roztáčen pouze ruční kličkou.

Příloha F

Výkresová dokumentace

Na následujících stránkách je kompletní výkresová dokumentace vytvořená v programovém prostředí Solid Edge ST7.