

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE
2020**

**JAN
PULEC**

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky
Obor: Přístrojová a řídicí technika

Nastavovací metody PID regulátoru v aplikaci na
řízení vodní turbíny

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Bc. Jan Pulec
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Fišer, Ph.D.
Rok: 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pulec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **439075**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Nastavovací metody PID regulátoru v aplikaci na řízení vodní turbíny

Název diplomové práce anglicky:

PID tuning methods applied to hydro-turbine system control

Pokyny pro vypracování:

- proveďte rešerši problematiky řízení soustrojí vodní turbíny a generátoru
- identifikovaný model vodní turbíny analyzujte pro jednotlivé režimy jejího provozu
- analyzujte nastavovací metody PID z hlediska jejich vhodnosti pro režimy provozu vodní turbíny

Seznam doporučené literatury:

- [1] Koritarov, V. and Guzowski, L.: Review of Existing Hydroelectric Turbine-Governor Simulation Models. Report ANL/DIS-13/05, Argonne National Laboratory, 2013, pg. 102.
- [2] IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, IEEE Std 1207-2011, June 20, 2011.
- [3] O'Dwyer, A.: Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd ed., World Scientific Publishing, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jaromír Fišer, Ph.D., U12110.3

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **27.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jaromír Fišer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne: 10.8.2020

Podpis:

Poděkování

Tato diplomová práce byla vytvořena se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu Národní centra kompetence TN01000024.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Jaromíru Fišerovi, Ph.D. za rady a podněty, kterými mi pomáhal při psaní diplomové práce. Velké poděkování patří mým rodičům, kteří mě při celém studiu podporovali a vytvářeli mi zázemí.

Anotace

Název:	Nastavovací metody PID regulátoru v aplikaci na řízení vodní turbíny
Autor:	Bc. Jan Pulec
Škola:	ČVUT FS
Ústav:	Ú12110 – Ústav přístrojové a řídicí techniky
Vedoucí:	Ing. Jaromír Fišer, Ph.D.
Klíčová slova:	regulátor, PID, turbína, ostrovní provoz, přenosová soustava, nastavovací metody
Anotace:	Tato práce se zabývá návrhem PID regulátoru a porovnáním nastavovacích metod v aplikaci řízení vodní turbíny. Na základě vypracované rešerše byly analyzovány jednotlivé provozní režimy turbíny. Pro návrh regulátoru bylo porovnáváno více metod s využitím především integrálních a frekvenčních kritérií.

Annotation

Title:	PID tuning methods applied to hydro-turbine system control
Author:	Bc. Jan Pulec
University:	CTU in Prag – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12110 – Department of instrumentation and control engineering
Supervisor:	Ing. Jaromír Fišer, Ph.D.
Key words:	controller, PID, turbine, island mode, transmission grid, tuning methods
Annotation:	This thesis deals with design of PID controller in application of a water turbine. Based on the elaborated research were different operation modes of a water turbine analysed. For designing the controller were various tuning method used and compared using especially integral and frequency performance criterion.

Obsah

Zadání	2
Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Anotace	5
Annotation.....	6
Obsah	7
Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Předmluva	11
2 Úvod do problematiky	12
2.1 Přenosová soustava a její regulace.....	13
2.1.1 Udržování výkonové rovnováhy	15
2.1.2 Regulace frekvence a činných výkonů.....	16
2.1.3 Regulace napětí a jalových výkonů.....	18
2.2 Vodní turbíny, jejich regulace a využití.....	20
2.2.1 Francisova turbína.....	21
2.2.2 Kaplanova turbína	22
2.2.3 Peltonova turbína	24
2.3 Vodní díla v ČR a jejich význam v rámci výroby elektřiny.....	26
3 Nastavování PID regulátoru v aplikaci na řízení vodní turbíny.....	29
3.1 Popis řízeného systému.....	29
3.2 Model řízeného systému	29
3.3 Parametry modelu	30
3.4 Akční člen	31
3.5 Analýza provozních režimů	32
3.6 Regulátor.....	33
3.7 Stanovení kritérií pro porovnání kvality regulace - odezva na poruchu	33
3.8 Jednotlivé ladicí metody - odezva na poruchu.....	34
3.8.1 Naladění pomocí kritického zesílení - Ziegler-Nichols	34
3.8.2 Naladění metodou lambda tuning	36
3.8.3 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 60°	38
3.8.4 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 45°	39
3.8.5 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 30°	40

3.8.6	Shrnutí jednotlivých variant a porovnání	41
3.9	Stanovení kritérií pro porovnání kvality regulace - sledování žádané hodnoty	43
3.10	Jednotlivé ladicí metody - odezva na změnu žádané hodnoty	43
3.10.1	Naladění pomocí kritického zesílení - Ziegler-Nichols	43
3.10.2	Naladění metodou lambda tuning	44
3.10.3	Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 60°	46
3.10.4	Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 45°	47
3.10.5	Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 30°	48
3.10.6	Shrnutí jednotlivých variant a porovnání	49
3.10.7	Odezva na rampovou změnu žádané hodnoty	50
4	Závěr	52
5	Seznamy	53
5.1	Seznam obrázků	53
5.2	Seznam tabulek	54
5.3	Seznam použité literatury	55
5.4	Seznam příloh	56

Seznam použitých zkratk a symbolů

A	Průřez přívodního potrubí [m^2]
a	Rychlost šíření zvuku ve vodě [$m \cdot s^{-1}$]
D	Průměr přívodního potrubí [m]
ENTSO-E	Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny
g	Tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
G_m	Amplitudová bezpečnost
G_{PID}	Přenos PID regulátoru
G_{RK}	Přenos rozvodného kola
H_0	Nominální spád [m]
IAE	Integrál absolutní hodnoty regulační odchylky
$ITSE$	Integrál čtverce regulační odchylky násobeného časem
K_C	Zesílení regulátoru
K_P	Zesílení modelu
L	Délka přívodního potrubí [m]
M_S	Maximum modulu citlivostní funkce
M_Z	Zatěžující moment
N	Konstanta filtru derivační složky regulátoru
P_G	Generovaný výkon
P_m	Fázová bezpečnost
P_S	Spotřebovaný výkon
P_Z	Ztrátový výkon
Q	Okamžitý průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
Q_0	Nominální průtok [$m^3 \cdot s^{-1}$]
T_D	Derivační časová konstanta regulátoru [s]
T_I	Integrační časová konstanta regulátoru [s]
T_M	Časová konstanta mechanických hmot [s]
T_{REG}	Doba regulace [s]
T_{RK}	Časová konstanta rozvodného kola [s]
t_t	Doba šíření hydraulického rázu přívodním potrubím [s]
T_W	Časová konstanta vodního sloupce [s]

u Akční veličina
VD Vodní dílo
VE Vodní elektrárna
 w Žádaná hodnota
 y Regulovaná veličina
ZN Naladění dle Zieglera-Nicholse

1 Předmluva

Elektrická energie se stala v moderním světě naprosto nezbytnou součástí civilizace, bez níž si již nelze představit normální fungování civilizace. Na elektrické energie je závislé již téměř vše: průmyslová výroba, dopravní infrastruktura, ale i běžné fungování domácnosti je již naprosto závislé na dodávkách elektrické energie. Výpadek dodávek může způsobit značné ztráty, a to nejen ekonomické, ale v případě déle trvajících výpadků i ztráty sociální. Zabránění výpadkům dodávek je úkolem přenosové soustavy, respektive její regulace. Seznámení se se základními způsoby a postupy v regulaci soustavy byla věnována úvodní část této práce. Podmínkou pro možnost regulace přenosové soustavy je však i kvalitní regulace na straně výroby – elektráren. Návrhu regulátoru pro vodní turbínu byla věnována hlavní část této práce.

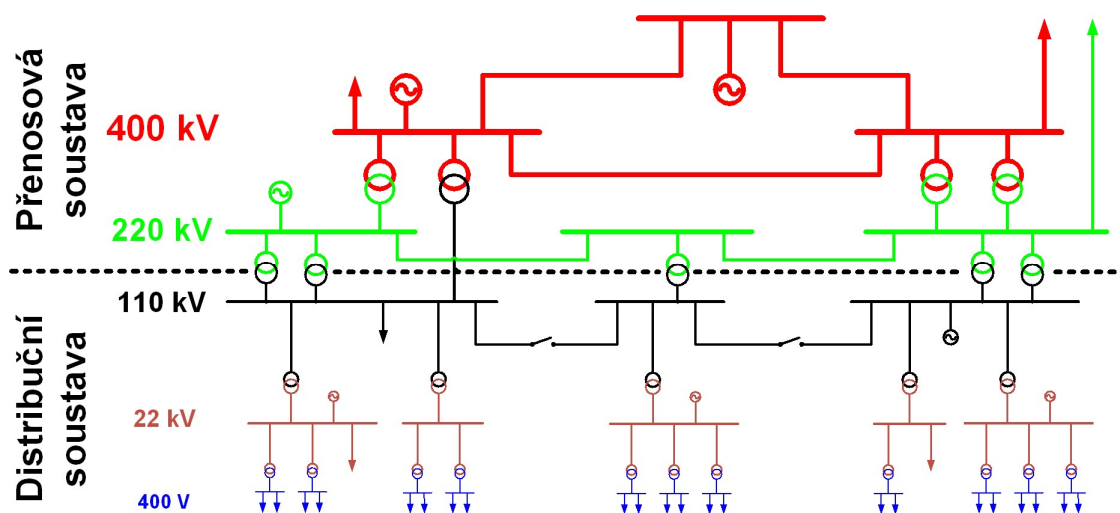
2 Úvod do problematiky

Jak již bylo zmíněnou výše, kvalita a stabilita dodávek elektrické energie zásadně ovlivňují dnešní civilizaci. Kvalitu a stabilitu dodávek ovlivňuje elektrizační soustavu. Několik základních pojmů dle [1] bylo nejprve vymezeno:

Elektrizační soustava - propojená zařízení sloužící k výrobě, přenosu, transformaci a distribuci elektřiny, včetně měřicí, řídicí, ochranné i zabezpečovací techniky.

Distribuční soustava - je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy) a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR, včetně měřicí, řídicí, ochranné i zabezpečovací techniky.

Přenosová soustava - je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV, sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území ČR a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států, včetně měřicí, řídicí, ochranné i zabezpečovací techniky.



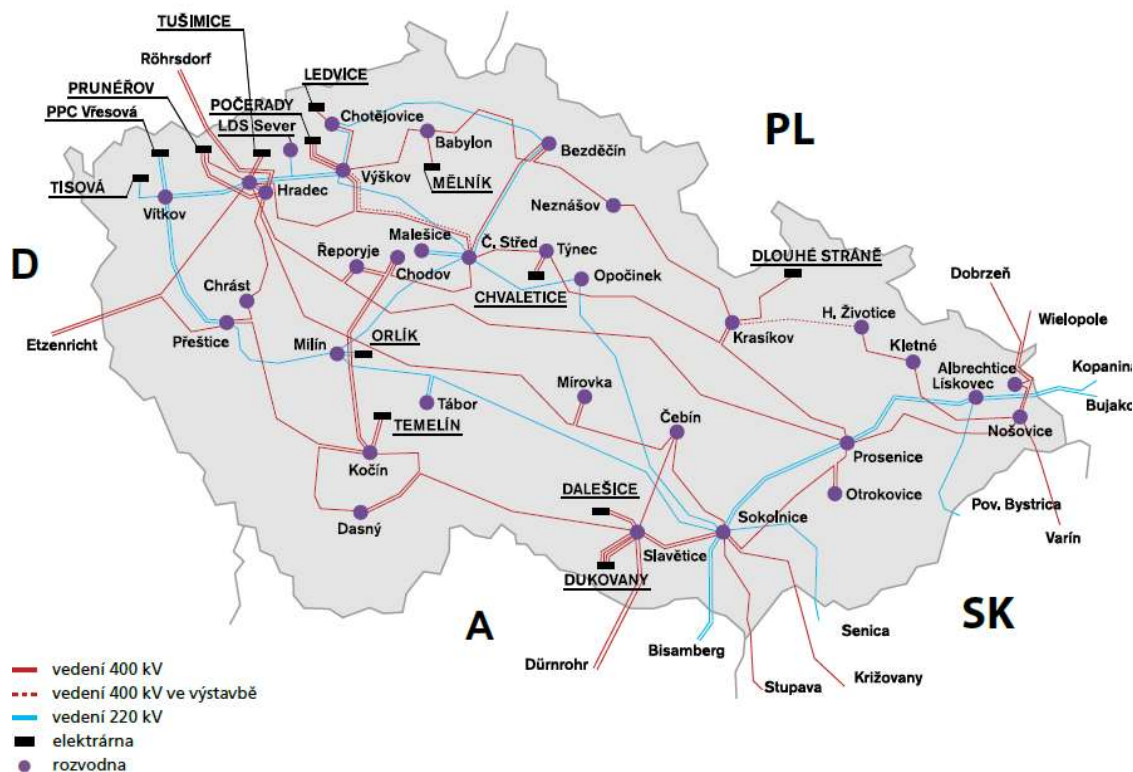
Obrázek 1 - Přenosová a distribuční soustava [2]

2.1 Přenosová soustava a její regulace

Stabilitu dodávek elektrické energie zajišťuje přenosová soustava, resp. její provozovatel. Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je společnost ČEPS, a.s.

Mapa přenosové soustavy v ČR:

Schéma sítě 400 a 220 kV



Obrázek 2 - Mapa přenosové soustavy ČR [2]

Tab. 1 - Popis zařízení přenosové soustavy [3]

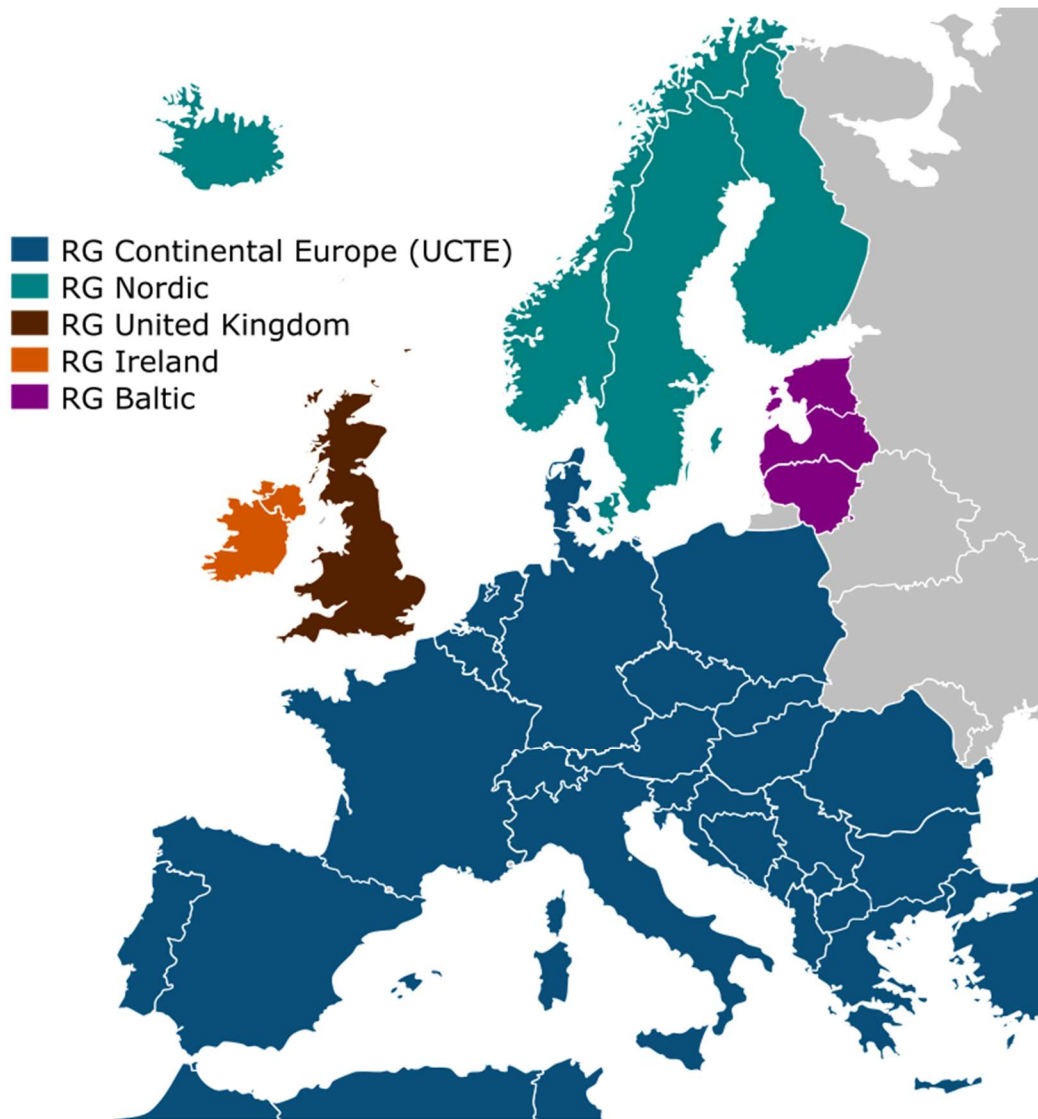
Trasy vedení 400 kV	3 103 km
Trasy vedení 220 kV	1 349 km
Trasy vedení 110 kV	45 km
Délka vedení 400 kV	3 735 km
Délka vedení 220 kV	1 909 km
Délka vedení 110 kV	84 km
Zahraniční vedení 400 kV	11 ks
Zahraniční vedení 220 kV	6 ks
Rozvodny 400 kV	28 ks

Rozvodny 220 kV	14 ks
Rozvodny 110 kV	1 ks
Transformační výkon	22 700 MVA
Transformační výkon 400/400 kV (PST)	3 400 MVA
Transformátory 400/400 kV (PST)	4 ks
Transformátory 400/220 kV	4 ks
Transformátory 400/110 kV	50 ks
Transformátory 220/110 kV	20 ks
Kompenzační výkon 400 kV	660 MVA
Kompenzační výkon 35 kV	270 MVA
Kompenzační výkon 10 kV	633,6 MVA
Kompenzační uzly (tlumivky) 400 kV	4 kV
Kompenzační uzly (tlumivky) 35 kV	5 kV
Kompenzační uzly (tlumivky) 10 kV	14 kV

Základem činnosti provozovatele přenosové soustavy je poskytování systémových služeb. Systémové služby jsou definovány následovně: [4]

- Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase
- Udržování kvality elektřiny (včetně regulace frekvence, činných výkonu, napětí a jalových výkonu)
- Obnova napájení po úplném nebo částečném rozpadu soustavy regulace
- Dispečerské řízení.

Přenosová soustava České republiky je připojena do skupiny ENTSO-E - Evropské síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny. V rámci této skupiny spadá do regionální skupiny kontinentální Evropy. Znázornění skupiny ENTSO-E a jejích regionálních skupin viz Obrázek 3 níže.



Obrázek 3 - Skupina ENTSO-E a vyznačení regionálních skupin [5]

2.1.1 Udržování výkonové rovnováhy

Systémová služba udržování výkonové rovnováhy spočívá ve vyrovnávání odchylek mezi výrobou a spotřebou. Okamžité odchylky mohou být způsobeny následujícími faktory: [4]

- Náhodnou fluktuací zatížení
- Trendovými změnami souvisejícími s tvarem denního diagramu zatížení
- Rozdílem mezi nasmlouvanou dodávkou a skutečnou spotřebou (např. vlivem neočekávaných klimatických výkyvu)
- Poruchovými výpadky bloků
- Změnami dodávek v obchodních hodinách

Pro reakci na okamžité odchylky může provozovatel užívat prostředky, které lze rozdělit do následujících skupin: [4]

- podpůrné služby, které nakupuje od výrobců případně i odběratelů elektřiny
- nákup regulační energie na komerčním základě
- nouzové prostředky – havarijní výpomoci ze sousedních soustav a snížení spotřeby

2.1.2 Regulace frekvence a činných výkonů

Rovnováha činných výkonů, vyjadřující rovnost mezi sumou činného výkonu dodávaného elektrárnami na straně jedné a sumou spotřeby a ztrát ve vedení na straně druhé, je dána rovnicí (1) dle [4].

$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \quad (1)$$

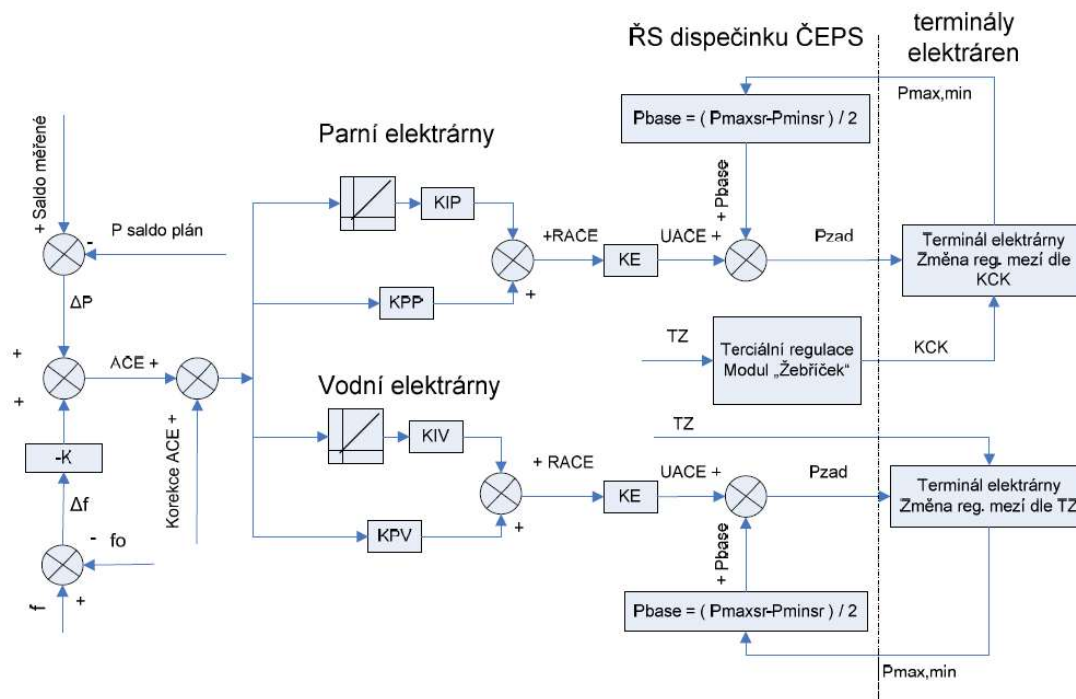
Rovnice (1) platí na úrovni celé propojené soustavy, tedy včetně připojených zahraničních soustav. Členy rovnice se mění následujícími vlivy: [4]

- náhodnými fluktuacemi zatížení
- trendovými změnami souvisejícími s tvarem denního diagramu zatížení
- poruchovými výpadky bloků
- neregulovatelnými dodávkami (např. z větrných elektráren).
- změnami dodávek ve zlomech obchodních hodin.

V případě výpadku bloku jeho výkon převezmou ostatní bloky (generátory) v závislosti na elektrické vzdálenosti od místa výpadku. Tento jev je nazýván elektrické rozdělení rázu činného výkonu. Než dojde k úplnému převzetí výkonu, výkon v soustavě je nedostatečný a tím klesá frekvence sítě. Na pokles frekvence sítě reagují regulátory jednotlivých bloků, které otevírají regulační ventily. Tento proces se nazývá **primární regulace frekvence**. Nutno zdůraznit, že tento proces probíhá na úrovni jednotlivých elektrárenských bloků. [4] Dorovnání vzniklé odchylky procesem primární regulace by mělo nastat do 30 sekund. [6]

Dále je nutné zmínit, že primární regulace probíhá v úrovni celé propojené sítě, tedy včetně zahraničních připojených přenosových soustav. Vlivem tzv. principu solidarity při pokrývání výkonové rovnováhy může vzniknout odchylka oproti plánovanému a nasmlouvanému importu/exportu elektřiny. Vyrovnávání této odchylky provádí **sekundární regulace frekvence**, která probíhá na dispečinku ČEPS. Regulátor vyhodnocuje data terminálů rozvoden u hranic,

měřících předávaný výkon, a z terminálů elektráren poskytujících podpůrnou službu sekundární regulace. Schéma bloku sekundární regulace je na obr. níže: [4]



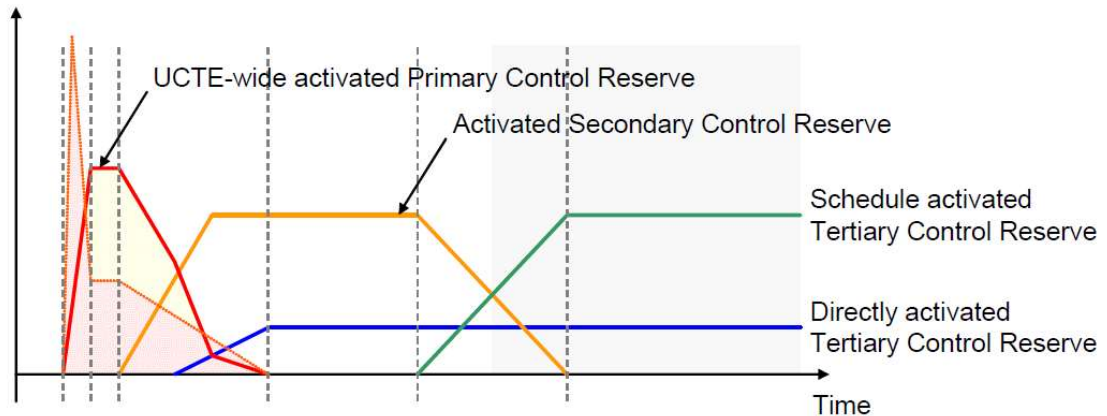
Obrázek 4 - Sekundární regulace frekvence [4]

Dorovnání vzniklé odchylky procesem sekundární regulace by mělo nastat do 15 minut od vzniku poruchy. [6]

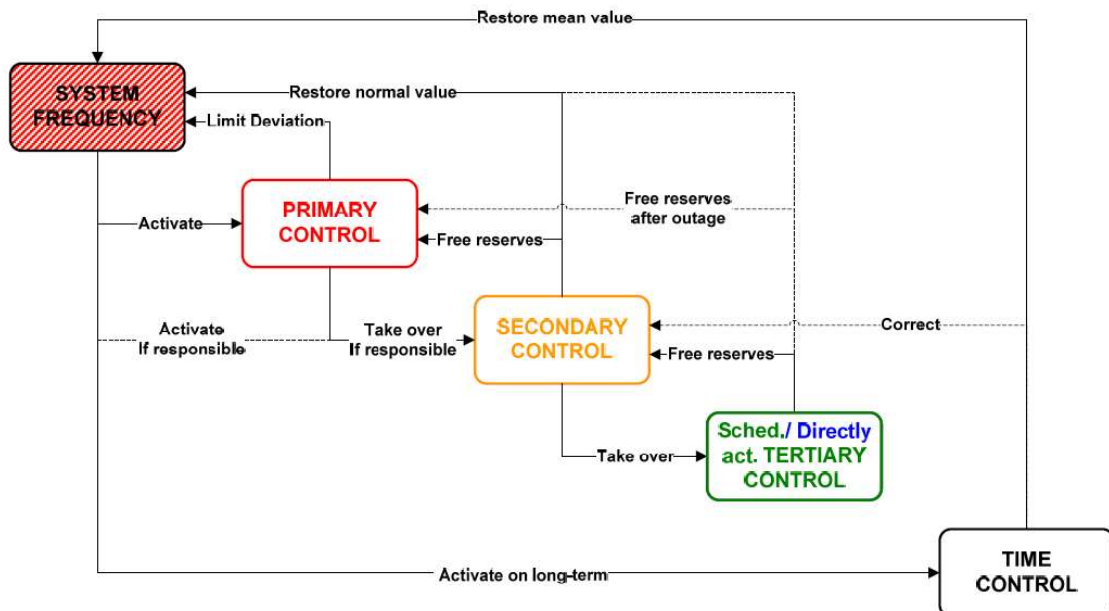
V hierarchické regulaci dále následuje **terciální regulace**, jejímž úkolem je nahrazení vyčerpané sekundární regulační zálohy. Pro terciální regulaci se zpravidla využívá točivá rezerva na blocích poskytujících podpůrnou službu terciální regulace. Na základě informací poskytovaných terminály elektráren o ceně podpůrné službě terciální regulace se sestavuje žebříček a následně aktivuje nejvýhodnější terciální záloha. [4]

Pokud ani terciální záloha nedostačuje na pokrytí výpadku, je aktivována **rychle startující rezerva** - v podmínkách České republiky hlavně Vltavská kaskáda a přečerpávací elektrárny.

Shrnutí a přehled jednotlivých regulačních procesů a jejich následnost viz níže Obrázek 5 a Obrázek 6.



Obrázek 5 - Následnost regulačních procesů [6]



Obrázek 6 - Schéma regulačních procesů [6]

2.1.3 Regulace napětí a jalových výkonů

Na řízení napětí a toků jalového výkonu je nutno pohlížet jako na lokální veličinu (na rozdíl od výkonové rovnováhy) v rámci elektrizační soustavy.

Napětí na přípojnicích rozveden je ovlivňováno: [4]

- zapínáním, vypínáním a přepojováním vedení a transformátoru
- zapínáním, vypínáním a regulací odběru elektřiny
- zapínáním, vypínáním a regulací elektrárenských bloku
- zapínáním, vypínáním a proměnnou dodávkou ostatních zdrojů elektřiny

- zapínáním a vypínáním kompenzačních prostředků
- změnami odboček regulačních transformátorů
- poruchami (zkraty apod.) a tranzitními toky v síti

K řízení napětí a toků jalového výkonu se nejčastěji používají: [4]

- synchronní stroje (elektrárenské bloky, rotační kompenzátory)
- kondenzátorové baterie
- tlumivky
- polovodičová zařízení (např. SVC z angl. „Static VAr Compensators” a frekvenční měniče používané ve fotovoltaických a větrných elektrárnách)
- také transformátory s regulací odboček pod zatížením

Hlavními přínosy regulace napětí a jalových výkonů jsou: [4]

- Zvýšení bezpečnosti a hospodárnosti provozu.
- Zvýšení kvality dodávky elektřiny koncovému odběrateli.
- Snížení počtu regulací odboček na transformátorech.
- Dodržení dohodnuté hodnoty tolerance toku jalového výkonu s přenosovou nebo distribuční soustavou.
- Eliminace negativního zpětného působení obnovitelných zdrojů na regulovanou soustavu.
- Eliminace zpětného působení průmyslových velkoodběratelů na regulovanou distribuční soustavu.
- Snížení nároků na dispečera regulované distribuční soustavy.
- Zvýšení úrovně diagnostiky technologie výroben zapojených do regulace napětí a jalových výkonů.
- Eliminace přetahování elektricky blízkých generátorů zapojených do regulace napětí a jalových výkonů

2.2 Vodní turbíny, jejich regulace a využití

Vodní turbína obecně je mechanický stroj, sloužící k přeměně kinetické a tlakové energie vody na mechanickou energii na hřídeli turbíny. Nejčastěji používanými turbínami jsou následující typy: Francisova, Kaplanova, Peltonova. [7]

Základním principem vodní turbíny je proudění vody přes lopatky oběžného kola. K zajištění rovnoměrného vstupu proudící vody na oběžné kolo slouží obvykle spirální skříň, následně protéká voda zpravidla přes rozvodné kolo, kde je voda nasměrována ideálním směrem na oběžné kolo pro zajištění nejvyšší možné účinnosti. Oběžné kolo je připojeno na společnou hřídel turbíny a generátoru.

Vodní turbíny lze dělit dle následujících hledisek:

Dle tlaku:

- **rovnotlaké** - u rovnotlakých turbín se tlak vody nemění při průtoku oběžným kolem, všechna tlaková energie se přeměnila na pohybovou již před vstupem na oběžné kolo, např. Peltonova
- **přetlakové** - u přetlakových turbín se mění tlak vody při průtoku oběžným kolem, směrem k výtoku dochází k poklesu tlaku. Tato tlaková energie se mění na pohybovou energii turbíny. Přetlakovými turbínami jsou Francisova a Kaplanova.

Dle orientace proudění:

- axiální - Kaplanova
- radiální
- axiálně-radiální - Francisova
- tangenciální - Peltonova

Dle orientace oběžného kola:

- horizontální
- vertikální
- šikmé - přímoproudé kaplanovy turbíny



Obrázek 8 - Natáčivé lopatky rozvodného kola malé Francisovy turbíny [9]

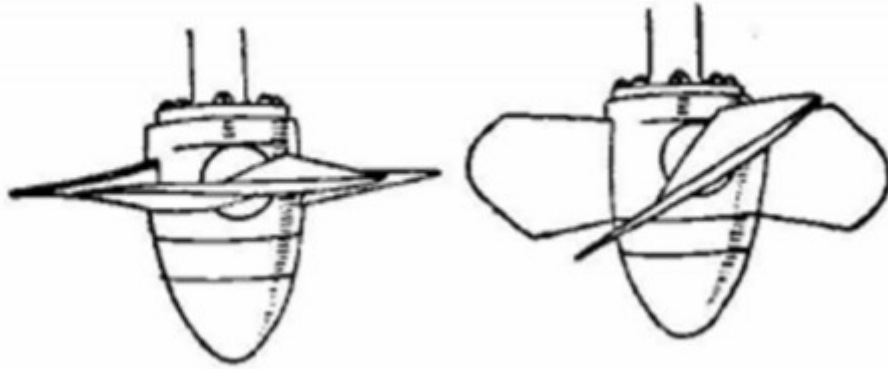
Synchronizace natáčení lopatek se zpravidla provádí mechanicky, např. pomocí táhel a otočného prstence viz Obrázek 9.



Obrázek 9 - Otočný prstenec rozvodného kola Francisovy turbíny [10]

2.2.2 Kaplanova turbína

Kaplanova turbína byla vyvinuta v roce 1912. Dosahuje vyšší účinnosti než Francisova, je však konstrukčně náročnější a dražší. Typicky se používá pro nižší spády a vyšší (a kolísavé) průtoky. Jejím hlavním konstrukčním znakem jsou natáčivé lopatky oběžného kola, které umožňují zachování vysoké účinnosti při širším spektru průtoků. [7]

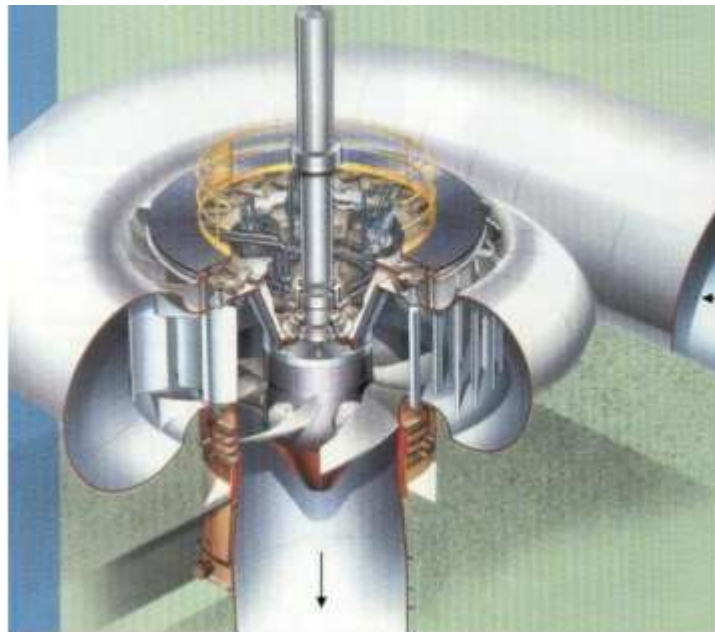


Obrázek 10 - Natáčivé lopatky oběžného kola Kaplanovy turbíny [7]

Kaplanova turbína může být instalována vertikálně, obdobně jako Francisova turbína, nebo horizontálně (případně šikmě) při aplikaci s velmi nízkým spádem a velkým průtokem. Při vertikální instalaci je provedení přívodní spirální skříně a rozvodného kola stejné jako u Francisovy turbíny výše. Příkladem takové instalace je VD Orlík.

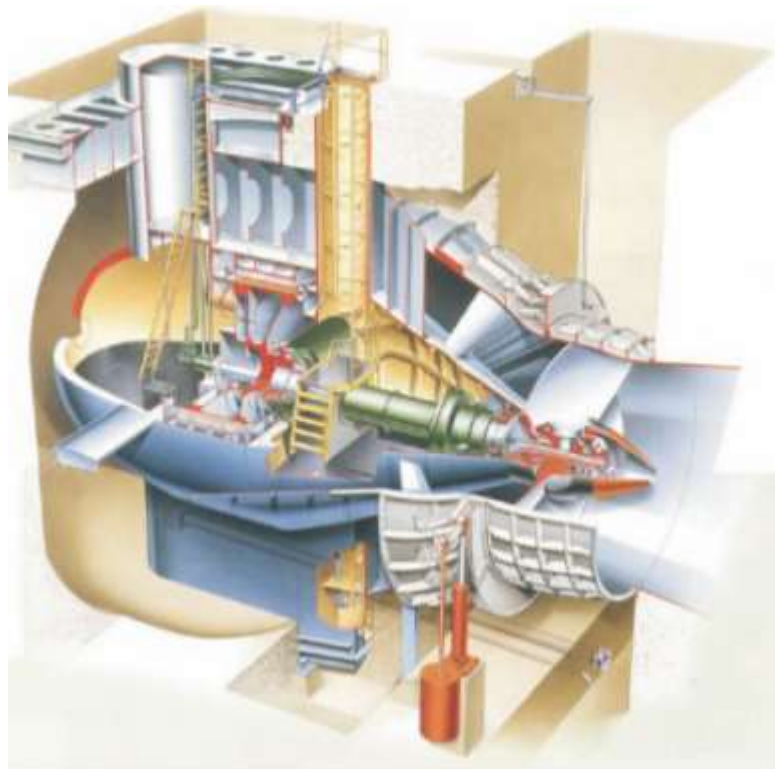
Regulace Kaplanovy turbíny:

Regulace je možná buď natáčením lopatek rozvodného kola v případě instalace se spirální skříní nebo natáčením lopatek oběžného kola.



Obrázek 11 - Kaplanova turbína ve vertikální poloze [11]

Při horizontální instalaci může být turbína bez spirální skříně a rozvodného kola viz Obrázek 12.



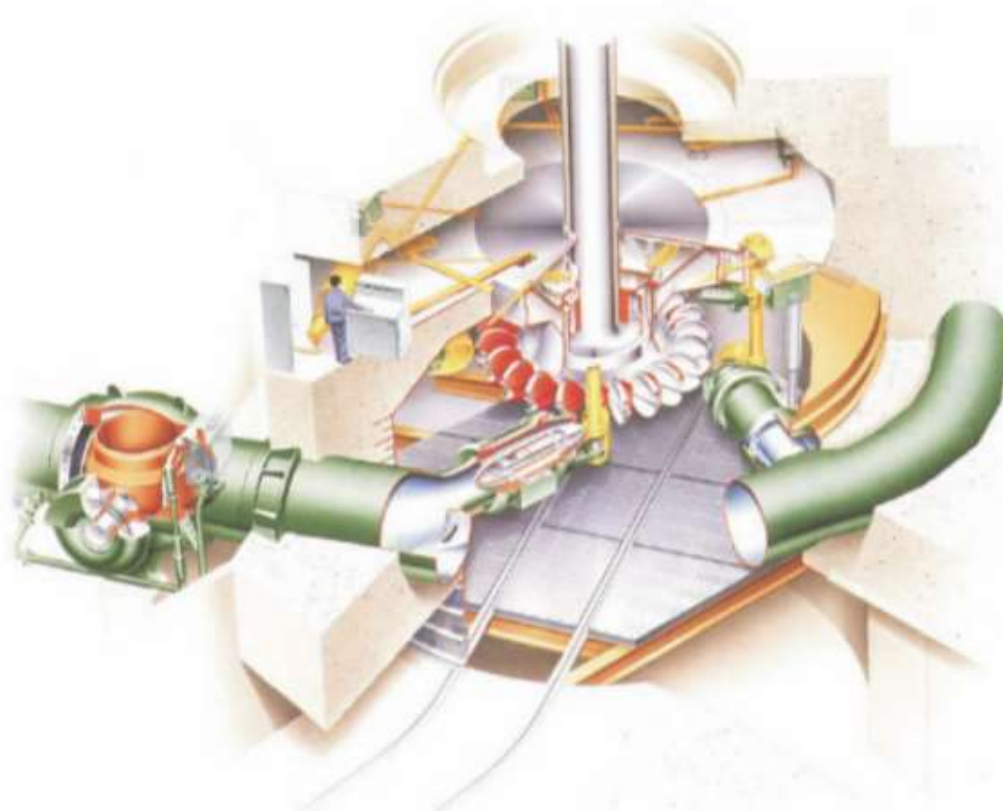
Obrázek 12 - Kaplanova turbína v horizontální poloze [11]

2.2.3 Peltonova turbína

Peltonova turbína byla vyvinuta v roce 1880. Jedná se o rovnotlakou turbínu s tangenciálním prouděním vody. Typicky se používá pro vysoké spády (až 1200 m). Jejím hlavním konstrukčním znakem je oběžné kolo s větším počtem miskovitých lopatek (typicky 16 až 24). Voda na oběžné kolo je přiváděna tryskou/tryskami. [7]



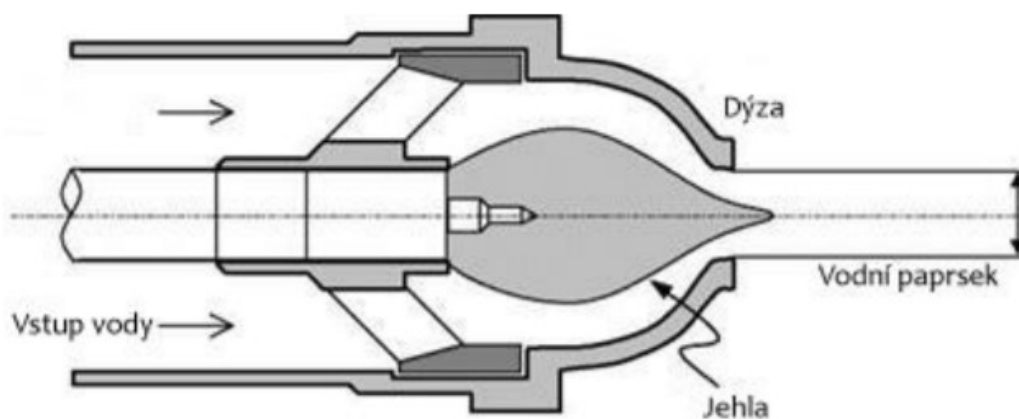
Obrázek 13 - Oběžné kolo Peltonovy turbíny [12]



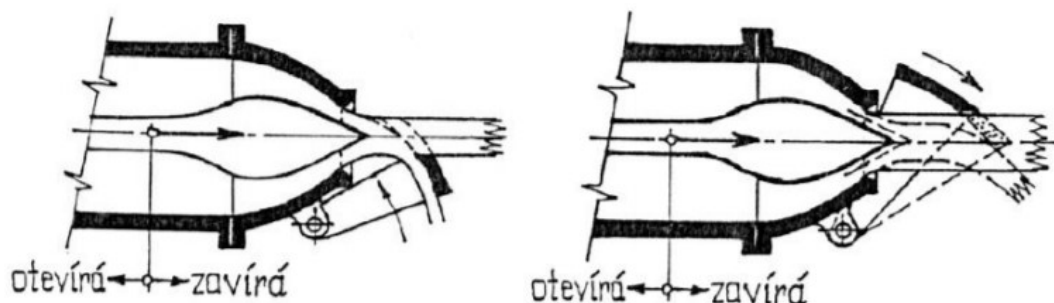
Obrázek 14 - Peltonova turbína s více tryskami v horizontální poloze [11]

Regulace Peltonovy turbíny:

Regulace je možná pomocí regulační jehly omezující průtok tryskou a tím i průtok celou turbínou. Kvůli případnému značnému nárůstu tlaku není možné jehlu přivírat rychle - proto je tryska vybavena deviátorem nebo deflektorem, který slouží k odklonění proudu vody vycházející z trysky mimo lopatky turbíny. [13]



Obrázek 15 - Tryska Peltonovy turbíny s regulační jehlou [14]



Obrázek 16 - Deflektor (vlevo) a deviátor (vpravo) [14]

2.3 Vodní díla v ČR a jejich význam v rámci výroby elektřiny

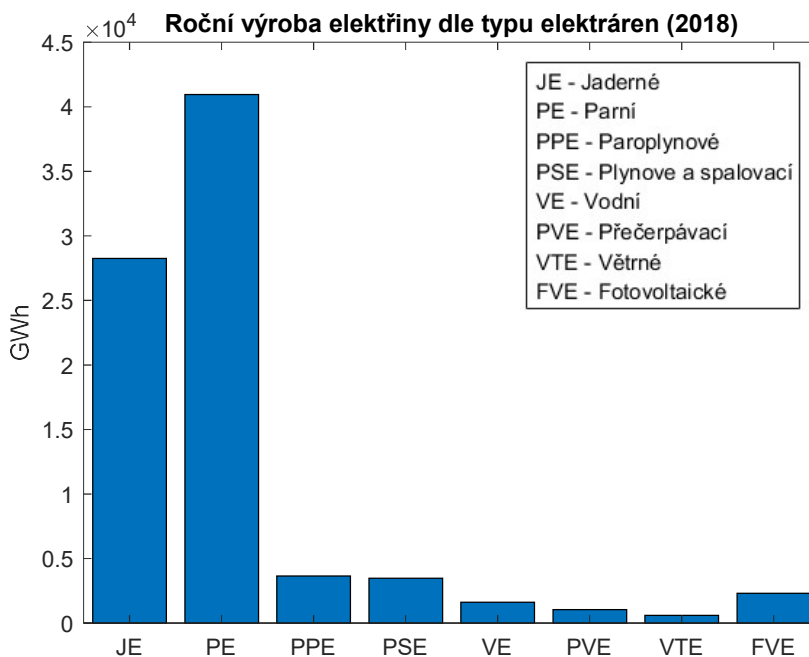
Souhrn nejvýznamnějších vodních elektráren v ČR s vybranými údaji viz Tab. 2: [15]

Tab. 2 - Významná vodní díla v ČR

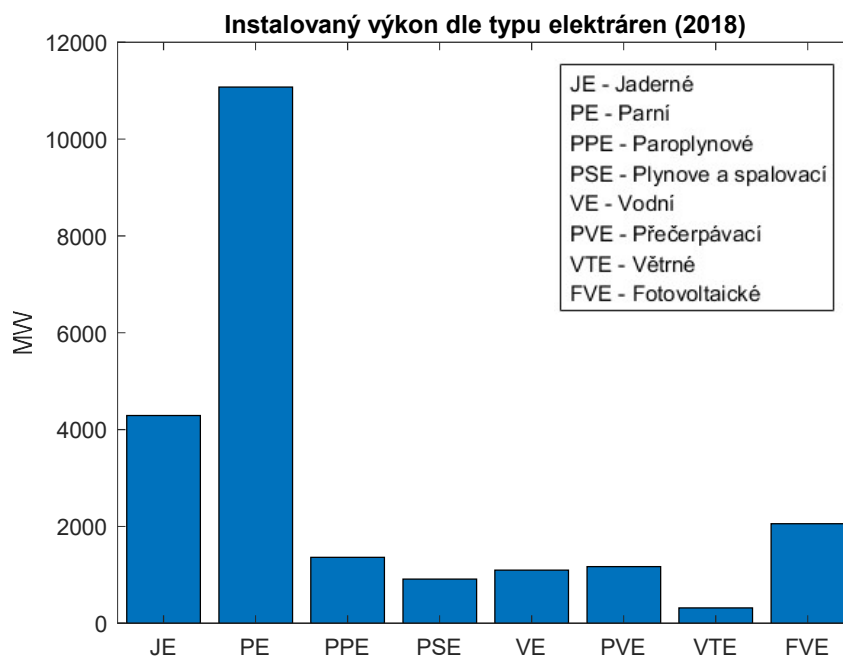
Dílo	Typ	Výkon [MW]	Turbína	Řeka
Dlouhé Stráně	Přečerpávací	650	Francis	Divoká Desná
Dalešice	Přečerpávací	480	Francis	Jihlava
Orlík	Akumulační	364	Kaplan	Vltava
Slapy	Akumulační	144	Kaplan	Vltava
Lipno I	Akumulační	120	Francis	Vltava
Štěchovice II	Přečerpávací	45	Francis	Vltava
Kamýk	Akumulační	40	Kaplan	Vltava
Štěchovice I	Akumulační	22,5	Kaplan	Vltava
Střekov	Průtočná	19,5	Kaplan	Labe
Vranov nad Dyjí	Akumulační	18,9	Francis	Dyje
Vrané	Akumulační	13,8	Kaplan	Vltava
Nechranice	Akumulační	10	Kaplan	Ohře

Ačkoliv je instalovaný výkon vodních elektráren poměrně vysoký, jedná se z velké části o přečerpávací nebo akumulární elektrárny. Jejich úkolem není vyrábět elektřinu staticky v průběhu celého dne, nýbrž pokrývat špičková zatížení v rámci dne. Instalovaný výkon vodních a

přečerpávacích elektráren tvoří zhruba 10 % celkového instalovaného výkonu v rámci ČR, v rámci celkové roční výroby se však podílí pouze 3 %, viz následující grafy. [16]



Obrázek 17 - Roční výroba elektřiny v ČR dle typu elektráren



Obrázek 18 - Instalovaný výkon v ČR dle typu elektráren

Z výše uvedeného vyplývá, že hlavní rolí vodních elektráren v rámci přenosové soustavy v ČR je umožňování podpůrných a regulačních služeb. Výhody vodních elektráren pro tuto funkci oproti ostatním typům jsou následující:

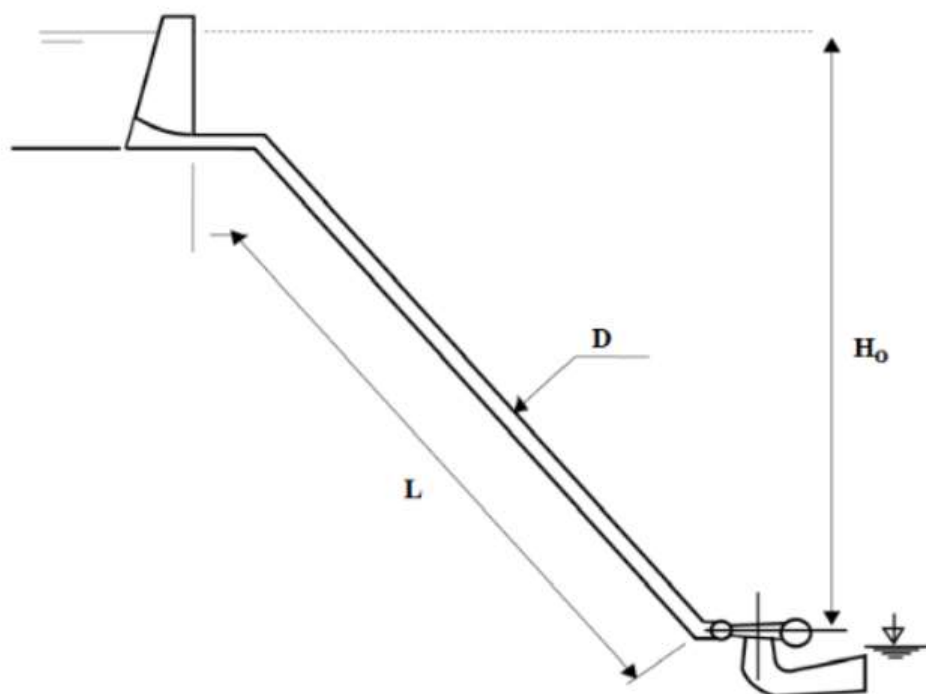
- snadná a rychlá regulace
- rychlý náběh
- možnost „startu ze tmy“ (Black-start)

Možnost startu ze tmy je zásadní v případě rozsáhlých poruch a výpadků sítě (Black out). Znamená to, že zdroj je schopen začít vyrábět elektřinu bez potřeby přívodu elektřiny zvenčí, např. s použitím vlastních záložních diesel generátorů. Vodní elektrárny nemají velkou vlastní spotřebu elektřiny a takové řešení je proto u nich možné, zatímco např. uhelný blok má velkou spotřebu elektřiny pro svůj vlastní chod (čerpadla, dopravníky apod.) a využití diesel generátorů by bylo značně nákladné a téměř se nepoužívá.

3 Nastavování PID regulátoru v aplikaci na řízení vodní turbíny

3.1 Popis řízeného systému

Řízeným systémem je soustava soustrojí Francisovy turbíny a generátoru ve vodní elektrárně a přívodního kanálu. Základními a určujícími rozměry soustavy je nominální spád, délka přívodního kanálu a průměr přívodního kanálu.



Obrázek 19 - Schéma přívodního kanálu a turbíny [17]

3.2 Model řízeného systému

Model řízeného systému (2) popisující změnu normalizovaných otáček (3) v závislosti na změně otevření rozvodného kola turbíny a na změně zátěžného momentu v okolí zvoleného pracovního bodu byl sestaven dle [18], [19]. Model generátoru popisující závislost zátěžného momentu na excitaci a dalších proměnných není součástí této práce, zatěžující moment je modelován pomocí jednotkových skoků a rampových funkcí.

$$(T_M s + \kappa)y(s) = \frac{1 - T_W s}{1 + 0,5T_W s} u(s) - M_Z(s) \quad (2)$$

$$y = \frac{\omega - \omega_{ref}}{\omega_{ref}} \quad (3)$$

Časová konstanta vodního sloupce se určí dle vztahu:

$$T_W = \kappa \frac{LQ_0}{gAH_0} \quad (4)$$

,kde součinitel zatížení turbíny specifikuje pracovní bod a platí pro něj:

$$\kappa = \frac{Q}{Q_0} \quad (5)$$

Doba šíření rázu potrubím se určí dle:

$$t_t = \frac{L}{a} \quad (6)$$

Změny ve spádu nejsou uvažovány, neboť se nepředpokládá rychlá změna spádu (rychlý pokles/nárůst hladiny v zásobní nádrži) vzhledem k velké rozloze hladiny vodní nádrže.

3.3 Parametry modelu

Parametry modelu byly zvoleny tak, aby odpovídaly parametrům VE Lipno I, dle dostupných zdrojů [20], [21]. Pro výpočet časové konstanty T_M dle [18] nebyly potřebné parametry (moment setrvačnosti) v dostupných zdrojích dohledány, hodnota této časové konstanty byla odhadnuta na základě naměřených dat poskytnutých firmou ZAT, a.s. Součinitel zatížení turbíny, určující pracovní bod, byl také odhadnut na základě těchto dat.

Tab. 3 - Parametry modelu (2)

a	$1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
D	$2,5 \text{ m}$
Q_0	$46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
g	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
H_0	150 m
L	200 m
κ	$0,8$
T_M	10 s

Pro parametry dle Tab. 3 byla dopočtena časová konstanta vodního sloupce dle rovnic (2) až (4).

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (2,5 \text{ m})^2}{4} = 4,91 \text{ m}^2 \quad (7)$$

$$T_W = \kappa \frac{LQ_0}{gAH_0} = \frac{aQ_0}{gFH_0} = 0,8 \cdot \frac{200 \text{ m} \cdot 46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}{9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 4,91 \text{ m}^2 \cdot 150 \text{ m}} = 1,02 \text{ s} \quad (8)$$

Dosazením bylo získáno:

$$(10s + 0,8)y(s) = \frac{1 - 1,02s}{1 + 0,51s}u(s) - M_Z(s) \quad (9)$$

Vzhledem k existenci hydraulických rázů šířících se přívodním potrubím, lze dle literatury [18] model použít, pouze pokud platí následující předpoklad (10), stanovující maximální možnou dobu šíření rázu potrubím.

$$t_t \leq 0,25 T_W \quad (10)$$

Doba šíření rázu potrubím byla určena:

$$t_t = \frac{L}{a} = \frac{200 \text{ m}}{1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = 0,138 \text{ s} \quad (11)$$

Vzhledem k dopočteným hodnotám v rovnicích (8) a (11) je předpoklad (10) splněný.

3.4 Akční člen

Akční člen - rozvodné kolo - je modelováno soustavou 1. řádu dle (12),(13) s časovou konstantou odhadnutou z naměřených dat poskytnutých firmou ZAT, a.s.

$$G_{RK}(s) = \frac{1}{1 + T_{RK}s} \quad (12)$$

$$T_{RK} = 0,5 \text{ s} \quad (13)$$

Výsledný model při zohlednění akčního členu:

$$(T_{MS} + \kappa)y(s) = \frac{1 - T_W s}{(1 + 0,5T_W s)(1 + T_{RK}s)}u(s) - M_Z(s) \quad (14)$$

3.5 Analýza provozních režimů

V rámci úlohy regulace vodní turbíny byly uvažovány následující provozní režimy.

Náběh na pracovní otáčky:

Před spuštěním turbína stojí, neprotéká jí žádná voda. Po přijetí požadavku na spuštění a výrobu elektřiny je před připojením generátoru k síti nutno naběhnout soustrojí na nominální otáčky. V tomto režimu jsou regulovanou veličinou otáčky soustrojí, poruchová veličina není v tomto režimu uvažována.

Výroba při připojení na síť:

Po nafázování a připojení k síti je rychlost otáčení pevně svázána se sítí. Zvýšení průtoku a tím i výkonu na hřídeli turbíny způsobí zvýšení dodávky výkonu do sítě. K okamžité změně rychlosti otáčení soustrojí však nedojde, to záleží na celkové výkonové bilanci v síti. V tomto režimu je regulovanou veličinou výkon dodávaný soustrojím do sítě, poruchová veličina není v tomto režimu uvažována.

Ostrovní provoz:

Soustrojí může být provozováno v režimu, kdy se dodává elektřina pouze do malého a odděleného úseku přenosové a distribuční soustavy, a kdy je soustrojí zároveň jediným zdrojem v tomto úseku (ostrovu). Zvýšení průtoku a tím i dodávaného výkonu se projeví na rychlosti soustrojí a tím i na frekvenci celého ostrova, neboť setrvačnost synchronně připojených strojů je výrazně nižší než v předchozím případě. Regulovanou veličinou je v tomto režimu rychlost otáčení soustrojí a odebíraný výkon na hřídeli je uvažován jako poruchová veličina.

Vypínací režim:

Vypínací režim se aktivuje při náhlém požadavku na přerušení dodávky do sítě nebo požadavku úplného odstavení turbíny. Při přerušení dodávky poklesne výroba pouze na úroveň vlastní spotřeby. Regulace musí zajistit, že se turbína neroztočí na otáčky (z důvodu poklesu zátěže), které by již mohly způsobit poškození zařízení. Regulovanou veličinou je v tomto režimu rychlost otáčení soustrojí a odebíraný výkon na hřídeli je uvažován jako poruchová veličina.

Akční veličinou je ve všech případech otevření rozvodného kola turbíny.

Tato práce se v dalších kapitolách zabývá naladěním regulátoru pro režim ostrovního provozu (regulace poruchy) a pro režim náběhu na otáčky (sledování žádané hodnoty). V ostrovním provozu totiž kvalita dodávané elektřiny přímo závisí na kvalitě regulace a náběh je nezbytně nutným pro následný provoz.

3.6 Regulátor

PID regulátor je pro všechny případy uvažován ve tvaru s filtrovanou derivační složkou (15) dle [22].

$$G_{PID}(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{1 + s \frac{T_D}{N}} \right) \quad (15)$$

Hodnota N je uvažována pro všechny případy konstantní:

$$N = 10 \quad (16)$$

3.7 Stanovení kritérií pro porovnání kvality regulace - odezva na poruchu

Pro hodnocení a porovnávání kvality regulace byla zavedena následující kritéria:

IAE - integrál absolutní hodnoty odchylky dle [23]

$ITSE$ - integrál čtverce regulační odchylky násobeného časem [23]

T_{reg} - doba regulace nutná k trvalému snížení absolutní hodnoty regulační odchylky pod 0,5 %

y_{min} - minimální hodnota regulované veličiny během regulace

G_m - Amplitudová bezpečnost. Doporučené hodnoty byly uvažovány v intervalu 2 až 4 [23]

P_m - Fázová bezpečnost. Doporučené hodnoty byly uvažovány v intervalu 30 až 60° [23]

M_s - maximum modulu citlivostní funkce. Doporučené hodnoty byly uvažovány v intervalu 1,3 až 2 [23]

Pro kritéria IAE , $ITSE$, T_{reg} , y_{min} je vyhodnocován pochod regulace při skokovém zvýšení zatěžujícího momentu M_Z z hodnoty 0 na 0,1, tedy nárůstu momentu o 10 %.

3.8 Jednotlivé ladicí metody - odezva na poruchu

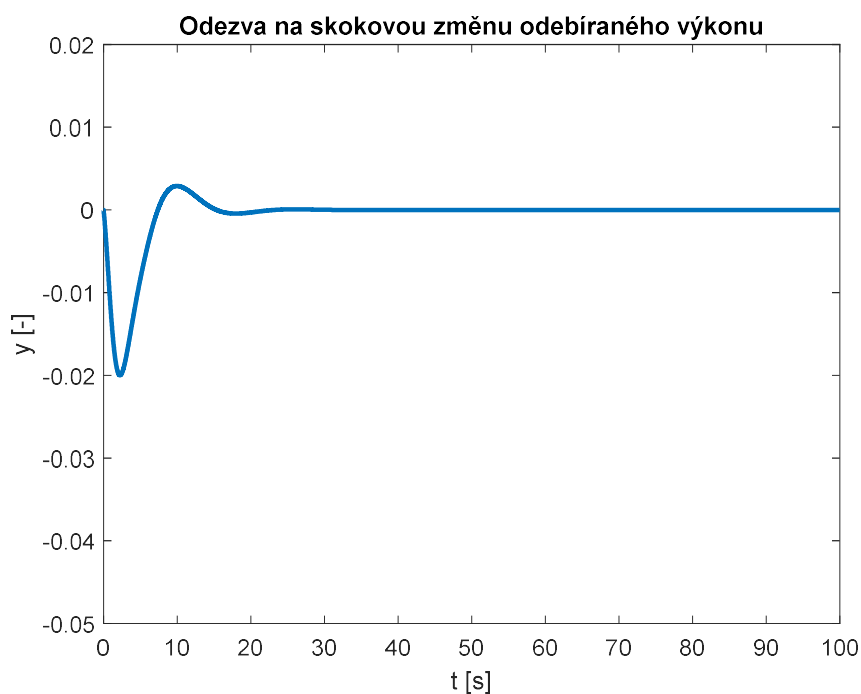
3.8.1 Naladění pomocí kritického zesílení - Ziegler-Nichols

Aplikací metody kritického zesílení dle Ziegler-Nicholse byly získány následující konstanty PID regulátoru: [24]

Tab. 4 - Nastavení PID regulátoru - Ziegler-Nichols

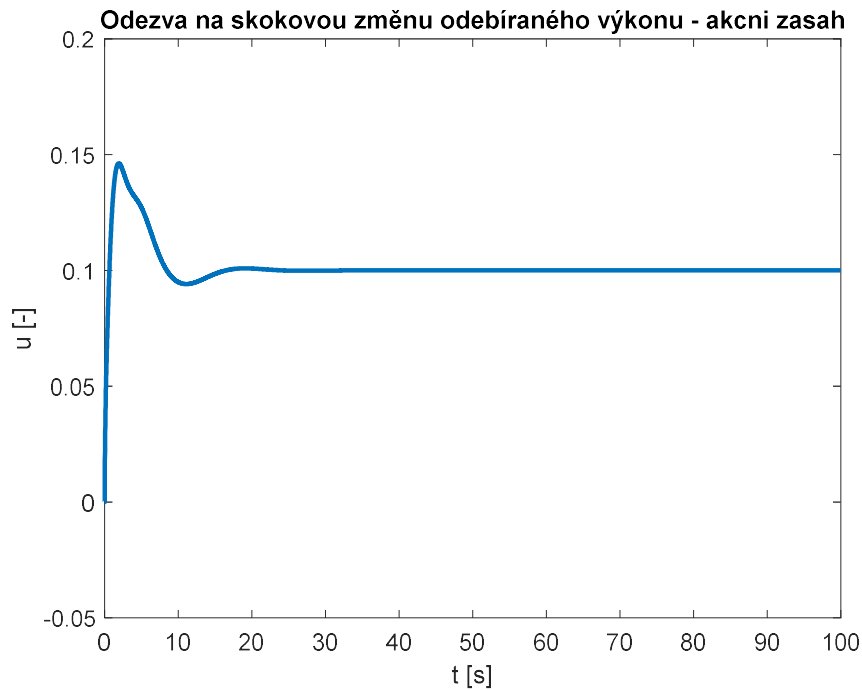
K_c	5,03
T_I	3,32 s
T_D	0,83 s

Průběh odezvy na poruchu:



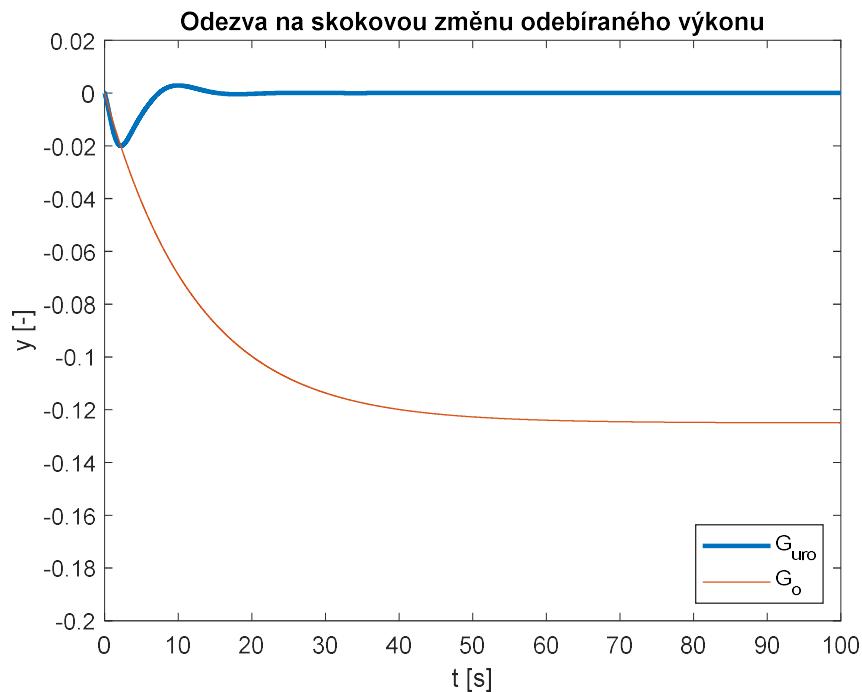
Obrázek 20 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols

Průběh odezvy na poruchu - akční zásah:



Obrázek 21 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols - průběh akčního zásahu

Průběh odezvy na poruchu v porovnání s otevřeným obvodem:



Obrázek 22 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols - v porovnání s otevřeným obvodem

Pro ostatní metody ladění již bude zobrazen pouze průběh odezvy regulované veličiny.

Tab. 5 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - Ziegler-Nichols

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	γ_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
0,0935	0,0034	5,82	-2,00	1,701	32,91°	2,492

3.8.2 Naladění metodou lambda tuning

Aplikací metody lambda tuning dle Skogestad [25] byly získány konstanty PID regulátoru následujícím způsobem:

Metoda předpokládá systém druhého řádu s dopravním zpožděním, zatímco řízený systém je třetího řádu s kladnou nulou. Řízený systém byl proto redukován při zachování dvou dominantních časových konstant a nahrazení kladné nuly dopravním zpožděním. Pro výpočet konstant regulátoru byl tedy využit model ve tvaru:

$$y(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\tau_d s}}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} u(s) \quad (17)$$

S následujícími parametry:

$$K_p = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{0,8} = 1,25 \quad (18)$$

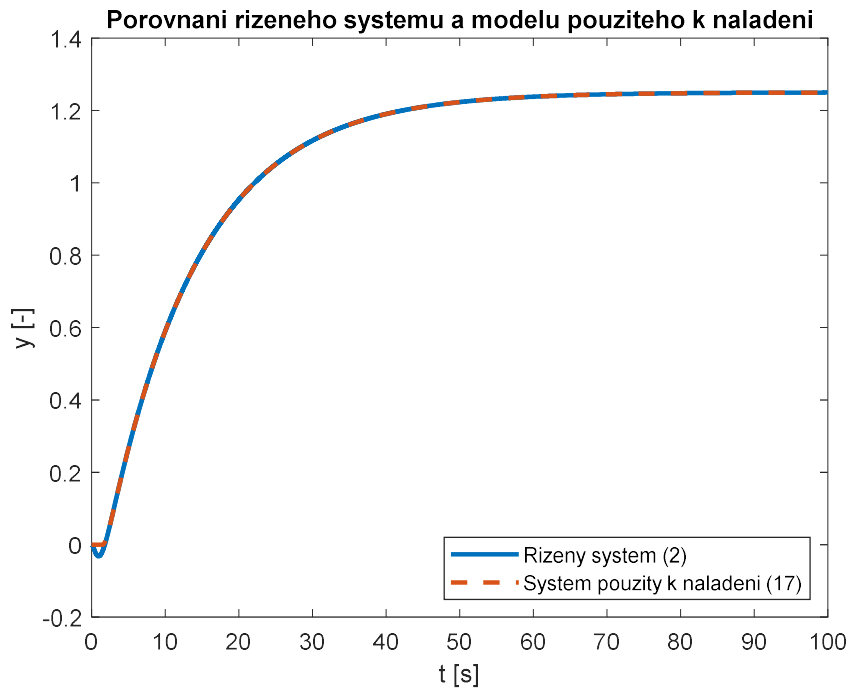
$$\tau_1 = \frac{T_M}{\kappa} = \frac{10 \text{ s}}{0,8} = 12,5 \text{ s} \quad (19)$$

$$\tau_2 = 0,5 \cdot T_W = 0,5 \cdot 1,02 \text{ s} = 0,51 \text{ s} \quad (20)$$

Dopravní zpoždění bylo odhadnuto:

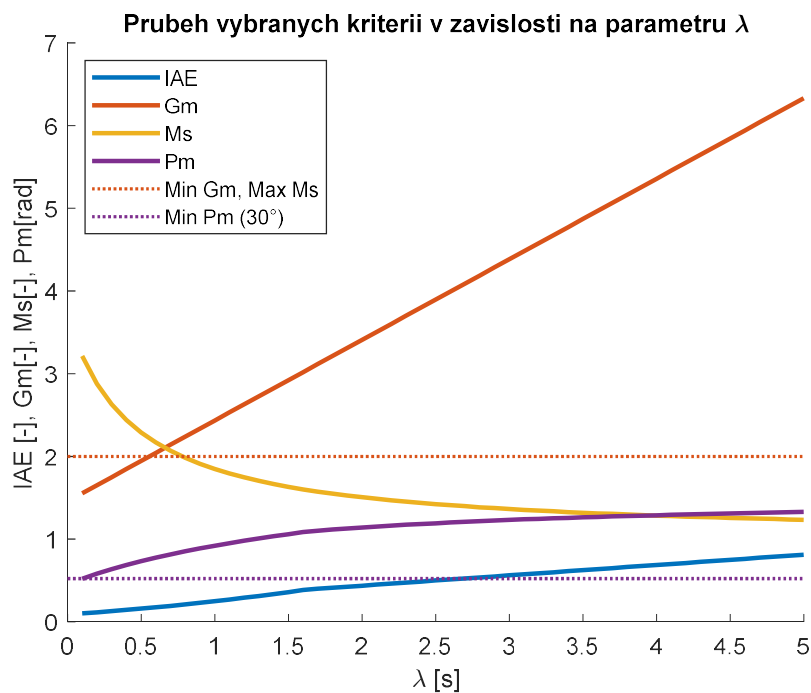
$$\tau_d = 1,5 \text{ s} \quad (21)$$

Porovnání řízeného systému s modelem využitým ke stanovení konstant regulátoru:



Obrázek 23 - Porovnání řízeného systému a modelu použitého k naladění

Aplikací pravidel dle [25] byly získány následující průběhy kritérií v závislosti na parametru λ :



Obrázek 24 - Průběh vybraných kritérií v závislosti na parametru lambda - regulace poruchy

Minimalizací kritéria IAE při zachování vhodných hodnot frekvenčních kritérií byla zvolena následující hodnota parametru lambda (22):

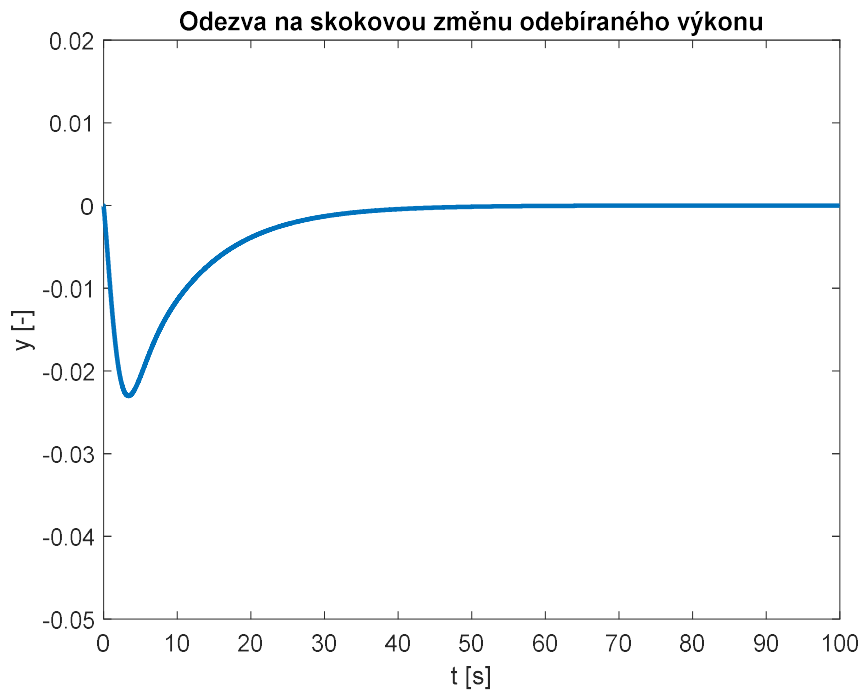
$$\lambda = 1,1 \text{ s}$$

(22)

Zvolené hodnotě parametru pak odpovídá následující nastavení regulátoru:

Tab. 6 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - lambda tuning

K_c	3,85
T_I	10,40 s
T_D	0,50 s



Obrázek 25 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - lambda tuning

Tab. 7 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - lambda tuning

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
0,2704	0,0231	17,65	-2,30	2,53	54,52°	1,795

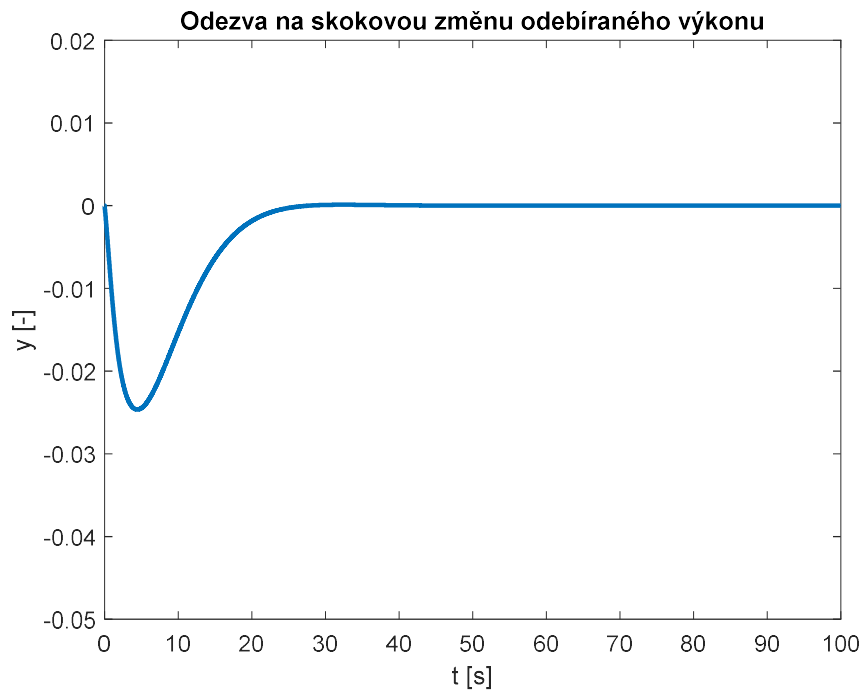
3.8.3 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 60°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 60° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 8 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 60°

K_c	2,80
T_I	7,50 s
T_D	0,80 s

Průběh odezvy na poruchu:



Obrázek 26 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 60°

Tab. 9 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 60°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	γ_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
0,2703	0,0301	16,13	-2,46	3,025	59,71°	1,524

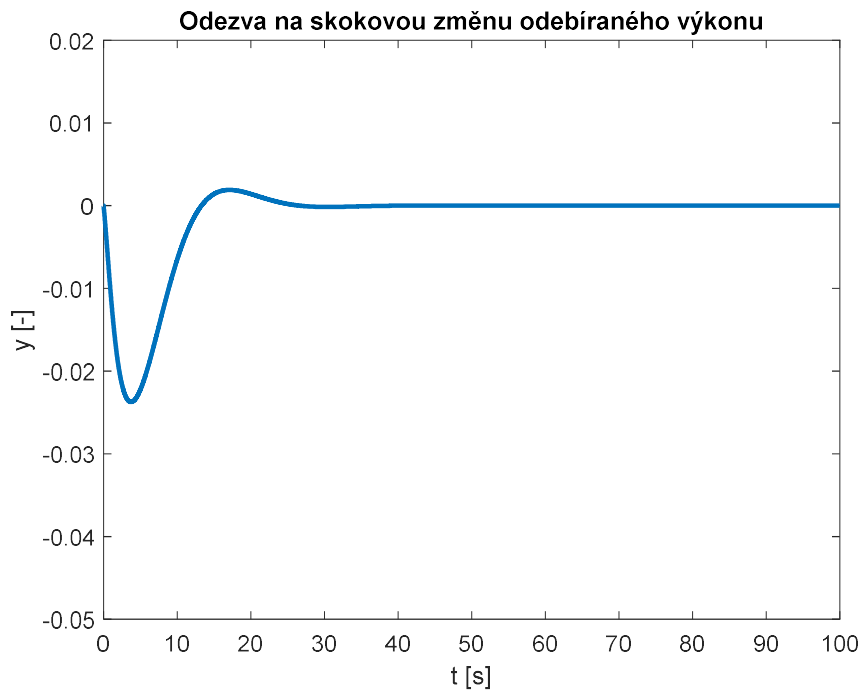
3.8.4 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 45°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 45° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 10 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 45°

K_c	4,00
T_I	4,40 s
T_D	1,00 s

Průběh odezvy na poruchu:



Obrázek 27 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 11 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 45°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	γ_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
0,1862	0,0146	10,62	-2,37	2,943	44,98°	1,574`

3.8.5 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 30°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 30° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 12 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 30°

K_c	3,90
T_I	3,10 s
T_D	0,80 s

Průběh odezvy na poruchu:



Obrázek 28 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 13 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 30°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	γ_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
0,1393	0,0071	12,34	-2,13	2,245	30,48°	1,989

3.8.6 Shrnutí jednotlivých variant a porovnání

Určená kritéria kvality regulace pro všechny použité metody jsou shrnuta v Tab. 14.

Tab. 14 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - porovnání všech metod

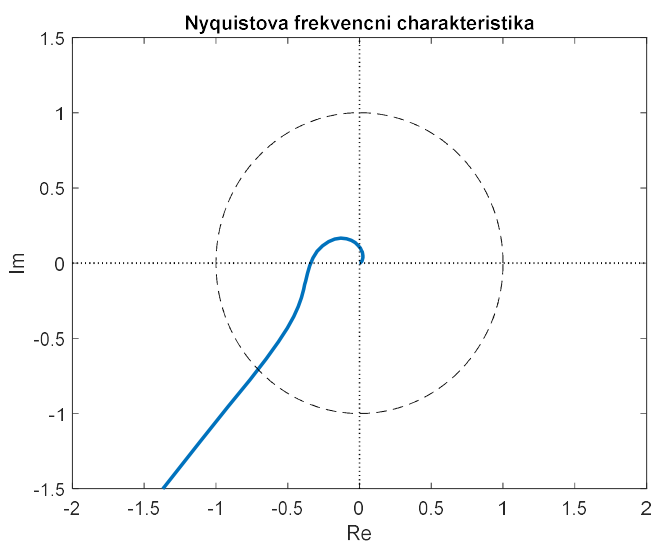
	K_C	T_I [s]	T_D [s]	IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	G_m	P_m	M_s
ZN	5,03	3,32	0,83	0,0935	0,0034	5,82	-2,00	1,701	32,91°	2,492
lambda	3,85	10,40	0,50	0,2704	0,0231	17,65	-2,30	2,531	54,52°	1,795
Pm60	2,80	7,50	0,80	0,2703	0,0301	16,13	-2,46	3,025	59,71°	1,524
Pm45	4,00	4,40	1,00	0,1862	0,0146	10,62	-2,37	2,943	44,98°	1,574
Pm30	3,90	3,10	0,80	0,1393	0,0071	12,34	-2,13	2,245	30,48°	1,989

Ze získaných hodnot byly vyvozeny následující závěry:

Naladění dle Ziegler-Nicholse, ačkoliv se vyznačuje nejnižšími hodnotami integrálních kritérií, nevyhovuje kvůli frekvenčním kritériím - amplitudové bezpečnosti a modulu citlivostní funkce. Naladění metodou Lambda vykazuje z porovnaných možností nejpomalejší regulační pochod a vyšší hodnoty integrálních kritérií, proto není považováno za vyhovující. Naladění s fázovou bezpečností 60° vykazuje téměř totožnou hodnotu IAE jako Lambda, avšak při lepších hodnotách frekvenčních kritérií. Naladění s fázovou bezpečností 45° oproti předchozímu snižuje hodnoty integrálních kritérií při zachování dobrých hodnot frekvenčních kritérií. Naladění s fázovou bezpečností 60° vykazuje ještě rychlejší regulační pochod, ale již nevyhovuje z hlediska frekvenčních kritérií.

Pro případ regulace poruchy z porovnávaných metod nejvíce vyhovuje naladění s fázovou bezpečností 45°, za předpokladu že v aplikaci nevadí mírný překmit. Pakliže by byl překmit považován za nežádoucí, více vyhovujícím by bylo naladění s fázovou bezpečností 60°.

Pro nejlépe vyhovující naladění - naladění s fázovou bezpečností 45° - byla vykreslena Nyquistova křivka otevřeného obvodu:



Obrázek 29 - Nyquistova křivka - bezpečnost ve fázi - 45°

3.9 Stanovení kritérií pro porovnání kvality regulace - sledování žádané hodnoty

Pro hodnocení a porovnávání kvality regulace byla zavedena stejná kritéria jako v případě regulace poruchy viz kapitola 3.7, tedy IAE , $ITSE$, T_{reg} , y_{min} , G_m , P_m , M_s .

Navíc bylo zavedeno kritérium y_{max} pro zohlednění případného překmitu.

Pro kritéria IAE , $ITSE$, T_{reg} , y_{min} , y_{max} je vyhodnocován pochod regulace při skokovém zvýšení žádané hodnoty z hodnoty 0 na 0,1 - tedy navýšení o 10 %.

3.10 Jednotlivé ladicí metody - odezva na změnu žádané hodnoty

3.10.1 Naladění pomocí kritického zesílení - Ziegler-Nichols

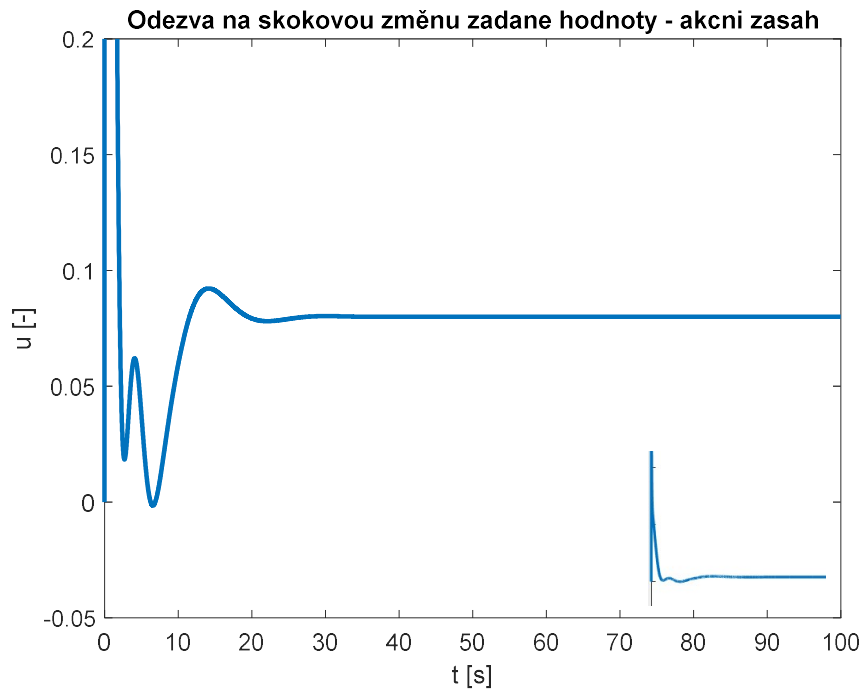
Nastavení PID regulátoru bylo v tomto případě stejné jako v kapitole 3.8.1.

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 30 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - Ziegler-Nichols

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 31 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - Ziegler-Nichols - průběh akčního zásahu

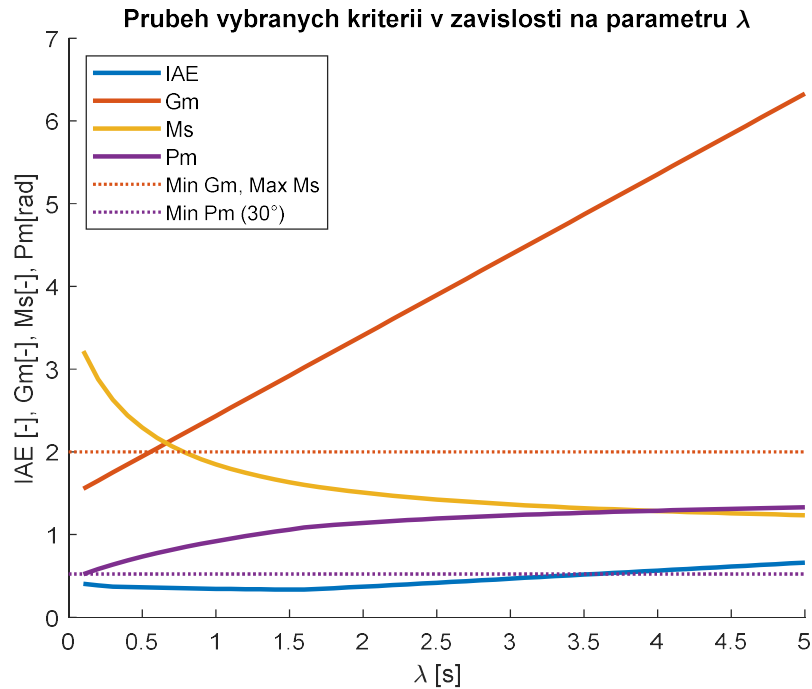
Pro ostatní metody ladění již bude zobrazen pouze průběh odezvy regulované veličiny.

Tab. 15 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty Ziegler-Nichols

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
0,4512	0,0555	14,48	-4,30	-4,06	1,701	32,91°	2,492

3.10.2 Naladění metodou lambda tuning

Aplikací stejného postupu jako v kapitole 3.8.2 a pravidel dle [25] byly získány následující průběhy kritérií dle parametru λ viz Obrázek 32.



Obrázek 32 - Průběh vybraných kritérií v závislosti na parametru lambda - sledování žádané veličiny

Minimalizací kritéria IAE při zachování vhodných hodnot frekvenčních kritérií byla zvolena následující hodnota parametru lambda:

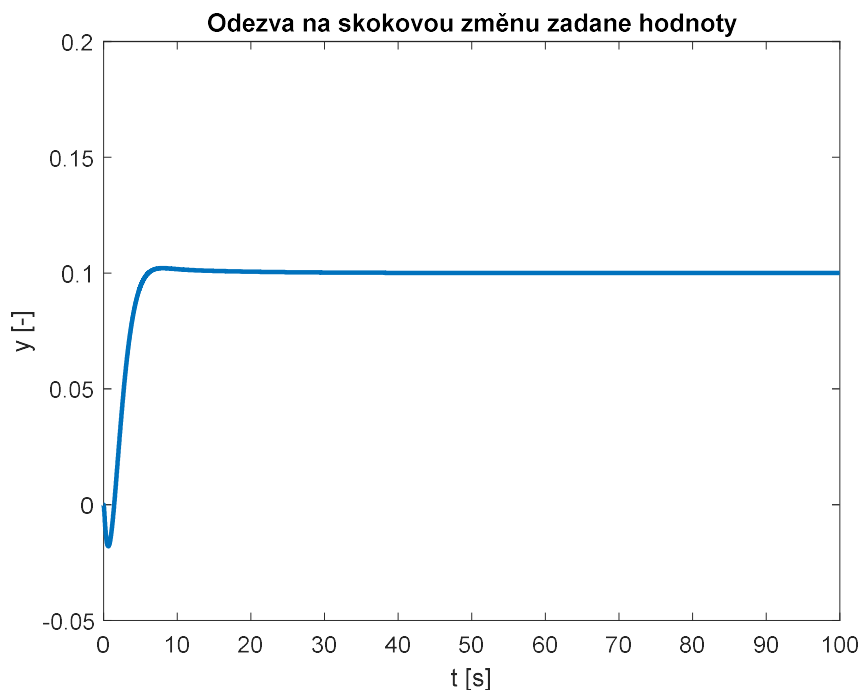
$$\lambda = 1,5 \text{ s} \quad (23)$$

Zvolené hodnotě parametru pak odpovídá následující nastavení regulátoru:

Tab. 16 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - lambda tuning

K_c	3,33
T_I	12,00 s
T_D	0,50 s

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 33 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - lambda tuning

Tab. 17 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - lambda tuning

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
0,3353	0,0330	5,10	-1,79	0,21	2,921	60,75°	1,633

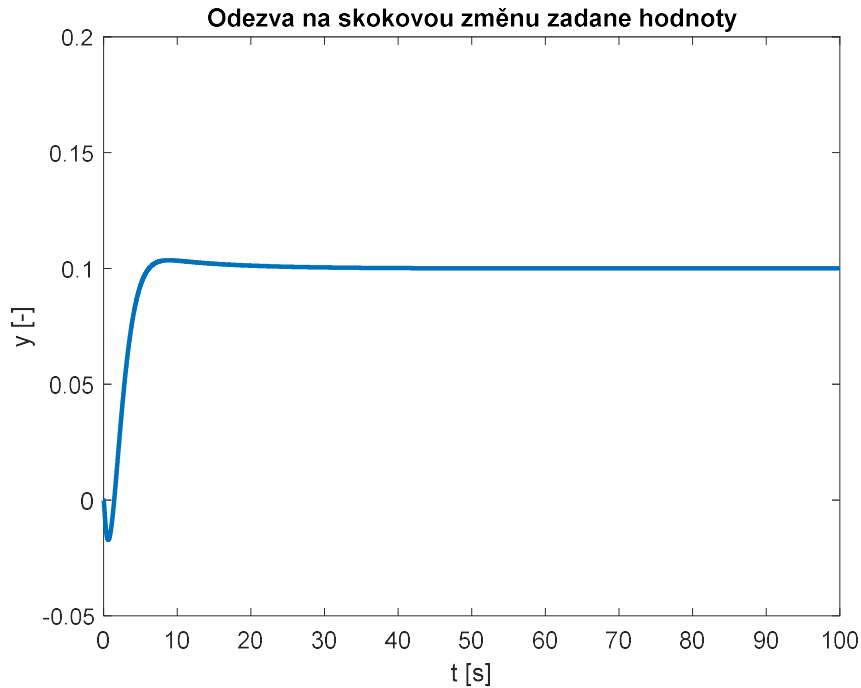
3.10.3 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 60°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 60° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 18 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 60°

K_c	3,20
T_I	11,00 s
T_D	0,50 s

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 34 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 60°

Tab. 19 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi 60°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
0,3640	0,0366	5,33	-1,71	0,35	3,043	60,45°	1,598

3.10.4 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 45°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 45° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 20 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 45°

K_c	3,40
T_I	5,80 s
T_D	0,50 s

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 35 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 21 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi 45°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
0,4547	0,0551	14,39	-1,86	2,32	2,851	45,26°	1,716

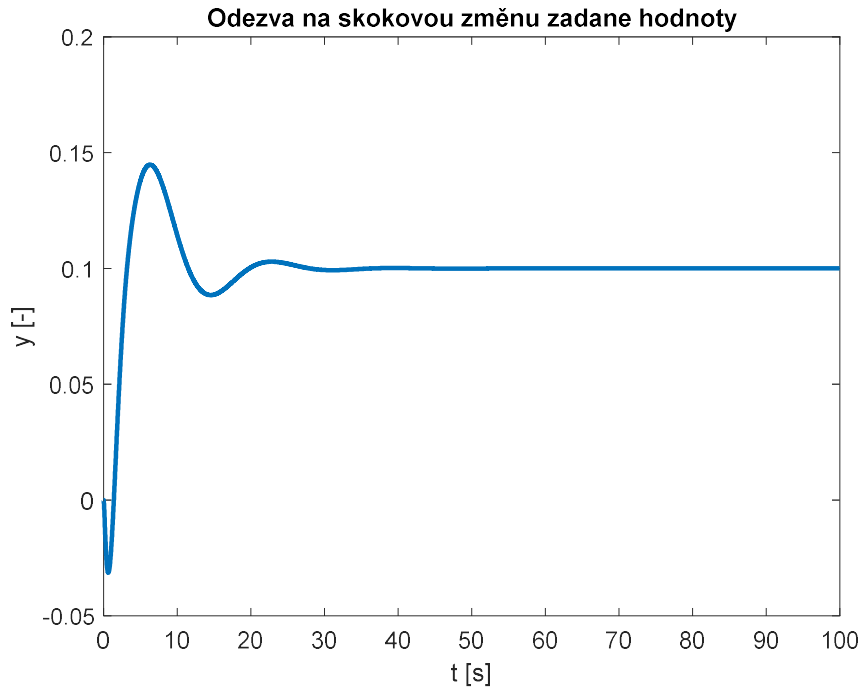
3.10.5 Naladění pomocí bezpečnosti ve fázi - 30°

Aplikací metody bezpečnosti ve fázi byly pro zvolenou hodnotu 30° (při minimalizaci kritéria IAE a zároveň zachování přijatelných hodnot frekvenčních kritérií) získány následující konstanty PID regulátoru:

Tab. 22 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 30°

K_c	4,00
T_I	3,10 s
T_D	0,80 s

Průběh odezvy na změnu žádané hodnoty:



Obrázek 36 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 23 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi 30°

IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
0,5503	0,0855	17,85	-3,13	4,48	2,189	30,45°	1,995

3.10.6 Shrnutí jednotlivých variant a porovnání

Určená kritéria kvality regulace pro všechny použité metody jsou shrnuta v Tab. 24.

Tab. 24 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - porovnání všech metod

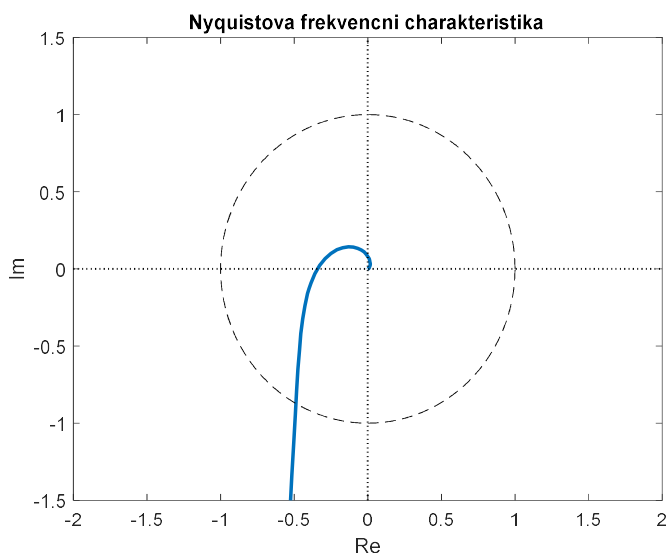
	K_c	T_I [s]	T_D [s]	IAE	$ITSE$	T_{reg} [s]	y_{min} [%]	y_{max} [%]	G_m	P_m	M_s
ZN	5,03	3,32	0,83	0,4512	0,0555	14,48	-4,30	-4,06	1,701	32,91°	2,492
lambda	3,33	12,00	0,50	0,3353	0,0330	5,10	-1,80	0,21	2,92	60,75°	1,633
Pm60	3,20	11,0	0,50	0,3640	0,0366	5,33	-1,71	0,35	3,043	60,45°	1,598
Pm45	3,40	5,80	0,50	0,4547	0,0551	14,39	-1,86	2,32	2,851	45,26°	1,716
Pm30	4,00	3,10	0,80	0,5503	0,0855	17,85	-3,13	4,48	2,189	30,45°	1,995

Ze získaných hodnot byly vyvozeny následující závěry:

Naladění dle Ziegler-Nicholse nevyhovuje kvůli frekvenčním kritériím stejně jako v případě regulace poruchy. Naladění metodou Lambda vykazuje nejrychlejší regulaci a zároveň velmi dobré hodnoty frekvenčních kritérií, následované naladěním s fázovou bezpečností 60° , které vykazuje jen mírně horší hodnoty integrálních kritérií. Naladění s menší fázovou bezpečností již nevedou ke snížení hodnot integrálních kritérií ani ke snížení doby regulace a hodnoty frekvenčních kritérií se také zhoršují.

Pro případ sledování žádané veličiny z porovnávaných metod tedy nejvíce vyhovuje naladění metodou lambda spolu s naladěním s fázovou bezpečností 60° .

Pro nejlépe vyhovující naladění - metodou lambda - byla vykreslena Nyquistova křivka otevřeného obvodu:

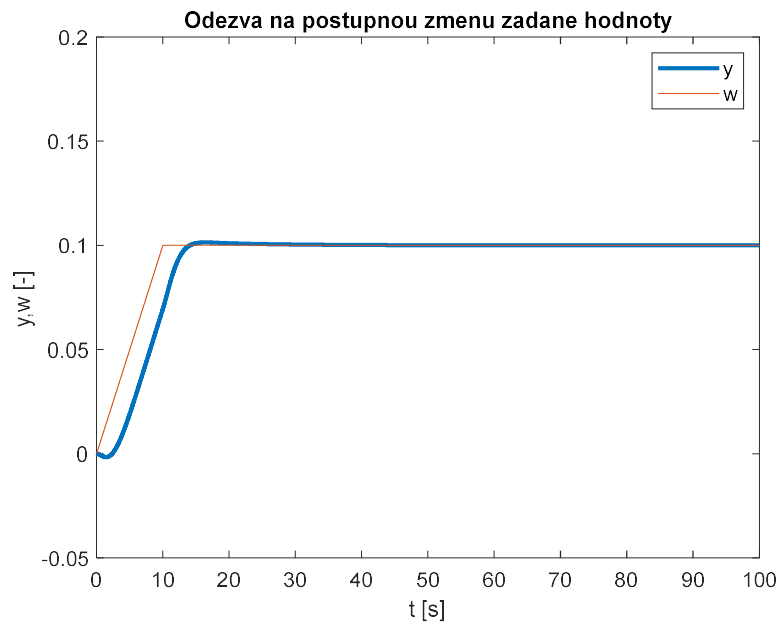


Obrázek 37 - Nyquistova křivka - metoda lambda°

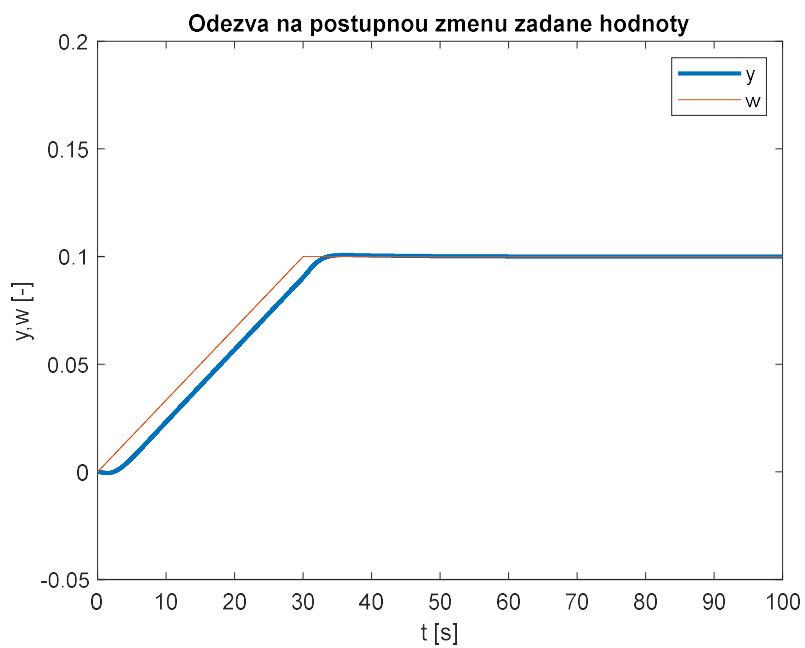
3.10.7 Odezva na rampovou změnu žádané hodnoty

V praxi se často používá změna žádané hodnoty nikoliv skokových, ale s využitím rampy. Proto pro vybrané naladění dle kapitoly 3.10.2 (metoda lambda) byla simulována odezva na rampovou změnu žádané hodnoty. Změna žádané hodnoty byla simulována z hodnoty 0 na 0,1 během 10 s v prvním případě a 30 s ve druhém případě.

Průběhy odezvy na rampovou změnu žádané hodnoty viz Obrázek 38 a Obrázek 39.



Obrázek 38 - Odezva na postupnou změnu žádané hodnoty - metoda lambda - rampa 10 s



Obrázek 39 - Odezva na postupnou změnu žádané hodnoty - metoda lambda - rampa 30 s

4 Závěr

V úvodu práce bylo provedeno seznámení s principy souvisejícími s řešenou problematikou - s návrhem regulátoru pro vodní turbínu. Tedy s principy fungování přenosové soustavy, její regulace a vlivu jednotlivých součástí. Následně byl sestaven model vodní turbíny s parametry odpovídajícími skutečnému vodnímu dílu. Dále byly analyzovány jednotlivé provozní režimy vodní turbíny. Pro řízený systém byla následně stanovena kritéria posuzující kvalitu regulace pro oba uvažované režimy: náběh na pracovní otáčky (sledování žádané veličiny) a ostrovní provoz (regulace poruchy). Mezi stanovenými kritérii byla jak heuristická, integrální tak i frekvenční kritéria. Pro oba z uvažovaných režimů bylo porovnáno několik nastavovacích metod PID regulátoru a byla diskutována vhodnost jejich použití a nedostatky.

Pro další navazující práci by se nabízelo navrhnout a porovnat pokročilejší metody regulace než jednosmyčkový regulátor, na který je zaměřena tato práce. Možným pokračováním je využití PID regulátoru s měřením poruchové veličiny a její kompenzací. Rovněž pro režim náběhu otáček se ukazuje saturace akční veličiny, která vyžaduje řešení windupu.

5 Seznamy

5.1 Seznam obrázků

- Obrázek 1 - Přenosová a distribuční soustava [2]
- Obrázek 2 - Mapa přenosové soustavy ČR [2]
- Obrázek 3 - Skupina ENTSO-E a vyznačení regionálních skupin [5]
- Obrázek 4 - Sekundární regulace frekvence [4]
- Obrázek 5 - Následnost regulačních procesů [6]
- Obrázek 6 - Schéma regulačních procesů [6]
- Obrázek 7 - Řez soustrojím Francisovy turbíny - model [8]
- Obrázek 8 - Natáčivé lopatky rozvodného kola malé Francisovy turbíny [9]
- Obrázek 9 - Otočný prsteneц rozvodného kola Francisovy turbíny [10]
- Obrázek 10 - Natáčivé lopatky oběžného kola Kaplanovy turbíny [7]
- Obrázek 11 - Kaplanova turbína ve vertikální poloze [11]
- Obrázek 12 - Kaplanova turbína v horizontální poloze [11]
- Obrázek 13 - Oběžné kolo Peltonovy turbíny [12]
- Obrázek 14 - Peltonova turbína s více tryskami v horizontální poloze [11]
- Obrázek 15 - Tryska Peltonovy turbíny s regulační jehlou [14]
- Obrázek 16 - Deflektor (vlevo) a deviátor (vpravo) [14]
- Obrázek 17 - Roční výroba elektřiny v ČR dle typu elektráren
- Obrázek 18 - Instalovaný výkon v ČR dle typu elektráren
- Obrázek 19 - Schéma přívodního kanálu a turbíny [17]
- Obrázek 20 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols
- Obrázek 21 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols - průběh akčního zásahu
- Obrázek 22 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - Ziegler-Nichols - v porovnání s otevřeným obvodem
- Obrázek 23 - Porovnání řízeného systému a modelu použitého k naladění
- Obrázek 24 - Průběh vybraných kritérií v závislosti na parametru λ - regulace poruchy
- Obrázek 25 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - λ tuning
- Obrázek 26 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 60°
- Obrázek 27 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 45°
- Obrázek 28 - Odezva na skokovou změnu odebíraného výkonu - bezpečnost ve fázi - 30°
- Obrázek 29 - Nyquistova křivka - bezpečnost ve fázi - 45°
- Obrázek 30 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - Ziegler-Nichols

Obrázek 31 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - Ziegler-Nichols - průběh akčního zásahu

Obrázek 32 - Průběh vybraných kritérií v závislosti na parametru lambda - sledování žádané veličiny

Obrázek 33 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - lambda tuning

Obrázek 34 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 60°

Obrázek 35 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 45°

Obrázek 36 - Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 30°

Obrázek 37 - Nyquistova křivka - metoda lambda°

Obrázek 38 - Odezva na postupnou změnu žádané hodnoty - metoda lambda - rampa 10 s

Obrázek 39 - Odezva na postupnou změnu žádané hodnoty - metoda lambda - rampa 30 s

5.2 Seznam tabulek

Tab. 1 - Popis zařízení přenosové soustavy [3]

Tab. 2 - Významná vodní díla v ČR

Tab. 3 - Zvolené parametry modelu

Tab. 4 - Nastavení PID regulátoru - Ziegler-Nichols

Tab. 5 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - Ziegler-Nichols

Tab. 6 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - lambda tuning

Tab. 7 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - lambda tuning

Tab. 8 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 60°

Tab. 9 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 60°

[Tab. 10](#) - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 11 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 12 - Nastavení PID regulátoru - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 13 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 14 - Hodnoty kritérií kvality regulace - regulace poruchy - porovnání všech metod

Tab. 15 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty Ziegler-Nichols

Tab. 16 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - lambda tuning

Tab. 17 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - lambda tuning

Tab. 18 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 60°

Tab. 19 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 60°

Tab. 20 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 21 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 45°

Tab. 22 - Nastavení PID regulátoru - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 23 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty - bezpečnost ve fázi - 30°

Tab. 24 - Hodnoty kritérií kvality regulace - sledování žádané hodnoty porovnání všech metod

5.3 Seznam použité literatury

- [1] GALEZIOK, Tomáš. Návrh lokální distribuční sítě v průmyslové zóně Hrabová [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/119205>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [2] GALETKA, Martin. Přenosová soustava elektrické energie [online]. TZB-Info, 2016. [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [3] Údaje o přenosové soustavě [online]. ČEPS, a.s. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/udaje-o-ps>
- [4] MÁŠLO, Karel. Řízení a stabilita elektrizační soustavy. [Praha]: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [5] Evropská síť provozovatelů přenosových soustav elektřiny [online], Wikipedie [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Evropsk%C3%A1_s%C3%AD%C5%A5_provozovatel%C5%AF_p%C5%99enosov%C3%BDch_soustav_elekt%C5%99iny&oldid=18700536
- [6] Load-Frequency Control and Performance [online]. Energy Regulators Regional Association. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://erranet.org/download/a1-appendix-1-load-frequency-control-performance/>
- [7] NECHLEBA, Miroslav. Vodní Turbíny: Jejich konstrukce a příslušenství. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1962
- [8] PODOLÁK, Petr. Francisova turbína [online]. In: ČVUT. Středoškolská technika 2016. [cit. 2020-04-12] Dostupné z: http://stretech.fs.cvut.cz/2016/sbornik_2016/a-CD-stretech2016/Olomouc_Podol%C3%A1k_turbina.pdf
- [9] Francisova turbína [online], Wikipedie [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Francisova_turb%C3%ADna
- [10] Francis turbine [online]. Zeco turbines. [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.zeco.it/zeco-turbines/francis-turbine/>
- [11] ŠIMEK, P. Přecherpačací vodní elektrárna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s
- [12] Francisova turbína [online]. ČKD Blansko. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.ckdblansko.cz/cs/produkty-a-sluzby/turbiny>
- [13] NECHLEBA, Miroslav. Základy regulace vodních turbín. Praha: Státní nakladatelství technické literatury SNTL, 1962
- [14] KAPRINAY, Z. Kroutící moment deflektoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018.
- [15] VOBORIL, David. Vodní elektrárny - princip, rozdělení, elektrárny v ČR [online]. O Energetice, 2016. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni>
- [16] Výroční zpráva ERÚ za rok 2018 [online]. Energetický regulační úřad, 2019. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/cs/-/vyrocni-zprava-eru-za-rok-2018>
- [17] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant [online]. European Small Hydropower Association. [cit. 2020-07-20]. Dstupné z: https://energiatalgud.ee/img_auth.php/a/ab/Guide_on_How_to_Develop_a_Small_Hydropower_Plant.pdf.

