

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Historie zpětnovazebního řízení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav DRAGOUN**
Osobní číslo: **E13B0013P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Historie zpětnovazebního řízení**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Sestavte stručný přehled historických milníků vývoje zpětnovazební regulace.
2. Sestavte simulační model vybrané historické regulační smyčky.
3. Provedte návrh parametrů vybraného historického regulátoru.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bennett, S. A History of Control Engineering 1800-1930, Peter Peregrinus, Stevenage.
2. Bennett, S. A History of Control Engineering 1930-1955, Peter Peregrinus, Stevenage.
3. Mayr, O. Zur Frühgeschichte der technischen Regelungen, Oldenbourg, Munich.

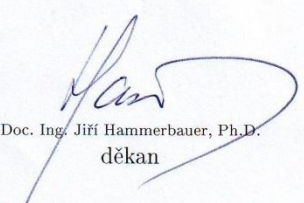
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Janda, Ph.D.

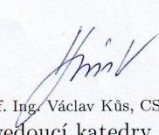
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce má za úkol popsat historické milníky v oblasti vývoje a využití zpětné vazby od jejího prvního využití ve starověkém Řecku do příchodu moderních způsobů regulace po druhé světové válce. Zaměřuje se hlavně na regulátory, které byly ve své době významné, nebo důležité pro další vývoj. Dále je jejím účelem popis návrhu simulačního modelu Wattova regulátoru, který jsem vytvořil v programu Simulink, a návrh parametrů tohoto regulátoru pro regulaci elektromotoru.

Klíčová slova

Zpětná vazba, regulace, automatizace, Wattův regulátor, průmyslová revoluce, Simulink

Abstract

This bachelors work describes historical milestones in the field of development and usage of feedback since ancient Greek, to discovery of modern ways of regulation after second world war. It pays attention mainly to regulators, which was significant in their times or important for future development. Next it describes simulation of watt regulator, which I made in program Simulink and designing parameters of this regulator for regulation of electric motor.

Key words

Feedback, regulation, automation, Watt regulator, industrial revolution, Simulink

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 30.5.2016

Jaroslav Dragoun

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Jandovi, Ph. D. za cenné rady, připomínky a poskytnutí informačních zdrojů k této práci.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 HISTORIE ZPĚTNÉ VAZBY	12
1.1 HODINY	13
1.1.1 <i>Vodní hodiny</i>	13
1.1.2 <i>Mechanické hodiny</i>	14
1.2 REGULACE POHONŮ	16
1.2.1 <i>Mlýny</i>	16
1.2.2 <i>Wattův regulátor</i>	16
1.2.3 <i>Hydraulické a pneumatické regulátory</i>	17
1.2.4 <i>Chronometrický regulátor</i>	18
1.2.5 <i>Výstředníkový regulátor</i>	19
1.2.6 <i>Nevydařené pokusy</i>	20
1.3 POROZUMĚNÍ STABILITĚ	21
1.3.1 <i>Analýza ustáleného stavu</i>	21
1.3.2 <i>Sir George Biddell Airy</i>	22
1.3.3 <i>Clerk Maxwell a Edward Routh</i>	22
1.4 SERVOMOTORY	23
1.4.1 <i>Parní Servomotor</i>	23
1.4.2 <i>Hydraulický servomotor</i>	24
1.4.3 <i>Elektrické servomotory</i>	24
1.4.4 <i>Autopilot</i>	24
1.4.5 <i>Torpéda</i>	25
1.4.6 <i>Stabilizace lodí</i>	26
1.5 ZPĚTNÁ VAZBA V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH.....	28
1.5.1 <i>Obloukové lampy</i>	28
1.5.2 <i>Výroba elektrické energie</i>	29
1.5.3 <i>Elektromotory</i>	30
1.5.4 <i>Elektronická regulace napětí</i>	30
1.5.5 <i>Pohony v průmyslu</i>	31
1.5.6 <i>Amplidyn a Metadyn</i>	32
1.6 SDĚLOVACÍ TECHNIKA A KRITÉRIUM STABILITY	33
1.7 AUTOMATIZACE VÝROBY	35
1.7.1 <i>Měření veličin</i>	35
1.7.2 <i>Změna výrobních procesů</i>	35
1.7.3 <i>Stabilog</i>	36
1.7.4 <i>Pneumatický PID kontrolér</i>	36
1.7.5 <i>Nastavení PID kontroléru</i>	37
1.8 DRUHÁ SVĚTOVÁ VÁLKA	38
1.9 MODERNÍ PŘÍSTUP K REGULACI.....	39
2 SIMULACE	40
2.1 VYTVOŘENÍ SIMULAČNÍHO MODELU	40
2.1.1 <i>Kyvadlo</i>	40
2.1.2 <i>Výpočet poloměru otáčení</i>	42
2.1.3 <i>Úprava signálu pro reálné chování regulátoru</i>	43
2.1.4 <i>Tření</i>	44
2.1.5 <i>Regulátor jako celek</i>	45
2.2 CHOVÁNÍ REGULÁTORU.....	46
2.2.1 <i>Změna délky ramene</i>	46

2.2.2	<i>Změna třecí síly</i>	48
2.3	POUŽITÍ REGULÁTORU PRO REGULACI MALÉHO ELEKTROMOTORU	49
2.3.1	<i>Návrh parametrů</i>	49
2.3.2	<i>Chování soustavy</i>	51
ZÁVĚR		53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ		54
PŘÍLOHY		1

Seznam symbolů a zkratek

h	výstup z regulátoru
g	tíhové zrychlení [$m*s^{-2}$]
ω	úhlová rychlost [$rad*s^{-1}$]
F	síla [N]
r	poloměr otáčení [m]
m	hmotnost [kg]
l	délka ramene [m]
a	zrychlení [$m*s^{-2}$]
s	výška kyvadla [m]
v	rychlost [$m*s^{-1}$]
Φ	magnetický tok [Wb]
c	konstanta motoru
M	moment [$N*m$]
I	proud [A]
J	moment setrvačnosti [$kg*m^{-2}$]
f	frekvence [Hz]
ρ	hustota [$kg*m^{-3}$]
d	průměr [m]
x	stlačení pružiny [m]
k	tuhost pružiny [$N*m^{-1}$]

Úvod

Předkládaná práce se věnuje historii zpětnovazebního řízení. Text je rozdělen do dvou částí. První se věnuje historickým milníkům ve vývoji zpětnovazebního řízení, zaměřuje se hlavně na zpětnou vazbu v regulačních systémech a u jednodušších zařízení popisuje princip jejich fungování. U složitějších zařízení a teorie je popis pouze přibližný, aby nebyl omezen historický rozsah práce. Ve druhé části je popsán postup návrhu simulace Wattova regulátoru a volba jeho parametrů pro regulaci elektromotoru. V postupu návrhu regulátoru jsou uvedeny nejdůležitější rovnice a popsán princip fungování jednotlivých bloků simulace.

Účelem této práce je sloužit jako pomoc při výuce regulační techniky. Já jsem si toto téma vybral, jelikož mi přišlo zajímavé dozvědět se více o vývoji technologií, které nyní považujeme za samozřejmost a také mám rád staré vynálezy, to jak jsou jednoduché, ale přesto zvládnou plnit svou funkci. Proto jsem se chtěl také zamyslet nad jejich potenciálem a tím zda by zvládly zastat práci moderních zařízení.

1 Historie zpětné vazby

Regulace je potřebná v mnoha odvětvích, kde má nejrůznější úkoly. Od udržení konstantní teploty v líhni pro kuřata, až po pohon zaoceánského parníku. Díky tomu, že zasahuje do několika různých odvětví a v minulosti byl také problém se vzájemnou komunikací mezi odborníky, kteří se regulací zabývali. Je velmi komplikované dát dohromady přesný obrázek toho jak vývoj probíhal, proto jsem se snažil věnovat pozornost všem objevům a vynálezům, které mi přišly, jako významné ve své době, nebo důležité pro další vývoj.

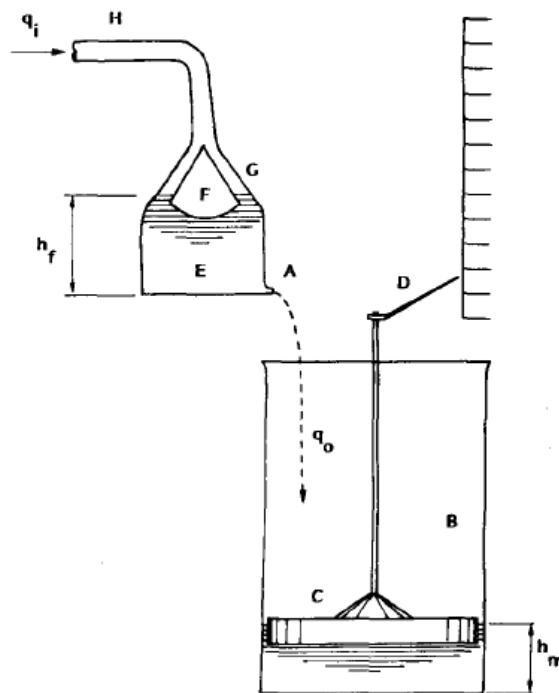
Text jsem se snažil členit chronologicky, ale také shlukovat jednotlivé vynálezy a objevy do kapitol podle toho, jaký problém řešily a jaký byl princip jejich fungování.

Znalosti systémů využívajících zpětnou vazbu má lidstvo již od dob antického Řecka, kde pomáhali hlavně při práci s kapalinami. Hlídaly hladinu vody nebo doplňovaly olej do lamp. Z Řecka se dostali do arabského světa, kde se uchovali až do doby kdy byli západní civilizací na konci období renesance znovuobjeveny. Opravdu rychlý vývoj, pak prodělaly regulační systémy v období průmyslové revoluce, kde musely vyřešit technické problémy spojené s nově vynalezeným parním strojem a zařízeními využívajícími elektřinu.

1.1 Hodiny

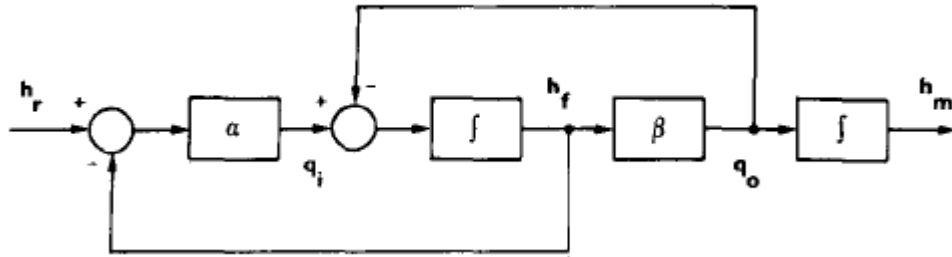
1.1.1 Vodní hodiny

Pravděpodobně prvním zařízením obsahujícím, zpětnovazební smyčku byly vodní hodiny (Obr. 1.1), které popsal Vitruvius, ale pravděpodobně byly vytvořené Ktesibiem přibližně v roce 270 před Kristem [2]. Tyto hodiny jsou tvořeny dvěma nádobami. Z první nádoby (E) voda vytéká a pomalu plní druhou nádobu (B), množství vody (h_m) v druhé nádobě odpovídá měřenému času. Problém je v tom, že jak v první nádobě ubývá voda, snižuje se tlak pod kterým voda odtéká. Toto Ktesibijs vyřešil tak že do první nádoby umístil kuželovitý plovák (F) který při poklesu hladiny uvolní hrdlo nádoby (G) a po doplnění na požadovanou výšku hladiny hrdlo opět uzavře.



Obr. 1.1 Nákres Ktesibiových vodních hodin [5]

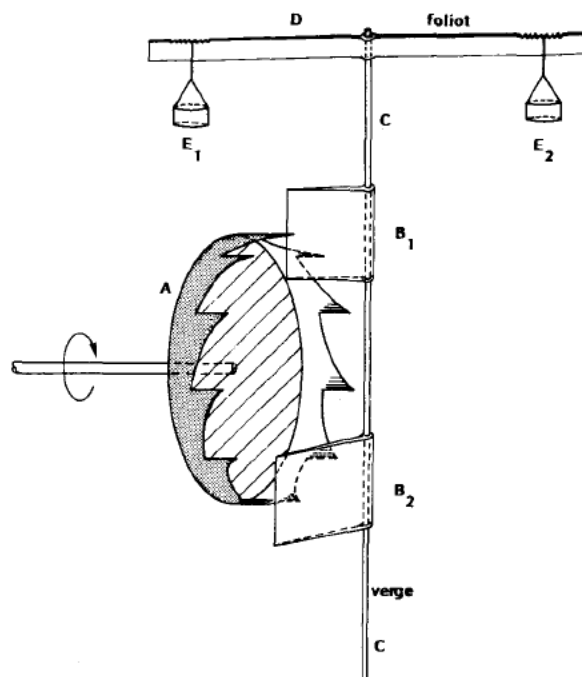
V blokovém schématu (Obr. 1.2) je vidět, že tyto hodiny obsahovaly dvě zpětnovazební smyčky. Spodní zpětnovazební smyčka udává množství vody které do první nádoby přitéká, což je dáno rozdílem h_r a h_f . Hodnota h_r udává požadovanou výšku hladiny a h_f je skutečná výška hladiny v první nádobě. Druhá zpětnovazební smyčka udává rychlost přírůstku vody v první nádobě a je dána rozdílem q_i a q_o . Hodnota q_i udává množství přitékající vody a q_o udává množství vody odtékající. [5 s. 3-4]



Obr. 1.2 Blokový diagram Ktesibiových vodních hodin [5]

1.1.2 Mechanické hodiny

Další krok ve vývoji hodin přišel ve středověku v podobě mechanických hodin poháněných pomocí závaží nebo pružin. U těchto hodin byl opět problém s udržení konstantní rychlosti běhu. Řešením bylo použití lihýře a vřetenového kroku (Obr. 1.3). Lihýř (D) tvoří setrvačnou část regulátoru, je tvořen a dvěma závažími (E1,E2) umístěnými na hřídeli (C). Vřetenový krok (A) zajišťuje regulaci rychlosti hodinového mechanismu a dodává energii setrvačné části regulátoru, toto je zajištěno kombinací lopatek (B1,B2) umístěných na stejné hřídeli, jako lihýř a krokového kola, které je spojeno s pohonem hodin. Regulátor tedy funguje tak, že pohon hodin přes krokové kolo dodá energii lihýři, ten se pootočí a společně s ním se pootočí i krokové kolo, když se první lopatka dostane z dosahu kola, zachytí se o něj lopatka druhá. Ta se v tuto chvíli díky setrvačnosti lihýře pohybuje opačným směrem než krokové kolo, proto s ním nejprve pootočí o kousek nazpět, než mu předá kinetickou energii uloženou v lihýři a celý cyklus se poté opakuje.



Obr. 1.3 Náskres lihýře a vřetenového kroku [5]

Tento způsob regulace byl ve své době nejlepší i přesto, že odchylka takto řízených hodin činila několik desítek minut denně. Lihýř a vřetenový krok byl využíván ve věžních hodinách od třináctého až do sedmnáctého století, kdy byl vytlačen přesnějším regulátorem tvořeným kyvadlem a setrvačkou s vláskem. [1 s. 194]

1.2 Regulace pohonů

1.2.1 Mlýny

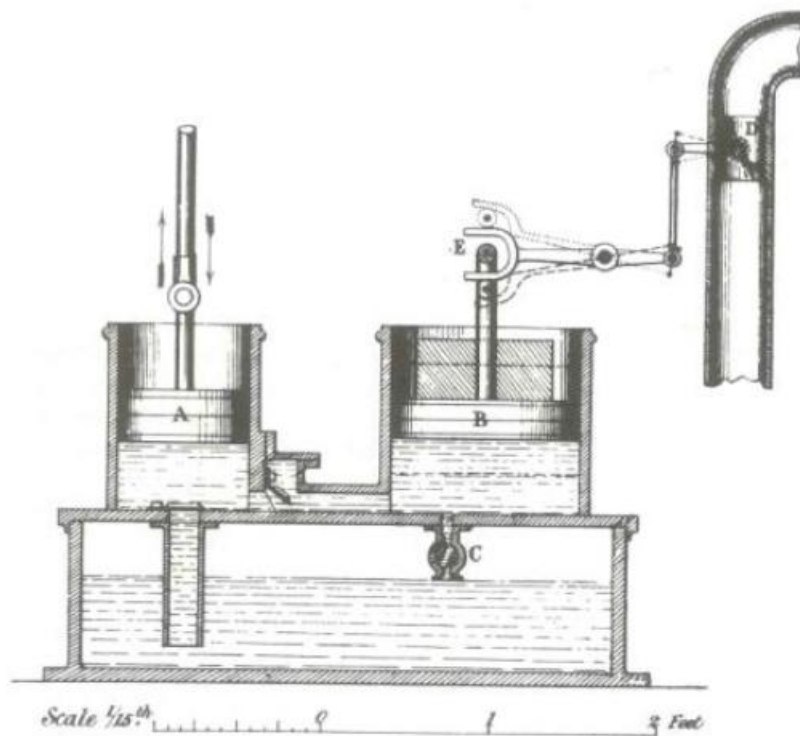
Vývoj zpětnovazební regulace byl vždy výrazně podporován snahou o automatizaci práce, přestože stroje sami o sobě práci výrazně ulehčují, je u nich nutný neustálý dohled obsluhy, která řídí jejich chod s ohledem na aktuální stav vstupu a výstupu stroje. Abychom nutnost neustálého dohledu nad strojem odstranili, je potřeba nějakým způsobem využít zpětnou vazbu. Jedním z prvních příkladů řešení tohoto problému je zařízení zvané "lift tenter", které sestrojil Thomas Mead a v roce 1787 si ho také nechal patentovat. Toto zařízení se používalo v mlýnech, kde byl problém s proměnlivou rychlostí. Zvýšení rychlosti otáčení mlýnských kol způsobovalo nadzvednutí horního mlýnského kamene díky čemuž byla namletá mouka příliš hrubá, proto se před zavedením lift tentru musela hrubost mouky pravidelně kontrolovat a ručně upravovat mezera mezi mlýnskými kameny. Thomas Mead využil k měření rychlosti otáčení kamenů odstředivé kyvadlo, na základě jehož pohybu se upravovala velikost síly, kterou byl tlačěn horní kámen ke spodnímu. Toto zařízení tedy nemělo za úkol udržovat konstantní otáčky, ale zajistit správnou hrubost mouky. Další výhodou tohoto zařízení bylo to, že když se mlýn rozbíhal měly mezi sebou mlýnské kameny velmi nízké tření, díky čemuž se spouštění mlýnu výrazně zjednodušilo. [3 s. 10]

1.2.2 Wattův regulátor

Během 80. let 18. století začali James Watt a Matthew Boulton aktivně propagovat, využití parního stroje. V roce 1786 spustili parní mlýn Albion Mills ve městě Southwark. Mlýn byl poháněn dvěma parními stroji, z nich každý měl výkon 37kW a byly schopny najednou pohánět až 20 párů mlýnských kamenů (John Farey, 442). Bohužel díky požáru byl mlýn v provozu pouze do roku 1791. Na tomto projektu si Watt s Boultonem otestovali Wattův parní stroj, který byl z počátku řízen manuálně. V roce 1788 Watt dostal od Boultona dopis ve kterém byl popsán Meadův regulátor. Na základě tohoto popisu Watt navrhl vlastní regulátor, který přímo ovládal škrtkovací klapku v přívodu páry do parního stroje. Přesto, že se Watt zprvu snažil svůj vynález tajit, brzy se jeho odstředivý regulátor rozšířil a našel své využití nejen v řízení parních motorů, ale také vodních kol. Právě díky využití v kombinaci s vodním kolem se projeví dva jeho velké nedostatky. Těmi jsou nedostatek síly a kmitání. I přes tyto chyby byl hlavně díky své jednoduchosti oblíben, což dokazuje i to, že v roce 1868 bylo v Anglii v provozu přibližně 75 000 zařízení řízených právě jeho pomocí a to od vodních kol, až po pohony teleskopů. [3 s. 12-15, 24]

1.2.3 Hydraulické a pneumatické regulátory

Ve snaze odstranit nevýhody Wattova regulátoru začaly být vyvíjeny nejrůznější pneumatické a hydraulické čerpadlové regulátory. Jeden z prvních regulátorů tohoto typu údajně vyrobil sám James Watt a měl nahradit katarakt používaný v pohonech čerpadel. Jako první však popsal hydraulický regulátor deProny a zásluhy za jeho vynález připsal bratrům Perierovým. Detailněji popsal fungování těchto regulátorů Mayr. Jednou z částí těchto regulátorů byl akumulátor který v systému sloužil jako integrátor. Díky tomu byla odstraněna jedna z chyb Wattova regulátoru, kterou byl offset. Další výhodou využití akumulátoru bylo zvýšení výstupní síly, díky čemuž byly tyto regulátory schopny ovládat stavidla v náhonech vodních kol.



Obr. 1.4 Nákres čerpadlového hydraulického regulátoru [3]

Hydraulický regulátor na obrázku 1.4 funguje tak, že píst A poháněný regulovaným pohonem pracuje, jako pumpa, která čerpá kapalinu do akumulátoru. Současně z akumulátoru kapalina vytéká ventilem C. Změna množství kapaliny v akumulátoru pohybuje pístem B, který je přes páku napojen na škrtkový ventil regulovaného pohonu.

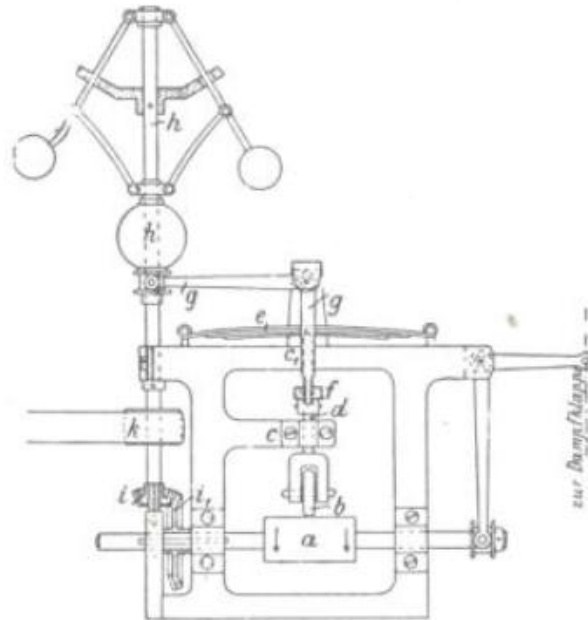
V roce 1837 si Louis Molinié nechal patentovat pneumatický regulátor, který byl tvořen vzduchovým čerpadlem, které hnalo vzduch do nafukovacího zásobníku, odkud otvorem postupně unikal. Zprvu byl problém s tím, že čím více bylo v zásobníku vzduchu tím rychleji

z něho vzduch unikal, proto tento akumulátor neměl čistě integrační funkci. Tato chyba byla napravena tím, že byla upravována velikost otvoru, kudy vzduch uniká, na základě toho kolik je aktuálně v zásobníku vzduchu, což bylo samozřejmě provedeno automaticky. Tento regulátor fungoval podobně, jako hydraulický, pokud se otáčky regulovaného motoru zvýšily, zvětšilo se také množství vzduchu dodávaného regulátorem do zásobníku, jelikož bylo množství dodávaného vzduchu větší než množství unikajícího, začal se zásobník nafukovat, což způsobilo omezení přísunu energie do pohonu, například přivření stavidla při řízení otáček vodního kola. Pozdější měření v roce 1841 ukázala, že čas ustálení tohoto regulátoru se pohybuje v řádu jednotek minut. Tato měření jsou také pravděpodobně první případ měření odezvy zpětnovazebního systému. [3 s. 15-16]

1.2.4 Chronometrický regulátor

Dalším pokusem o odstranění chyb Wattova regulátoru byl chronometrický regulátor navržený v roce 1844 Williamem a Wernerem Siemensem. Prvním problémem Wattova a ostatních odstředivých regulátorů bylo dle jejich názoru, že tyto regulátory neřídí, ale pouze "krotí" rychlost pohonu. Druhým byla jejich potřeba síly na to, aby přemohly statické tření a pohnuly ventilem. Proto Siemens vymyslel řešení, při kterém byl ventil ovládán přímo silou pohonu, který řídil a nezatěžoval tedy regulátor. Díky tomuto řešení měl Siemensův regulátor mnohem rychlejší odezvu než Wattův. Siemens dokonce tvrdil, že jeho regulátor zvládne v některých případech provést korekci otáček dříve, než Wattův regulátor stihne začít reagovat. Již tato verze chronometrického regulátoru poskytovala jistý stupeň integrace, takže byl odstraněn i offset regulátoru. Siemensův regulátor byl ve vědeckých kruzích oblíben a Sir George Biddell Airy ho použil v rovníkovém teleskopu, díky čemuž se Siemens dostal do kruhu vědců zahrnujícího i Maxwella, Williama Thompsona a Edwarda Johna Routha. Po komerční stránce byl však z chronometrického regulátoru propadák a to hlavně díky jeho problémům s opotřebením třecí brzdy a vysokofrekvenčním oscilacím.

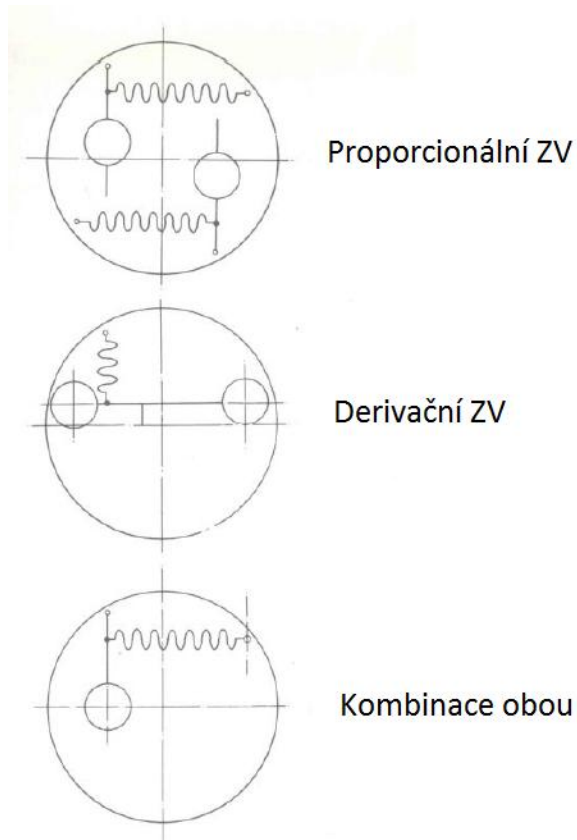
V roce 1882 Siemens navrhl vylepšený regulátor (Obr. 1.5) u něhož byla integrační činnost zajištěna úpravou rozdílového signálu dodávaného obyčejným proporcionálním regulátorem. Pohyb regulátoru, který odpovídá rozdílu mezi skutečnou a požadovanou hodnotou otáček motoru, byl integrován pomocí mechanického integrátoru složeného z kola a válce. Kolo se otáčelo na místě a na něm byl položen válec. Ten se také otáčel, ale navíc se mohl posunovat v axiálním směru. Rychlost posunu v axiálním směru odpovídala úhlu, který mezi sebou kolo a válec svíraly. [3 s. 17-22]



Obr. 1.5 Siemensův integrační regulátor [3]
(*h*-proporcionální regulátor, *b*-kolo, *a*-válec)

1.2.5 Výstředníkový regulátor

Velmi zajímavý byl také vynález výstředníkového regulátoru, který byl oblíben hlavně v Americe. První patent na výstředníkový regulátor podal v roce 1839 Jacob Custer, ale trvalo až do 70. let 19. století, než se objevily výstředníkové regulátory použitelné v průmyslu. Tyto regulátory byly často zabudovány jako součást setrvačnicku stroje. Jejich velkou výhodou je, že se dá jejich chování upravit pomocí změny ukotvení závaží tak, aby regulátor reagoval více na odstředivé síly (rychlost otáčení), nebo spíše na setrvačné síly (změna rychlosti otáčení) (Obr. 1.6). Díky tomuto bylo možné vytvořit regulátory, které v sobě kombinovaly proporcionální a derivační zpětnou vazbu, což zajistilo rychlejší reakci při náhlých změnách rychlosti. [3 s. 35-40]



Obr. 1.6 Možnosti umístění kyvadel výstředníkového regulátoru [3]

1.2.6 Nevydařené pokusy

Některé pokusy o vylepšení regulační techniky však nebyly úspěšné. Například odstředivé regulátory s parabolickým kyvadlem měly problémy se stabilitou, a proto tato možnost řízení byla zavrhnuta. Nebo Ponceletův regulátor, který měl reagovat na změny otáček ještě dříve než nastanou, díky tomu, že bude řízen zátěžným momentem. Moment měl být měřen pomocí pružné hřídele. Zkroucení hřídele vlivem zátěžného momentu by pak řídilo otevření ventilu parního stroje. Tento způsob se neosvědčil díky tomu, že nebyl schopen reagovat na změny v přísunu páry a hlavně pružná hřídel způsobovala nikdy nekončící "kývání". [3 s. 27]

1.3 Porozumění stabilitě

Během 19. století bylo vyvinuto velké množství regulátorů, které byly běžně dostupné. Tyto regulátory se navrhovaly a používaly na základě grafických metod popisujících ustálený stav a zdálo se, že problém řízení a regulace pohonů je vyřešen. Inženýři se proto vrhli na zlepšování konstrukce za účelem snížení velikosti, tření a lepšího nastavení požadovaných otáček. [3 s. 45]

1.3.1 Analýza ustáleného stavu

První pokusy o teoretický popis fungování regulátorů byla tedy analýza ustáleného stavu. V roce 1807 Thomas Young omezil svou analýzu wattova regulátoru na vzorec (1.1)

$$h = \frac{g}{\omega^2} \quad (1.1)$$

Tento vzorec popisuje výšku ideálního kónického kyvadla h v závislosti na rychlosti otáčení ω . Větší pozornost tomuto popisu věnoval Jean-Victor Poncelet, který si uvědomil důležitost třecí síly. V roce 1836 dospěl ke vzorci (1.2), který ukazuje vliv třecí síly na regulaci otáček

$$\frac{F_g}{p} = \frac{a}{b} * \frac{\omega^2}{\omega_u^2 - \omega^2} \quad (1.2)$$

F_g je gravitační síla působící na závaží kyvadla, p je třecí síla, ω_u je rychlost otáčení a ω je jmenovitá rychlost. Tyto teoretické poznatky se bohužel moc nerozšířily, a proto měly pouze malý dopad na teoretický a praktický vývoj regulátorů. [3 s. 54-56]

1.3.2 Sir George Biddell Airy

Na základě svých zkušeností s třecími regulátory, které používal k regulaci pohonů teleskopů, Sir George Biddell Airy napsal článek, kde se pokusil prošetřit problém stability matematicky. Na začátku článku se snaží věnovat pozornost dynamickému chování nestability. V hlavní části se poté věnuje chování samostatného odstředivého kyvadla, následkům přidání setrvačnicku a chování regulátoru při působení řídicí síly. Airymu se podařilo popsat chování regulátoru pomocí diferenciálních rovnic a přesto, že se mu nepovedlo objevit praktický způsob, jak kmitání regulátoru zabránit, podařilo se mu alespoň zajistit pro tento problém více pozornosti. [3 s. 56-63]

1.3.3 Clerk Maxwell a Edward Routh

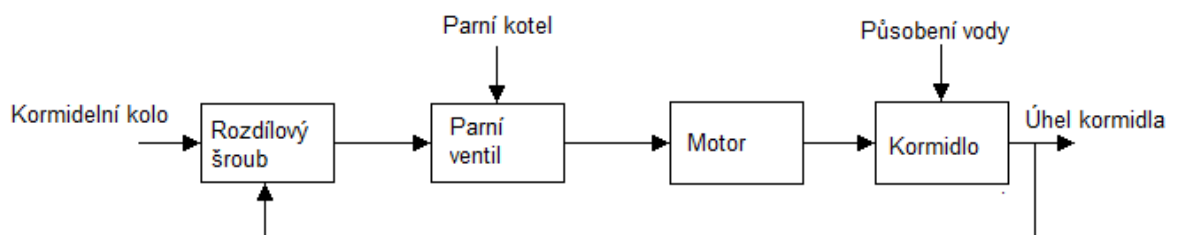
Dalším kdo se pokusil vyřešit problém se stabilitou regulace byl Clerk Maxwell, poté co společně s Williamem Thomsonem a Williamem Siemensem pracoval na způsobu určení ohmu. Podstatou výsledného zařízení navrženého Thomsonem byla cívka rotující konstantní rychlostí. Díky této zkušenosti se Maxwell začal zajímat o regulátory, jako o příklad dynamického systému. S řešením stability dynamických systémů měl Maxwell již zkušenosti, například ze své eseje zabývající se stabilitou Saturnových prstenců, za kterou v roce 1856 dostal Adamsovu cenu. V roce 1868 publikoval studii "On governors", kde mimo jiné popisuje možné výsledky působení regulátoru a jejich souvislost s řešením diferenciálních rovnic. Maxwellovi se podařilo určit podmínky stability pro systémy třetího řádu a doufal, že jeho práce přitáhne k tomuto tématu pozornost matematiků.

Na základě Maxwellovy práce vypracoval Edward John Routh esej ve které se mu podařilo určit podmínky stability pro systémy pátého řádu. Za tuto esej dostal v roce 1877 Adamsovu cenu. Několik let však trvalo, než se Routhův objev dostal k technikům kteří by jeho závěry mohli využít v praxi. Jenže toto nebyl problém pouze Routhových objevů, během celého 19. století se nedařilo teoretický výzkum aplikovat v praxi, za což mohla špatná komunikace mezi vědci a techniky. Například, když v roce 1850 začali vědci používat Tredgoldovu formuli pro výšku kónického kyvadla, nikdo si nebyl jist od jakého bodu se má tato výška měřit. [3 s. 64-71]

1.4 Servomotory

1.4.1 Parní Servomotor

V roce 1835 se začaly v Anglii objevovat první velké parníky a společně s nimi se objevil nový požadavek na řízení pohonu. Jednalo se o pohon kormidla. Do této doby bylo hlavním úkolem regulace udržovat konstantní otáčky, ale při pohybu kormidla nešlo o jeho rychlost, ale o jeho polohu. První parní motor pro pohon kormidla zahrnující zpětnou vazbu si nechal patentovat J. McFarlane Gray až v roce 1866, do té doby bylo kormidlování řízeno manuálně pomocí převodů, díky čemuž nebylo příliš přesné a mělo špatnou odezvu. Grayův pohon (Obr. 1.7) fungoval tak, že kormidelní kolo bylo připojeno na hlavní hřídel, otáčení této hřídele pohybovalo ukazatelem, který udával nastavený úhel kormidla, a rozdílovým šroubem, který otevřel škrťací klapku parního stroje pohánějícího kormidlo. Jak se kormidlo otáčelo do požadované polohy, otáčelo také rozdílovým šroubem, který díky tomu postupně uzavíral škrťací klapku. Pohyb kormidla byl také přiveden na ukazatel, takže obsluha měla přehled o aktuálním natočení kormidla. [3 s. 98-100]



Obr. 1.7 Blokové schéma Grayova servomotoru

Označení servomotor se poprvé objevilo v knize *Le servomoteur ou moteur assevi* vydané Josephem Farcotem v roce 1873. V této knize se Farcot věnoval hlavně popisu různých řešení parních zařízení určených pro kormidlování vyvinutý firmou Farcot and Son. Farcotův servomotor byl postaven na principu pístu a posuvného ventilu, ventil na základě rozdílu mezi požadovaným a skutečným úhlem kormidla pouštěl páru buď na levou, nebo na pravou stranu pístu. Posuv pístu poté pomocí páky otáčel s kormidlem. Tento servomotor byl instalován na lodi *Bélier* a díky němu mohl kormidelník za vynaložení síly 30N pohybovat s kormidlem, na které působily síly kolem 100kN. [3 s. 100-101]

1.4.2 Hydraulický servomotor

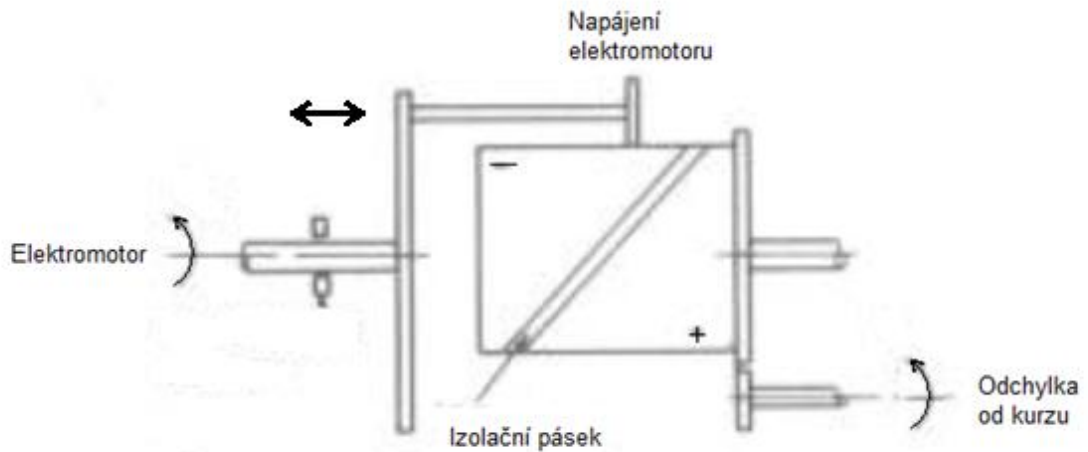
Další možností, jak kormidlovat loď bylo použití hydraulických pohonů. Tlak vody byl většinou zajišťován malým parním strojem. V roce 1870 Andrew Betts Brown patentoval hydraulický servomotor určený ke kormidlování lodi. Kormidlem pohybovaly hydraulické písty spojené s ventilem, ovládaným opět rozdílem mezi požadovanou a skutečnou polohou kormidla. Tyto hydraulické pohony se ale moc neuchytily, jelikož malý parní kompresor nedokázal udržet konstantní tlak při složitém manévrování lodi. [3 s. 108]

1.4.3 Elektrické servomotory

První pokusy o kormidlování s využitím elektrické energie byly provedeny na jachtě Albion, která byla původně osazena čistě elektrickým soustrojím určeným ke kormidlování. Toto řešení se ale neosvědčilo, protože časté spouštění soustrojí ničilo komutátor, proto byl tento systém nakonec nahrazen kombinací konvenčního parního servomotoru a experimentálního založeného na čerpadle s variabilním záběrem, které bylo poháněno elektromotorem. Hele-Shaw a Martineau, kteří tento experimentální pohon kormidla navrhli poté prováděli na Albionu měření odezvy kormidla na pohyb kormidelního kola, což byl pravděpodobně první pokus o zaznamenání vztahu mezi vstupem a výstupem servomechanizmu. Toto měření dokázalo, že jimi navržený elektrohydraulický servomotor má mnohem rychlejší odezvu, než konvenční parní servomotor. [3 s. 115-116]

1.4.4 Autopilot

Po vytvoření servomotoru určeného ke kormidlování byl dalším krokem vývoj automatického řízení lodi. První pokus o automatické kormidlování provedl v poslední čtvrtině 19. stol. A. B. Brown, který připojil servomotor na magnetický kompas, výsledek však nebyl uspokojivý. Díky pomalé reakci celého systému se loď pohybovala po sinusoidě, která se navíc zvětšovala s rostoucí rychlostí. Prakticky využitelný systém pro kormidlování byl patentován v roce 1920 Elmerem Sperrym. Základem tohoto zařízení byl elektromotor otáčející kormidelním kolem, dále celý systém fungoval jako běžný servomotor otáčející kormidlem. Nejzajímavější částí celého systému je řízení elektromotoru (Obr. 1.8), Sperry si totiž uvědomil, že řízení založené pouze na základě odchylky není uspokojující. Skutečný kormidelník totiž nastavuje kormidlo podle toho, jak loď reaguje, tedy jeho nutkáním je nastavit úhel kormidla úměrně odchylce od kurzu. Sperry tohoto dosáhl zavedením zpětné vazby od kormidelního kola k řízení elektromotoru. [3 s. 129-131]



Obr. 1.8 Nákres řízení elektromotoru Sperryho autopilota [3]

Zajímavý pokrok v regulační technice provedl Nicholas Minorsky. Jeho přínosem však nebyl vynález nějakého přístroje, ale teoretické poznatky týkající se PID regulace, které prezentoval ve své práci "Directional stability of automatically steered bodies" v roce 1922. Stejně jako Sperry si byl Minorsky vědom toho, že tak jako skutečný kormidelník i automatické řízení lodi musí předvídat její pohyb. Během svého výzkumu Minorsky dokonce provedl měření za účelem určit, jak přesně zvládne zkušený kormidelník odhadnout rychlost otáčení lodi. Své teoretické poznatky potvrdil Minorsky při pokusu na lodi USS New Mexico, kde se mu s jeho vybavením povedlo dosáhnout odchylky od kurzu v rozmezí $\pm 1/6^\circ$, což je méně, než byla schopna většina kormidelníků. [3 s. 142-146]

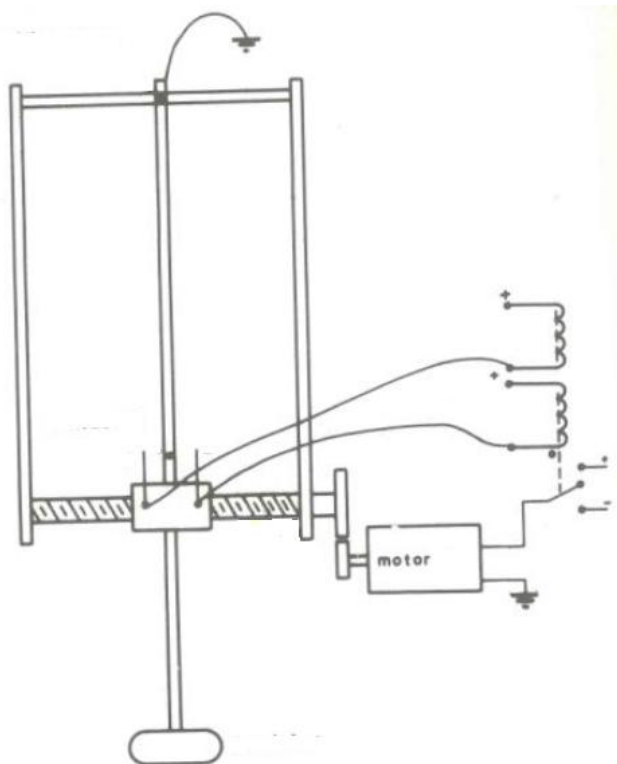
1.4.5 Torpéda

Nejpokrokovějšími servomechanismy vyvinutými během devatenáctého století byly ty používané v torpédech. Jelikož se jednalo o vojenský výzkum byla většina objevů v té době označena, jako tajná. Například řízení hloubky v jaké se má torpédo pohybovat navržené v roce 1869 Robertem Whiteheadem bylo označeno jako tajné až do roku 1894. Toto řízení spočívalo v tom, že úhel natočení horizontálního kormidla byl závislý nejen na hloubce, jak tomu bylo dosud, ale také na náklonu torpéda. Jednou z nevýhod Whiteheadova torpéda byl jeho pohon, který byl založen na stlačeném vzduchu, proto za sebou torpédo nechávalo stopu z bublin. Tuto nedokonalost se povedlo odstranit Johnu Adamsu Howellovi, který mezi roky 1870 a 1884 vyvinul torpédo poháněné setrvačником, který byl před vypuštěním roztočen na přibližně 10 000 otáček za minutu, poté dodával torpédu energii pro pohyb kupředu a současně sloužil i jako gyroskop pro jeho stabilizaci. Toto bylo první úspěšné použití

gyroskopu k řízení. V roce 1895 Ludwig Obry vytvořil gyroskopické zařízení, které pomocí pneumatických relé ovládalo vertikální kormidla, díky použití relé měla kormidla jen dvě stabilní polohy a to až do zavedení proporcionálního ovládání na začátku 20. století. [3 s. 119-122]

1.4.6 Stabilizace lodí

Jak rostlo všeobecné povědomí o využití gyroskopů, množily se i nápady na jeho využití. První z nich byly velmi jednoduché, například Ernst Schlick navrhl umístit obrovský gyroskop do trupu lodi, aby snížil její kývání. Tento systém byl pasivní a v podstatě pouze zpomaloval kývání lodi. V roce 1908 Elmer Sperry vynalezl aktivní stabilizátor, který na základě kyvadla, které měřilo náklon lodi, pohyboval gyroskopem tak, aby působil proti směru naklánění lodi. Aby dosáhl proporcionálního řízení, zkonstruoval Sperry kyvadlo (Obr. 1.9) tak, že závěs měl polaritu země a visel mezi dvěma kontakty, když se kyvadlo pohnulo dotklo se závěsem jednoho z kontaktů, čímž se uzavřel obvod s malým motůrkem který současně řídil otáčení gyroskopu a pohyboval kontakty tak, aby následovaly pohyb kyvadla. Po prvotním úspěchu stabilizace malých lodí pomocí gyroskopů se ukázalo, že na velké lodě se tento systém nedá použít, jelikož aby plnil svou funkci správně musel být gyroskop velký a těžký, tudíž zmenšoval kapacitu lodi. Stabilizace velkých lodí se zdařila až za použití "ploutví" připevněných po stranách trupu lodi. Tento způsob byl do praxe uveden až v roce 1936 a fungoval tak, že ploutve svým natáčením působily proti směru, kterým se loď nakláněla, proto aby ploutve tuto sílu vytvořily, musela být loď v pohybu. Systém pro řízení natočení ploutví vycházel ze Sperryho stabilizátoru. [3 s. 123-129]

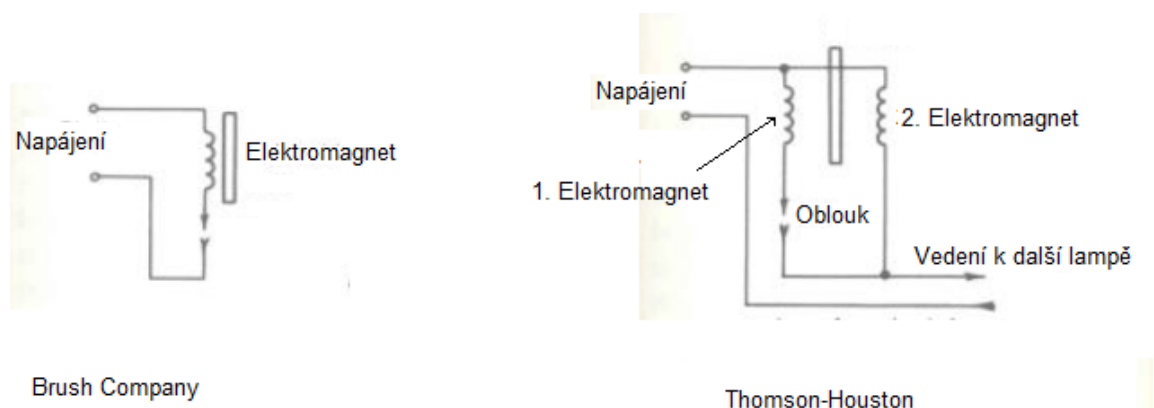


Obr. 1.9 Náskres kyvadla pro měření náklonu lodi navrženého Sperrym [3]

1.5 Zpětná vazba v elektrických zařízeních

1.5.1 Obloukové lampy

Z průběhu vývoje zpětnovazebního řízení je vidět, že většina objevů je pouze řešením problémů souvisejících s novými technologiemi, kterým toto řízení zajišťuje správné fungování. S tím jak se rozšiřovalo využití elektrické energie, objevilo se takovýchto problémů hned několik. Jedním z nich bylo nastavení mezery mezi uhlíky obloukových lamp. Udržení konstantní mezery mezi uhlíky je nezbytné pro správné hoření elektrického oblouku. Problém je v tom, že uhlíky postupně odhořívají a mezera se zvětšuje. Jedním z prvních pokusů o řešení tohoto problému bylo zařízení patentované v roce 1878 firmou Brush Company (Obr. 1.10). V jejich obloukové lampě byl spodní uhlík přídělán napevno a horní byl pomalu spouštěn k němu. Správnou rychlost spouštění zajišťovala elektromagnetická brzda, která byla ovládána proudem, tekoucím obloukem. Když proud obloukem poklesl, brzda povolila, následkem čehož se uhlíky přiblížily, proud stoupl a brzda zastavila posun. Problémem tohoto řešení bylo, že se hodí pro provoz pouze samostatné lampy, jelikož se obloukové lampy zapojovaly do série, ovlivňovaly se navzájem a systém byl nestabilní. Se systémem, který zvládl více lamp přišla v roce 1879 firma Thomson-Houston (Obr. 1.10). Jejich řešení využívalo dvou elektromagnetů. První zapojený do série s obloukem zvětšoval mezera mezi elektrodami tím, že táhl spodní uhlík dolů. Druhý připojený paralelně k oblouku a prvnímu elektromagnetu pak řídil brzdění horního uhlíku, ale v tomto případě opačně, než tomu bylo v Brushově případě, když byl proud cívkou elektromagnetu malý, byla horní elektroda zabrzděna a s tím jak proud stoupal, brzda povolovala. Nejenom, že tento způsob umožnil provoz více lamp, ale díky prvnímu elektromagnetu se usnadnilo i zapínání těchto lamp. [3 s. 154-158]

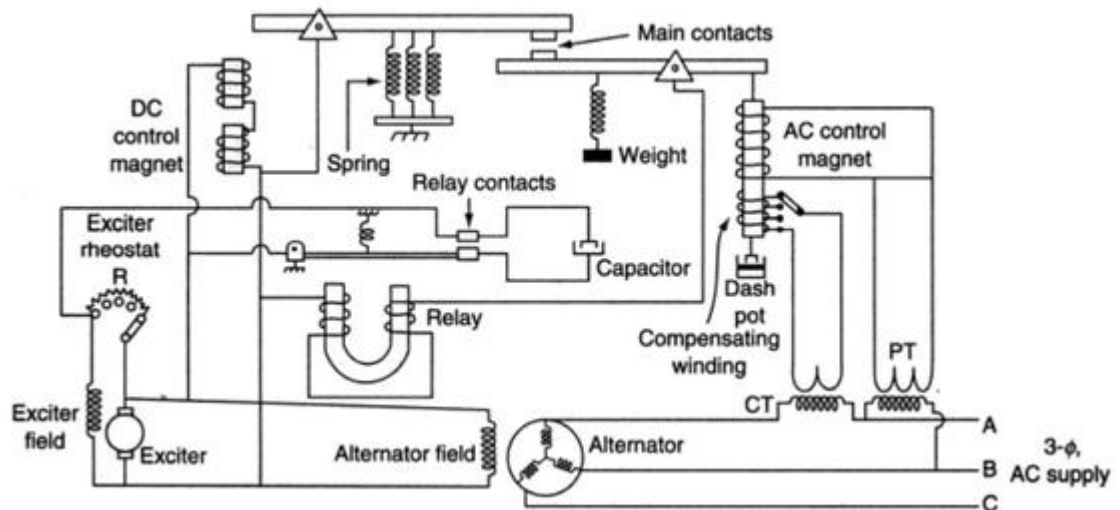


Obr. 1.10 Schémata zapojení obloukových lamp [3]

1.5.2 Výroba elektrické energie

Současně se začátky využívání elektrické energie bylo nutno vyřešit i její výrobu. Konkrétně regulaci proudu a napětí. Konstantní proud byl vyžadován pro správnou funkci obloukových lamp. Prvním pokusem o řízení výstupního proudu dynama bylo natáčení kartáčů vůči neutrální ose. To však vedlo ke zvýšení jiskření na komutátoru, proto se toto řešení moc dlouho neudrželo a přešlo se k řízení pomocí změny budícího toku. Mnoho řešení zahrnovalo změny v magnetickém obvodu, například řízení pomocí změny velikosti vzduchové mezery, to ale nebylo příliš praktické a pro použití ve velkých strojích skoro nemožné. Nakonec se tedy všichni vydali cestou změny budícího toku pomocí elektrické nebo magnetické energie a od mechanických řešení bylo upuštěno. Jednou z prvních možností udržení konstantního proudu byl Brushův regulátor, který pomocí jedné cívky měřil výstupní proud, podle kterého upravoval proud budícím vinutím. Podobné regulátory, jako pro stabilizaci proudu se daly použít i pro stabilizaci napětí, stačilo měřicí cívku přepojit tak, že měřila místo proudu napětí. Pro stabilizaci napětí však byla ještě jedna mnohem jednodušší možnost a tou bylo využití kompaundního vynutí. [3 s. 158-164]

Postupem času začaly být stejnosměrné systémy nahrazovány střídavými, což sebou přinášelo nové nároky na regulaci, kromě velikosti napětí se najednou musela řešit i frekvence. Frekvence byla řízena samostatně a spočívala v řízení otáček stroje pomocí změny přísunu páry do parní turbíny, nebo přítoku vody v případě vodních elektráren. Pro stabilizaci napětí se většinou používaly vibrační regulátory, nejčastěji regulátor Tirril (Obr. 1.11) navržený firmou General Electric Company v roce 1902. Podstatou fungování tohoto regulátoru je řízení budícího napětí synchronního generátoru pomocí změny odporu budícího vinutí budiče (derivačního dynama). Odpor budícího vinutí se mění skokově, tím že se zkratuje rezistor zapojený v sérii s budícím vinutím, jedná se tedy v podstatě o pulzní měnič odporu. Sepnutí relé zkratujícího odpor je řízeno hlavními kontakty, jejichž poloha je na jedné straně řízena velikostí výstupního napětí alternátoru a na straně druhé napětím budiče, právě tato strana má na svědomí "vibrování" regulátoru. Tento vibrační regulátor reagoval velmi rychle, takže odchylka napětí na výstupu nepřekročila $\pm 0,5\%$. [10 s. 423]



Obr. 1.11 Schéma regulátoru Tirril [10]

1.5.3 Elektromotory

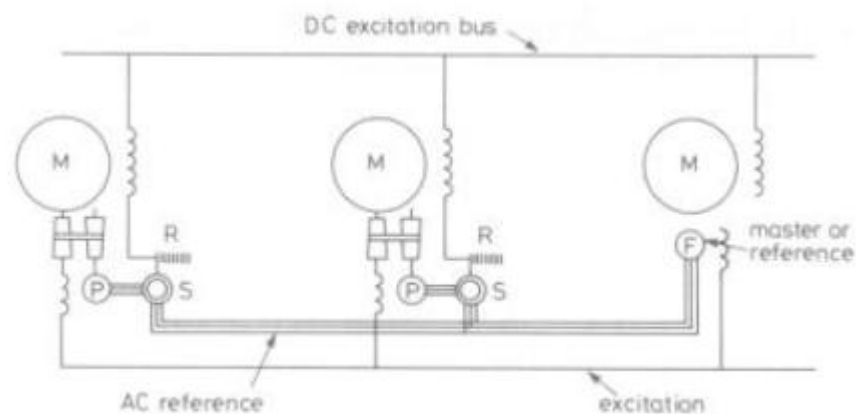
Dalším poměrně složitým problémem bylo udržení konstantních otáček elektromotorů. Zprvu se pro tento účel používaly stejně jako u parních strojů odstředivé regulátory, které měnily odpor kotvy motoru, posouvaly kartáče, nebo prostě odpojily napájení, pokud se motor roztočil příliš rychle. Tyto metody se ale neosvědčily v případech, kdy bylo potřeba řídit motor ve velkém rozmezí otáček. Pro řízení rychlosti bylo vyvinuto několik systémů, například Ward Leonardovo soustrojí. Tyto systémy však ve většině případů neobsahovaly zpětnou vazbu, která by zajistila konstantní otáčky. [3 s. 171-174]

1.5.4 Elektronická regulace napětí

Na začátku 30. let 20. století se stále pro řízení výstupního napětí generátorů využíval regulátor Tirril a v některých speciálních případech regulátor s uhlíkovým stohem, jehož odpor se měnil pomocí tlaku. Tyto regulátory však obsahovaly pohyblivé části, které negativně ovlivňovaly odezvu a životnost regulátoru. Proto byly s příchodem elektronek vyvinuty regulátory bez pohyblivých částí. Jedním z příkladů těchto regulátorů byl AT regulátor od firmy Westinghouse vytvořený v roce 1933, jehož hlavní součástí byl tyatron, což je elektronková obdoba polovodičového tyristoru. Princip byl takový, že tyatron pomocí změny úhlu vedení měnil velikost výstupního napětí budiče. Úhel vedení odpovídal velikosti napětí na mřížce tyatronu, které bylo řízeno pomocnými obvody tak, aby udrželo požadované konstantní výstupní napětí alternátoru. Regulace pomocí tyatronu se osvědčila, jeho rychlejší reakce výrazně omezily překmit a následné kmitání výstupního napětí. [4 s. 4-7]

1.5.5 Pohony v průmyslu

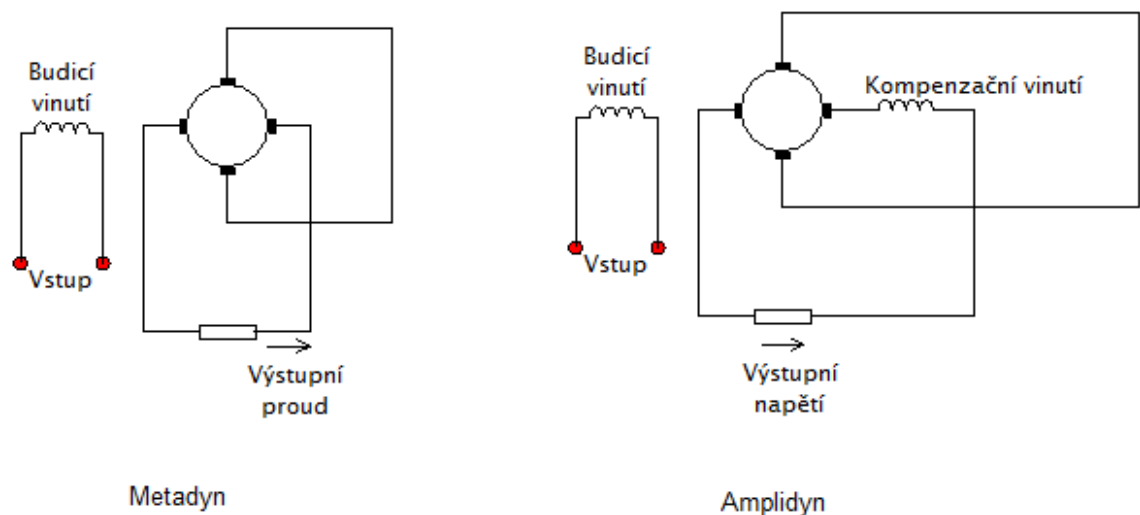
S tím jak v průmyslu malé motory nahrazovaly centrální pohony, objevil se problém se synchronizací. Některé procesy zpracování papíru, gumy nebo oceli potřebovaly více pohonů v sérii za sebou, aby spolupracovaly a běžely stejně rychle, jelikož hrozilo například u papíru jeho přetržení. S jedním z prvních řešení přišla firma Westinghouse v roce 1919. Řešení spočívalo v použití soustrojí tvořeného stejnosměrným a synchronním motorem. Synchronní motor byl dimenzován přibližně na 20% výkonu stejnosměrného motoru a spojen s ostatními synchronními motory na lince. Staral se tedy o udržení synchronní rychlosti zatímco stejnosměrný motor dodával mechanický výkon. Během dalších let se pracovalo na vylepšeních, ale významný pokrok přišel až v roce 1929 v podobě Selsynova regulátoru (Obr. 1.12). Který opět využíval jako hlavní pohon stejnosměrný motor. Jeden ze stejnosměrných motorů byl zvolen jako hlavní (master) a doplněn o alternátor (F), který napájel rotory selsynů (S) umístěných u ostatních motorů. Statory selsynů byly napájeny z alternátorů (P) umístěných u jednotlivých motorů. Výsledkem bylo, že pokud se daný motor točil stejně rychle jako motor hlavní, selsyn zůstával v klidu, ale pokud se rychlosti lišily, selsyn svým otáčením pohyboval reostatem (R) v budícím obvodu stejnosměrného motoru. [4 s. 7-10]



Obr. 1.12 Schéma zapojení pro synchronizaci otáček více motorů [4]

1.5.6 Amplidyn a Metadyn

Zajímavé prostředky pro zpracování signálů používaných v servomotorech se objevily kolem roku 1930. Jednalo se o elektromechanické zesilovače Metadyn a Amplidyn (Obr. 1.13). První vznikl Metadyn, jednalo se v podstatě o stejnosměrné dynamo s dvěma páry kartáčů potočených o 90° . Na základě napětí připojeného ke kontrolnímu obvodu (budícímu vinutí) protékal tímto vinutím proud, díky čemuž se vytvořilo magnetické pole, které do otáčející se kotvy indukovalo napětí. Jelikož byl první pár kartáčů zapojen na krátko, uzavíral se přes něj proud, čímž vznikl jev zvaný reakce kotvy, který způsoboval vychýlení budícího magnetického toku, proto se napětí objevilo i mezi výstupními kartáči. Pokud byl výstupní obvod zatížen, proud jím protékající působil proti reakci kotvy, čím se snižovalo výstupní napětí a klesal tedy i výstupní proud, jednalo se díky tomu o zesilovač s napěťovým vstupem a proudovým výstupem. Doplněním Metadynu o vinutí, které kompenzuje vliv pole vytvořeného proudem zátěže, získáme Amplidyn, který má tedy napěťový vstup i výstup. Zesílení těchto přístrojů dosahovalo až hodnoty 10 000, ale kvůli jejich pomalým reakcím se nedaly využít pro zesilování akustických signálů. Jejich hlavní uplatnění bylo ve zbraňových systémech, ale také v pohonech vlaků a metra. [4 s. 10] [8] [9]



Obr. 1.13 Návrh zapojení metadynu a amplidynu

1.6 Sdělovací technika a kritérium stability

Kromě praktické aplikace regulačních systémů stále probíhal i teoretický výzkum jejich chování. Inženýři se již nespolehali pouze na intuici při návrhu a ladění regulačních smyček, ale snažili se využít i teoretických poznatků, stále zde však byli vynálezci kteří postupovali pomocí metody pokus-omyl, například Thomas A. Edison, který při hledání vhodného vlákna do žárovky vyzkoušel 6000 různých rostlinných vláken. Velký skok v porozumění chování zpětné vazby a celkové stabilitě regulačních systémů přines vývoj sdělovací techniky. Při pokusech na elektronkové triodě v roce 1912 Edwin Armstrong zjistil, že pokud přivede část výstupního signálu zesilovače zpět na vstup, získá mnohem větší zesílení, tohoto využil při konstruování svého přijímače s vysokou citlivostí. Dalším kdo si uvědomil potenciál využití pozitivní zpětné vazby byl Alexander Meissner, který ji použil v oscilátorech. Ale až Charles S. Franklin jasně popsal chování pozitivní zpětné vazby v bezdrátových přijímačích a hlavně to, jak zmenší jejich útlum a zlepši selektivitu. Během vytváření telefonního spojení v USA se objevil problém s vedením signálu na dlouhé vzdálenosti. Jelikož byl signál po cestě tlumen, musely být na vedení zesilovače, ty však na druhou stranu signál rušily, proto začal vývoj zesilovačů s co nejmenším rušením a přenosem šumu. Zesilovač splňující tyto podmínky popsal v roce 1934 Harold S. Black. Proto, aby splnil požadované podmínky, použil Black ve svém zesilovači zápornou zpětnou vazbu, při jeho návrhu také vymyslel rovnici popisující zesílení při použití zpětné vazby a odvodil zesílení uzavřené smyčky. Díky vývoji zesilovačů a pokusům se zpětnou vazbou se opět objevil problém se stabilitou systému, proto byl v roce 1927 Harry Nyquist požádán o pomoc při hledání podmínek za kterých je zesilovač se zpětnou vazbou stabilní. Závěry svého výzkumu publikoval Nyquist v roce 1932 ve své práci Regeneration theory. V této práci bylo popsáno kritérium stability, které dnes nese jeho jméno. Nyquist zde přišel s myšlenkou, že chování systému může být analyzováno na základě jeho frekvenčních charakteristik a že všechny signály mohou být popsány na základě svého spektra. Dále také tvrdil, že předešlé pokusy pro určení podmínek stability založené na popisu postupného průchodu signálu, v podobě nekonečné řady smyčkou neuspěly, jelikož ignorovaly přechodové jevy. Nyquist popsal problémy se stabilitou na základě zesílení otevřené smyčky a fázového posunu, což jsou hodnoty, které je možno přímo změřit. To byl veliký úspěch neboť do této doby hledání podmínek stability záviselo na řešení diferenciálních rovnic založených na modelech systémů, které bylo často těžké získat. Nyquistovo kritérium stability pomocí pokusu potvrdili v roce 1934 Peterson, Kreer a Ware, kteří předvedli zesilovač chovající se podle Nyquistových předpokladů. Přestože Nyquistova

práce byla velikým krokem dopředu, bylo těžké ji využít v praxi. Několik let se inženýři bez větších úspěchů snažili na jejím základě vytvořit zesilovače, které budou současně mít velké zesílení, ale malý fázový posun. Problém vyřešil až Henrik Bode, který si všiml že neexistuje žádné univerzální řešení vztahu mezi útlumem a fázovým posunem, tudíž při vývoji je možné jedno z toho omezit za účelem posílení druhého. Později přišel na vztah mezi útlumem a fázovým posunem, který udával, že pokud se zesílení snižuje rychlostí $6 \cdot k$ dB/oktávu, tak fázový posun je $k \cdot \frac{\pi}{2}$ rad/s. Dalším Bodeho přínosem bylo "zpřísňení" kritéria stability, které dle Nyquista znělo, že když fázový posun dosáhne 180° musí být zesílení smyčky 1 nebo menší. Bode toto považoval za neadekvátní, jelikož při praktické realizaci se jistě objeví nepřesnosti, proto trval na tom že kritický fázový úhel musí být menší než 180° a zavedl tedy použití bezpečnosti ve fázi. [3 s. 180-195]

Při vývoji výpočetních metod pro určení stability systému se zásadně lišil vývoj v oblasti komunikací od toho v ostatních oblastech elektrotechniky, kde stále skoro všichni vycházeli z určení ustáleného stavu. Tento přístup se však v komunikačních systémech použít nedal, jelikož signál, který zpracovávaly, se náhodně měnil. Velkých úspěchů při řešení problémů souvisejících s přenosovými problémy dosáhl Oliver Heaviside v roce 1888. Jeho řešení spočívalo v tom, že vyšetřoval chování systému při průchodu jednoho pulsu, pro jehož popis si vytvořil vlastní funkci. Použitím této funkce v kombinaci s operačním výpočtem byl Heaviside schopen určit průběh přechodného děje proudu v elektrických obvodech. S jeho prací však většina matematiků nesouhlasila hlavně z důvodu nedostatku teoretických základů na kterých byl jeho výpočet postaven. Během dalších let se proto mnoho vědců pokoušelo matematicky popsat a vypočítat přenos elektrických systémů. Tyto výzkumy však neměly na praktický vývoj velký vliv, ale postaraly se o změnu přístupu ke komunikačním systémům, jelikož se nyní začali komunikační inženýři více zajímat o spektrum a šířku pásma signálu. [3 s. 195-200]

1.7 Automatizace výroby

1.7.1 Měření veličin

I kolem roku 1930 panovala v praxi snaha se pokud možno použití zpětné vazby vyhnout. Zpětná vazba se sice používala jako prostředek ke stabilizaci výstupních hodnot, ať už se jednalo o otáčky nebo o napětí, ale to jen v případě, kdy byla jasně dána jejich hodnota. Navíc se většinou používalo spíš dvouhodnotové řízení, které fungovalo pomocí relé nebo fotonky. Dokonce pokud bylo hodnotu výstupu potřeba měnit během provozu, starala se o regulaci většinou obsluha, nebo se výstupní hodnoty měnily až za čidlem, například v případě motoru převodovkou. Jedním z důvodů, proč ve spoustě oborů do té doby zpětná vazba nenašla uplatnění, bylo to, že některé veličiny ještě nebylo možno efektivně měřit, patřily mezi ně teplota, tlak nebo průtok. A proto, když se objevily levné a spolehlivé měřicí přístroje, proběhl vývoj regulátorů pro průmyslové použití velice rychle a během několika let již bylo ve Spojených státech na 600 firem zabývajících se jejich výrobou. Prvními zájemci byly elektrické společnosti snažící se zefektivnit výrobu elektrické energie, automobilky chtěly regulaci využít pro řízení tepelné úpravy dílů a papírny pro kontrolu vlhkosti. Tyto pokroky vedly k další automatizaci výroby. S tím však přišly i nové problémy, které musely být vyřešeny. [4 s. 29-31]

1.7.2 Změna výrobních procesů

Jak již bylo řečeno, mnoho systémů využívalo dvouhodnotové řízení, což s sebou přinášelo problémy, jako například malou přesnost a kmitání, které nejenom způsobovalo výkyvy regulované veličiny, ale v některých případech ničilo samotné zařízení. Na druhou stranu byl tento způsob jednoduchý, všem známý a kmitání předcházelo zatuhnutí mechanismu. Dvouhodnotové řízení se hodilo pro pomalé procesy s velkou setrvačností, jenže s postupem času se měnila technologie těchto procesů. Příkladem může být pasterizace mléka, která se původně prováděla tak, že se mléko ve velkém tanku zahřálo na 50°C a na této teplotě se udržovalo po 30 minut. Novější postup byl ten, že mléko protékalo potrubím, kde se ohřívalo, takže na jedné straně se lilo čerstvé mléko a na druhé straně vytékalo pasterizované. Problém byl v tom, že se zásadně zmenšilo množství mléka ohřívaného v daný okamžik, tím se zmenšila i tepelná setrvačnost systému a mohlo snadno dojít k přehřátí mléka, proto muselo být zavedeno plynulé řízení. [4 s. 34-37]

1.7.3 Stabilog

Jedním z prvních průmyslových kontrolérů s plynulým řízením byl Stabilog vytvořený firmou Foxboro Company v roce 1931. Stabilog obsahoval proporcionální a integrální vazbu, čímž odstranil offset v ustáleném stavu. Jednalo se o pneumatický systém jehož hlavní součástí byl diferenční tlakový motor, vyvinutý stejnou firmou, tvořený dvěma komorami. Jedna komora poskytovala proporcionální a druhá integrační činnost. Další výhodou Stabilogu bylo to že, obsahoval pneumatický zesilovač se zápornou zpětnou vazbou, díky čemuž bylo jeho zesílení lineární. Problémy se však objevily při prodeji těchto zařízení. Potencionální zákazníci většinou nevěděli, jaké jsou důvody jejich problémů s řízením, nebo si jich vůbec nebyli vědomi. Proto se musela Foxboro Company nejprve postarat o jejich vzdělání a ke každému kontroléru poskytla i proškolení o automatickém řízení. [4 s. 39-45]

1.7.4 Pneumatický PID kontrolér

Dalším velkým úspěchem byla realizace derivace v pneumatických kontrolérech. Hlavním důvodem pro vývoj derivační činnosti byly problémy při řízení zařízení na zpracování celulózy, kdy během procesu vzrůstala teplota a celulóza se musela chladit. Problém byl v tepelném čidle, které muselo být současně odolné, aby vydrželo tlak celulózy, ale nesmělo být moc chráněné, aby zbytečně neprodužovalo zpoždění měření. Díky zpoždění skutečné hodnoty muselo mít proporcionální řízení malé zesílení, což vedlo k velikému offsetu. Jako řešení byl regulátor doplněn o integrační řízení, to však vedlo k velkému překmitu teploty na začátku procesu. Při řešení tohoto problému v roce 1935 si Ralph Claridge vzpomněl na svůj pokus, při kterém zjistil, že pokud se do zpětné vazby proporcionálního řízení přidá omezení, objeví se na výstupu řízení neočekávaná odezva ve formě jakéhosi nakopnutí, pokud se náhle změní požadovaná hodnota. To nakopnutí je způsobeno tím že, při velké řídicí odchylce, která vznikne náhlou změnou řízené veličiny, zareaguje přidaný omezovač, který sníží velikost záporné zpětné vazby, díky čemuž se zvětší celkové zesílení. Poté co tento princip aplikoval na regulaci teploty při zpracování celulózy, zjistilo se zlepšení citlivosti, zmenšila se doba kmitání a výsledná teplota byla prakticky konstantní. [4 s. 46-49]

1.7.5 Nastavení PID kontroléru

S příchodem PID regulace do výrobních procesů se objevila otázka toho, jak regulátor nastavit tak, aby správně fungoval. Tedy dosáhl požadované hodnoty co nejrychleji, ale s minimálním kmitáním. V roce 1942 proto J. G. Ziegler přišel s metodou, která spočívala v nastavení zesílení regulátoru tak, že pravidelně kmital a poté se z hodnoty zesílení a periody kmitů vypočítaly hodnoty pro nastavení regulátoru. [4 s. 60-61]

1.8 Druhá světová válka

S příchodem druhé světové války se opět objevily nové problémy pro jejichž řešení bylo nutné vyvinout nové nebo vylepšit již stávající regulační systémy. Těchto problémů byla spousta od napěťové stabilizace leteckých generátorů, až po řízení továrny na atomové zbraně v Los Alamos, ale pravděpodobně nejvýznamnějším bylo zaměřování protileteckých systémů. Na jeho vývoji se pracovalo již od začátku století a to hlavně během první světové války, jenže zařízení vyvinuta v této době již nezvládala udržet krok s moderními letadly, proto bylo nutné provést zásadní změny v jejich konstrukci. Prvním vylepšením bylo využití radaru, původní protiletadlové systémy byly naprosto závislé na tom, zda je cíl vidět, což byl problém hlavně v noci nebo při špatném počasí. Dále bylo nutné upravit počítač, který vyhodnocoval data z radaru nebo teleskopu a přepočítával je tak, aby bylo možno zasáhnout pohybující se cíl. Vylepšením zaměřeným na přesnost a rychlost prošly také servomotory použité k pohybu protiletadlových kanónů. Největší problém však nakonec byl, jak tyto tři části spojit dohromady. Dlouhou dobu toto spojení proto zajišťovala obsluha, která dostávala hodnoty z jedné části a zadávala je na vstup části druhé, což však značně zpomalovalo celý systém. [4 s. 115-116, 125-126]

Vědecký vývoj během druhé světové války přinesl mnoho zajímavých objevů, které si našly své uplatnění i v poválečné společnosti. Vývoj systémů pro řízení palby znamenal velký skok pro vývoj zpětnovazebního řízení a opět dokázal jeho důležitost. Kromě technologických objevů proběhl ale i průlom v organizaci výzkumu, jelikož si politici uvědomili taktický dopad, který během druhé světové války nové technologie měly. Za účelem podpory výzkumu vznikla ve Spojených státech Národní vědecká nadace NSF. Její založení proběhlo až v roce 1950, protože se ze začátku nedařilo najít kompromis mezi požadavky vědců a vlády. Bez problému se neobešla ani podpora vývoje automatického řízení ve Velké Británii, kde ústav pro elektrické technologie IEE formálně uznal význam automatického řízení až v roce 1951 a i poté trvalo až do roku 1961, než pro něho zřídil specializovanou skupinu. [4 s. 186-189]

1.9 Moderní přístup k regulaci

Posledním milníkem kterému se budu v této práci věnovat je přechod k moderním způsobům řízení. Jako jeho počátek se udávají dvě konference, konference o automatickém řízení, která proběhla v červenci 1951 v Anglii ve městě Crainfield a symposium o frekvenční odezvě v roce 1953 v New Yorku. Konference v Crainfieldu byla první významnou mezinárodní konferencí týkající se automatického řízení, řešilo se na ní například odstranění šumu, nelinearity, analogové počítače a dokonce i chování ekonomických systémů. Kromě těchto konferencí vycházely také nové knížky zabývající se chováním zpětnovazebních systémů a automatizací výroby. Ne všechny tyto knihy byly zaměřeny na technické problémy, některé z nich, jako například Wienerova kniha "The Human Use of Human Beings", se zabývaly společenskými dopady automatizace výroby. [4 s. 200-205]

2 Simulace

Simulaci jsem se rozhodl udělat v programu Simulink, což je nástavba programu MatLab. V tom to programu jsem nasimuloval chování Wattova regulátoru.

2.1 Vytvoření simulačního modelu

2.1.1 Kyvadlo

Základní částí Wattova regulátoru je odstředivé kyvadlo (Obr. 2.1). Toto kyvadlo má za úkol měřit rychlost otáčení regulovaného pohonu. Tím, jak se kyvadlo otáčí, působí na závaží na konci ramene odstředivá síla(2.1), která je závislá právě na rychlosti otáčení, ale také na poloměru otáčení.

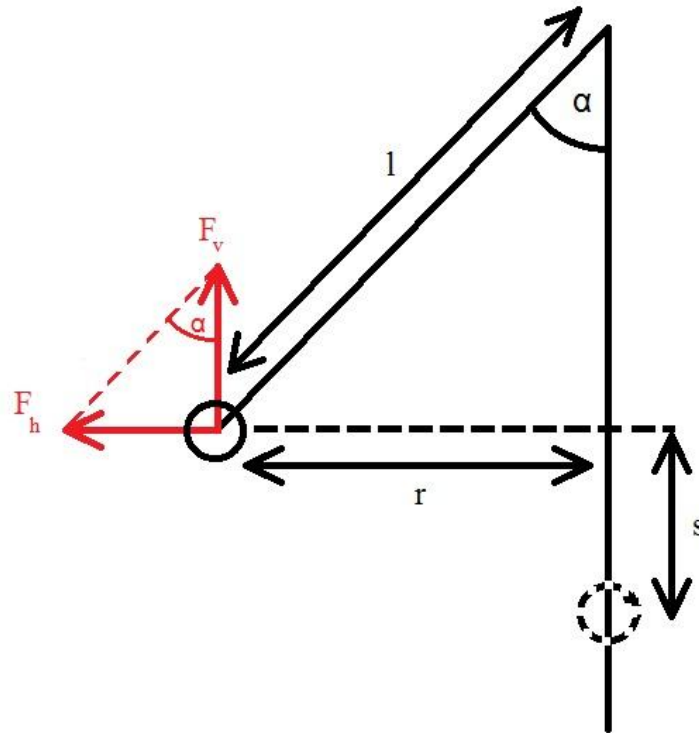
$$F_h = m * \omega^2 * r \quad (2.1)$$

Tato síla však působí v horizontální směru, proto abych ji mohl použít v simulaci, potřeboval jsem zjistit , jaká síla působí na kyvadlo ve vertikálním směru (2.2).

$$\frac{F_h}{F_v} = \operatorname{tg}(\alpha) = \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} \Rightarrow F_v = F_h * \frac{\sqrt{l^2 - r^2}}{r} \quad (2.2)$$

Po dosazení za F_h a po zkrácení r tedy vyjde (2.3).

$$F_v = m * \omega^2 * \sqrt{l^2 - r^2} \quad (2.3)$$



Obr. 2.1 Nákres pro odvození vertikální složky odstředivé síly

Na kyvadlo samozřejmě působí gravitační síla (2.4).

$$F_g = m * g \quad (2.4)$$

Konečná síla působící na kyvadlo je tedy (2.5).

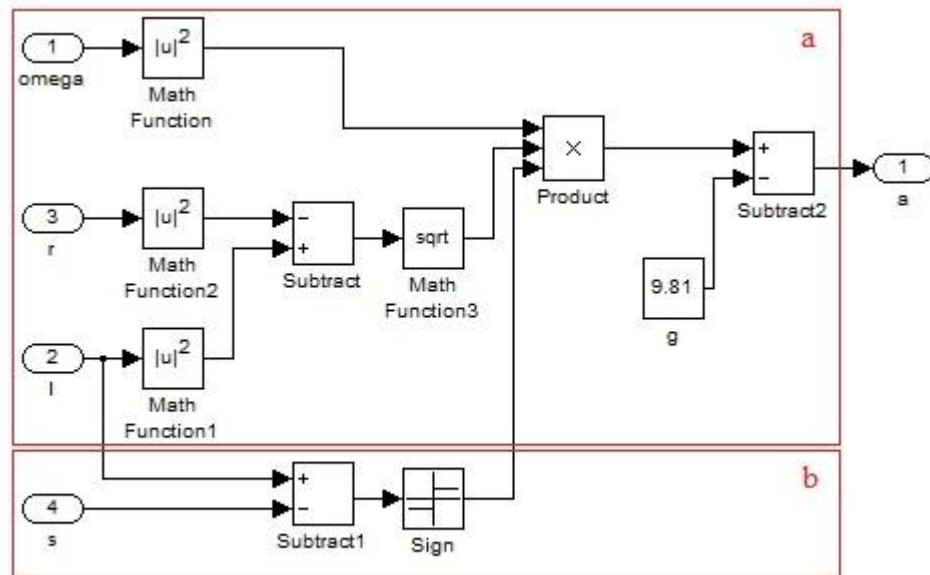
$$F_{cv} = F_v - F_g \quad (2.5)$$

$$m * a_v = m * \omega^2 * \sqrt{l^2 - r^2} - m * g \quad (2.6)$$

Po vydělení rovnice hmotností kyvadla m získáme vztah (2.7) pro vertikální zrychlení.

$$a_v = \omega^2 * \sqrt{l^2 - r^2} - g \quad (2.7)$$

Realizovaný model v programu Simulink (Obr. 2.2).



Obr. 2.2 Blok simulující chování odstředivého kyvadla

Část a provádí výpočet a_v . Část b udává směr působení vertikální síly, která v případě, že je $s > l$ ($\alpha > 90^\circ$), působí ve stejném směru jako gravitační síla, proto je také záporná.

2.1.2 Výpočet poloměru otáčení

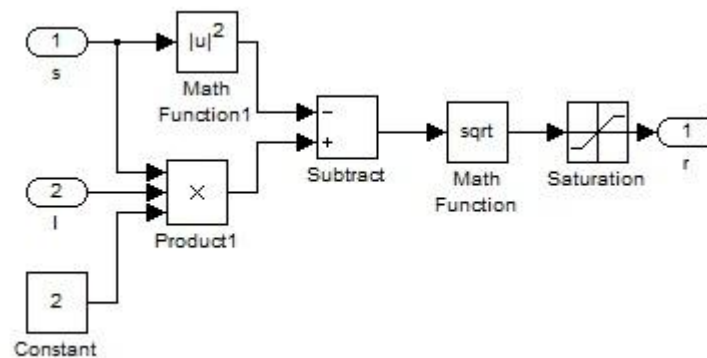
Jelikož se poloměr otáčení r mění s ohledem na pohyb kyvadla, je třeba jeho velikost také neustále přepočítávat (2.10). K jeho určení však stačí pouze Pythagorova věta.

$$r = \sqrt{l^2 - (l - s)^2} \quad (2.8)$$

$$r = \sqrt{l^2 - l^2 + 2 * l * s - s^2} \quad (2.9)$$

$$r = \sqrt{2 * l * s - s^2} \quad (2.10)$$

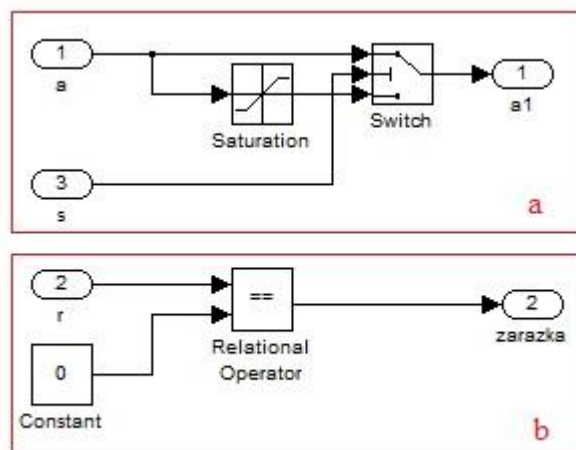
Realizace výpočtu (2.10) v programu Simulink (Obr.2.3).



Obr. 2.3 Blok pro výpočet poloměru otáčení kyvadla

2.1.3 Úprava signálu pro reálné chování regulátoru

Čistě matematický model regulátoru nelze reálně použít, jelikož nepočítá s fyzickými omezeními skutečného kyvadla. Proto je v simulaci zařazen blok s názvem vertikální pohyb (Obr. 2.4), který tato omezení realizuje.



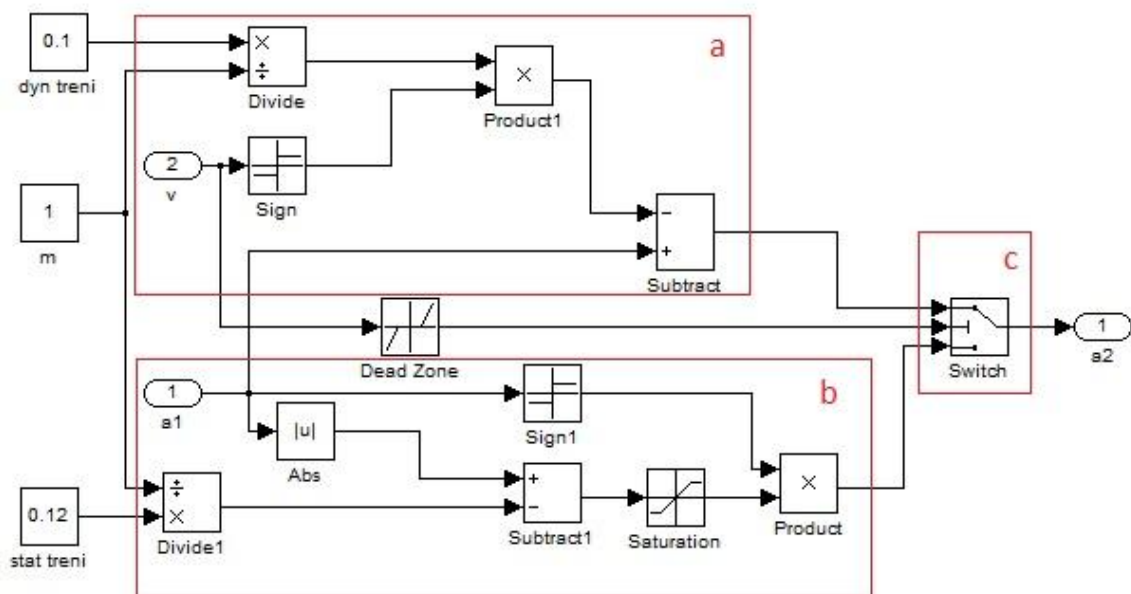
Obr. 2.4 Blok simulující fyzická omezení skutečného kyvadla

Část a simuluje zavěšení kyvadla a způsobuje to, že když je kyvadlo ve své nejnižší poloze, nepůsobí na něj záporné zrychlení (nemůže být urychlováno směrem k zemi). Fungování tohoto bloku se projeví při rozběhu, nebo v nízkých rychlostech, kdy F_g je větší než F_v . Pokud by tento blok v simulaci nebyl, bylo by kyvadlo neustále urychlováno gravitační silou směrem k zemi, což se dá představit, jako případ kdy se na skutečném kyvadle utrhl jeho zavěšení a závaží spadlo na zem.

Část b simuluje zarážky kyvadla tím, že v případě, kdy se kyvadlo dostane do krajní pozice $r=0$, což znamená, že úhel α je 0° , nebo 90° . Vyšle se signál, který nastaví rychlost kyvadla v na nulu.

2.1.4 Tření

Toto je velmi důležitý blok (Obr. 2.5) pro to, aby se simulovaný model choval, jako skutečný regulátor. Pokud by simulace nepočítala s třecí silou, kyvadlo by se netlumeně kývalo kolem rovnovážné polohy $F_g=F_v$.



Obr. 2.5 Blok simulující třecí síly

Část a simuluje dynamické tření, které se projevuje, když kyvadlo mění svou pozici. Tato třecí síla působí proti směru pohybu kyvadla a tlumí již zmíněné kmitání. Jelikož ve zbytku simulace počítám se zrychlením kyvadla $a = \frac{F}{m}$, musím i třecí sílu vydělit hmotností kyvadla m .

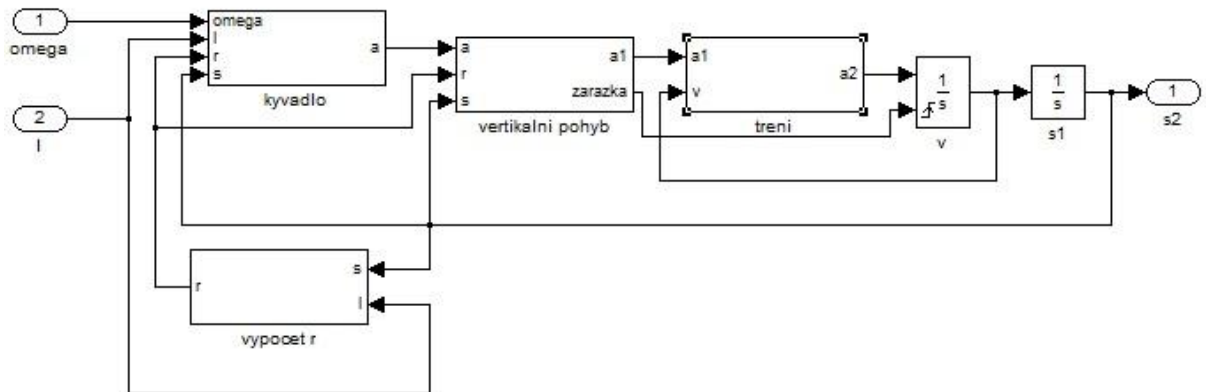
Část b simuluje statické tření, které se projevuje ve chvíli, kdy je vertikální rychlost kyvadla v nulová. Tato třecí síla brání tomu, aby se kyvadlo dalo do pohybu a způsobuje ustálení kyvadla na hodnotě, která neodpovídá úplně přesně rovnovážné poloze.

Část c na základě rychlosti v rozhoduje o tom, zda chod regulátoru v danou chvíli ovlivňuje statické, nebo dynamické tření. Blok "Dead Zone" je v simulaci jen proto, že během

kroků, které Simulink provádí nevyhází rychlost přesně nula. Tento blok tedy vytváří velmi malý interval($2 \cdot 10^{-6}$), ve kterém je bráno v jako nulové.

2.1.5 Regulátor jako celek

Výsledný model regulátoru (Obr. 2.6) je poskládán z předchozích bloků. Vstupem regulátoru je rychlost otáčení ω a délka ramene kyvadla l . Výstupem je výška kyvadla s .



Obr. 2.6 Celkové spojení bloků regulátoru

Kromě předem zmíněných bloků jsou v regulátoru ještě dva integrátory. Prvním je integrátor v jehož výstupem je vertikální rychlost kyvadla. Tento integrátor má navíc ještě resetovací vstup, na který je přiveden signál "zarážka" popsáný v kapitole vertikální pohyb. Integrátor provádí výpočet (2.11).

$$v = \int a * dt \quad (2.11)$$

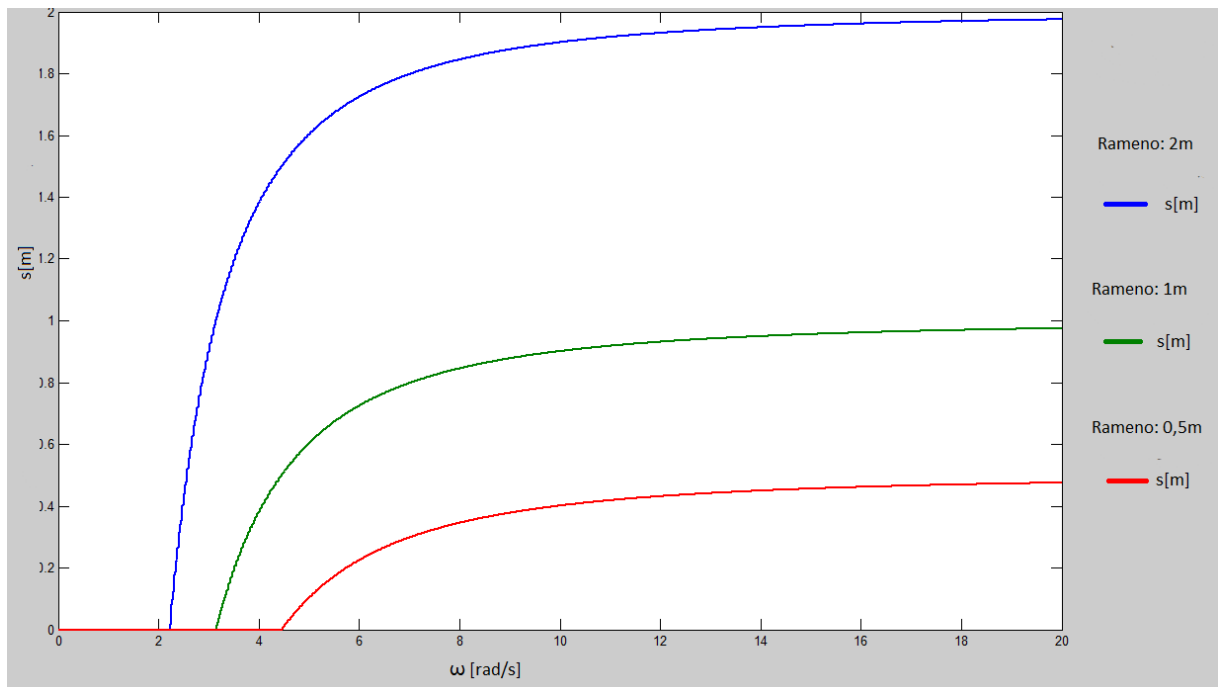
Výstup z tohoto integrátoru se integruje ještě jednou a výsledkem této operace (2.12) je již konečný výstup z regulátoru, kterým je výška kyvadla s .

$$s = \int v * dt \quad (2.12)$$

2.2 Chování regulátoru

2.2.1 Změna délky ramene

Chování regulátoru lze ovlivnit pomocí změny třecí síly nebo délky ramene. Délka ramene slouží k nastavení regulovaných otáček. Vliv délky ramene je vidět na následujícím grafu (Obr. 2.7). Je třeba brát v potaz, že délka ramene l ovlivní také maximální velikost výšky s , jelikož ta v ustáleném stavu nikdy nemůže překonat velikost l .

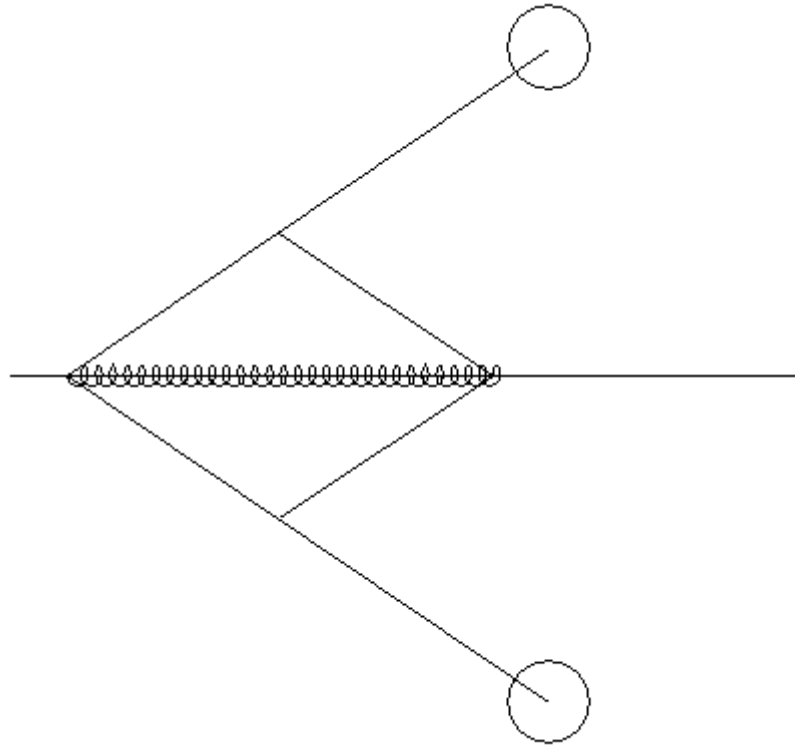


Obr. 2.7 Závislost chování regulátoru na délce ramene kyvadla

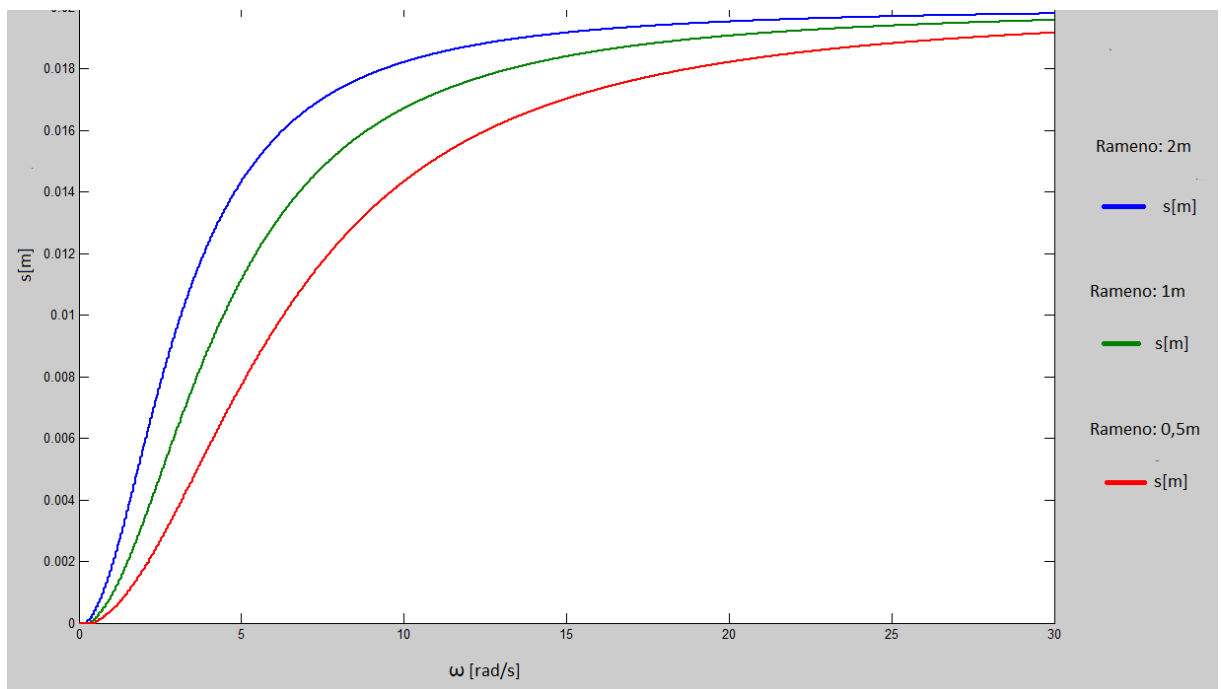
To že se maximální velikost výšky s , která by se používala jako výstup regulátoru, mění by ztížilo práci při řízení pohonu. Dále by mohl být problém se vznikem nelineární momentové charakteristiky pohonu, jelikož je z grafu vidět, že při malé rychlosti kyvadlo nereaguje a když se otáčky zvýší dost na to aby zareagovalo, mění se jeho výstup nelineárně a hodnota s se limitně blíží l .

Tyto nedostatky regulátoru lze odstranit úpravou jeho konstrukce (Obr. 2.8). Jako první jsem vyřešil změny v maximální výšce s tak, že jsem začal brát výstup ze speciální páky za tímto účelem připevněné na kyvadle, tuto páku jsem využil také k umístění pružiny, která v regulátoru nahradí gravitační sílu, pro zjednodušení počítám s tím, že síla pružiny působí na kyvadlo stejně jako síla gravitační s tím rozdílem, že je tato síla lineárně úměrná stlačení pružiny a na kyvadlo působí pomocí jednoramenné páky. Co se týče reálného provedení

regulátoru, v případě použití pružiny bude uložení regulátoru horizontální, namísto původního vertikálního.



Obr. 2.8 Náskres regulátoru po úpravách



Obr. 2.9 Závislost chování regulátoru na délce ramene kyvadla po úpravách

Dalšího zlepšení chování se dá dosáhnout prací s výstupem regulátoru. Pokud se nebudeme snažit z regulátoru dostat maximální výchylku, ale regulátor nastaví nulový moment motoru ještě dříve, například při výchylce ramene regulátoru na 60° , získáme výstup z regulátoru poměrně lineární.

2.2.2 Změna třecí síly

Třecí síla je dána nejen konstrukcí samotného regulátoru, ale často je z větší části tvořena odporem zařízení snímajícího výstup regulátoru. Například při regulaci parního stroje může být tímto zařízením škrtecí ventil. Díky tomu, pokud je potřeba zmenšit vliv třecí síly na regulátor, lze to udělat zvětšením hmotnosti kyvadla. Toto zvětšení hmotnosti kyvadla ovlivní tření v samotném regulátoru, ale tření způsobené zařízeními snímajícími výstup regulátoru neovlivní a právě tyto třecí síly bývají mnohem větší. Pokud je třecí síla působící na regulátor malá, regulátor má sklony ke kmitání při náhlé změně rychlosti, což v dobách jeho používání příliš nevadilo, jelikož se většinou používal k regulaci parních strojů s velkou setrvačností, ale pokud by reguloval pohon, který by byl schopný na tyto rychlé změny reagovat, byl by tento regulátor v podstatě nepoužitelný. Kmitání se dá zvýšením třecí síly omezit, toto zvýšení však vede ke vzniku offsetu a snížení citlivosti regulátoru vůči malým změnám otáček, které způsobí statické tření.

2.3 Použití regulátoru pro regulaci malého elektromotoru

Pro regulaci elektromotoru lze použít Wattův regulátor několika způsoby. Některé z nich jsou vypsány již v kapitole Historie. Já jsem se rozhodl pro moderní řešení za použití pulzního měniče řízeného pomocí PWM. Při realizaci regulátoru by byl jeho výstup snímán pomocí posuvného potenciometru. Napětí na potenciometru by odpovídalo požadovanému proudu a na jeho základě by regulátor proudu nastavoval řídicí napětí pro PWM měniče.

2.3.1 Návrh parametrů

V simulaci je možné za blok regulátoru připojit ještě další bloky, které budou simulovat chování malého motoru. Hodnoty těchto bloků jsem určil na základě naměřených charakteristik skutečného elektromotoru a proudového regulátoru. Motor z jehož charakteristik vycházím, má výkon 1,7 kW, takže se o úplně malý motor nejedná, ale rád bych tímto označením zdůraznil, že je mnohem menší než parní stroje pro které byl Wattův regulátor původně zkonstruován a na rozdíl od parního stroje, nemá setrvačnick, který by jeho reakci na změnu momentu zpomaloval.

Chování proudového regulátoru jsem se rozhodl zjednodušit a ignorovat jeho zakmitání, díky tomu s ním lze počítat jako s aperiodickým blokem prvního řádu, jehož časová konstanta je 0,079s.

Pro zjištění parametrů motoru jsem nejprve stanovil hodnoty $\frac{M}{J}$ pro motor a zátěž k čemuž jsem využil zlom charakteristiky v oblasti kolem nulových otáček. Poté jsem vypočítal moment motoru, zátěže a moment setrvačnosti(2.14; 2.16; 2.15).

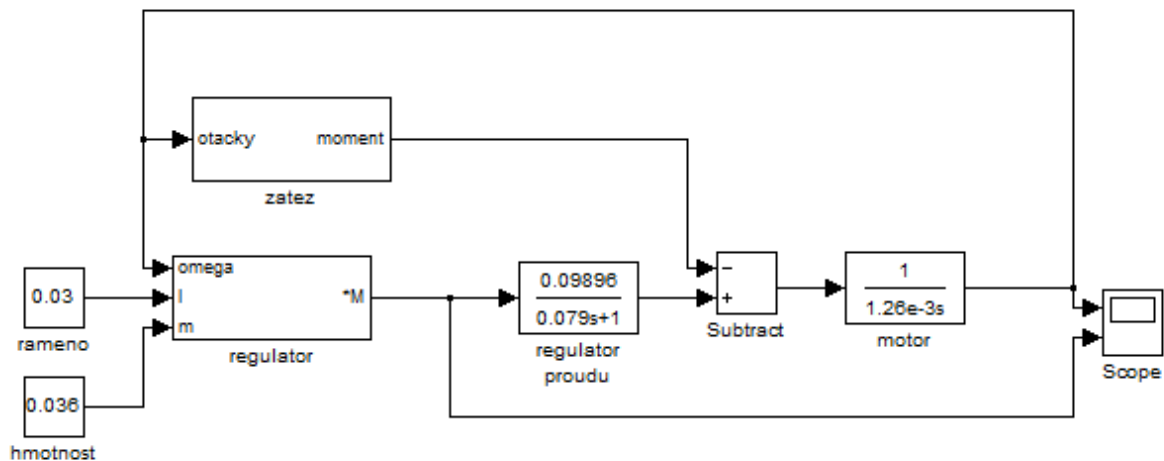
$$c * \Phi = \frac{U_i}{\omega} = \frac{17,5}{89} = 0,197 \quad (2.13)$$

$$M_m = c * \Phi * I = 0,197 * 0,5 = 0,0985 \text{ Nm} \quad (2.14)$$

$$J = \frac{M_m}{78,54} = \frac{0,0985}{78,54} = 1,26 * 10^{-3} \text{ kg} * \text{m}^2 \quad (2.15)$$

$$M_z = 26,18 * J = 26,18 * 1,26 * 10^{-3} = 0,03299 \text{ Nm} \quad (2.16)$$

Tyto hodnoty jsem poté použil v simulaci (Obr. 2.10).



Obr. 2.10 Zapojení regulátoru a motoru

Jelikož regulovaný motor je velmi malý, objevily se problémy se stabilitou. Pokud jsou reakce motoru na změnu řízení rychlejší, než reakce regulátoru na změnu rychlosti, dochází ke kmitání. Frekvence kmitů matematického kyvadla je dána rovnicí (2.17)

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (2.17)$$

Z tohoto vztahu lze vidět, že reakci kyvadla můžeme zrychlit buď zkrácením jeho ramene, nebo zvětšením tíhového zrychlení, což v tomto případě znamená zvětšení tuhosti pružiny. Tuhost skutečné pružiny o velikosti, jaká je potřeba do tohoto regulátoru, může být například $250 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$.

Při návrhu ostatních parametrů regulátoru jsem postupoval jako technici v 19. století, což znamená odhad parametrů na základě intuice a konečné vyladění regulátoru dle jeho chování. V případě Wattova regulátoru je tento postup obzvlášť výhodný, jelikož při použití jiných metod by byla velikým problémem nelinearita regulátoru. Přibližnou délku ramene kyvadla jsem otestoval na modelu regulátoru bez pružiny, jelikož působení tíhového zrychlení není ovlivněno hmotností kyvadla, ani délkou ramene, na rozdíl od působení pružiny. Protože je regulovaný motor opravdu malý a na změny reaguje rychle vhodné rameno vycházelo v řádu jednotek centimetrů. Čemuž musela být přizpůsobena velikost závaží a tím i jeho hmotnost. Jako závaží jsem tedy zvolil mosaznou kuličku o průměru 2cm. Což znamená že závaží kyvadla váží 36g (2.18).

$$m = \frac{\rho * \pi * d^3}{6} = \frac{8500 * \pi * 0,02^3}{6} = 0,036 \text{ kg} \quad (2.18)$$

Po dosazení hodnot do regulátoru jsem zjistil, že nevhodnější délkou ramene je 5cm. Menší regulátor by se díky svým rozměrům špatně konstruoval a delší rameno nelze zvolit, protože by otáčky motoru netlumeně kmitaly vlivem pomalé reakce regulátoru. Z těchto hodnot jsem vypočítal, že síla, kterou vytváří pružina, je v okamžiku, kdy regulátor dodává nulový požadavek momentu, 2,5 N (2.19).

$$F_p = k * x = 250 * 0,01 = 2,5 \text{ N} \quad (2.19)$$

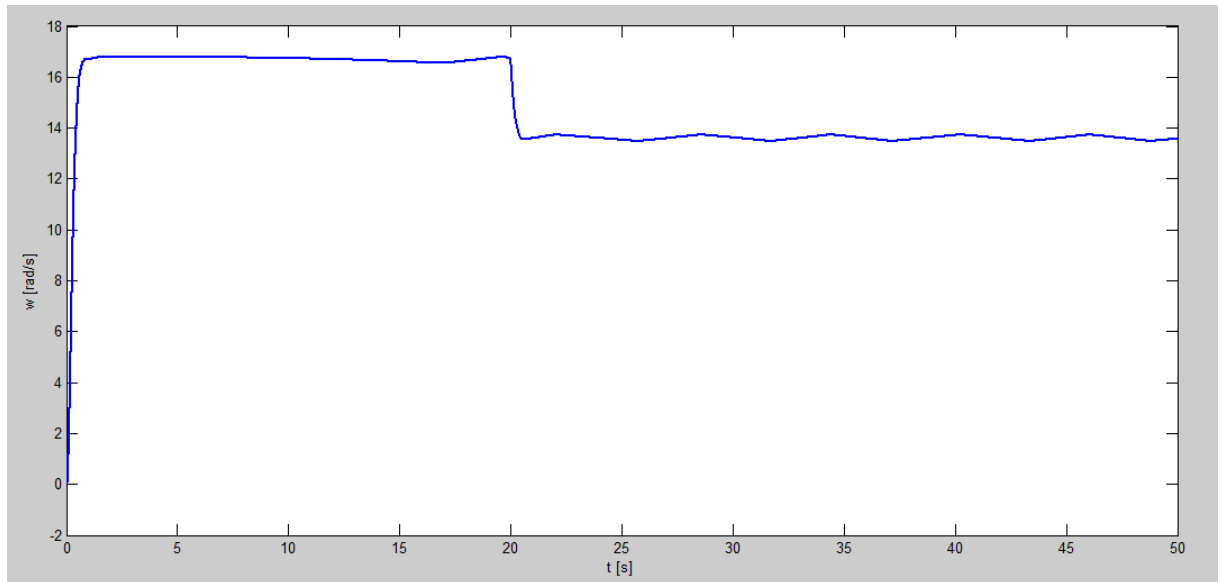
Na základě velikosti této síly, jsem zvolil velikost maximální přípustné třecí síly (2.10).

$$F_t = \frac{F_p}{100} = \frac{2,5}{100} = 0,025 \text{ N} \quad (2.20)$$

Třecí síla je zvolena 100-krát menší, aby se snížil její vliv na otáčky motoru. Statická třecí síla zabraňuje regulátoru nastavit přesně požadavek momentu, při kterém by motor nezrychloval ani nezpomaloval. Díky tomuto vlivu dochází k netlumenému kmitání otáček, toto kmitání je však díky malé třecí síle pouze v rozsahu $\pm 1\%$ hodnoty ustálené rychlosti.

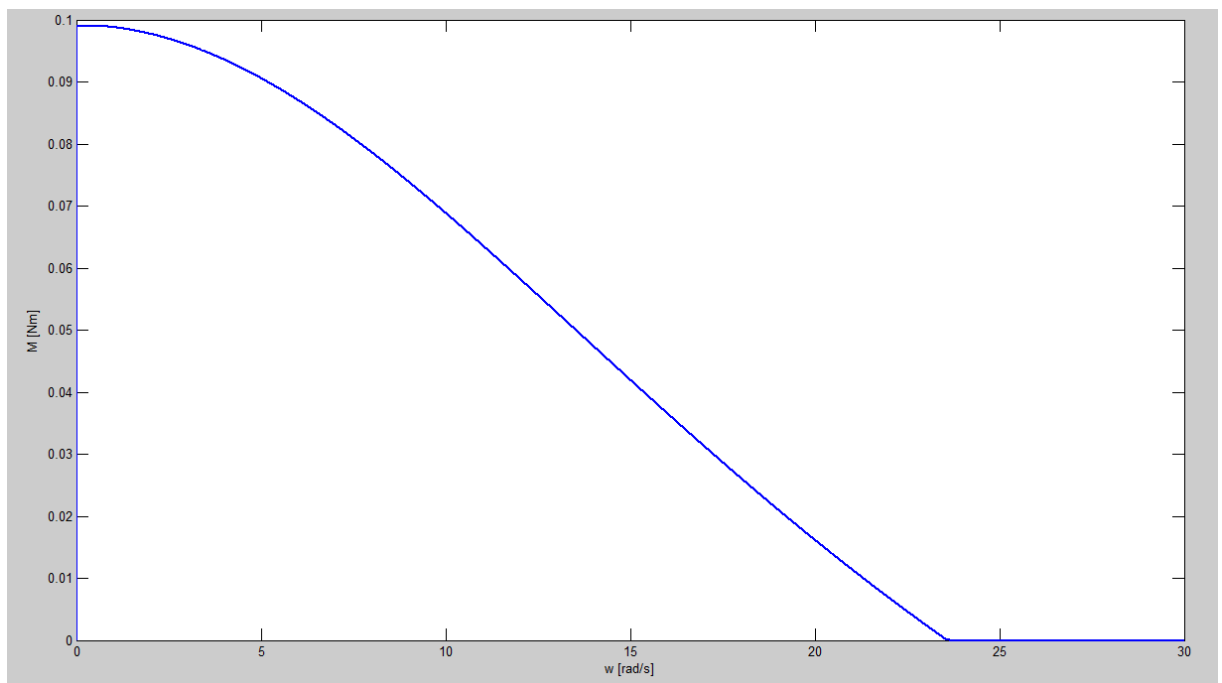
2.3.2 Chování soustavy

Jak již bylo zmíněno v kapitole historie, Wattův regulátor se nedá použít k udržení konstantních otáček, ale dá se použít, jako jakási ochrana proti nechtěným stavům motoru, jelikož zvládne omezit maximální otáčky motoru a pomoci motoru při rozběhu, dodáním maximálního momentu (toto platí hlavně pro verzi regulátoru bez pružiny).



Obr. 2.11 Změna otáček v závislosti na zátěžném momentu

Průběh otáček (Obr. 2.11) ukazuje děj při kterém je motor nejprve rozběhnut s vypočítaným zátěžným momentem a v čase 20s je tento moment zvýšen o 50%, což vede ke změně rychlosti. Změna rychlosti vychází z momentové charakteristiky (Obr. 2.12), kterou regulátor motoru "vnucuje". Z grafu je také vidět kmitání způsobené statickým třením.



Obr. 2.12 Momentová charakteristika regulovaného motoru

Díky tomuto se nabízí možnost, že pokud by nevyhovovala momentová charakteristika požadavkům na chování daného pohonu, bylo by ji možno upravit vhodnou volbou odporové dráhy potenciometru snímajícího výšku kyvadla.

Závěr

Historie technického vývoje je často velmi opomíjeným tématem, pravděpodobně z důvodu, že technický vývoj neustále směřuje dopředu a staré technologie jsou zapomínány, protože byly nahrazeny lepšími. Přestože samotné vynálezy a objevy, na které se zapomnělo, mají dnes již pouze historickou hodnotu a jejich použití v praxi je nepravděpodobné, lze se poučit z jejich vývoje. Na vývoji regulace pohonů v devatenáctém století je například vidět, jak je důležitá spolupráce mezi teoretickým vývojem a jeho aplikací v praxi.

Simulace Wattova regulátoru potvrdila jeho nedostatky popsané v kapitole Historie. Jednou z myšlenek během vývoje simulace byla možnost měnit regulované otáčky pomocí délky ramene kyvadla. Tento způsob se ukázal jako nevhodný. Délka ramene sice ovlivňuje reakci regulátoru na otáčky, ale jelikož odstředivá síla závisí na druhé mocnině úhlové rychlosti, je na malou změnu regulované rychlosti potřeba velká změna délky ramene. Délka ramene navíc může být omezena v zájmu stability nebo rozměrů regulátoru, proto by bylo lepší volit regulované otáčky připojením regulátoru k pohonu přes mechanické převody.

Jako jednu z nevýhod Wattova regulátoru ukázala simulace jeho pomalou reakci, která je problémem hlavně při regulaci motorů s malým setrvačným momentem. Další velkou nevýhodou je offset při změně zatížení. Také je nutné si uvědomit, že se jedná o zařízení se spoustou pohyblivých částí a díky tomu je velmi náročný na údržbu. Proto je použití Wattova regulátoru v dnešní době, kdy jsou k dispozici poměrně levné a spolehlivé elektronické regulátory, velmi nevýhodné a jedinou výjimkou by mohlo být jeho využití, ne pro jeho technické kvality, ale spíše z estetických důvodů.

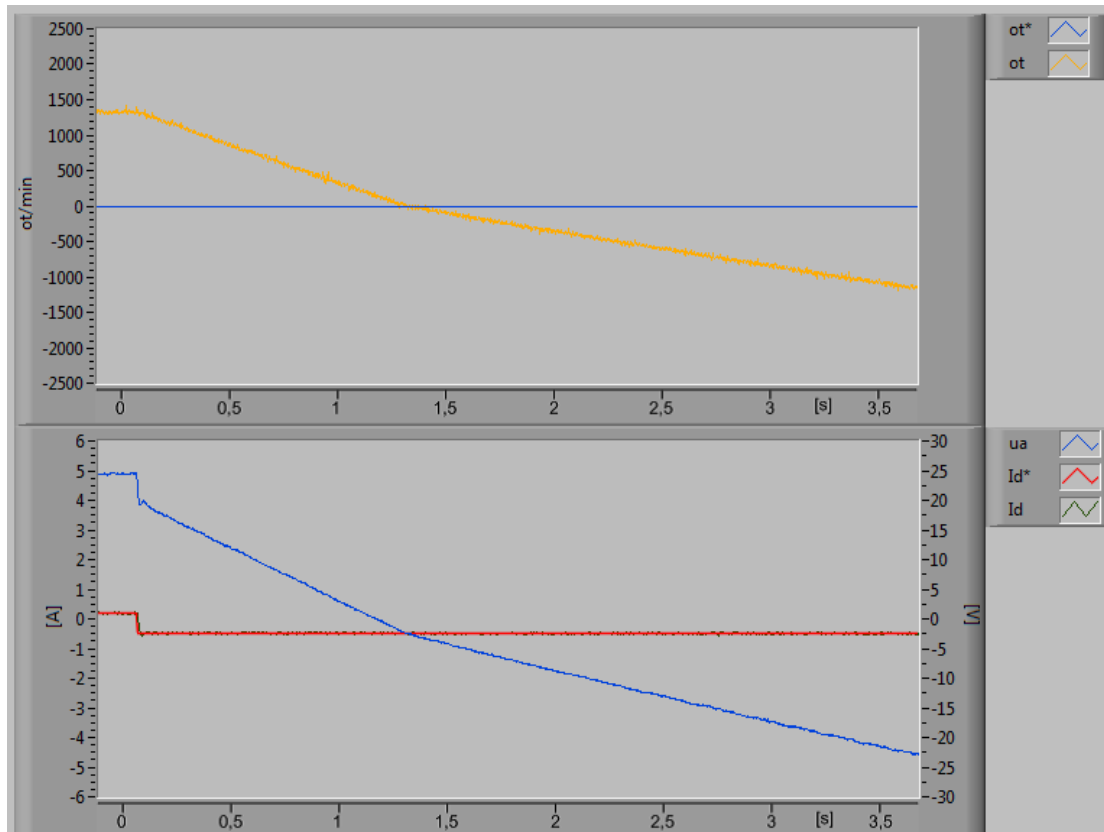
Výsledná práce stručně popisuje fungování regulátorů vyvinutých před druhou světovou válkou včetně pokroků v porozumění jejich chování. Navíc detailně rozebírá princip fungování Wattova regulátoru a jednotlivé činitele, které mohou ovlivnit jeho chování. Díky tomu může být použita jako pomoc při výuce regulační techniky.

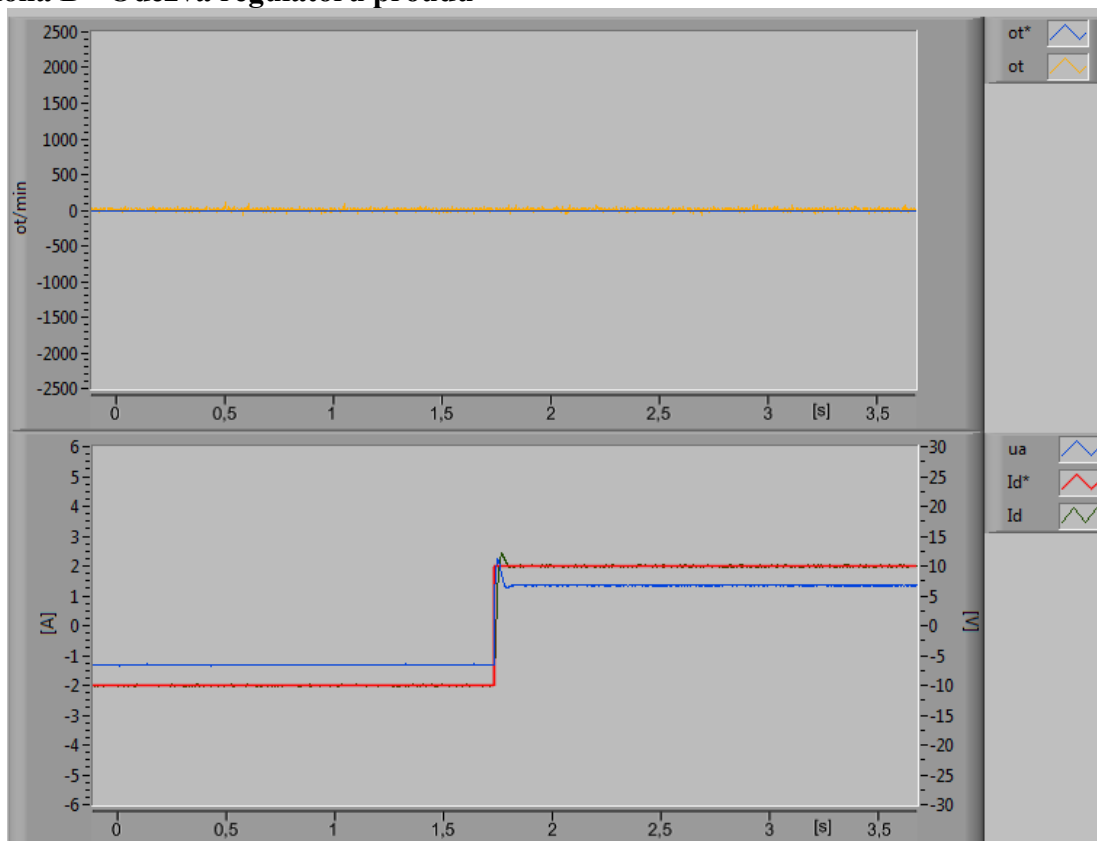
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAJN, M. *Základy jemné mechaniky a hodinářství*. 1.vyd. Praha: Práce, 1953. 410 s.
- [2] BENNETT, S. *A brief history of automatic control*. IEEE Control Systems, 2002. 9 s.
- [3] BENNETT, S. *A History of Control Engineering, 1800-1930*. Institution of Electrical Engineers Stevenage, 1979. 214 s.
- [4] BENNETT, S. *A History of Control Engineering, 1930-1955*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1993. 250 s.
- [5] LEPSCHY, A. M., MIAN, G. A., VIARO, U. *Feedback control in ancient water and mechanical clocks*. IEEE Education Society, 2002. 7 s.
- [6] BISSELL, C. C. *A History of Automatic Control*. *Springer Handbook of Automation*. Springer 2009. 17 s.
- [7] KIMBERLY, E. E. Voltage control of A-C generators [online]. [Cit. 20.3.2016] Dostupné z: http://www.vias.org/kimberlyee/ee_22_04.html
- [8] Metadyne [online]. [Cit. 5.4.2016] Dostupné z: <http://circuitglobe.com/metadyne.html>
- [9] Amplidyne [online]. [Cit. 5.4.2016] Dostupné z: <http://circuitglobe.com/amplidyne.html>
- [10] SIVANAGARAJU, S. *Power system operation and control*. Dorling Kindersley, 2010. 588 s.
- [11] FAREY, J. *A treatise on the steam engine: historical, practical and descriptive*. Printed for Longman, Rees, Orme, Brown and Green, 1827. 728 s.

Přílohy

Příloha A - Odezva motoru



Příloha B - Odezva regulátoru proudu

Příloha C - Štítkové hodnoty motoru

