

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta stavební  
Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulace provozu vodní elektrárny

Hydropower plant simulation

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Květen 2022

Kraus Jan

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kraus Jméno: Jan Osobní číslo: 477533  
Zadávající katedra: K142 - Katedra hydrotechniky  
Studijní program: (B3651) Stavební inženýrství  
Studijní obor: (3647R015) Vodní hospodářství a vodní stavby

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Simulace provozu vodní elektrárny

Název bakalářské práce anglicky: Hydropower plant simulation

Pokyny pro vypracování:

Model provozu VE bude zahrnovat vodní turbínu s jedním regulačním prvem (regulovatelnými rozváděcími lopatkami), popř. s možností proměnlivých provozních otáček. Bude vycházet z modelových charakteristik turbíny, které budou na základě zvoleného průměru Dok, popř. provozních otáček automaticky přepočteny na charakteristiky provozní. Nastavený pracovní bod bude zobrazen v obou charakteristikách společně se zobrazením základních provozních hodnot.

Model bude obsahovat i prvek generátoru s hlavními elektrickými veličinami.

Hydraulický obvod bude schematizován na horní a dolní vodu s tlakovým přívodním přivaděčem.

Seznam doporučené literatury:

Čábelka a kol.: Využití vodní energie I + II

Mosonyi : Hydropower Development

Hydraulic structures – P. Novák, Moffat et al.

Hydraulic turbines – design, erection and operation – H. Brekke

Jméno vedoucího bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání bakalářské práce: 17.2.2022

Termín odevzdání BP, v IS KOS:

Údaj uveďte v souladu s [redacted] příslušného ak. roku

[redacted]  
Podpis vedoucího práce

[redacted]  
Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

17.2.2022

Datum převzetí zadání

[redacted]  
Podpis studenta(ky)

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „ O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

V Hradci Králové dne 15.5.2022

podpis:

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych tímto poděkoval především Dr. Ing. Petru Nowakovi za odborné i praktické rady, vstřícný přístup a poskytnutí podkladů. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Součkovi za jeho čas, rady a poskytnutí podkladů pro zpracování výsledků.



## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvořit simulátor malé vodní elektrárny pomocí softwaru Matlab a Simulink, který je založen na principu fyzikálního modelování. Tento simulátor by mohl dále sloužit pro zkoumání přechodových dějů při provozu vodní elektrárny a jako výuková pomůcka, která by studentům názorněji představila danou problematiku. U vytvořeného modelu lze měnit parametry vodní elektrárny, jako je hladina horní a dolní vody, délka a průměr přivaděče, velikost oběžného kola turbíny, nastavení generátoru a další parametry. Model je modulární a lze na něm pozorovat a porovnávat výsledky jednotlivých simulací a provádět citlivostní analýzu na vybrané parametry. Celý model lze ovládat manipulací s lopatkami rozvaděče turbíny a s uzavírací klapkou před turbínou včetně ovládání připojení a odpojení generátoru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

malá vodní elektrárna, simulátor, francisova turbína, turbínové charakteristiky, hydraulický ráz, generator, výroba elektrické energie

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create a simulator of a small hydropower plant using Matlab and Simulink software, which is based on the principle of physical modelling. This simulator could also be used to investigate transients in the operation of a hydroelectric power plant and as a teaching aid to introduce the students to the subject more clearly. In the model created, the parameters of the hydropower plant can be changed, such as the upper and lower water levels, the length and diameter of the intake, the size of the turbine impeller, the generator settings and other parameters. The model is modular and can be used to observe and compare the results of individual simulations and perform sensitivity analysis on selected parameters. The entire model can be controlled by manipulating the turbine manifold blades and the shut-off flap in front of the turbine, including controlling the connection and disconnection of the generator.

## KEYWORDS

small hydropower plant, simulator, francis turbine, turbine characteristics, hydraulic shock, generator, electric power generation

## Obsah

ABSTRAKT .....	5
KLÍČOVÁ SLOVA .....	5
ABSTRACT .....	5
KEYWORDS .....	5
Obsah.....	6
1. Úvod .....	9
2. Malá vodní elektrárna .....	9
3. Základní technické parametry vodní elektrárny Plavisko .....	9
3.1. Přivaděč .....	10
3.2. Uzavírací klapka před turbínou.....	10
3.3. Turbína.....	10
3.4. Generátor .....	10
3.5. Schéma malé vodní elektrárny .....	11
4. SIMULINK MODEL VODNÍ ELEKTRÁRNY .....	11
4.1. Význam simulátoru vodní elektrárny .....	12
4.2. Zdroj průtoku .....	12
4.3. Přivaděč .....	13
4.4. Uzávěr před turbínou .....	16
4.5. Turbína.....	17
4.6. Generátor .....	19
4.7. Výstup vody ze systému .....	21
4.8. Další prvky modelu .....	21
4.9. Spuštění a ovládání modelu .....	22
4.9.1. Nouzové načtení dat do workspace.....	23
4.9.2. Nastavení parametrů elektrárny.....	24

---

4.9.3.	Simulace modelu podle přednastavených stavů .....	24
4.9.4.	Simulace modelu s manuálním ovládáním .....	25
4.10.	Přednastavené manipulační a provozní stavy .....	27
4.10.1.	Provozní najetí a kontinuální provoz elektrárny .....	27
4.10.2.	Provozní najetí a provozní odstavení .....	28
4.10.3.	Provozní najetí a havarijní odstavení.....	28
4.10.4.	Trip generátoru za chodu bez další manipulace.....	29
4.10.5.	Trip generátoru a havarijní odstavení .....	30
4.10.6.	Havarijní odstavení při najíždění .....	31
4.10.7.	Selhání zavírání RK a následné havarijní odstavení uzavírací klapkou.....	32
4.11.	Zobrazení výsledků modelu .....	34
4.11.1.	Výsledky přímo v modelu .....	34
4.11.2.	Vykreslení výsledků pomocí MATLAB Scriptu .....	36
5.	VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU .....	37
5.1.	Základní výstupy z modelu .....	38
5.1.1.	Manipulace s RK a s generátorem.....	39
5.1.2.	Tlakový průběh.....	40
5.1.3.	Průběh průtoku turbínou .....	42
5.1.4.	Průběh otáček .....	43
5.1.5.	Průběh kroutícího momentu a výkonu generátoru .....	45
5.2.	Charakteristiky turbíny .....	47
5.2.1.	Jednotkové charakteristiky turbíny.....	47
5.2.2.	Provozní charakteristiky turbíny .....	51
5.2.3.	Závislost H/Q vyrovnávací komory.....	55
5.2.4.	Tlakový průběh v přivaděči při odstavení .....	57
6.	Závěr.....	60

---

---

7. SEZNAMY .....	61
7.1. Seznam použitých zkratk a symbolů.....	61
7.2. Použitá literatura .....	61
7.3. Seznam grafů .....	62
7.4. Seznam obrázků.....	63
7.5. Seznam tabulek.....	65

## 1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je vytvoření modelu pro simulaci provozu malé vodní elektrárny s Francisovou turbínou s možností přizpůsobení parametrů a simulace jednotlivých provozních stavů. Jako předloha pro vytvoření toho modelu byla použita vodní elektrárna Plavisko.

Simulace přechodových jevů, které nastávají při provozu vodní elektrárny je komplikovaná. Model umožňuje jednoduchou změnu parametrů a díky tomu je možné jednotlivé přechodové a provozní stavy mezi sebou porovnávat. Hra s modelem pomůže k pochopení, jak funguje provoz vodní elektrárny, a k čemu dochází při jednotlivých manipulačních stavech.

V úvodu této práce se zaměřím na vodní elektrárnu jako takovou, včetně popisu a uvedení základních parametrů vodní elektrárny Plavisko, na základě které byl tento model vytvořen. V druhé části se zaměřím na vytvořený Simulink model s použitím SimScape prvků, který je vytvořen s jednotlivými prvky podle skutečné elektrárny. Ve třetí části se budu zabývat výsledky, které mohou ve vodní elektrárně nastat při jednotlivých manipulačních a provozních stavech

## 2. Malá vodní elektrárna

Za malou vodní elektrárnu se považuje vodní elektrárna s maximálním výkonem do 10 MW, ale podle řazení Evropské unie je maximální výkon pro MVE pouze 5 MW. Malá vodní elektrárna představuje ekologicky příznivý zdroj elektrické energie. V dnešní době při rostoucích cenách elektrické energie je její ekologická výroba velmi aktuální téma. Vodní elektrárny jsou v dnešní době budovány na většině vodních děl.

## 3. Základní technické parametry vodní elektrárny Plavisko

Pro tvorbu modelu byla jako předloha použita právě vodní elektrárna Plavisko. To především z důvodu, že jsem měl k dispozici charakteristiky turbíny, která je instalována na této elektrárně a další důležité podklady s parametry této elektrárny.

Vodní elektrárna Plavisko je derivační malá vodní elektrárna, která se nachází na Oravsku.

Toto vodní dílo je vybudováno na Studeném potoce.

### 3.1. Přivaděč

Přivaděč je proveden ocelovým tlakovým potrubím DN 1000 mm v celkové délce 1550 m.

Podařilo se zde dosáhnout spádu H brutto 35 m a čistého spádu H netto 32 m.

### 3.2. Uzavírací klapka před turbínou

Jedná se o uzavírací klapku s vodorovnou osou otáčení. Klapka je průměru DN 800 v přírubovém provedení, těleso a talíř je z uhlíkové oceli, těsnění na talíři je pryžové NBR. Klapka má havarijní uzavírání s hydraulickým pohonem. Jedná se o přesný typ L 32.6 115 410 NBR AG DN 800 PN 10.

### 3.3. Turbína

Na této vodní elektrárně se nachází jedna Francisova turbína, která je instalována horizontálně. Jedná se o typ HHF 64-550 s parametry viz tabulka 3.1.

V Simulink modelu byly použity univerzální neboli jednotkové charakteristiky této konkrétní turbíny.

turbína	
typ	HHF 64-550
Hn	32 m
Dok	0,55 m
Q max	1,2 m <sup>3</sup> /s
Q min	0,2 m <sup>3</sup> /s
Pt max	326 kW
Pg max	304 kW
nt	750 ot/min

Tabulka 3.1- Parametry turbíny

### 3.4. Generátor

V tabulce 3.2 jsou uvedeny parametry generátoru, který je umístěn v této vodní elektrárně. Jedná se o vzduchem chlazený synchronní generátor, uložený horizontálně. Celkový moment setrvačnosti je 275

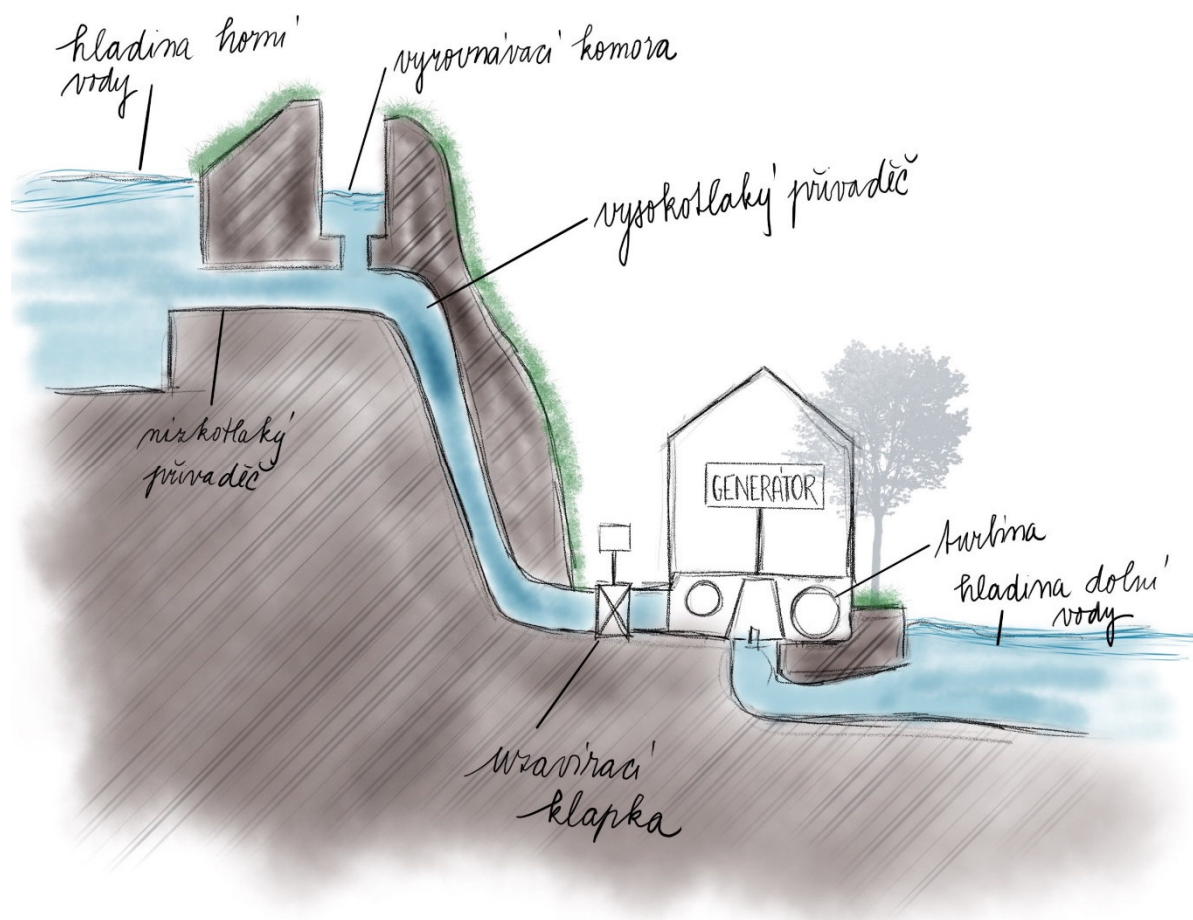
kg\*m<sup>2</sup>.

1 ks synchronní horizontální generátor typ GSH400M8			
výkon	358 kVA	výkon hřídeli	310 kW
otáčky	750 min <sup>-1</sup>	max. otáčky	1 800 min <sup>-1</sup>
napětí	400 V	proud	517 A
frekvence	50 Hz	zapojení	hvězda, 4 vodiče
směr otáčení - prosím uveďte	IP23/IC01	provoz	paralelní se sítí
tvár	IM1002	nadm. výška	: do 1000 m.n.m.
barva	červená RAL 3004	teplota okolí	: + 40 °C
norma	IEC 34-1	chvění	: EN60034-14 ed.2 tř.A
		moment setrvačnosti	Jr = 65 kgm <sup>2</sup>
		zatěžovatel S1 – 100%	
		tř. izol. F , využití tř. B	
		účinnost % při	
		Cos φi	0,8      0,9      1
		Pn	92,5    93,4    94,2
		0.75 P	93      93,9    94,7
		0.5 P	93,1    94      94,8
		0.25 P	91,4    92,5    93,3
		hmotnost cca 3 400 kg	
- Poznámky:			
- RN 3-3175-532: jen pro informaci !			
- 3 ks PT100 ve vinutí			
- 2 ks PT100 v ložiskách			
- ložiska s domazáváním, životnost teoretická 100 000 hod			
- regulátor napětí AVC 125-10			
- indukční snímač otáček, 4 imp./ot.			
- druhý volný konec pro setrvačnick			

Tabulka 3.2 - Parametry generátoru

### 3.5. Schéma malé vodní elektrárny

Na obrázku č. 3.1 je zobrazené ilustrační schéma malé vodní elektrárny s hlavními prvky, kterými jsou: hladina horní a dolní vody, nízkotlaký a vysokotlaký přivaděč, vyrovnávací komora, uzávěr před turbínou, turbína, generátor a objekt elektrárny.

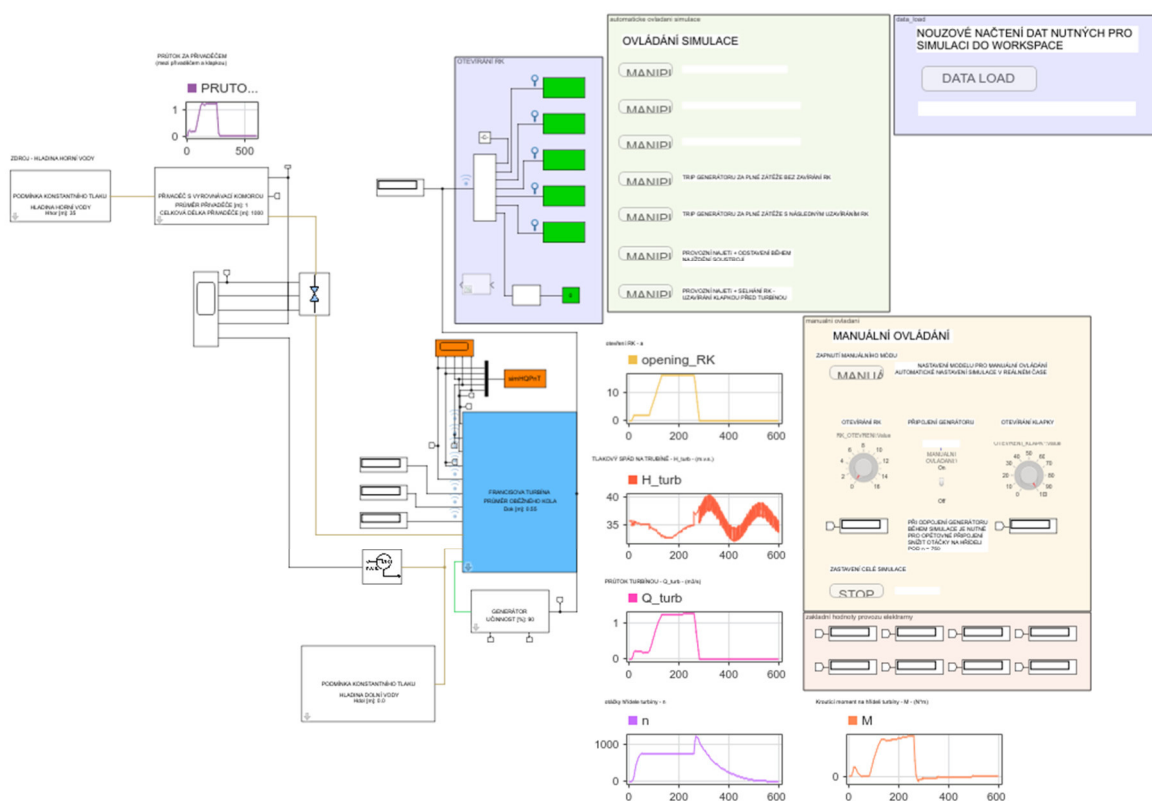


Obrázek 3.1 – Schéma malé vodní elektrárny

## 4. SIMULINK MODEL VODNÍ ELEKTRÁRNY

Celý model (obr. 4.1) je vytvořen podle skutečné předlohy, tak aby co nejvíce odpovídal reálným částem vodní elektrárny a jejím funkcím. Je vytvořen ze SimScape bloků v prostředí Simulink. Celý Simulink model je rozdělen na jednotlivé funkční části vodní elektrárny, do jednotlivých Simulink subsystémů. Každý subsystém má vytvořenou masku, pro nastavení

daných parametrů. Okrajové podmínky celého modelu jsou dány, jako podmínky konstantního tlaku horní a dolní vody.



Obrázek 4.1 – Schéma modelu

#### 4.1. Význam simulátoru vodní elektrárny

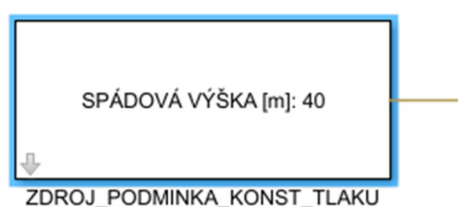
Při provozu vodní elektrárny, manipulaci a následných přechodových stavech vzniká spousta těžko si představitelných jevů. V tomto modelu jsou přednastaveny manipulační stavy, při kterých dochází k nejzajímavějším jevům, které jsou následně zobrazeny v názorné formě, tak aby byly jednodušší na pochopení a byla s nimi umožněna další práce nebo detailnější inspekce. Zároveň lze v modelu snadno měnit jednotlivé parametry, následně výsledky a odchylky jednotlivých simulací mezi sebou jednoduše porovnat.

#### 4.2. Zdroj průtoku

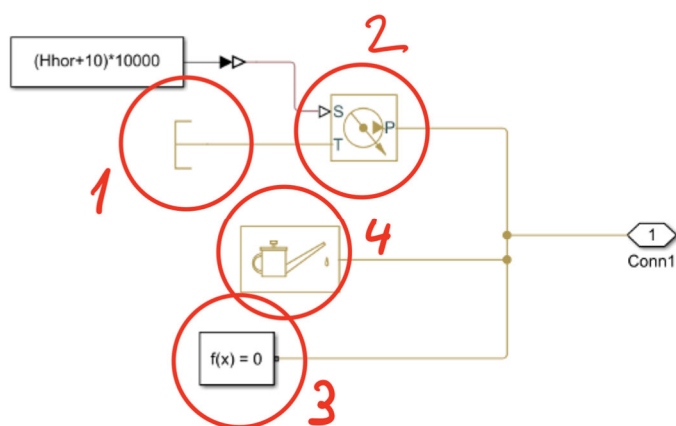
Tímto subsystémem (obr. 4.2 a 4.3) je zajištěn zdroj média pro simulaci a zdroj vstupního tlaku. Tento parametr se skládá z tlaku vyvolaným rozdílem hladin horní a dolní vody a atmosférického tlaku. Atmosférický tlak musí působit na obou koncích modelu, aby byla



zachována podmínka konstantního tlaku v celém systému. Zdroj media je zajištěn prvkem *hydraulic reference* (č.1.), který představuje neomezený zdroj media, v našem případě vody. Dále je zde prvek *hydraulic pressure source* (č.2), který dodává tlak na vstupu do systému, dle nastavené spádové výšky s přičtením atmosférického tlaku. V tomto subsystému se také nacházejí prvky pro zajištění chodu simulace, kterými jsou *simulink solver* (č.3), tento blok zajišťuje nastavení řešiče pro simulaci všech Simscape prvků v tomto modelu. A prvek *Hydraulic fluid* (č.4), který udává parametry media v hydraulickém systému. Velikost spádové výšky lze nastavit po kliknutí na tento subsystém (obr. 4.2), a potom se tento parametr ukazuje na masce tohoto subsystému, což lze vidět na obrázku č. 4.2.



Obrázek 4.2 - Subsystém - zdroj průtoku



Obrázek 4.3 - Subsystém - zdroj průtoku

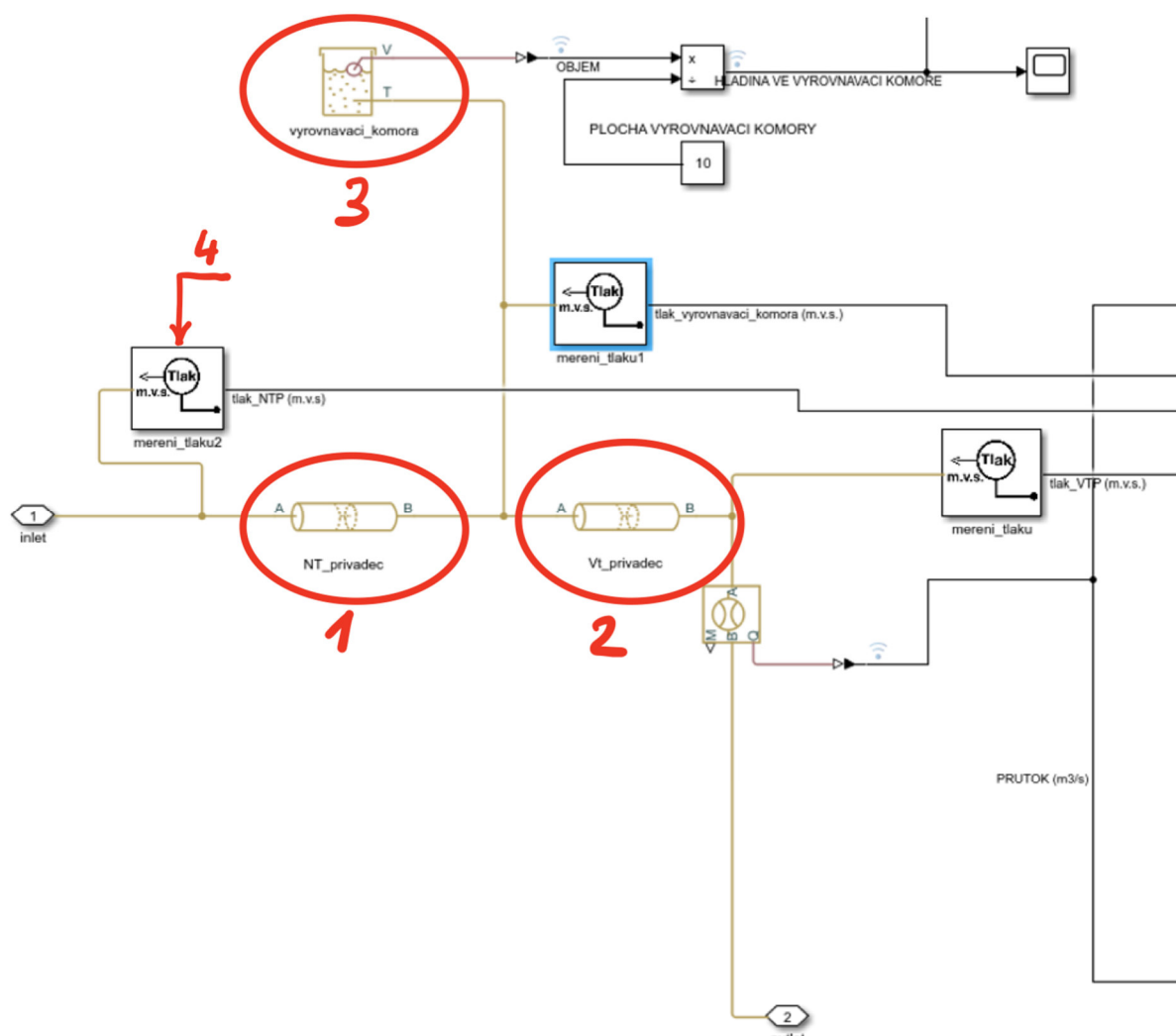
### 4.3. Přivaděč

Jedná se o druhý blok na cestě modelu. V tomto bloku se nachází prvky, které představují nízkotlakou i vysokotlakou část přivaděče a vyrovnávací komoru. Lze si v tomto bloku nastavit délku a průměr přivaděče, tyto hodnoty se potom zobrazují na tomto bloku.

Při nahlídnutí pod masku tohoto subsystému (obr. 4.4 a 4.5) vidíme všechny Simscape bloky, ze kterých se skládá. První část celého subsystému tvoří nízkotlaký přivaděč, na obrázku 4.5 je to blok označen číslem 1. Tato část přivaděče je vytvořena blokem Segmeted Pipeline se třemi segmenty, tento blok funguje jako potrubí pro převod media, a na rozdíl od jednodušších verzí, které by se jako přívodní potrubí dali použít, dokáže pracovat s hydraulickým rázem, který v přivaděči může nastat. Tento



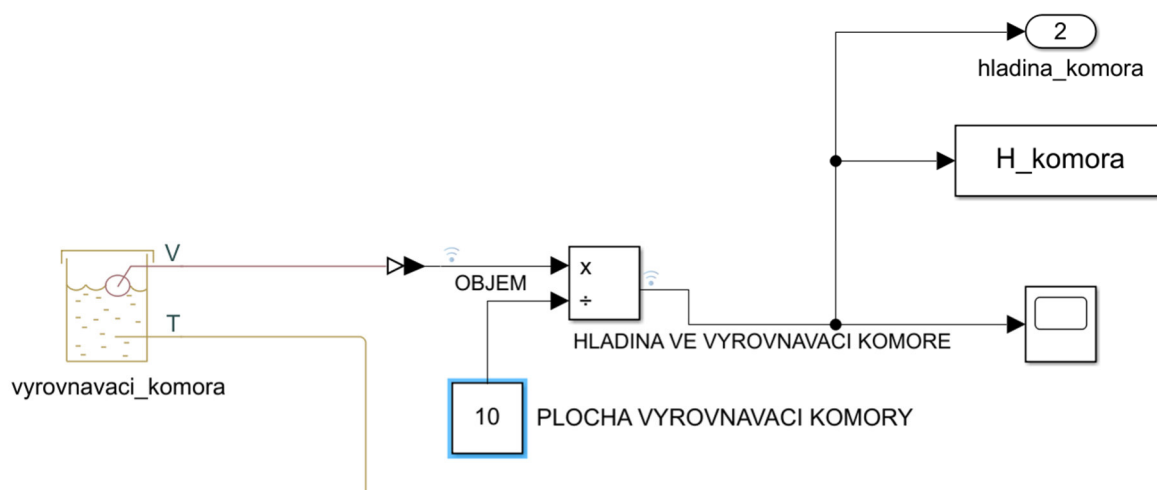
typ Simscape potrubí umí také pracovat s hmotností a dynamikou proudění kapaliny. Se stejným principem je vytvořena i část vysokotlakého přivaděče (č.2), pouze s rozdílnou délkou. Celková délka, kterou uživatel tímto blokem nastaví, je mezi nízkotlaký přivaděč rozdělena v poměru 4 ku 1, s větší délkou pro přivaděč nízkotlaký. Mezi tyto dvě části přivaděče je zapojena vyrovnávací komora (č.3), která slouží pro utlumení hydraulického rázu, který vzniká při manipulaci s uzavírací klapkou před turbínou nebo při manipulaci s lopatkami rozváděcího kola turbíny. Dále tu jsou prvky na snímání tlaku na různých místech této sestavy (č.4).



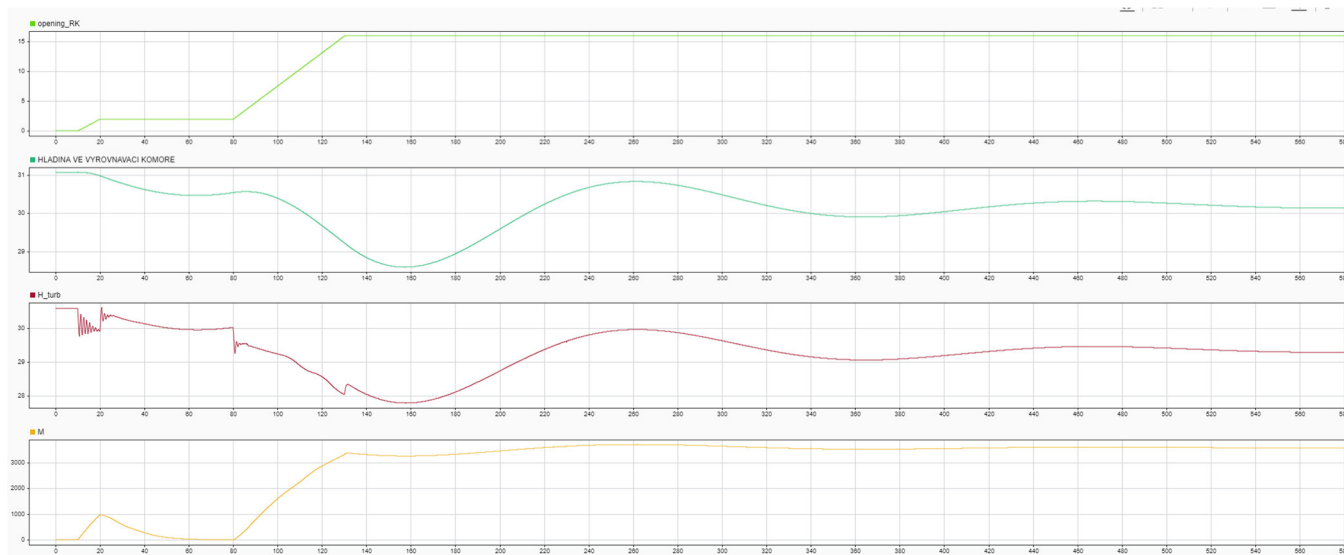
Obrázek 4.5 - Subsystém přivaděč

Vyrovnávací komora (obr. 4.6) má plochu 10 m<sup>2</sup> a průměr napojení se rovná průměru přivaděče. Připojení vyrovnávací komory na přivaděč má ztrátu, která je daná ztrátovým koeficientem 0,1 (-), tato hodnota je nastavena přímo v SimScape bloku nádrže s volnou hladinou. Hlavní funkce vyrovnávací komory je utlumení hydraulického rázu, který nastává při

v přivaděči při manipulaci s lopatkami RK nebo s uzavírací klapkou před turbínou. Při simulaci také nastává kolísání hladiny, které je způsobeno manipulací. Kolísání se také projeví na chodu turbíny, jelikož kvůli kolísající hladině ve vyrovnávací komoře dochází ke kolísání vstupního tlaku do turbíny a tím pádem můžeme pozorovat i kolísání kroutícího momentu, který turbína generuje viz graf 4.1.



Obrázek 4.6 - Prvky vyrovnávací komory



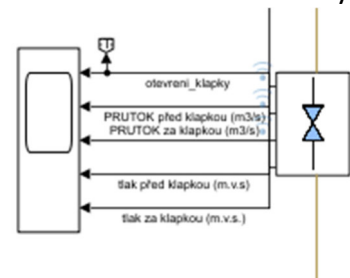
Graf 4.1 - Kolísání spádu a kroutícího momentu

#### 4.4. Uzávěr před turbínou

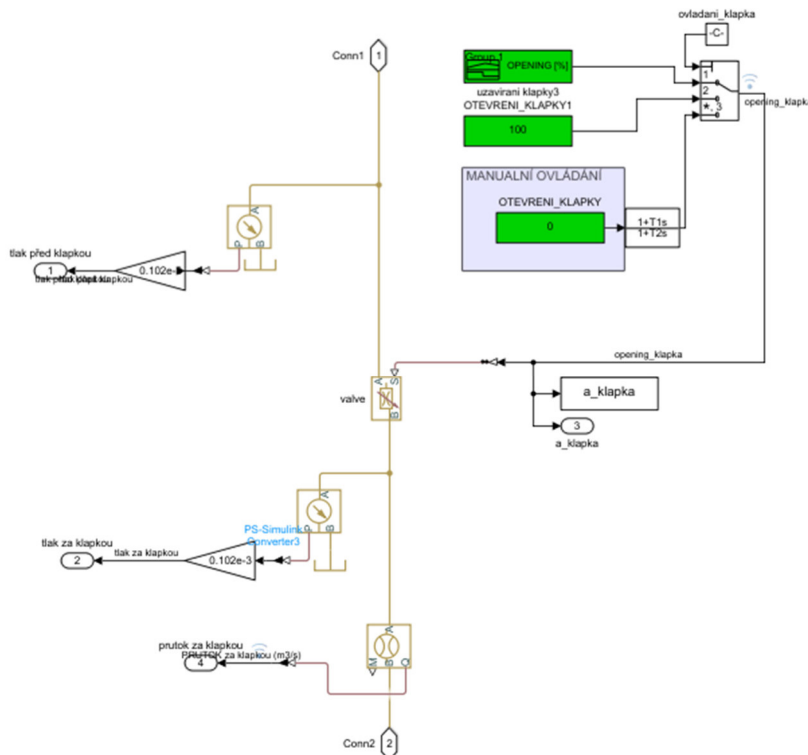
Primárně k regulaci průtoku turbínou dochází pomocí manipulací s lopatkami rozváděcího kola turbíny. Uzavírací klapka před turbínou má bezpečnostní funkci pro ostavení turbíny při selhání RK, nebo pro odpojení při servisních pracích.

V mém Simulink modelu se s klapkou při většině simulací nemanipuluje, kvůli charakteristikám, které jsou zapojeny v turbíně. Při uzavření klapky a ponechání otevřeného RK na turbíně, se průběh simulace dostával mimo plochy těchto charakteristik a model nebyl na dále schopen pokračovat v simulaci. Pro simulaci uzavírání pomocí klapky byl vytvořen samostatný model, ke kterému se dostaneme v pozdější kapitole.

Uzavírací klapka (obr. 4.7 a 4.8) je v modelu definována jako místní ztráta, která zde působí podle % otevření. Ztráta je vypočítávána z charakteristiky klapky, která je v tomto bloku nastavena. Jako prvek pro uzavírací klapku byl zvolen SimScape blok *Variable Orifice*, ve kterém jsou nahrány jednotlivé charakteristiky pro uzavírání. Dále se v tomto systému nachází jen ovládací a snímací SimScape prvky.



Obrázek 4.7 - Subsystem uzavírací klapky



Obrázek 4.8 - Subsystém uzavírací klapky

## 4.5. Turbína

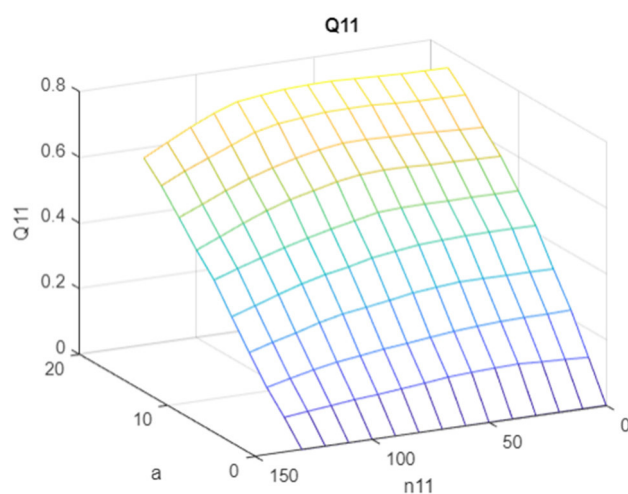
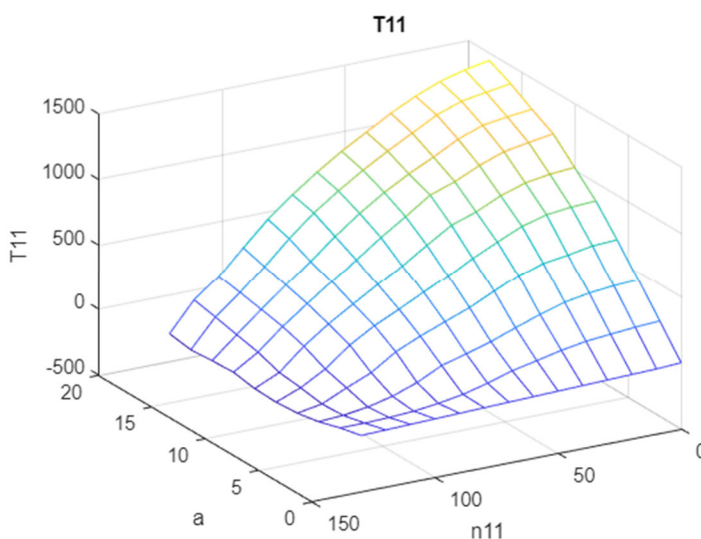
V modelu je umístěna jedna horizontální turbína typu Francis s možností ovládní natočení lopatek RK. V tomto modelu byly použity charakteristiky Francisovy turbíny, která je instalovaná ve vodní elektrárně Plavisko. Jedná se o reakční (přetlakový) typ turbíny, který se modeluje hůř než turbína akční (rovnotlaká, např. Peltonova), jelikož zde dochází ke zpětnému ovlivnění průtoku. Francisova turbína má jednoduchou regulaci, pomocí natáčení lopatek rozváděcího kola, proto je její modelování jednodušší než turbíny Kaplanovy, která má dvojitou regulaci.

Vstupními parametry do turbíny jsou průtok, tlakový spád a otevření lopatek rozváděcího kola  $a$ , které jsou přepočteny na výstupní otáčky a kroutící moment na hřídeli turbíny, pomocí charakteristik  $Q_{11}$ - $n_{11}$  a  $M_{11}$ - $n_{11}$  (obr. 4.9 a 4.10) Tyto charakteristiky představují vlastnosti turbíny na základě podobnosti pro 1 m oběžného kola a 1 m spádu. Vztahy pro přepočet těchto jednotkových veličin se skutečnými, jsou dány:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D_{ok}}{\sqrt{H_{netto}}}$$

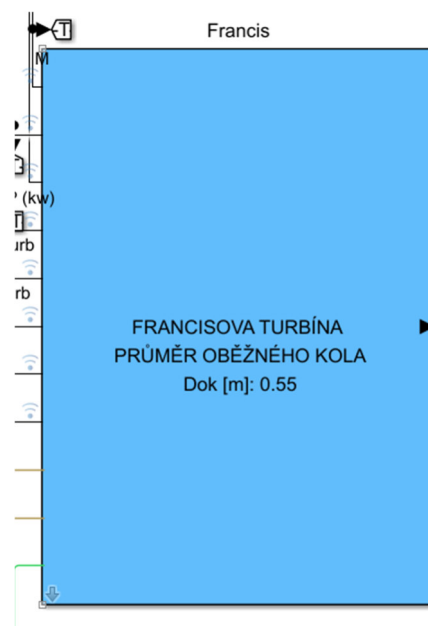
$$Q_{11} = \frac{Q}{D_{ok}^2 \cdot \sqrt{H_{netto}}}$$

$$M_{11} = \frac{T}{D_{ok}^3 \cdot H_{netto}}$$

Obrázek 4.10 - Turbínová charakteristika  $Q_{11}$ Obrázek 4.9 - Turbínová charakteristika  $M_{11}$

Model turbíny je vytvořen s možností natáčení lopatek rozváděcího kola, se kterými se manipuluje během najíždění nebo odstavení soustrojí. Manipulaci se mění momentové a průtokové charakteristiky. Z tohoto důvodu jsou pro výpočet skutečných hodnot průtoku  $Q$  a kroutícího momentu na hřídeli  $M$  použity trojrozměrné charakteristiky jednotkového průtoku  $Q_{11}$  a kroutícího momentu  $M_{11}$  na rovině jednotkových otáček  $n_{11}$  a otevření  $a$ .

Při klinutí na tento blok lze nastavit průměr oběžného kola  $D_{ok}$ . Tento parametr se pak zobrazuje na masce tohoto bloku (obr. 4.11).



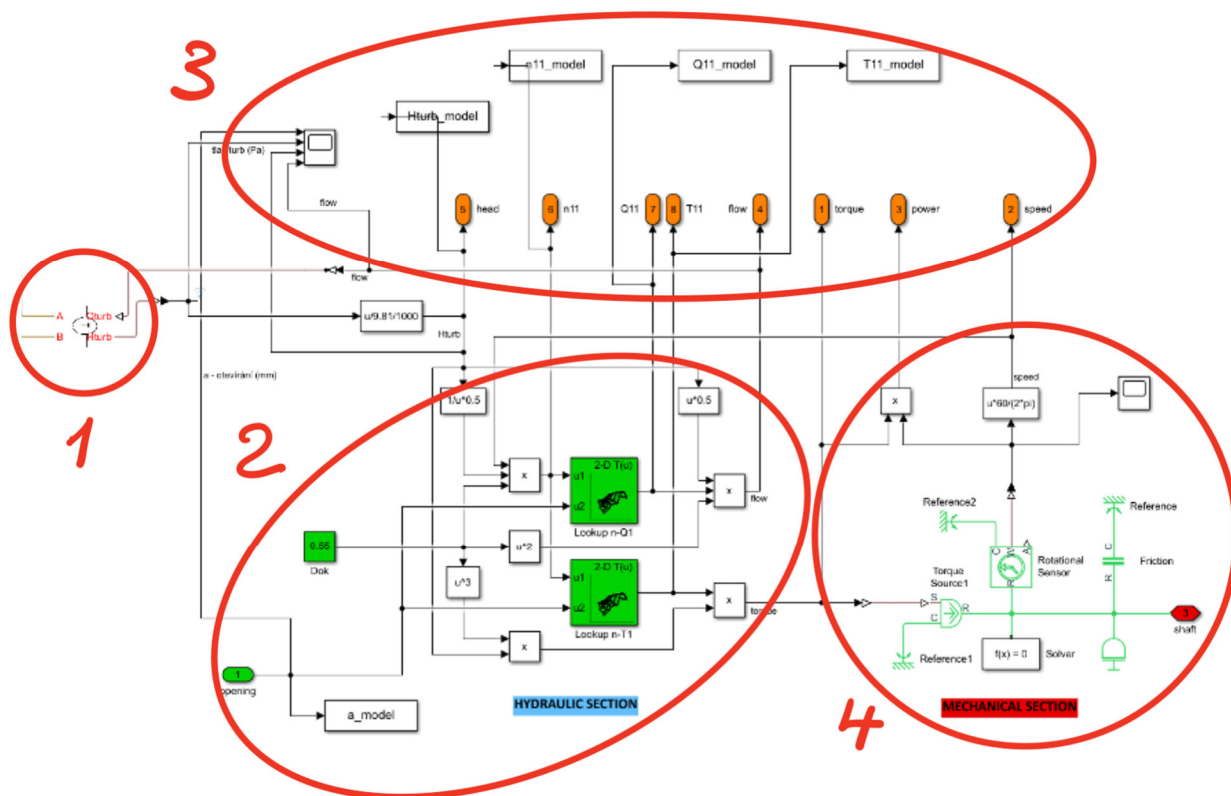
Obrázek 4.11 - Subsystem Francisova turbína

Pod maskou tohoto subsystemu se nachází sestavení Simulink a SimScape bloků viz obr. 4.12. První blok převádí tlakový spád ze vstupního SimScape signálu na signál pro použití Simulink bloky (č.1). Zároveň informaci o průtoku  $Q$ , která vychází ze Simulink systému, ve kterém jsou zapojené charakteristiky turbíny, převádí tento blok zpět na SimScape signál průtoku. Ten se vrací zpátky do hydraulického SimScape systému a pokračuje na odvodní cestu.

Dále je zde systém vytvořen ze Simulink prvků (č.2) se dvěma Lookup plochami, ve kterých jsou nahrány charakteristiky dané turbíny. Spolu s ostatními Simulink prvky provádí výpočet jednotkových a skutečných veličin, z dostupného tlakového spádu na turbíně.

Třetí část v tomto subsystemu (č.3) tvoří bloky, které převádějí Simulink signál kroutícího momentu na SimScape signál, pomocí bloku *Ideal Torque Source*. Tento blok vytváří ideální převod kroutícího momentu ze Simulink na SimScape signál. Dále je zde *Rotational Sensor*, tento blok snímá rychlost otáčení SimScape hřídele turbíny. Bloky *Mechanical Reference* zde působí jako okrajová podmínka pro řešení mechanické SimScape části. Způsob, jakým řešič řeší mechanickou SimScape část, definuje blok *Solver*. Blok *Friction* přidává ztrátu mechanickým třením a blok *Inertia* údaje o setrvačnosti celého soustrojí. Posledním blokem v této části je výstup signálu SimScape hřídele turbíny, který pokračuje do generátoru.

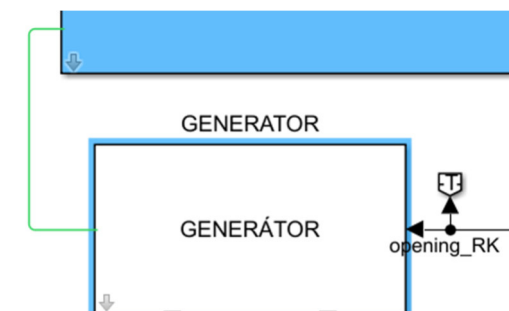
Ve čtvrté a poslední části tohoto subsystému (č. 4) se nacházejí bloky, které zapisují data do hlavního workspace celého modelu. A bloky pro výstup jednotlivých signálů ven z tohoto subsystému, které jsou dále použity pro další chod simulace a pro vykreslení výsledků tohoto subsystému.



Obrázek 4.12 - Simulink turbína

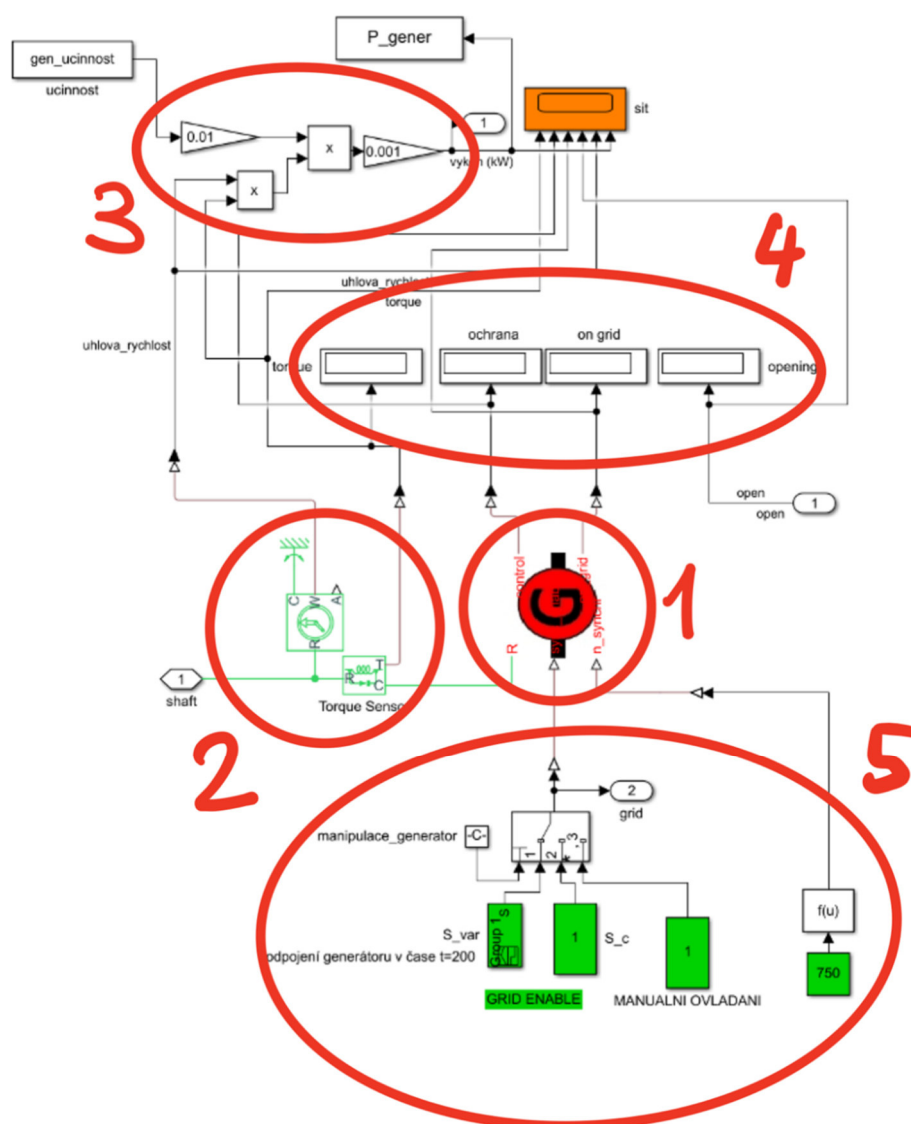
### 4.6. Generátor

Jedná se o subsystém, který se nachází hnedka pod turbínou, a dochází v něm k přeměně mechanické rotační energie na energii elektrickou, která pokračuje dále do elektrické sítě. Vstupem do tohoto subsystému je Simscape signál hřídele turbíny, který je v tomto subsystému zapojen do bloku na obr. 4.14 č. 1, který ovládá připojení generátoru a vytváří zatížení na hřídeli. Dále jsou v tomto subsystému bloky pro snímání úhlové rychlosti otáčení hřídele a kroutícího momentu (č. 2). Další částí je soubor Simulink bloků (č. 3), ty provádí výpočty výkonu, který generátor vytváří. Posledními bloky v tomto subsystému slouží pro



Obrázek 4.13 - Subsystém generátor

zobrazení výsledků, jsou to ukazatele jednotlivých hodnot během simulace (č. 4), a Simulink blok Scope pro vykreslení dat ze simulace do grafů.



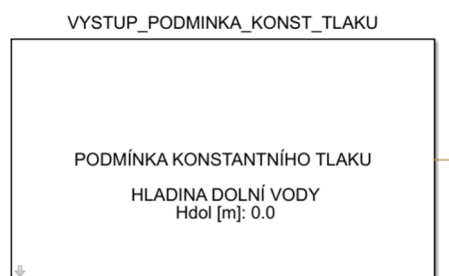
Obrázek 4.14 - Simulink generátor

Generátor byl modelován podle generátoru, který je instalován v elektrárně Plavisko. Moment setrvačnosti zde je totožný a to  $275 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , odporový moment tření na hřídeli od turbíny  $0.0001 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ . K připojení generátoru dojde při 750 otáčkách, k odpojení dochází automaticky při poklesu otáček, strmost momentové charakteristiky je  $1e^6 \text{ N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ .



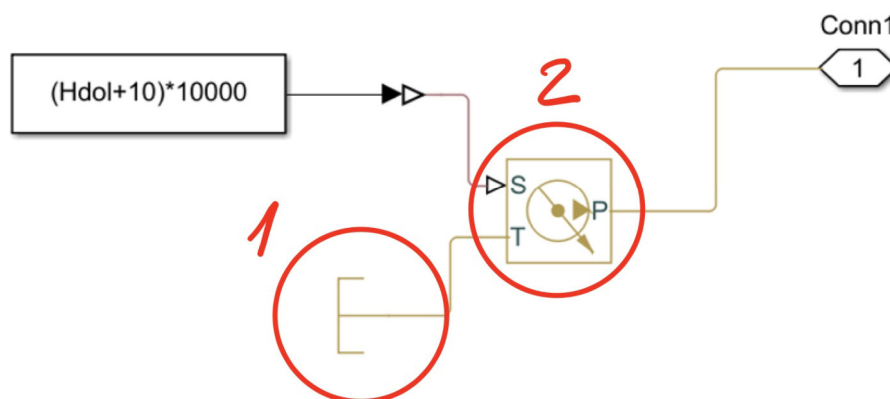
#### 4.7. Výstup vody ze systému

Posledním bokem na cestě media (vody) modelem je subsystem, který zajišťuje výstup vody ze systému a zároveň tvoří okrajovou podmínku konstantního tlaku (tlak dolní vody). Při kliknutí na tento blok (obr. 4.15) můžeme nastavit hladinu dolní vody, tato hodnota se potom zobrazí na masce tohoto subsystemu. Při nahlídnutí pod masku (obr. 4.16)



Obrázek 4.15 - Subsystem výstup ze systému

vidíme bloky, které mají na starost správnou funkci tohoto subsystemu. *Hydraulic reference* blok č. 1, představuje odtok vody ze systému, funguje jako nekonečný zdroj nebo odtok daného média. Blok označen č. 2 *Hydraulic pressure source*, dodává do systému atmosférický tlak z druhé strany systému, tak aby byla zachována podmínka konstantního tlaku. Dále do systému dodává tlak vyvolaný výškou dolní vody, která je nastavitelná tímto celým subsystemem.

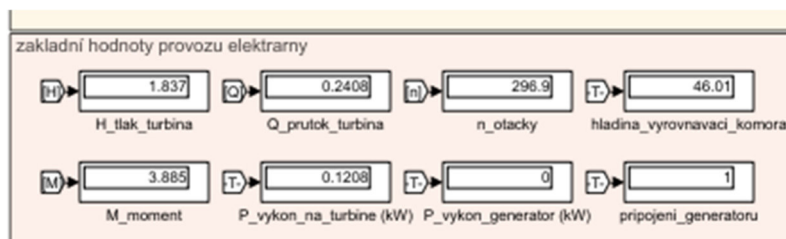


Obrázek 4.16 - Simulink výstup vody ze systému

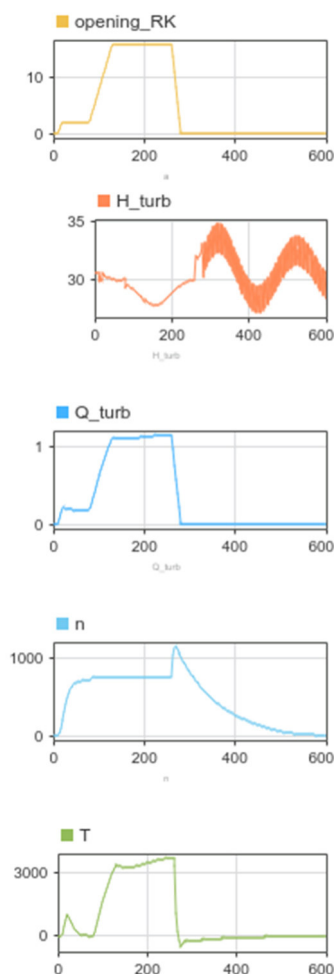
#### 4.8. Další prvky modelu

V modelu je vytvořen ovládací systém, který slouží pro nastavení parametrů celého modelu a simulace, nastavení jednotlivých bloků a samotné ovládání simulace. Na celý systém ovládání a spuštění simulace se zaměřím v následující kapitole 4.9 *Spuštění a ovládání modelu*. Dále jsou v tomto modelu prvky, které slouží pro vykreslování a zobrazení výsledků, a to několika způsoby. Jednotlivé hodnoty jsou zobrazovány během simulace v Simulink *display* blocích

(obr. 4.18). Grafické výsledky pomocí grafů, které se automaticky aktualizují a přizpůsobí po skončení simulace (obr 4.17), Simulink bloky „Scope“, otevření Simulink aplikace Data Inspector a vykreslení složitějších formací pomocí MATLAB Live Script. Více o zobrazení výsledků se dozvíte v samostatné kapitole. V poslední řadě se v modelu nacházejí různé bloky, které slouží pro jednotlivé uložení, snímání nebo transfer dat.



Obrázek 4.18 - Display bloky pro zobrazení dat při simulaci



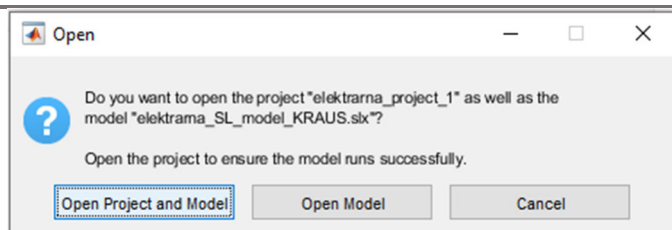
Obrázek 4.17 - Grafické zobrazení výsledků v Simulink modelu

#### 4.9. Spuštění a ovládání modelu

Model se otevře velmi jednoduše, a to dvojklikem na zástupce modelu ve složce souborů (obr 4.19). Poté dojde k otevření nejprve aplikace MATLAB. Po jejím načtení se ukáže hláška, zdali chceme otevřít pouze model nebo celý projekt. Zde je nutné kliknout na otevřít celý projekt neboli „OPEN PROJECT AND MODEL“ viz obr 4.20. Poté dojde k otevření aplikace Simulink a načtení celého projektu i modelu, tato akce může chvíli trvat, jedná se o poslední krok při otevírání modelu a je nutné, aby došlo k načtení celého modelu a všech dat.



Obrázek 4.19 - Simulink soubor modelu elektrárny



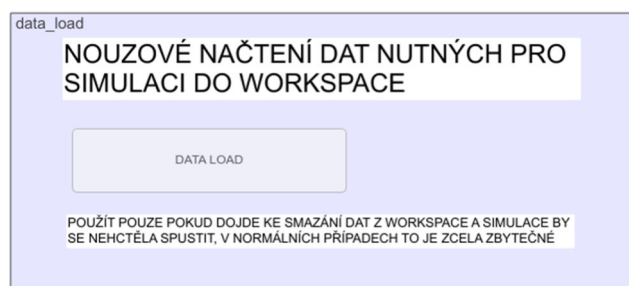
Obrázek 4.20 - Spuštění projektu s modelem

Před spuštěním simulace můžeme nastavit parametry elektrárny, podle kterých bude simulace probíhat. Tyto parametry se nastavují jednotlivě na každém bloku, můžeme takto nastavit většinu základních parametrů jako jsou například délka přivaděče nebo hladina horní a dolní vody, viz kapitola 4.9.2.

Celý model elektrárny má dále dvě možnosti ovládání simulace, mezi kterými si uživatel může vybrat. Jedná se o simulaci pomocí přednastavených manipulačních stavů a manuální ovládání simulace v *real time* módu. Při simulaci podle přednastavených stavů odpadá uživateli starost o to, zdali je jeho manipulace správná a nevymyká se reálným stavům, které mohou na elektrárně nastat, nebo zdali se nedostává na mez funkčnosti tohoto modelu nebo za ní.

#### 4.9.1. Nouzové načtení dat do workspace

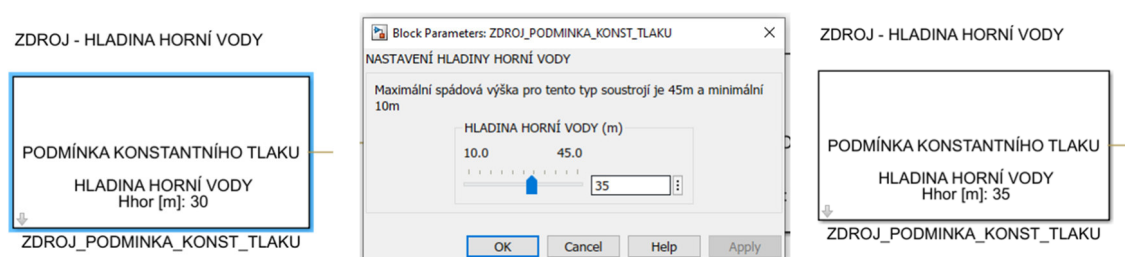
Pro úspěšné spuštění simulace je nutné, aby byly v *base workspace* načtena data, které jsou potřeba pro chod simulace (například charakteristiky turbíny, uzávěru a další vstupní data). Toto načtení probíhá automaticky při otevření modelu a spuštění celého projektu. Pokud by z nějakého důvodu byla data z *workspace* vymazána, dojde k tomu, že se simulace nebude chtít spustit a při pokusu o spuštění se otevře varovná hláška o chybějících datech. V takovém případě je nutno buď otevřít model s celým projektem znovu, nebo použít druhou možnost načtení dat do *workspace* a to kliknutím na tlačítko „*DATA LOAD*“ přímo v modelu viz obr. 4.21. Tuto možnost jsem zde vytvořil, aby při případném smazání dat z *workspace* nebylo nutno celý projekt otvírat znovu.



Obrázek 4.21 - Nouzové načtení dat do base workspace pro spuštění simulace

### 4.9.2. Nastavení parametrů elektrárny

Nastavování se provádí jednoduše kliknutím na daný blok podle parametru, který chceme nastavit, nastavitelné parametry se zobrazují na masce každého bloku. Po kliknutí na blok se nám zobrazí parametry, které lze na daném bloku nastavovat, včetně stručného popisu. Každý parametr, který lze nastavovat má předem definované rozpětí pro nastavení, aby nedošlo k simulaci nereálného stavu, který by vedl ke kolapsu celé simulace a modelu. Po nastavení daného parametru stačí kliknout na tlačítko „OK“ v dolní části okna. Parametr se automaticky nastaví na požadovanou hodnotu a toto nastavení se ihned zobrazí na masce tohoto bloku. Příklad nastavení hladiny horní vody je na obrázku 4.20.



Obrázek 4.22 - Příklad nastavení parametru horní vody

### 4.9.3. Simulace modelu podle přednastavených stavů

Simulace tímto způsobem je mnohem jednodušší než při manuálním ovládáním. Stačí akorát zvolit přednastavený manipulační stav, podle kterého chceme, aby simulace probíhala a potom kliknout na tlačítko příslušného manipulačního stavu (obr. 4.23). Model se automaticky nastaví a spustí se vybraná simulace.

V modelu toto funguje tak, že při kliknutí na tlačítko dané simulace se nastaví, jaký vstupní signál bude použit, pro otevírání RK, otevírání klapky před turbínou a pro ovládání připnutí generátoru. Dále se v modelu nastaví parametr pro rychlost simulování modelu. Následně se spustí celá Simulink simulace. Při průběhu simulace nelze cokoli měnit nebo nastavovat.

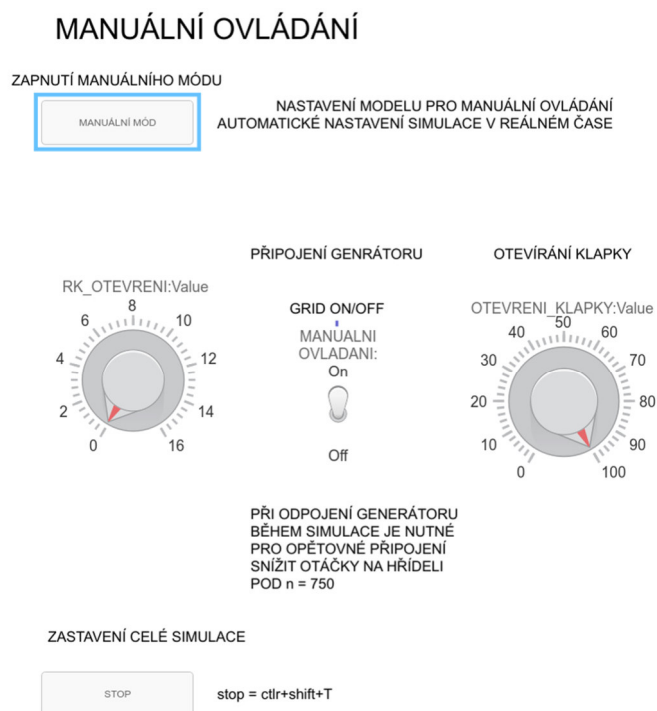


Obrázek 4.23 - Ovládání přednastavených manipulačních stavů

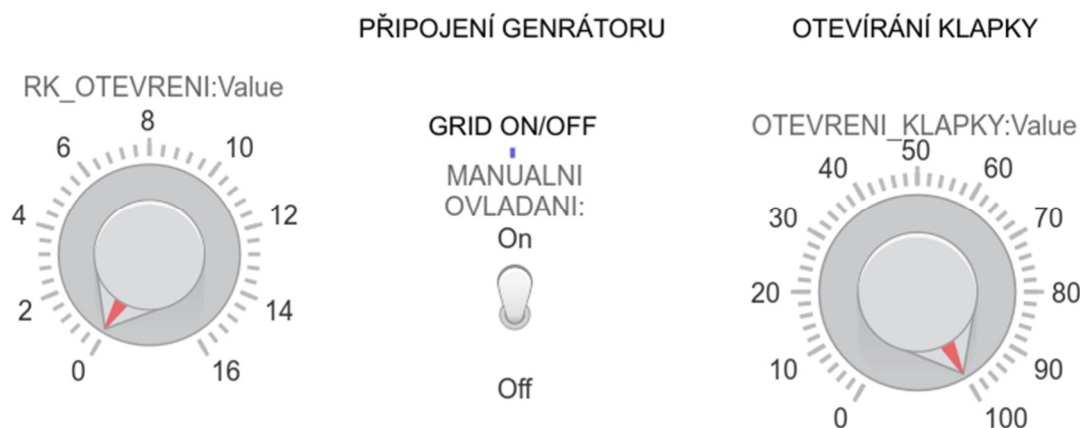
#### 4.9.4. Simulace modelu s manuálním ovládáním

Simulace za použití manuálního ovládání již vyžaduje určitou znalost provozu vodní elektrárny a opatrnost při manipulaci. Přejítí do manuálního módu simulace je jednoduché, stačí v sekci „MANUÁLNÍ OVLÁDÁNÍ“ (obr. 4.24) kliknout na tlačítko *MANUÁLNÍ MÓD*, tím se simulace přepne do manuálního módu, nastaví se potřebné parametry pro tento druh simulace, a zároveň se nastaví časový průběh simulace na simulaci v reálném čase.

Simulace se ovládá za jejího chodu pomocí ovládacích prvků (obr. 4.25)



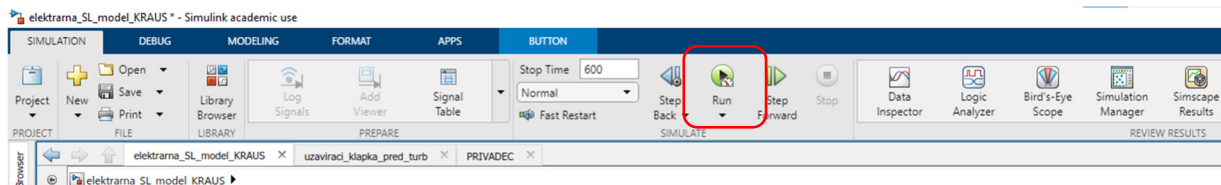
Obrázek 4.24 - Manuální ovládání modelu



Obrázek 4.25 - Prvky manuálního ovládání simulace

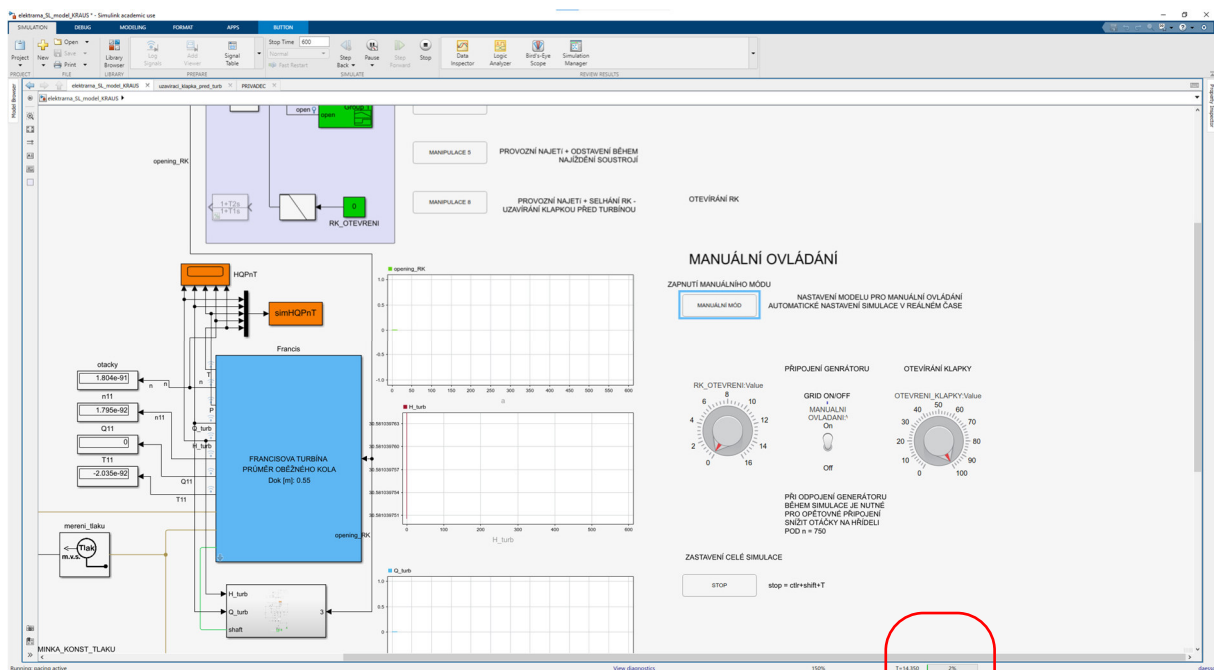
Kterými jsou, zleva: ovládání otevření RK, ovládání připojení generátoru, ovládání otevření uzavírací klapky před turbínou. Před zahájením simulace doporučuji nastavit ovládání RK do polohy 0 = zcela zavřeno, generátor do pozice on/off podle toho, zdali chceme simulovat připojení ke generátoru (v momentě kdy spustíme simulaci s vypnutým připnutím generátoru otáčky rychle vzrostou nad hranici, kdy se generátor připojí, a potom ho již nejde připojit),

otevření klapky do polohy 100% která odpovídá plně otevřenému stavu. Simulaci poté spustíme tlačítkem „Run“ nahoře v pásu karet v záložce „SIMULATION“ viz obr. 4.26.



Obrázek 4.26 - Spuštění simulace v manuálním módu

Po spuštění simulace ji můžeme ovládat ovládacími prvky, podle stavu, kterého chceme docílit. Zde bych chtěl ještě jednou upozornit, že je potřeba dbát na to, abychom simulovali reálný provozní stav, který by mohl nastat. Při určité manipulaci se může stát, že se dostaneme na mez, ve které model již není schopný fungovat, a ve které výpočty dále nedávají smysl. V takovém případě se může stát, že se simulace modelu zasekne a solver nebude schopný dále pokračovat ve výpočtu simulace modelu. Poznáme to tak, že se simulace sama zastaví s varovnou Simulink zprávou, o tom že došlo k chybě při výpočtu, nebo bude zaseknutý čas simulace který běží vpravo dole v okně s modelem (obr. 4.27) a nebude dále pokračovat.



Obrázek 4.27 - Model při simulaci

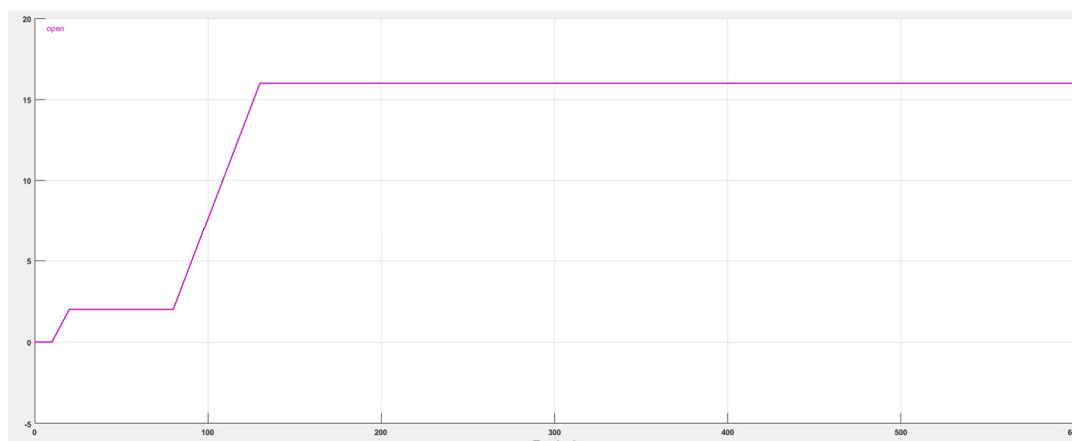
V takovém případě je nutné simulaci ukončit manuálně a to buď: kliknutím na tlačítko „Stop“ nahoře v pásu karet v záložce „SIMULATION“, použitím klávesové zkratky „ctrl+shift+T“, nebo kliknutí na tlačítko stop v sekci manuální ovládání simulace. Pokud bude simulace probíhat bez problému a bez manuálního zastavení, dojde k jejímu automatickému zastavení v čase  $T = 600$  s, které odpovídají reálné době simulace 10 min.

#### 4.10. Přednastavené manipulační a provozní stavy

Pro simulaci jednotlivých provozních a manipulačních stavů jsou v modelu předdefinované jednotlivé stavy abychom dosáhli požadovaných průběhů simulace. Jednotlivé manipulační stavy jsou představeny v následujících kapitolách.

##### 4.10.1. Provozní najetí a kontinuální provoz elektrárny

Tato manipulace probíhá za neustále otevřené uzavírací klapky před turbínou a je celou dobu řízena pouze manipulací s lopatkami RK. Signál, podle kterého se bude simulace otevírat je zde na obr. 4.28.

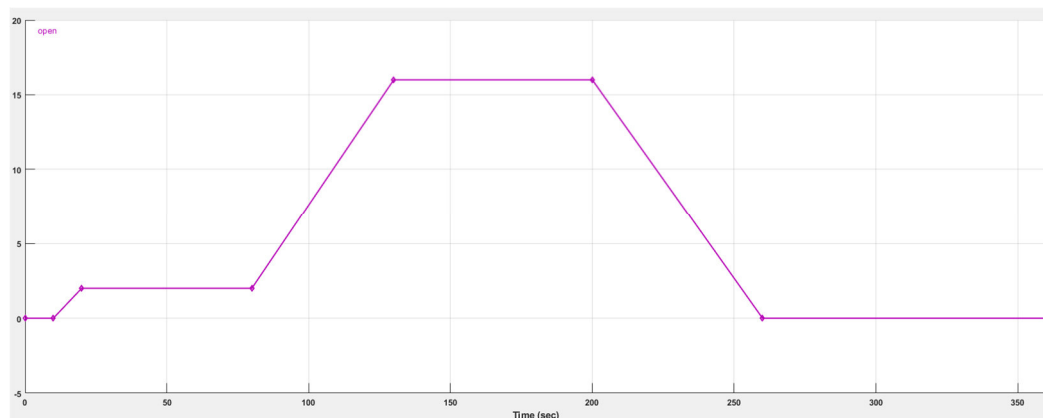


Obrázek 4.28 - Signál najetí a provoz elektrárny

Tento manipulační stav reprezentuje najetí soustrojí a jeho následný nepřetržitý provoz. Na začátku simulace jsou lopatky v plně zavřeném stavu, průtok přes turbínu je  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ . V čase simulace  $T = 10 \text{ sec}$ . začneme pomalu otevírat RK, až na hodnotu otevření  $a = 2 \text{ mm}$  v čase  $T = 20 \text{ sec}$ . Na tomto otevření probíhá chod dalších 60 sekund během kterých dochází k postupnému najíždění soustrojí. A připojení generátoru při hodnotě 750 otáček. Od času  $T = 80 \text{ sekund}$  se začne RK otevírat až na plné otevření, ke kterému dojde v čase  $T = 130 \text{ sec}$ ., hodnota otevření  $a = 16 \text{ mm}$ . Dále model pokračuje v provozu při maximálním otevření až do konce simulace, které odpovídá čas  $T = 600 \text{ sec}$ .

#### 4.10.2. Provozní najetí a provozní odstavení

Tato manipulace představuje reálný stav najetí soustrojí do provozu na maximální otevření RK, provoz elektrárny a následné provozní odstavení soustrojí. Klapka před turbínou zůstává v plně otevřeném stavu po celou dobu této simulace. Je povoleno připojení generátoru, ke kterému dojde při 750 otáčkách. V průběhu této simulace je manipulováno pouze s lopatkami RK. Nejprve dojde k najíždění soustrojí, které je stejné jako v předchozím stavu, po maximálním otevření RK simulace pokračuje dalších 70 sekund, potom dojde k pozvolnému zavírání RK a odstavení soustrojí. Zavírání trvá 60 s. během kterých dojde k plnému uzavření RK a snížení průtoku přes turbínu na  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při poklesu otáček dojde také k automatickému odpojení generátoru. Manipulační signál RK pro tuto simulaci je na obrázku 4.29.



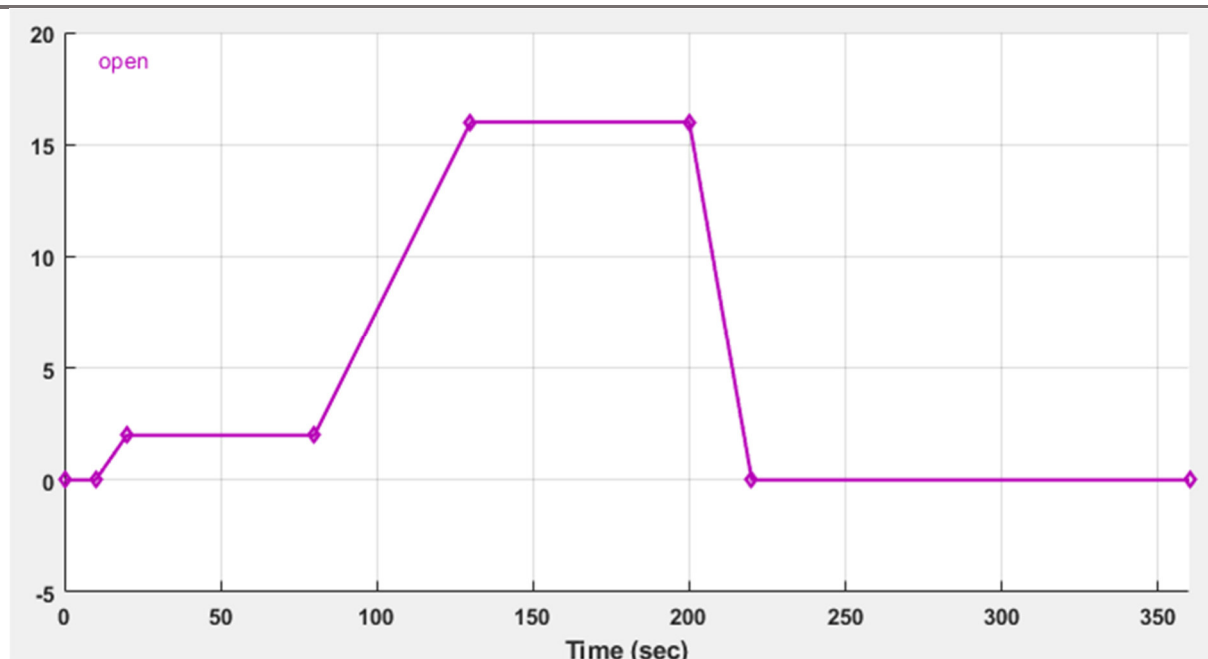
Obrázek 4.29 - Signál provozního najetí a odstavení soustrojí

#### 4.10.3. Provozní najetí a havarijní odstavení

V reálném případě by k takovéto manipulaci došlo, pokud by se při provozu elektrárny objevil nějaký problém, a obsluha by byla nucena elektrárnu nouzově odstavit.

Tato manipulace je velmi podobná manipulaci předchozí, s tím rozdílem, že při zavírání nedochází k pozvolnému odstavení soustrojí, ale je zde nasimulováno nouzové odstavení. Toho je docíleno pomocí rychlejšího zavírání RK. Z plně otevřeného stavu se lopatky RK zavřou na hodnotu 0 mm která také odpovídá nulovému průtoku přes turbínu během 20 s. Na obr. 4.30 vidíme signál pro manipulaci RK tohoto průběhu, pokud ho porovnáme s předchozím stavem uvidíme rozdíl strmosti v zavírání RK, která je u tohoto případu vyšší.



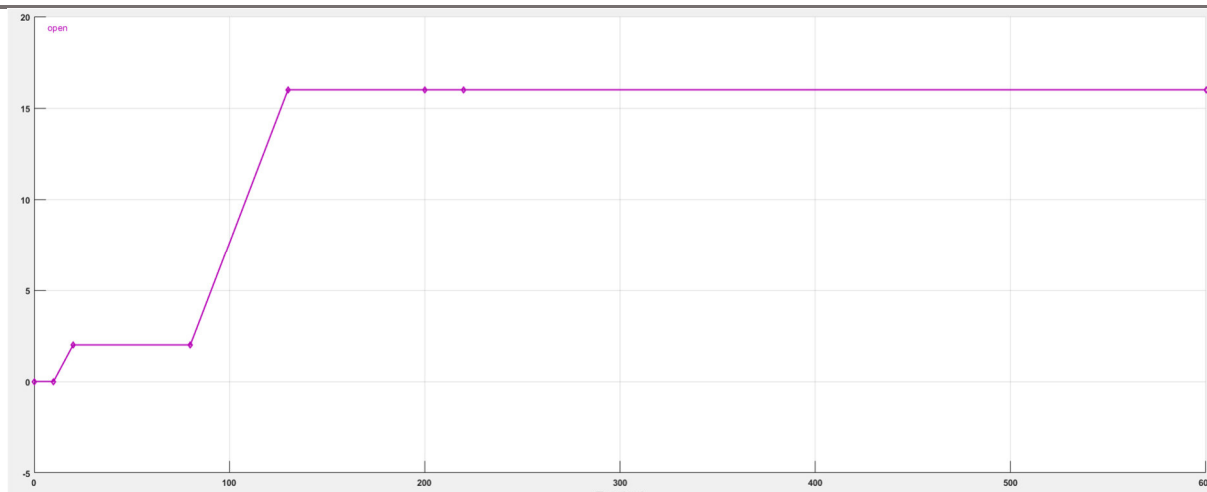


Obrázek 4.30 - Signál provozního najetí a havarijního odstavení soustrojí

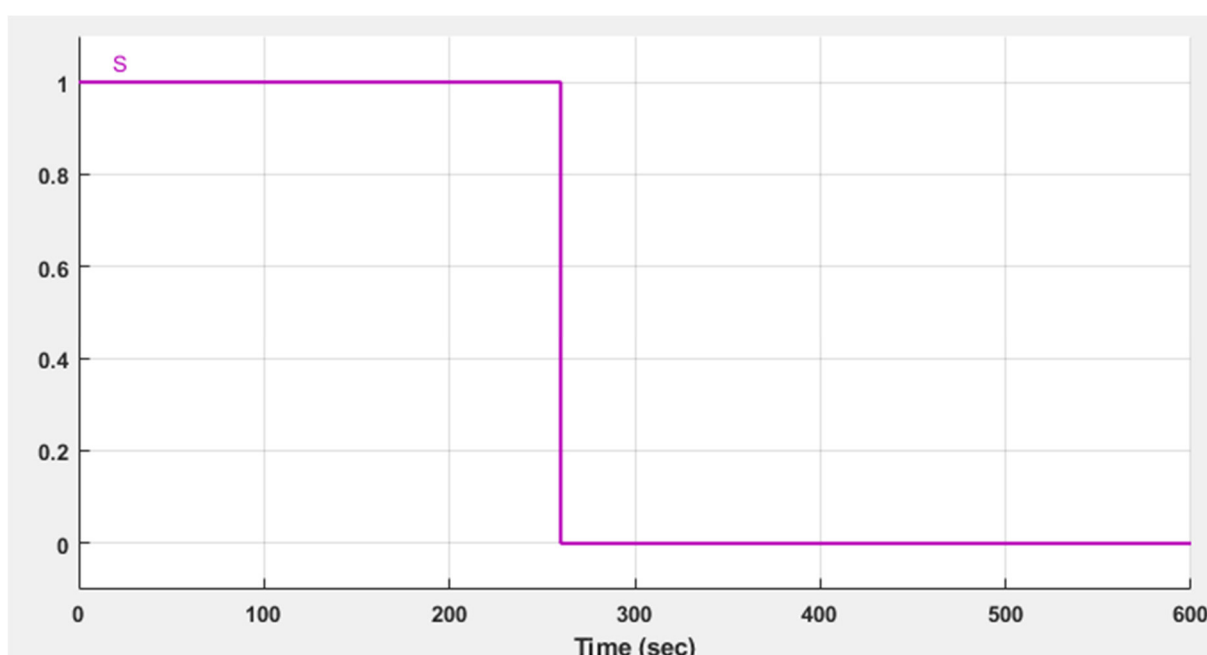
#### 4.10.4. Trip generátoru za chodu bez další manipulace

Při tomto manipulačním scénáři simulujeme nejprve provozní najetí soustrojí až na maximální otevření RK, následný výpadek elektrické sítě, odpojení generátoru a vystoupaní otáček na průběžnou hodnotu. V reálném provozu je tento scénář méně pravděpodobný, při výpadku generátoru by došlo k zahájení odstavení soustrojí. Tato situace by mohla nastat kdyby selhalo zavírání RK, klapka před turbínou, nebo pokud by udělala obsluha elektrárny zásadní chybu v manipulaci. Tento stav simulujeme, abychom zjistili více o chování elektrárny při výpadku generátoru a následného provozu na průběžných otáčkách turbíny.

Celý průběh simulace probíhá opět s plně otevřenou uzavírací klapkou před turbínou. Nejprve je provedeno najíždění soustrojí až do plného otevření RK. Následně RK zůstává plně otevřeno až do konce simulace viz obr. 4.31, dále dojde k odpojení generátoru v 260 s. Signál pro odpojení generátoru je na obr. 4.32, kde hodnota 1 odpovídá stavu „připojeno“ a hodnota 0 stavu „odpojeno“. Tento čas pro odpojení generátoru je vybrán úmyslně, protože zde dochází k nejvyšší hodnotě tlaku při provozu, který kolísá kvůli „houpající“ se hladině ve vyrovnávací komoře.



Obrázek 4.31 - Signál RK - trip generátoru při plné zátěži



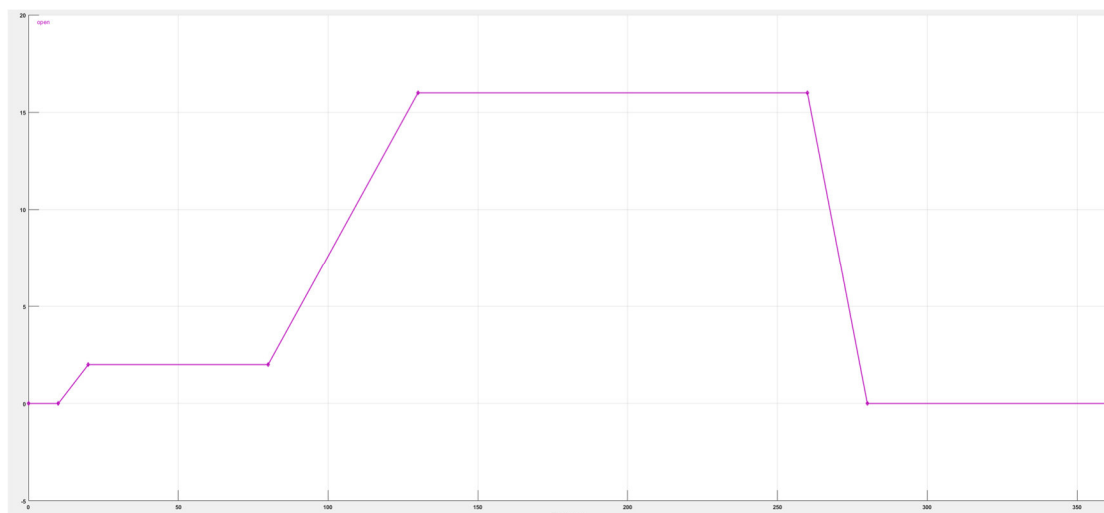
Obrázek 4.32 - Signál připojení generátoru - trip při plné zátěži

#### 4.10.5. Trip generátoru a havarijní odstavení

Manipulace tohoto typu by při reálném provozu vodní elektrárny mohla nastat, v případě, že by došlo k odpojení generátoru, a obsluha elektrárny by ihned přešla k odstavení soustrojí. Nouzové odstavení by bylo provedeno rychlým zavíráním RK až do úplného uzavření.

V tomto modelu je při celé simulaci opět uzavírací klapka před turbínou celou dobu v plně otevřeném stavu a je manipulováno s lopatkami RK a s připojením generátoru. Na začátku simulace dojde k najetí soustrojí a připojení generátoru jako v předchozím scénáři. Následně pak v čase simulace  $T = 260$  s dojde k odpojení generátoru. Tento čas byl vybrán záměrně,

z důvodu, že zde dochází ke zvýšení tlaku, který při provozu elektrárny kolísá kvůli hladině vody ve vyrovnávací komoře, stejně jako v předchozím manipulačním stavu. Po odpojení generátoru dojde ke zvýšení otáček a ihned se začíná zavírat RK. Manipulaci s RK lze vidět na obr. 4.33 a odpojení generátoru na obr. 4.32 u předchozího manipulačního stavu, jelikož je tento signál pro oba tyto stavy stejný.

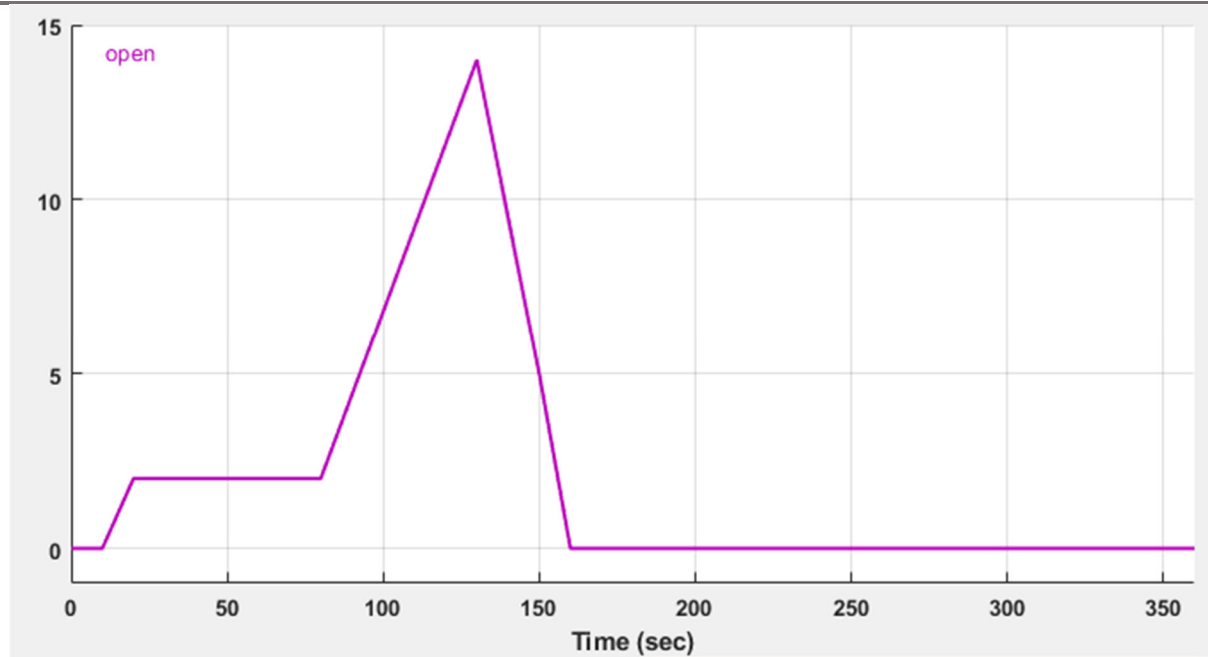


Obrázek 4.33 - Signál RK - Trip generátoru a havarijní odstavení soustrojí

#### 4.10.6. Havarijní odstavení při najíždění

Jedná se o velmi málo pravděpodobný stav, který by při provozu skutečné elektrárny nastal. Tento průběh je zde vytvořen, protože se jedná o atypický stav, který je velmi odlišný od předchozích simulačních stavů.

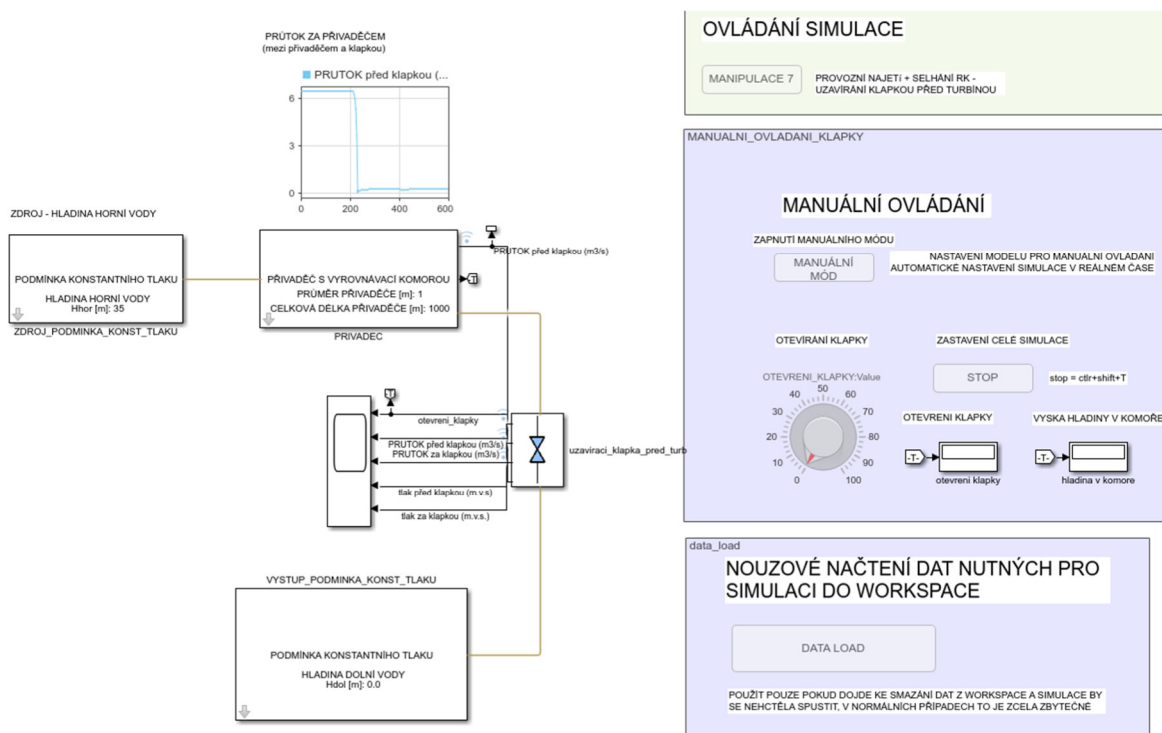
Při této simulaci nejprve dojde k otevření RK na hodnotu 2 mm, roztočení oběžného kola turbíny a připojení generátoru. Následně začne postupné otevírání RK a zvyšování kroutícího momentu na hřídeli. Těsně před dosažením plného otevření RK dojde k náhlé změně manipulace a zahájení odstavení soustrojí. Signál manipulace s RK pro tuto simulaci je na obrázku 4.34.



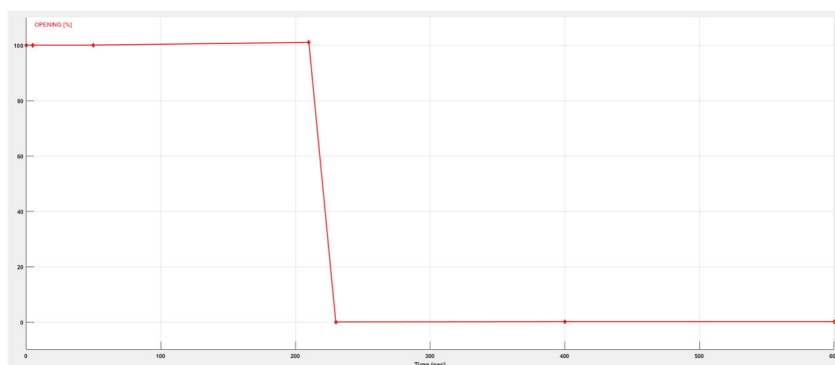
Obrázek 4.34 - Signál odstavení soustrojí při jeho najíždění

#### 4.10.7. Selhání zavírání RK a následné havarijní odstavení uzavírací klapkou

Toto je velmi málo pravděpodobný stav, který by mohl nastat, pokud by došlo k poruše na RK, a muselo by dojít k zastavení průtoku turbínou pomocí zavření klapky. Zároveň je tento stav velmi těžké simulovat tímto modelem, protože se touto manipulací dostáváme za hranici charakteristik, na kterých funguje turbína v tomto modelu. Kvůli tomu výsledky dějů kolem turbíny nemusí být odpovídající. Výsledky turbíny ale nejsou při tomto stavu důležité, pokud by došlo k tomuto manipulačnímu stavu na elektrárně turbína zde již nehraje roli, působila by zde jen jako místní ztráta, a postupně by po uzavření klapky a snížení průtoku na  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  setrvačností doběhla. Při tomto stavu jsou pro nás mnohem zajímavější děje, které se dějí těsně nad klapkou, ve vysokotlakém přivaděči, nízkotlakém přivaděči a ve vyrovnávací komoře. Proto by pro simulaci bylo vhodné použít druhý model, který jsem vytvořil a slouží pro simulaci pouze tohoto stavu. Je totožný s tímto modelem, s rozdílem, že zde není turbína. Což vzhledem k nezajímavosti dění kolem turbíny lze bez problému udělat, aniž by jsme přišli o důležité výsledky, které od této simulace požadujeme. Na zjednodušeném modelu se prezentují výsledky, které nás zajímají nejvíce a to: hodnoty těsně nad uzavírací klapkou, v přivaděči a vyrovnávací komoře. Sledujeme zde primárně hydraulický ráz a tlak který vzniká v jednotlivých částech. Tento model je na obr. 4.35, a manipulace s klapkou zobrazena na obr. 4.36.

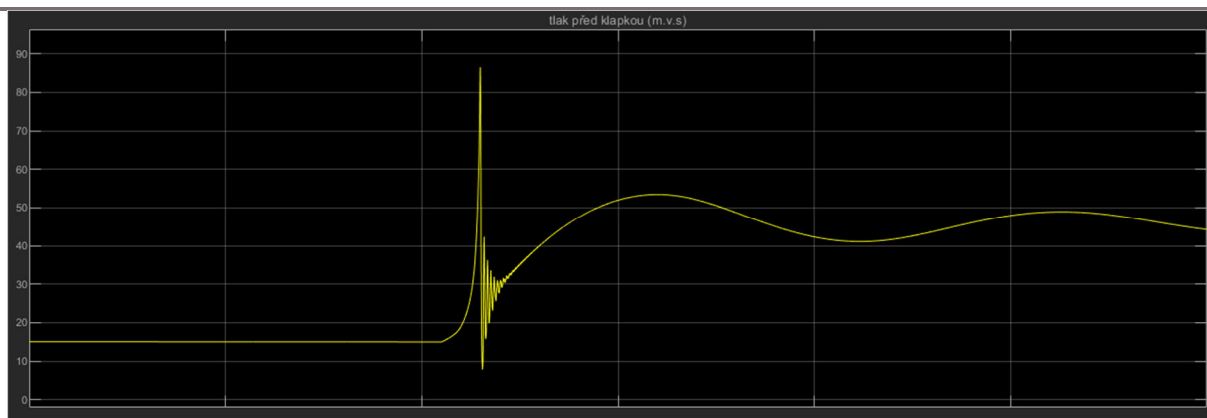


Obrázek 4.35 - Model pro simulaci odstavení pomocí klapky před turbínou



Obrázek 4.36 - Signál manipulace klapkou při havarijním odstavení

Při simulaci tohoto modelu však nedochází k tak velkému hydraulickému rázu jako při havarijním odstavení turbíny manipulací RK, který budu prezentovat v kapitole 5, protože charakteristika klapky je nastavena na jemnější uzavírání a i při úplném zavření zde zůstává průsak klapkou, který je nutné zachovat, aby výpočetní program byl tuto simulaci schopen řešit. Tlakový průběh simulace tohoto modelu je zobrazen na grafu 4.2.



Graf 4.2 - Tlak před klapkou při nouzovém zavírání

#### 4.11. Zobrazení výsledků modelu

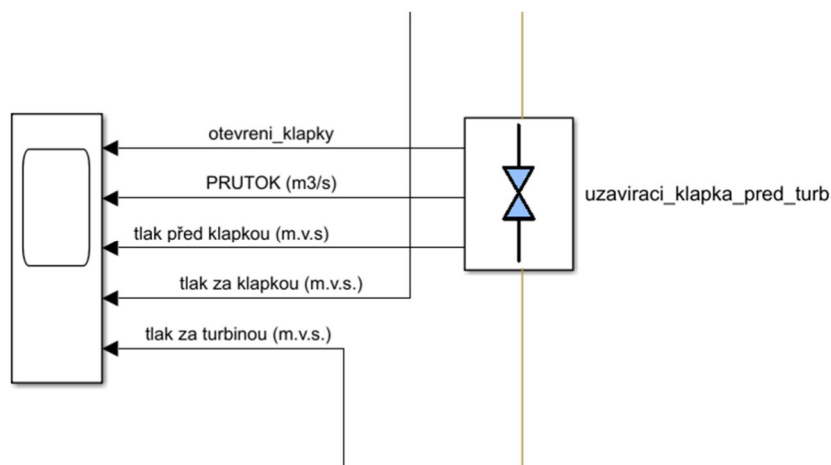
Model je sestaven tak, aby dokázal zobrazit a předat uživateli co nejvíce důležitých výsledků a stavů, které při simulaci nastávají. Zobrazení výsledků lze provést několika způsoby. Zároveň si lze data ze simulace uložit pro pozdější rozbor a inspekci.

##### 4.11.1. Výsledky přímo v modelu

Pro zobrazení výsledků v modelu je většinou více možností. Uživatel si tedy může vybrat jak a kde chce na jednotlivé výsledky nahlížet, samotná data jsou však totožná a nijak se neliší.

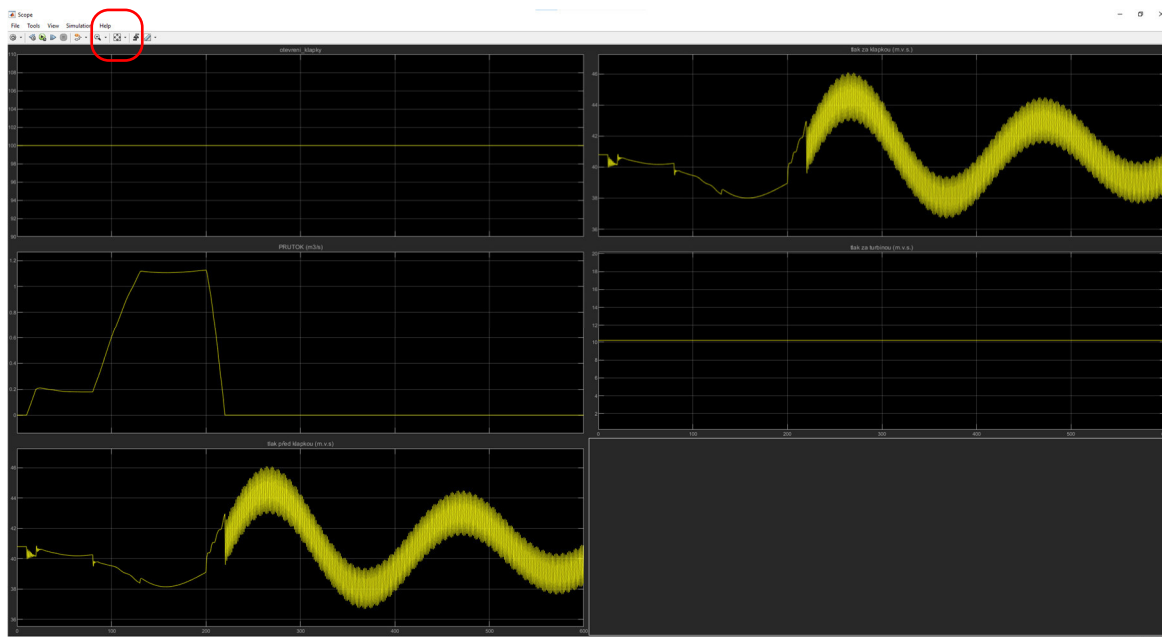
Vybrané výsledky se zobrazují rovnou na pracovní ploše (obr. 4.17 v kapitole 4.8) v blocích jednotlivých grafů, které jsou napojeny na signál dat která mají vykreslovat. Práce s těmito grafy je ale omezená a možnosti inspekce dat simulace jsou zde téměř nulové, proto se jedná spíše o hrubou představu průběhu simulace.

Další možností jak si zobrazit požadovaná data, je prostřednictvím Simulink bloků „Scope“ (příklad tohoto bloku pro zobrazení výsledků snímaných kolem uzavírací klapky obr. č. 4.37)



Obrázek 4.37 - Simulink blok Scope

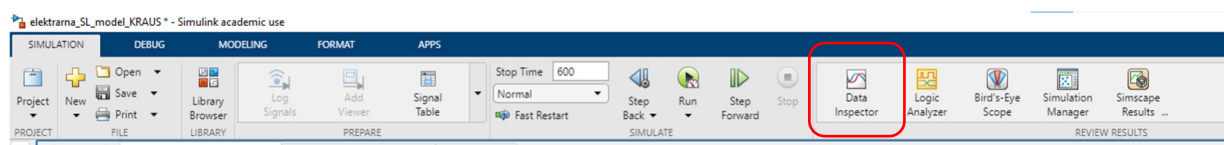
Tento blok lze dvojklikem otevřít, a zobrazí se přednastavená konfigurace grafů, které zobrazují data, která do tohoto bloku vstupují viz obr. 4.38.



Obrázek 4.38 - Příklad zobrazení výsledků pomocí simulink bloku scope

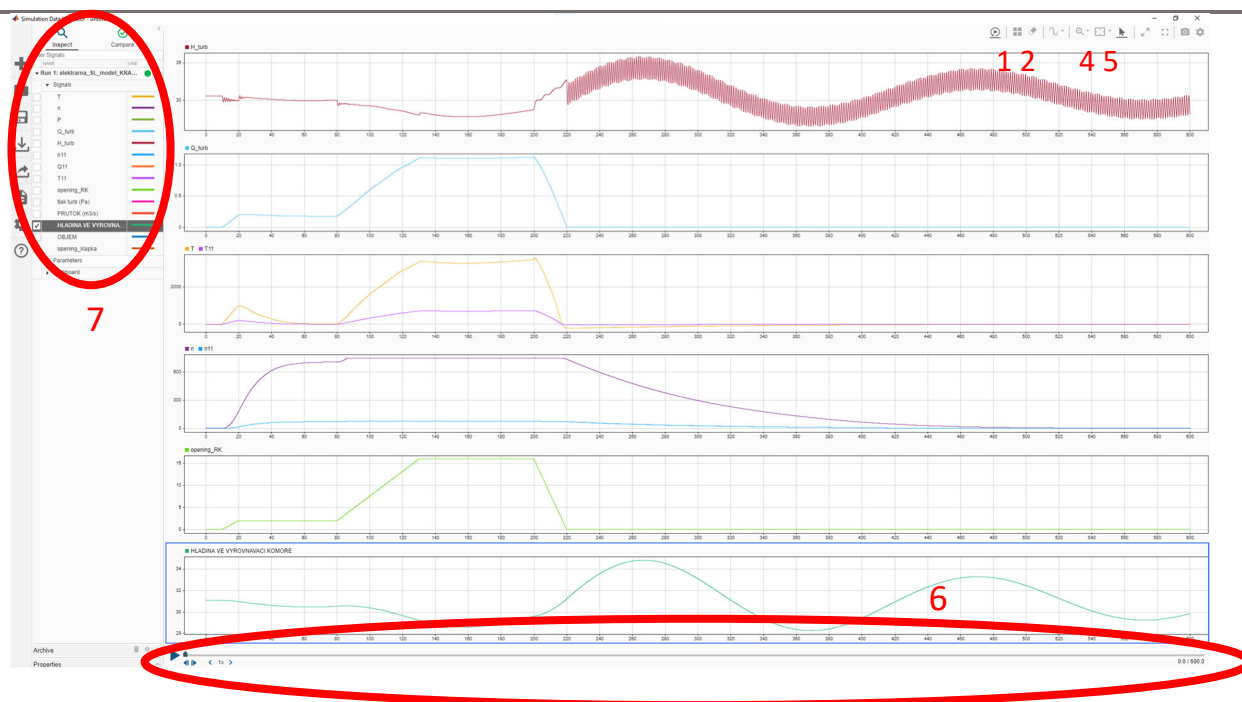
Pokud by na jednotlivých grafech data přesahovala rozmezí a nebyli by vidět celé, nebo naopak byli příliš malé stačí v tomto okně kliknout nahoře na znak se šipkami na všechny strany vyznačen na předchozím obrázku. Tím dojde k přizpůsobení dat celé zobrazované ploše grafu.

Další možnost, jak zobrazit a následně dále analyzovat data ze simulace, je otevření aplikace Simulinku „Data inspector“. Tuto aplikaci můžeme najít v horním pásmu karet, v záložce simulace v okně „REVIEW RESULTS“ viz obr. 4.39.



Obrázek 4.39 - Spuštění Simulink aplikace Data inspector

Okno této aplikace se otevře také automaticky po skončení simulace. Tato aplikace slouží pro inspekci jednotlivých dat, i velmi detailních parametrů každého bloku v simulaci. Rozvržení okna této aplikace je na obr. 4.40.



Obrázek 4.40 - Zobrazení Simulink aplikace Data inspector

Pod číslem 1 je zapínání časového posuvníku, který je umístěn v nejspodnější části tohoto okna (č. 6). Tento posuvník umožňuje pohybovat se v čase simulace a zobrazuje konkrétní hodnoty u zobrazovaných dat. Tlačítkem číslo 2 si lze přidávat další okna pro zobrazení grafů (při prvním spuštění se data inspektor spouští v rozvržení pouze s 1 oknem). Tlačítkem u č. 5 přizpůsobíme zobrazovaná data velikosti našich oken, tak aby byli dobře vidět. V sekci označené číslem 7 najdeme všechny parametry, se kterými simulace pracovala. Vykreslíme je na pracovní plochu tak, že klikneme do okna grafu, do kterého chceme naše data vykreslit, potom najdeme v sekci se všemi daty požadovanou veličinu a zaškrtnutím políčka u dané veličiny se vykreslí do předem zvoleného okna.

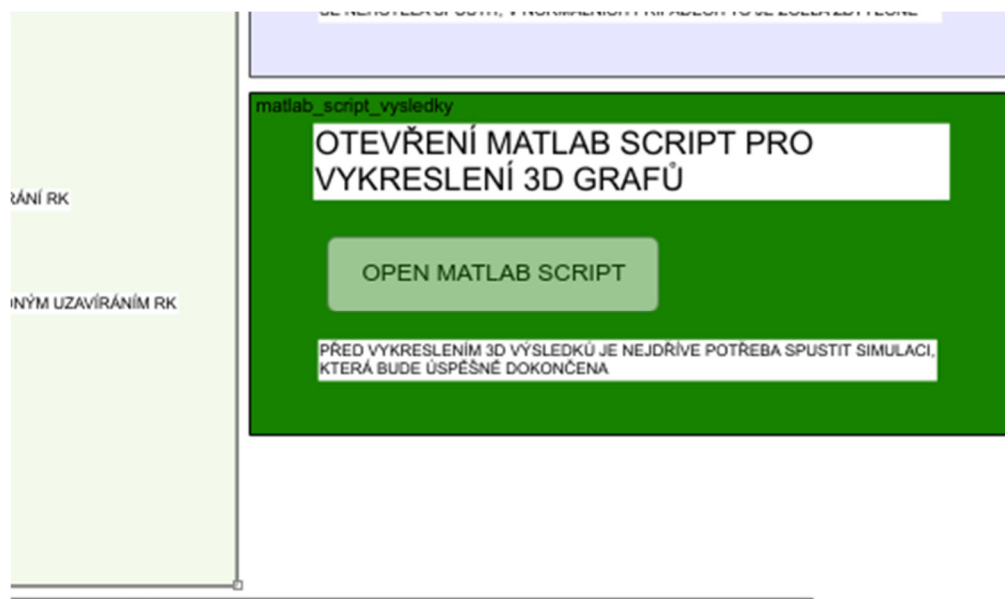
#### 4.11.2. Vykreslení výsledků pomocí MATLAB Scriptu

Vykreslování složitějších výsledků, které by bylo neefektivní vykreslovat přímo v aplikaci Simulink, probíhá pomocí MATLAB Scriptu. Jedná se především o vykreslení jednotlivých charakteristik turbíny a průběhu po nich během simulace.

Otevření MATLAB souboru pro vykreslení těchto výsledků je také velmi jednoduché, stačí kliknout na tlačítko *OPEN MATLAB SCRIPT* viz obr. 4.41. Dojde k otevření MATLAB Scriptu, ten potom stačí spustit tlačítkem run nahoře v pásu karet. Před spuštěním je pouze potřeba aby byla dokončena úspěšná simulace Simulink modelu elektrárny, jinak by výpočetní



výpočetní script neměl dostatek dat na zpracování výsledků a objevila by se varovná hláška o chybějících datech.



Obrázek 4.41 - Otevření MATLAB Script pro vykreslení výsledků

Pokud by z nějakého důvodu nedošlo při stisknutí tlačítka k otevření souboru, doporučuji zkusit tuto možnost ještě jednou, pokud by problém stále přetrvával je možné tento soubor otevřít manuálně, a to dvojklikem na zdrojový soubor, viz obr. 4.42.



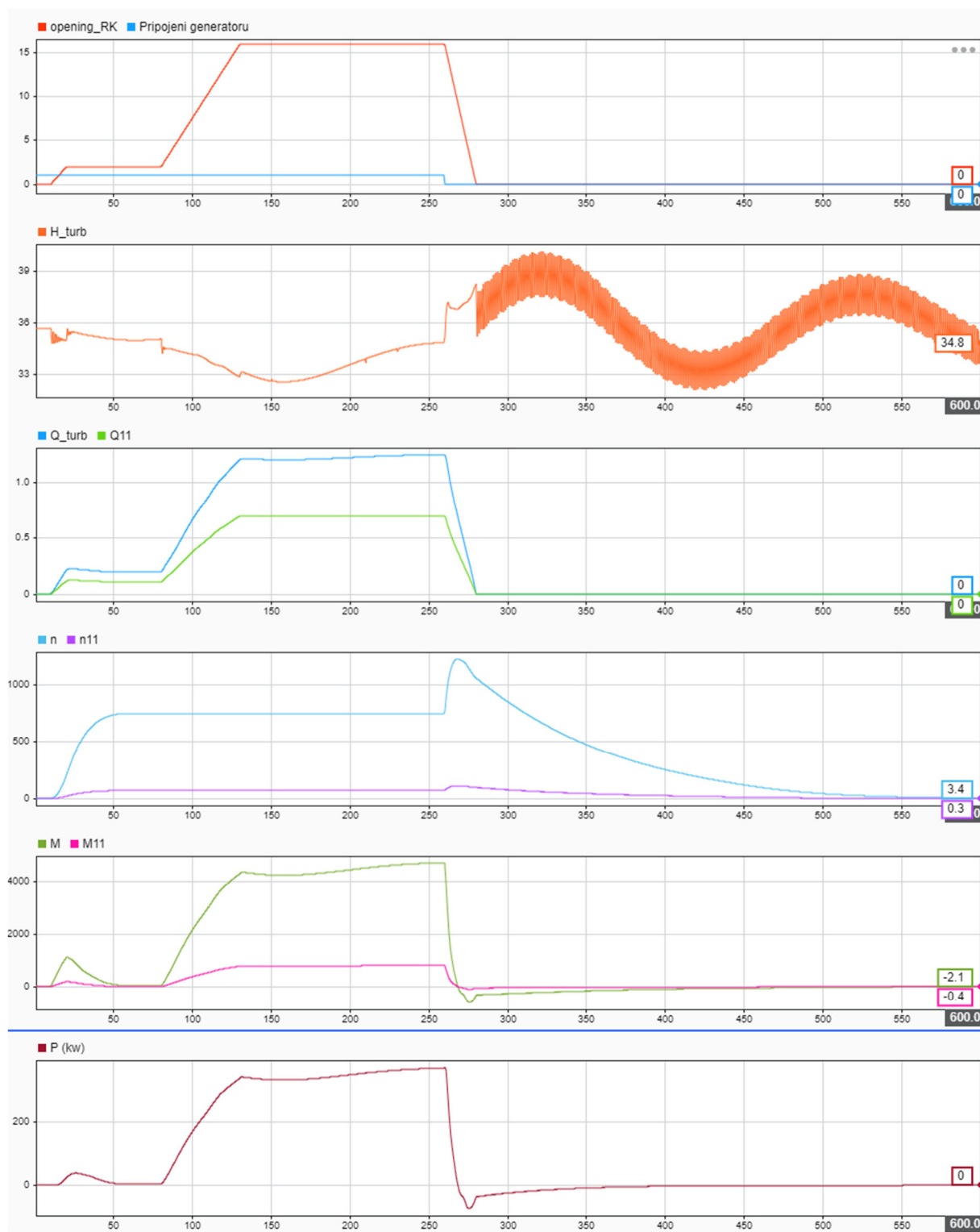
Obrázek 4.42 - Matlab soubor pro vykreslení výsledků

## 5. VÝSLEDKY SIMULACÍ MODELU

Vzhledem k množství výsledků, které tento modelu generuje budu prezentovat výsledky pouze na manipulačním stavu č. 6, kterým je trip generátoru a následné havarijní odstavení turbíny pomocí zavírání RK. Tento manipulační stav jsem zvolil, protože zde dochází k největším extrémům a je nejkritičtější. V tomto manipulačním případě je manipulace s RK shodná se stavy, kde dochází k najíždění soustrojí, provozu a nouzovému odstavení, ale je tu navíc trip generátoru. Díky tomu lze na této simulaci ukázat nejvíce jevů, které na elektrárně mohou nastat. Princip zobrazení výsledků tohoto manipulačního případu je plně použitelný na ostatní manipulační stavy.

## 5.1. Základní výstupy z modelu

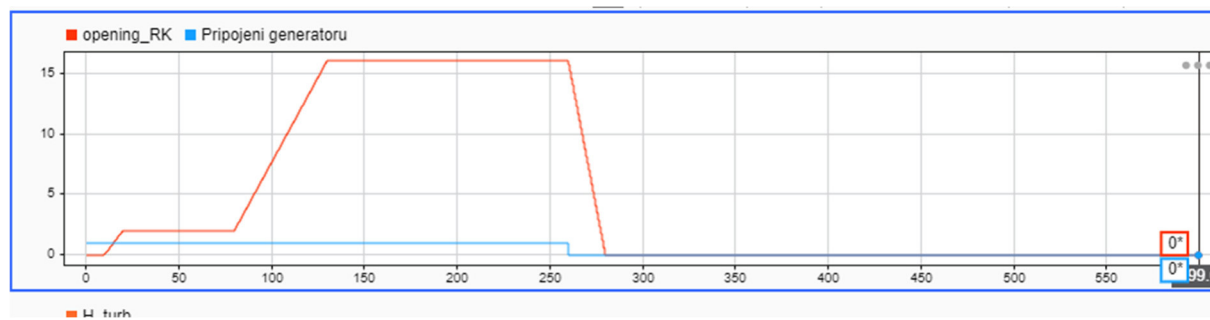
Tyto výsledky budu prezentovat pomocí zobrazení v Simulink aplikaci Data inspector (Graf 5.1), jelikož zobrazení výsledků pomocí tohoto nástroje považuji za nejpřehlednější, a dá se zde s daty dále velmi dobře pracovat a provádět jejich detailnější analýzu.



Graf 5.1 - Základní výsledky Simulink modelu

### 5.1.1. Manipulace s RK a s generátorem

V grafu 5.1 jsou vykresleny základní hodnoty, které vznikají v průběhu simulace na turbíně a generátoru. Od shora na prvním grafu můžeme vidět vykreslenou manipulaci s lopatkami RK, označenou jako „opening RK“ v milimetrech a signál, který určuje zdali se bude připojovat generátor označen jako „Připojení generatoru“ (obr. 5.2). Na průběhu tohoto signálu můžeme vidět, že v časovém rozmezí  $t = 10\text{--}20$  s. začne otevírání RK, v první fázi se otevře na hodnotu 2,0 mm, která zůstane konstantní v časovém intervalu  $t = 20\text{--}80$  sekund, během kterých dochází k najíždění soustrojí, k postupnému růstu otáček a k připojení generátoru, ke kterému dojde v čase 54,5 s., jakmile turbína dosáhne 750 otáček na hřídeli, na které je připojení nastaveno. V čase  $t = 80$  s. začne postupné otevírání RK a zatěžování soustrojí. Plně otevřeného stavu je dosaženo v čase  $t = 130$  s. Otáčky se již dále nezvyšují a zůstávají na hodnotě 750, protože turbína je již připojena k synchronnímu generátoru. Dochází ale k postupnému zvyšování průtok přes turbínu, růstu kroutícího momentu na hřídeli a zvyšování výkonu generátoru. Dále v časovém rozmezí  $t = 80\text{--}160$  vteřin je elektrárna provozována na plný výkon (330-370 kW) při plném otevření RK. V čase  $t = 260$  s. dojde k odpojení generátoru, a ihned na to k havarijnímu (rychlému) uzavírání RK, ke kterému dojde v čase  $t = 280$  s., v plném uzavření zůstává až do konce simulace ( $t = 600$  s.).



Graf 5.2 - Průběh otevírání RK a připojení generátoru při simulaci

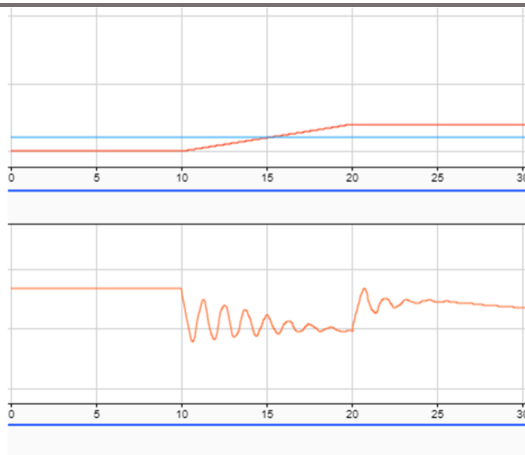
### 5.1.2. Tlakový průběh

V druhém okně na grafu č. 5.1 shora, je vykreslen průběh tlakového spádu na turbíně během simulace v m. v. s.

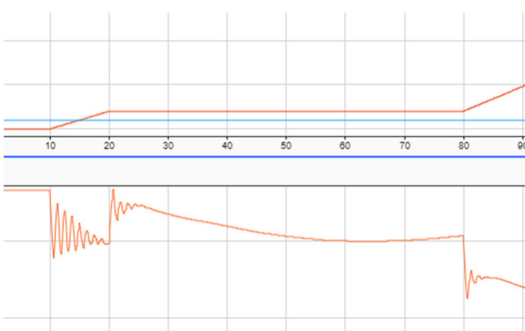
Při zahájení manipulace v čase  $t = 10$  s. vidíme že dochází ihned k poklesu tlaku, který se mění na rychlostní výšku proudění vody. Dále je vidět, že zde dochází k tlakovému rázu v přivaděči (obr. 5.1 – snižující se vlnění s pravidelnou frekvencí), tlakový ráz vzniká při manipulaci s RK a podrobněji se jím budu zabývat v další části.

V čase  $t = 20-80$  s. vidíme zlehka klesající čáru s mírným prohnutím, i když je po celou dobu otevřeno RK na konstantní hodnotu (obr. 5.2). K tomu dochází kvůli kolísání hladiny ve vyrovnávací komoře.

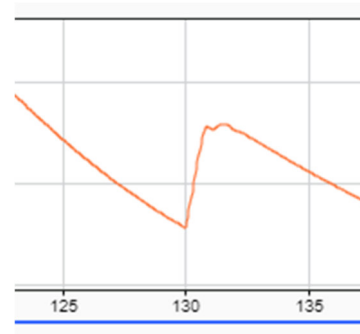
Při zahájení další manipulace v čase  $t = 80$  s., vidíme nejprve tlakový skok (ke kterému dochází kvůli zvětšení průtoku a rychlosti proudění), následovaný opět hydraulický rázem vzniklým z manipulace s RK. V následujícím úseku se lopatky RK otevírají naplno, což se na tlakové čáře projevuje opět dalším poklesem. Zastavení dalšího otevírání RK způsobilo skok na tlakové čáře v čase  $t = 130$  s. se vznikem mírného tlakové rázu (obr. 5.3)



Obrázek 5.1 - Tlakový ráz - začátek simulace

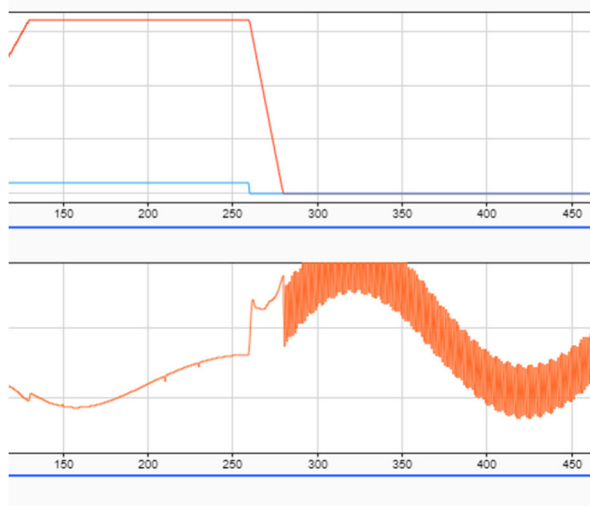


Obrázek 5.2 - Tlakový průběh  $t = 20-80$ s.í



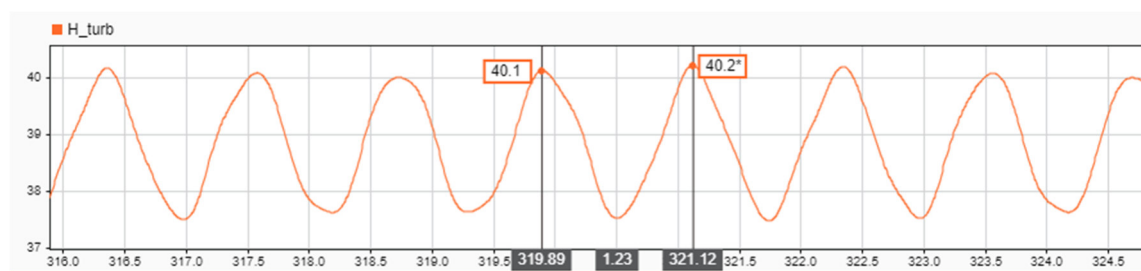
Obrázek 5.3 - Tlakový průběh  $t = 130$  s.

Následuje provoz turbíny při konstantním otevření Rk, při kterém na tlakové čáře opět vidíme značný výkyv s průběhem sinusového tvaru. Tento výkyv je opět způsoben kolísáním hladiny ve vyrovnávací komoře (obr. 5.4 , t = 130-260 s.). Jakmile dojde k odpojení generátoru a zavírání RK (obr. 5.4 , t = 260 s.), vidíme prudké zvýšení tlaku, a následné nepravidelné narůstání v době, kdy dochází k rychlému zavírání RK (obr. 5.4 , t = 260-280 s.). Při kompletním uzavření RK v čase t = 280 s.



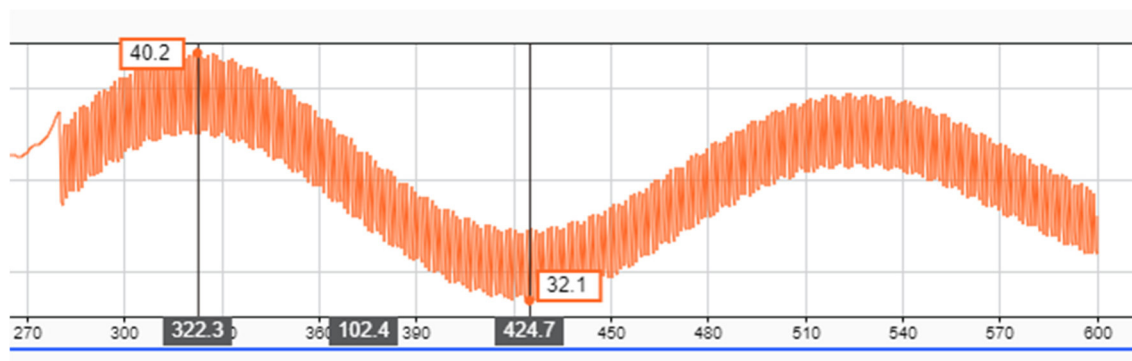
Obrázek 5.5 - Tlakový průběh t = 130 - 450 s.

vidíme vznik velkého hydraulického rázu v přivaděči. Při detailnějším přiblížení vidíme na obrázku č. 5.6 frekvenci tlakového rázu o délce 1,23 s., který putuje přivaděčem od turbíny.



Obrázek 5.4 - Tlakový ráz při havarijním uzavření RK - detail

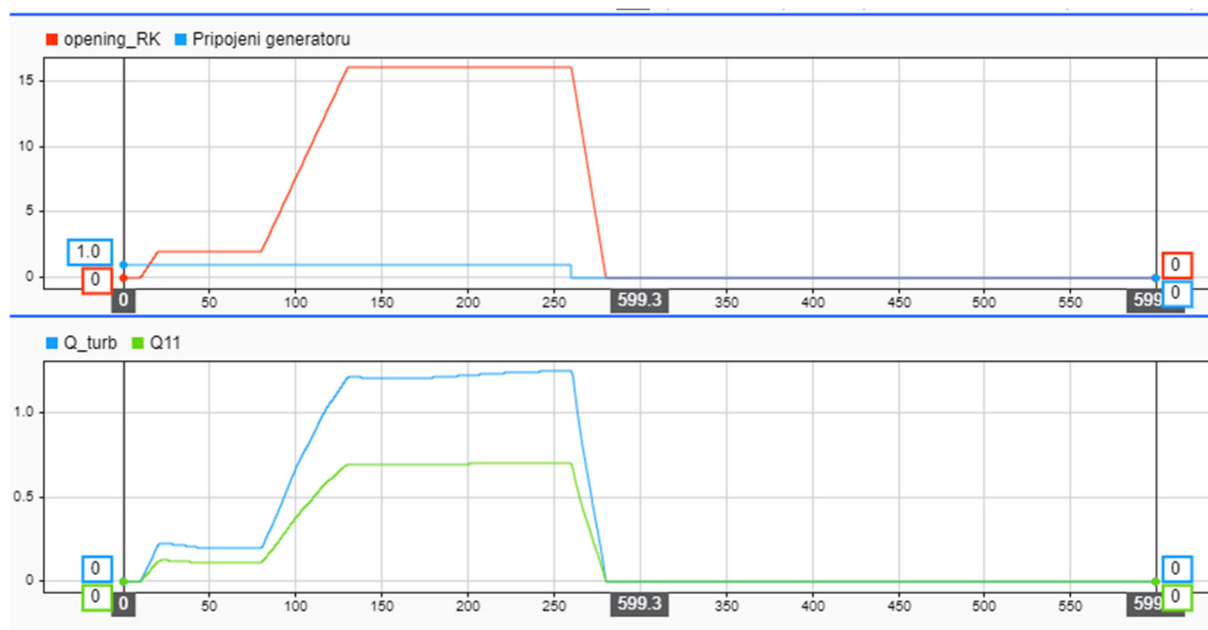
Další jev, který zde pozorujeme je vyšší tlakové kolísání s nízkou frekvencí „ velká vlna“ vyznačená na obr. 5.5, s nejvyšší hodnotou 40,2 m. v. s. a nejnižší 32,1 m. v. s. Tento výkyv je způsoben kolísáním hladiny vody ve vyrovnávací komoře, která je rozhýbána právě rychlým uzavřením RK a vznikem většího tlakového rázu.



Obrázek 5.6 - Tlakový ráz při havarijním uzavření RK

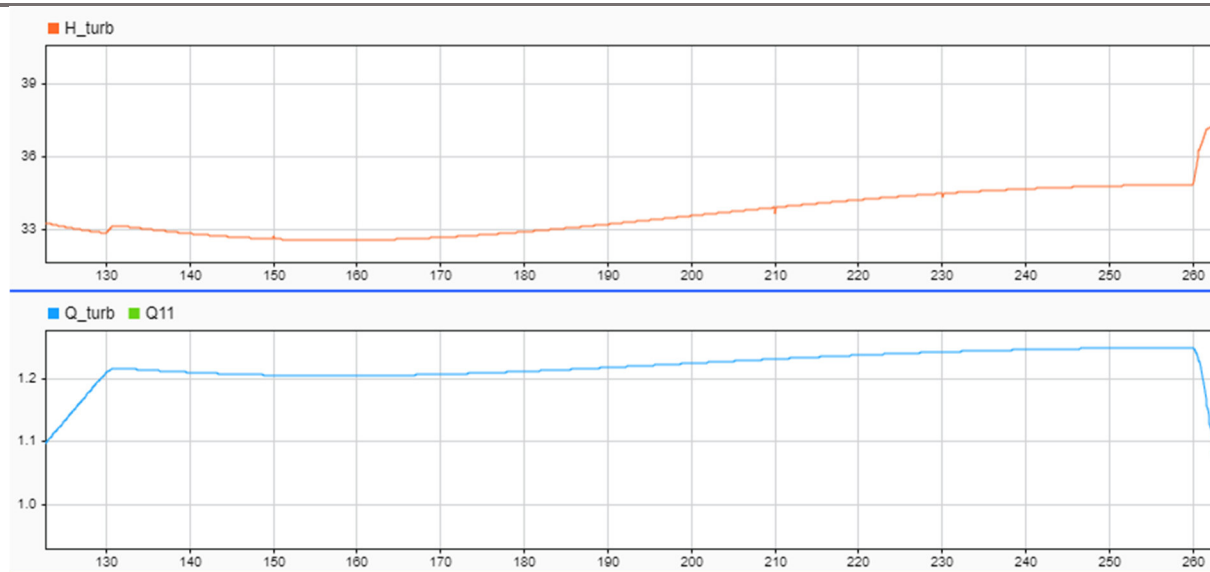
### 5.1.3. Průběh průtoku turbínou

Graf s průtokem turbínou se nachází v 3. okně od shora v grafu 5.1 a je zde vykreslen jednotkový průtok označen jako „Q11“ v  $\text{m}^3/\text{s}$  vycházející z charakteristiky turbíny Q11 v závislosti na otevření  $a$  sa jednotkových otáček  $n11$ . Z průtoku „Q11“ je vypočítávám skutečný průtok turbínou se zvolenými parametry, označen jako „Q\_turb“ v  $\text{m}^3/\text{s}$ . Průběh průtoku „Q\_turb“ je tedy závislý na průběhu „Q11“, což můžeme z grafu dobře vidět (Graf 5.3 dolní okno). Průtok přes turbínou je přímo závislý na otevírání RK, které je vykresleno v grafu 5.3 v horním okně aby byla lépe patrná vzájemná závislost.



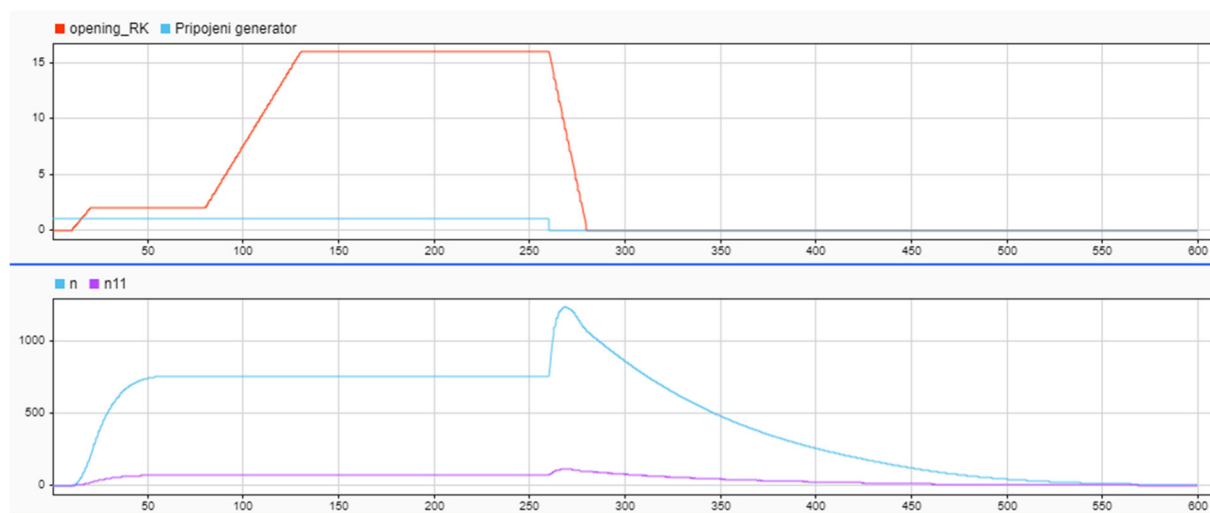
Graf 5.3 - Průběh průtoku Q a Q11 v turbíně

Na začátku simulace vidíme rychlejší nárůst průtoku, protože dochází k otevírání RK. V dalším úseku se průtok postupně ustaluje, a poté přichází další prudké zvýšení při otevírání RK na maximum. Při plném otevření RK vidíme, že dochází k dalšímu postupnému ustálení, které nemá lineární průběh. To je opět způsobeno pohybem hladiny ve vyrovnávací komoře a tím nepravidelným kolísáním tlaku. Závislost na změně tlaku a průtoku v tomto časovém úseku simulace je vykreslena v obr. 5.7. V další fázi při havarijním zavírání RK vidíme rychlé snížení průtoku až na  $0 \text{ m}^3/\text{s}$ , který tak pokračuje až do konce simulace.

Obrázek 5.7 - Průběh průtoku v úseku  $t = 120\text{--}260$  s.

#### 5.1.4. Průběh otáček

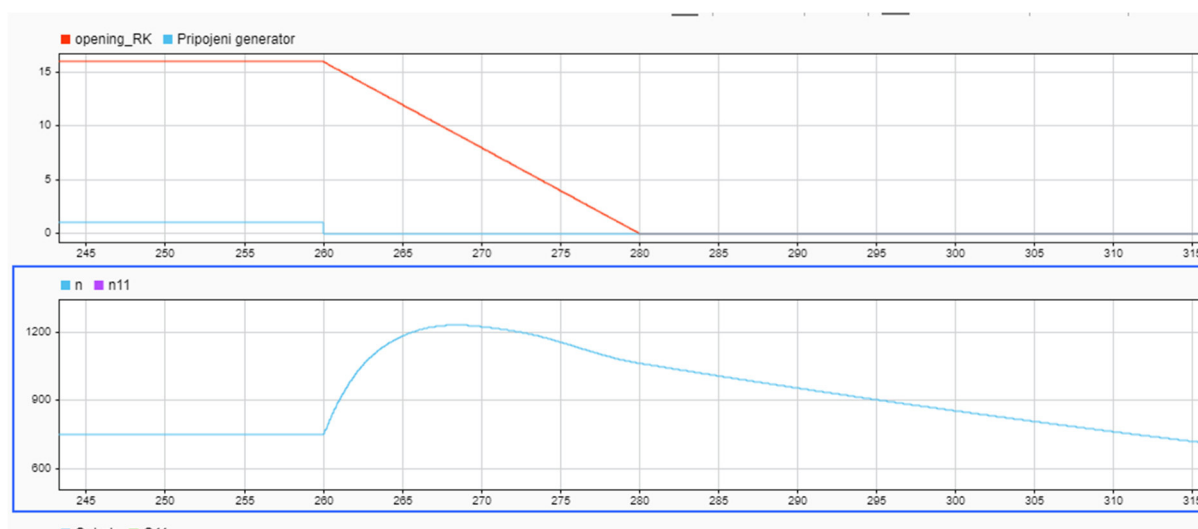
Graf s průběhem otáček najdeme na grafu 5.1 ve čtvrtém okně od shora. V tomto grafu jsou opět vykresleny oba údaje otáček, jak jednotková veličina  $n_{11}$  z charakteristiky turbíny, tak skutečná hodnota  $n$  přepočtena podle parametrů našeho modelu, obě v jednotkách 1/min. Opět zde můžeme vidět určitou závislost na otevření RK, a navíc závislost na připojení generátoru graf 5.8.



Obrázek 5.8 - Průběh otáček při simulaci

V první fázi, kdy dochází k otevírání RK a najíždění soustrojí se otáčky postupně zvyšují, tím jak se roztáčí turbína, až na hodnotu 750 zde dojde k připojení synchronního generátoru.

Ten udržuje otáčky na této hodnotě i při rostoucím průtoku, kterým dochází k nárůstu kroutícího momentu nikoliv otáček, protože je stále připojen generátor. V čase  $t = 260$  s. dojde k odpojení generátoru, a ihned dojde k rapidnímu vzrůstu otáček, který má nelineární průběh (viz. Obr. 5.9), to je způsobeno setrvačným momentem soustrojí. Ke zvyšování otáček až na maximální hodnotu tedy dochází několik sekund. Úplného maxima otáček, kterých bychom dosáhli, pokud bychom elektrárnu simulovali při plném otevření RK bez připojení generátoru zde nedosáhneme, protože než stihnou otáčky na tuto hodnotu vzrůst, projeví se rychlé uzavírání RK a rapidní snižování průtoku a tlaku. Díky tomu otáčky začínají postupně klesat.



Obrázek 5.9 - Detail průběhu otáček při simulaci v  $t = 260$  s.

Další mírný zlom můžeme v průběhu otáček vidět v čase  $t = 280$  s. kdy dojde k úplnému zavření RK. Od tohoto momentu již nic nedodává turbíně další energii, turbína se dále otáčí pouze svou setrvačností a je brzděna třecími silami. K úplnému zastavení otáčení by při tomto nastavení simulace došlo v čase  $t = 643$  s.



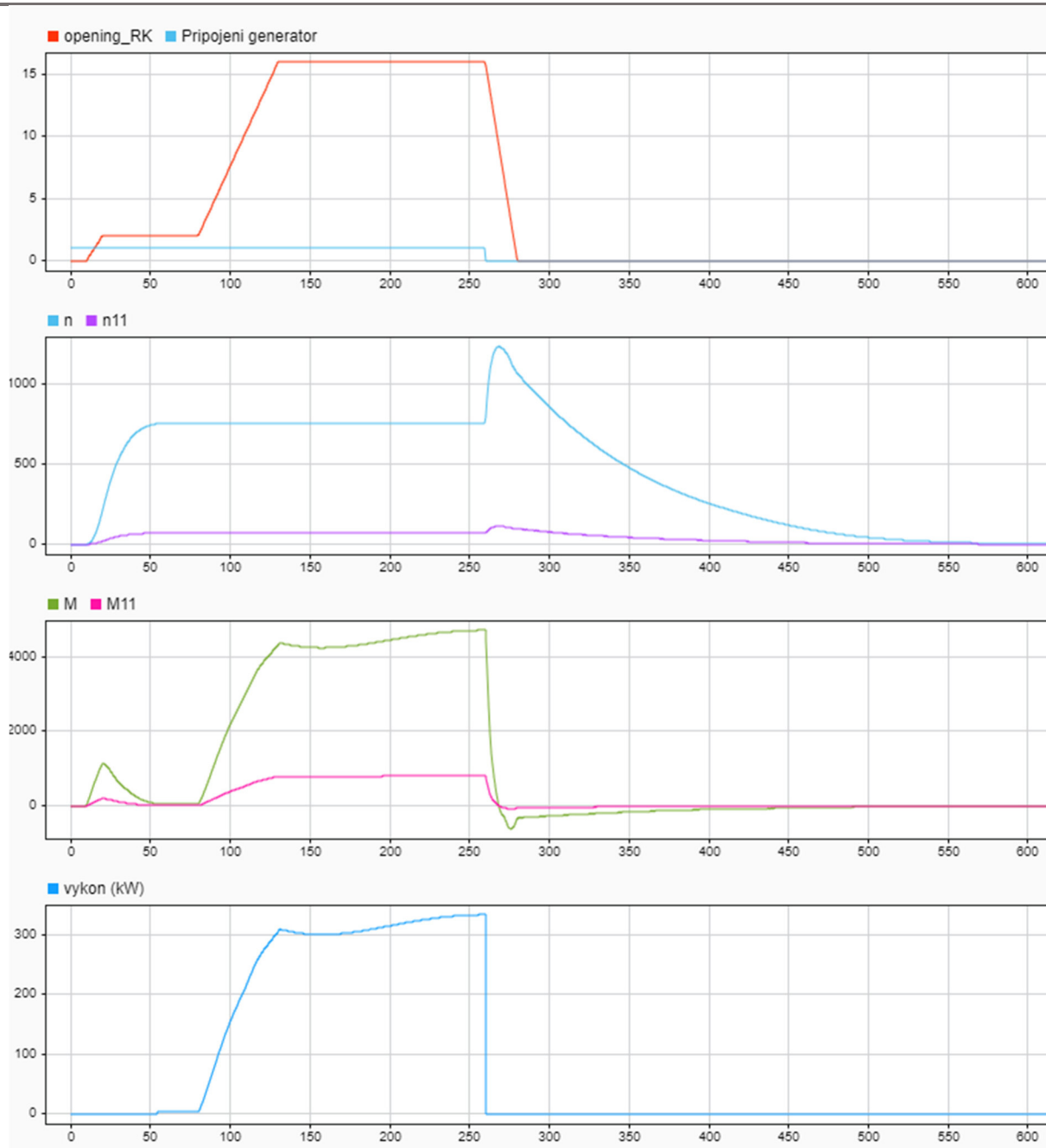
### 5.1.5. Průběh kroutícího momentu a výkonu generátoru

Výkon generátoru je závislý na kroutícím momentu, který dokáže turbína dodat. Kroutící moment je vykreslen v grafu 5.1 v předposledním a výkon generátoru v posledním okně. V okně kroutícího momentu je opět vykreslena jak jednotková hodnota  $M_{11}$  (N/m), tak hodnota přepočtená podle navolených parametrů elektrárny  $M$  (N/m). Výkon generátoru je vykreslován v (kW).

V grafu 5.4 jsou vykresleny tyto průběhy detailněji, včetně otevíracího signálu a otáček, které jsou vykresleny nad nimi, pro lepší pochopení vzájemných závislostí.

Na začátku simulace vidíme nárůst kroutícího momentu při otevírání RK a roztáčení turbíny. Jedná se o kroutící moment, který je potřeba k roztočení soustrojí z klidu na otáčky pro připojení generátoru k síti. Poté nastává pokles kroutícího momentu, jelikož již došlo k roztočení soustrojí, v čase  $t = 20-80$  s. je turbína provozována při konstantním průtoku a otevření. V tomto intervalu lze také vidět mírné zvýšení výkonu, které začíná ve chvíli, kdy se generátor připojí k síti a začne generovat proud ( $t = 55$  s.). V další fázi dochází k otevírání RK, tím se zvyšuje průtok přes turbínu. Otáčky zůstávají stále konstantní, protože je připojen generátor, ale kroutící moment i výkon roste. Tímto dochází k postupnému zatěžování soustrojí, až do se dostaneme na plné otevření RK a tím i maximální výkon.

V další fázi je turbína provozována na plný výkon v čase  $t = 130-260$  s. V tomto úseku můžeme opět pozorovat mírný průhyb průběhu jak kroutícího momentu, tak i výkonu, i když otevření RK zůstává konstantní. Tento jev je opět způsoben kolísáním hladiny ve vyrovnávací komoře a tím ovlivnění vstupního tlaku, od kterého se odvíjejí další parametry. Maximální výkon, kterého v této simulaci dosáhneme je 333 kW. Této hodnotě odpovídá maximální tlak, kterého je dosaženo v úseku provozu při maximálním otevření RK, k tomu dochází těsně před odpojením generátoru od sítě, které je nastaveno v tomto bodě ( $t = 260$  s.) záměrně. Tím že zde nastává maximální tlak je toto místo nejnepříznivější pro výpadek a vznikne zde největší tlakový ráz, a proto ho v tomto místě simulujeme.



Graf 5.4 - Průběh kroutícího momentu a výkonu při simulaci

Po odpojení generátoru v čase  $t = 260$  s. vidíme ihned snížení výkonu na 0 kW, protože odpojený generátor nemá, jak generovat další výkon do sítě. Kroutící moment se zde také rapidně sníží, protože zde přestalo působit zatížení. Kroutící moment se na rozdíl od výkonu ovšem sníží až do záporných hodnot. To dokazuje, že dále působí brzdny kroutící moment od mechanických ztrát.

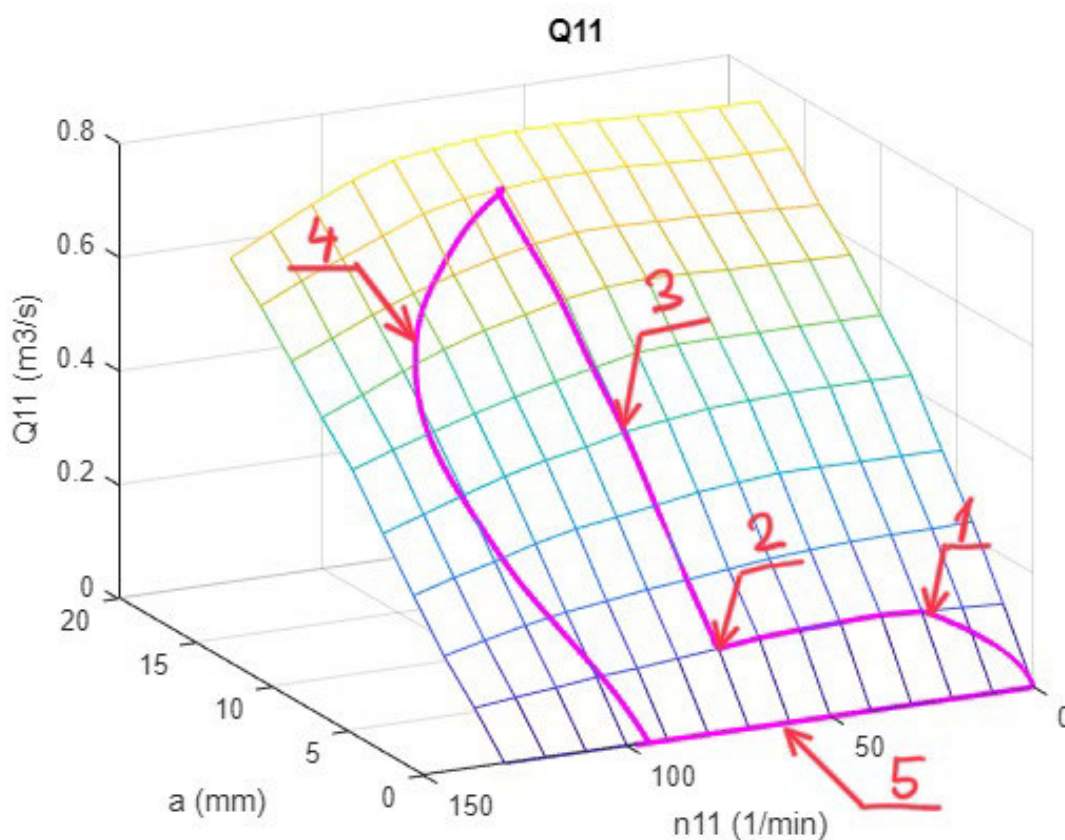
## 5.2. Charakteristiky turbíny

Tyto výsledky již nebyly zpracovávány přímo v programu Simulink, ale pomocí MATLAB Live Script. Protože software Simulink není pro takovéto zpracování dat ideální, a zpracovat tyto výsledky pomocí něj by bylo složité a značně neefektivní. V programu MATLAB bylo provedeno vykreslení jednotlivých jednotkových charakteristik turbíny, jejich transformace, následný přepočítání na charakteristiky provozní, a do obou sad vykreslení výsledků simulace.

### 5.2.1. Jednotkové charakteristiky turbíny

Jedná se o jednotkové charakteristiky, které jsou totožné s charakteristikami turbíny, která je instalována v elektrárně Plavisko. Charakteristiky, které jsou přímo zapojené v Simulink modelu v bloku turbíny jsou vykresleny v grafech 5.5 a 5.6. Na těchto charakteristikách je vykreslen daný průběh při manipulačním stavu s tripem generátoru a následným havarijním odstavením soustrojí.

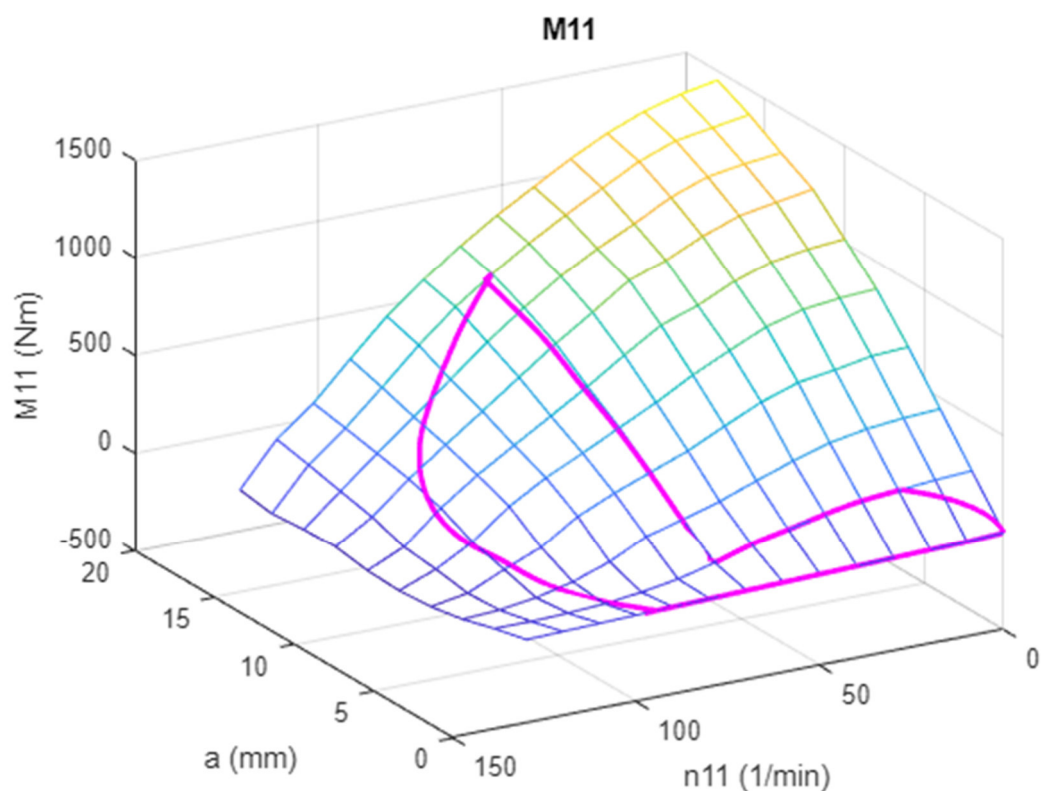
Na první zobrazeném grafu je vykreslena charakteristika  $Q11$  v závislosti na  $a$  a  $n11$  a průběh  $Q11$  při tomto manipulačním stavu.



Graf 5.5 - Univerzální charakteristika –  $Q11$

V druhém grafu je zobrazena charakteristika  $M11$  v závislosti na  $a$  a  $n11$ , včetně průběhu  $M11$  v této simulaci (graf 5.6).

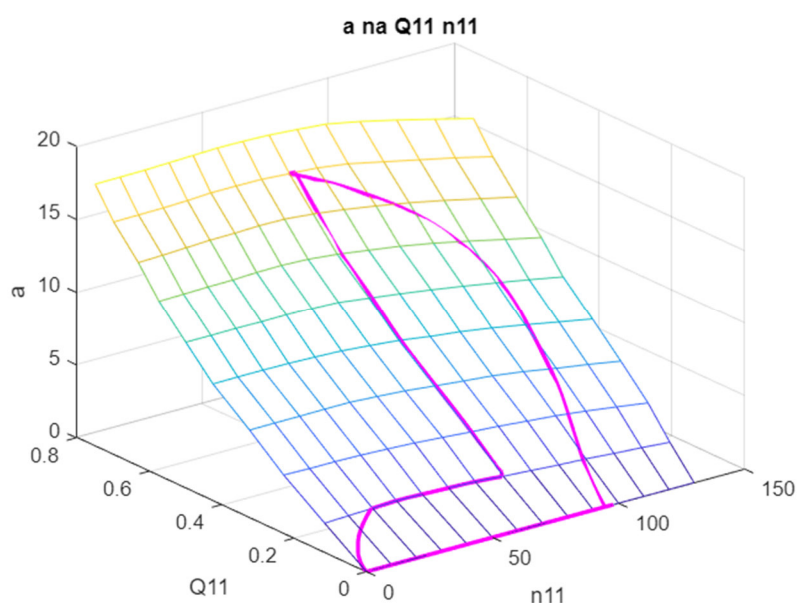
Na tomto a předchozím grafu (graf 5.5) můžeme vidět velmi podobný průběh. Na začátku (č. 1) postupné otevírání  $a$  a nárůst otáček. Růst otáček při konstantním otevření RK až k hodnotě pro připojení generátoru (č. 2). Otevírání RK až na 100 % při konstantních otáčkách (č. 3), na obou charakteristikách vidíme, že otáčky drží konstantní hodnotu, s rostoucím otevíráním roste  $Q11$  a  $M11$ . Jakmile při simulaci dojde k odpojení generátoru a k začátku zavírání RK, vidíme pohyb kladný směrem po ose  $n11$ , který odpovídá zvyšování  $n11$  v důsledku ztráty zátěže (č. 4). Zároveň snižující se pohyb ve směru osy  $a$ , ten odpovídá začátku zavírání RK pro odstavení soustrojí. V poslední části tohoto průběhu (č. 5) je již RK plně uzavřeno, proto již zde není žádný pohyb ve směru osy  $a$ , ale pohybujeme se pouze na ose  $n11$  směrem k hodnotě 0, to představuje otáčky turbíny vlivem setrvačnosti při plně zavřeném RK. Otáčky se postupně snižují díky odporovým silám.



Graf 5.6 - Univerzální charakteristika  $M11$

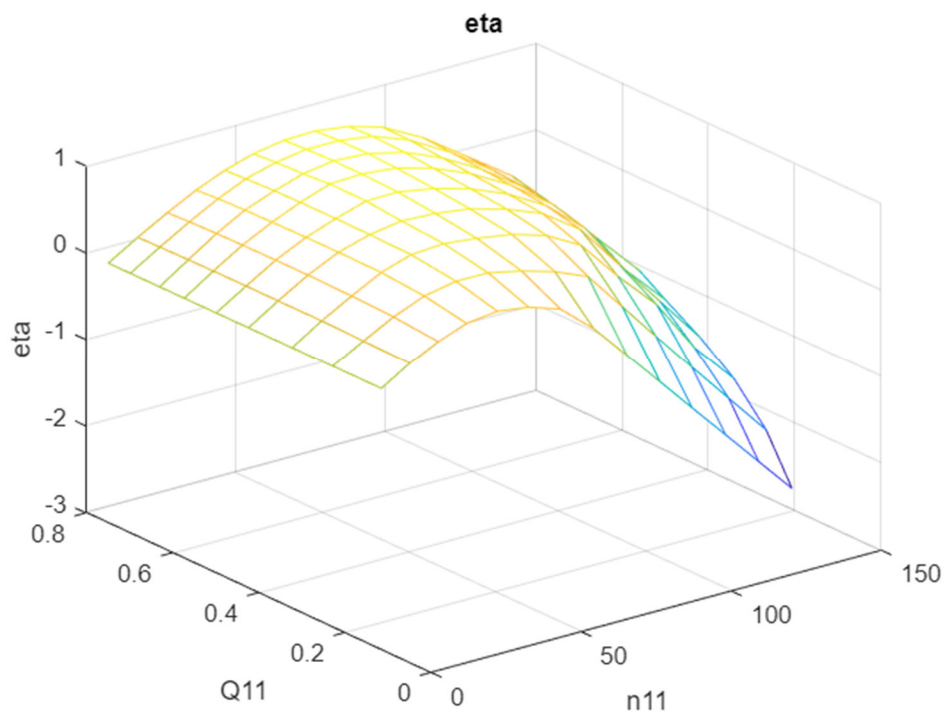
Na dalším 3D grafu (graf 5.7) je vykreslena charakteristika  $a$  v závislosti na  $Q11$  a  $n11$ , která byla vytvořena transformací charakteristiky  $Q11$ . Stejně jako na předchozí charakteristikách je

zde vykreslen průběh simulace manipulačního stavu s tripem generátoru a následným rychlým zavíráním RK.



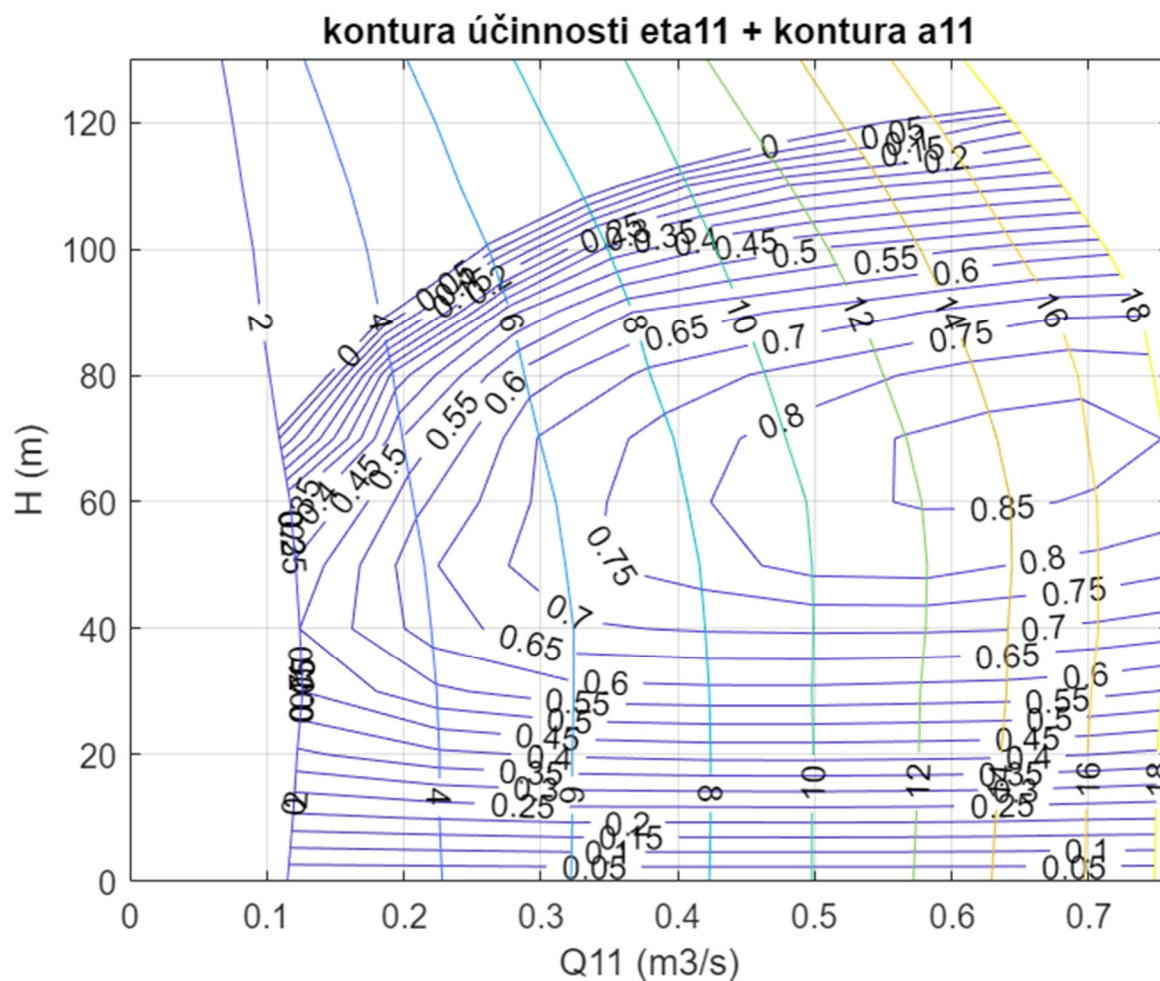
Graf 5.7 - Univerzální charakteristika  $a$

V grafu 5.8 je vykreslena charakteristika  $\eta$ , neboli účinnost turbíny, v závislosti na  $Q11$  a  $n11$ . Tato účinnost byla vypočtena pomocí MATLAB Scriptu z jednotkových charakteristik vykreslených na předchozích grafech.



Graf 5.8 - Univerzální charakteristika  $\eta$

Na dalším grafu (graf 5.9) jsou vykresleny 2D vrstevnice jednotkových charakteristik pro  $\eta$  a  $a$ , které byli na předchozích grafech zobrazeny jako 3D plochy. Na tomto grafu si můžeme všimnout, že krajní hodnoty vrstevnic otevření  $a$ , přesně lícují s okrajem vrstevnic pro  $\eta$ , což odpovídá vzájemné závislosti.



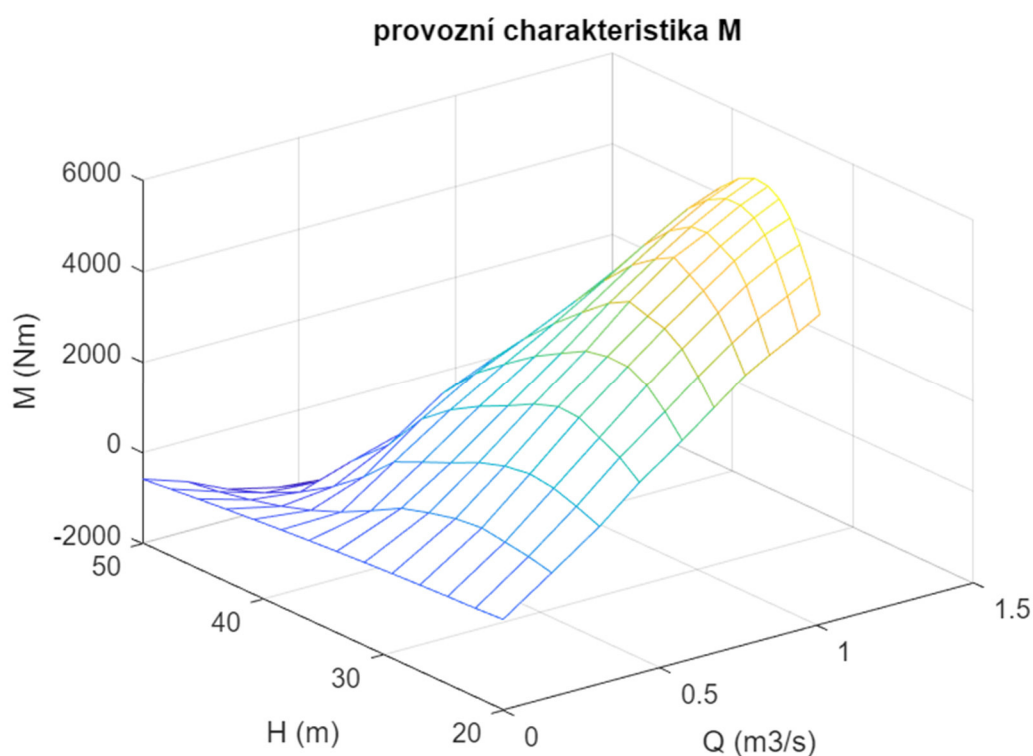
Graf 5.9 - Univerzální charakteristika  $\eta$  a  $a$  - vrstevnice



### 5.2.2. Provozní charakteristiky turbíny

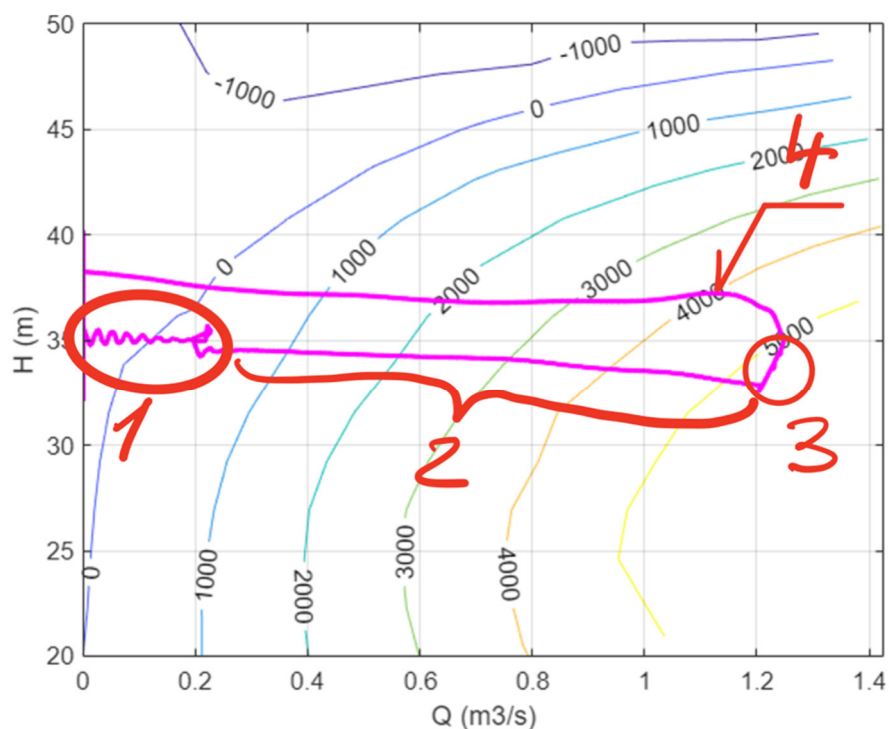
V této části bych rád představil jednotlivé provozní charakteristiky. Tyto charakteristiky byli v programu MATLAB přepočteny z charakteristik jednotkových, které jste mohli vidět v předchozí části. U těchto charakteristik je důležité zmínit že při přechodových jevech na turbíně, jako je najetí a odstavení nejsou zcela odpovídající a jsou zcela platné pouze pro ustálený kontinuální provoz turbíny.

Na prvním grafu (graf 5.10) je vykresleny plocha provozní momentové charakteristiky  $M$  v závislosti na  $H$  a  $Q$ . Tato charakteristika je také použita na dalším grafu (5.11), kde je vykreslena pomocí 2D vrstevnic, včetně průběhu během simulace.



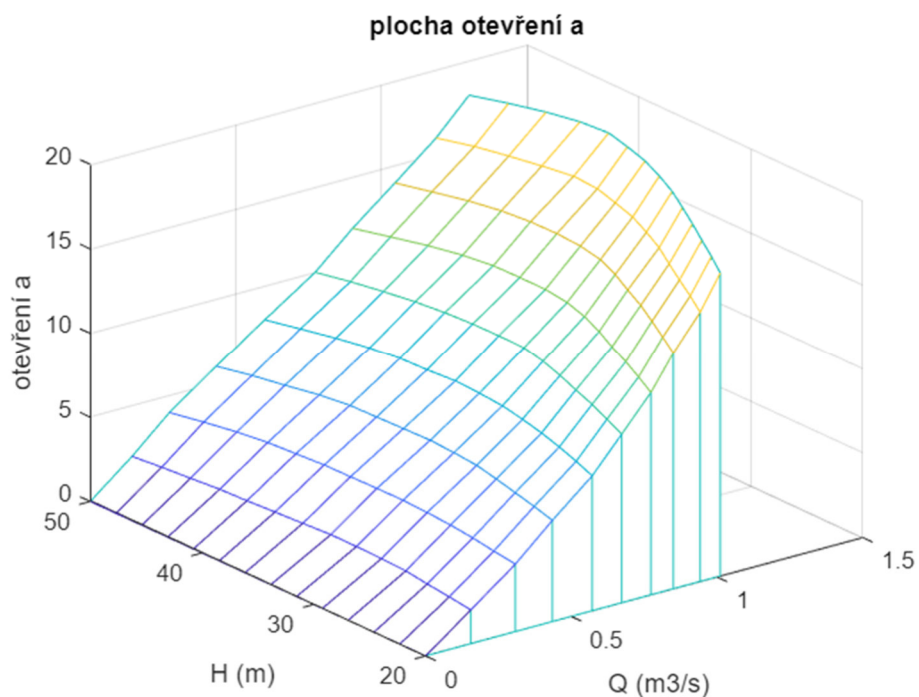
Graf 5.10 - Provozní charakteristika M

Na průběhu kroutícího momentu  $M$  při simulaci vidíme v grafu 5.11 nejprve najíždění soustrojí (č. 1), v druhé fázi zatěžování soustrojí při otevírání RK (č. 2). V bodě č. 3 se elektrárna nachází v provozní fázi na plný výkon, dále dojde k tripu generátoru a havarijnímu odstavení soustrojí pomocí zavírání RK, bod č. 4)



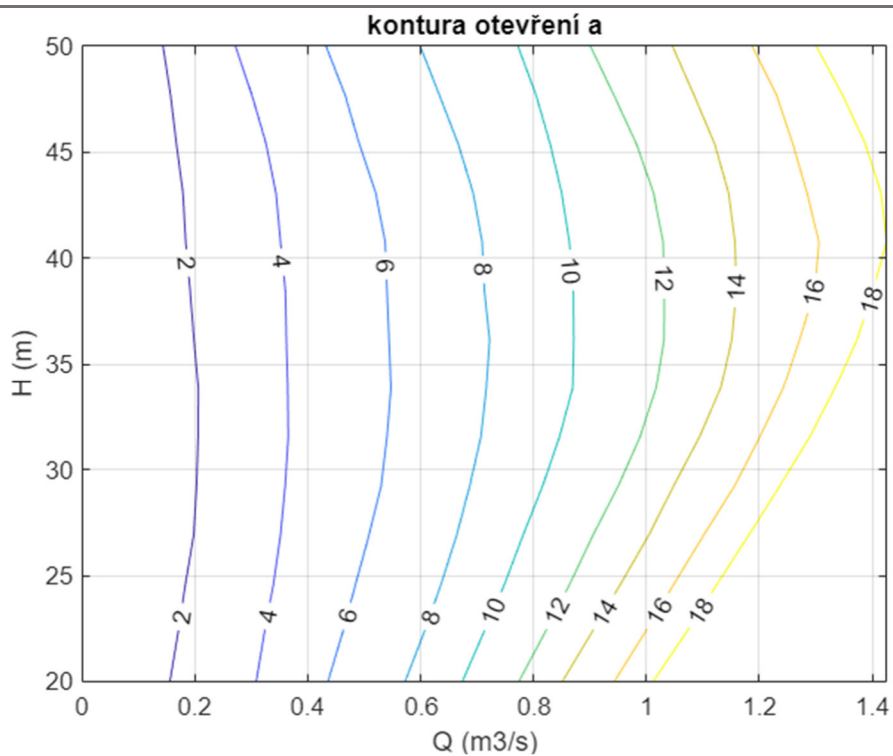
Graf 5.11 - Provozní charakteristika M - vrstevnice

Dalším grafem ( 5.12) je vykreslení charakteristiky otevření RK a v závislosti na Q a H. U této plochy bylo také provedeno vykreslení pomocí 2D vrstevnic, které je v grafu 5.13. Tyto vrstevnice jsou dále použity pro vykreslení spojeného 2D grafu, ve kterém jsou vykresleny provozní charakteristiky pro eta a otevření a.



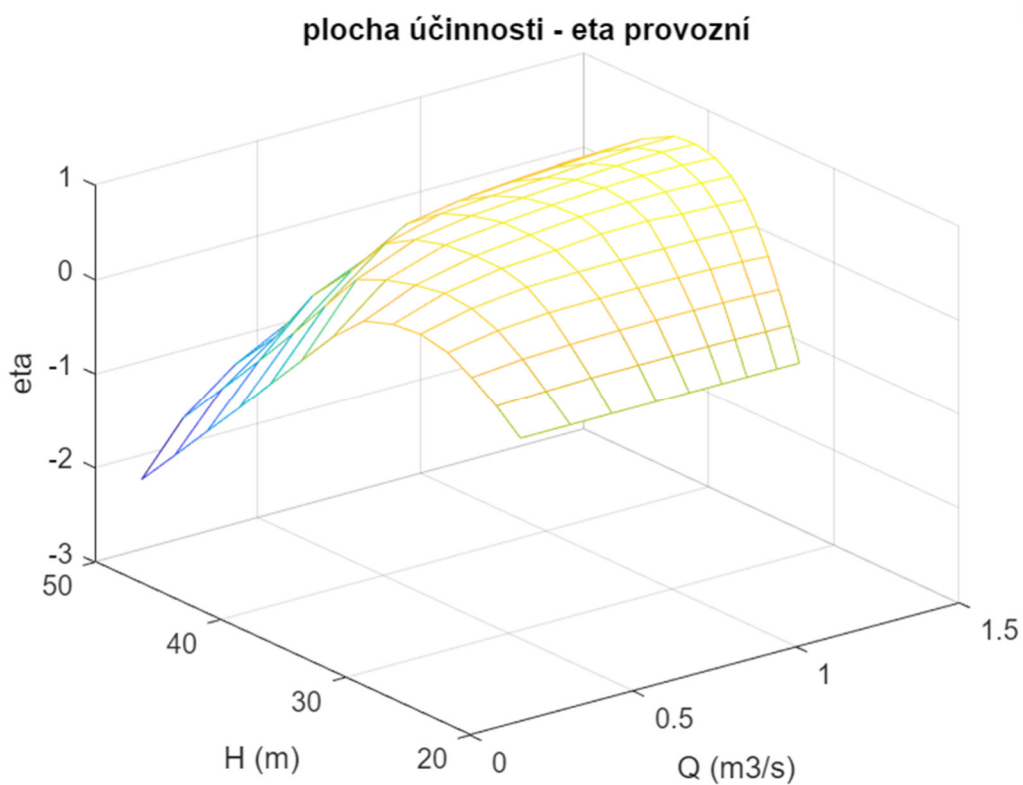
Graf 5.12 - Provozní charakteristika otevření RK – a





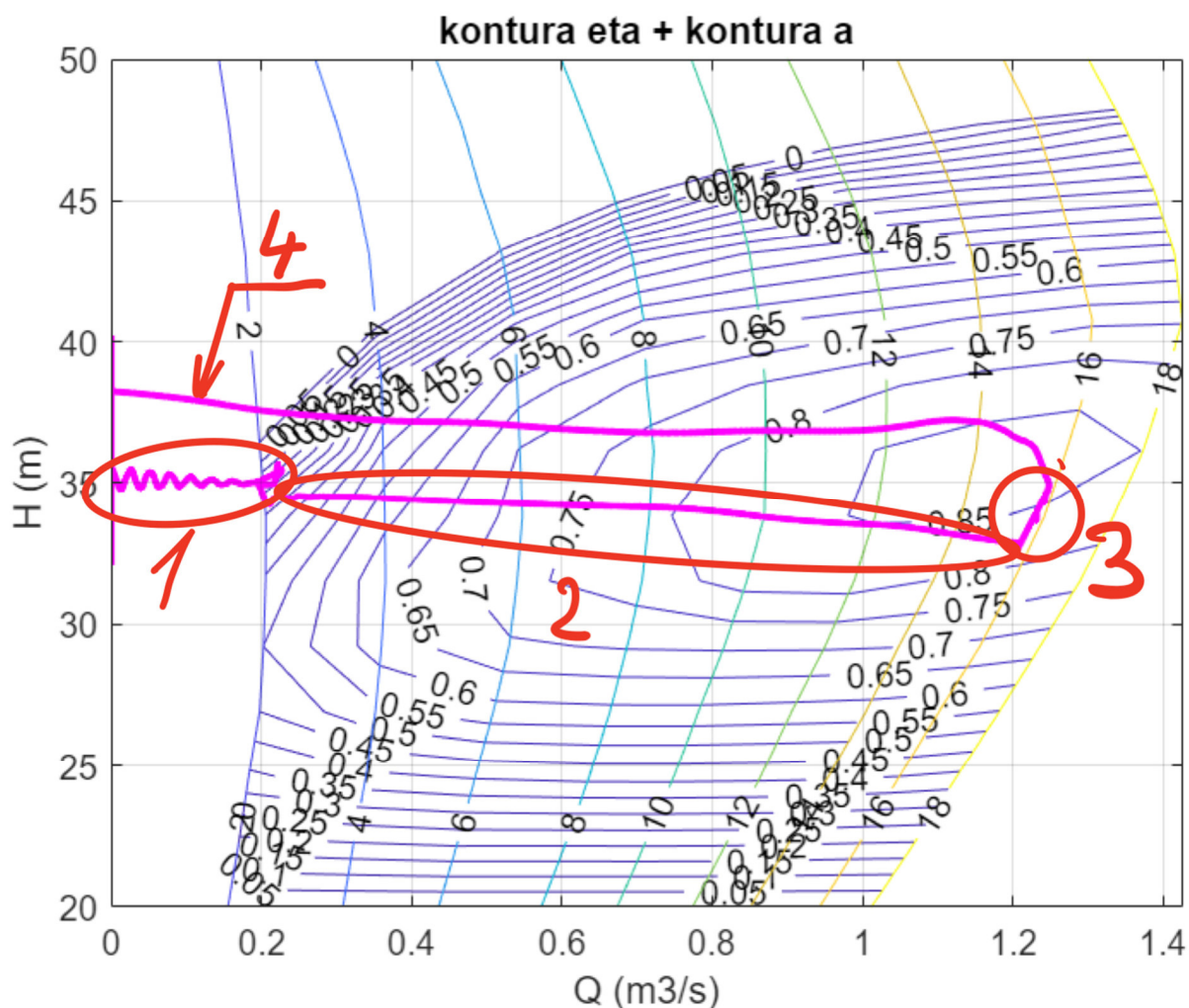
Graf 5.13 - Provozní charakteristika otevření a – vrstevnice

Dále byl proveden přepočít jednotkové plochy účinnosti na provozní, jejíž 3D vykreslení lze vidět v grafu 5.14. U této charakteristiky bylo také provedeno vykreslení pomocí 2D vrstevnic spolu s vrstevnicemi otevření a (graf 5.15).



Graf 5.14 - Provozní charakteristika eta

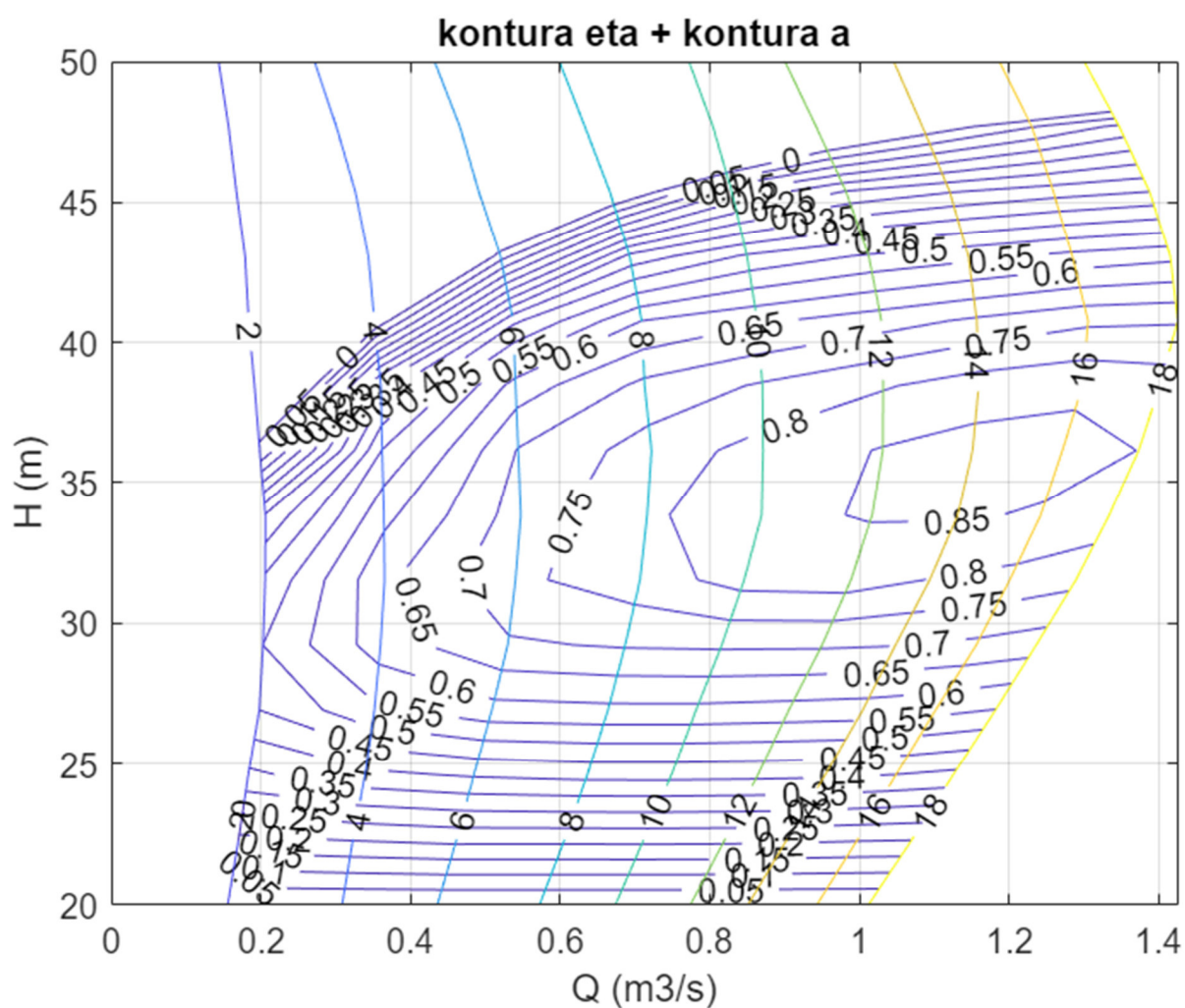
V následujícím grafu (5.15) je vykreslena provozní charakteristika  $\eta_a$ , v závislosti na  $H$  a  $Q$ , spolu s charakteristikou otevírání RK  $a$ , pomocí 2D vrstevnic do jednoho grafu. Zde můžeme opět vidět vzájemnou závislost kdy krajní vrstevnice charakteristiky  $a$  lícují s okrajem plochy vrstevnic charakteristiky  $\eta_a$ .



Graf 5.15 - Provozní charakteristika  $\eta_a$  a otevíření  $a$  - vrstevnice

V tomto grafu je také vykreslen průběh při simulaci, kde můžeme vidět najetí soustrojí (č.1), postupné zatěžování (č. 2), provoz turbíny pro maximálním otevíření (č. 3) a havarijní odstavení turbíny (č. 4)

V dalším grafu (5.16) je tato charakteristika vykreslena znovu bez průběhu simulace.

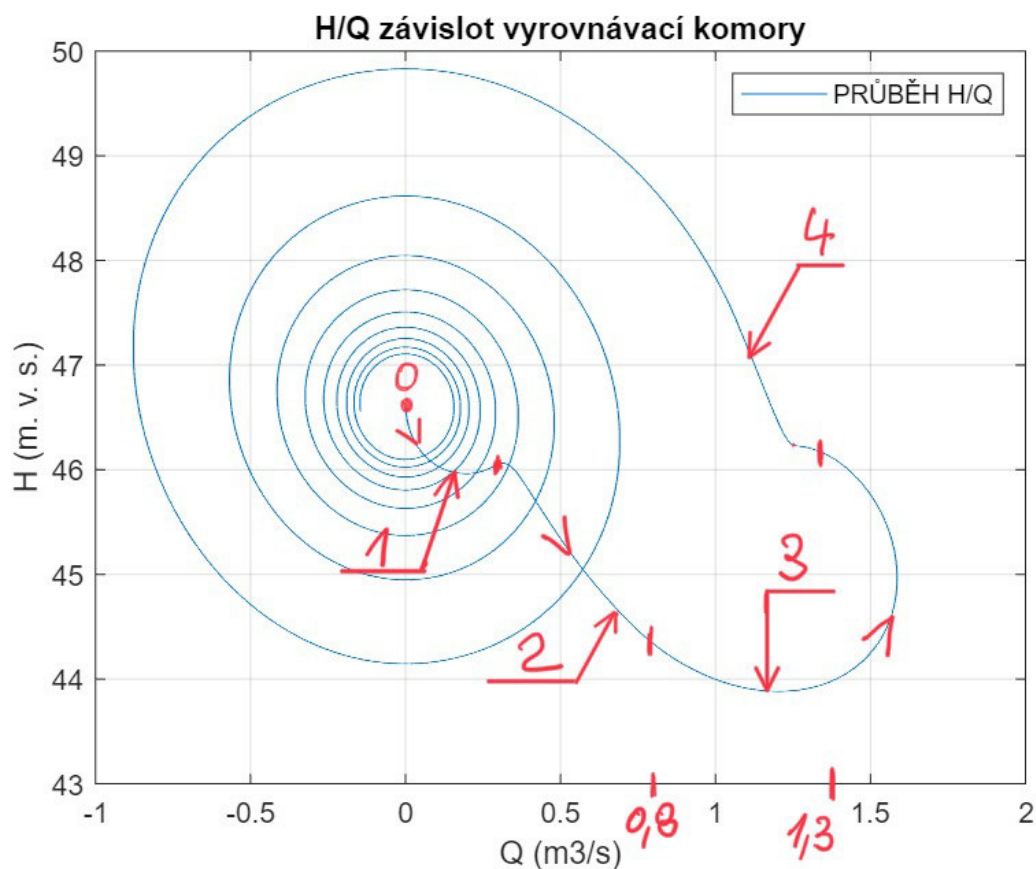


Graf 5.16 - Provozní charakteristika eta a otevření a – vrstevnice

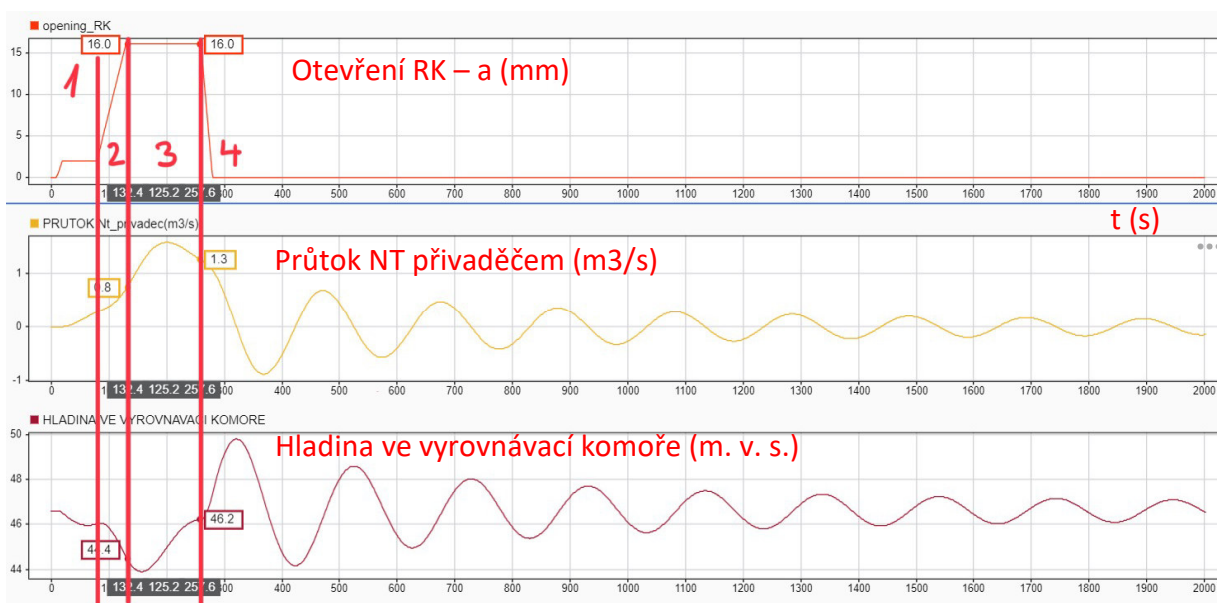
### 5.2.3. Závislost $H/Q$ vyrovnávací komory

V programu MATLAB bylo také provedeno vykreslení závislosti absolutní výšky hladiny ve vyrovnávací komoře a průtoku v nízkotlakém přivaděči (graf 5.17). Úsek č. 1 na tomto grafu je fáze najíždění soustrojí, č. 2 odpovídá zatěžovací fázi, kdy dochází k postupnému navyšování průtoku turbínou. V úseku, který je označen č. 3 se turbína nachází v provozní fázi plného výkonu při plném otevření, v této fázi vidíme kolísání průtoku právě vlivem kolísání hladiny ve vyrovnávací komoře. Poslední fáze, označena číslem č. 4 je v době havarijního odstavení turbíny, vzniku hydraulického rázu v přivaděči a rozhoupání hladiny v komoře. Pro vykreslení toho průběhu byla použita simulace nouzového odstavení při tripu generátoru, na které byli prezentovány i předchozí výsledky, v tomto případě ale s prodloužením času simulace na 2000 s., aby bylo více patrné postupné utahování šroubovice spirály v poslední fázi. Pod tímto

grafem je ještě vykreslen průběh průtoku v nízkotlakém přivaděči a průběh výšky hladiny vyrovnávací komory v čase (graf 5.18), pro lepší časovou orientaci v grafu Q/H.



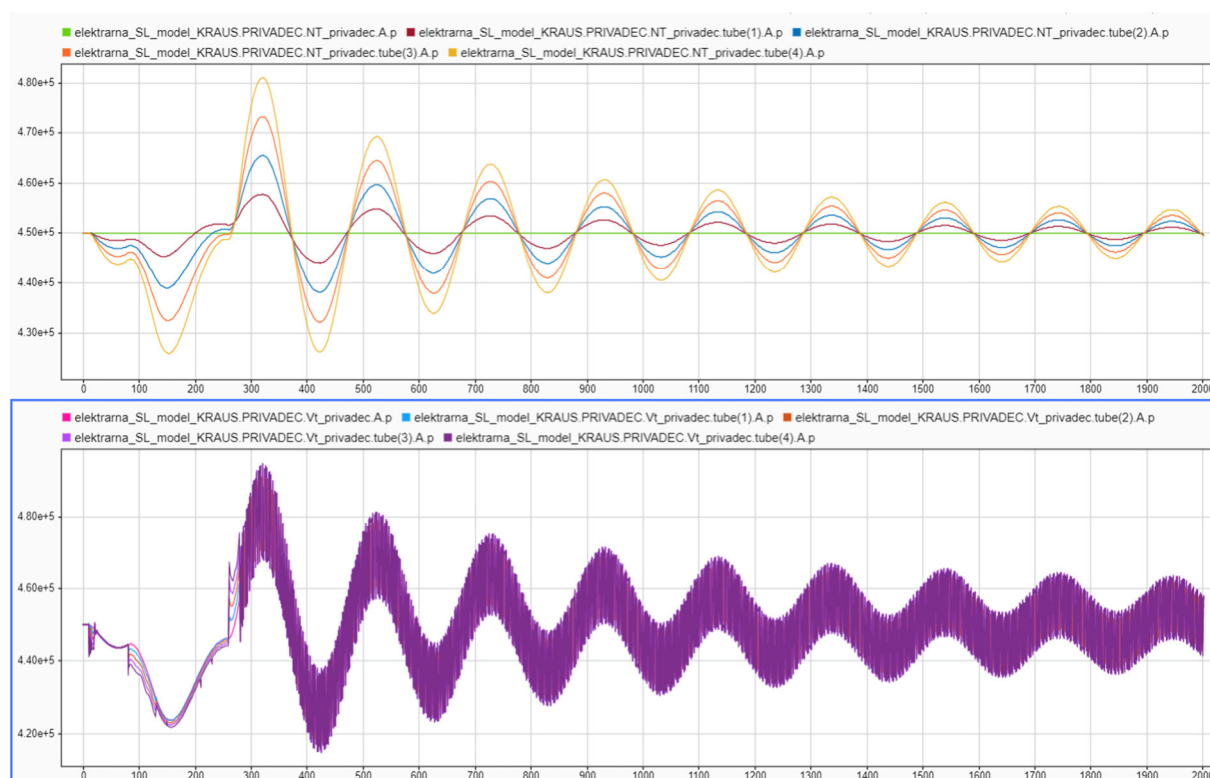
Graf 5.17 - Závislost H/Q vyrovnávací komory



Graf 5.18 – Průběh hladiny vody ve vyrovnávací komoře a průtok v nízkotlakém přivaděči

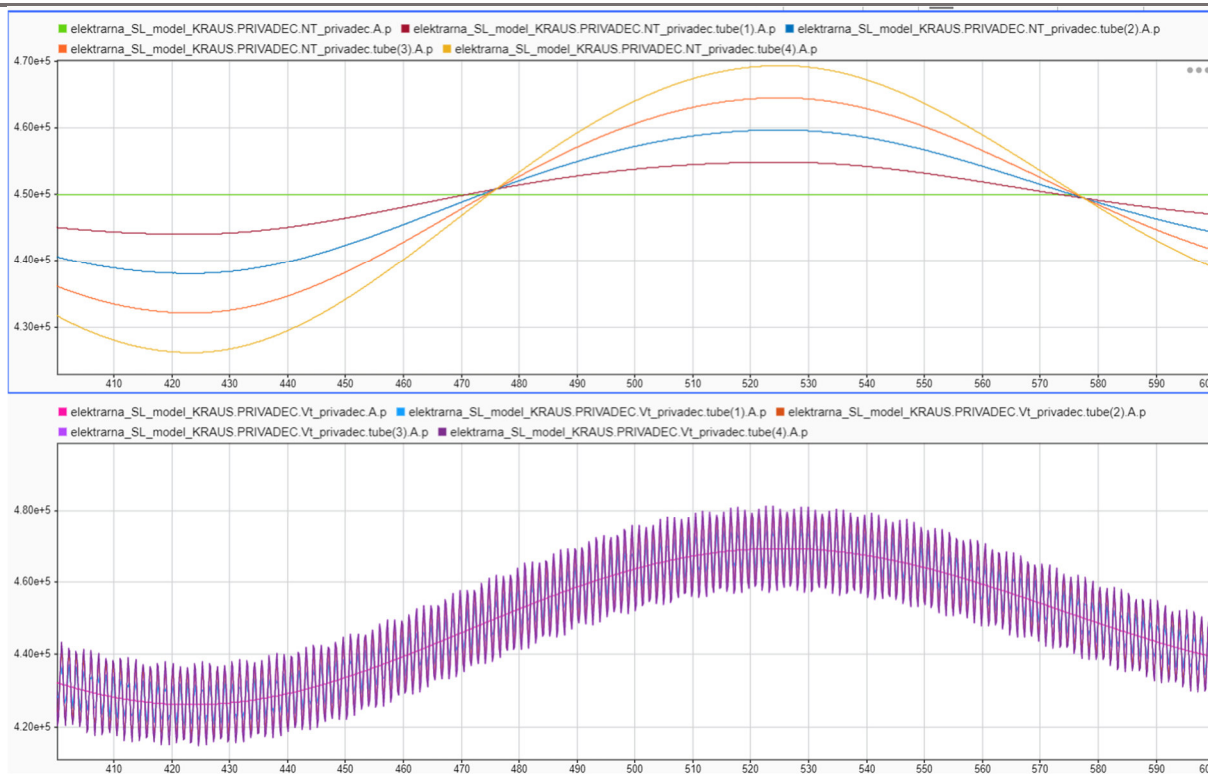
#### 5.2.4. Tlakový průběh v přivaděči při odstavení

Na dalších grafech (grafy 5.19, 5.20, 5.21) je vykreslen průběh tlaku při odstavení v obouh přivaděčích. Na začátku, na konci a ve třech místech (uprostřed třetin délky) každého přivaděče (nízkotlaký přivaděč obr. Xx a xx, vysokotlaký obr. Xx a xx). Na obouh těchto grafem lze vidět, čím vzdálenější místo směrem od turbíny, tím zde je menší tlakový ráz, toto je patrné z seřazení jednotlivých průběhů v daných bodech. Dále z těchto grafů lze vidět že v nízkotlakém přivaděči se již neprojevuje tlakový ráz, který plně vstřebává vyrovnávací komora. Nastává zde pouze tlakový výkyv, který je způsobený kolísáním hladiny ve vyrovnávací komoře. Pokud by napojení vyrovnávací komoro mělo tlakovou ztrátu, vyrovnávací komora by nebyla schopna plně pohltit tlakový ráz a projevil by se i v nízkotlakém přivaděči mírným vlněním na trajektorii průběhu.

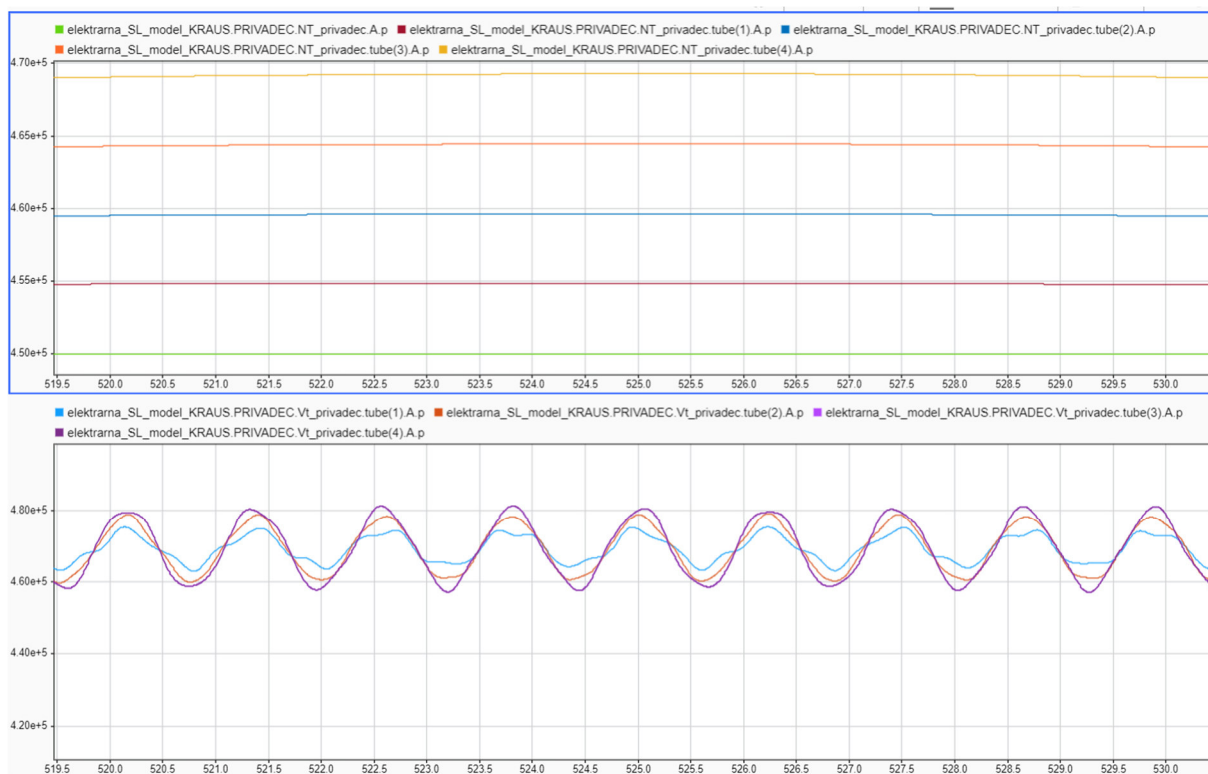


Graf 5.19 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči



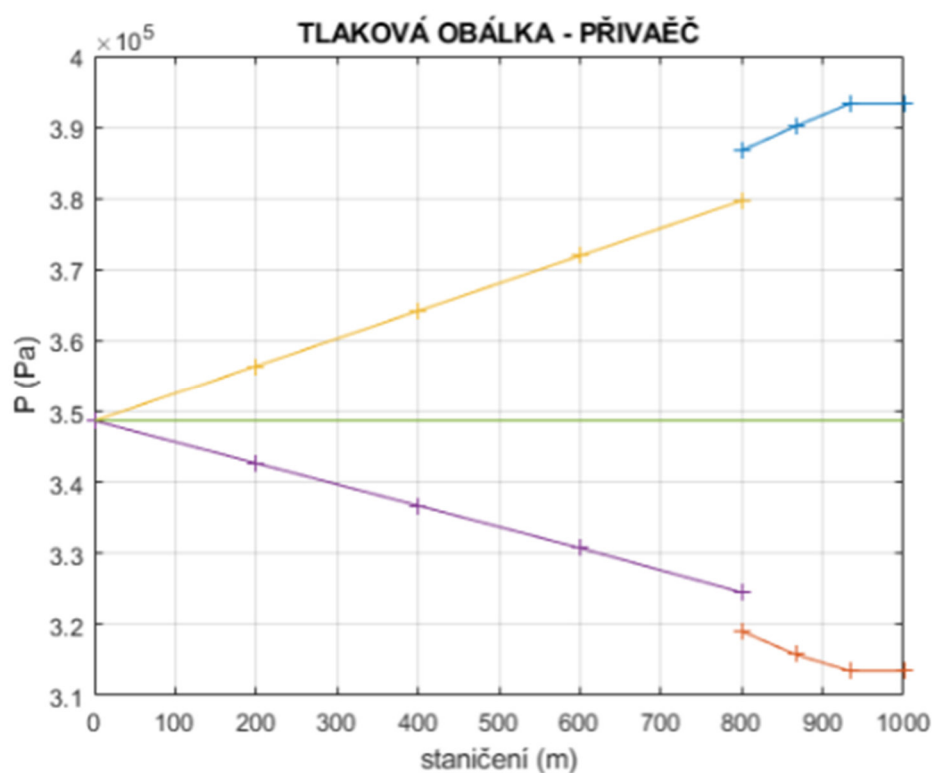


Graf 5.20 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči – detail 1



Graf 5.21 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči - detail 2

Pomocí program MATLAB a export výsledků simulace tohoto manipulačního stavu, bylo provedeno vykreslení obálky tlakový minim a maxim v přivaděči (graf 5.22). Vykreslení bylo provedeno pro obě části přivaděče, nízkotlakému přivaděči odpovídá staničení 0 – 800 m a vysokotlakému přivaděči staničení 800 – 1000 m. Mezi napojením trajektorie maxim a minim lze vidět značný tlakový skok. Tento jev je způsoben hydraulickým rázem ve vysokotlakém přivaděči, který je utlumen díky vyrovnávací komoře a nepokračuje do nízkotlakého přivaděče. Velikost hydraulického rázu odpovídá velikosti tlakového skoku mezi těmito trajektoriami.



Graf 5.22 - obálka tlakových minim a maxim v přivaděči.

## 6. Závěr

Model obsahuje soustavu základní prvků, jako reálná elektrárna. Je zde vytvořen přivaděč s vyrovnávací komorou, který je schopný simulovat hydraulický ráz v něm, a následně vykreslit detailní parametry, ke kterým v něm při simulaci došlo. Vyrovnávací komora, sloužící pro utlumení hydraulického rázu, dokáže vykreslit výsledky průběhu hladiny v komoře během simulace a průtoku do ní. Uzávěř před turbínou, se kterým lze simulovat speciální případy při provozu elektrárny. Pro manipulace s tímto uzávěrem, které by nezvládl celý model i s turbínou je vytvořen druhý model, robustnějšího charakteru, kde si můžeme dovolit méně šetrnou manipulaci. Dále je v modelu vytvořena turbína, ve které jsou zapojeny jednotkové charakteristiky z reálné turbíny, které jsou následně přepočítávány na charakteristiky provozní. U turbíny lze ovládat lopatky rozváděcího kola a tím regulovat průtok turbínou. Na turbínu je dále napojen generátor, u kterého lze ovládat jeho připojení k síti, v případě zapnutí připojení se umí sám připojit při dosažení adekvátních otáček a poté i opojit. Generátor také vytváří reálné zatížení na hřídeli turbíny, a je v něm nastaven moment setrvačnosti a třecí síly podle reálné předlohy. Celý model je pro správnou funkci ohraničen podmínkou konstantního tlaku, kterou vytváří horní a dolní voda.

Pomocí tohoto modelu jsme schopni nasimulovat spoustu různých stavů, které můžou na elektrárně nastat, při různém nastavení parametrů. Následně díky tomu lépe a detailněji analyzovat jednotlivé stavy a jevy, a lépe pochopit danou problematiku.

Model lze také použít jako výukovou pomůcku, student díky "hře" s modelem může snadněji porozumět provozu vodní elektrárny. Jednotlivým manipulačním stavům, rizikům provozu a dějům, které zde vznikají.

Za nedostatky modelu považují nemožnost simulovat rychlejší manipulaci s klapkou v modelu, kde by byla zapojena i turbína. Při manuálním ovládání je model vysoce náchylný na vznik výpočetní chyby v modelu, a následné erorovém ukončení simulace. Z tohoto důvodu jsou v modelu zapojeny filtry, které vyhlazují signál při manuální manipulaci s modelem, a nedovolí uživateli udělat prudkou manipulaci s lopatkami RK, nebo s uzavírací klapkou. Podobný systém lze najít i ve skutečné elektrárně, kde řídicí systém nedovolí obsluze provést nešetrnou manipulaci.



---

## 7. SEZNAMY

### 7.1. Seznam použitých zkratk a symbolů

a	otevření lopatek rozváděcího kola	[mm]
D	průměr potrubí	[m]
D <sub>ok</sub>	průměr oběžného kola turbíny	[m]
H	tlaková výška	[m]
n	otáčky	[1/min]
n <sub>11</sub>	jednotkové otáčky	[1/min]
p	tlak	[Pa]
P	výkon	[W]
P <sub>11</sub>	jednotkový výkon	[W]
Q	průtok	[m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>11</sub>	jednotkový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
t	čas	[s]
M	kroučící moment na hřídeli	[Nm]
M <sub>11</sub>	jednotkový kroučící moment na hřídeli	[Nm]
eta	účinnost	[-]
$\omega$	úhlová rychlost	[rad/s]
RK	rozdávěcí kolo	

### 7.2. Použitá literatura

[1] **Nowak Petr.** Hydraulické ráz MVE Plavisko. Praha, 2010.

[2] **Jaroslav Čábelka, Pavel Gabriel.** Matematické a fyzikální modelování v hydrotechnice. Praha : Academia, 1987.

[3] **Gabriel Pavel, Kučerová Jitka.** Navrhování vodních elektráren. První. Praha : České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01304-9

[4] **Rudolf Tomáš.** Hydraulický ráz na přivaděcích vodních elektráren. Praha, 2010. Diplomová práce, ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.

[5] **Melichar Jan.** Malé vodní trubiny. 2. Přeprac. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-02164-5.

[6] **Melichar, Jonáš.** Matematický model male vodní elektrárny. [online]. Praha, 2019. Diplomová práce, ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84233/F1-DP-2019-Melichar-Jonas-Matematicky%20model%20MVE.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

[7] **Gabriel Pavel, Čihák František a Kalandra Petr.** Malé vodní elektrárny. Praha : České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.

[8] **Nicolet Ch.** Hydroacoustic modeling and numerical simation of unsteady operation of hydroelectric systems, EPFL, Lausanne, 2007.

[9] **MathWorks.** Simulink User's Guide R2022a. [online]. 2022. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/simulink/simulink\\_ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/simulink_ug.pdf)

[10] **MathWorks.** Simscape User's Guide R2022a. [online]. 2022. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/phymod/simscape/simscape\\_ug.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/simscape/simscape_ug.pdf)

[11] **MathWorks.** Simscape Language Guide R2022a. [online]. 2022. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/phymod/simscape/simscape\\_lang.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/phymod/simscape/simscape_lang.pdf)

### 7.3. Seznam grafů

Graf 4.1 - Kolísání spádu a kroutícího momentu .....	15
Graf 4.2 - Tlak před klapkou při nouzovém zavírání .....	34
Graf 5.1 - Základní výsledky Simulink modelu.....	38
Graf 5.2 - Průběh otevření RK a připojení generátoru při simulaci.....	39
Graf 5.3 - Průběh průtoku Q a Q11 v turbíně.....	42
Graf 5.4 - Průběh kroutícího momentu a výkonu při simulaci.....	46
Graf 5.5 - Univerzální charakteristika – Q11 .....	47

Graf 5.6 - Univerzální charakteristika M11 .....	48
Graf 5.7 - Univerzální charakteristika a .....	49
Graf 5.8 - Univerzální charakteristika eta .....	49
Graf 5.9 - Univerzální charakteristika eta a a - vrstevnice .....	50
Graf 5.10 - Provozní charakteristika M .....	51
Graf 5.11 - Provozní charakteristika M - vrstevnice .....	52
Graf 5.12 - Provozní charakteristika otevření RK – a .....	52
Graf 5.13 - Provozní charakteristika otevření a – vrstevnice .....	53
Graf 5.14 - Provozní charakteristika eta .....	53
Graf 5.15 - Provozní charakteristika eta a otevření a - vrstevnice .....	54
Graf 5.16 - Provozní charakteristika eta a otevření a – vrstevnice .....	55
Graf 5.17 - Závislost H/Q vyrovnávací komory .....	56
Graf 5.18 – Průběh hladiny vody ve vyrovnávací komoře a průtok v nízkotlakém přivaděči..	56
Graf 5.19 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči .....	57
Graf 5.20 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči – detail 1 .....	58
Graf 5.21 - Tlakový průběh hydraulického rázu v přivaděči - detail 2 .....	58
Graf 5.22 - obálka tlakových minim a maxim v přivaděči. ....	59

#### 7.4. Seznam obrázků

Obrázek 3.1 – Schéma malé vodní elektrárny .....	11
Obrázek 4.1 – Schéma modelu .....	12
Obrázek 4.2 - Subsystem - zdroj průtoku      Obrázek 4.3 - Subsystem - zdroj průtoku .....	13
Obrázek 4.4 - Subsystem přivaděč .....	13
Obrázek 4.5 - Subsystem přivaděč .....	14
Obrázek 4.6 - Prvky vyrovnávací komory .....	15
Obrázek 4.7 - Subsystem uzavírací klapky .....	16
Obrázek 4.8 - Subsystem uzavírací klapky .....	17
Obrázek 4.9 - Turbínová charakteristika M11 .....	17
Obrázek 4.10 - Turbínová charakteristika Q11 .....	17
Obrázek 4.11 - Subsystem Francisova turbína .....	18
Obrázek 4.12 - Simulink turbína .....	19

---

Obrázek 4.13 - Subsystemy generátor.....	19
Obrázek 4.14 - Simulink generátor.....	20
Obrázek 4.15 - Subsystem výstup ze systému .....	21
Obrázek 4.16 - Simulink výstup vody ze systému .....	21
Obrázek 4.17 - Grafické zobrazení výsledků v Simulink modelu.....	22
Obrázek 4.18 - Display bloky pro zobrazení dat při simulaci .....	22
Obrázek 4.19 - Simulink soubor modelu elektrárny .....	22
Obrázek 4.20 - Spuštění projektu s modelem .....	23
Obrázek 4.21 - Nouzové načtení dat do base workspace pro spuštění simulace.....	23
Obrázek 4.22 - Příklad nastavení parametru horní vody .....	24
Obrázek 4.23 - Ovládání přednastavených manipulačních stavů .....	24
Obrázek 4.24 - Manuální ovládání modelu .....	25
Obrázek 4.25 - Prvky manuálního ovládání simulace .....	25
Obrázek 4.26 - Spuštění simulace v manuálním módu .....	26
Obrázek 4.27 - Model při simulaci .....	26
Obrázek 4.28 - Signál najetí a provoz elektrárny .....	27
Obrázek 4.29 - Signál provozního najetí a odstavení soustrojí.....	28
Obrázek 4.30 - Signál provozního najetí a havarijního odstavení soustrojí.....	29
Obrázek 4.31 - Signál RK - trip generátoru při plné zátěži .....	30
Obrázek 4.32 - Signál připojení generátoru - trip při plné zátěži.....	30
Obrázek 4.33 - Signál RK - Trip generátoru a havarijní odstavení soustrojí.....	31
Obrázek 4.34 - Signál odstavení soustrojí při jeho najíždění .....	32
Obrázek 4.35 - Model pro simulaci odstavení pomocí klapky před turbínou.....	33
Obrázek 4.36 - Signál manipulace klapkou při havarijním odstavení .....	33
Obrázek 4.37 - Simulink blok Scope .....	34
Obrázek 4.38 - Příklad zobrazení výsledků pomocí simulink bloku scope.....	35
Obrázek 4.39 - Spuštění Simulink aplikace Data inspector .....	35
Obrázek 4.40 - Zobrazení Simulink aplikace Data inspector .....	36
Obrázek 4.41 - Otevření MATLAB Script pro vykreslení výsledků.....	37
Obrázek 4.42 - Matlab soubor pro vykreslení výsledků.....	37
Obrázek 5.1 - Tlakový ráz - začátek simulace .....	40
Obrázek 5.2 - Tlakový průběh $t = 20-80s$ .í.....	40

---

---

Obrázek 5.3 - Tlakový průběh $t = 130$ s.....	40
Obrázek 5.4 - Tlakový ráz při havarijním uzavření RK - detail.....	41
Obrázek 5.5 - Tlakový průběh $t = 130 - 450$ s.....	41
Obrázek 5.6 - Tlakový ráz při havarijním uzavření RK.....	41
Obrázek 5.7 - Průběh průtoku v úseku $t = 120-260$ s.....	43
Obrázek 5.8 - Průběh otáček při simulaci .....	43
Obrázek 5.9 - Detail průběhu otáček při simulaci v $t = 260$ s.....	44

### 7.5. Seznam tabulek

Tabulka 3.1- Parametry turbíny .....	10
Tabulka 3.2 - Parametry generátoru .....	11