

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace parametrů axiálního turbínového soustrojí

Optimization of axial turbine unit parameters

Vedoucí diplomové práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Prosinec 2021


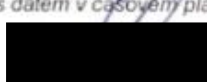
Bc. David Karbulka

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Karbulka</u>	Jméno: <u>David</u>	Osobní číslo: <u>458978</u>
Zadávací katedra: <u>K142 – katedra hydrotechniky</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Optimalizace parametrů axiálního turbínového soustrojí</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Optimization of axial turbine unit parameters</u>	
Pokyny pro vypracování: Simulace roční výroby elektrické energie v zadané lokalitě (hydrologické podklady, měrná křivka horní i dolní vody) na základě zadané charakteristiky turbíny. Optimalizace výroby energie změnou vybraných parametrů (Dok, provozní otáčky). Hranice přepínání „fixed speed„ x „variable speed“ se zohledněním ztrát frekvenčního měniče Kavitační součinitel – zpracování na sací výšce v provozní charakteristice Zobrazení dílčích účinností částí obvodu turbíny ze CFD v univerzálních charakteristikách Definice provozní oblasti (rozsah spádů, průtoků, výkonů, momentů, RK) Optimalizace provozní vazby RK-otáčky se zohledněním vlivu účinnostní charakteristiky PMG (Permanent magnet generator)	
Seznam doporučené literatury: - obecná literatura - Hydropower, small hydro, axial variable speed turbine - MatLab manuals and tutorials	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Dr.Ing. Petr Nowak</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>23/9/2021</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>2/11/2021</u> <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23/9/2021
Datum převzetí zadání


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 Praze dne 2.1.2022

.....

Bc. David Karbulka

Poděkování

Děkuji Dr. Ing. Petru Nowakovi za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při tvorbě této diplomové práce. Neméně bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Součkovi za jeho čas při společných konzultacích. Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu a motivaci v průběhu celého studia.

ABSTRAKT

V této diplomové práci byl vytvořen program v prostředí MATLAB, který zpracovává turbínové charakteristiky. Program nejdříve vytvoří univerzální charakteristiku turbíny, kterou následně přepočte na provozní charakteristiku pro turbínu o daném průměru oběžného kola a daných provozních otáčkách. Tyto charakteristiky byly zpracovány pro propelerovou turbínu ve variantách s frekvenčním měničem a bez frekvenčního měniče. Dále byla vytvořena provozní charakteristika generátoru s permanentními magnety, která slouží k určení účinnosti generátoru v pracovním bodě, tedy při známém momentu na hřídeli a provozních otáčkách. Z výkonové charakteristiky turbíny byla vypočtena roční výroba elektrické energie se zohledněním ztrát na vstupu do elektrárny, ztrát na generátoru a případně ztrát na frekvenčním měniči. Cílem práce je nalezení optimální velikosti průměru oběžného kola a provozních otáček z hlediska roční výroby elektrické energie. Součástí práce je také výpočet ztrátového výkonu na generátoru, který by mohl být využit, například k temperování technického zázemí elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA

turbínové charakteristiky, propelerová turbína, malá vodní elektrárna, výroba elektrické energie, frekvenční měnič, PMG

ABSTRACT

In this thesis, a MATLAB program was developed to process the turbine characteristics. The program first creates a universal turbine characteristic, which is then converted to an operating characteristic for a turbine with a given runner diameter and a given operating speed. These characteristics have been processed for the propeller turbine in both the with and without frequency converter versions. Furthermore, the operating characteristics of the permanent magnet generator were developed to determine the efficiency of the generator at the operating point, i.e. at a known shaft torque and operating speed. From the turbine power characteristic, the annual electricity production was calculated including the losses at the plant inlet, losses at the generator and, if applicable, losses at the frequency converter. The aim of the work is to find the optimum size of runner diameter and operating speed in terms of annual electricity production. The work also includes the calculation of the power loss on the generator, which could be used, for example, to temper the technical background of the power plant.

KEY WORDS

turbine characteristics, propeller turbine, small hydropower plant, power generation, frequency converter, PMG

OBSAH PRÁCE

1. ÚVOD	- 3 -
2. LOKALITA TEREZÍN	- 4 -
2.1. HORNÍ VODA	- 5 -
2.2. DOLNÍ VODA	- 5 -
2.3. PRŮTOKOVÉ POMĚRY	- 6 -
2.4. NÁVRHOVÉ PARAMETRY MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	- 6 -
3. ZAŘÍZENÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	- 8 -
3.1. PROPELEROVÁ TURBÍNA	- 8 -
3.2. FREKVENČNÍ MĚNIČ	- 9 -
3.3. GENERÁTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	- 9 -
3.4. TURBÍNY DIVE	- 9 -
4. PRACOVNÍ PARAMETRY VODNÍ TURBÍNY	- 11 -
4.1. SPÁD	- 11 -
4.2. PRŮTOK	- 11 -
4.3. PROVOZNÍ OTÁČKY	- 12 -
4.4. ÚČINNOST	- 12 -
4.5. VÝKON	- 13 -
4.6. SACÍ VÝŠKA	- 13 -
5. TURBÍNOVÉ CHARAKTERISTIKY	- 14 -
5.1. DATA POTŘEBNÁ K VYTVOŘENÍ TURBÍNOVÝCH CHARAKTERISTIK	- 14 -
5.2. JEDNOTKOVÉ VELIČINY	- 15 -
5.3. UNIVERZÁLNÍ CHARAKTERISTIKA	- 16 -
5.4. PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKA	- 17 -
6. ZPRACOVÁNÍ TURBÍNOVÝCH CHARAKTERISTIK	- 19 -
6.1. STRUKTURA VÝPOČTU	- 19 -
6.2. VSTUPNÍ DATA	- 20 -
6.3. PROGRAM – TEREZIN HYDROLOGIE	- 20 -
6.4. PROGRAM – SETUP	- 21 -

6.5.	PROGRAM - UNIVERZÁLNÍ CHARAKTERISTIKA.....	- 21 -
6.6.	PROGRAM – CHARAKTERISTIKA GENERÁTORU	- 26 -
6.7.	PROGRAM – OPTIMALIZACE „VARIABLE SPEED“	- 27 -
6.8.	PROGRAM – OPTIMALIZACE „FIX SPEED“	- 35 -
6.9.	PROGRAM – UNIVERZÁLNÍ CHARAKTERISTIKA ZPĚTNÉ VYKRESLENÍ....	- 44 -
7.	ZÁVĚR.....	- 46 -
8.	SEZNAMY	- 47 -
8.1.	POUŽITÁ LITERATURA	- 47 -
8.2.	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 48 -
8.3.	SEZNAM GRAFŮ.....	- 48 -
8.4.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	- 50 -
9.	PŘÍLOHY	- 51 -

1. ÚVOD

Malé vodní elektrárny jsou spolehlivým, bezpečným a ekologickým zdrojem elektrické energie. V dnešní době je převážná většina vodních děl a staveb vybavena vodními turbínami. Ceny energií neustále stoupají, což odpovídá snaze maximalizovat efektivitu a využít co nejvíce generovaného výkonu.

Existuje několik typů vodních turbín, rozdělených do pracovních oblastí dle velikostí průtoků a spádů. Mezi nejpopulárnější patří především tři typy vodních turbín, a sice Kaplanova turbína, Francisova turbína a Peltonova turbína. Kaplanovy turbíny jsou vhodné především v oblasti nízkých spádů a velkých průtoků. Francisovy turbíny je vhodné použít v oblasti středních průtoků a středních spádů, zatímco Peltonovy turbíny se používají při nízkých průtocích ale vysokých spádech. [1] V této diplomové práci se budeme zabývat především propelerovou turbínou, jakožto odnoží Kaplanovy turbíny.

Součástí této diplomové práce je také program vytvořený v prostředí MATLAB, který pomůže při volbě parametrů vodní elektrárny, především velikosti oběžného kola a provozních otáček tak, aby byl vhodně využit hydroenergetický potenciál. Program pracuje s řadou m-denních průtoků, čarou trvání spádu a provozními charakteristikami propelerové turbíny a generátoru. Výsledkem jsou grafy zobrazující roční výrobu elektrické energie v závislosti na velikosti oběžného kola pro variantu turbíny s frekvenčním měničem. Pro turbíny bez frekvenčního měniče jde o optimální kombinaci průměru oběžného kola a provozních otáček. Dále je zpracována charakteristika generátoru s permanentními magnety, která je důležitá pro zjištění účinností generátoru v jednotlivých provozních bodech. Pokud dokážeme určit výkon turbíny a účinnost generátoru, získáváme výstupní elektrický výkon, ale také ztrátový výkon generátoru. Tento ztrátový výkon je disipován ve vodním chlazení generátoru. Myšlenkou je využít tuto chladící vodu k dalším účelům např. temperování technických prostor vodního díla.

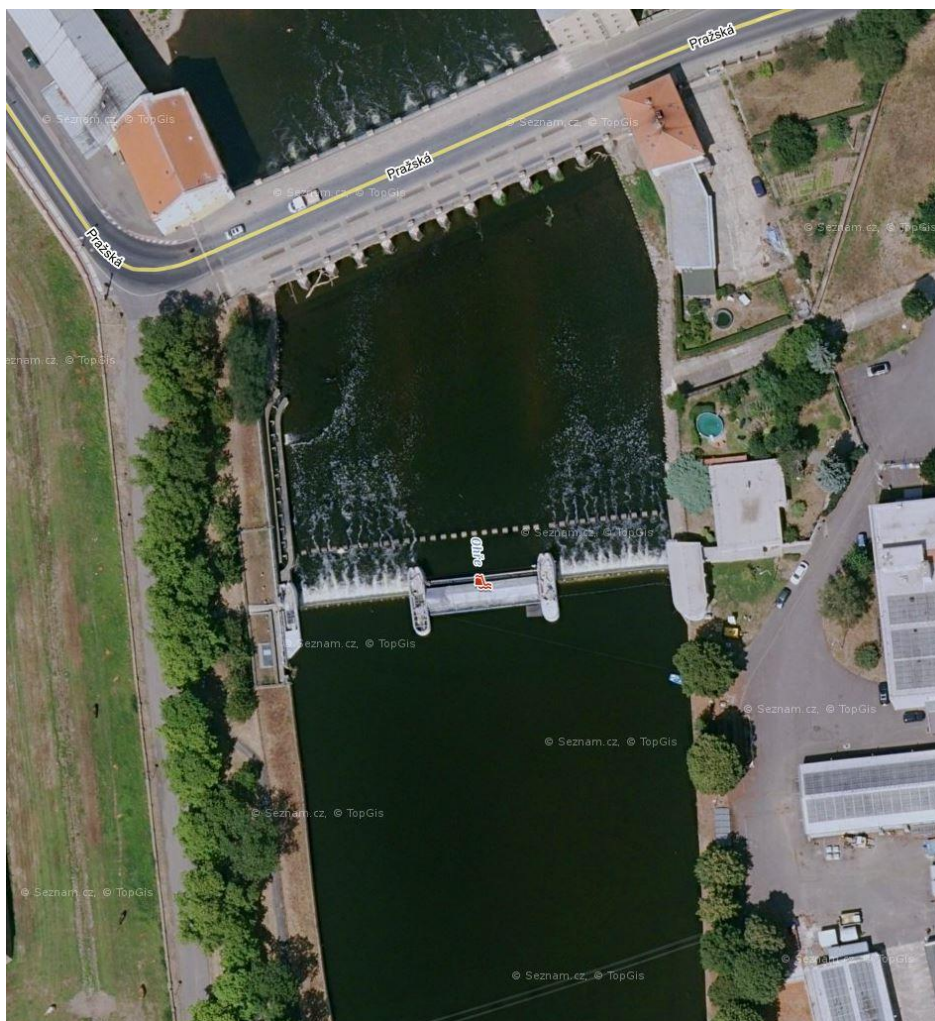
Lokalitou, která byla vybrána jako modelová pro účely této diplomové práce je jez Terežín a potenciální vodní elektrárna. Protože se lokalita nachází v památkově chráněné a historicky významné oblasti, je obtížné najít řešení stavby vodní elektrárny. Vhodným řešením by mohlo být použití pomaluběžných vertikálních turbín s pevnými lopatkami oběžného kola s hřídelí přímo spojenou s hřídelí generátoru, který bude umístěn pod hladinou, takzvané BULB řešení. S tímto konceptem korespondují turbíny DIVE.

2. LOKALITA TEREZÍN

Zájmová lokalita pro výstavbu MVE Terezín je na řece Ohři v říčním km. 2,262 u stávajícího pohyblivého jezu ve městě Terezín. Energetický potenciál jezu Terezín je nevyužitý, ale podklady pro výstavbu MVE jsou zpracovávány již od roku 2005.

Bylo posouzeno několik variant: přímoproudá Kaplanova turbína v uspořádání S - výkon turbíny je vyveden hřídelí kolenem v savce, K - výkon turbíny je vyveden hřídelí kolenem v nátoku turbíny, PIT - převodovka, resp. generátor umístěn ve středovém pitu nebo BULB - generátor umístěn v obtékaném plášti. Dále přímoproudé varianty Straflo, Streamdiver a Hydromatrix. Pro turbíny s vertikální osou otáčení byly posuzovány možnosti: vertikální Kaplanova turbína s betonovou spirálou a kolenovou savkou a turbína DIVE - varianta s pevným OK a regulovatelnými provozními otáčkami.

Zohledníme-li všechny omezující kritéria pro výstavbu MVE Terezín, jako optimální se jeví řešení s vertikální turbínou typu DIVE. [2]



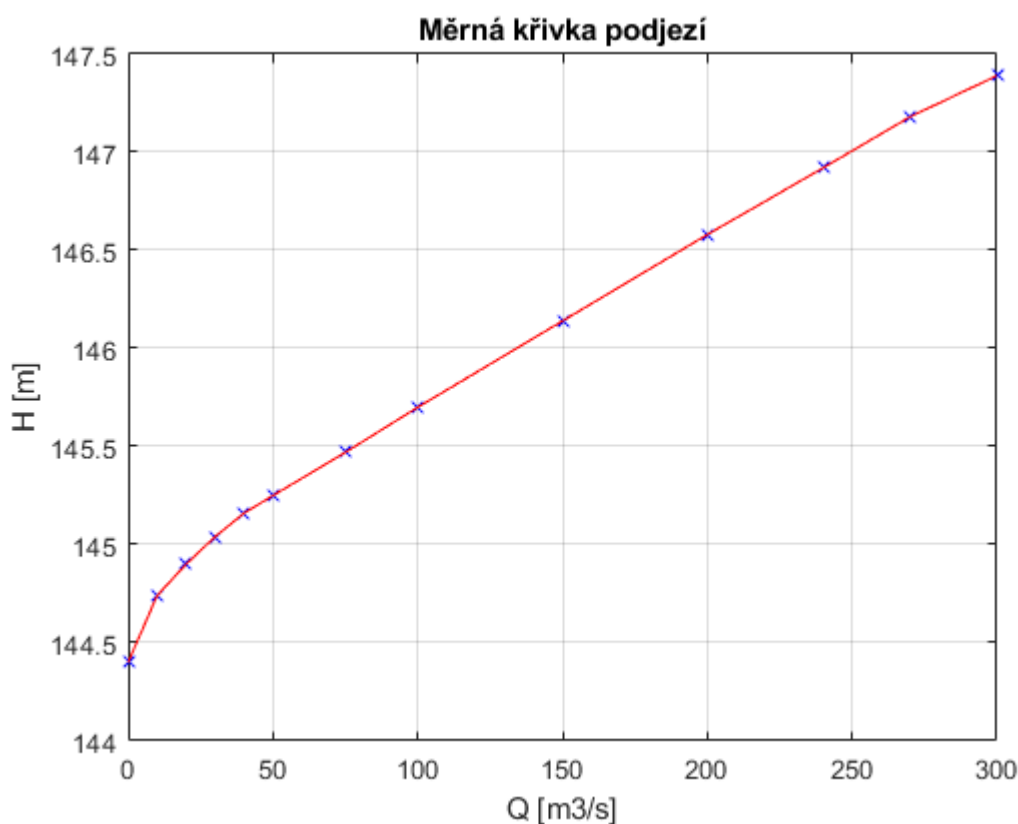
Obrázek 1 Jez Terezín

2.1. Horní voda

Jez Terežín zajišťuje konstantní hladinu na úrovni 147,80 m n.m. v běžném rozsahu průtoků plánované MVE. Jez je rozdělen do třech polí hrazených klapkovými uzávěry a celková kapacita jezu je 354 m³/s. Horní přelivná hrana klapky ve zcela vztyčené poloze je 147.75 m n.m. Provozní hladina může být zajištěna i při nízkých průtocích, protože dochází k nadlepšování průtoku z VD Nechranice. V případě výstavby MVE bude po většinu roku prakticky veškerý průtok převáděn přes MVE a RP a vztyčené jezové klapky nebudou přelévány. Ve výpočtu výroby je tedy uvažována konstantní hladina horní vody na úrovni 147.80 m n.m., která je zajištěna manipulací klapkovými uzávěry. Z hlediska spádu je tedy rozhodující hladina dolní vody. [3]

2.2. Dolní voda

Ohře ústí do Labe v jezové zdrži jezu Lovosice. Protože práh starého mostu v Terežíně je na kótě 144,40 m n.m., není za běžných průtokových stavů voda zpětně vzdouvána z Labe do podjezí nového jezu v Terežíně. [3]



Graf 1 Měrná křivka podjezí

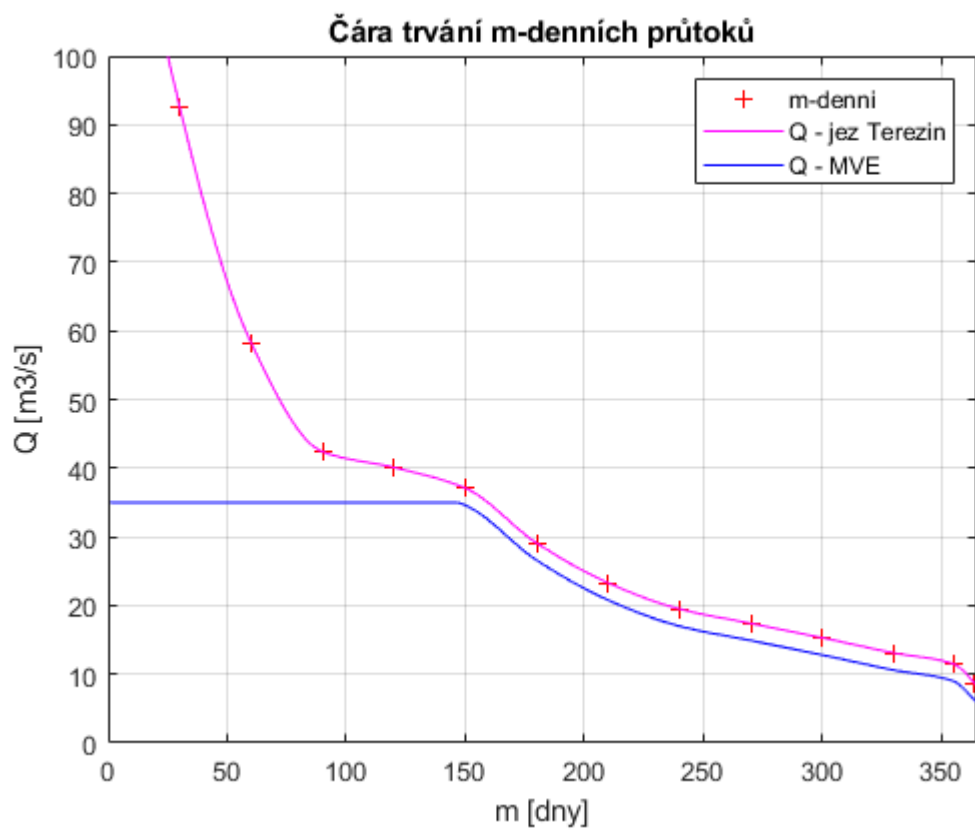
Případným zkapacitněním starého jezu by bylo možné navýšit spád na MVE o cca 1 m, což by mělo za následek výrazné zlepšení ekonomické efektivity investice MVE. Ke zpětnému vzduťi dochází pouze za povodňových situací na Labi. Měrná křivka dolní vody byla převzata z manipulačního řádu Tereziánského jezu.

2.3. Průtokové poměry

VD Nechranice výrazně navyšuje minimální průtoky v suchých obdobích a s ohledem na provoz VE Nechranice s návrhovým průtokem $2 \times 16 \text{ m}^3/\text{s}$ vykazuje čára trvání m-denních průtoků stagnaci okolo průtoku $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Jako podklad pro výpočet výroby byly převzaty hodnoty ze studie Aquatisu, a to ovlivněné odtoky z VD Nechranice. Z hlediska využití hydroenergetického potenciálu je ovlivnění nadlepšenými průtoky přínosné. MZP je uvažován $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pro rybí přechod. [3]

2.4. Návrhové parametry malé vodní elektrárny

V této práci je uvažována varianta dvou turbínových soustrojí. Maximální průtok jedním soustrojím je $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$, tedy celkový průtok vodní elektrárnou $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Rozsah průtoků vodní elektrárnou je od $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ do $35 \text{ m}^3/\text{s}$. Jmenovitý spád je 2,6 m, avšak může kolísat v rozpětí od 1,9 m do 2,8 m. Obě turbíny mají stejnou velikost OK. Při souběhu obou soustrojí je průtok rovnoměrně rozdělen mezi obě turbíny. Průměr OK a provozní otáčky jsou předmětem zkoumání této práce. Snahou je najít optimální velikost OK a provozních otáček z hlediska výroby elektrické energie.



Graf 2 Čára trvání m-denních průtoků

3. ZAŘÍZENÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

3.1. Propelerová turbína

Jedná se o přetlakovou axiální turbínu, obdobně jako je Kaplanova turbína. Lopatky rozváděcího kola jsou natáčivé, avšak rozdílem jsou pevné lopatky oběžného kola. Odpadá tedy komplikované hydraulické ovládání těchto lopatek. Následkem je značně jednodušší konstrukční řešení a nižší výrobní náklady. Lopatky mohou být součástí náboje oběžného kola (jeden odlitek), spíše jsou však připojeny pomocí šroubů a mohou být přestaveny za klidu soustrojí podle aktuální hydrologických poměrů v dané lokalitě a daném čase. Toto přestavení tedy umožňuje zvýšení účinnosti. Propelerové turbíny je vhodné použít na lokalitách s málo proměnnými průtoky a spády, protože průběh křivky účinnosti je při změně průtoku výrazně strmý. Často jsou tyto turbíny pro svou stavební a investiční nenáročnost používány v malých vodních elektrárnách, zejména u mini- a mikro-zdrojů. K získání většího provozního rozsahu, tedy dosažení vyšších účinností při nižším nebo naopak vyšším průtoku, lze použít frekvenční měnič, který umožňuje variabilní změnu provozních otáček soustrojí. [4]



Obrázek 2 Oběžné kolo propelerové turbíny s pevnými lopatkami DIVE

3.2.Frekvenční měnič

Frekvenční měnič je zařízení, které slouží k přeměně elektrického proudu s určitou frekvencí na elektrický proud s jinou frekvencí. Měnič frekvence lze rozdělit na čtyři hlavní části: usměrňovač, meziobvod, střídač a řídicí mikro počítač. U vodních elektráren ho lze využít k regulaci turbín pomocí změny otáček. U soustrojí nižších výkonů lze snížit investiční náklady na strojní zařízení tím, že použijeme elektrickou část k regulaci. Průtok turbínou se při tomto typu regulace nemění. Mění se otáčky při zachování stejné frekvence. Použitím frekvenčního měniče získáváme větší provozní rozsah turbíny, můžeme tedy turbínu provozovat ve větším rozsahu průtoků. Nevýhodou je zahrnutí dalšího prvku do sestavy vodní elektrárny, který snižuje celkovou účinnost soustrojí.

3.3.Generátory s permanentními magnety

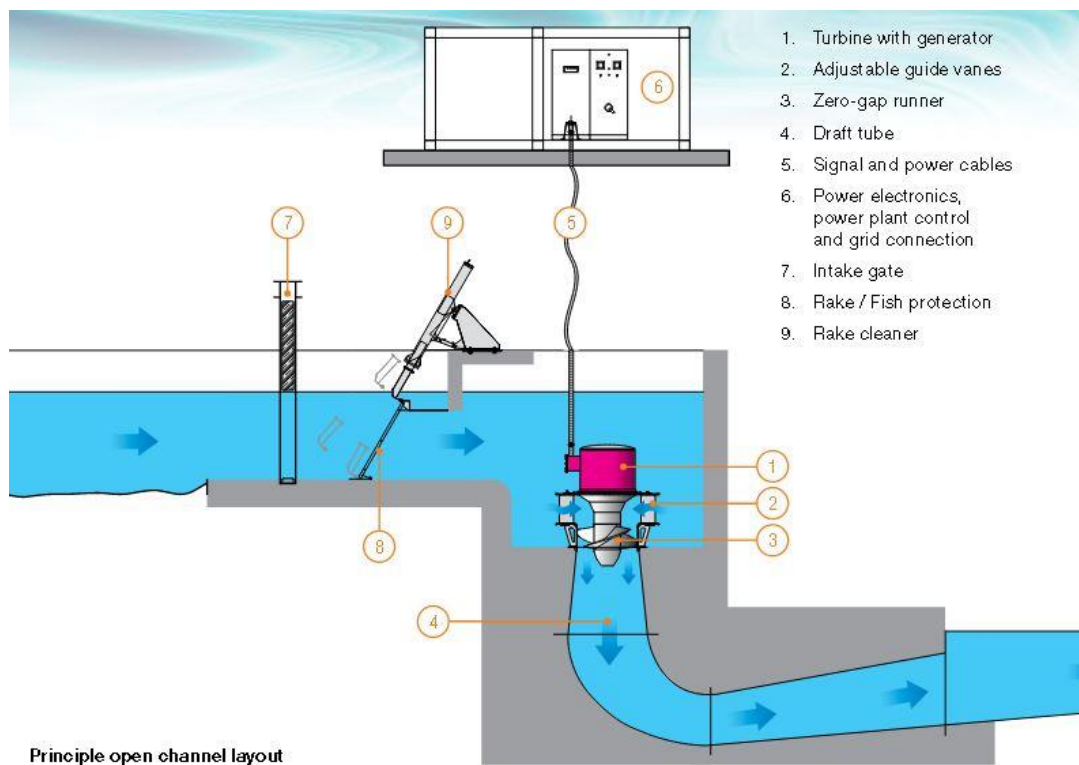
Generátor je zařízení sloužící k přeměně mechanické energie na energii elektrickou. Stator je tvořen vinutím, které je identické se statorovým vinutím klasického synchronního generátoru nebo asynchronního stroje. Je uloženo v magnetickém obvodu složeném z vhodně tvarovaných magnetických plechů. Tyto plechy jsou uchyceny na kostře generátoru. Jako u asynchronních a klasických synchronních strojů je zde klíčový počet pólů. Tento počet pólů určuje jmenovité (synchronní) otáčky. Stroj je prezentován jako synchronní. To mimo jiné znamená, že při práci na síti stroj musí mít jmenovité (synchronní) otáčky, stejné jako je frekvence sítě.

Konstrukce rotoru je odlišná od klasických synchronních strojů. V případě provozu synchronního stroje na síti se mění velikost i charakter jalového výkonu generátoru se změnou budícího proudu. U PGM chybí budící vinutí v rotoru stroje. Rotor je tvořen pouze permanentními magnety. Není zde tedy potřeba žádný budící proud a nevznikají ztráty vyvolané průchodem budícího proudu. [5]

3.4.Turbíny DIVE

Turbíny německého výrobce „DIVE Turbinen GmbH“ jsou vertikální turbíny s pevným natočením lopatek OK (propelerová turbína). Regulačním mechanismem jsou lopatky RK, které zároveň slouží jako provozní uzávěr. Dalším prvkem regulace jsou proměnné provozní otáčky pomocí frekvenčního měniče. Tyto turbíny využívají generátor s permanentními magnety, který je připojen přímo na hřídel turbíny. Generátor spolu s turbínovým víkem tvoří „keson“, do kterého se nedostane voda. Objem vnitřního

prostoru náboje a přechodového kusu kompenzuje stlačení vzduchu tak, aby bylo zamezeno vniknutí vody k ložiskům. Nátok je tvořen kašnou umístěnou do přivaděče s volnou hladinou nebo betonovou spirálou, použitou pro tlakové proudění. Speciální ložiska umožňují chod turbíny při průběžných otáčkách, aniž by došlo k poškození soustrojí. Turbíny „DIVE“ jsou pomaluběžné a v kombinaci se stále otevřeným oběžným kolem jsou pro vodní živočichy bezpečnější než Kaplanovy turbíny. [6]



Obrázek 3 Schéma MVE s využitím turbín DIVE [6]

4. PRACOVNÍ PARAMETRY VODNÍ TURBÍNY

Vodní turbíny jsou stroje sloužící k přeměně hydraulické energie v jiné formy mechanické energie. Při tomto procesu dochází k hydrodynamickým jevům v traktu turbíny. Změnou pracovních podmínek (tj. při změně spádu, průtoku a otáček) se kvalitativní vlastnosti pracovního procesu nemění. Ke změnám však dochází u jednotlivých hydrodynamických jevů po stránce kvantitativní. Pro konstantní hodnotu pracovních parametrů jsou hydrodynamické jevy kvazistacionární (změny charakteristických veličin probíhají dostatečně pomalu a tuto změnu lze zanedbat), jak z hlediska kvalitativního tak kvantitativního.

4.1. Spád

Z hlediska využití hydroenergetického potenciálu rozlišujeme dva druhy spádů a to hrubý (celkový spád) a užitný (čistý spád). Hrubý spád lze jednoduše určit nivelací. Jedná se o celkový statický spád mezi dvěma profily řeky při nulovém průtoku, které chceme energeticky využít. Užitný spád je rozdíl mezi energetickými výškami před a za vodní turbínou. Přesnou hodnotu určíme přičtením rozdílu rychlostních výšek na začátku a na konci využívaného úseku a odečtením hydraulických ztrát v přívodním a odpadním kanále vodní elektrárny od hrubého spádu (4.1). Pro přetlakové turbíny lze uvažovat ztráty na vtoku, ztráty třením po délce přivaděče, ztráty v česlích, ztráty na vtoku do kašny turbíny a ztráty v odpadu. Ztráty ve spirále a savce jsou zahrnuty v účinnosti turbíny. [7]

$$H = H_b + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2 - \alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} - \sum h_{z_{1-n}} \quad (4.1)$$

kde H je čistý spád, H_b je hrubý spád, $\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2 - \alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g}$ je rozdíl rychlostních výšek a $\sum h_{z_{1-n}}$ je součet všech hydraulických ztrát.

4.2. Průtok

Průtok turbínou odpovídá množství vody protékající daným profilem za jednotku času. V tomto objemu je zahrnuto i množství vody prosáklé ucpávkami a obtokovými kanály. Často používaným pojmem je také hltnost turbíny, tedy maximální průtok turbínou při daném spádu. Kromě základních hodnot mohou být určeny maximální a minimální hodnoty průtoku pro dané otáčky případně hodnoty průtoku turbínou

při chodu naprázdno. Jmenovitý průtok odpovídá průtoku, při němž je dosaženo nejvyšší účinnosti. Určení návrhového průtoku je vodohospodářská úloha, při které musí být zohledněno několik parametrů a to vodnost toku a její kolísání, akumulární a regulační schopnost nádrže, potřeba výroby elektrické energie, investiční a provozní náklady, ale také minimální zůstatkový průtok v toku a ztráty netěsnostmi a průsaky. Obecně je měření průtoku náročný metrologický problém. [8]

4.3. Provozní otáčky

Provozní otáčky vodní turbíny jsou určeny hydraulickým a konstrukčním řešením stroje, ale také použitým typem generátoru a připojením generátoru na hřídel turbíny. Při použití převodu mezi turbínou a generátorem jsou hlavními kritérii pro volbu otáček hydraulické a konstrukční řešení turbíny. Při napojení hřídele generátoru přímo na hřídel turbíny je volba otáček podřízena typu zvoleného generátoru a odpovídajícím synchronním otáčkám. S určením otáček turbíny přímo souvisí i velikost oběžného kola, tedy jeho průměr. Pomocí vztahů pro jednotkové veličiny (5.1) můžeme odvodit vzorec pro průměr oběžného kola v závislosti na otáčkách, spádu a jednotkových otáčkách. [4]

4.4. Účinnost

Účinnost lze definovat jako poměr mechanického výkonu a hydraulického příkonu turbíny, tedy poměr skutečného výkonu k teoretickému výkonu. Celková účinnost zahrnuje všechny hydraulické, objemové a mechanické ztráty. Hodnota účinnosti se u vhodně navržených turbín pro daný spád a průtok pohybuje mezi 0,80 až 0,94. Mechanický výkon předává turbína generátoru, který jej přemění na elektrickou energii. Vlivem vlastních ztrát má generátor účinnost 0,85 až 0,97. Pokud není generátor připojen přímo na hřídeli turbíny, ale je mezi hřídelem turbíny a generátoru převodovka, je nutné zohlednit i účinnost převodovky. Dále dochází k transformaci na vyšší napětí v transformátoru, který má také svou účinnost. Celková účinnost vodní turbíny, převodovky, generátoru a transformátoru je tedy dána vztahem:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (4.2)$$

kde η_c je celková účinnost, η_t je účinnost turbíny, η_g je účinnost generátoru, η_p je účinnost převodovky a η_{tr} je účinnost transformátoru.

Hodnota celkové účinnosti není určena pouze typem turbíny, ale také velikostí turbíny a hydrologickými podmínkami. Se zmenšující se velikostí turbíny klesá kvalita

opracování obtékaných ploch, čímž dochází k poklesu účinnosti. Velmi důležitá je také úroveň hydraulického výzkumu. [8]

4.5. Výkon

Mechanická energie dodávaná hřídelí turbíny za jednotku času určuje mechanický výkon. Výkon se určuje na svorkách generátoru, kde jsou započteny ztráty generátoru, převodovky i setrvačníku, pokud je jím turbína vybavena. Určen je vztahem:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_c \quad (4.3)$$

kde P je výkon, Q je průtok, H je spád a η_c je celková účinnost.

Hydraulický výkon je teoretickým výkonem určeným průtokem vstupním profilem turbíny. Jmenovitý výkon odpovídá mechanickému výkonu při jmenovitých otáčkách a měrné energii. Instalovaným výkonem rozumíme maximální výkon dosažený při optimálních podmínkách provozu. Celkový výkon vodní elektrárny odpovídá součtu výkonů všech soustrojí. Výrobu elektrické energie potom lze stanovit jako výkon dodávaný po určitý čas. [7]

4.6. Sací výška

Sací výška je určujícím parametrem výškového umístění osy turbíny vzhledem k výškové kótě hladiny dolní vody. Jedná se důležitou hodnotu z hlediska potlačení vzniku kavitace, která vzniká, dojde-li k dosažení měrné tlakové energie nasycených vodních par. Při kavitačním napadení dochází k poškození turbíny, především oběžného kola, projevující se rozrušením materiálu a vznikem trhlin. Abychom snížili riziko kavitace na minimum, je nutné dbát na správné založení a umístění turbíny. [4] Výpočet sací výšky pomocí kavitačního součinitele je v této práci prováděn dle následujícího vzorce:

$$H_s = B - \sigma \cdot H - 1 \quad (4.4)$$

kde H_s je sací výška, B je hodnota atmosférického tlaku, σ je kavitační součinitel a H je spád.

5. TURBÍNOVÉ CHARAKTERISTIKY

Charakteristiky vodních turbín slouží k znázornění vztahů mezi parametry vodní turbíny, které můžeme obecně definovat následující funkční závislostí:

$$f(Q, E, n) = 0 \quad (5.1)$$

kde Q je průtok, E je měrná energie a n jsou otáčky turbíny.

Grafickým vyjádřením jsou prostorové plochy. Rozhodující pro pracovní proces jsou závislosti účinnosti a výkonu na průtoku. Zavedením jednotkových veličin můžeme sledovat průběh těchto závislostí při eliminaci vlivu velikosti stroje. Tato úvaha vede k použití funkční závislosti (5.1). Z těchto charakteristik jsou zřejmé základní hydraulické vlastnosti vodní turbíny a její citlivost na změny měrné energie a jejich vliv na změny průtoku turbínou a účinnost turbíny. [4]

5.1. Data potřebná k vytvoření turbínových charakteristik

K vytvoření turbínových charakteristik potřebujeme přesné výsledky měření. Tyto hodnoty lze získat laboratorními měřeními na zkušebním zařízení, které se skládá z několika částí a sice, modelu, technologické části, čidel a vybavení pro záznam výsledků. Pomocí tohoto zařízení simulujeme a zaznamenáváme chování modelu, který je vytvořen v daném měřítku. Využívá se při tom teorie podobnosti. Modelovými zkouškami lze získat parametry P – výkon, Q – průtok, E – měrná energie, n – provozní otáčky, η – účinnost a σ – kavitační součinitel v celé provozní oblasti.

Další možností, jak získat podklady pro vytvoření turbínových charakteristik je simulace pomocí matematického modelu metodou konečných objemů. K popisu proudění jsou použity Navier-Stokesovy rovnice v kombinaci s rovnicí kontinuity. Dále je třeba vytvořit 3D model a definovat okrajové podmínky. Tyto výpočty jsou velmi náročné na výpočetní výkon, avšak z hlediska ekonomického, energetického a časového jsou méně náročné, než zkoušky na fyzikálních modelech. Pro tuto práci byla vstupní data získána pomocí matematického modelu. Tato data poskytl Ing. Martin Kantor, Ph.D. z fakulty strojního inženýrství Univerzity J. E. Purkyně a jedná se o turbínu z projektu TAČR Inovativní návrh kompaktního soustrojí Kaplanovy mikro-turbíny.

Charakteristiku můžeme vytvořit také pomocí hodnot, které naměříme přímo na konkrétní lokalitě. Jedná se o obdobu fyzikálního modelu s tím rozdílem, že měříme hodnoty, které odpovídají skutečným hydrologickým poměrům pro skutečnou velikost oběžného kola. [9]

5.2. Jednotkové veličiny

Pomocí jednotkových veličin můžeme porovnávat turbíny rozdílných velikostí pracujících při odlišných hodnotách měrné energie. Využíváme přitom přepočtových vztahů na teoretický stroj o průměru oběžného kola $D = 1$ m, pracující na spádu $H = 1$ m při použití tekutiny s hustotou $\rho = 1 \text{ kg.m}^{-3}$. Byly definovány a odvozeny vztahy pro n_{11} – jednotkové otáčky, Q_{11} – jednotkový průtok, P_{11} – jednotkový výkon a M_{11} – jednotkový výkon. Jednotkové veličiny si zachovávají svůj rozměr dle fyzikálního významu (jednotkové otáčky [$1.\text{min}^{-1}$], jednotkový průtok [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$], jednotkový výkon [kW] a jednotkový moment – [N.m]). [4]

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \rightarrow n = \frac{n_{11} \cdot \sqrt{H}}{D} \quad (5.2)$$

kde n_{11} jsou jednotkové otáčky, D je průměr oběžného kola, H je spád a n jsou otáčky.

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \rightarrow Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \quad (5.3)$$

kde Q_{11} je jednotkový průtok, D je průměr oběžného kola, H je spád a Q je průtok.

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} \rightarrow P = P_{11} \cdot D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (5.4)$$

kde P_{11} je jednotkový výkon, D je průměr oběžného kola, H je spád a P je výkon.

$$M_{11} = \frac{M}{D^3 \cdot H} \rightarrow M = M_{11} \cdot D^3 \cdot H \quad (5.5)$$

kde M_{11} je jednotkový moment, D je průměr oběžného kola, H je spád a M je moment.

S takto vyjádřenými jednotkovými veličinami můžeme dále pracovat. [9]

Součástí této diplomové práce je vytvoření skriptu, který vykreslí hodnoty získané pomocí CFD výpočtu a vhodně je proloží plochou, ze které následně interpoluje další hodnoty. Aby nedocházelo k vnášení chyb, které vznikají při prokládání ploch, je prokládána pouze plocha pro jednotkový moment. Ostatní veličiny (účinnost a jednotkový výkon) jsou přepočteny podle jednotkového momentu z následujících vztahů:

$$P = M \cdot \omega = \frac{M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi}{60} = \frac{M_{11} \cdot D^3 \cdot H \cdot n_{11} \cdot \sqrt{H} \cdot 2 \cdot \pi}{60 \cdot D} = \frac{M_{11} \cdot D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot n_{11} \cdot \pi}{30} \quad (5.6)$$

kde P je výkon, M je moment, ω je úhlová rychlost, n jsou otáčky, M_{11} je jednotkový moment, n_{11} jsou jednotkové otáčky, D je průměr oběžného kola a H je spád.

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} = \frac{\frac{M_{11} \cdot D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot n_{11} \cdot \pi}{30}}{D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} = \frac{M_{11} \cdot D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}} \cdot n_{11} \cdot \pi}{30 \cdot D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} = \frac{M_{11} \cdot n_{11} \cdot \pi}{30} \quad (5.7)$$

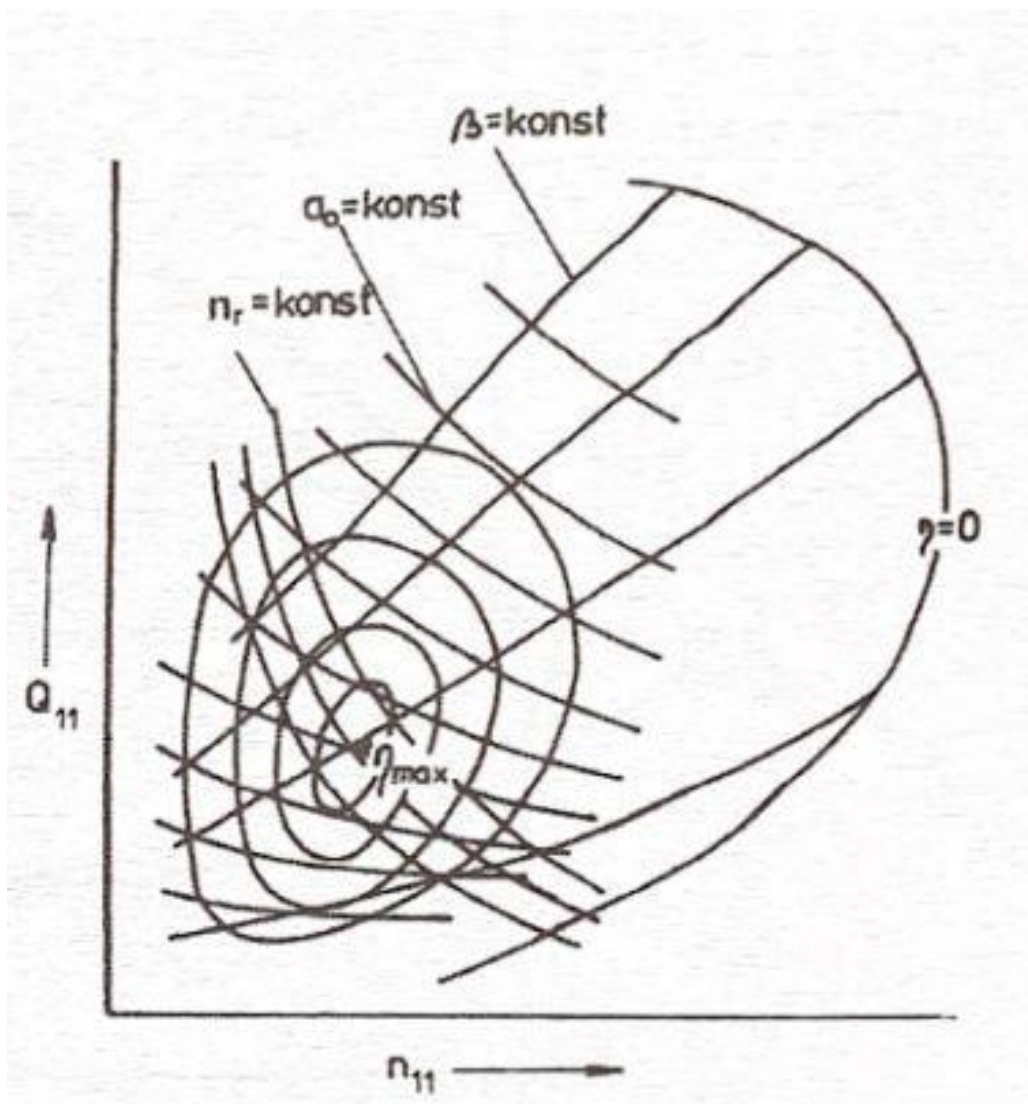
kde P_{11} je jednotkový výkon, kde P je výkon, M_{11} je jednotkový moment, n_{11} jsou jednotkové otáčky, D je průměr oběžného kola a H je spád.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P}{H \cdot \rho \cdot g \cdot Q} = \frac{M \cdot \omega}{H \cdot \rho \cdot g \cdot Q} = \frac{M \cdot n \cdot 2 \cdot \pi}{H \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot 60} = \\ &= \frac{M_{11} \cdot D^3 \cdot H \cdot n_{11} \cdot \sqrt{H} \cdot 2 \cdot \pi}{H \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \cdot D \cdot 60} = \frac{M_{11} \cdot n_{11} \cdot \pi}{Q_{11} \cdot \rho \cdot g \cdot 30} \end{aligned} \quad (5.8)$$

kde η je účinnost, P je výkon, M je moment, ω je úhlová rychlost, n jsou otáčky, H je spád, Q je průtok, D je průměr oběžného kola, n_{11} jsou jednotkové otáčky, Q_{11} je jednotkový průtok a M_{11} je jednotkový moment.

5.3. Univerzální charakteristika

Univerzální charakteristika představuje jednoduché grafické znázornění základních parametrů vodní turbíny pro turbínu o průměru $D = 1$ m, pracující při spádu $H = 1$ m. Tato charakteristika je znázorněna grafy, ve kterých hodnoty na ose X odpovídají jednotkovým otáčkám a hodnoty na ose Y jednotkovému průtoku. Na ose Z jsou pomocí kontur znázorněny odpovídající hodnoty účinnosti, jednotkového výkonu, otevření RK, jednotkového momentu a kavitačního součinitele, pro dané jednotkové otáčky a jednotkový průtok. [9] [10]



Obrázek 4 Ukázka universální charakteristiky

5.4. Provozní charakteristika

Provozní charakteristiku získáme přepočtem z universální charakteristiky dle vzorců (5.9) a (5.10) pro turbínu o daném průměru oběžného kola a daných provozních otáčkách. Tato charakteristika je znázorněna grafy, ve kterých hodnoty na ose X odpovídají průtoku turbínou a hodnoty na ose Y spádu. Na ose Z jsou pomocí kontur znázorněny odpovídající hodnoty účinnosti, výkonu, otevření RK, momentu na hřídeli turbíny, otáček turbíny a sací výšky, vše pro daný průtok a spád. [11]

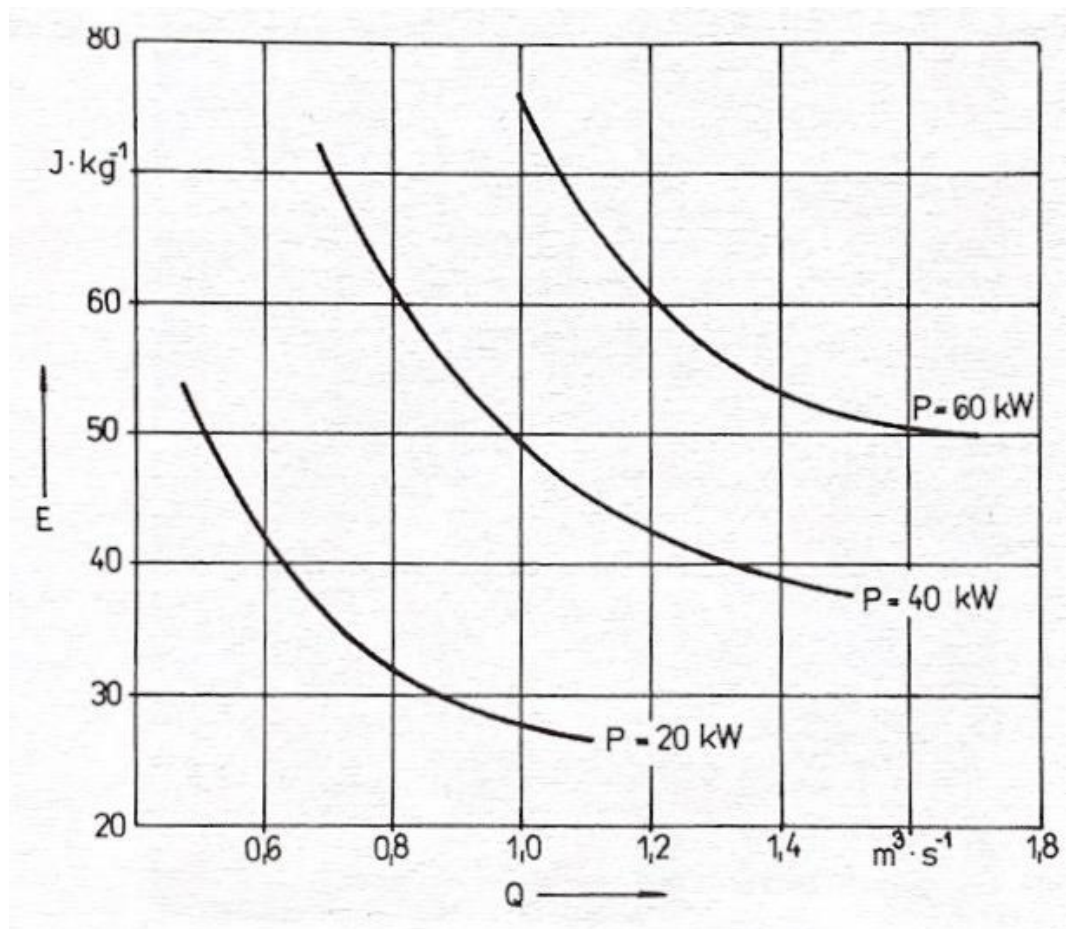
Vzorce pro přepočet z univerzální charakteristiky jsou následující:

$$H = \left(\frac{n \cdot D}{n_{11}} \right)^2 \quad (5.9)$$

kde H je užitný spád, n jsou provozní otáčky turbíny, D je průměr oběžného kola a n_{11} jsou jednotkové otáčky.

$$Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \quad (5.10)$$

kde Q je průtok turbínou, Q_{11} je jednotkový průtok, D je průměr oběžného kola a H je užitný spád.

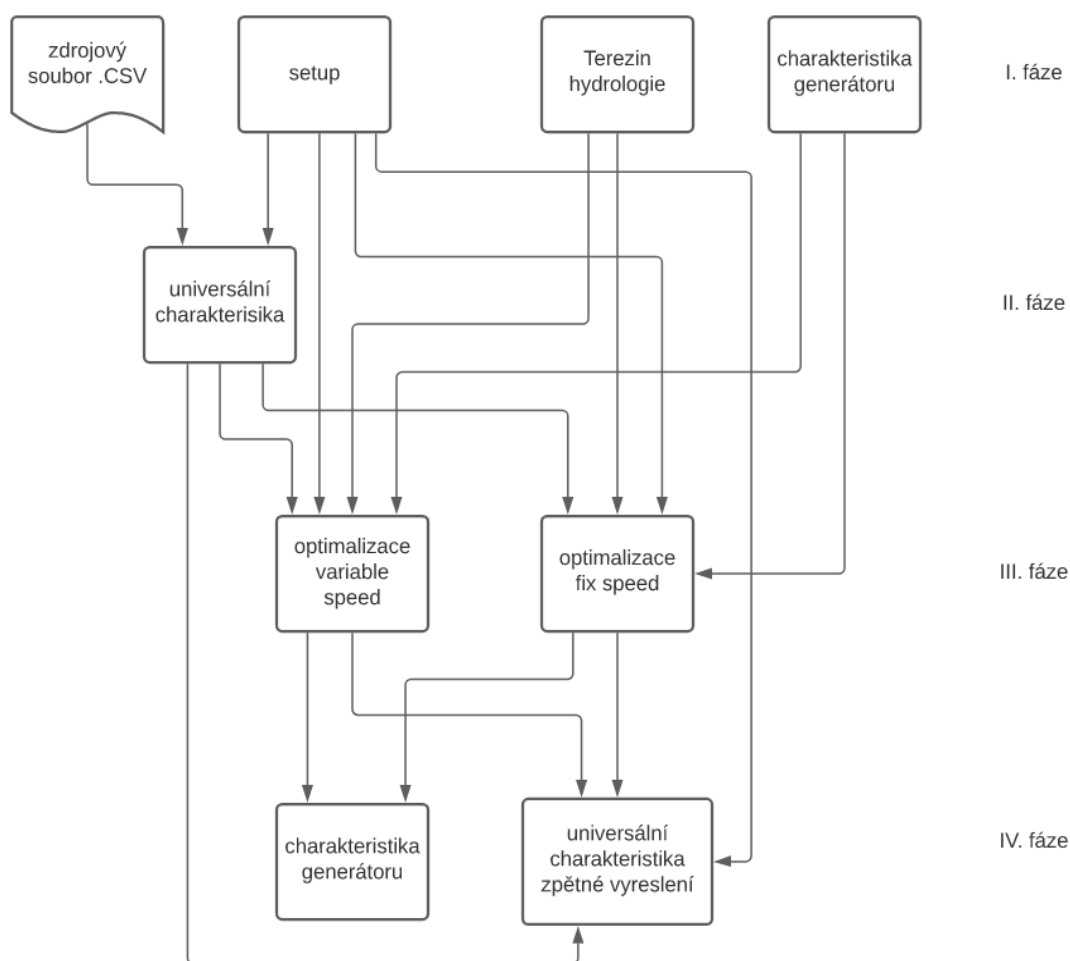


Obrázek 5 Ukázka provozní charakteristiky

6. ZPRACOVÁNÍ TURBÍNOVÝCH CHARAKTERISTIK

6.1. Struktura výpočtu

Aby vytvořené programy fungovali správně, je třeba dodržet pořadí spuštění dle následujícího diagramu. Šipky znázorňují výstupy z programů, které slouží jako vstupy do dalších programů. V jednotlivých fázích mohou být programy spuštěny v libovolném pořadí.



Obrázek 6 Flow chart pořadí spuštění jednotlivých programů

6.2. Vstupní data

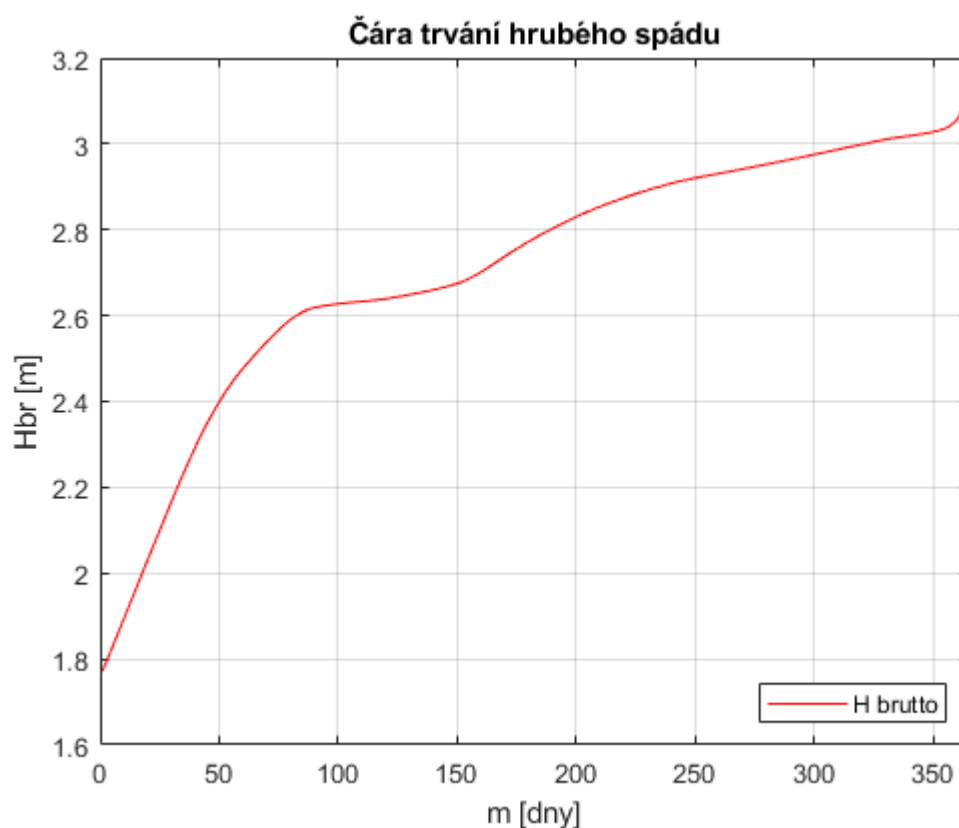
Zdrojová data, ze kterých je vytvořena universální charakteristika jsou načtena z tabulkového souboru ve formátu .CSV. Aby program správně fungoval a načel hodnoty pro všechny veličiny, které zpracovává, musí soubor obsahovat takto nazvané sloupce:

- eval_alfa_RK – (natočení RK)
- eval_beta_OK – (natočení OK)
- eval_eta – (celková účinnost)
- eval_eta_OK – (účinnost OK)
- eval_eta_Savka – (účinnost savky)
- eval_eta_RK – (účinnost RK)
- eval_sigma0 – (kavitační součinitel)
- n11 – (jednotkové otáčky)
- eval_Q – (průtok turbínou)
- eval_H – (spád)
- eval_M – (moment na hřídeli)
- loadTrue_false – (načtení hodnoty 0/1)

Pořadí sloupců může být libovolné.

6.3. Program – Terezín hydrologie

Pro výpočet výroby a posouzení vhodného návrhu turbíny jsou důležitá hydrologická data lokality, pro kterou je návrh zpracováván. Do programu je zadána řada m-denních průtoků. Dále je zadána měrná křivka dolní vody, která je pro lokalitu Terezín převzata z manipulačního řádu. Posledním parametrem je kóta hladiny horní vody, která je konstantní, protože pohyblivým uzávěrem můžeme udržovat stálou hladinu horní vody. Takto zadanými daty jsou proloženy křivky a interpolovány hodnoty pro 365 bodů průtoků a jim odpovídajícím spádům. Průtok vodní elektrárnou je získán odečtením MZP od průtoku v řece. Následně je průtok omezen maximálním průtokem vodní elektrárny, který může být dán hlností turbín nebo povolením k nakládání s povrchovými vodami.



Graf 3 Čára trvání hrubého spádu

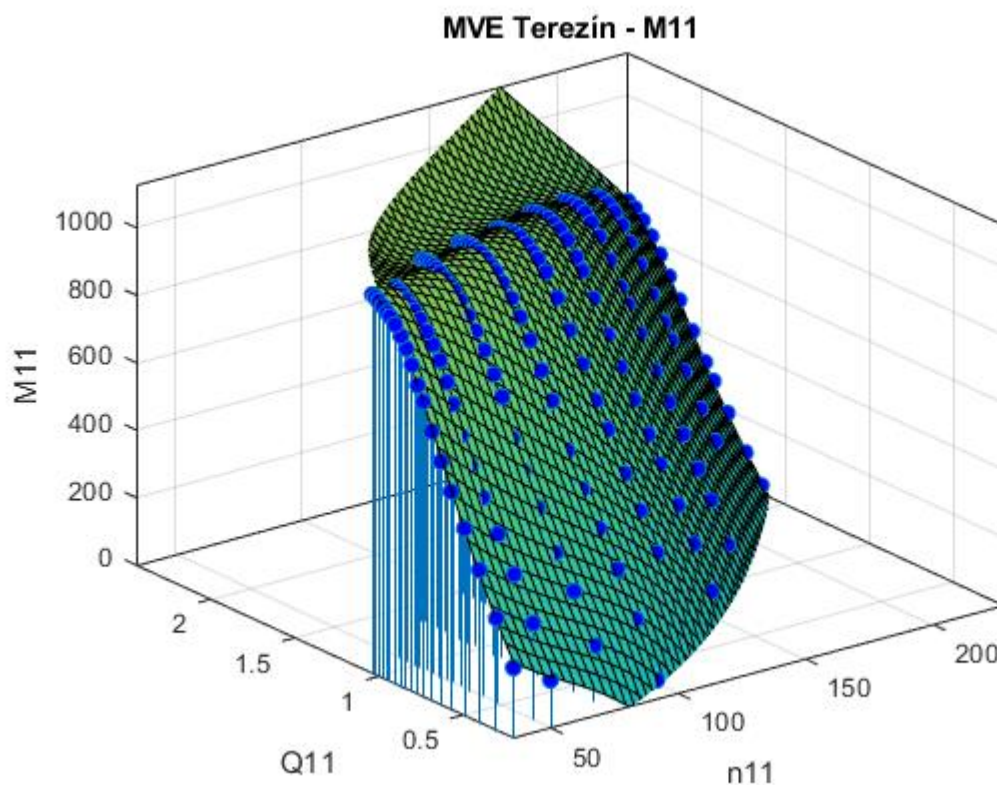
6.4. Program – setup

V tomto programu je zadán název zdrojového souboru, který slouží jako podklad pro zpracování universální charakteristiky. Název souboru je následně použit k pojmenování výstupních souborů z jednotlivých programů, ale také k pojmenování grafů. Dále je specifikován průměr OK a spád z modelového měření. V tomto programu také specifikujeme limity grafů provozních charakteristik pro variantu „fix speed“ a „variable speed“. Výsledné grafy jsou poté ve stejném měřítku a můžeme snadněji porovnávat vykreslované veličiny.

6.5. Program - univerzální charakteristika

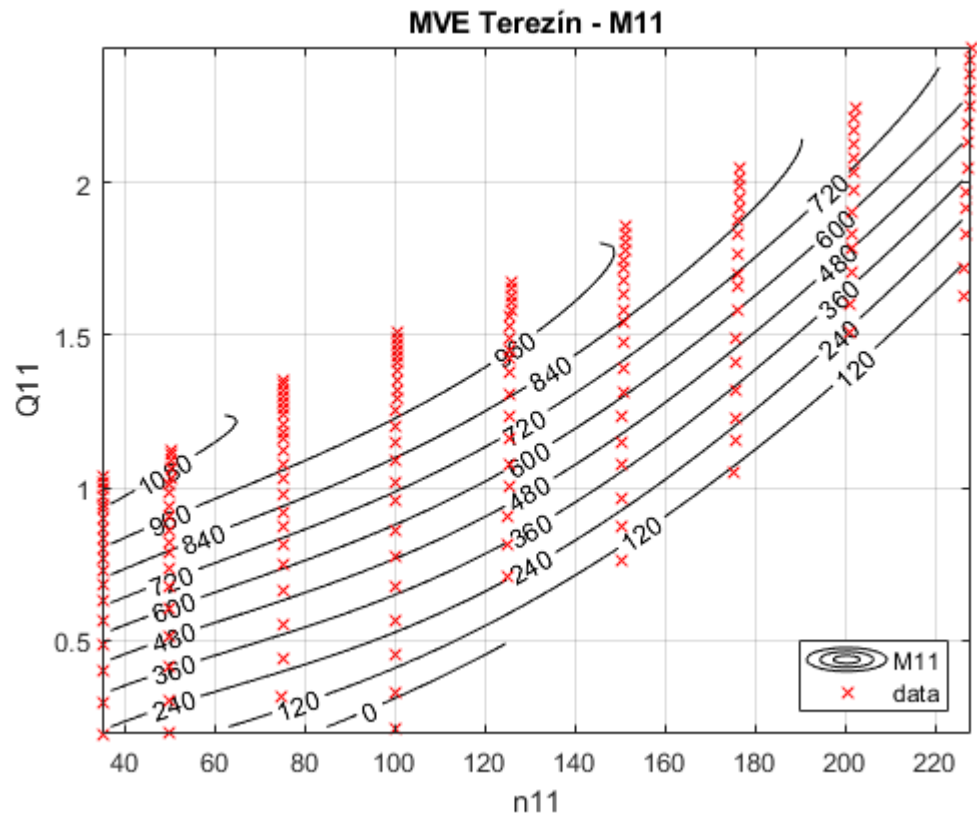
Tento skript načte zadaný vstupní soubor, a přepočte data dle vzorců pro jednotkové veličiny. Program následně vykreslí data do trojrozměrného grafu s kartézským systémem souřadnic, ve kterém osa X představuje jednotkové otáčky, osa Y jednotkový průtok a osa Z natočení RK, kavitační součinitel sigma, jednotkový moment a dílčí účinnosti savky, oběžného kola a rozváděcího kola. Následně těmito body proloží 3D

plochy. Data pro vznik plochy účinnosti a výkonu jsou dopočtena pomocí vzorců (5.6) a (5.8) z jednotkového momentu.



Graf 4 Plocha jednotkového momentu

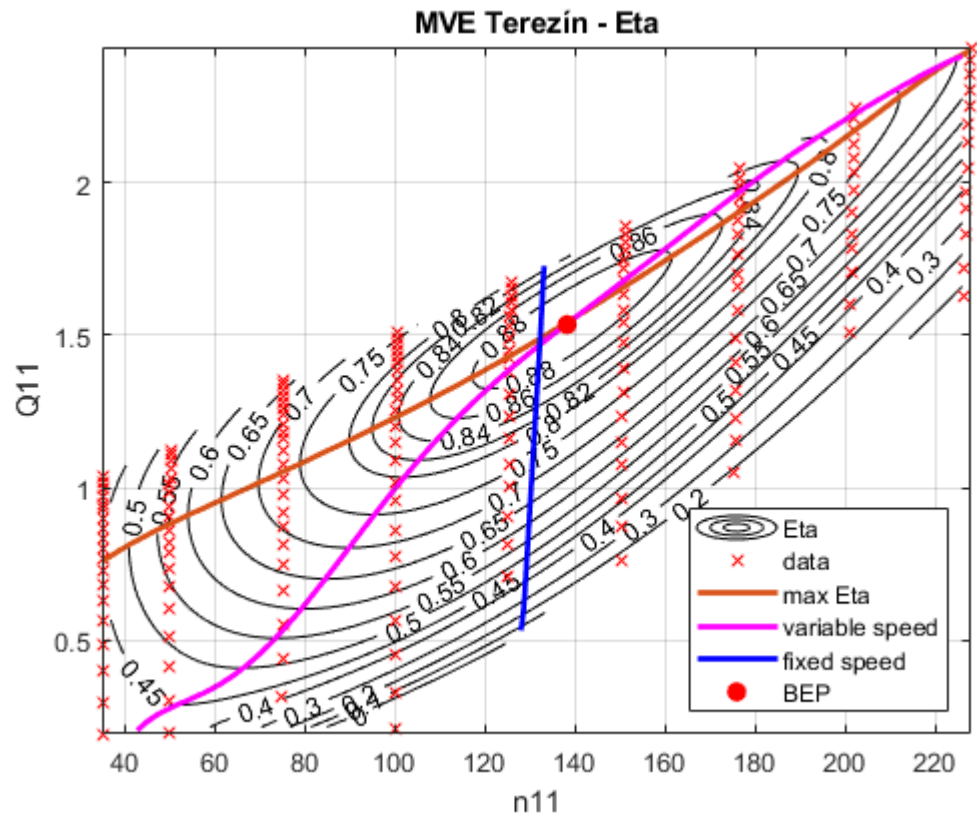
Plocha vykreslena mimo proložená data (modré body) je dále oříznuta tak, aby nedocházelo k výpočtům s extrapolovanými hodnotami.



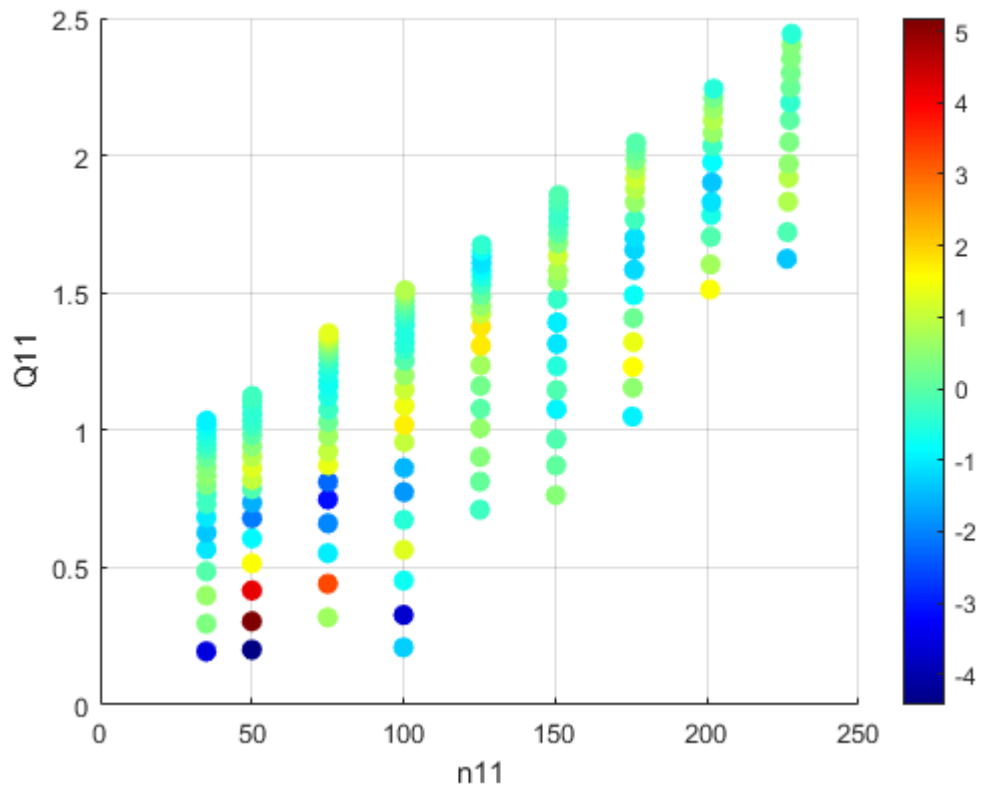
Graf 5 Půdorysný pohled jednotkového momentu

V účinnostní charakteristice program vyhledá body s nejvyšší účinností pro každé Q11 ze zadaného rozsahu. Spojením těchto bodů vznikne křivka optimální vazby Q11 a n11 a zároveň křivka, po které se pohybujeme v universální charakteristice, máme-li turbínu s frekvenčním měničem, tedy variantu „variable speed“.

Program dále počítá odchylku v účinnosti mezi zadanými hodnotami a hodnotami odečtenými z proložené plochy. Průměr absolutních hodnot odchylek účinnosti vyšel 0,798 %, medián z absolutních hodnot odchylek vyšel 0.565% a RMS absolutních hodnot odchylek vyšel 1.147 %.



Graf 6 Půdorysný pohled účinnosti

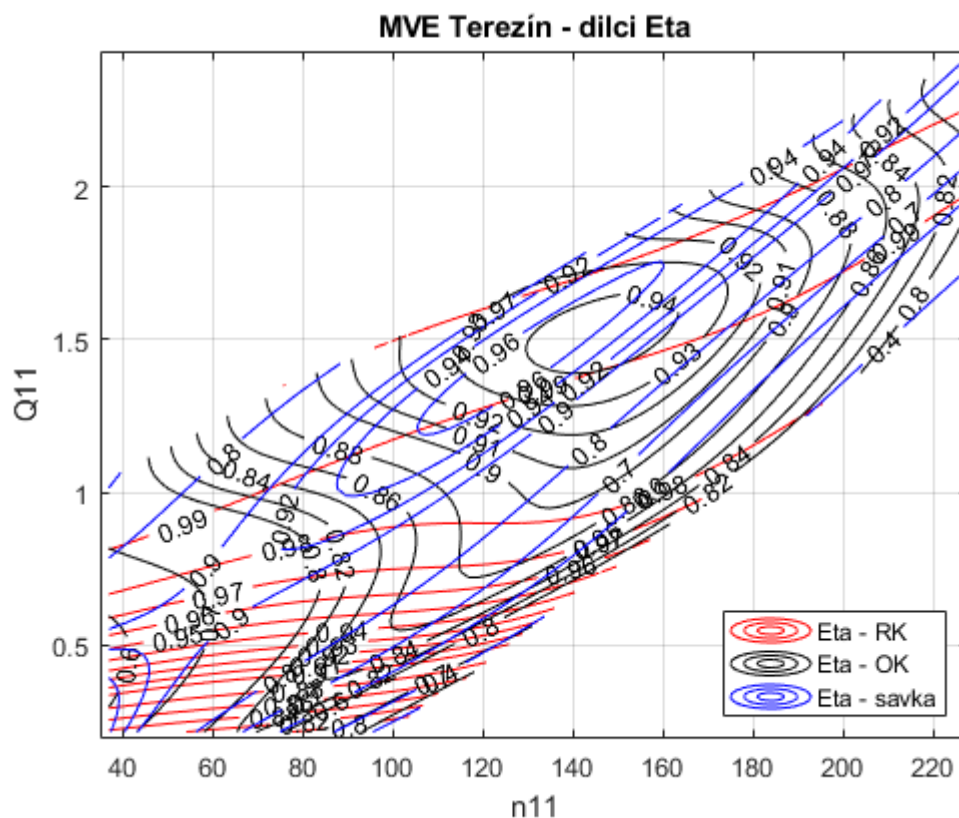


Graf 7 Procentuální odchylky mezi zadanými daty a proložením

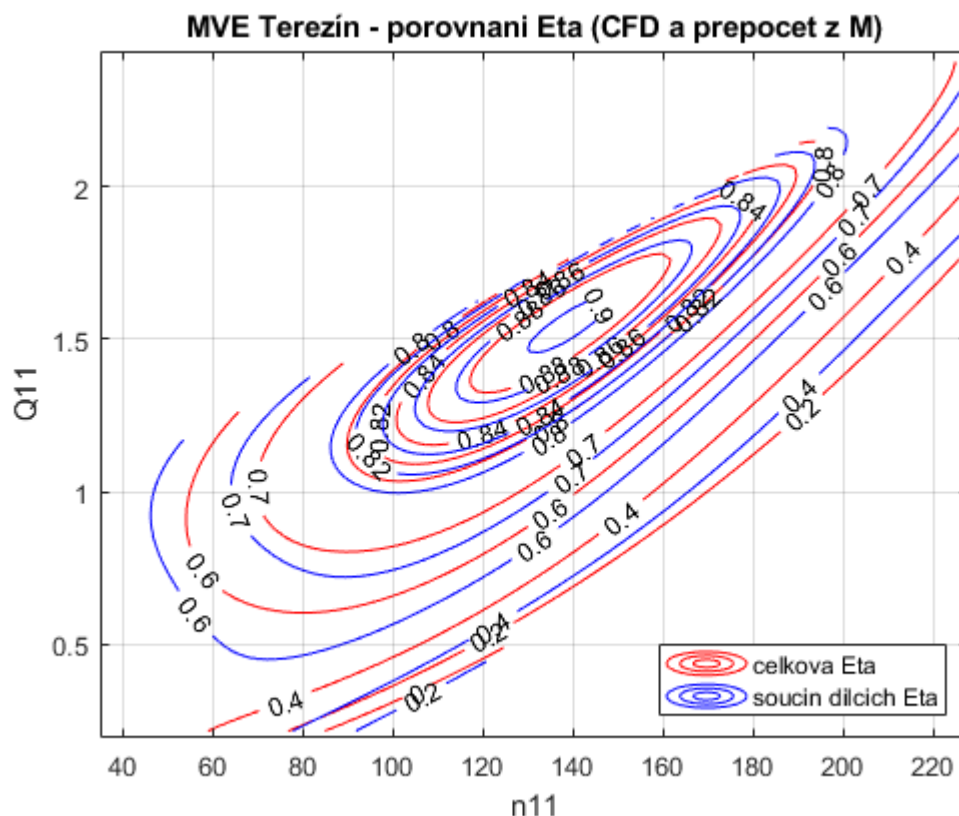
Data vyhodnocena jako nevhodná nebo chybná, mohou být z výpočtů jednoduše odstraněna ve zdrojovém souboru přepsáním hodnoty ve sloupci „loadTrue_false“ z 1 na 0. Tímto zůstávají zdrojová data zachována, avšak nevstupují jako podklad do skriptu.

Dále program vykreslí dílčí účinnosti jednotlivých prvků turbínové sestavy, a sice savky, RK a OK (grafy součástí přílohy). Z průběhu účinnosti charakteristiky RK (Graf 42) je patrné, že účinnost klesá s přivírajícím se natočením RK. Oblast maximální účinnosti OK (Graf 41) odpovídá přibližně poloze BEP a při odchýlení od tohoto bodu ve všech směrech klesá. Účinnost savky (Graf 43) se rychleji mění se změnou n_{11} , tedy s měnícím se spádem.

Součin ploch dílčích účinností, tedy celková účinnost turbíny, byl porovnán s plochou účinnosti získané přepočtem z M11. Tvarově vycházejí obě plochy podobné avšak s odchylkou, která je způsobena nepřesnostmi vzniklými při prokládání ploch dílčích účinností.



Graf 8 Kontury dílčích účinností

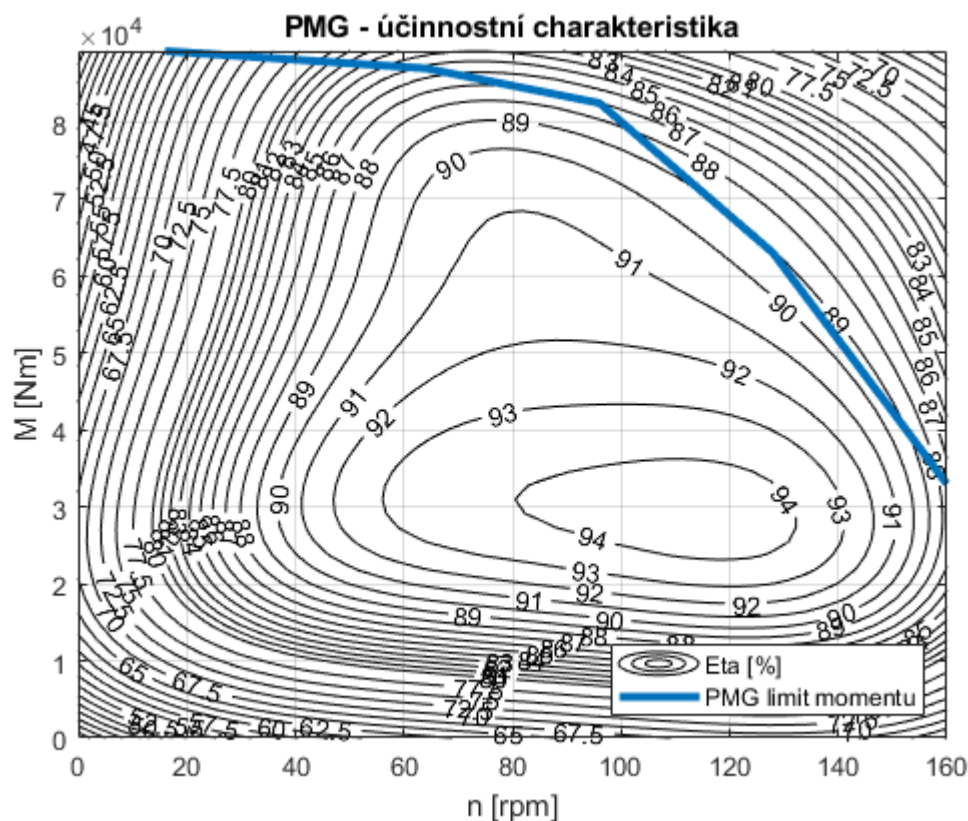


Graf 9 Porovnání kontur účinností z CFD a přepočtených z M11

Universální charakteristiky pro ostatní veličiny tedy výkon, RK a kavitační součinitel jsou součástí přílohy této diplomové práce.

6.6. Program – charakteristika generátoru

Charakteristika generátoru je obdobná provozní charakteristice turbíny. Rozdílem jsou vykreslované veličiny na osách, kde osa X odpovídá provozním otáčkám a osa Y momentu na hřídeli generátoru. Program vykreslí do 3D grafu hodnoty získané od výrobce generátorů a vhodně je proloží plochou. Získáme tak účinnostní charakteristiku generátoru v závislosti na provozních otáčkách turbíny a momentu na hřídeli. Hodnoty mimo oblast zadaných hodnot jsou extrapolovány, tudíž nelze ověřit jejich věrohodnost, avšak provozním rozsahem turbíny se pohybujeme uvnitř oblasti zadaných hodnot. S takto zpracovanou charakteristikou generátoru je dále pracováno v dalších skriptech.



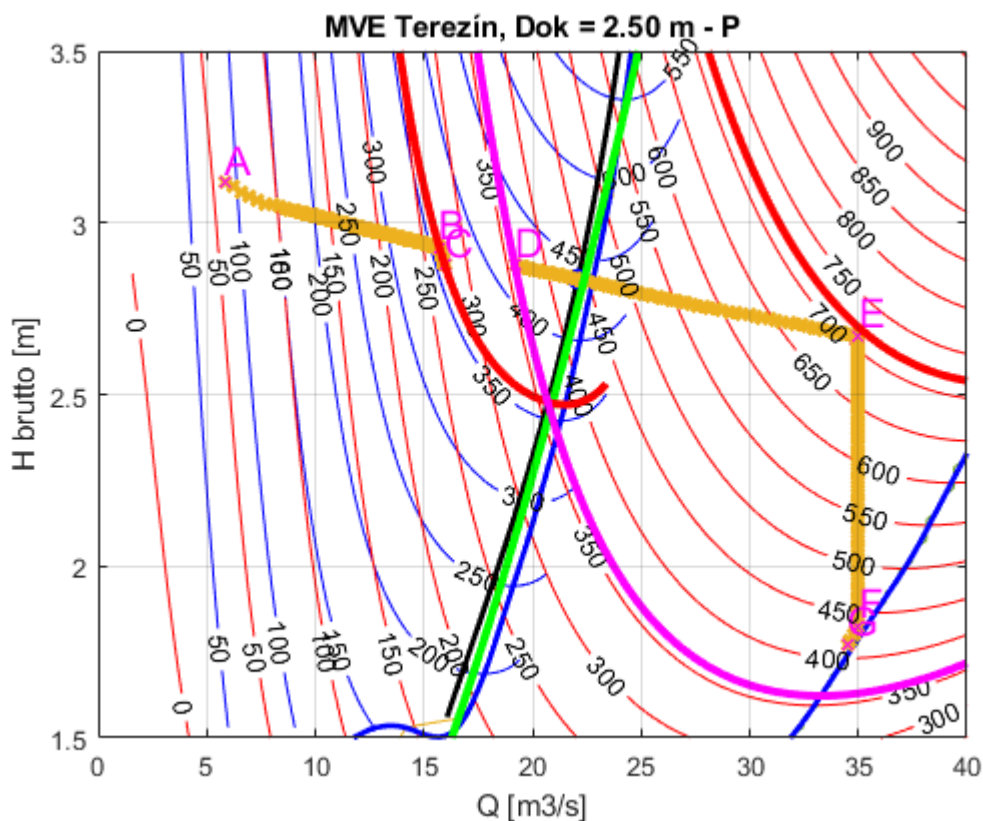
Graf 10 Účinnostní charakteristika PMG generátoru

6.7. Program – optimalizace „variable speed“

V tomto programu je vytvořena provozní charakteristika turbíny s frekvenčním měničem. Plochy pro jednotlivé veličiny vznikají přepočtem podle vzorců (5.9) a (5.10) z křivky v universální charakteristice. Důležitou z hlediska výroby je výkonová charakteristika turbíny. Do této charakteristiky jsou vykresleny body získané skriptem Terezin hydrologie. V charakteristice jsou vyznačena omezení maximálního výkonu turbíny, maximální výkon generátoru a hranice mezi výkonovou charakteristikou jednoho a dvou soustrojí. Dále je zavedeno omezení maximálního natočení RK. Program pracuje s variantou, že obě turbíny jsou stejně velké a při souběhu se průtok dělí v poměru 50:50.

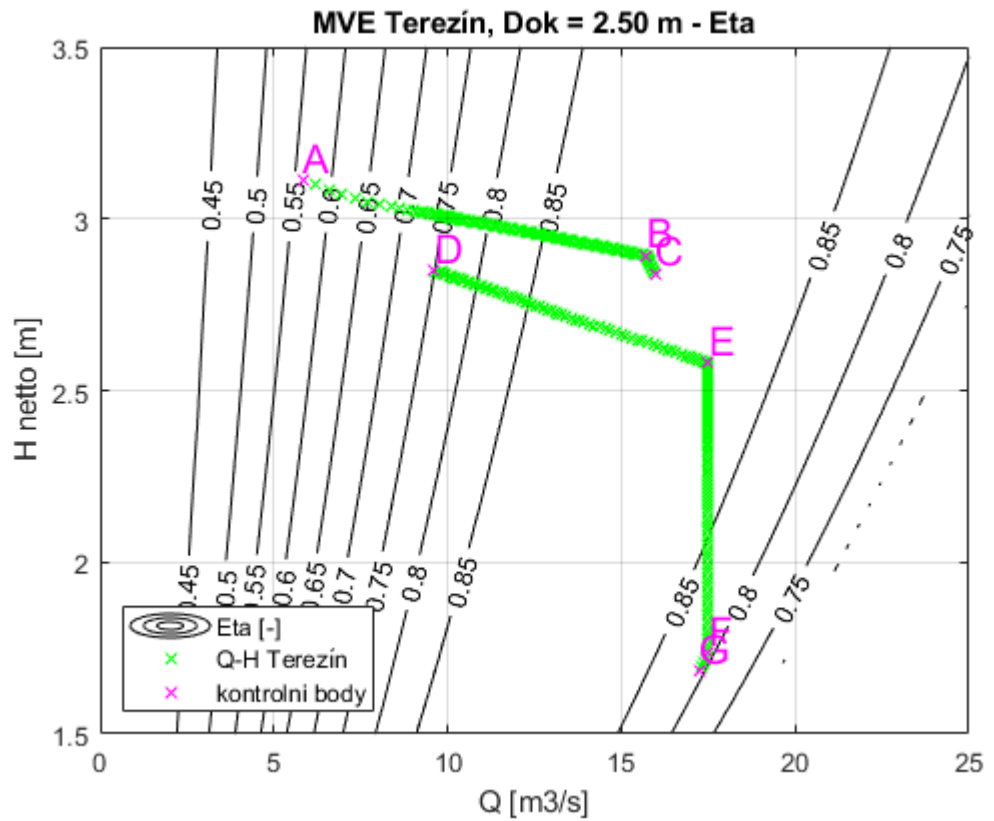
Tato omezení jsou vykreslena v Grafu 11. Červená kontura odpovídá výkonové charakteristice jedné turbíny a modrá kontura výkonové charakteristice dvou turbín. V grafu byly vykresleny body pro kontrolu a zároveň lepší orientaci mezi jednotlivými grafy. Body pro jednotlivé stavy průtoku a hrubého spádu jsou znázorněny jako oranžové křížky. Červené křivky znázorňují maximální výkon generátoru, modré křivky maximální výkon turbíny, zelená křivka odpovídá maximálnímu natočení RK, černá křivka představuje přechod mezi výkonovou charakteristikou jedné a dvou turbín a fialová

křivka maximální výkon generátoru jedné turbíny při provozu dvou soustrojí. S rostoucím průtokem a klesajícím spádem je v tomto případě jako první dosaženo omezení výkonu generátoru (bod B). Omezujeme tedy průtok turbínou a necháváme nevyužitý průtok přepadat přes jez. V momentě, kdy je pro průtok v řece výkon dvou turbín větší než maximální výkon generátoru jedné turbíny (bod C), spouštíme druhé soustrojí a dělíme průtok rovnoměrně mezi oba stroje (bod D). Dále s rostoucím průtokem pokračujeme až na průtokové omezení, dané povolením k nakládání s vodami, v tomto případě hodnotu 35 m³/s (bod E). Od tohoto okamžiku jsou v provozu obě soustrojí s maximálním průtokem 17,5 m³/s na stroji a výkon nám klesá z důvodů poklesu spádu. Posledním omezením je maximální otevření RK (bod F), kterého je dosaženo při velkých průtocích a nízkých spádech, kdy hlnost turbíny klesá. Křivky maximálního výkonu turbíny, maximálního natočení RK a přechodová křivka mezi výkonovou charakteristikou jedné a dvou turbín jsou blízko sebe, z čehož můžeme usoudit, že turbína je vhodně navržena tak, aby při dosažení maximálního výkonu na jedné turbíně došlo k přepnutí na provoz dvou turbín bez poklesu výkonu.

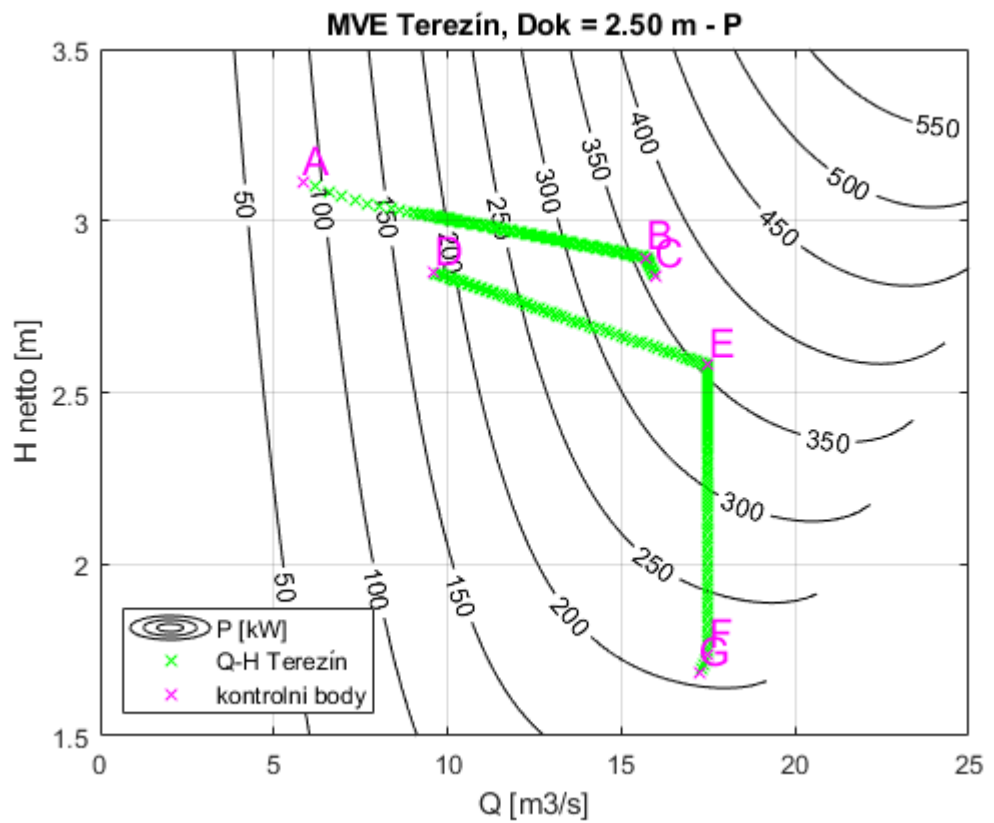


Graf 11 Výkonová charakteristika s omezeními VS

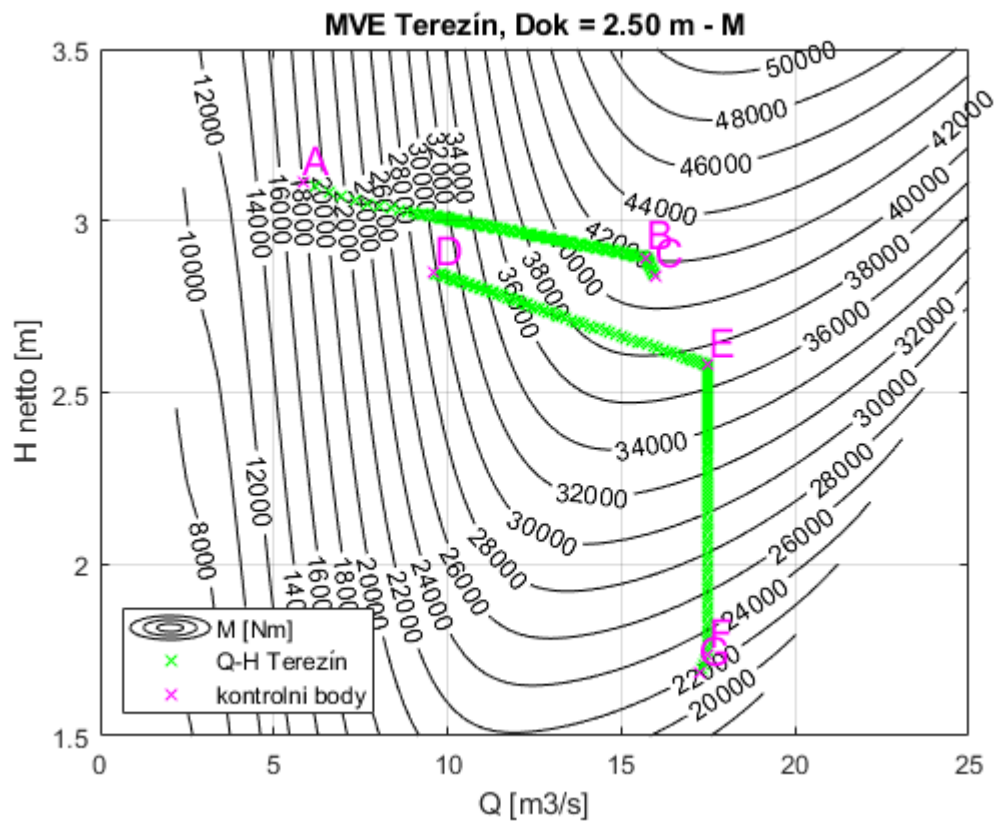
Následně program vykreslí provozní charakteristiky pro jednotlivé veličiny, tedy účinnost, výkon, moment na hřídeli, otáčky turbíny, otevření RK a sací výšku. Tyto veličiny jsou vykresleny pro H_{netto} , neboli spád mezi vstupním a výstupním profilem turbíny.



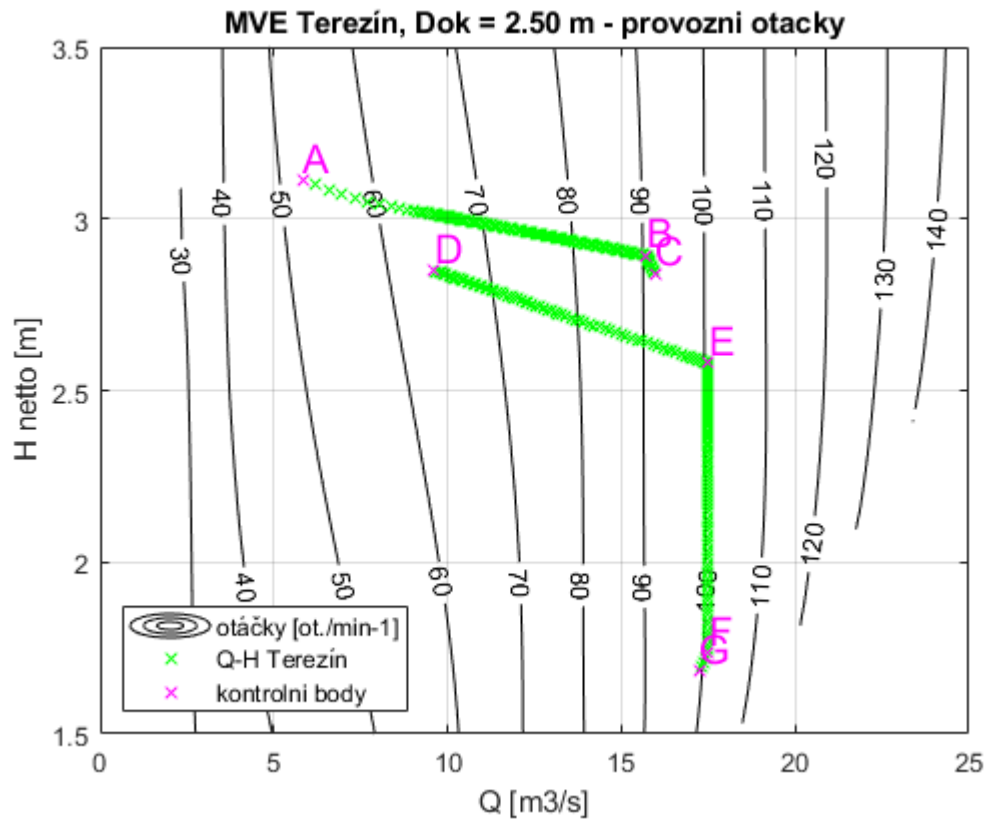
Graf 12 Účinnostní charakteristika VS



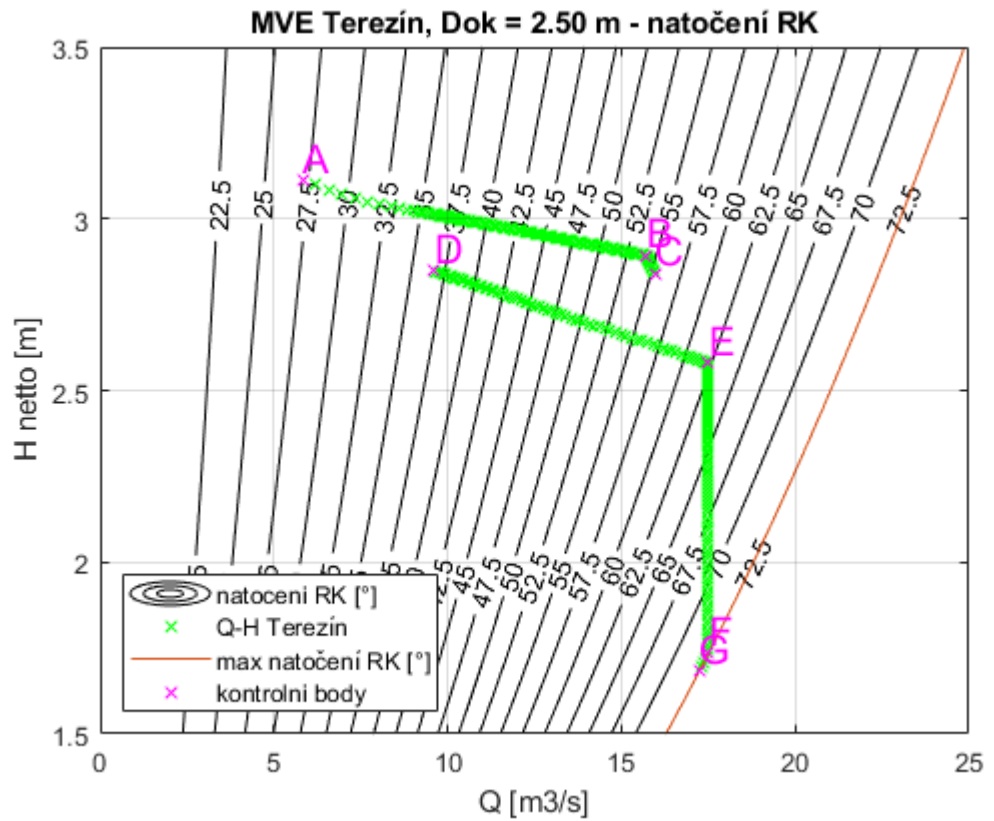
Graf 13 Výkonová charakteristika VS



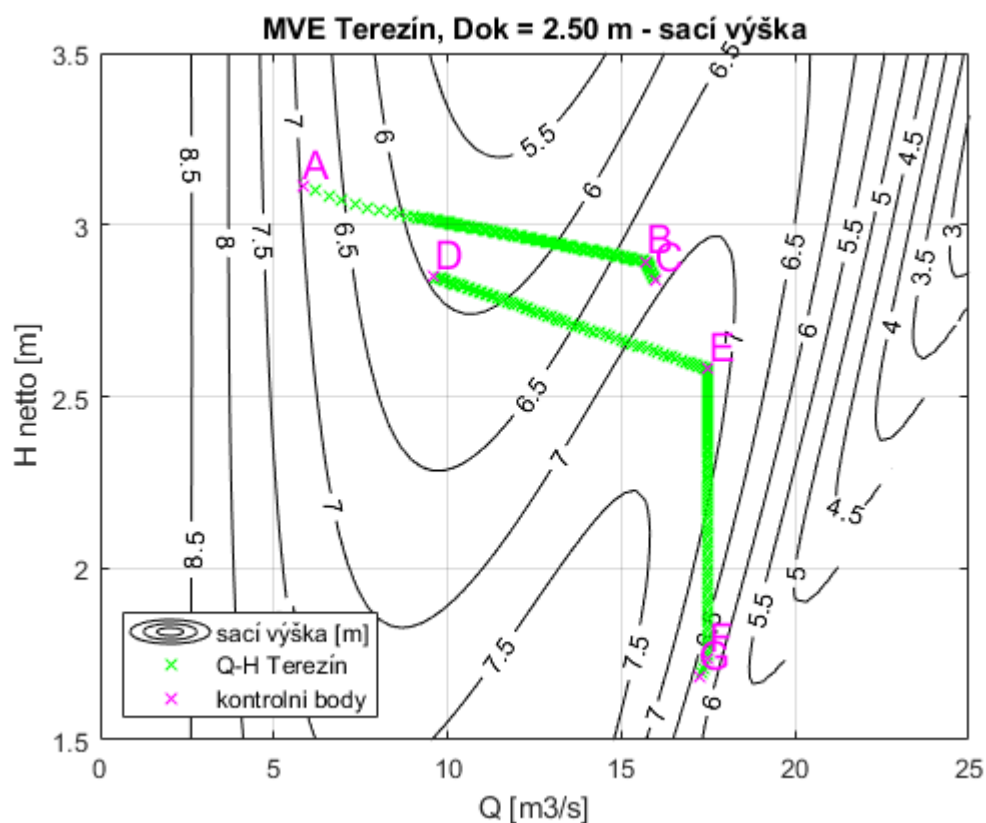
Graf 14 Momentová charakteristika VS



Graf 15 Provozni otáčky turbíny VS

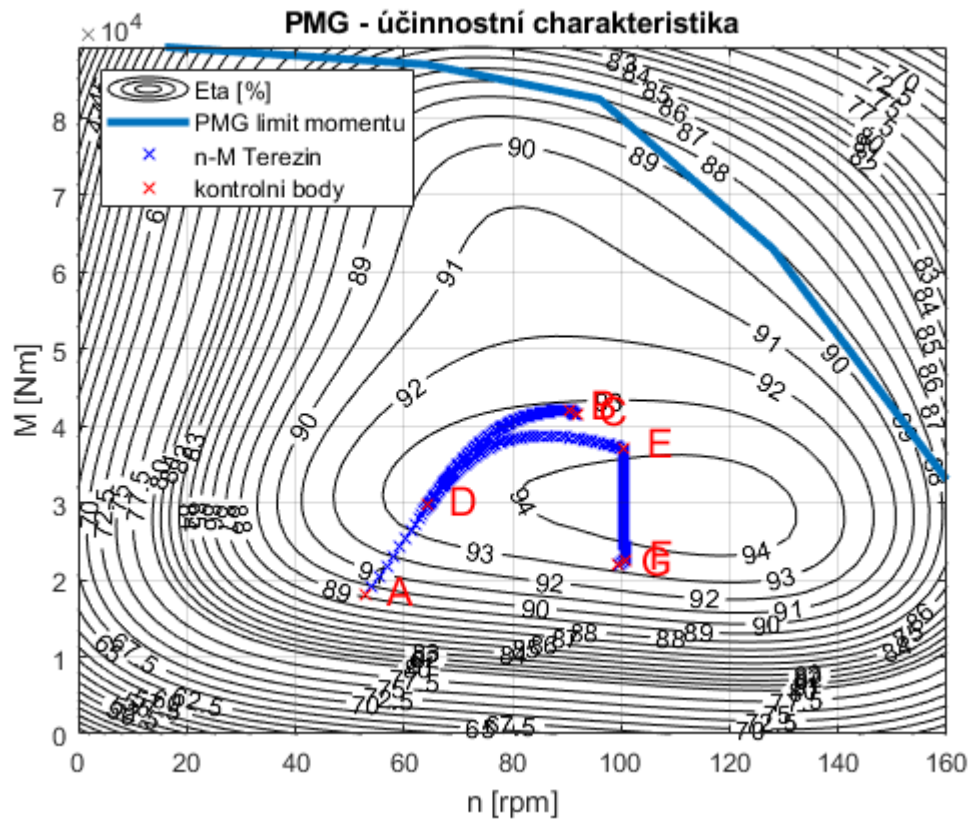


Graf 16 Natočení RK VS

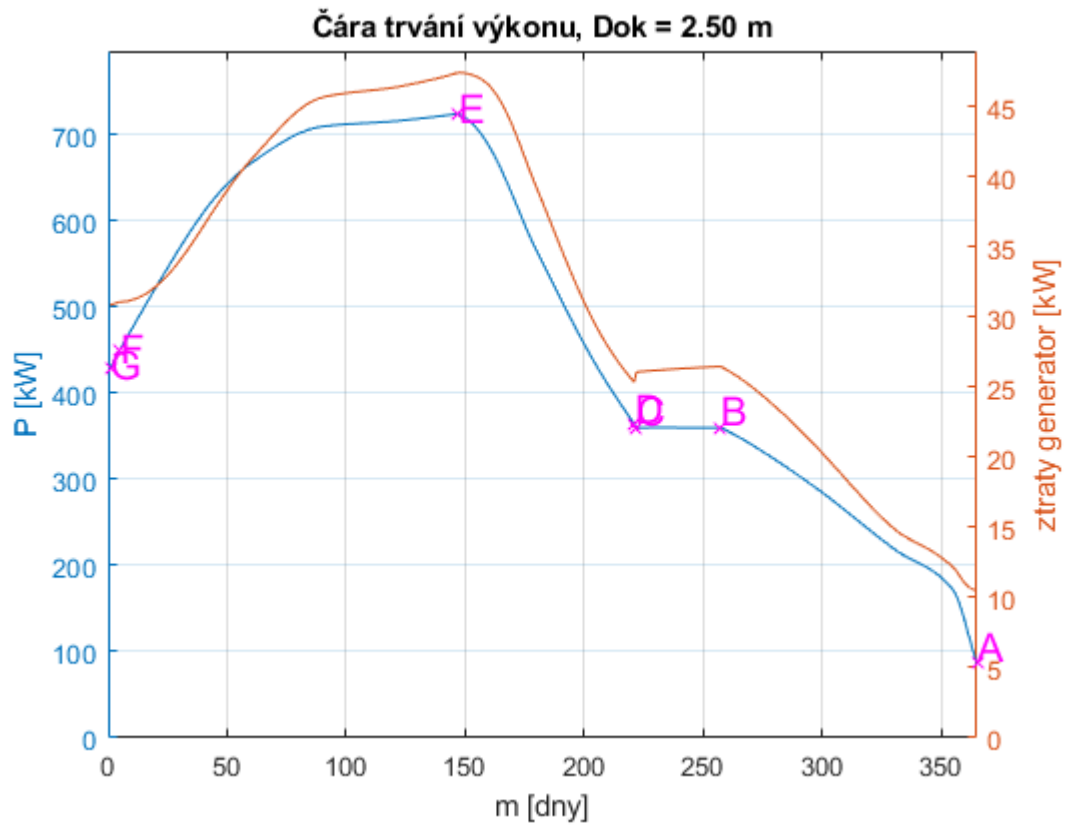


Z charakteristik pro moment a otáčky byly odečteny hodnoty pro dané body Q-H Terezín. Pomocí těchto bodů byla následně odečtena účinnost generátoru z účinnostní charakteristiky PMG generátoru.

Roční výroba elektrické energie byla počítána z hodnot odečtených pro Q-H body lokality Terezín z výkonové charakteristiky. Tyto hodnoty výkonu jsou pro čistý spád se zohledněním ztrát na vtoku turbíny. Dále byly hodnoty výkonu vynásobeny účinností generátoru a účinností frekvenčního měniče, uvažované konstantně 97 % pro všechny průtokové stavy. Ztráty na generátoru byly dopočteny vynásobením turbínového výkonu doplňkem účinnosti generátoru do 100 %. Součástí skriptu je také vytvoření grafů čáry trvání výkonu, čáry trvání čistého spádu a čáry trvání průtoku.

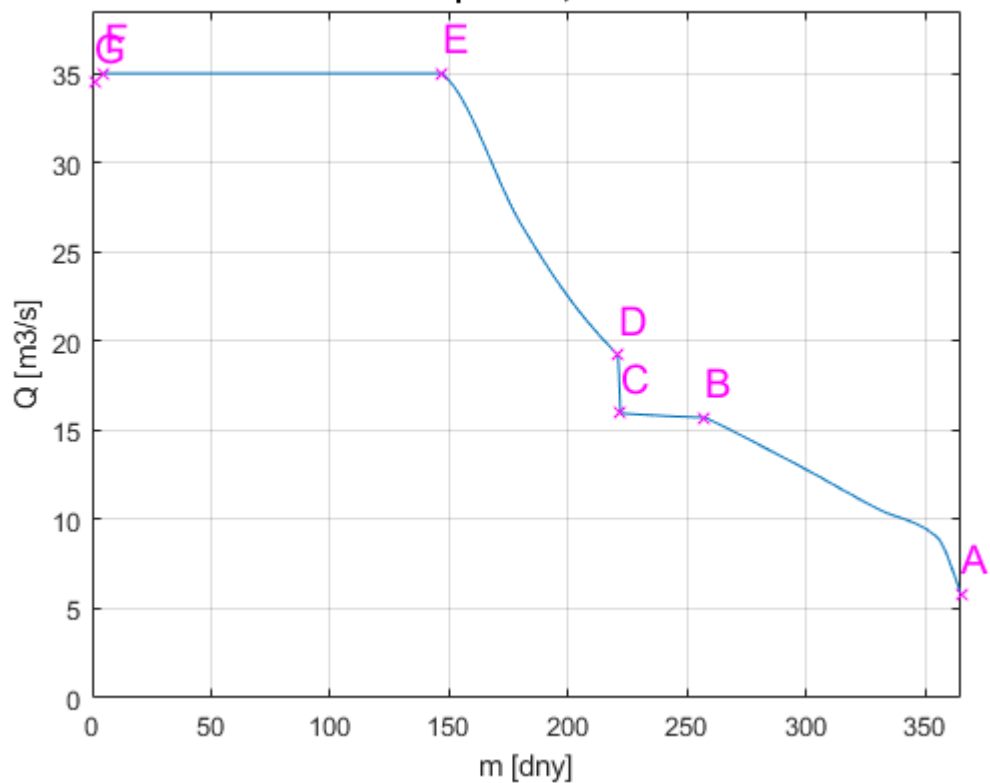


Graf 18 Účinnostní charakteristika PMG generátoru VS



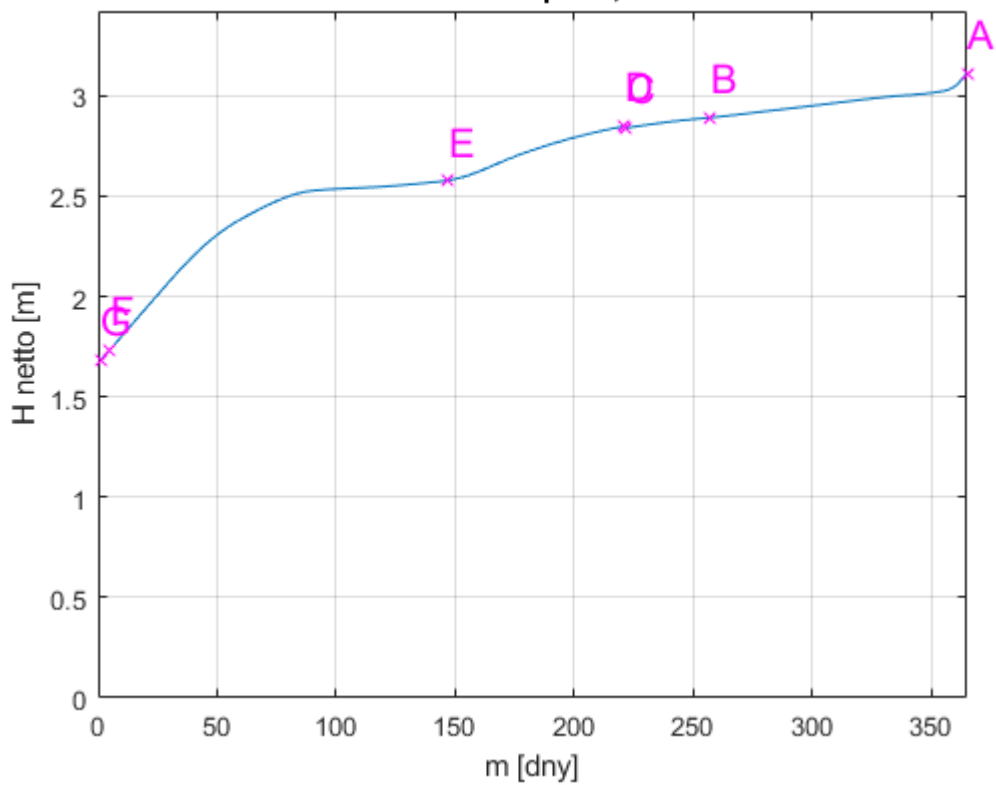
Graf 19 Čára trvání výkonu VS

Čára trvání průtoku, Dok = 2.50 m



Graf 20 Čára trvání průtoku VS

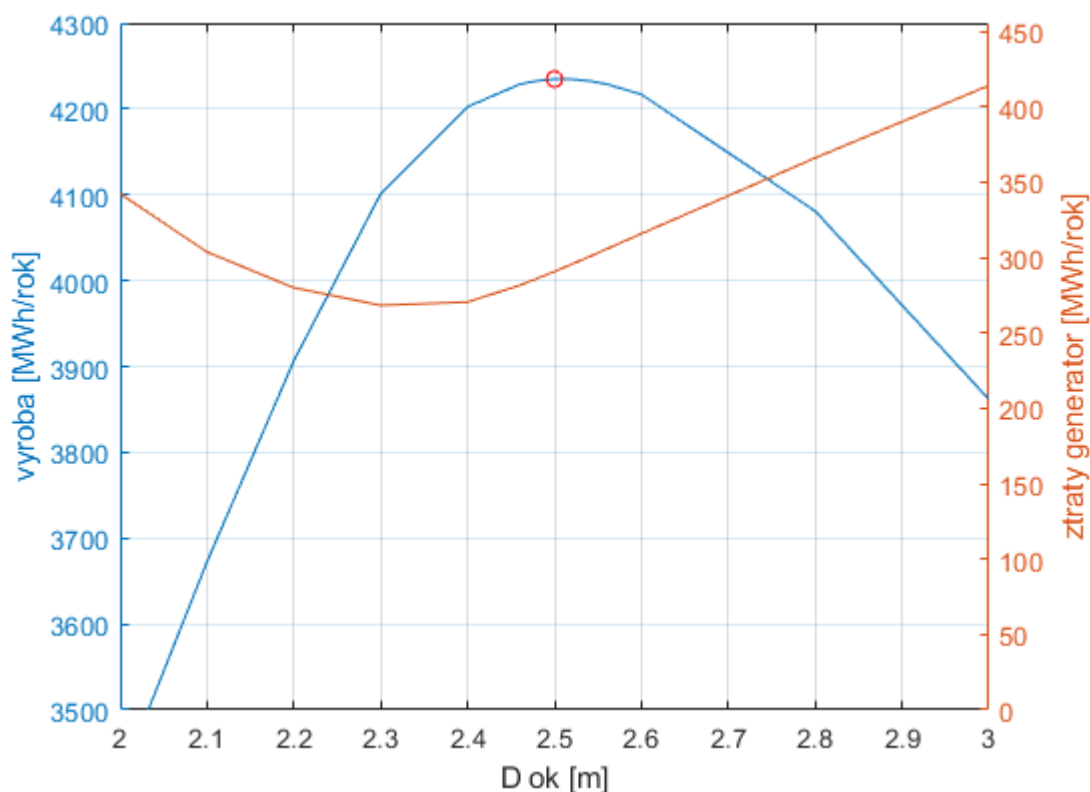
Čára trvání čistého spádu, Dok = 2.50 m



Graf 21 Čára trvání čistého spádu VS

Z čáry trvání výkonu (Graf 19) je patrné, že mezi body B a C dochází k omezení maximálním výkonem generátoru, což můžeme pozorovat i v čáře trvání průtoku (Graf 20), jelikož dochází k regulaci průtoku turbínou a přepadu vody přes jez.

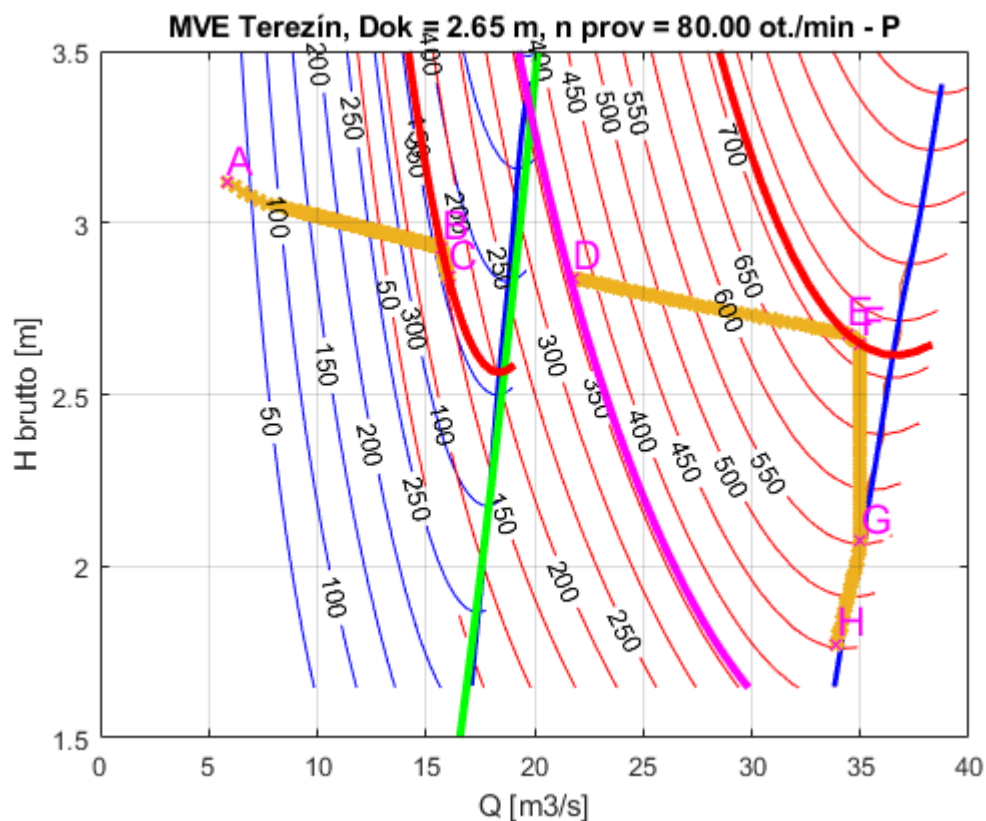
Výše popsaný postup výpočtu ve skriptu byl proveden pro velikosti průměru OK v rozsahu od 2 m do 3 m. Cílem skriptu je najít optimální velikost průměru OK z hlediska roční výroby elektrické energie. Jako optimální byl nalezen průměr $D_{ok} = 2,5$ m.



Graf 22 Závislost roční výroby a ztrátového výkonu na průměru OK

6.8. Program – optimalizace „fix speed“

Tento program pracuje podobně jako program optimalizace "variable speed", nejprve tedy přepočte dle vzorců (5.9) a (5.10) hodnoty pro jednotlivé veličiny, které jsou následně použity k proložení ploch. Opět je jako první vytvořena výkonová charakteristika, která je důležitá k výpočtu celkové roční výroby elektrické energie. Do této charakteristiky jsou zanesena všechna omezení, jako je maximální výkon turbíny, maximální výkon generátoru, hranice mezi výkonovou charakteristikou jedné a dvou turbín a maximální natočení RK. Program pracuje s variantou, že obě turbíny jsou stejně velké a při souběhu se průtok dělí v poměru 50:50.

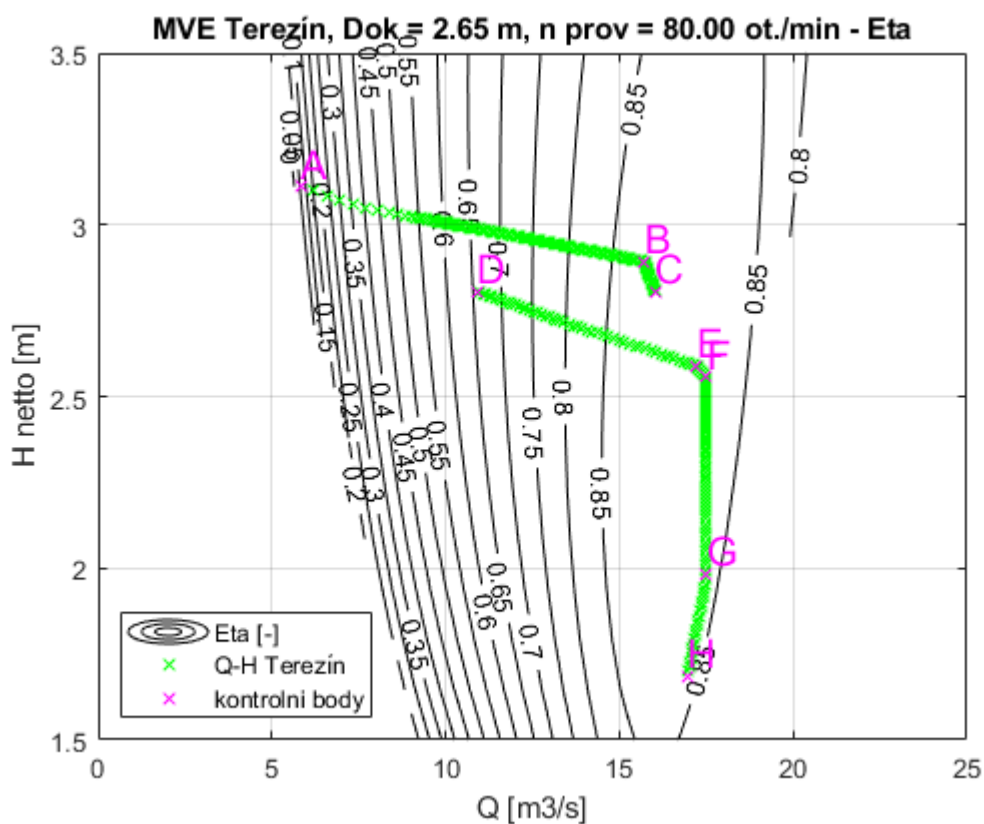


Graf 23 Výkonová charakteristika s omezeními FS

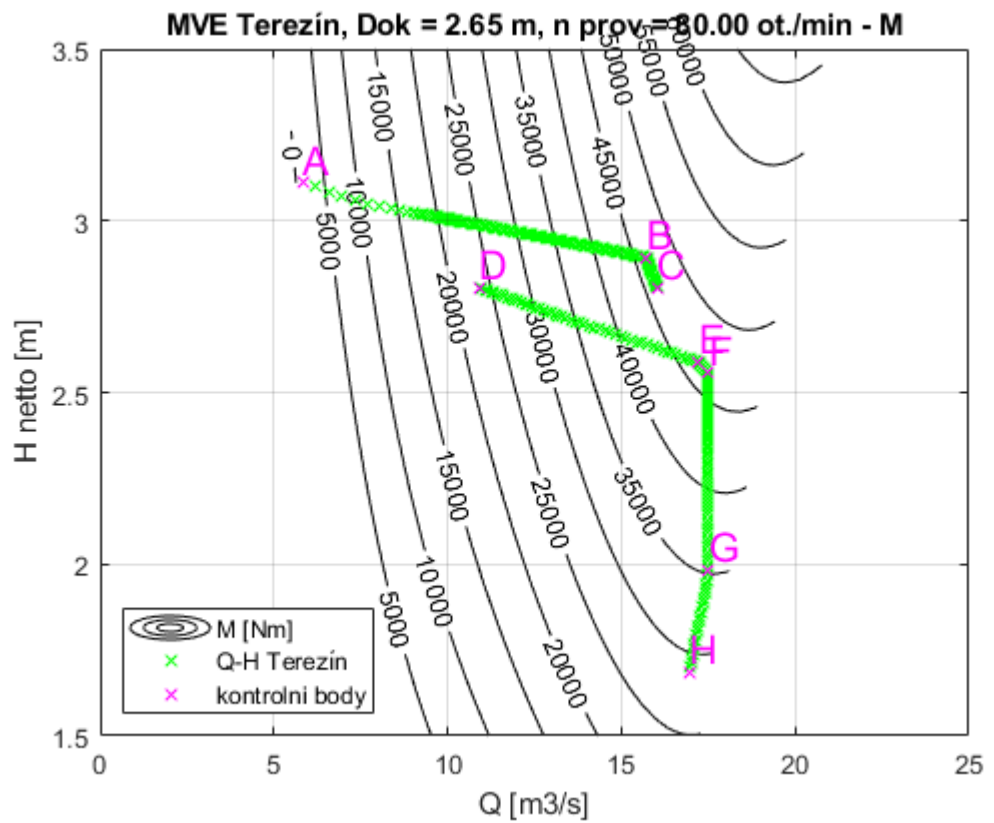
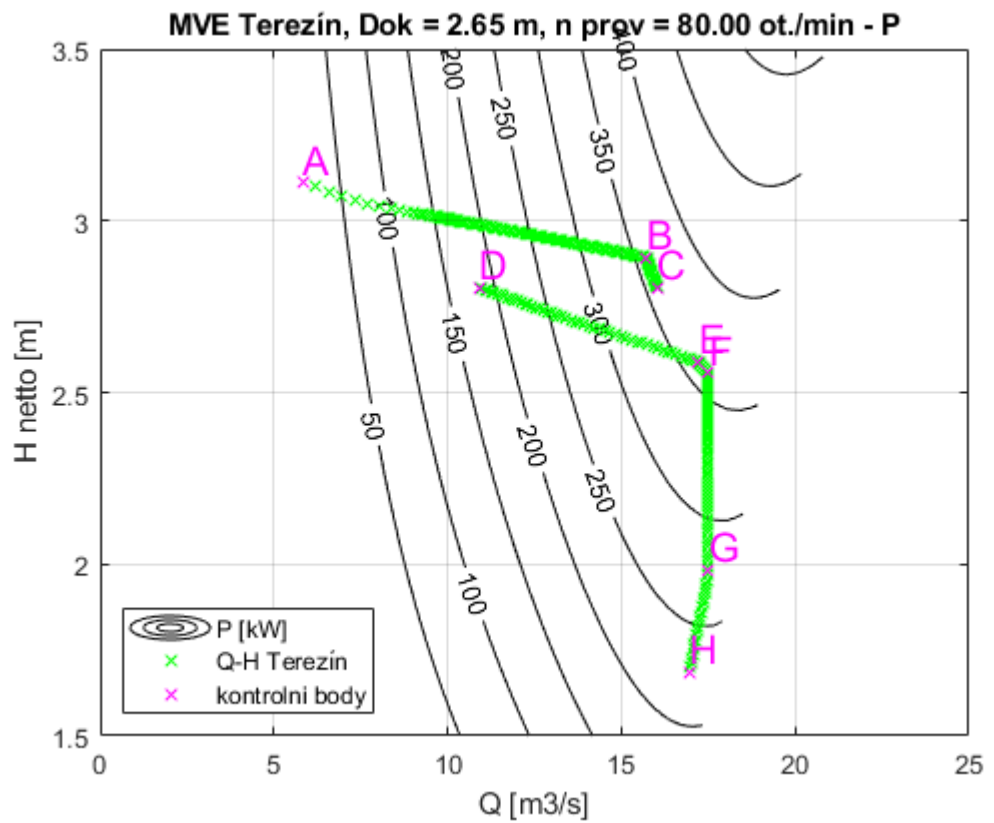
Tato omezení jsou vykreslena v Grafu 23. Červená kontura odpovídá výkonové charakteristice jedné turbíny a modrá kontura výkonové charakteristice dvou turbín. V grafu byly vykresleny body pro kontrolu a zároveň lepší orientaci mezi jednotlivými grafy. Body pro jednotlivé stavy průtoku a hrubého spádu jsou znázorněny jako oranžové křížky. Červené křivky znázorňují maximální výkon generátoru, modré křivky maximální výkon turbíny, zelená křivka odpovídá maximálnímu natočení RK, černá křivka představuje přechod mezi výkonovou charakteristikou jedné a dvou turbín a fialová křivka maximální výkon generátoru jedné turbíny při provozu dvou soustrojí. Jako první je dosaženo omezení maximálního výkonu generátoru (bod B) a dochází k regulaci turbíny. Průtok turbínou je omezen a zbytkový průtok je převáděn přes jez. Takto pokračujeme, dokud průtok řekou není dostatečný k tomu, aby výkon dvou soustrojí v souběhu byl větší, než maximální výkon generátoru jedné turbíny (bod C). Dále jsou v provozu dvě soustrojí, mezi něž je průtok dělen rovnoměrně (bod D). S rostoucím průtokem a klesajícím spádem je dosaženo dalšího omezení, a sice maximálního výkonu generátorů obou turbín (bod E). Průtok je tedy opět redukován. Při dosažení průtoku $35 \text{ m}^3/\text{s}$ je dosaženo maximální hodnoty průtoku elektrárnou dané povolením (bod F).

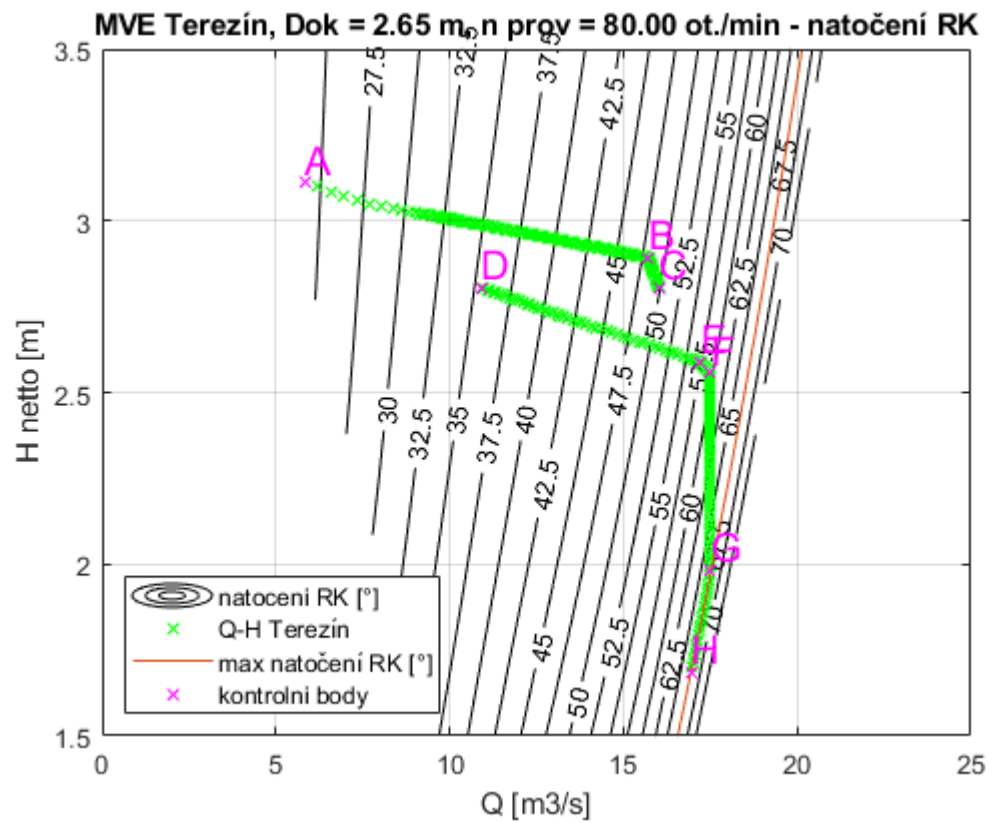
Obě turbíny jsou tedy v provozu při maximálním průtoku $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Zbytek průtoku je převáděn přes konstrukci jezu. S rostoucím průtokem v řece dochází k poklesu spádu a je dosaženo omezení maximálního výkonu obou turbín a průtok elektrárnou je snížen tak, aby byl zachován maximální výkon soustrojí (bod G). Pro největší průtoky a zároveň pro nejnižší spády je průtok omezen dosažením maximálního otevření RK.

Následně program vykreslí provozní charakteristiky pro jednotlivé veličiny, tedy účinnost, výkon, moment na hřídeli, otevření RK a sací výšku. Tyto veličiny jsou vykresleny pro H_{netto} , neboli spád mezi vstupním a výstupním profilem turbíny.

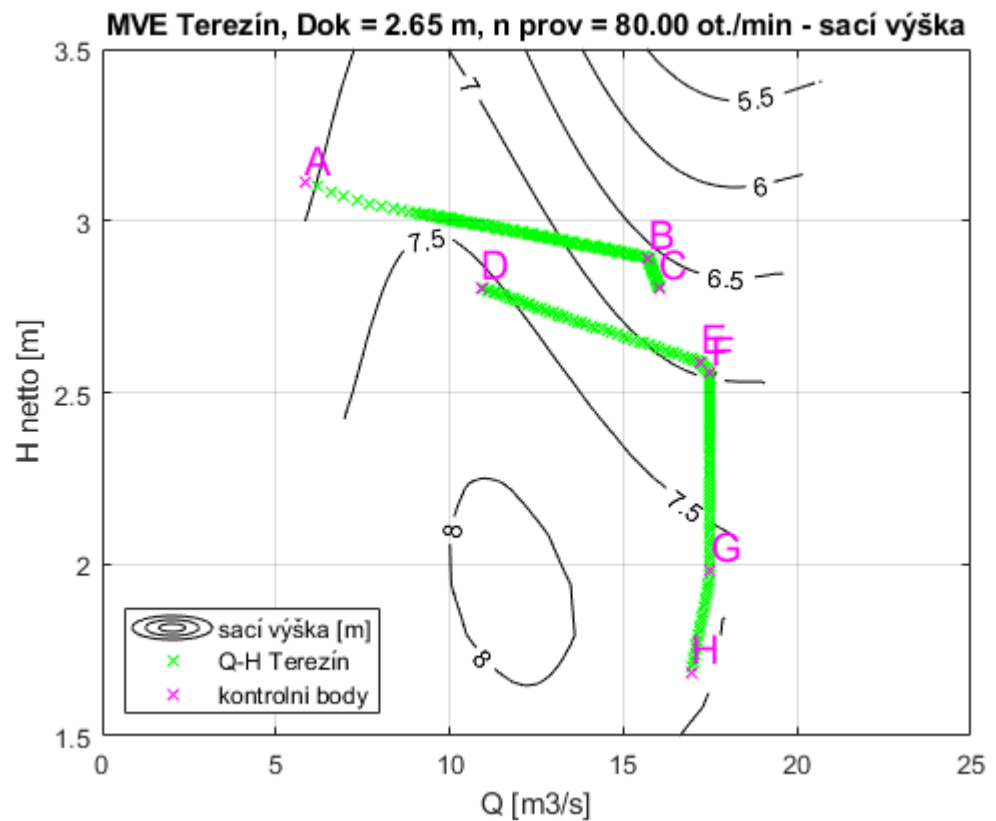


Graf 24 Účinnostní charakteristika FS



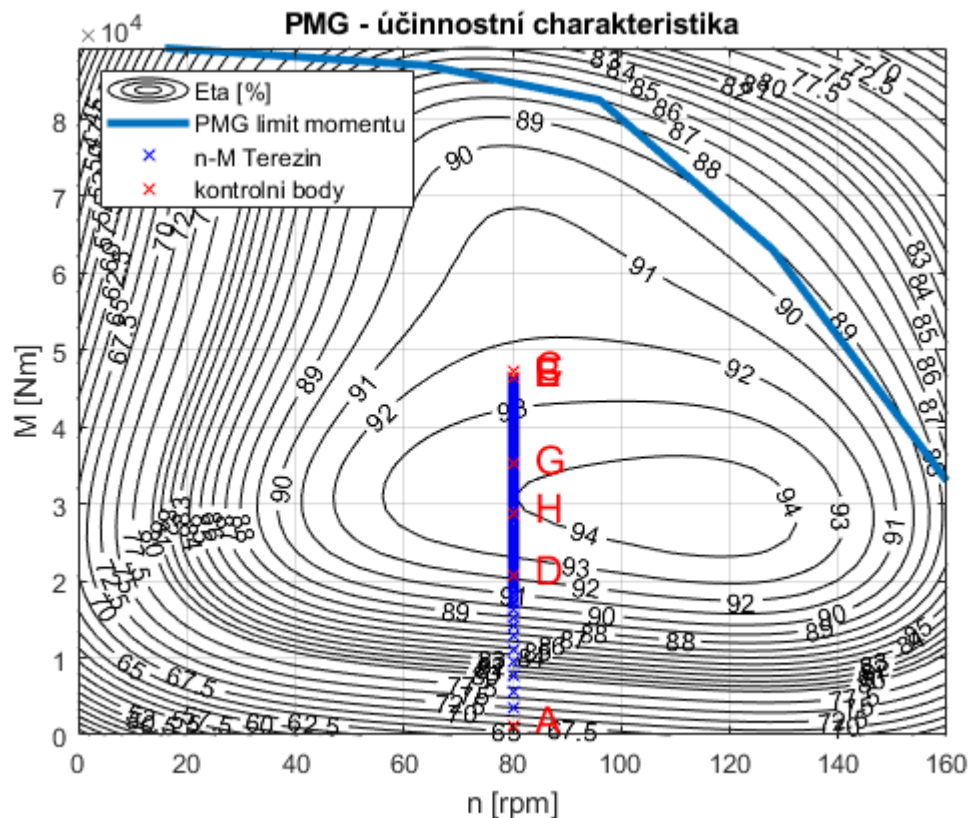


Graf 27 Natočení RK FS



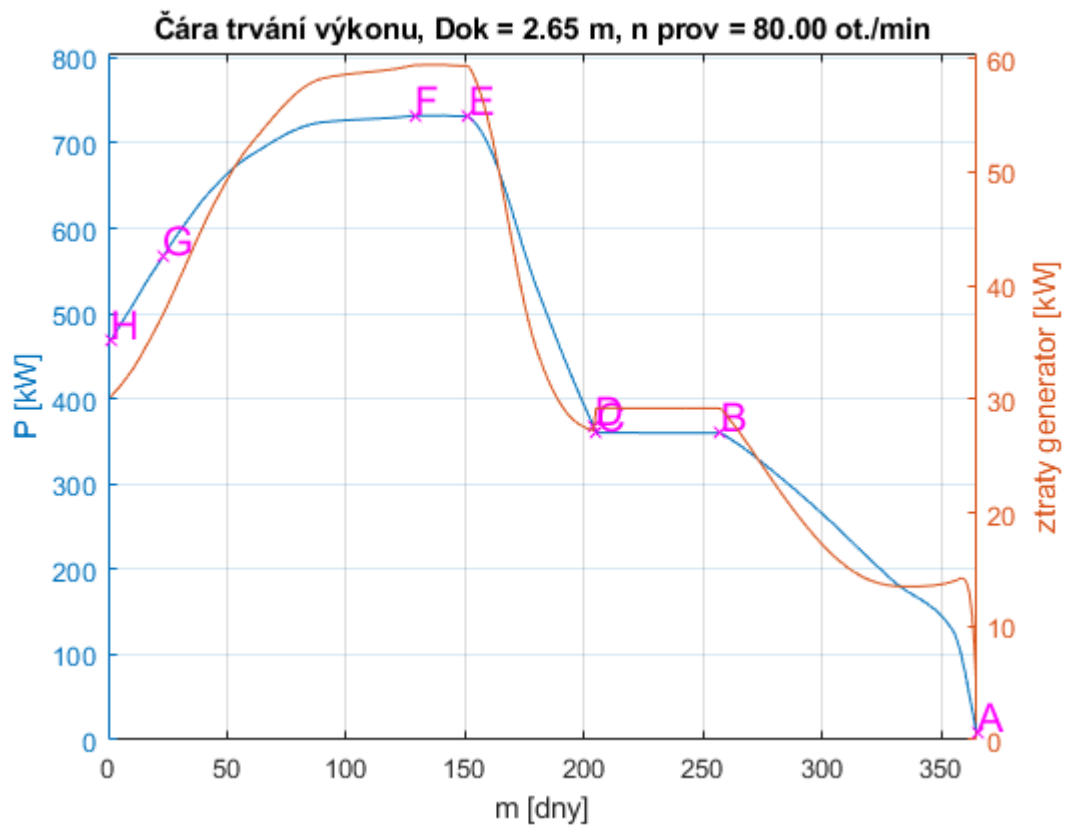
Graf 28 Sací výška FS

Z momentové charakteristiky byly odečteny hodnoty pro dané provozní body lokality Terezín. Provozní otáčky jsou v tomto případě konstantní. K takto získaným hodnotám byla z provozní charakteristiky PMG generátoru odečtena účinnost generátoru.

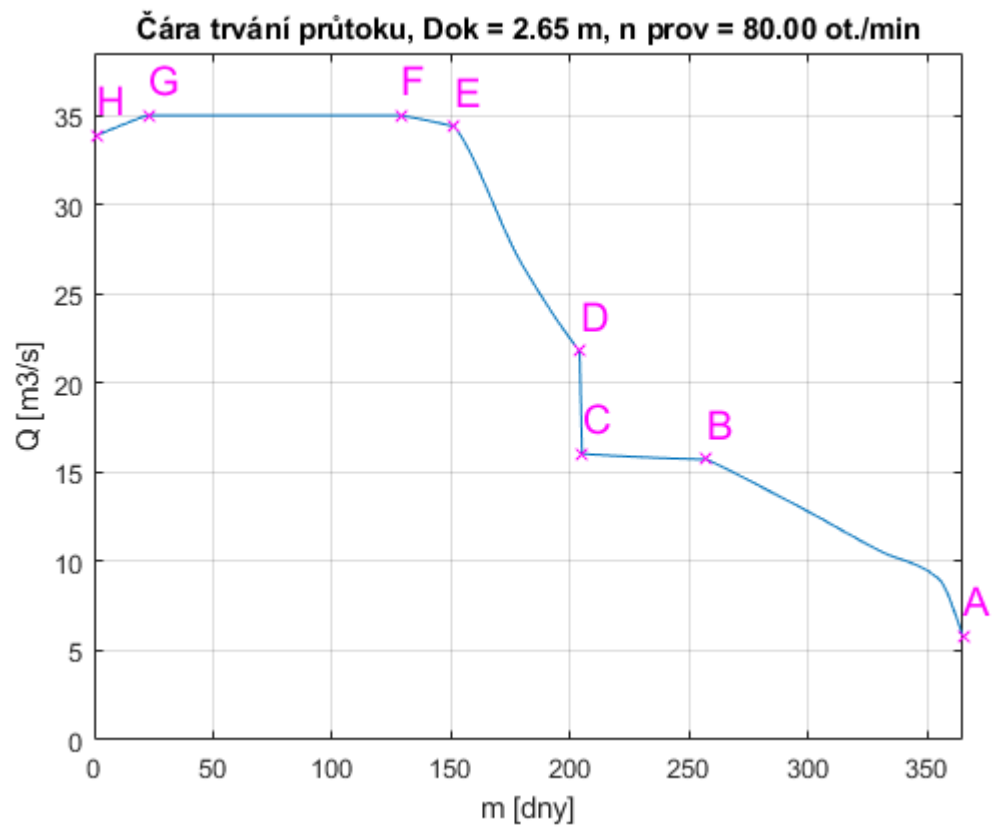


Graf 29 Účinnostní charakteristika PMG generátoru FS

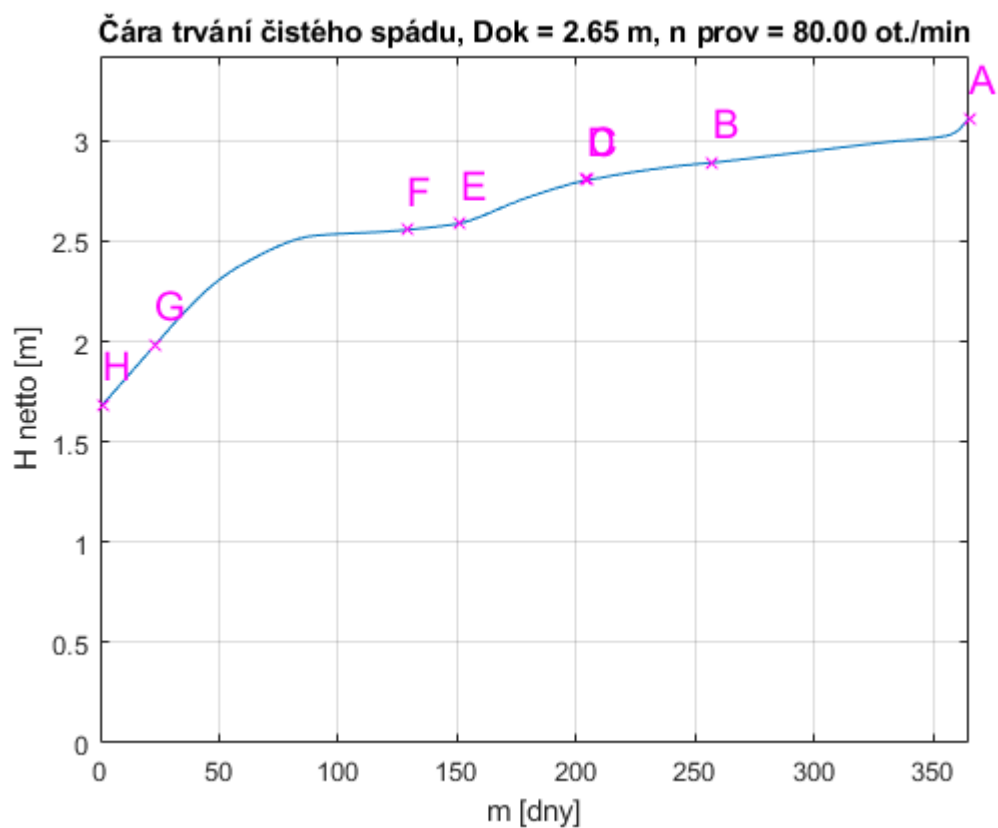
Roční výroba elektrické energie byla počítána z hodnot odečtených pro Q-H body lokality Terezín z výkonové charakteristiky. Tyto hodnoty výkonu jsou pro čistý spád se zohledněním ztrát na vtoku turbíny. Dále byly hodnoty výkonu vynásobeny účinností generátoru. Ztráty na generátoru byly dopočteny vynásobením turbínového výkonu doplňkem účinnosti generátoru do 100 %. Součástí skriptu je také vytvoření grafů čáry trvání výkonu, čáry trvání čistého spádu a čáry trvání průtoku.



Graf 30 Čára trvání výkonu FS



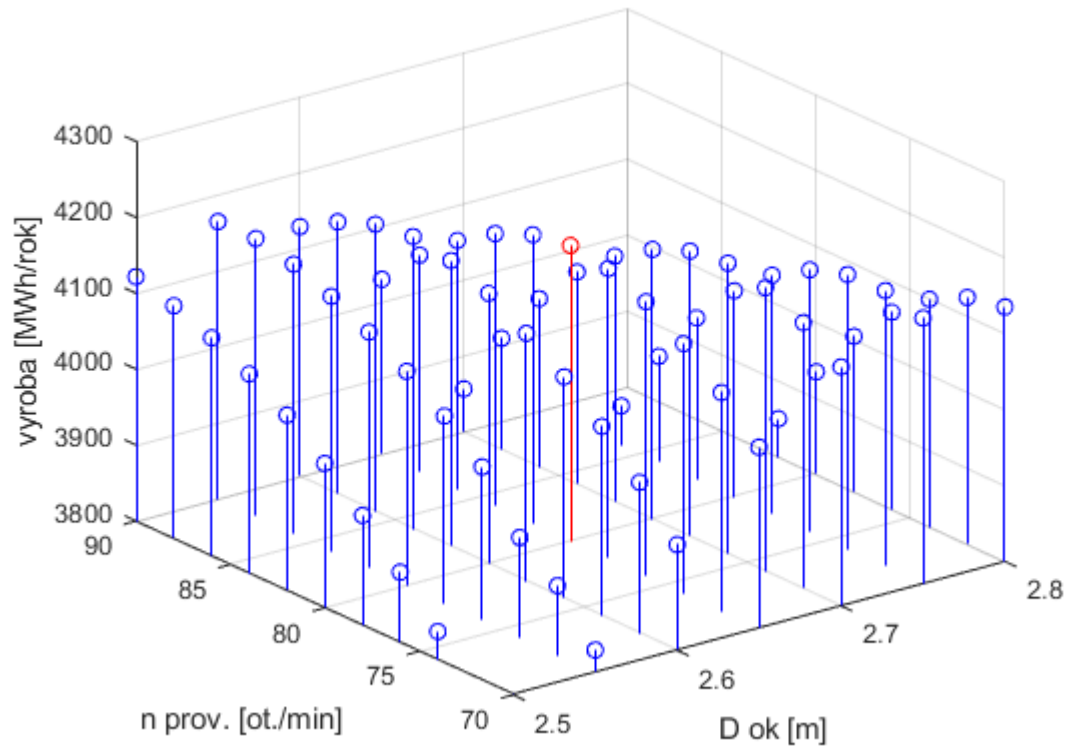
Graf 31 Čára trvání průtoku FS



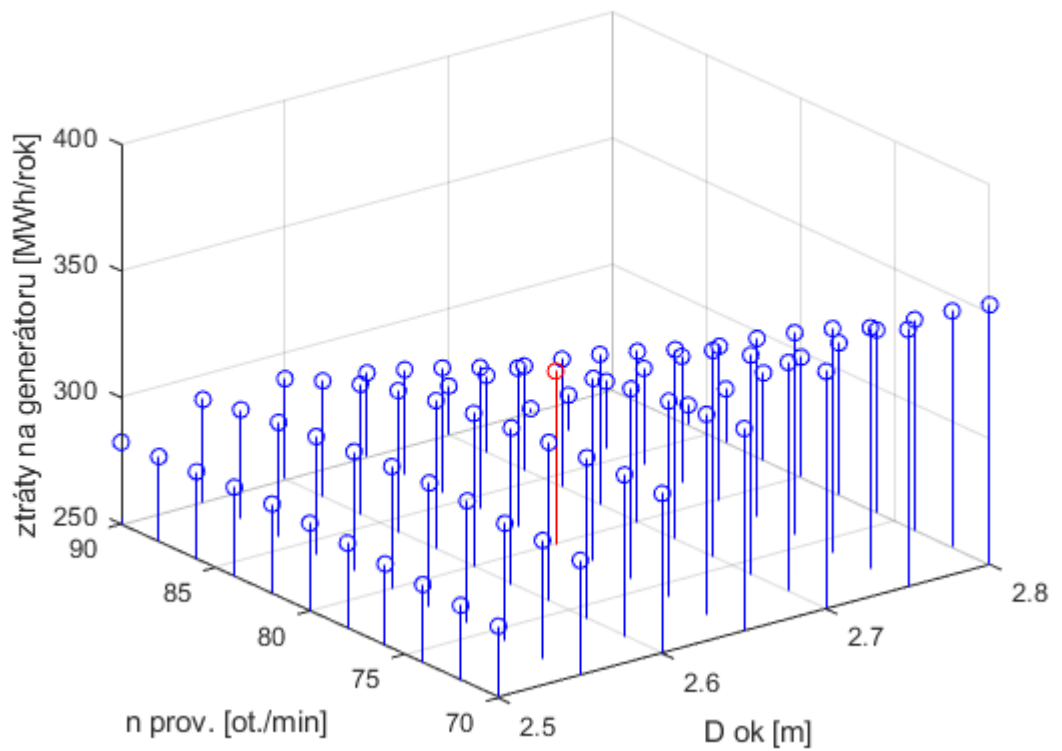
Graf 32 Čára trvání čistého spádu FS

Z čáry trvání výkonu (Graf 30) je patrné, že mezi body B a C dochází k omezení maximálním výkonem generátoru, což můžeme pozorovat i v čáře trvání průtoku (Graf 31), jelikož dochází k regulaci průtoku turbínou a přepadu vody přes jez. Obdobný jev můžeme pozorovat i mezi body E a F, kdy dochází ke stejné situaci, tedy je dosaženo maximálního výkonu na generátoru obou turbín.

Byla provedena iterace pro velikosti průměru OK v rozsahu od 2,5 m do 2,8 m a pro provozní otáčky v rozsahu od 70 ot./min do 90 ot./min. Jako optimální z hlediska roční výroby elektrické energie byla nalezena varianta turbíny o průměru OK 2,65 m provozovaná při konstantních otáčkách 80 ot./min.



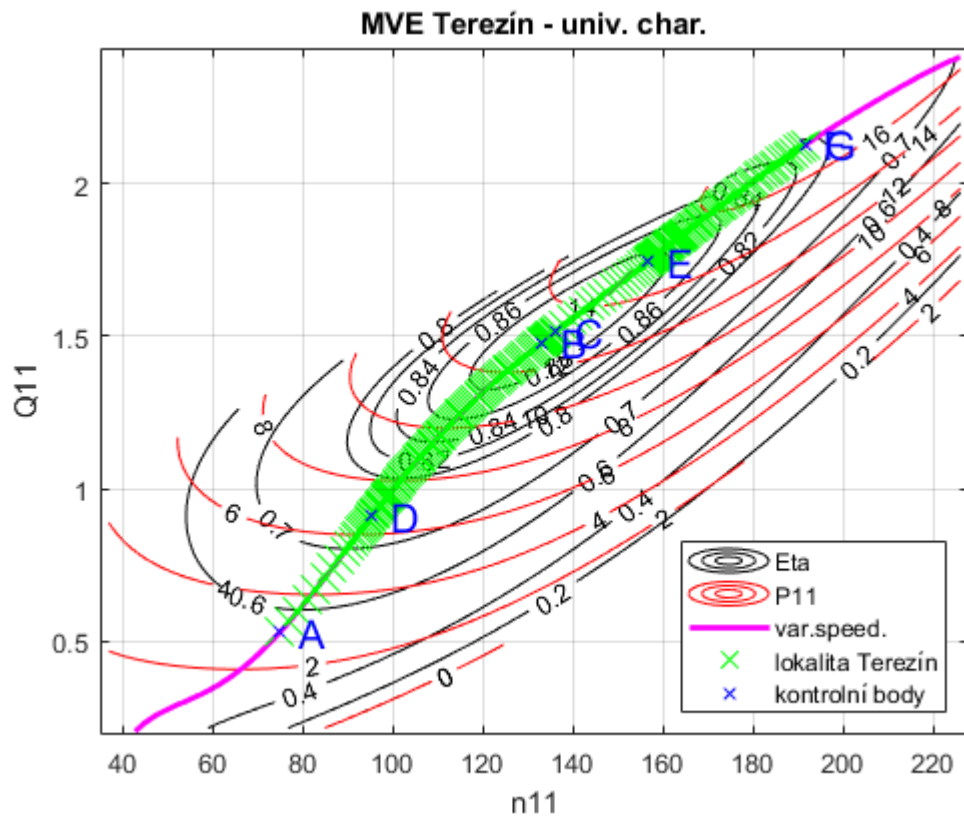
Graf 33 Závislost roční výroby na průměru OK a provozních otáčkách



Graf 34 Závislost ztrát generátoru na průměru OK a provozních otáčkách

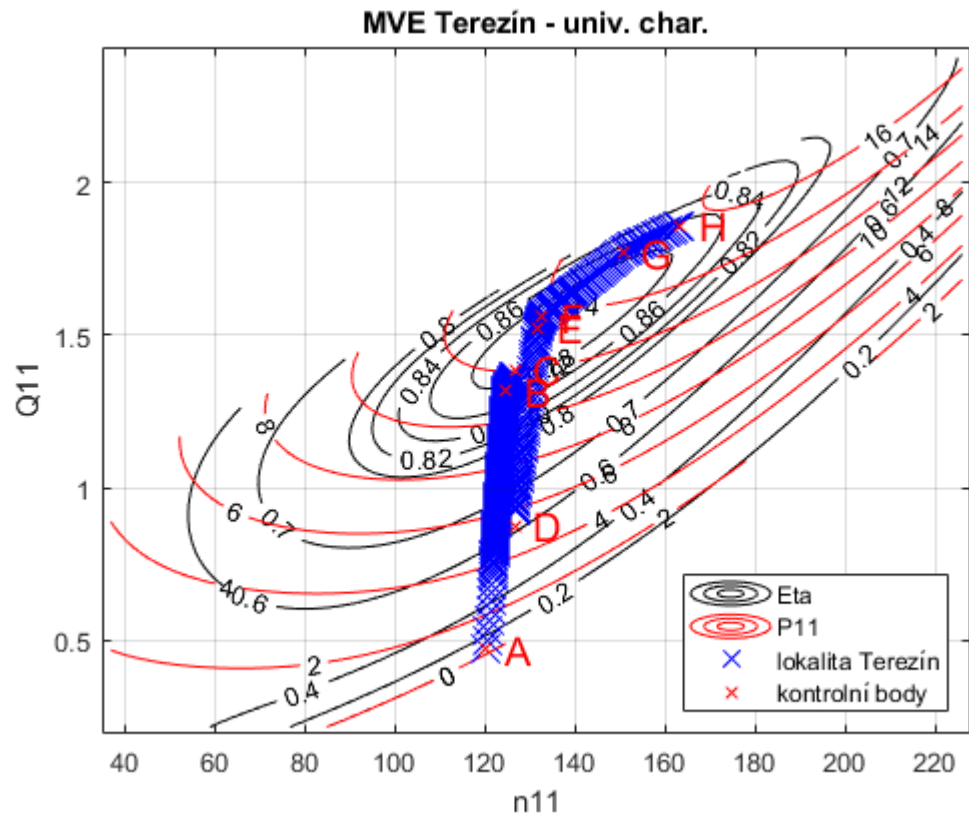
6.9. Program – univerzální charakteristika zpětné vykreslení

Tento program vykreslí univerzální charakteristiku turbíny, tedy graf s osmi n_{11} a Q_{11} . Nedochozí přitom k prokládání ploch a vytváření univerzální charakteristiky, ale k načtení dat zpracovaných programem univerzální charakteristika a jejich vykreslení. Do grafů jsou vyneseny Q-H body pro lokalitu Terežín, přepočteny na jednotkový průtok a jednotkové otáčky dle vzorců (5.9) a (5.10). Pro variantu s frekvenčním měničem leží tyto body na křivce „variable speed“, která spojuje n_{11} s nejvyšší účinností pro dané Q_{11} . Pro variantu bez frekvenčního měniče lze pozorovat rozdělení bodů do dvou skupin a to pro provoz jednoho a dvou soustrojí. Pro kontrolu a lepší orientaci byly vykresleny kontrolní body.



Graf 35 Zpětné vykreslení Q-H bodů lokality Terežín do univ. char. VS

Nejprve je v provozu jedno soustrojí a po křivce „variable speed“ se pohybujeme mezi body A a C. Jakmile dojde ke spuštění druhého soustrojí, pohybujeme se mezi body D a G, stále však po dané křivce.



Graf 36 Zpětné vykreslení Q - H bodů lokality Terežín do univ. char. FS

Pro variantu „fix speed“ se při provozu jedné turbíny pohybujeme v oblasti mezi body A a C. Při provozu dvou soustrojí mezi body D a H.

7. ZÁVĚR

Výsledkem této práce je vytvoření nových programů v prostředí MATLAB, které slouží k optimalizaci parametrů turbíny z hlediska roční výroby elektrické energie. Základ programů vychází z bakalářské práce Modelové a provozní charakteristiky axiální turbíny [9], avšak došlo k výraznému přepracování a vylepšení.

Ze zadaných dat byla vytvořena universální charakteristika turbíny. Aby nedocházelo k vnášení chyb opakujícím se prokládáním ploch, byly účinnost a jednotkový výkon přepočteny pomocí odvozených vzorců z jednotkového momentu. Byla provedena statistická analýza vhodnosti proložení s případnou možností odebrat chybná data. Dále byl vytvořen skript na zpracování hydrologických údajů lokality, který vytvoří řadu průtoků a jim odpovídajícím spádům, které v dalších skriptech slouží k výpočtu výroby elektrické energie. Byla vytvořena charakteristika generátoru, která byla použita k určení účinnosti generátoru v provozních bodech. Ze zpracované universální charakteristiky byla vytvořena charakteristika provozní. Pomocí výkonové charakteristiky byla vypočtena roční výroba elektrické energie a optimalizována velikost oběžného kola a provozní otáčky turbíny pro varianty „fix speed“ a „variable speed“. Dále byly vypočteny ztráty na generátoru. Pro kontrolu byly body Q-H pro lokalitu Terezín přepočteny do universální charakteristiky.

Z výsledků vyplývá, že roční výroba elektrické energie pro optimální velikosti turbín v obou variantách je obdobná. Znatelný rozdíl je však ve velikosti turbíny, kdy u varianty „variable speed“ můžeme použít menší turbínu, která bude levnější. Z hlediska ztrát na generátoru, jsou ztráty menší u varianty „variable speed“. Při těchto ztrátách vzniká teplo, které je mařeno chladicí vodou. Pro využití ztrátového tepla by mohla být ohřátá chladicí voda použita k temperování technických prostor a snížena tak potřeba odebíraného výkonu pro vytápění. Bylo by tak dosaženo lepší ekonomické návratnosti MVE.

Další variantou, která by mohla být zajímavá ke zpracování, je varianta s jednou turbínou s frekvenčním měničem a jednou bez frekvenčního měniče. V tomto případě by však nedocházelo k dělení průtoků v poměru 50:50.

Zpracovaný program je vytvořen jako univerzální nástroj tak, aby bylo možné jeho další použití pro rozdílná vstupní data, tedy pro jiný design oběžného kola turbíny. Zároveň je možné použití pro jinou lokalitu.

8. SEZNAMY

8.1. Použitá literatura

- [1] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. *Navrhování vodních elektráren*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01304-9.
- [2] NOWAK, Petr, Jiří SOUČEK a Lucie VODRÁŽKOVÁ. *Optimální využití hydroenergetického potenciálu v profilu stávajícího jezu Terežín*. Praha, 2018. Technická zpráva. ČVUT.
- [3] VODRÁŽKOVÁ, Lucie. *Návrh břehové MVE Terežín s využitím technologie „DIVE-Turbine“*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [4] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny [malé vodní elektrárny]*. První. Blansko: Marcela Bednářová, 2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [5] MAVEL, A.S. *Synchronní generátory s permanentními magnety [PMG]: INTERNÍ ZPRÁVA O MOŽNÉ APLIKACI*. Benešov, 2019.
- [6] *DIVE Turbinen* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.dive-turbine.de/en>
- [7] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [8] BROŽA, Vojtěch, Pavel GABRIEL, František ČIHÁK a Jitka KUČEROVÁ. *Využití vodní energie*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00392-2.
- [9] KARBULKA, David. *Modelové a provozní charakteristiky axiální turbíny*. Praha, 2020. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [10] MELICHAR, Jan. *Malé vodní turbíny*. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-02164-5.
- [11] MELICHAR, Jonáš. *Matematický model malé vodní elektrárny*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.

8.2. Seznam obrázků

Obrázek 1 Jez Terezín.....	- 4 -
Obrázek 2 Oběžné kolo propelerové turbíny s pevnými lopatkami DIVE.....	- 8 -
Obrázek 3 Schéma MVE s využitím turbín DIVE [6].....	- 10 -
Obrázek 4 Ukázka universální charakteristiky	- 17 -
Obrázek 5 Ukázka provozní charakteristiky	- 18 -
Obrázek 6 Flow chart pořadí spouštění jednotlivých programů	- 19 -

8.3. Seznam grafů

Graf 1 Měrná křivka podjezí.....	- 5 -
Graf 2 Čára trvání m-denních průtoků.....	- 7 -
Graf 3 Čára trvání hrubého spádu	- 21 -
Graf 4 Plocha jednotkového momentu.....	- 22 -
Graf 5 Půdorysný pohled jednotkového momentu	- 23 -
Graf 6 Půdorysný pohled účinnosti.....	- 24 -
Graf 7 Procentuální odchylky mezi zadanými daty a proložením	- 24 -
Graf 8 Kontury dílčích účinností	- 25 -
Graf 9 Porovnání kontur účinností z CFD a přepočtených z M11.....	- 26 -
Graf 10 Účinnostní charakteristika PMG generátoru	- 27 -
Graf 11 Výkonová charakteristika s omezeními VS.....	- 28 -
Graf 12 Účinnostní charakteristika VS	- 29 -
Graf 13 Výkonová charakteristika VS	- 30 -
Graf 14 Momentová charakteristika VS	- 30 -
Graf 15 Provozní otáčky turbíny VS.....	- 31 -
Graf 16 Natočení RK VS	- 31 -
Graf 17 Sací výška VS	- 32 -
Graf 18 Účinnostní charakteristika PMG generátoru VS	- 33 -
Graf 19 Čára trvání výkonu VS	- 33 -
Graf 20 Čára trvání průtoku VS.....	- 34 -
Graf 21 Čára trvání čistého spádu VS.....	- 34 -
Graf 22 Závislost roční výroby a ztrátového výkonu na průměru OK	- 35 -
Graf 23 Výkonová charakteristika s omezeními FS	- 36 -
Graf 24 Účinnostní charakteristika FS.....	- 37 -

Graf 25 Výkonová charakteristika FS.....	- 38 -
Graf 26 Momentová charakteristika FS	- 38 -
Graf 27 Natočení RK FS	- 39 -
Graf 28 Sací výška FS.....	- 39 -
Graf 29 Účinnostní charakteristika PMG generátoru FS	- 40 -
Graf 30 Čára trvání výkonu FS	- 41 -
Graf 31 Čra trvání průtoku FS	- 41 -
Graf 32 Čára trvání čistého spádu FS	- 42 -
Graf 33 Závislost roční výroby na průměru OK a provozních otáčkách	- 43 -
Graf 34 Závislost ztrát generátoru na průměru OK a provozních otáčkách	- 43 -
Graf 35 Zpětné vykreslení Q-H bodů lokality Terezín do univ. char. VS.....	- 44 -
Graf 36 Zpětné vykreslení Q-H bodů lokality Terezín do univ. char. FS.....	- 45 -
Graf 37 Půdorysný pohled jednotkového výkonu.....	- 51 -
Graf 38 Půdorysný pohled natočení RK - univ. char.....	- 52 -
Graf 39 Půdorysný pohled kavitačního součinitele - univ. char.	- 52 -
Graf 40 Universální charakteristika turbíny.....	- 53 -
Graf 41 Dílčí eta OK – univ. char.....	- 54 -
Graf 42 Dílčí eta RK - univ. char.....	- 54 -
Graf 43 Dílčí eta savka - univ. char.	- 55 -

8.4. Seznam použitých zkratk

BEP – bod s nejvyšší účinností

D_{ok} – průměr oběžného kola

η – účinnost

FS – „fix speed“ (varianta bez frekvenčního měniče)

H. – spád

M_{11} – jednotkový moment

MVE – malá vodní elektrárna

MZP – mezní zůstatkový průtok

n_{11} – jednotkové otáčky

n. – provozní otáčky

OK – oběžné kolo

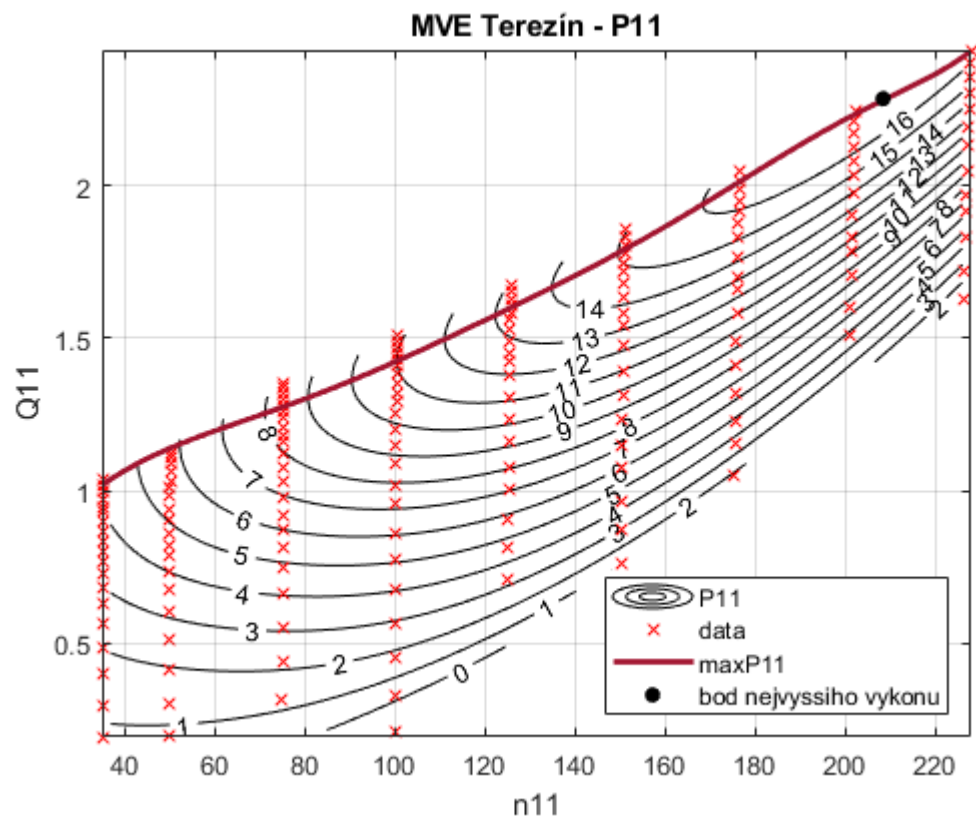
P_{11} – jednotkový výkon

Q_{11} – jednotkový průtok

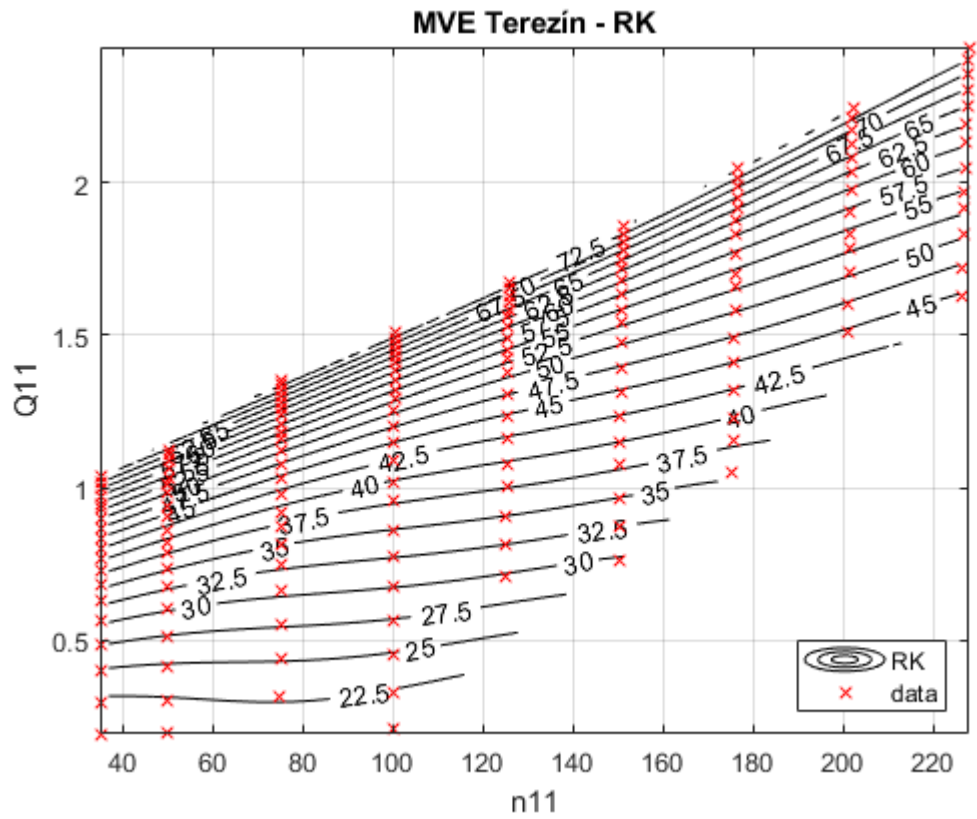
RK – rozváděcí kolo

VS – „variable speed“ (varianta s frekvenčním měničem)

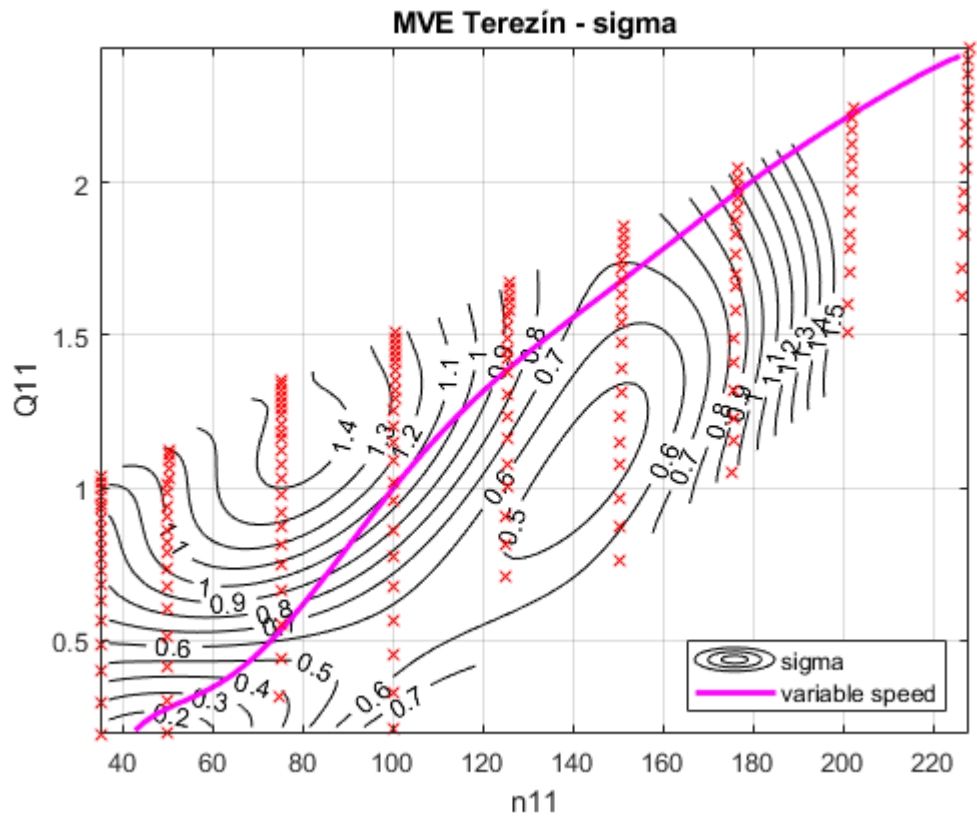
9. PŘÍLOHY



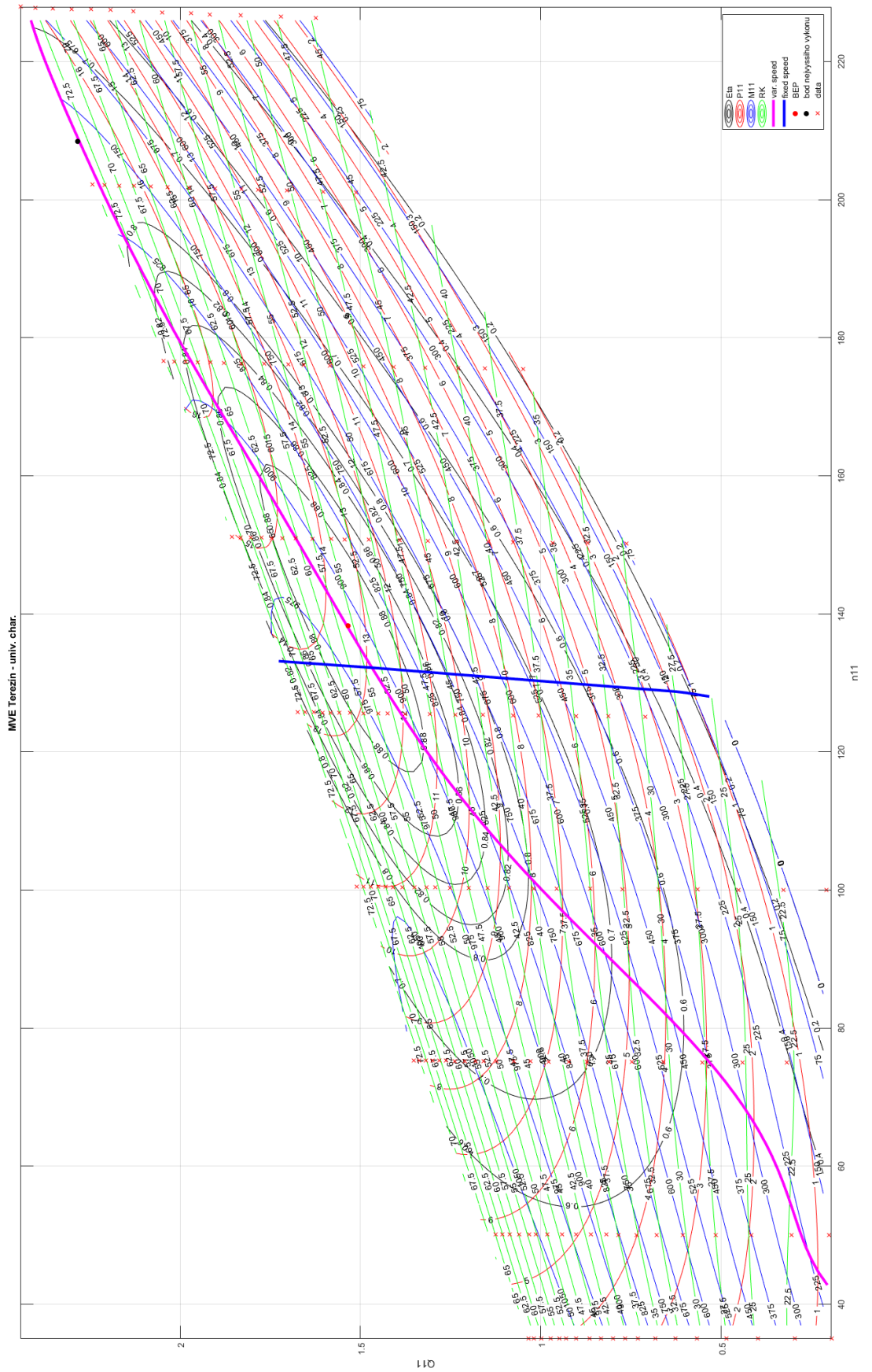
Graf 37 Půdorysný pohled jednotkového výkonu



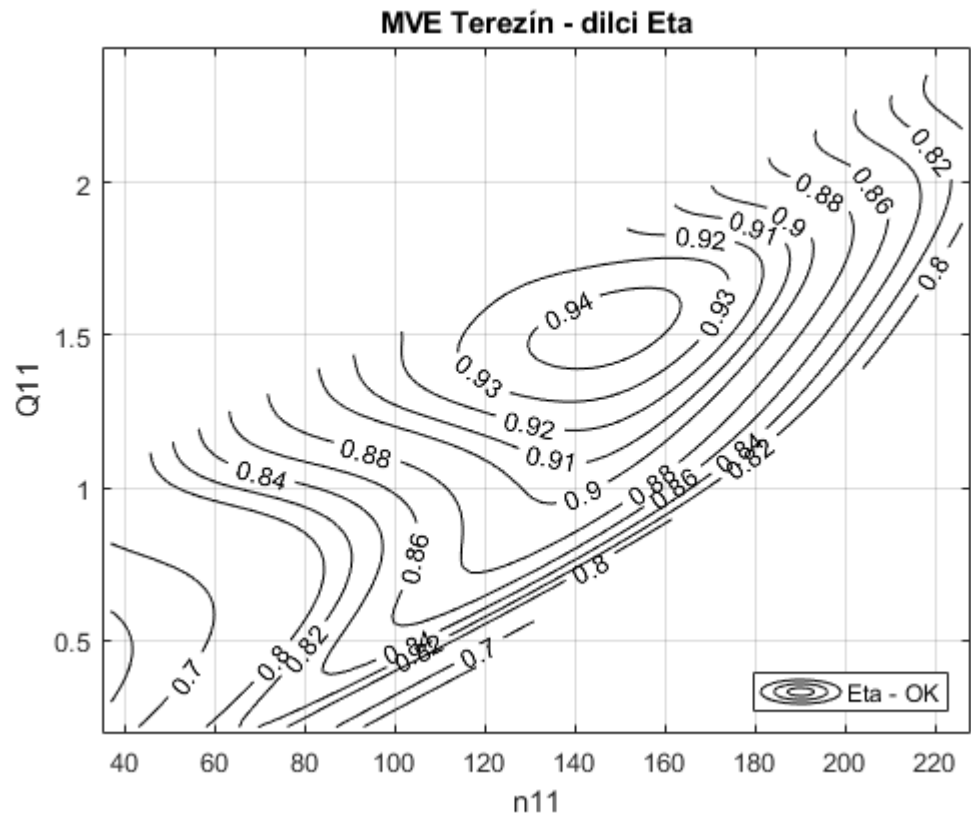
Graf 38 Půdorysný pohled natočení RK - univ. char.



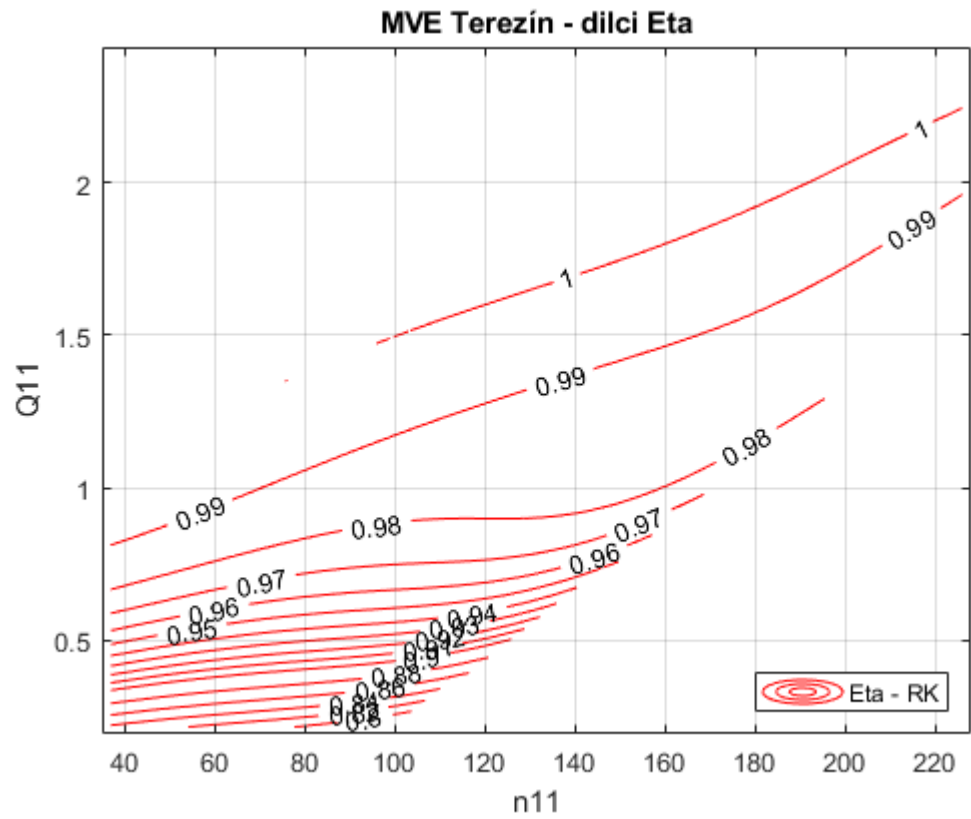
Graf 39 Půdorysný pohled kavitačního součinitele - univ. char.



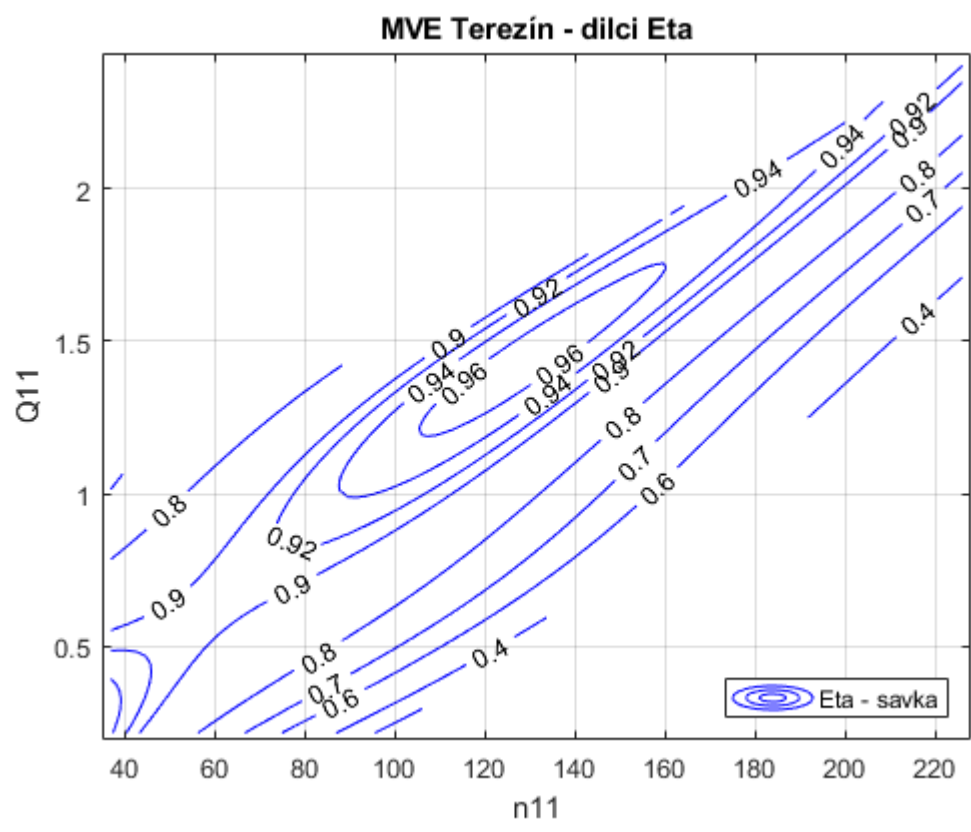
Graf 40 Universální charakteristika turbíny



Graf 41 Dilčí eta OK – univ. char.



Graf 42 Dilčí eta RK - univ. char.



Graf 43 Dílčí eta savka - univ. char.