

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modelové a provozní charakteristiky axiální turbíny

Model and operational characteristics of axial turbine

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Květen 2020



David Karbulka

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ 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 BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Modelové a provozní charakteristiky axiální turbíny</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Model and operational characteristics of axial turbine</u>	
Pokyny pro vypracování: Sestrojení modelových charakteristik axiální turbíny na základě předaných dat ze CFD simulace pro jednotlivé polohy OK. Transformace těchto dat do charakteristik odpovídající kombinacím jednotlivých proměnných prvků (RK, OK, otáčky). Přepočítání modelových charakteristik do provozních charakteristik pro daný spád a průměr OK pro výše uvedené kombinace proměnných prvků. Pro výpočty bude využito prostředí MatLab.	
Seznam doporučené literatury: - obecná literatura - Hydropower - MatLab manuals and tutorials	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Dr. Ing. Petr Nowak</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>19.2.2020</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>17.5.2020</u> <small>Údaj uveďte v příslušném ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 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“.

<u>19.2.2020</u> 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 17.5.2020

.....

David Karbulka

Poděkování

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

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je vytvořit program, který bude sloužit jako nástroj pro zpracování turbínových charakteristik pro Kaplanovu turbínu a její varianty. Práce obsahuje porovnání charakteristik strojů s různými natočeními oběžného kola, rozváděcího kola, ale i s možností regulace provozních otáček použitím frekvenčního měniče. Tyto charakteristiky jsou nejdříve zpracovány jako modelové pro jednotkové veličiny a následně přepočteny na provozní charakteristiky pro konkrétní stroj o daném průměru oběžného kola a spádu. Výsledkem této práce je porovnání účinností a provozních rozsahů jednotlivých variant strojů, respektive strojů s různými variantami regulace. Tyto výsledky mohou sloužit jako podklad pro výběr vhodného stroje pro konkrétní lokalitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Modelové charakteristiky, provozní charakteristiky, Kaplanova turbína, frekvenční měnič

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is to create a program that will be use as a tool for processing turbine characteristics for Kaplan turbine and its variants. The work includes a comparison of the characteristics of machines with different positioning of guide vanes, runner vanes, but also with the possibility of regulating the operating speed using a frequency converter. These characteristics are first processed as model characteristic for unit quantities and then converted to operational characteristics for a specific machine with a given runner diameter and head. The result of this work is a comparison of efficiencies and operating ranges of variants of Kaplan turbine, or more precisely machines with different types of regulation. These results can serve for selecting a suitable machine for a specific location.

KEY WORDS

Model characteristic, operational characteristics, Kaplan turbine, frequency converter

OBSAH PRÁCE

1. ÚVOD	- 3 -
2. KAPLANOVA TURBÍNA A JEJÍ VARIANTY	- 4 -
2.1. KAPLANOVA TURBÍNA.....	- 4 -
2.2. PROPELEROVÁ TURBÍNA.....	- 6 -
2.3. THOMANNOVA TURBÍNA	- 7 -
2.4. NEREGULOVATELNÁ TURBÍNA	- 8 -
2.5. VARIANTY PROPELEROVÝCH TURBÍN	- 8 -
3. MODELOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍN	- 9 -
3.1. JEDNOTKOVÉ PARAMETRY	- 9 -
3.2. UNIVERSÁLNÍ CHARAKTERISTIKA	- 10 -
3.3. PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKA.....	- 11 -
4. PODKLADY PRO ZPRACOVÁNÍ CHARAKTERISTIK TURBÍN. -	13 -
4.1. FYZIKÁLNÍ MODEL	- 13 -
4.2. MATEMATICKÝ MODEL	- 13 -
4.3. PŘÍMÉ MĚŘENÍ.....	- 14 -
5. ZPRACOVÁNÍ CHARAKTERISTIK	- 15 -
5.1. ZPRACOVÁVANÁ DATA A JEJICH NAČTENÍ.....	- 15 -
5.2. MODELOVÁ CHARAKTERISTIKA	- 17 -
5.2.1. Propelerová turbína	- 17 -
5.2.2. Thomannova turbína	- 20 -
5.2.3. Kaplanova turbína	- 22 -
5.2.4. Turbína s pevným natočením RK a OK.....	- 26 -
5.3. PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKA – DANÉ PROVOZNÍ OTÁČKY.....	- 27 -
5.3.1. Propelerová turbína	- 27 -
5.3.2. Thomannova turbína	- 29 -
5.3.3. Kaplanova turbína	- 31 -
5.3.4. Turbína s pevným natočením RK a OK.....	- 32 -

5.4.	PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKA – FREKVENČNÍ MĚNIČ	- 34 -
5.4.1.	Propelerová turbína	- 34 -
5.4.2.	Thomannova turbína	- 35 -
5.4.3.	Kaplanova turbína	- 37 -
5.4.4.	Turbína s pevným natočením RK a OK.....	- 38 -
6.	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	- 40 -
6.1.	POROVNÁNÍ ÚČINNOSTÍ V PROVOZNÍCH CHARAKTERISTIKÁCH.....	- 40 -
6.2.	ÚČINNOSTI VŠECH VARIANT PRO DANÝ SPÁD	- 42 -
7.	ZÁVĚR.....	- 44 -
8.	SEZNAMY.....	- 45 -
8.1.	POUŽITÁ LITERATURA	- 45 -
8.2.	SEZNAM OBRÁZKŮ	- 46 -
8.3.	SEZNAM GRAFŮ.....	- 46 -
8.4.	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	- 48 -
9.	PŘÍLOHY	- 49 -

1. ÚVOD

V dnešní době, kdy dochází k velkému technickému rozvoji, hlavně v oblasti výpočetní techniky a nárůstu výpočetního výkonu, se matematické modelování stává nedílnou součástí technického vývoje, ať už se jedná o tvarový návrh nebo optimalizaci. Díky tomu jsme schopni celkem snadno a rychle získat velké množství dat pro všechny možné varianty a prototypy. Tato možnost je hojně využívána i v oboru vodního hospodářství, konkrétně třeba při návrhu soustrojí vodní turbíny. Aby bylo možné rozhodnout,

jaký návrh je nejideálnější, je třeba zpracovat data z matematického modelování tak, aby výsledky byly jasné a přehledné. [1]

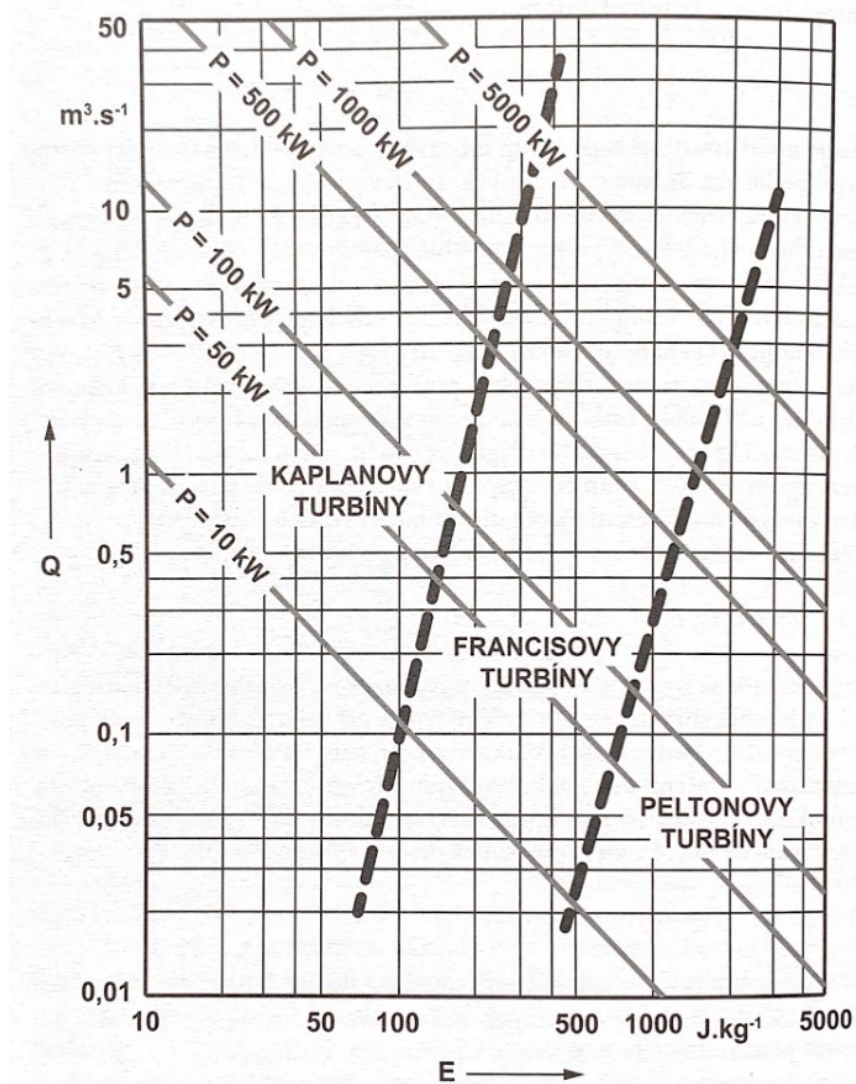
Tato práce si klade za cíl vytvořit nástroj, který pomůže při zpracování velkého množství dat. Velký důraz je kladen na automatizaci a co největší univerzálnost, aby bylo možné program použít pro různé sady dat. K vypracování bylo použito aplikace Matlab.

V této práci bude čtenář postupně seznámen se základními principy Kaplanovy turbíny, charakteristikami vodních turbín a zdroji dat potřebnými k vypracování těchto charakteristik. Dále budou prezentovány vytvořené univerzální a provozní charakteristiky pro jednotlivé kombinace proměnných prvků, kterými jsou natočení oběžného kola, natočení rozváděcího kola a provozní otáčky. Výsledky budou znázorněny pomocí grafů a slovního komentáře. Na závěr budou porovnány provozní charakteristiky všech variant propelerových turbín a demonstrovány výhody použití frekvenčního měniče.

2. KAPLANOVA TURBÍNA A JEJÍ VARIANTY

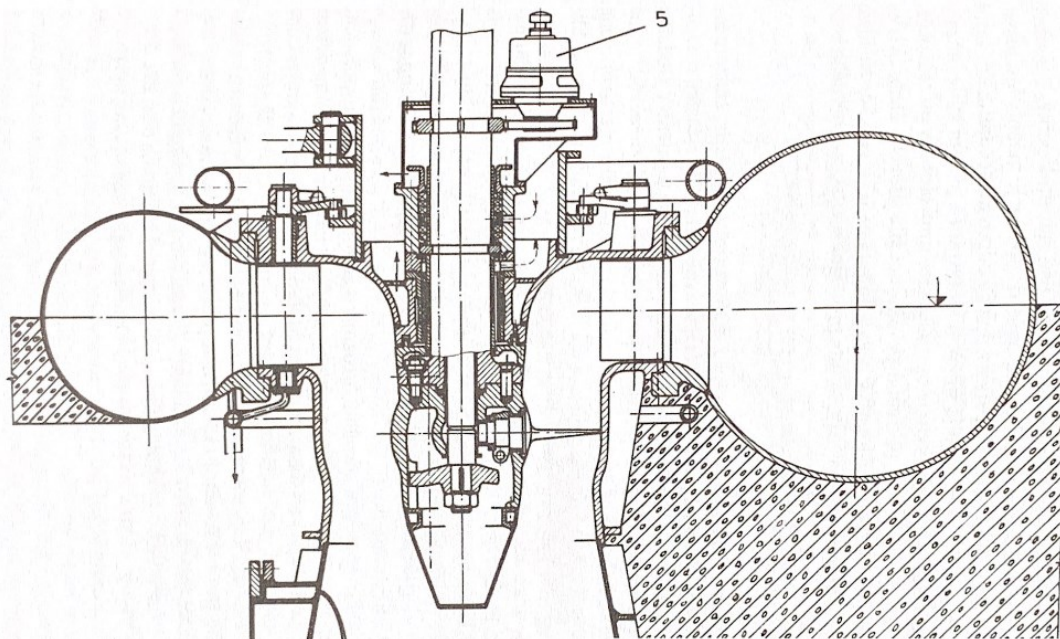
2.1. Kaplanova turbína

Tato turbína byla vynalezena profesorem Viktorem Kaplanem na počátku 20. století. Výchozí pro návrh byla turbína vrtulová s pevnými lopatkami oběžného kola. Vrtulové turbíny se vyznačují axiálním prouděním vody v oběžném kole. Kaplanovy turbíny se používají od nejnižších spádů až po hranici 100 m (Obrázek 2.1). Její hlavní výhodou je možnost tzv. dvojitě regulace, tedy regulovatelné oběžné i rozváděcí kolo. Takto lze nastavit optimální průtokové poměry nejen z hlediska energetického, ale i z hlediska dynamického, čímž dochází ke snížení tlakových pulzací. Díky tomu lze dosáhnout účinnosti $\eta = (0,88 \text{ až } 0,9)$ i vyšších. [2]



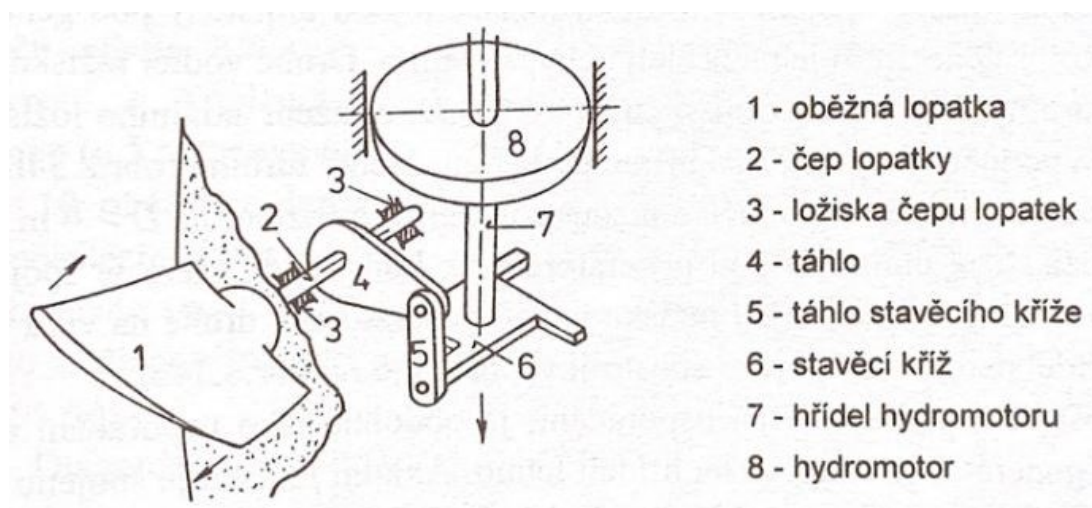
Obrázek 2.1 Rámcový oblastní diagram turbín pro MVE [3]

U Kaplanovy turbíny (Obrázek 2.2) lze dosáhnout většího jednotkového průtoku a větších měrných otáček než u turbíny Francisovy, díky čemuž bude hmotnost i rozměry Kaplanovy turbíny srovnatelných parametrů menší. [3]



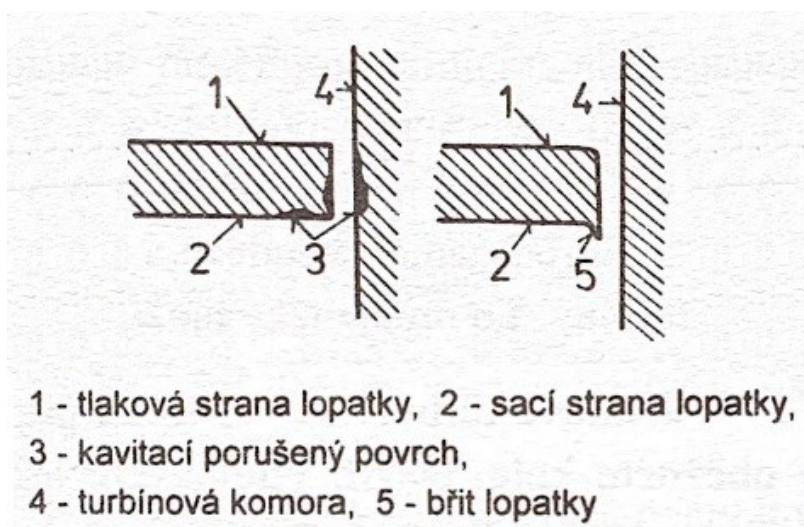
Obrázek 2.2 Vertikální spirální Kaplanova turbína [3]

Počet lopatek oběžného kola závisí na spádu, minimem jsou však vždy 3 lopatky (do spádu 5 m), a maximem 10 lopatek (při spádech nad 60 m). Při menších počtech se lopaty nepřekrývají. K natáčení lopatek se obvykle používá hydraulický pohon zajištěný hydromotorem. Způsob natáčení lopatek je znázorněn na Obrázku 2.3. [4]



Obrázek 2.3 Zařízení pro natáčení lopatek Kaplanovy turbíny [4]

Prostor turbíny se nachází mezi nábojem oběžného kola a pláštěm komory oběžného kola. Náboj a plášť komory bývají u menších soustrojí válcové, u větší soustrojí kulové. Průměr náboje je určen počtem lopatek tak, aby byl uvnitř náboje dostatečný prostor pro uchycení lopatek a pro mechanismus sloužící k jejich manipulaci. Z hlediska postupné změny průtočné plochy za turbínou je vhodné náboj protáhnout až do prostoru savky. Na základě vysokých rychlostí vody mezi hranou lopatky a pláštěm komory může docházet ke kavitaci, jak na konci lopatky, tak na stěně komory. Avšak vhodným upravením konce lopatky (obrázek 2.4) je možné tuto kavitaci omezit. [4]



Obrázek 2.4 Úprava konce lopatek k omezení spárové kavitace [4]

Jak již bylo zmíněno, nevýhodou Kaplanovy turbíny je relativně vysoká hodnota kavitačního součinitele, která prodražuje stroj z hlediska použití kvalitnějších korozivzdorných materiálů, odolným proti kavitačnímu poškození, tak z hlediska hloubky založení pro zajištění dostatečné hodnoty měrné sací energie.

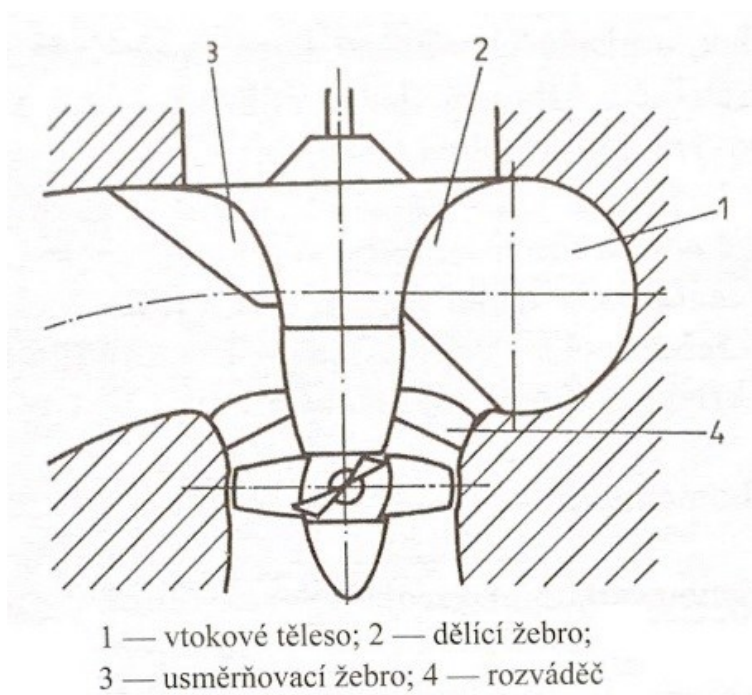
2.2. Propelerová turbína

Propelerová turbína má pevné lopatky oběžného kola a stejně jako Kaplanova turbína se vyznačuje axiálním prouděním vody turbínou. Lopatky oběžného kola mohou být součástí náboje (jeden odlitek), častěji jsou však k náboji připevněny šroubovými spoji, které dovolují upravit natočení dle hydrologických poměrů daného díla. S takto připevněnými lopatkami může být za klidu manipulováno. K regulaci průtoku turbínou dochází pomocí manipulace lopatkami rozváděcího kola. Nevýhodou těchto turbín je však velmi strmý průběh účinnosti s ostrým maximem, což má za následek, že s dobrou

účinností pracují pouze v malém rozsahu kolem nejvýhodnějšího pracovního bodu (BEP). Jsou proto používány v lokalitách s ustálenými průtokovými a spádovými poměry. Takových lokalit není mnoho, což vedlo k vylepšení těchto turbín do dnešní podoby Kaplanovy turbíny. [2] [3]

2.3. Thomannova turbína

Jedná se o zjednodušenou Kaplanovu turbínu, u které je použito pevného rozvaděče. K regulaci dochází pomocí natáčení lopatek oběžného kola. Jelikož je způsob regulace složitější než u turbíny propelerové, zvyšuje se také cena této turbíny. Výhodou je však vyšší střední hodnota účinnosti v regulačním rozsahu provozního režimu. K zajištění osově symetrického průtoku na vstupu do rozvaděče se používají žebra umístěná v rovině osy vtoku. Z hlediska ekonomie provozu, je Thomannova turbína (Obrázek 2.5) srovnatelná s Kaplanovou turbínou. Avšak z technologického a konstrukčního hlediska je jednodušší, čímž je vhodná pro malé vodní elektrárny. Hlavním nedostatkem této turbíny je pomalá manipulace s lopatkami oběžného kola. U Kaplanovy turbíny je čas závěru rozvaděče několikanásobně kratší. Také charakter lopatek oběžného kola vylučuje úplné uzavření průtoku a může tak dojít k dosažení průběžných otáček. Tento problém lze vyřešit použitím rychle pracujícího uzávěru na přívodu. Thomannovu turbínu lze použít v několika variantách jako axiální, radiální nebo diagonální. [2]



Obrázek 2.5 Thomannova turbína [3]

2.4. Neregulovatelná turbína

Tyto turbíny jsou používány ve snaze snížit investiční náklady na minimum. Jednoduchost jejich konstrukčního řešení současně vede ke snížení provozních nákladů a ke zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti turbíny. Používají se v lokalitách, kde hydrologické podmínky a charakter provozu nevyžadují regulaci, nebo vystačí v paralelním provozu s přerušováním chodu. U těchto turbín je pevný rozvaděč a pevné lopatky oběžného kola. Dochází tak k vytvoření rotující lopatkové mříže bez možnosti regulace průtoku. Lze říci, že každá z variant Thomannovy turbíny může být provedena bez možnosti regulace oběžného kola. [3]

2.5. Varianty propelerových turbín

Díky možnosti natáčet oběžným kolem získávají propelerové neboli vrtulové turbíny další možnost regulace, oproti ostatním turbínám. Celkem je tedy možné regulovat tři parametry a sice oběžné kolo, rozvaděcí kolo a otáčky. Oběžné i rozvaděcí kolo regulujeme mechanicky zatímco otáčky pomocí frekvenčního měniče. Ne všechny tyto možnosti musí být pro daný stroj regulovatelné. Kombinací těchto možností získáme celkem osm variant řízení od všech tří parametrů volných po všechny tři pevně dané. Některé z těchto kombinací jsou nevhodné, ať už z hlediska ekonomického, tak z hlediska technického. V následující tabulce (Obrázek 2.6) jsou uvedeny všechny možné kombinace, případně jejich označení.

Název	Regulace		
	RK	OK	otáčky
<i>Kaplanova turbína (variable speed)</i>	volné	volné	volné
<i>Kaplanova turbína</i>	volné	volné	pevné
<i>Thomannova turbína (variable speed)</i>	pevné	volné	volné
<i>Thomannova turbína</i>	pevné	volné	pevné
<i>Propeller (variable speed)</i>	volné	pevné	volné
<i>Propeller</i>	volné	pevné	pevné
<i>Neregulovatelná turbína (variable speed)</i>	pevné	pevné	volné
<i>Neregulovatelná turbína</i>	pevné	pevné	pevné

Obrázek 2.6 Souhrn všech variant propelerových turbín

3. MODELOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍN

Charakteristiku turbín lze popsat jejich základními veličinami. Těmito veličinami jsou vztahy mezi n - otáčkami turbíny, Q – průtokem turbínou, H – užitným spádem, α – poměrným otočením lopatek rozváděcího kola turbíny a η – účinností turbíny. Tyto veličiny a vztahy mezi nimi získáváme z měření ve vodohospodářských laboratořích, ale také ze simulací pomocí matematických modelů. Při použití fyzikálního modelu je nutné zvolit dostatečně velký model, aby byla zajištěna věrohodnost naměřených dat. Obvykle měříme všechny veličiny pro určitý spád. Takto naměřené hodnoty jsou charakteristiky statické. Charakteristiky dynamické vyjadřují vztah mezi veličinami turbíny v přechodových režimech. Pomocí hydraulické podobnosti lze přepočítat charakteristiky naměřené na jednom modelu na celou řadu podobných turbín. [5]

3.1. Jednotkové parametry

Tyto parametry se využívají ke kvantitativnímu porovnání turbín rozdílných provedení a velikosti, pracujících při různých hodnotách měrné energie. Využíváme přepočtových vztahů, přičemž uvažujeme teoretický stroj s průměrem oběžného kola $D = 1$ m, pracujícím při spádu $H = 1$ m a při použití tekutiny o hustotě $\rho = 1$ kg.m⁻³. Uvažujeme-li tyto hodnoty, získáme následující vztahy pro výpočet jednotkových parametrů:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (3.1)$$

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

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (3.2)$$

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

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot H^{\frac{3}{2}}} \quad (3.3)$$

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

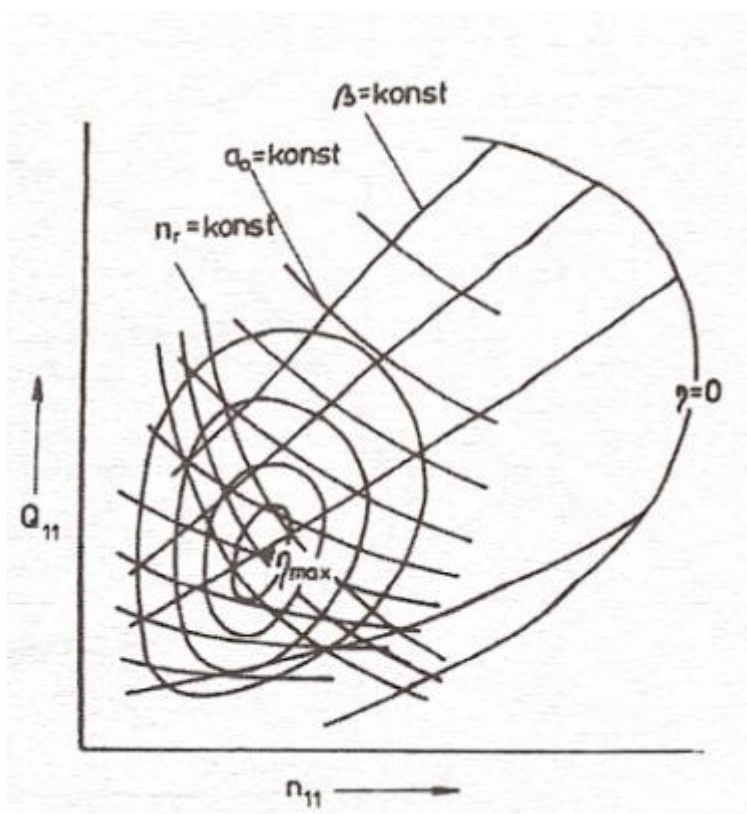
$$M_{11} = \frac{M}{D^3 \cdot H} \quad (3.4)$$

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

Takto definované parametry si zachovávají svůj rozměr dle fyzikálního významu (jednotkové otáčky – $1 \cdot \text{min}^{-1}$, jednotkový průtok – $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, jednotkový moment: $\text{N} \cdot \text{m}$ a jednotkový výkon – kW). [6]

3.2. Universální charakteristika

Universální charakteristika (Obrázek 3.1) představuje jednoduché grafické znázornění základních parametrů vodní turbíny. Rozhodující jsou závislosti účinnosti a výkonu na průtoku. Tyto závislosti lze poté upravit pomocí jednotkových parametrů pro určení výsledné charakteristiky, která je univerzálním vyjádřením úplné charakteristiky turbíny. Jako znázornění této charakteristiky se používá graf o souřadných osách Q_{11} a n_{11} . V tomto grafu jsou dále znázorněny přidružené informace, jako například účinnost – η , natočení lopatek oběžného kola – β , otevření lopatek rozváděcího kola – α , kavitační součinitel – σ a jiné. [4] [7]



Obrázek 3.1 Universální charakteristika Kaplanovy turbíny [3]

Data pro sestavení univerzální charakteristiky lze získat rozsáhlým měření na modelové turbíně, nebo pomocí výpočtů na matematickém modelu (CFD). Výhodou této charakteristiky je, že ji lze použít pro všechny turbíny, které mají geometricky podobné průtočné části jako turbína modelová. Pro konkrétní stroj s daným průměrem oběžného kola a provozními otáčkami je tedy možné přepočítat charakteristiku univerzální na charakteristiku provozní, která je vhodná pro řízení provozu vodní elektrárny.

3.3. Provozní charakteristika

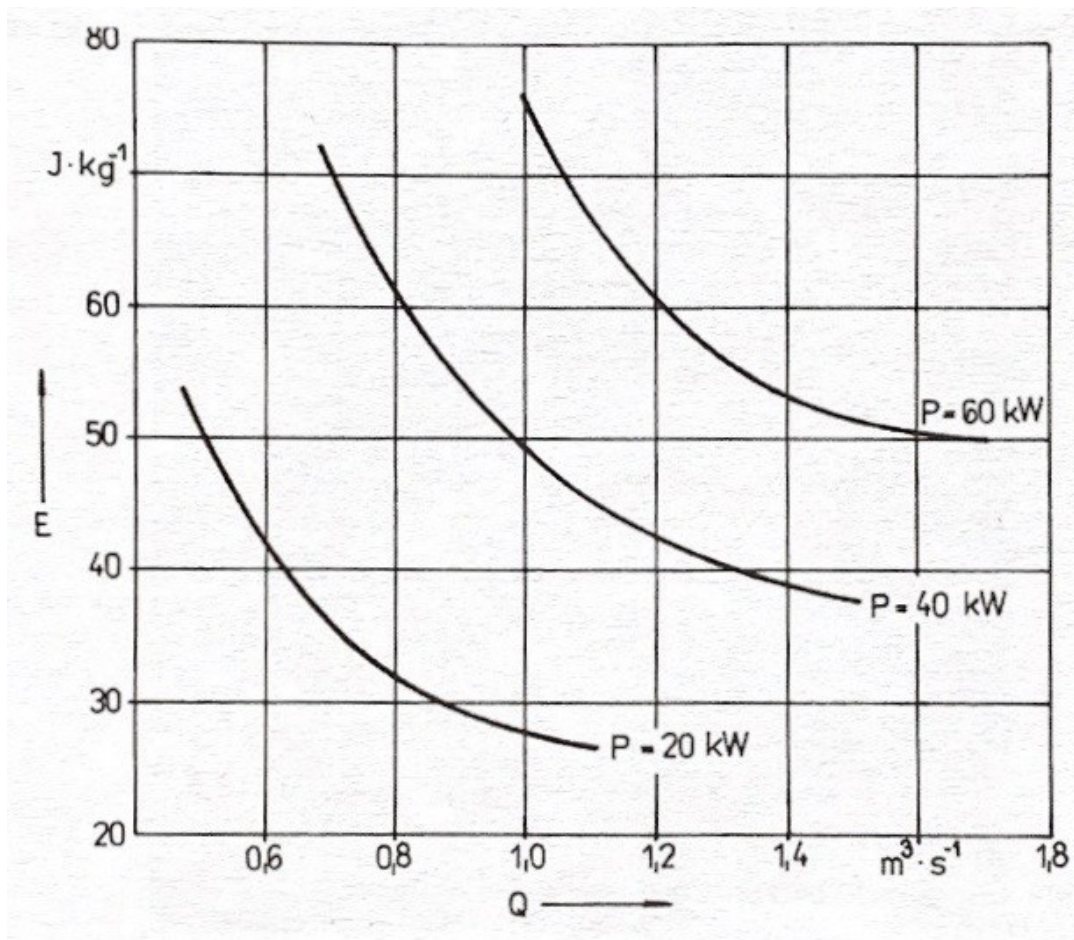
Provozní charakteristiku (Obrázek 3.2) získáme přepočtem universální charakteristiky pro turbínu o daném průměru oběžného kola a daných provozních otáčkách. Tato charakteristika je znázorněna grafem, kde na svislé ose je znázorněn spád H a na vodorovné ose průtok Q vodní turbínou. Dále jsou znázorněny přidružené parametry, obdobně jako u charakteristiky universální. Transformace z univerzální na provozní charakteristiku je provedena pomocí upravených rovnic pro jednotkové otáčky (3.1) a jednotkový průtok (3.2). Pro konkrétní hodnoty jsou rovnice upraveny následovně:

$$H = \left(\frac{n \cdot D}{n_{11}} \right)^2 \quad (3.5)$$

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

$$Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \quad (3.6)$$

kde Q je průtok turbínou, Q_{11} je jednotkový průtok, D je průměr oběžného kola a H je užitný spád. [2]



Obrázek 3.2 Pracovní charakteristika řízení provozu turbíny podle průtoku [3]

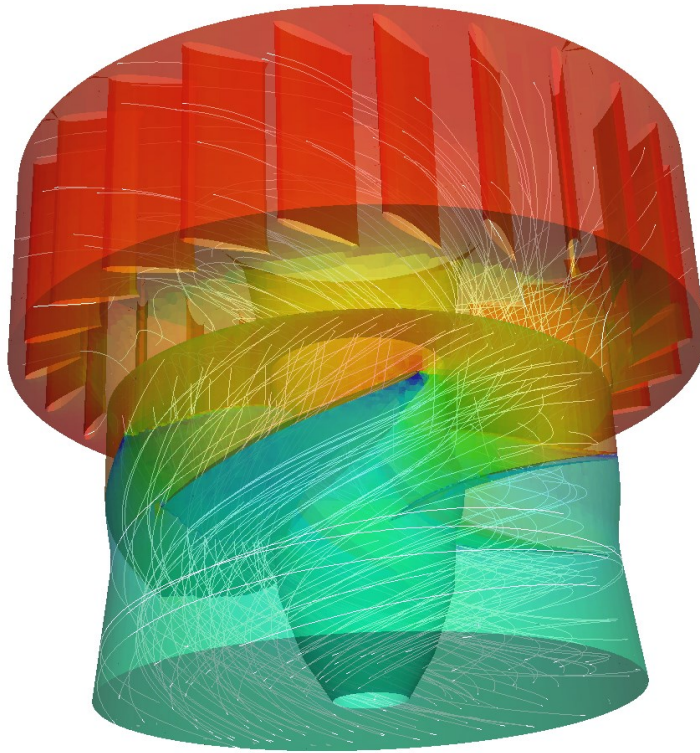
4. PODKLADY PRO ZPRACOVÁNÍ CHARAKTERISTIK TURBÍN

4.1. Fyzikální model

Cílem fyzikálního modelu je vytvořit co nejvěrnější model v daném měřítku. Na tomto modelu potom simulujeme podmínky provozu. Počáteční i okrajové podmínky jsou určeny. Dále jsou vždy určeny fyzikální konstanty zkušebny (tíhové zrychlení, hustota vody). K měření dochází na zkušebních stanicích v laboratořích. Tyto stanice se skládají z modelu (například turbíny), technologické části (čerpadla, nádrže, potrubí), snímačů (tlaku, rychlostí, síly) a vyhodnocovacího zařízení (počítač pro sběr dat). Měřicí stanice nesmí negativně ovlivňovat měření. Veškerá čidla musí být kalibrována na podmínky daného měření. Nevýhodou fyzikálního modelu je finanční, energetická a časová náročnost. Výsledky fyzikálního modelu mohou být následně ověřeny použitím matematického modelování, ale i naopak. [8]

4.2. Matematický model

S rostoucím výpočetním výkonem počítačů získáváme možnosti řešit stále komplikovanější matematické problémy. Rozvoj v oboru výpočetní techniky vede k vývoji výpočetního softwaru. Matematické modelování se díky tomu používá v čím dál více oborech, především při návrhu a optimalizaci výsledného produktu. Cílem matematického modelování je popsat fyzikální problém soustavou rovnic a následně je vyřešit. V oboru vodního hospodářství využíváme rovnice k popisu proudění kapalin, konkrétně soustavu čtyř rovnic a to tři Navier-Stokesovy rovnice a rovnici kontinuity. Základem pro matematické modelování je digitální 3D model, který slouží jako podklad k vytvoření výpočetní sítě. Výpočet probíhá při přesně daných okrajových podmínkách. Po výpočtu získáváme informace o sledovaných veličinách ve všech bodech výpočetní sítě. Další výhodou této metody je její energetická, finanční a časová nenáročnost v porovnání s fyzikálním modelováním. Na obrázku 4.1 je ukázka výstupu z matematického modelu. [1] [8]



Obrázek 4.1 Ukázka výsledků matematického modelu Kaplanovy turbíny [9]

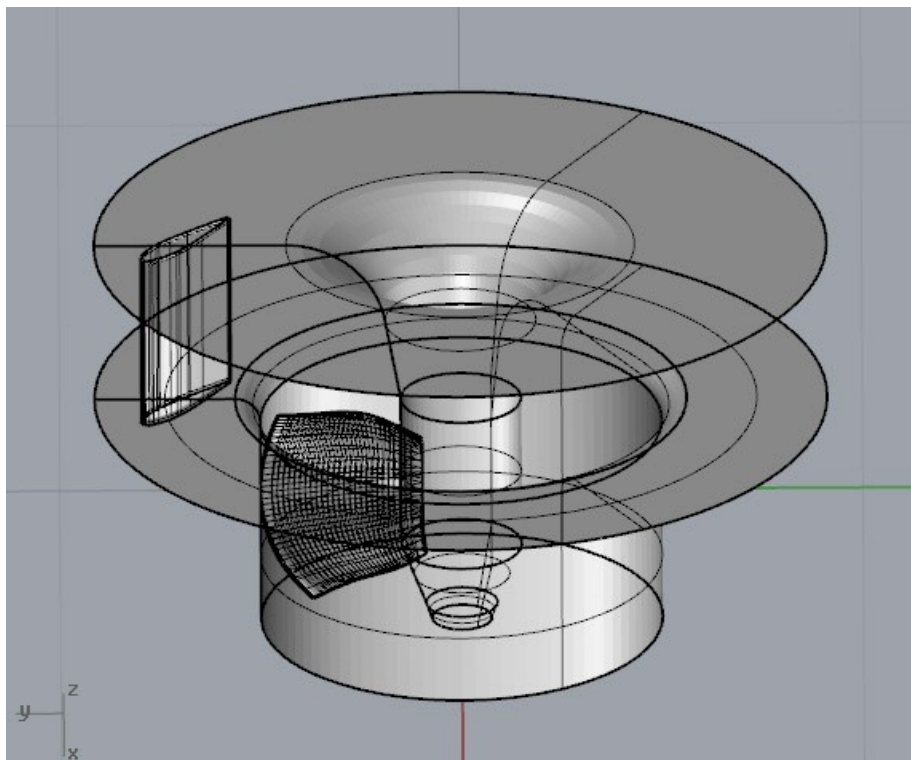
4.3. Přímé měření

V porovnání s fyzikálním nebo matematickým modelováním je přímé měření nejvěrnější metodou. Jedná se o měření skutečných hodnot na požadovaném místě. Nevýhodou je, že toto měření je velmi náročné a drahé, při výzkumu prakticky nepoužitelné. Pokud bychom chtěli výsledky srovnatelné s matematickým modelováním, museli bychom mít přesně tolik měřících přístrojů, kolik je bodů ve výpočetní síti. Proto tuto metodu používáme pouze k ověření, zda skutečnost odpovídá výsledkům získaným z matematického nebo fyzikálního modelu. [8]

5. ZPRACOVÁNÍ CHARAKTERISTIK

5.1. Zpracovávaná data a jejich načtení

Data zpracovávaná v této práci byla poskytnuta panem Ing. Martinem Kantorem Phd. z fakulty strojního inženýrství Univerzity J. E. Purkyně. Jedná se o tabulkový výstup z matematického modelu Kaplanovy turbíny.

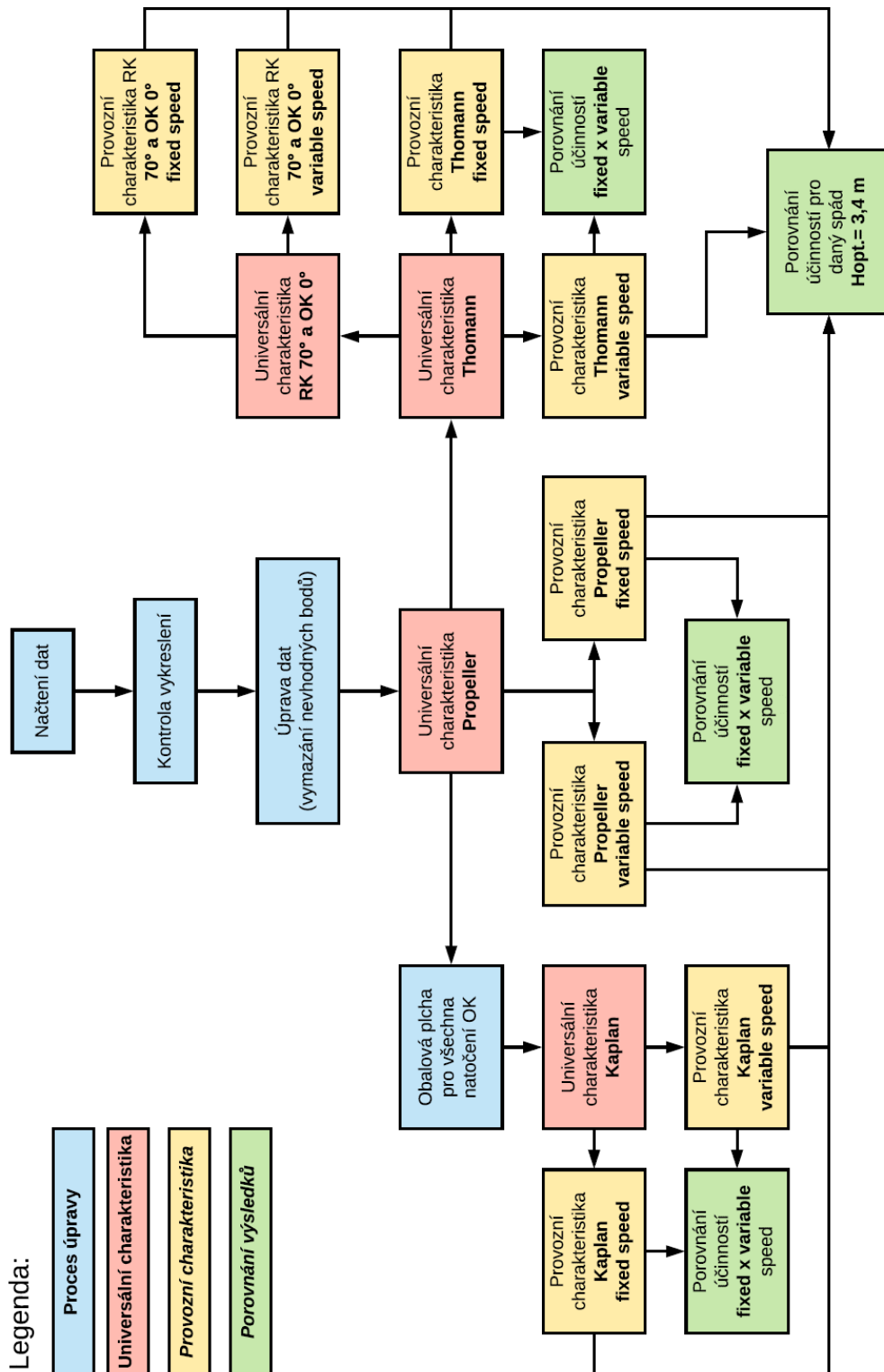


Obrázek 5.1 3D model Kaplanovy turbíny pro matematické modelování

Jedná se Kaplanovu turbínu se 3 lopatkami OK. Směr rotace OK je pravotočivý. Na obrázku 5.1 je ukázka konkrétního modelu, jenž slouží jako vstup pro výpočet dat zpracovávaných v této práci. Natočení OK odpovídá iniciační poloze, tedy natočení OK 0° . Lopatka RK je symetrická, zde v iniciačním natočení 50° od plně otevřené polohy. Celkový počet lopatek RK je 14.

Důležité hodnoty pro tuto práci jsou především účinnost a výkon pro jednotlivá natočení RK, OK a otáčky ve všech kombinacích. Konkrétně pro natočení OK od -10° do $+10^\circ$ (po 5°), tedy 5 možností, natočení RK od 30° do 80° (po $2,5^\circ$) tedy 21 možností a pro každou kombinaci RK a OK 6 variant otáček. Potřebná data byla načtena do programu Matlab. [10] Průtoky, otáčky a výkony byly přepočteny na jednotkové veličiny dle vzorců zmíněných v kapitole 3.1. Po vykreslení univerzální účinnosti charakteristiky byla viditelně špatná data vyřazena a dále nepoužívána. Celkem bylo tedy

pro výpočty uvažováno přibližně 600 hodnot. Body byly vždy rozděleny dle požadovaných parametrů a vyneseny do prostorového grafu. Těmito body byla vhodně proložena plocha, z které byly vyinterpolovány nové hodnoty. Průběh postupu je znázorněn na obrázku 5.2. [11]



Obrázek 5.2 Schéma postupu při tvorbě turbínových charakteristik [12]

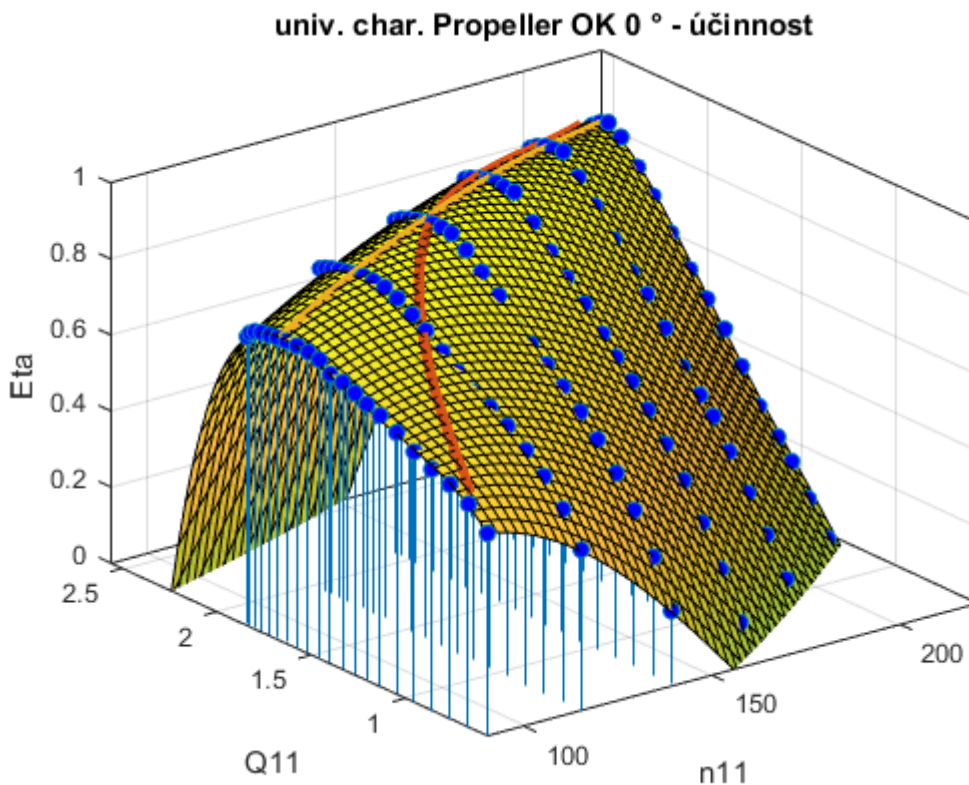
5.2. Modelová charakteristika

Modelová charakteristika je reprezentována jednotkovými veličinami a grafy jsou vynášeny ve volném rovnoběžném promítání, kdy podstavu tvoří osy n_{11} a Q_{11} k nimž je vynášena jako výšková pořadnice účinnost, jednotkový výkon a natočení RK. Druhou variantou je zobrazení do kartézské soustavy souřadnic s osami n_{11} a Q_{11} , kde jsou vynášené veličiny zobrazeny jako vrstevnice. Práce se nezabývá scale up efektem u turbín Kaplanova typu.

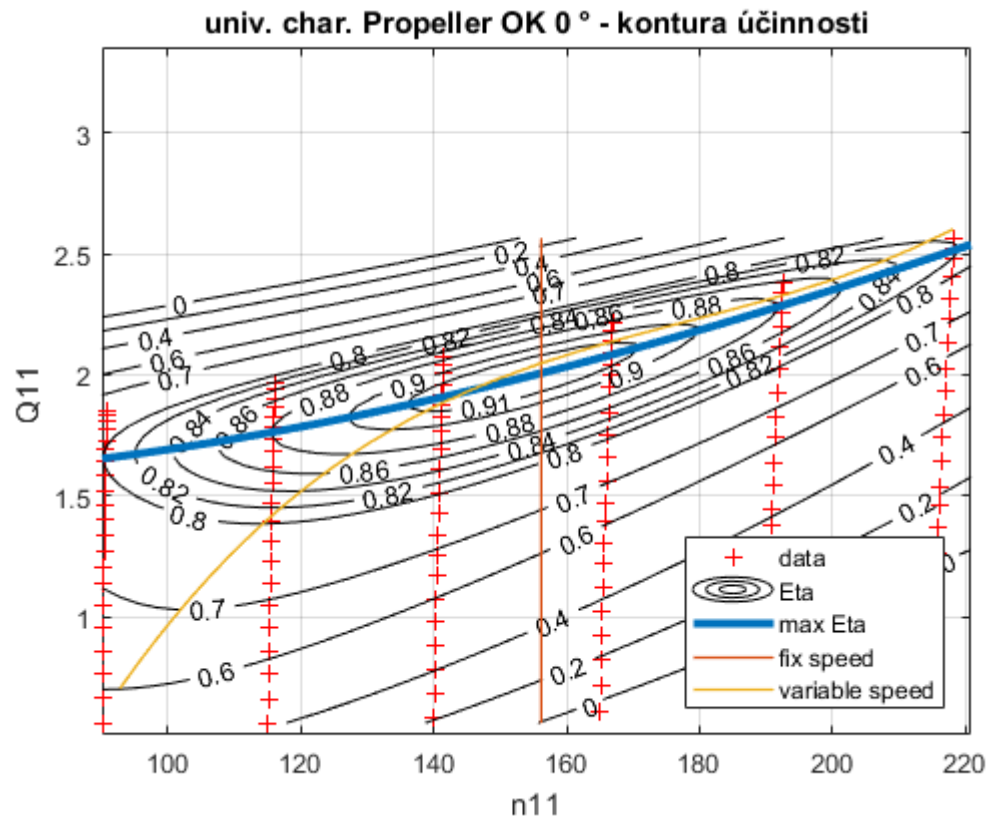
5.2.1. Propelerová turbína

Protože propelerová turbína má pevné natočení OK, byla data seřazena dle jednotlivých natočení OK a rozřazena do struktur, kde každé natočení OK má své souřadnice n_{11} , Q_{11} a k nim přiřazenou účinnost, jednotkový výkon a natočení RK.

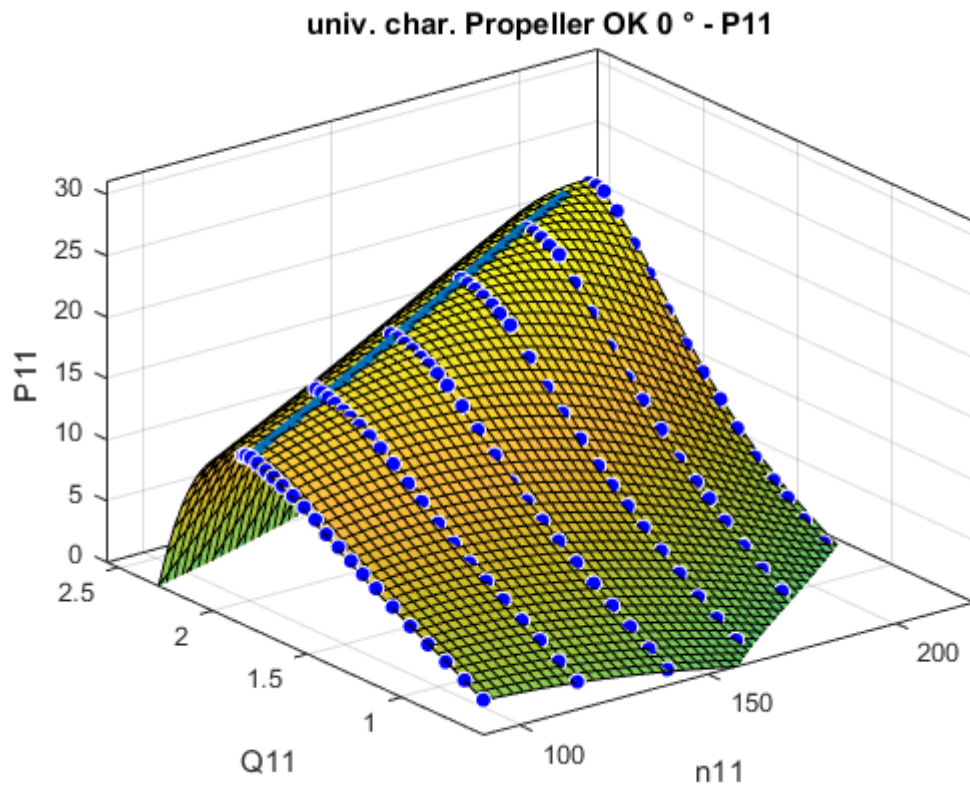
V grafu 5.1 je vykreslena účinnostní charakteristika pro turbínu s pevným natočením OK 0° . Vrcholová křivka spojuje body s nejvyšší účinností v rozsahu n_{11} . Oranžová křivka reprezentuje body, které jsou nejlepší v rozsahu Q_{11} a budou využity pro variantu s frekvenčním měničem.



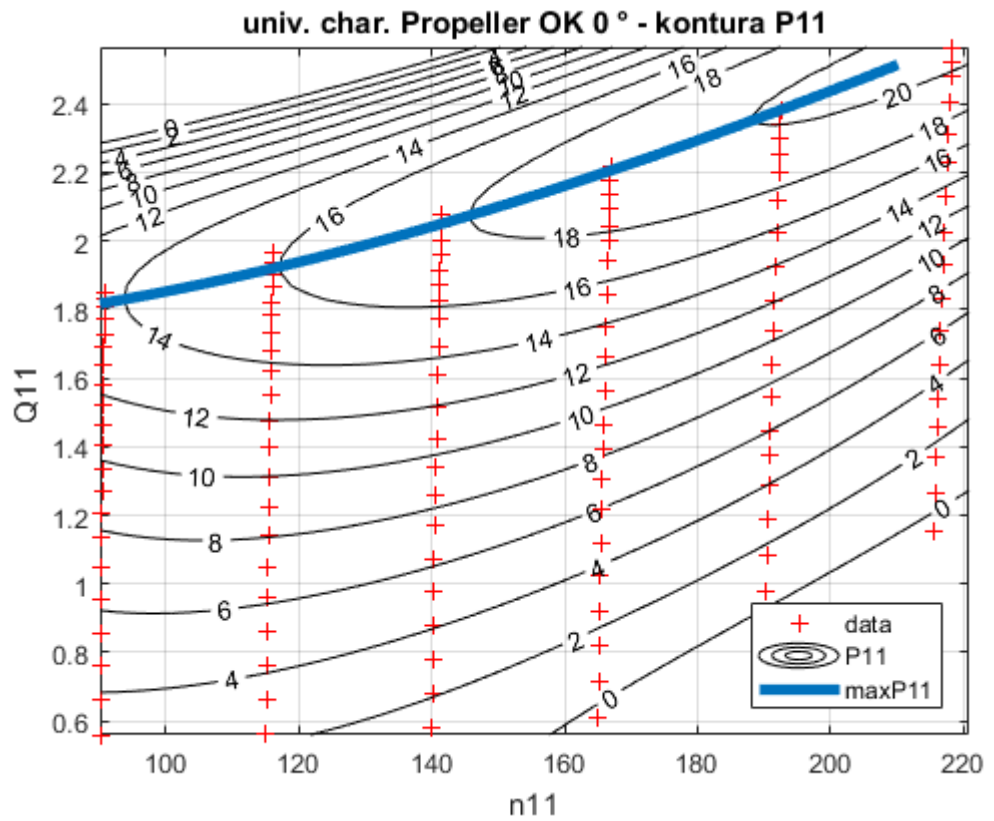
Graf 5.1 Účinnostní charakteristika - Propeller OK 0°



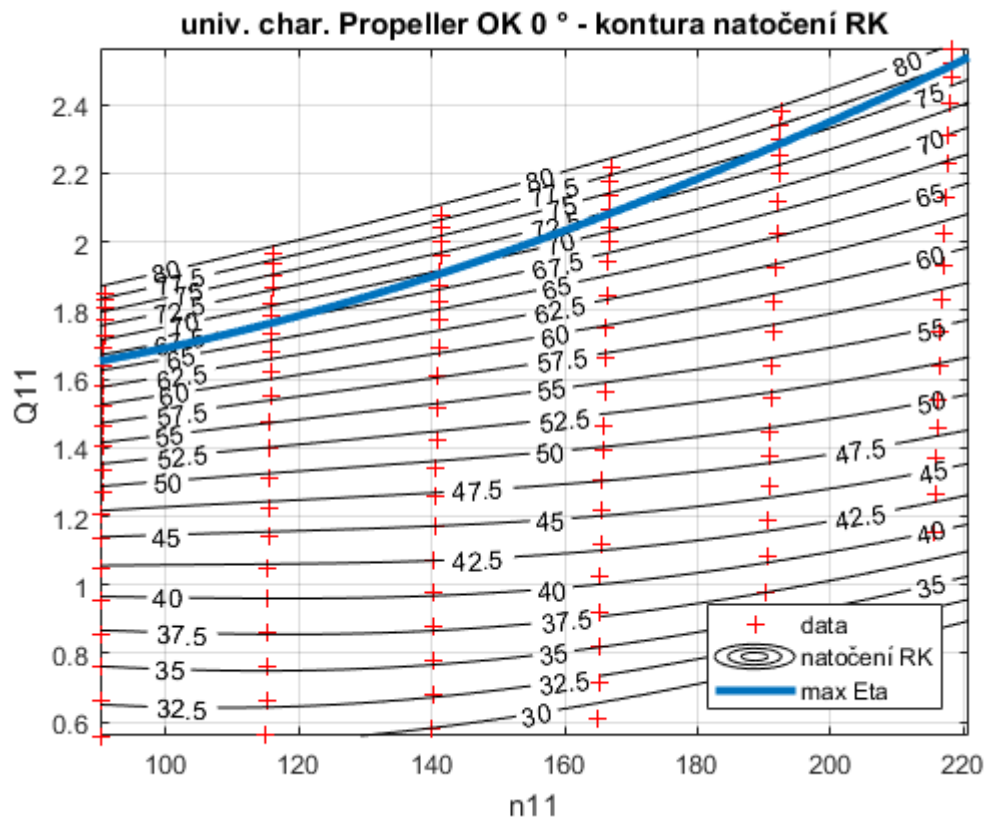
Graf 5.2 Kontura účinnosti - Propeller OK 0°



Graf 5.3 Charakteristika jednotkového výkonu - Propeller OK 0°

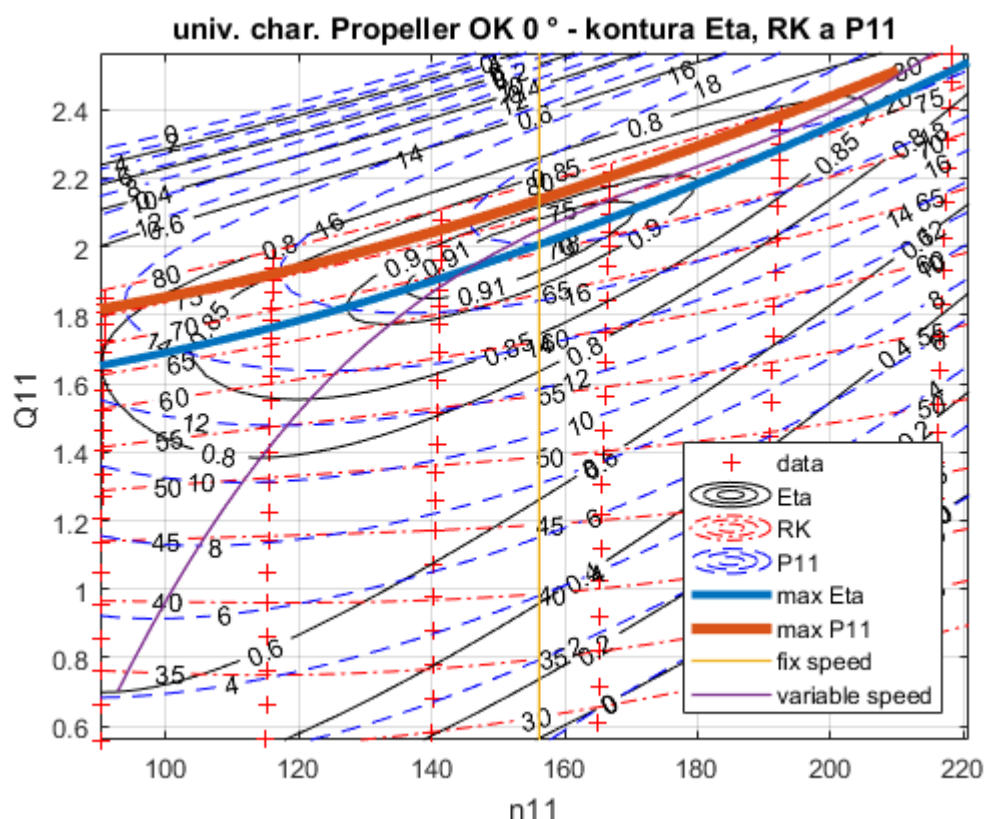


Graf 5.4 Kontura jednotkového výkonu - Propeller OK 0°



Graf 5.5 Kontura natočení RK - Propeller OK 0°

V grafech 5.1 – 5.5 Jsou vykresleny jednotlivé veličiny, tedy účinnost, natočení RK a jednotkový výkon, pro turbínu s pevným natočením OK 0°. Červené křížky představují data, z kterých byla charakteristika tvořena. Křivka fix speed odpovídá průběhu účinnosti pro stroj daného průměru, provozních otáček a spádu. Křivka variable speed odpovídá průběhu účinnosti stroje stejného průměru na stejném spádu, s použitím frekvenčního měniče.



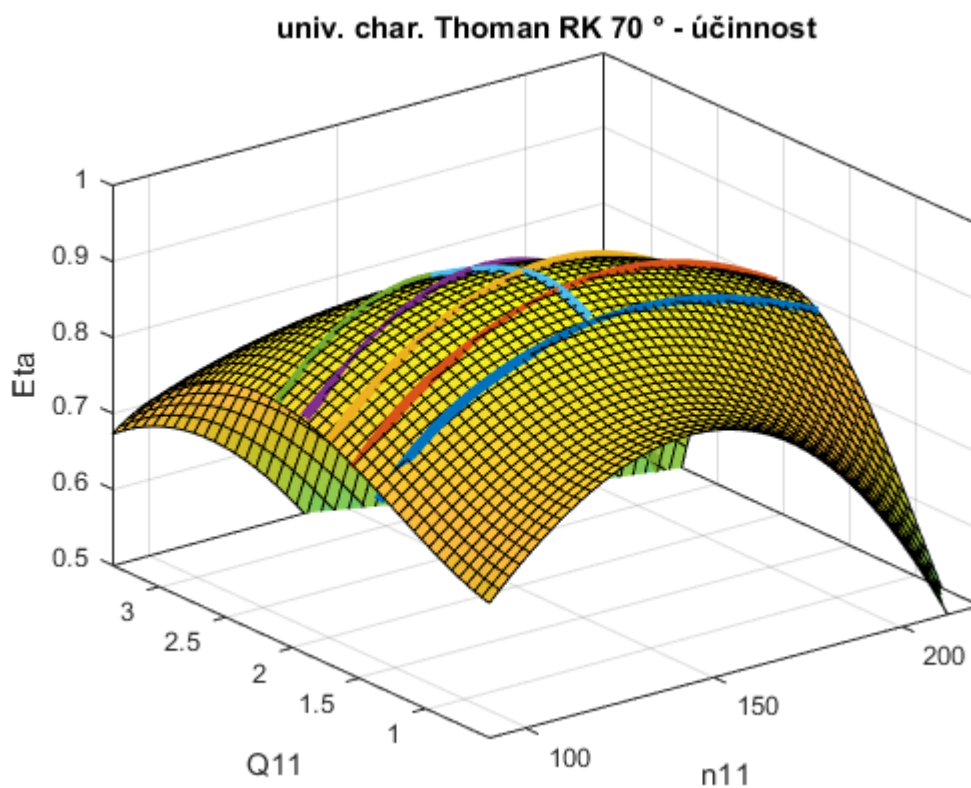
Graf 5.6 Univerzální charakteristika - Propeller OK 0°

V grafu 5.6 je vyobrazen soubor všech zpracovávaných veličin pro jedno natočení OK. Tyto grafy byly vytvořeny pro všech 5 natočení RK a budou součástí přílohy této práce. Takto upravená data byla dále použita k vytvoření univerzálních charakteristik Kaplanovy a Thomanovy turbíny, ale i k transformaci z charakteristiky univerzální do charakteristiky provozní.

5.2.2. Thomannova turbína

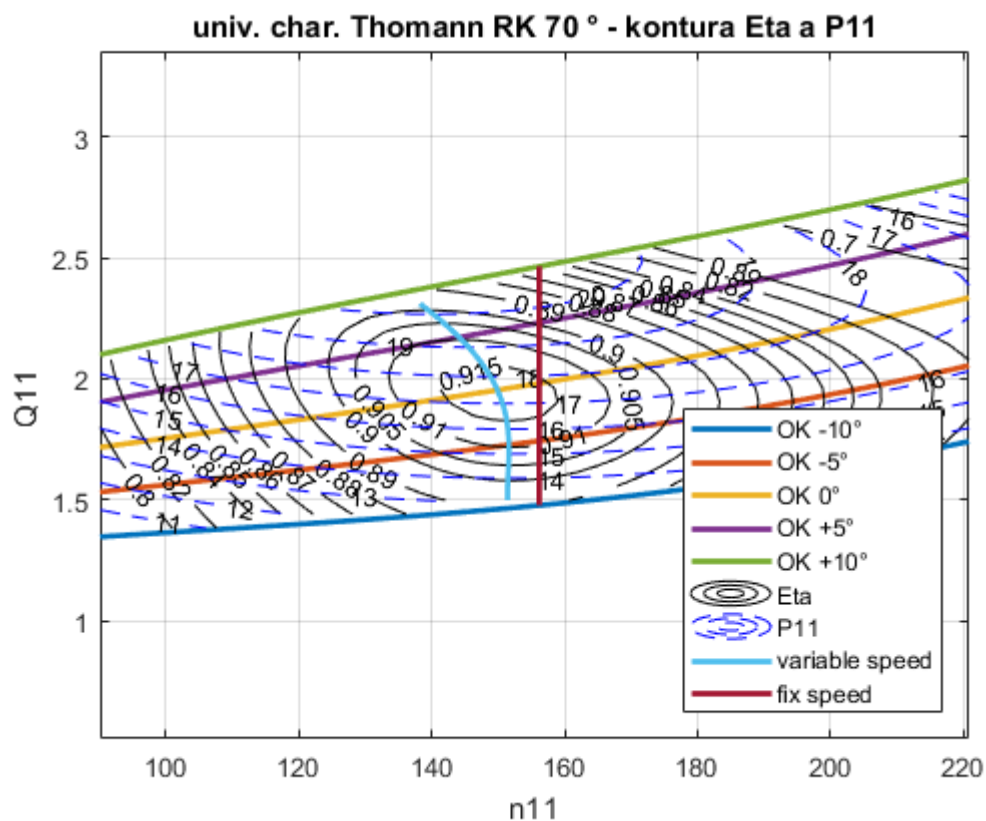
Univerzální charakteristika Thomannovy turbíny s pevným natočením RK, byla vytvořena z dat odpovídajícím danému natočení RK pro jednotlivá natočení OK, v tomto případě z pěti křivek reprezentujících natočení OK. Každá z křivek nese informaci o účinnosti a jednotkovém výkonu. Těmito křivkami byly opět vhodně proloženy plochy

s důrazem na minimální rezidua, tedy odchylky od daných křivek. Oblast mimo dané křivky není podložena daty a je pouze interpolována, proto není vykreslena.



Graf 5.7 Účinnostní charakteristika - Thomann RK 70°

V grafu je vykreslena účinnostní charakteristika pro turbínu s pevným natočením RK 70°. Jednotlivé křivky představují natočení OK od -10° do +10°. Světle modrá křivka reprezentuje body s nejlepší účinností v rozsahu Q11 a budou využity pro variantu s frekvenčním měničem.



Graf 5.8 Universální charakteristika - Thomann RK 70°

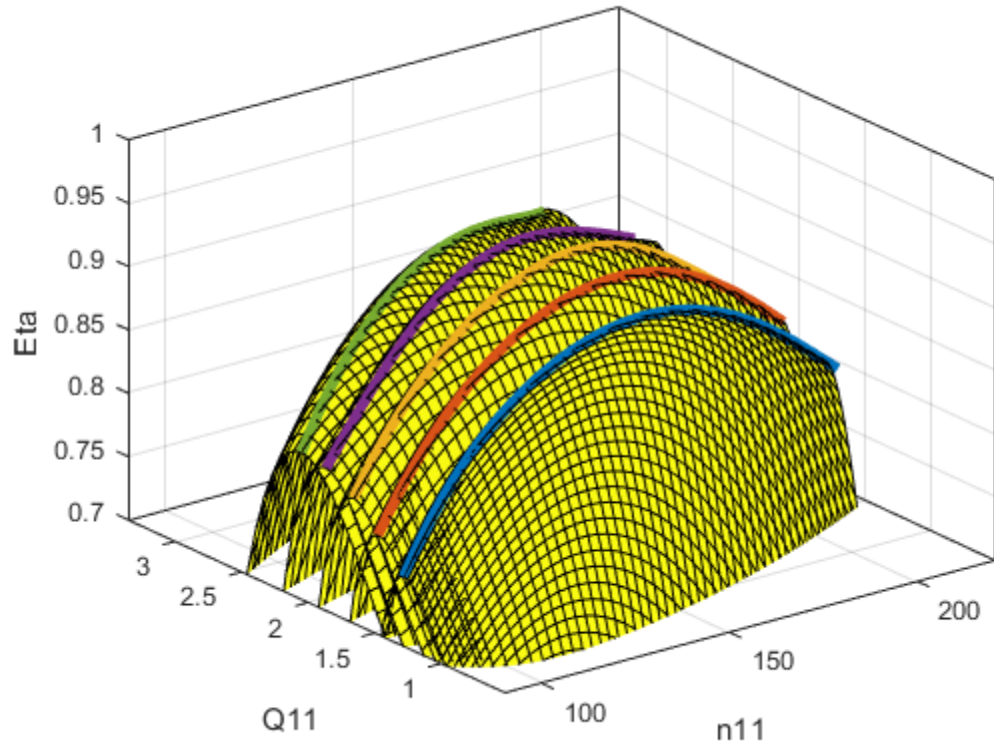
Obdobně jako je znázorněno v grafu 5.8 byla vytvořena i charakteristika pro natočení RK 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75° a 80°. Tyto grafy jsou součástí přílohy této práce. Univerzální charakteristika Thomannovy turbíny byla dále použita jako podklad pro univerzální charakteristiku turbíny s pevným natočením RK a OK. Dále také pro vytvoření provozní charakteristiky Thomannovy turbíny.

5.2.3. Kaplanova turbína

Charakteristika Kaplanovy turbíny odpovídá charakteristice propelerových turbín všech natočení. Proto bylo důležité vytvořit obalovou plochu pro všech 5 natočení OK. Nejprve byl proveden soutisk všech účinností a jednotkových výkonů pro jednotlivá natočení OK (grafy 5.9 a 5.10).

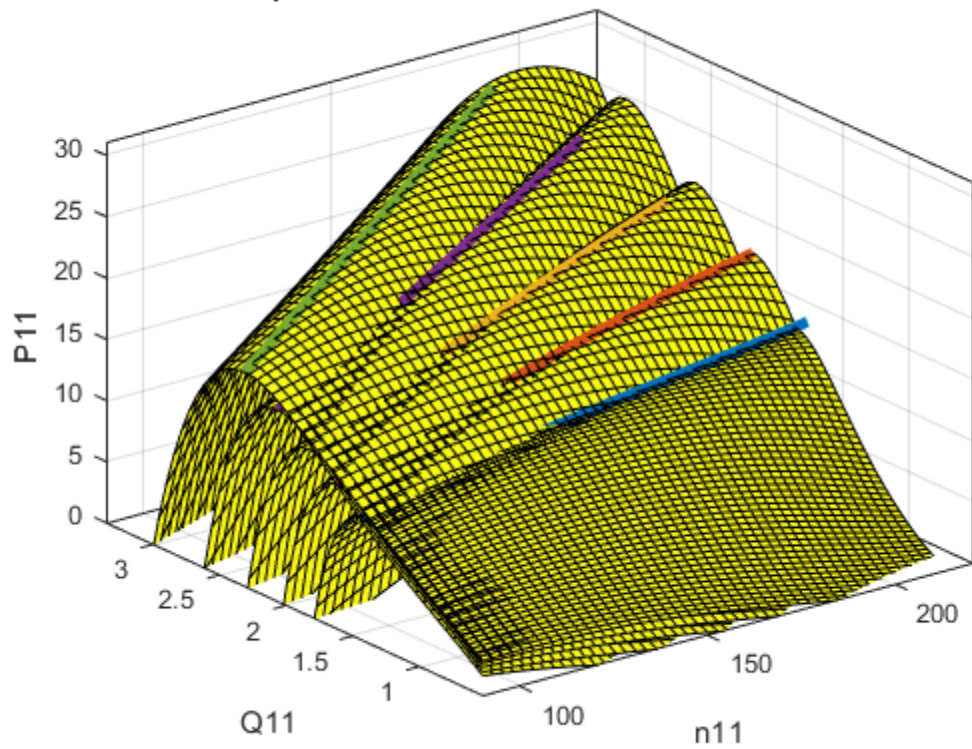
Poté byly sestrojeny obalové plochy všech natočení OK (grafy 5.11 a 5.12). Důležitým faktorem zde byla rezidua, tedy velikosti odchylek od ploch, které sloužily jako podklad. U účinnosti bylo dosaženo přesnosti v řádu 10^{-3} , tedy promile účinnosti. U jednotkového výkonu se odchylka pohybovala v řádu setin kW. Tyto odchylky byly prohlášeny za přijatelné a takto vytvořené plochy použity k vykreslení univerzální charakteristiky Kaplanovy turbíny. [13]

Propeller všechna natočení OK - soutisk účinnosti

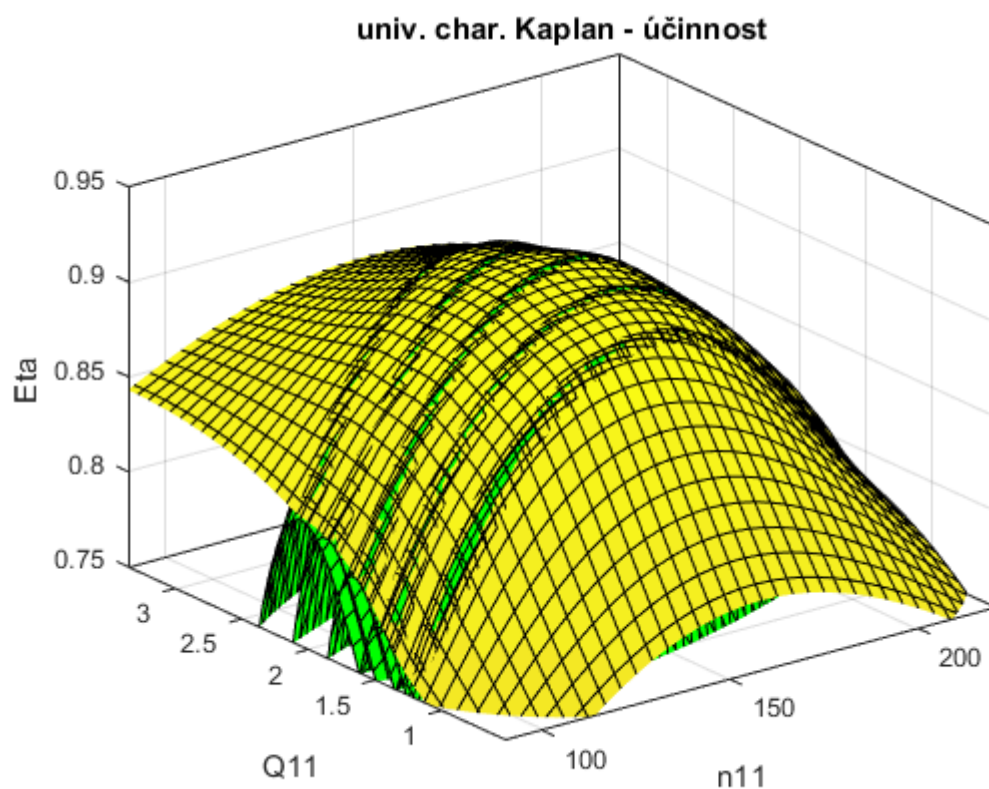


Graf 5.9 Soutisk účinnostních charakteristik pro jednotlivá natočení OK

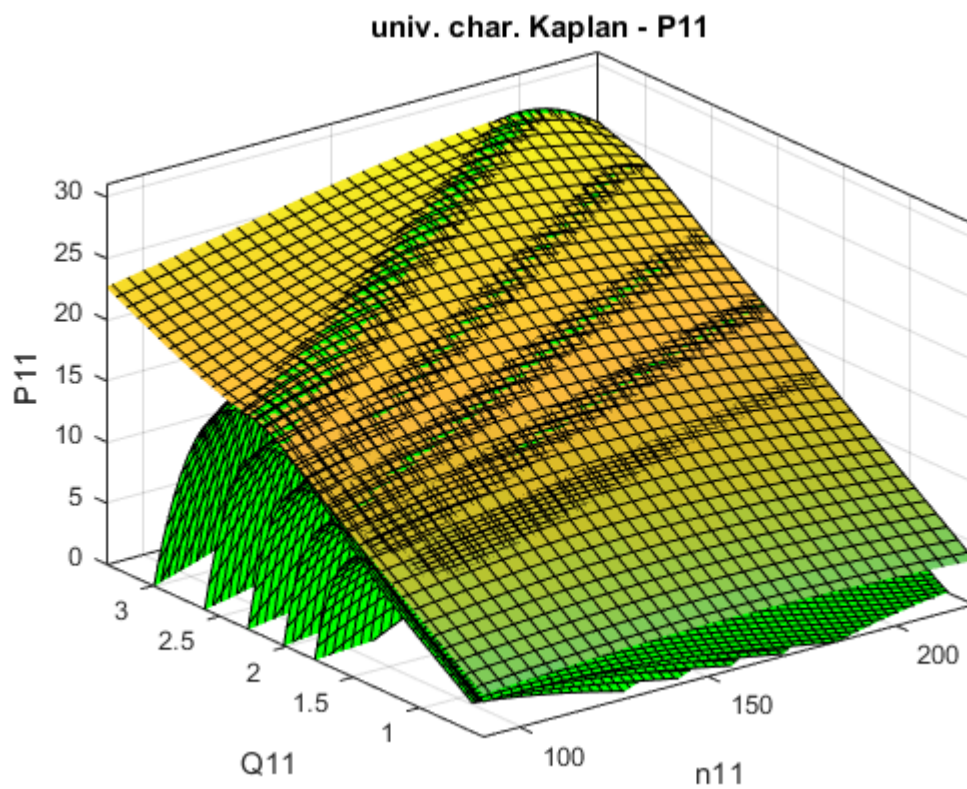
Propeller všechna natočení OK - soutisk P11



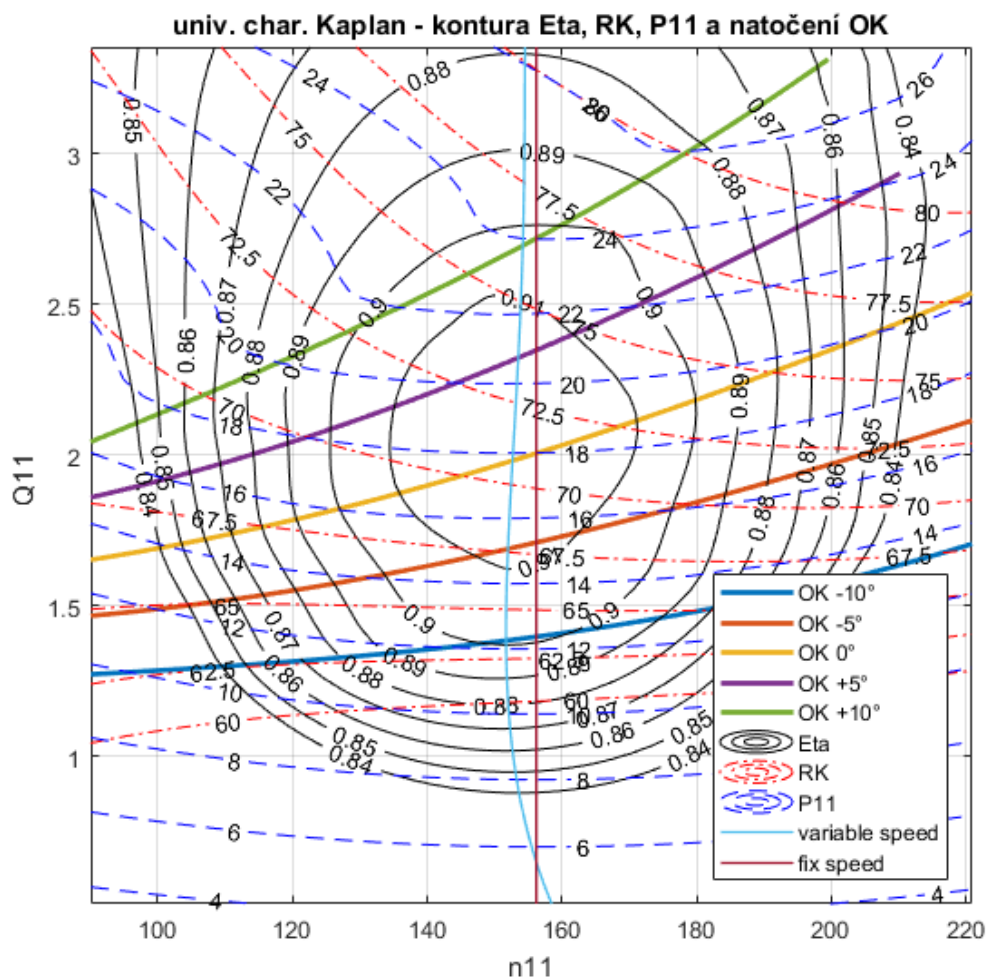
Graf 5.10 Soutisk charakteristik P11 pro jednotlivá natočení OK



Graf 5.11 Účinnostní charakteristika - Kaplan



Graf 5.12 Charakteristika jednotkového výkonu - Kaplan

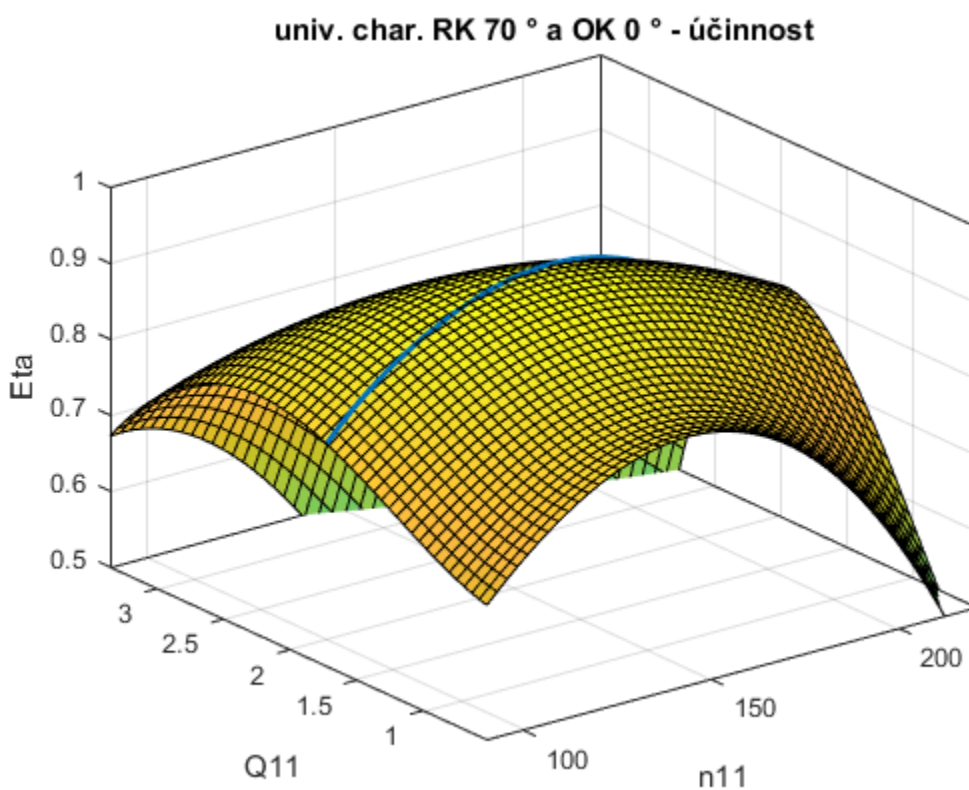


Graf 5.13 Universální charakteristika - Kaplan

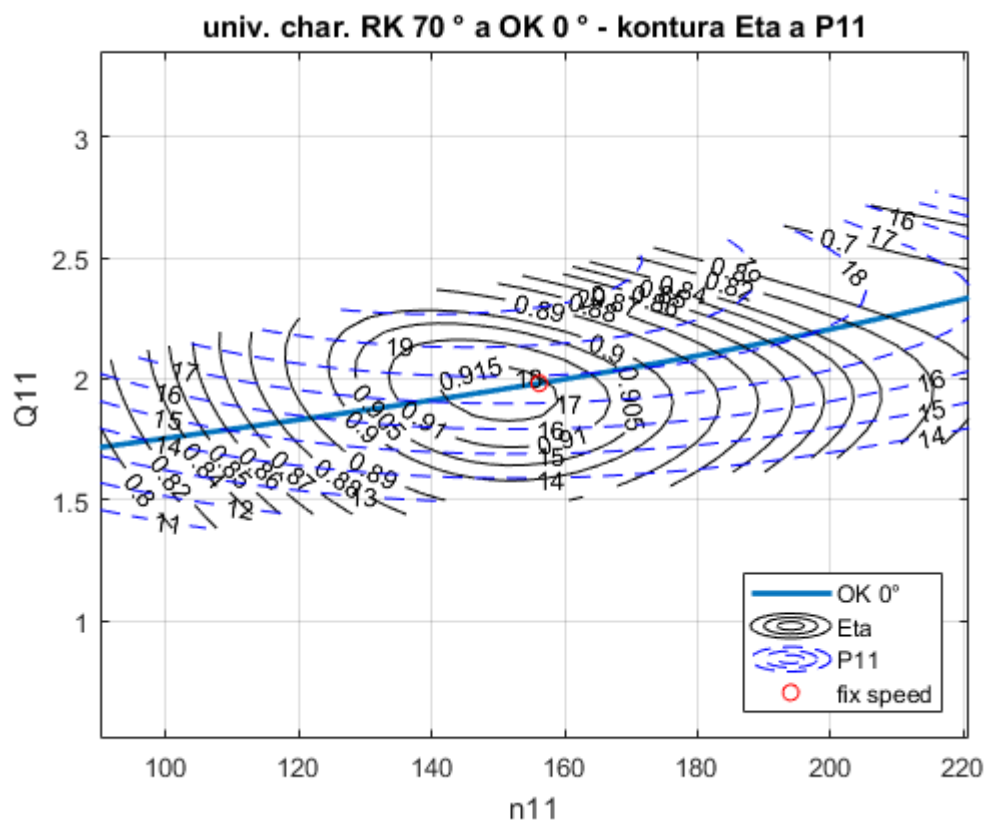
V grafu 5.13 jsou jako křivky vykreslena jednotlivá natočení OK. Oblast nad zelenou křivkou (OK +10°) a pod modrou křivkou (OK -10°) vznikla pouze interpolací, protože v těchto oblastech chybí zpracovávaná data, a z tohoto důvodu nemůžeme kontury vykreslené v těchto oblastech považovat za věrohodné. Dále je v grafu vykreslena účinnost, jednotkový výkon a natočení RK. Také jsou vykresleny křivky pro konkrétní lokalitu s daným spádem a průměrem OK ve variantách s danými provozními otáčkami (fixed speed) nebo frekvenčním měničem (variable speed). Lze si všimnout, že rozdíl mezi těmito křivkami je u Kaplanovy turbíny jen nepatrný.

5.2.4. Turbína s pevným natočením RK a OK

Universální charakteristika neregulovatelné turbína (Graf 5.14 a 5.15), tedy turbíny s pevným natočením RK a OK, je v grafu znázorněna pouze jednou křivkou. Tato křivka vychází z grafu pro Thomannovu turbínu omezenou pouze na jedno natočení OK. Hodnoty účinnosti a jednotkového výkonu jsou odečteny podle průniků dané křivky s konturami těchto veličin. Provozní charakteristika s danými provozními otáčkami bude pouze jeden bod, zatímco s frekvenčním měničem celá křivka OK 0°.



Graf 5.14 Účinnostní charakteristika - RK 70° a OK 0°



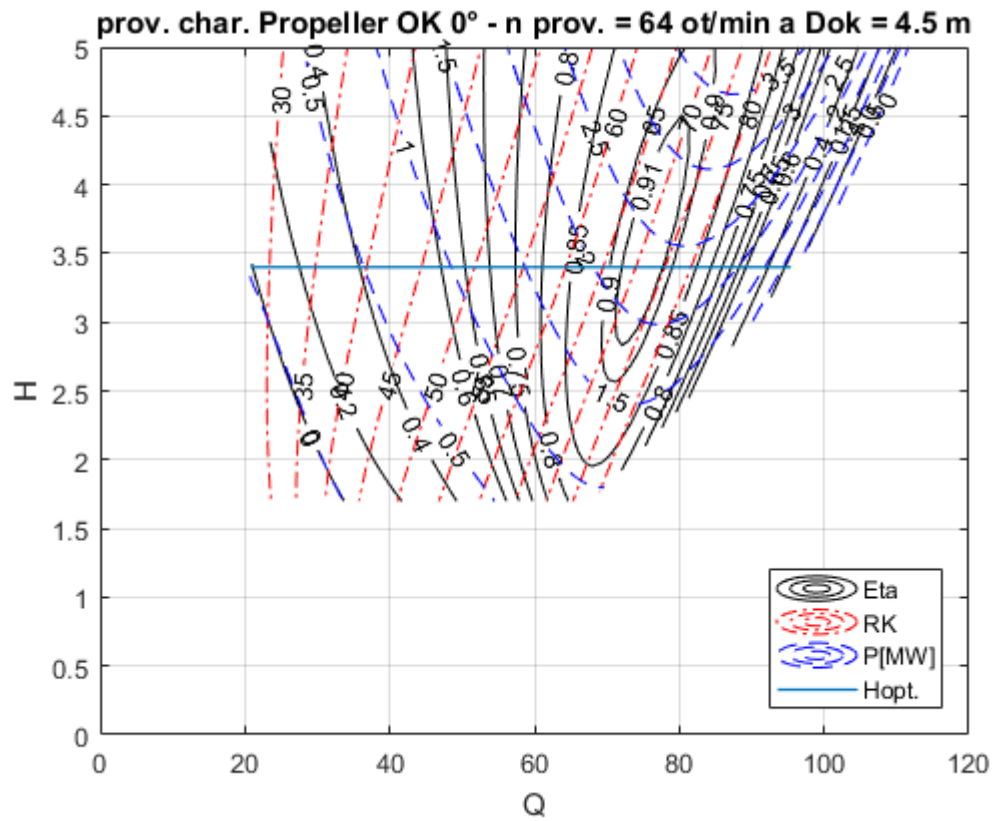
Graf 5.15 Universální charakteristika - RK 70° a OK 0°

5.3. Provozní charakteristika – dané provozní otáčky

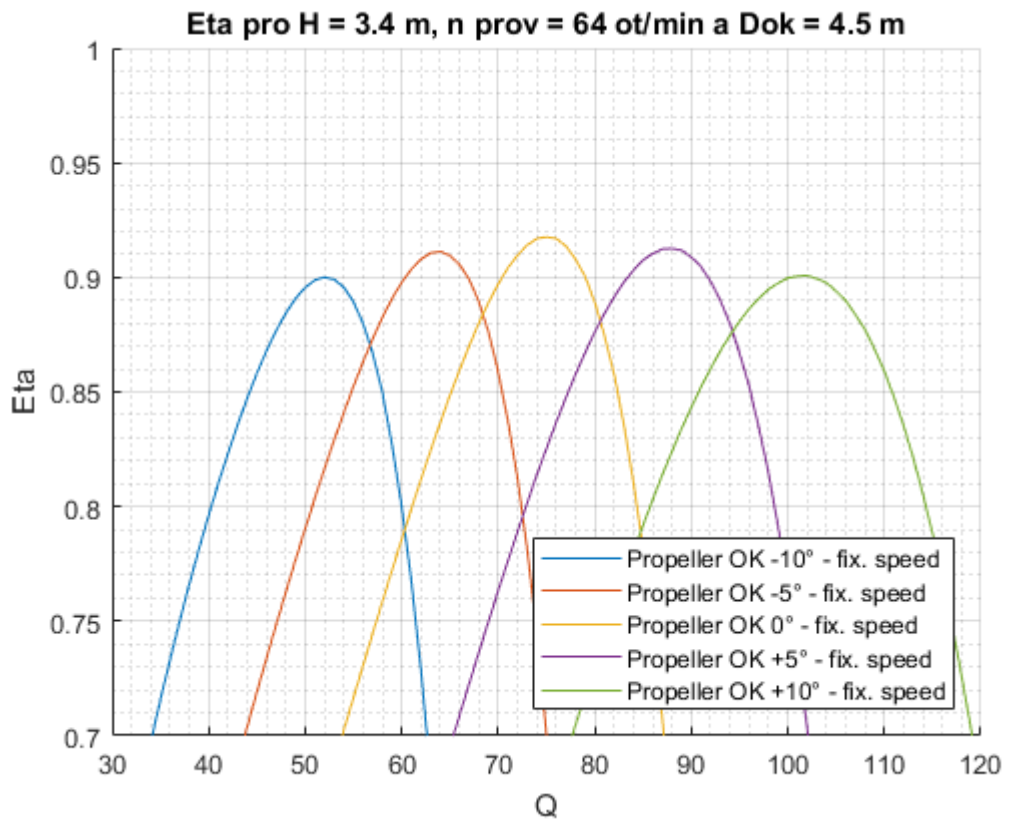
Provozní charakteristika je charakteristika pro konkrétní stroj na konkrétní lokalitě, tedy daným spádem, průměrem oběžného kola a provozními otáčkami (více v kapitole 3.3.). V této práci bylo zvoleno oběžné kolo $D_{ok} = 4,5$ m, spád $H_{opt.} = 3,4$ m a provozní otáčky $n_{prov.} = 64$ ot/min. Tyto parametry odpovídají turbíně s označením TG1 na lokalitě MVE Liběchov. Tyto parametry lze ve vytvořeném programu libovolně měnit a vytvořit tak nové charakteristiky pro jinou lokalitu.

5.3.1. Propelerová turbína

Provozní charakteristika propelerové turbíny byla vytvořena transformací její univerzální charakteristiky. V grafu 5.16 je vykreslena provozní charakteristika pro turbínu s pevným natočením OK 0°. Dále jsou v grafu vyneseny kontury účinnosti, natočení RK a výkonu v MW. Podobně byly vytvořeny grafy pro všechna ostatní natočení OK. Tyto grafy jsou součástí přílohy této práce.



Graf 5.16 Provozní charakteristika - Propeller OK 0° (fixed speed)

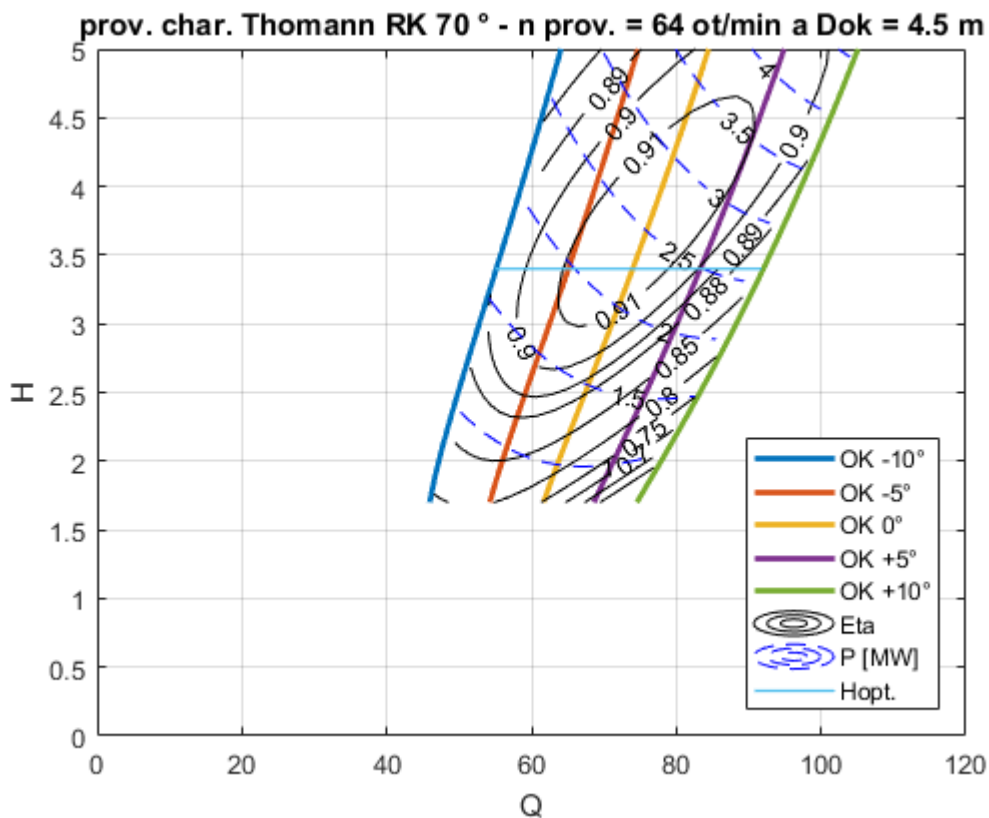


Graf 5.17 Průběh účinnosti pro daný spád - Propeller (fixed speed)

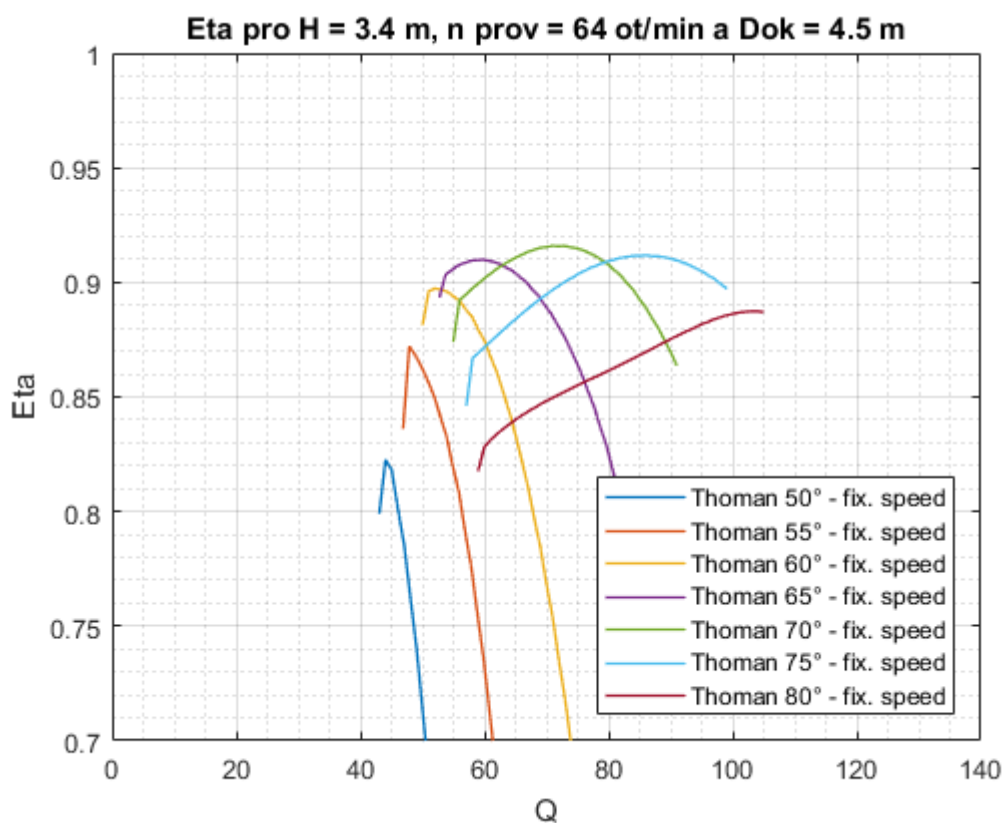
Provedeme-li řez provozní charakteristikou při konstantní hodnotě H , v tomto případě $H_{opt.} = 3.4$ m, získáme průběh účinnosti a regulační rozsah průtoků. V grafu 5.17 je zobrazen soutisk účinností pro jednotlivá natočení OK. Nejvyšší účinnost zde vychází u turbíny s natočením OK 0° .

5.3.2. Thomannova turbína

Provozní charakteristika Thomannovy turbíny vznikla opět transformací univerzální charakteristiky pro konkrétní lokalitu. V grafu 5.18 jsou jako křivky zobrazeny jednotlivá natočení OK pro pevné natočení RK 70° . Dále je v grafu vynesena účinnost a výkon v MW. Grafy pro ostatní natočení RK jsou součástí přílohy.



Graf 5.18 Provozní charakteristika - Thomann RK 70° (fixed speed)

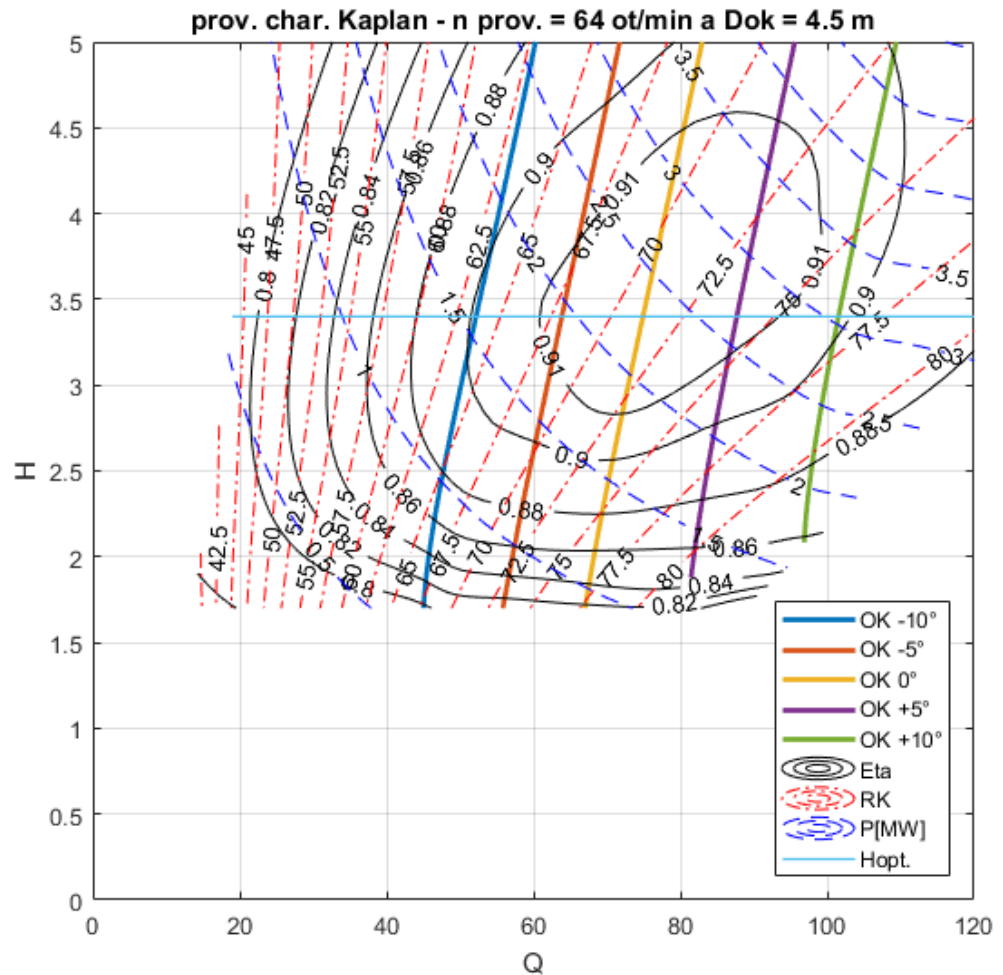


Graf 5.19 Průběh účinnosti pro daný spád - Thomann (fixed speed)

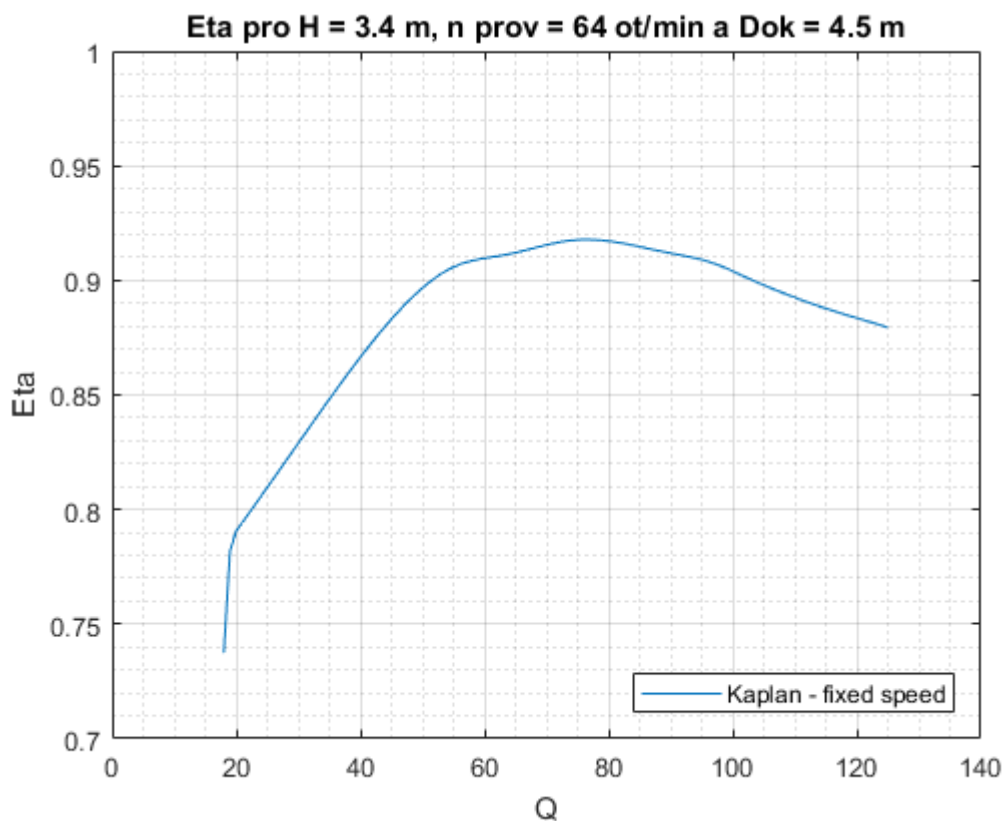
Pro konstantní spád opět získáme průběh účinnosti v závislosti na průtoku. Porovnáním účinností strojů s různými natočeními RK zjistíme, že nevyšší účinnosti dosahuje turbína s natočením RK 70°. Při porovnání rozsahů průtoku s propelerovou turbínou vychází Thomannova turbína lépe, tedy s vyšší účinností ve větším rozsahu průtoků.

5.3.3. Kaplanova turbína

V provozní charakteristice Kaplanovy turbíny jsou znázorněna jednotlivá natočení OK jako křivky. Dále jsou v grafu 5.20 znázorněna účinnost, výkon a natočení RK jako kontury.



Graf 5.20 Provozní charakteristika - Kaplan (fixed speed)



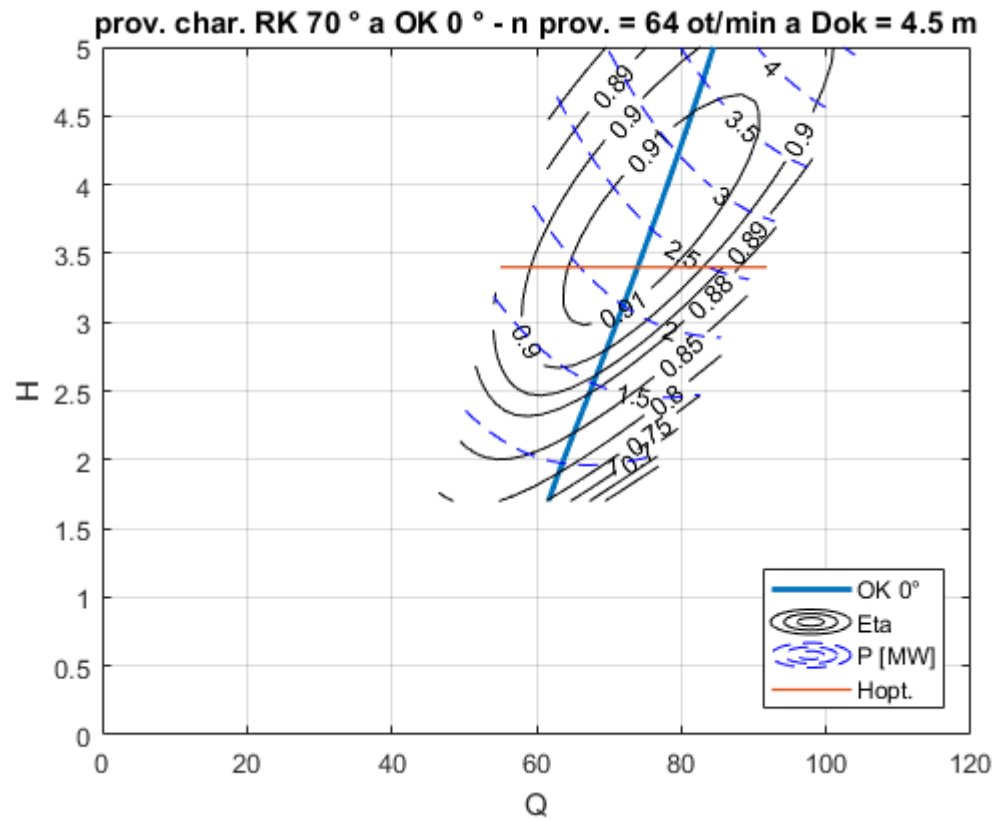
Graf 5.21 Průběh účinnosti pro daný spád - Kaplan (fixed speed)

Průběh účinnosti Kaplanovy turbíny (Graf 5.21) tvoří obalovou křivku k jednotlivým propelerovým turbínám. V tomto grafu lze vidět výhodu dvojí regulace Kaplanovy turbíny a sice velký rozsah průtoků s vysokou účinností.

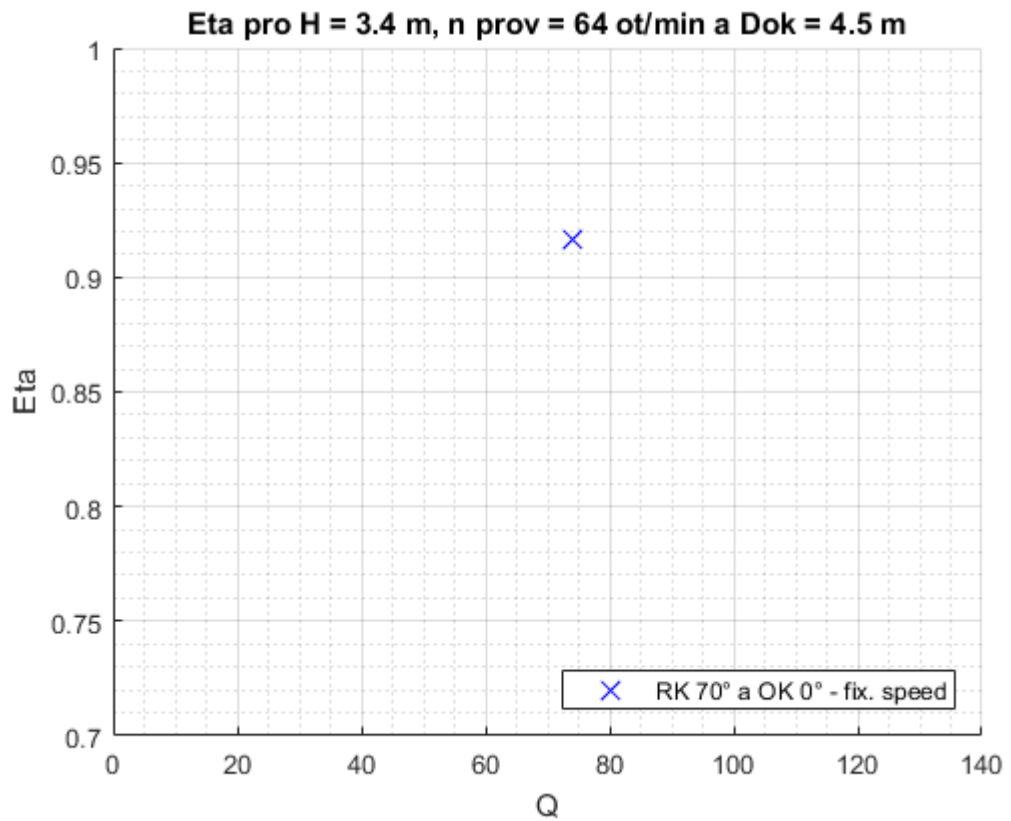
5.3.4. Turbína s pevným natočením RK a OK

Pracovní charakteristikou turbíny s pevnými natočeními RK a OK (Graf 5.22) je pouze jedna křivka. Kontury jsou vyneseny pro lepší znázornění a odečítání hodnot z grafu. Obdobně i účinnost při daném spádu H_{opt} je pouze jeden bod, tedy průsečík červené a modré křivky.

Jelikož byla zvolena vazba s nejvhodnějším natočením, tedy RK 70° a OK 0°, vychází účinnost v provozním bodě vysoká (Graf 5.23).



Graf 5.22 Provozní charakteristika - RK 70° a OK 0° (fixed speed)



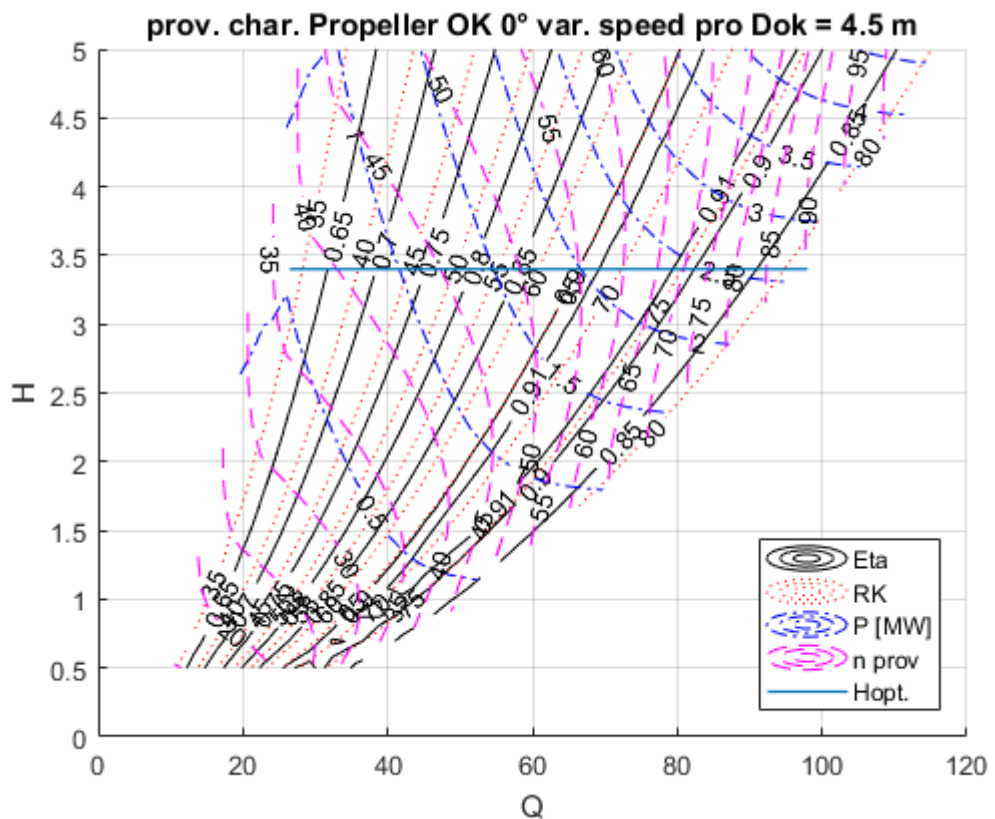
Graf 5.23 Průběh účinnosti pro daný spád - RK 70° a OK 0° (fixed speed)

5.4. Provozní charakteristika – frekvenční měnič

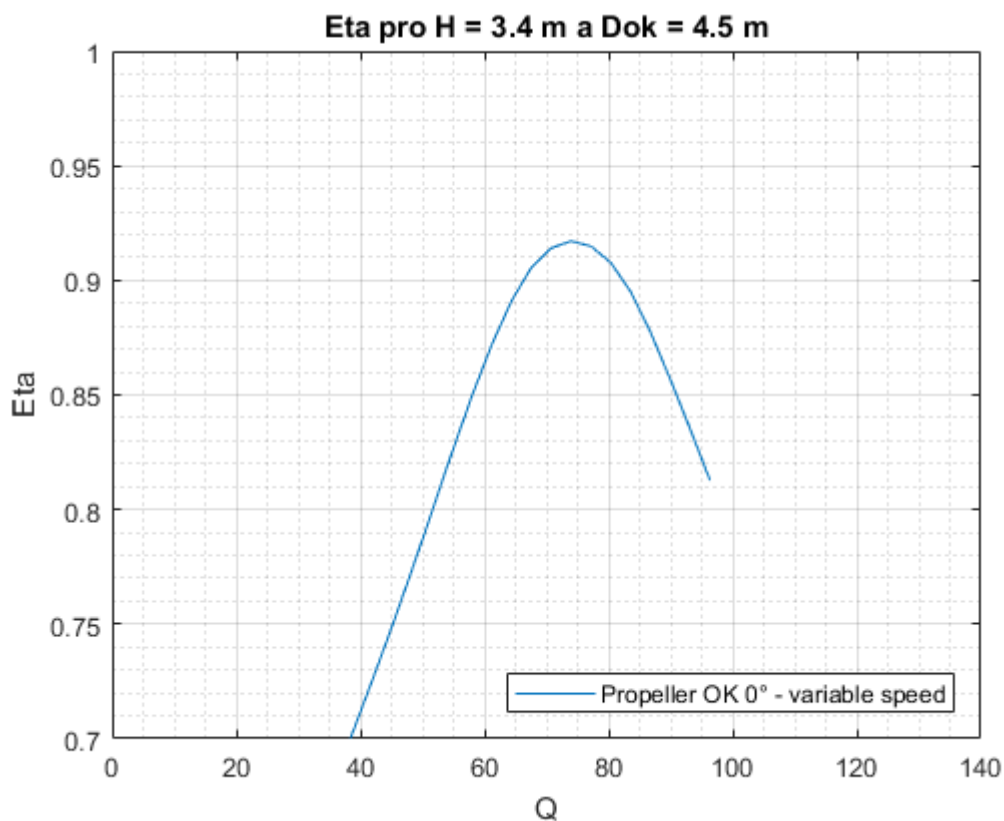
Provozní charakteristika pro stroj s frekvenčním měničem se sestojí obdobně, jako provozní charakteristika pro stroj s danými provozními otáčkami. Rozdílem je, že při pevných provozních otáčkách transformujeme přímku, která je řezem univerzální charakteristikou pro dané n_{11} , zatímco u frekvenčního měniče transformujeme křivku procházející univerzální charakteristikou v intervalu n_{11} . Zmiňované přímky a křivky jsou zobrazeny v grafech univerzálních charakteristik. Pro transformaci byla použita stejná lokalita jako u stroje s danými provozními otáčkami, abychom mohli obě varianty porovnávat.

5.4.1. Propelerová turbína

Protože propelerová turbína s natočením OK 0° dosáhla nejvyšší účinnosti, byla varianta provozní charakteristiky s frekvenčním měničem zpracována pro toto natočení. V grafu 5.24 jsou opět vyneseny kontury odpovídající účinnosti, natočení RK a výkonu. Dále kontura pro provozní otáčky, při kterých stroj dosahuje odpovídající účinnosti a výkonu.



Graf 5.24 Provozní charakteristika - Propeller OK 0° (variable speed)

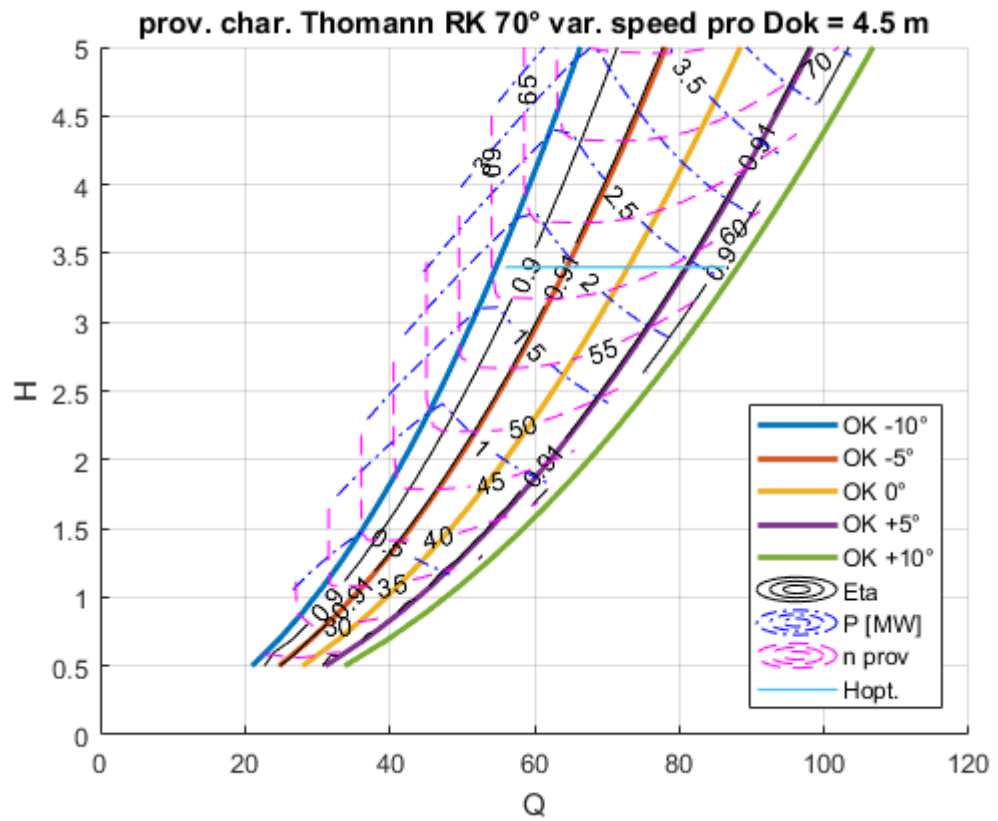


Graf 5.25 Průběh účinnosti pro daný spád - Propeller OK 0° (variable speed)

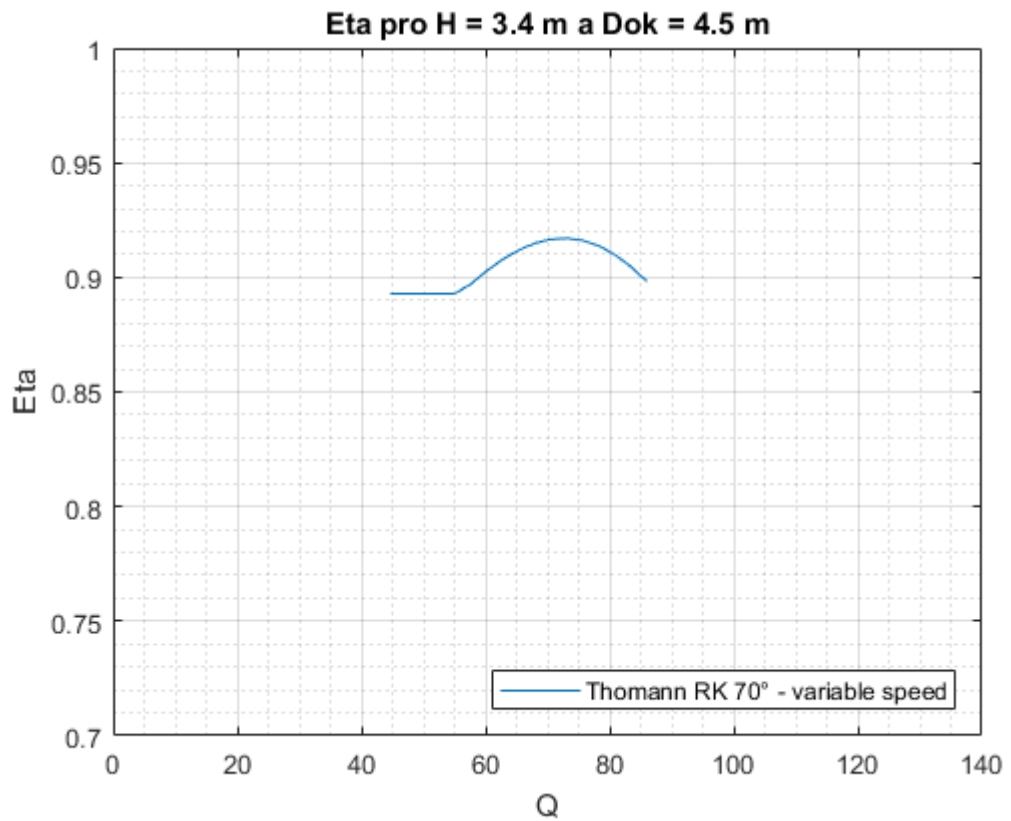
Použitím frekvenčního měniče u propelerové turbíny získáme větší regulační rozsah průtoků při vyšší účinnosti (Graf 5.25). Porovnání s variantou pro pevné provozní otáčky je součástí následující kapitoly.

5.4.2. Thomannova turbína

U Thomannovy turbíny byla obdobně jako u turbíny propelerové zpracována provozní charakteristika pro variantu s frekvenčním měničem pro natočení RK 70°, u kterého bylo dosaženo nejvyšší účinnosti. V grafu 5.26 jsou přidány křivky odpovídající jednotlivým natočením OK, které nahrazují konturu natočení RK, které je zde pevné.



Graf 5.26 Provozní charakteristika - Thomann RK 70° (variable speed)

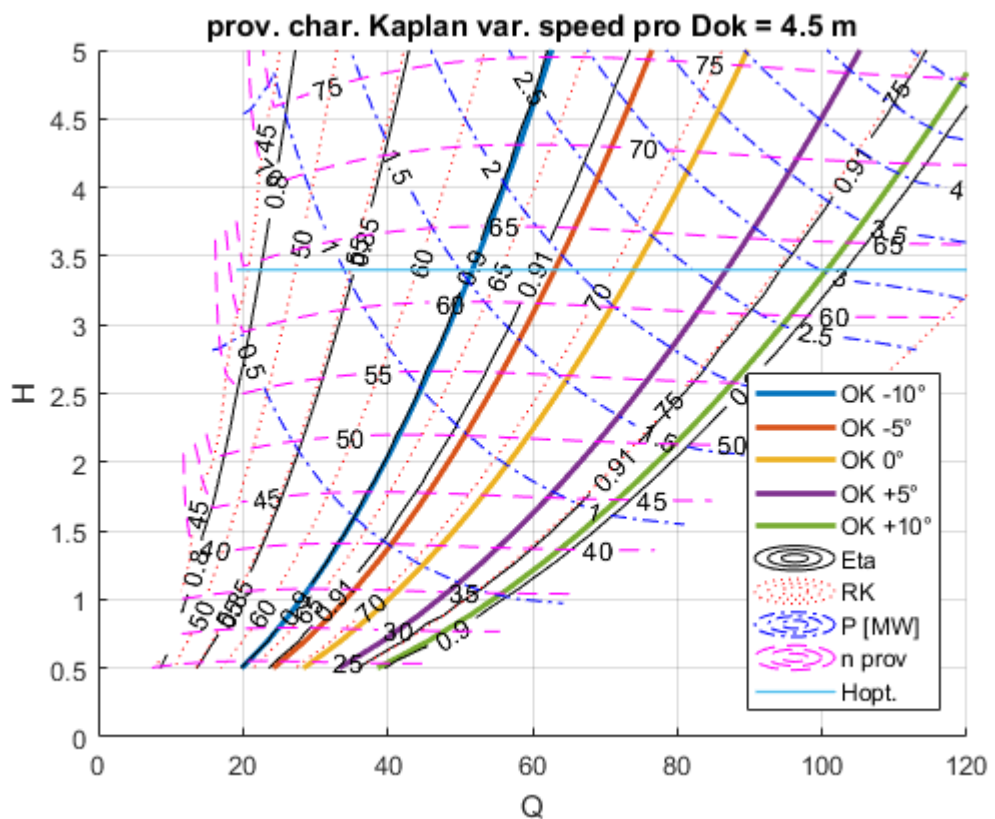


Graf 5.27 Průběh účinnosti pro daný spád - Thomann RK 70° (variable speed)

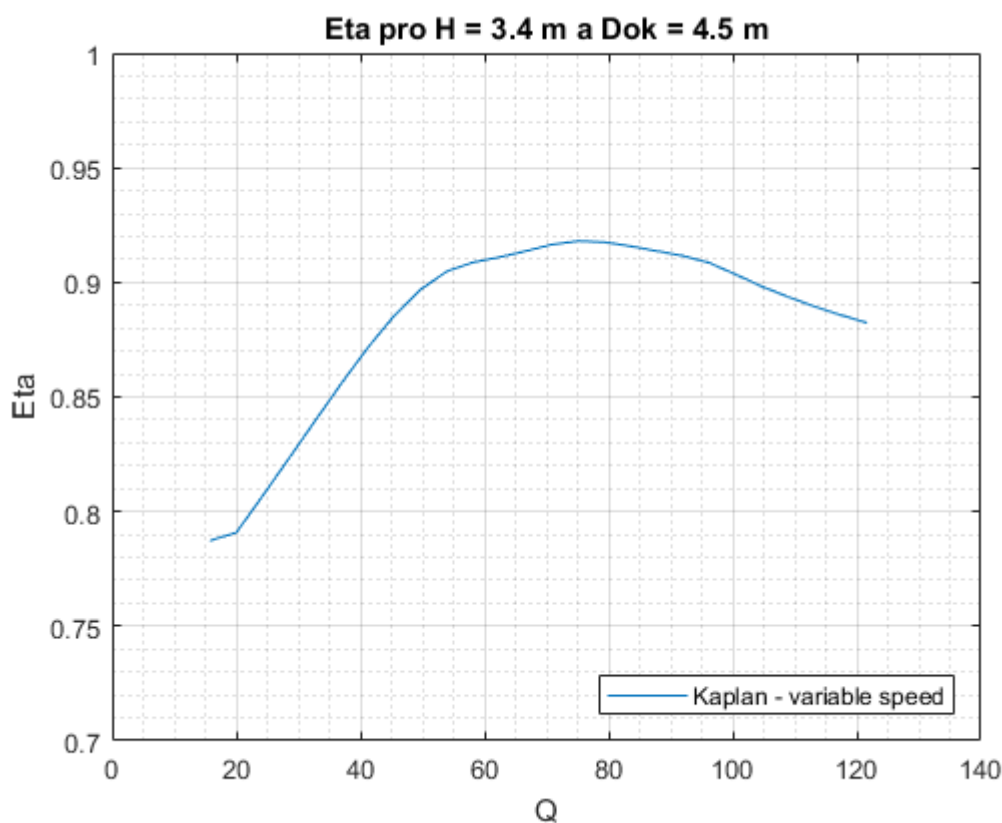
Průběh účinnosti pro daný spád $H_{opt.} = 3,4$ m (Graf 5.27) je podobný jako u varianty bez frekvenčního měniče.

5.4.3. Kaplanova turbína

Provozní charakteristika pro Kaplanovu turbínu s frekvenčním měničem je nejrozsáhlejší, protože dochází k trojité regulaci, a to pomocí RK, OK a otáček. V grafu 5.28 jsou kromě zmíněných parametrů vyneseny také kontury účinnosti a výkonu.



Graf 5.28 Provozní charakteristika - Kaplan (variable speed)



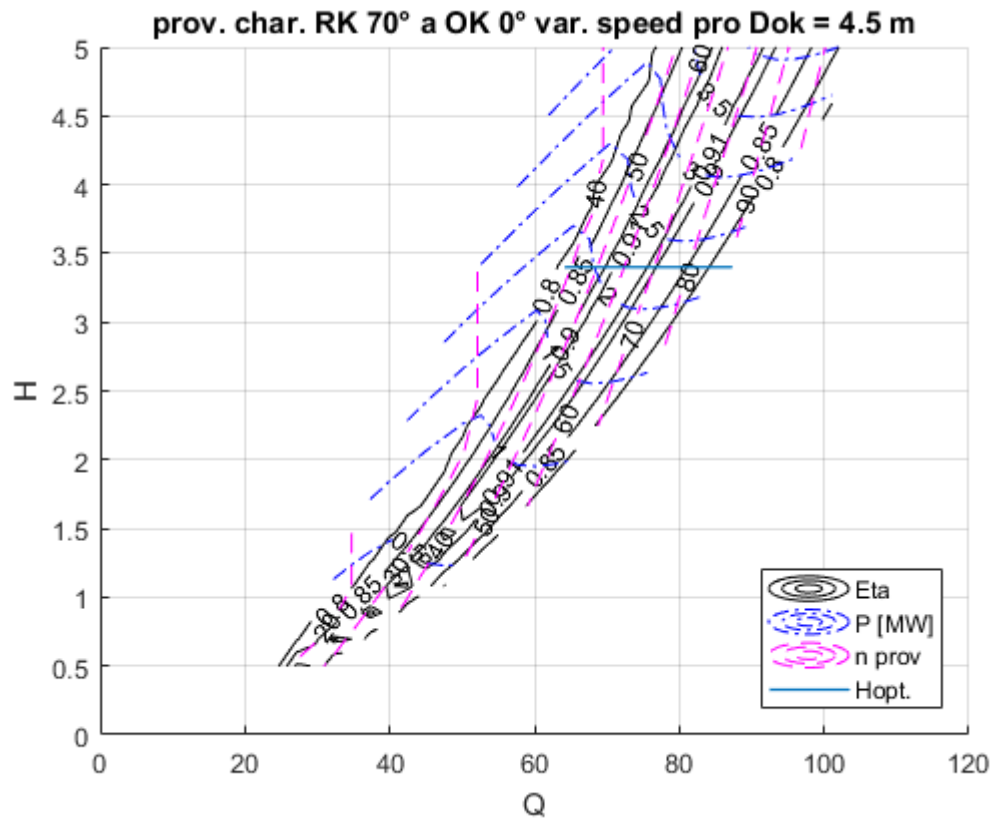
Graf 5.29 Průběh účinnosti pro daný spád - Kaplan (variable speed)

Porovnáním přímky a křivky z universální charakteristiky Kaplanovy turbíny (přímka pro dané provozní otáčky a křivka pro variable speed) zjistíme, že jejich průběh se moc neliší. Účinnost při daném spádu je tedy prakticky totožná (Graf 5.29).

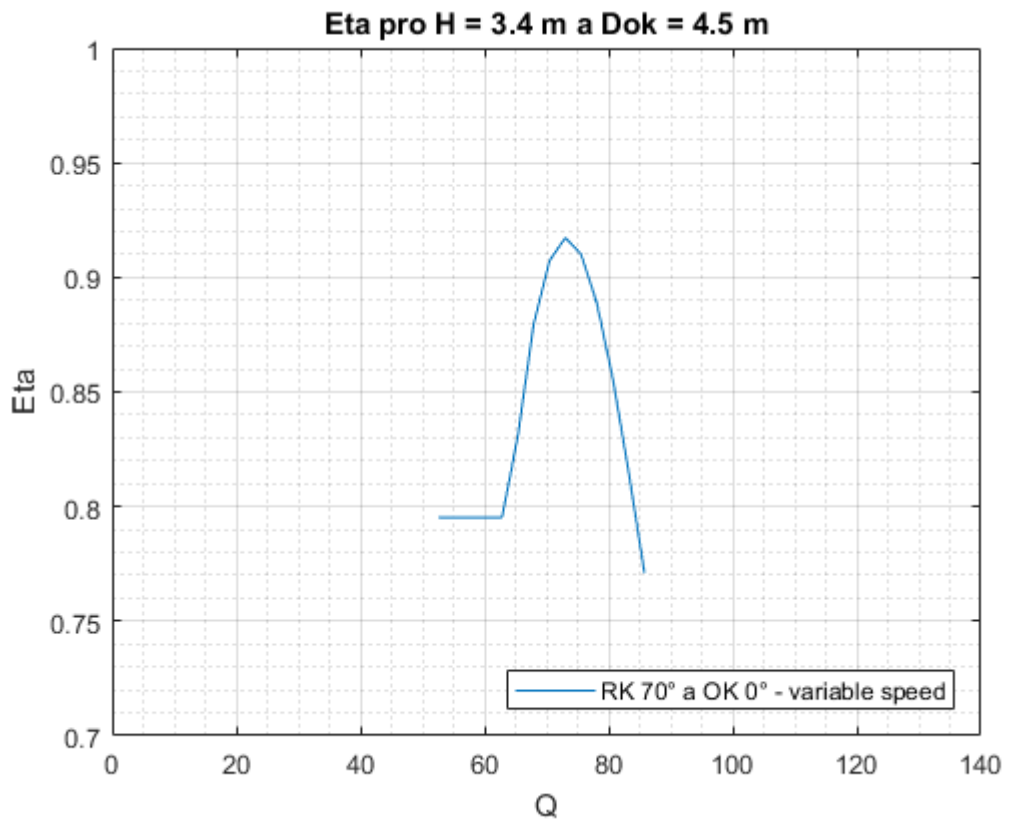
5.4.4. Turbína s pevným natočením RK a OK

Provozní charakteristika byla zpracována pro turbínu s natočeními RK 70°, OK 0° a proměnlivými provozními otáčkami (Graf 5.30). Při použití frekvenčního měniče pro turbínu tohoto typu získáme charakteristiku jako plochu, na rozdíl od varianty bez měniče, kde charakteristikou byla jen křivka.

Protože provozní charakteristiku představuje plocha, získáme průběh účinnosti pro daný spád jako křivku. Použitím měniče u této turbíny získáme regulační rozsah (Graf 5.31).



Graf 5.30 Provozní charakteristika - RK 70° a OK 0° (variable speed)

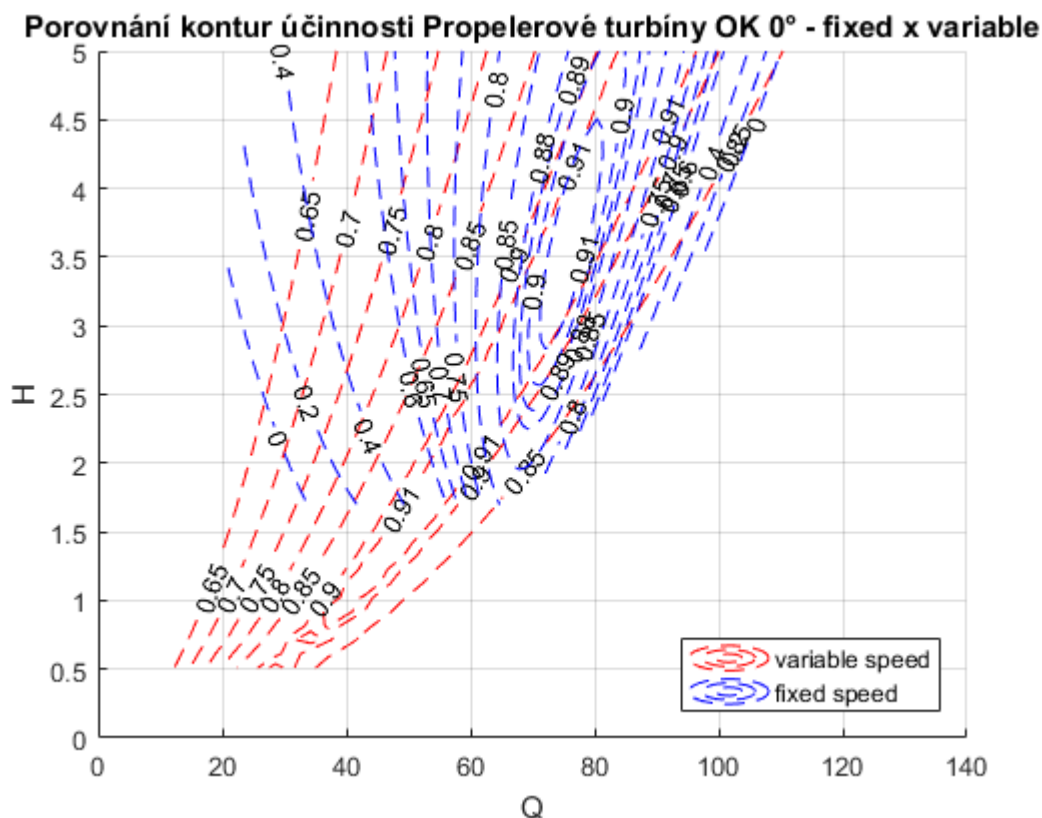


Graf 5.31 Průběh účinnosti pro daný spád - RK 70° a OK 0° (variable speed)

6. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

6.1. Porovnání účinností v provozních charakteristikách

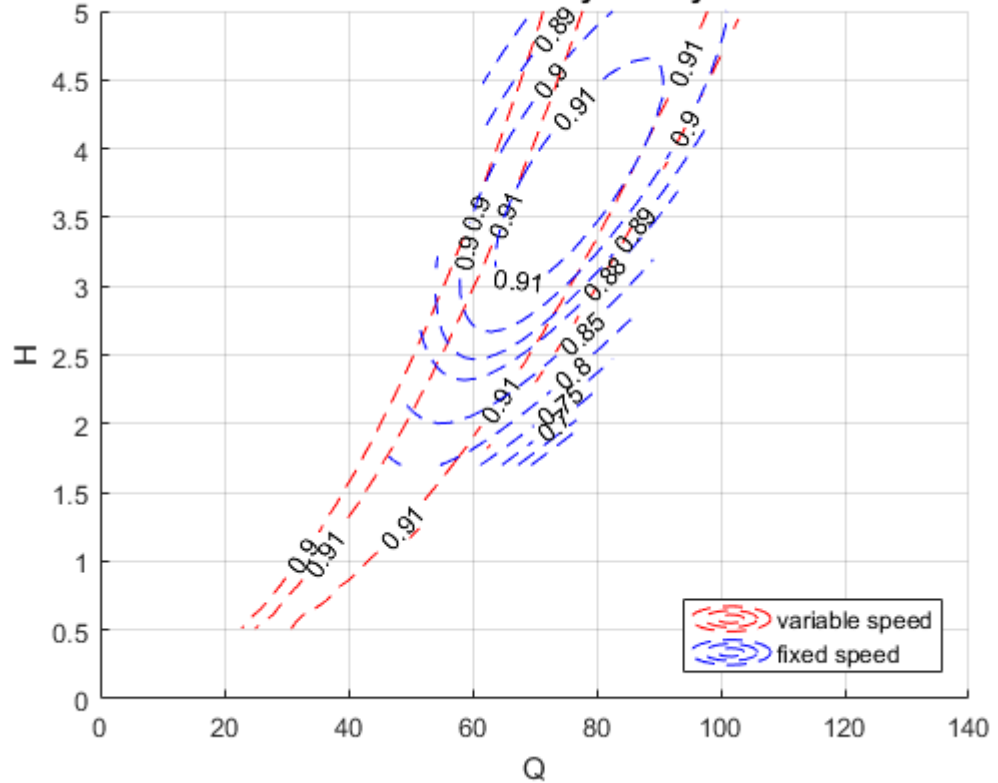
V následujících grafech je vykreslen soubor účinností provozních charakteristik pro Kaplanovu, Thomannovu a propelerovou turbínu. Pro každou turbínu je porovnávána varianta s frekvenčním měničem a bez frekvenčního měniče.



Graf 6.1 Porovnání kontur účinnosti - Propeller OK 0°

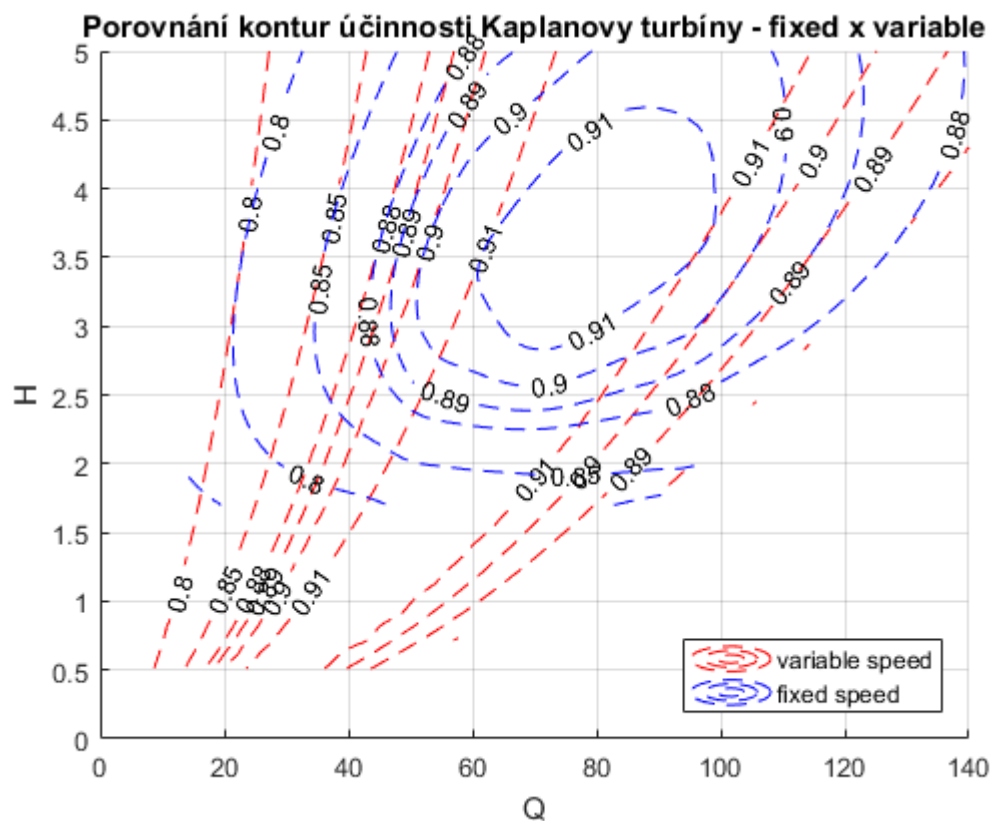
Z grafu 6.1 je patrné, že při použití frekvenčního měniče získáme při vyšších spádech vyšší účinnosti ve stejném rozsahu průtoků, což je patrné i z grafu 6.4. Dále získáme možnost pohybovat se v oblasti nízkých průtoků a spádů, mimo regulační rozsah obyčejné propelerové turbíny.

Porovnání kontur účinnosti Thomannovy turbíny RK 70° - fixed x variable



Graf 6.2 Porovnání kontur účinnosti - Thomann RK 70°

V grafu 6.2 jsou porovnány účinnosti Thomannovy turbíny v obou variantách. Při daném spádu $H_{opt.} = 3,4$ m jsou kontury stejných účinností tečné, proto vychází stejná účinnost v obou variantách. Budeme-li se pohybovat v oblasti nízkých spádů a průtoků, získáme použitím frekvenčního měniče regulační rozsah, kterého nejsme schopni dosáhnout u turbíny bez měniče. V této provozní oblasti je tedy frekvenční měnič přínosný.

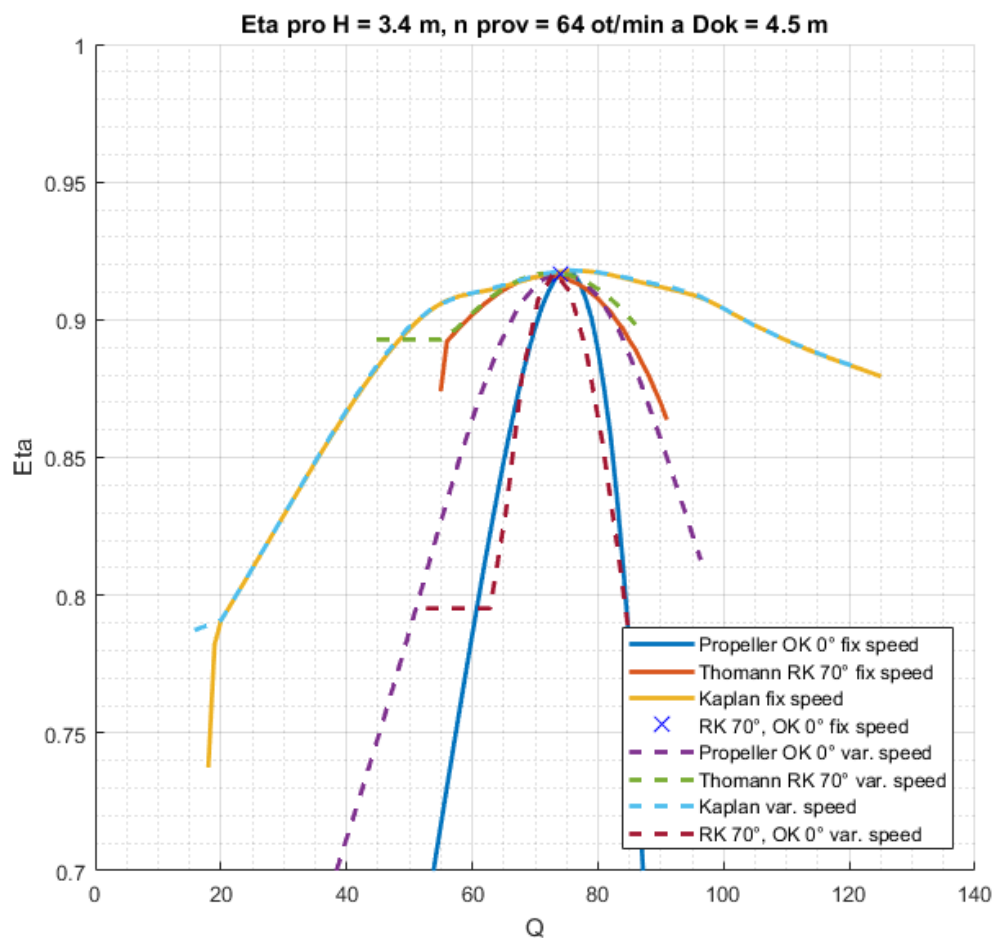


Graf 6.3 Porovnání kontur účinnosti - Kaplan

Porovnání kontur účinnosti provozních charakteristik Kaplanovy turbíny můžeme vidět v grafu 6.3. Zde pro daný spád $H_{opt.} = 3,4$ m jsou kontury účinností opět tečné, takže průběh účinnosti vychází stejný, avšak v oblasti nízkých spádů a průtoků, kde není možné Kaplanovu turbínu provozovat, získáváme u stroje s frekvenčním měničem regulační rozsah a vysoké účinnosti. Frekvenční měnič je tedy v této oblasti provozu přínosem.

6.2. Účinnosti všech variant pro daný spád

Výsledkem je porovnání všech účinností pro stroj o průměru oběžného kola $D_{ok} = 4.5$ m na spádu $H_{opt.} = 3.4$ m. Ve variantě s danými provozními otáčkami odpovídajícími $n_{prov.} = 64$ ot./min nebo frekvenčním měničem.



Graf 6.4 Průběh účinnosti pro daný spád - všechny varianty

V grafu 6.4 je proveden soutisk všech variant. Je patrné, že Kaplanova turbína s frekvenčním měničem bude mít pro daný spád stejnou účinnost a stejný regulační rozsah jako Kaplanova turbína s danými provozními otáčkami. Pro tuto variantu tedy není frekvenční měnič přínosem. Obdobné výsledky dostaneme při porovnání Thomannovy turbíny obou variant. Ani v tomto případě není frekvenční měnič přínosem. Avšak při porovnání turbín s pevným natočením OK, tedy turbín propelerových, zjistíme, že použitím frekvenčního měniče získáme znatelně vyšší účinnosti ve větším regulačním rozsahu. Pro tuto variantu je tedy frekvenční měnič přínosem. Turbína s pevným natočením RK a OK má při daném spádu velice dobrou účinnost, protože se jedná o optimální kombinaci natočení obou regulačních prvků, ale jedná se pouze o jeden bod. Použitím frekvenčního měniče u této varianty, získáme navíc regulační rozsah průtoků. V tomto případě je tedy frekvenční měnič opět přínosem.

7. ZÁVĚR

Výsledkem této práce je vytvoření programu v prostředí Matlab, který zpracovává turbínové charakteristiky z dat generovaných matematickým modelováním. Program načte data v tabulkovém formátu, přepočte jednotlivé veličiny a vykreslí universální charakteristiky propelerových turbín, tedy turbín s pevným natočením OK. V další části program vytváří obalovou plochu pro jednotlivá natočení, čímž vytvoří universální charakteristiku Kaplanovy turbíny. Dále z vykreslení charakteristik pro pevná natočení OK vytrídí data pro sestrojení universální charakteristiky Thomannovy turbíny. Varianta s pevným natočením RK i OK je jen jedním řezem charakteristiky Thomannovy turbíny.

Všechny 4 universální charakteristiky jsou následně transformovány do provozních charakteristik, a to ve dvou variantách. První varianta pro dané provozní otáčky a druhá pro turbínu s frekvenčním měničem. Transformace je prováděna pro konkrétní hodnoty D_{ok} – průměr oběžného kola a n_{prov} – provozní otáčky. Tyto hodnoty mohou být kdykoliv změněny. Program poté přepočítá všechny charakteristiky pro novou lokalitu a automaticky upraví názvy grafů.

Z provozních charakteristik jsou následně vytvořeny průběhy účinností pro daný spád H_{opt} . a zobrazeny v jednom grafu. Můžeme tedy porovnat průběhy účinností a regulační rozsahy jednotlivých variant stejné turbíny a vybrat vhodnou variantu pro konkrétní lokalitu.

Cílem bylo také demonstrovat výhody frekvenčního měniče. Při porovnání průběhů účinností pro daný spád je frekvenční měnič největším přínosem u turbíny s pevným natočením OK. Získáme lepší účinnosti a větší regulační rozsah. Účinnost a regulační rozsah pro Kaplanovu a Thomannovu turbínu vycházel pro daný spád s frekvenčním měničem obdobně jako bez frekvenčního měniče, tudíž jeho použitím nedošlo ke zlepšení. Porovnáním účinností provozních charakteristik Kaplanovy, Thomannovy a propelerové turbíny však bylo zjištěno, že při použití frekvenčního měniče se můžeme s dobrou účinností pohybovat i v oblasti nízkých průtoků a spádů, kde turbína bez měniče nemůže být provozována.

8. SEZNAMY

8.1. Použitá literatura

- [1] ŠTIKA, Jiří. *Optimalizace tvaru betonové spirály s využitím parametrického prostorového modelu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84177>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Petr Nowak.
- [2] MELICHAR, Jan. *Malé vodní turbíny*. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-02164-5.
- [3] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny [malé vodní elektrárny]*. První. Blansko: Marcela Bednářová, 2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [4] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [5] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. *Navrhování vodních elektráren*. První. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01304-9.
- [6] BROŽA, Vojtěch, Pavel GABRIEL, František ČIHÁK a Jitka KUČEROVÁ. *Využití vodní energie*. První. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00392-2.
- [7] MELICHAR, Jonáš. *Matematický model malé vodní elektrárny* [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/84233>. Magisterská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Petr Nowak.
- [8] MUSIL, Martin. *Nástroje pro simulaci a modelování proudění tekutin* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/108291/MUS177_HGF_B2102_6209R013_2015.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Pavel Staša.
- [9] Kaplan Turbine CFD. *CFD support* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.cfdsupport.com/kaplan-turbine-cfd-study.html>
- [10] *MathWorks* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/>
- [11] BARBORKA, Petr. *Měření a vyhodnocení charakteristiky Peltonovy turbíny* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z:

<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/77943>. Magisterská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Petr Nowak.

- [12] LucidChart. *Flow chart* [online]. 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://app.lucidchart.com/documents#/dashboard>
- [13] BROST, a REINHARDT. *Leistungsausbeute bei einfach, doppelt und dreifach regulierten Turbinen* [dokument]. Stuttgart, 2007 [cit. 2020-05-13]. Podklad pro výuku. Universität Stuttgart.

8.2. Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Rámcový oblastní diagram turbín pro MVE [3].....	- 4 -
Obrázek 2.2 Vertikální spirální Kaplanova turbína [3].....	- 5 -
Obrázek 2.3 Zařízení pro natáčení lopatek Kaplanovy turbíny [4].....	- 5 -
Obrázek 2.4 Úprava konce lopatek k omezení spárové kavitace [4]	- 6 -
Obrázek 2.5 Thomannova turbína [3]	- 7 -
Obrázek 2.6 Souhrn všech variant propelerových turbín.....	- 8 -
Obrázek 3.1 Universální charakteristika Kaplanovy turbíny [3]	- 10 -
Obrázek 3.2 Pracovní charakteristika řízení provozu turbíny podle průtoku [3] -	12 -
Obrázek 4.1 Ukázka výsledků matematického modelu Kaplanovy turbíny [9] .	- 14 -
Obrázek 5.1 3D model Kaplanovy turbíny pro matematické modelování	- 15 -
Obrázek 5.2 Schéma postupu při tvorbě turbínových charakteristik [12]	- 16 -

8.3. Seznam grafů

Graf 5.1 Účinnostní charakteristika - Propeller OK 0°	- 17 -
Graf 5.2 Kontura účinnosti - Propeller OK 0°	- 18 -
Graf 5.3 Charakteristika jednotkového výkonu - Propeller OK 0°	- 18 -
Graf 5.4 Kontura jednotkového výkonu - Propeller OK 0°	- 19 -
Graf 5.5 Kontura natočení RK - Propeller OK 0°	- 19 -
Graf 5.6 Universální charakteristika - Propeller OK 0°	- 20 -
Graf 5.7 Účinnostní charakteristika - Thomann RK 70°	- 21 -
Graf 5.8 Universální charakteristika - Thomann RK 70°	- 22 -
Graf 5.9 Soutisk účinnostních charakteristik pro jednotlivá natočení OK	- 23 -

Graf 5.10 Soutisk charakteristik P11 pro jednotlivá natočení OK.....	- 23 -
Graf 5.11 Účinnostní charakteristika - Kaplan	- 24 -
Graf 5.12 Charakteristika jednotkového výkonu - Kaplan	- 24 -
Graf 5.13 Universální charakteristika - Kaplan	- 25 -
Graf 5.14 Účinnostní charakteristika - RK 70° a OK 0°	- 26 -
Graf 5.15 Universální charakteristika - RK 70° a OK 0°	- 27 -
Graf 5.16 Provozní charakteristika - Propeller OK 0° (fixed speed)	- 28 -
Graf 5.17 Průběh účinnosti pro daný spád - Propeller (fixed speed)	- 28 -
Graf 5.18 Provozní charakteristika - Thomann RK 70° (fixed speed)	- 29 -
Graf 5.19 Průběh účinnosti pro daný spád - Thomann (fixed speed)	- 30 -
Graf 5.20 Provozní charakteristika - Kaplan (fixed speed)	- 31 -
Graf 5.21 Průběh účinnosti pro daný spád - Kaplan (fixed speed)	- 32 -
Graf 5.22 Provozní charakteristika - RK 70° a OK 0° (fixed speed)	- 33 -
Graf 5.23 Průběh účinnosti pro daný spád - RK 70° a OK 0° (fixed speed)	- 33 -
Graf 5.24 Provozní charakteristika - Propeller OK 0° (variable speed)	- 34 -
Graf 5.25 Průběh účinnosti pro daný spád - Propeller OK 0° (variable speed) ..	- 35 -
Graf 5.26 Provozní charakteristika - Thomann RK 70° (variable speed)	- 36 -
Graf 5.27 Průběh účinnosti pro daný spád - Thomann RK 70° (variable speed) ..	- 36 -
Graf 5.28 Provozní charakteristika - Kaplan (variable speed)	- 37 -
Graf 5.29 Průběh účinnosti pro daný spád - Kaplan (variable speed)	- 38 -
Graf 5.30 Provozní charakteristika - RK 70° a OK 0° (variable speed)	- 39 -
Graf 5.31 Průběh účinnosti pro daný spád - RK 70° a OK 0° (variable speed) ..	- 39 -
Graf 6.1 Porovnání kontur účinnosti - Propeller OK 0°	- 40 -
Graf 6.2 Porovnání kontur účinnosti - Thomann RK 70°	- 41 -
Graf 6.3 Porovnání kontur účinnosti - Kaplan	- 42 -
Graf 6.4 Průběh účinnosti pro daný spád - všechny varianty	- 43 -
Graf 9.1 Universální charakteristika - Propeller OK -10°	- 49 -
Graf 9.2 Universální charakteristika - Propeller OK -5°	- 49 -
Graf 9.3 Universální charakteristika - Propeller OK +5°	- 50 -
Graf 9.4 Universální charakteristika - Propeller OK +10°	- 50 -
Graf 9.5 Provozní charakteristika - Propeller OK -10°	- 51 -
Graf 9.6 Provozní charakteristika - Propeller OK -5°	- 51 -
Graf 9.7 Provozní charakteristika - Propeller OK +5°	- 52 -

Graf 9.8 Provozní charakteristika - Propeller OK +10°	- 52 -
Graf 9.9 Universální charakteristika - Thomann RK 60°	- 53 -
Graf 9.10 Universální charakteristika - Thomann RK 65°	- 53 -
Graf 9.11 Universální charakteristika - Thomann RK 75°	- 54 -
Graf 9.12 Universální charakteristika - Thomann RK 80°	- 54 -
Graf 9.13 Provozní charakteristika - Thomann RK 60°	- 55 -
Graf 9.14 Provozní charakteristika - Thomann RK 65°	- 55 -
Graf 9.15 Provozní charakteristika - Thomann RK 75°	- 56 -
Graf 9.16 Provozní charakteristika - Thomann RK 80°	- 56 -

8.4. Seznam použitých zkratek

BEP – bod s nejvyšší účinností

D_{ok} – průměr oběžného kola

η – účinnost

$H_{opt.}$ – spád

M_{11} – jednotkový moment

n_{11} – jednotkové otáčky

$n_{prov.}$ – provozní otáčky

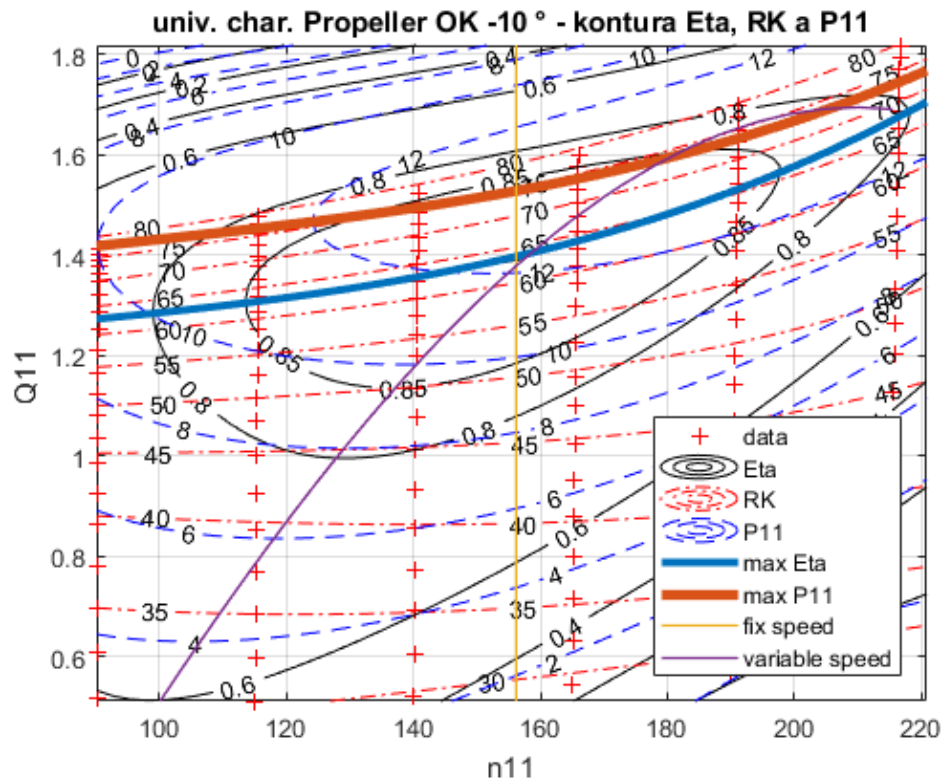
OK – oběžné kolo

P_{11} – jednotkový výkon

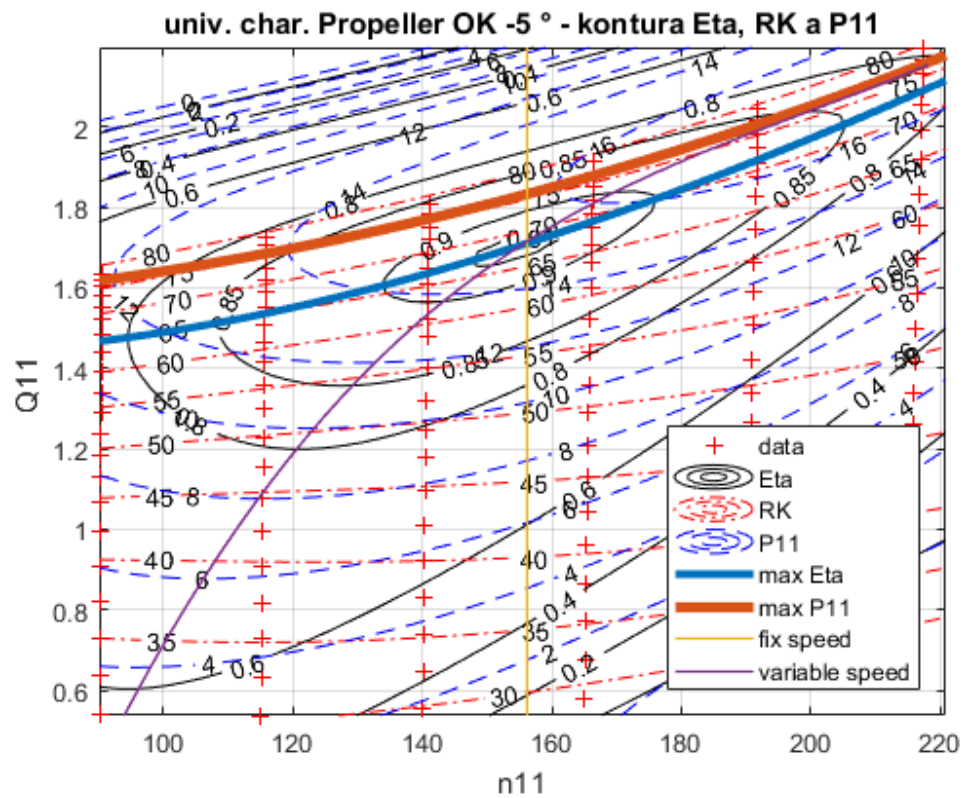
Q_{11} – jednotkový průtok

RK – rozváděcí kolo

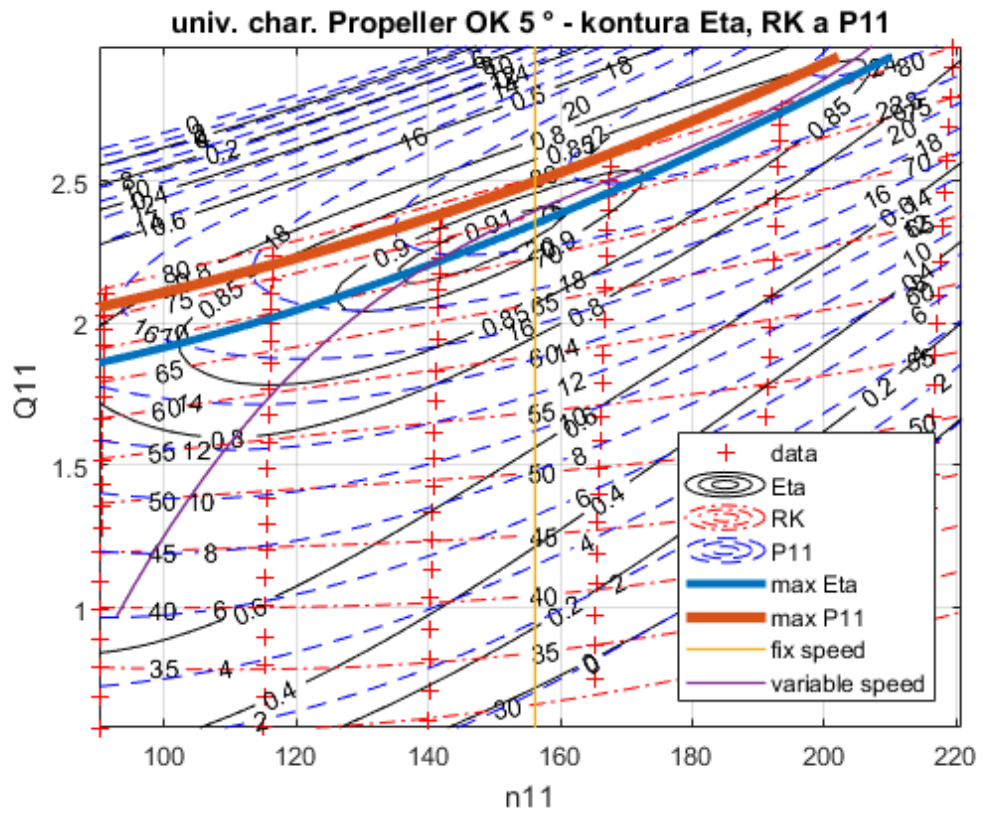
9. PŘÍLOHY



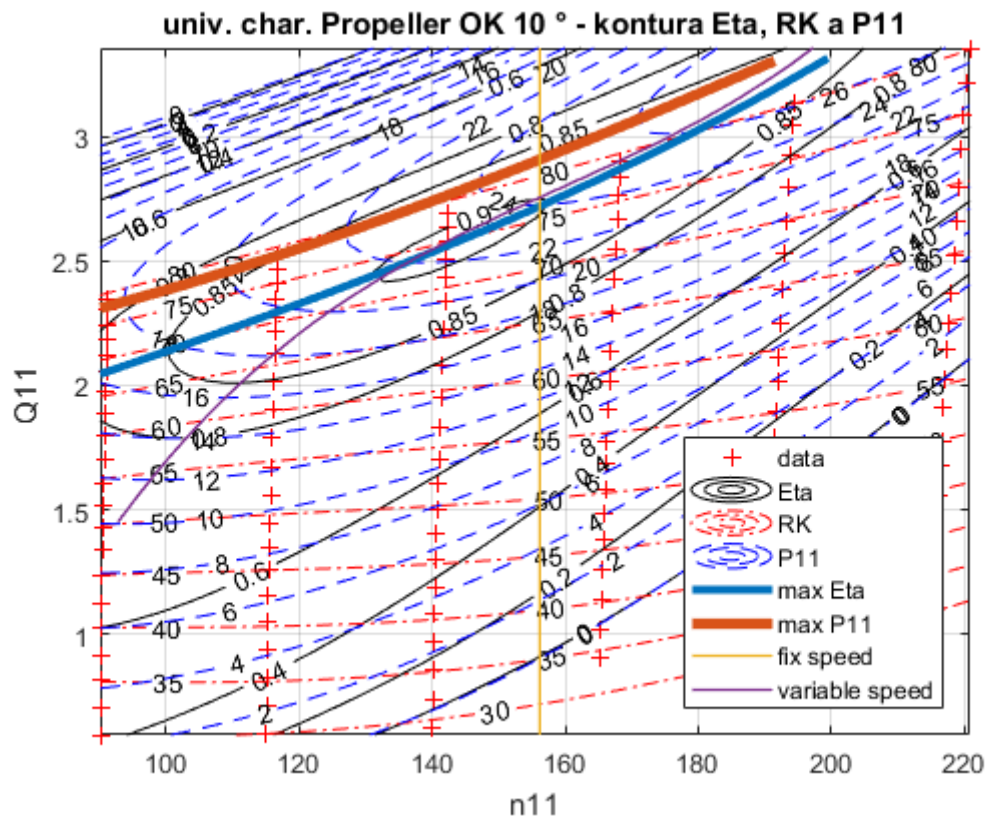
Graf 9.1 Universální charakteristika - Propeller OK -10°



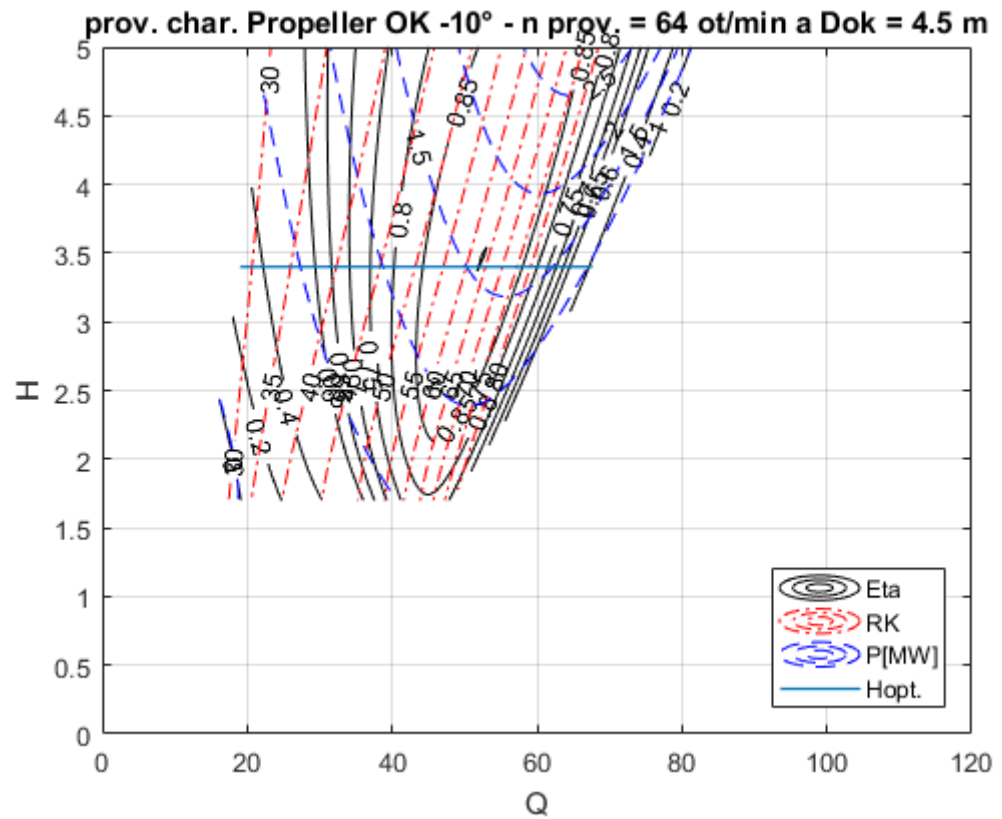
Graf 9.2 Universální charakteristika - Propeller OK -5°



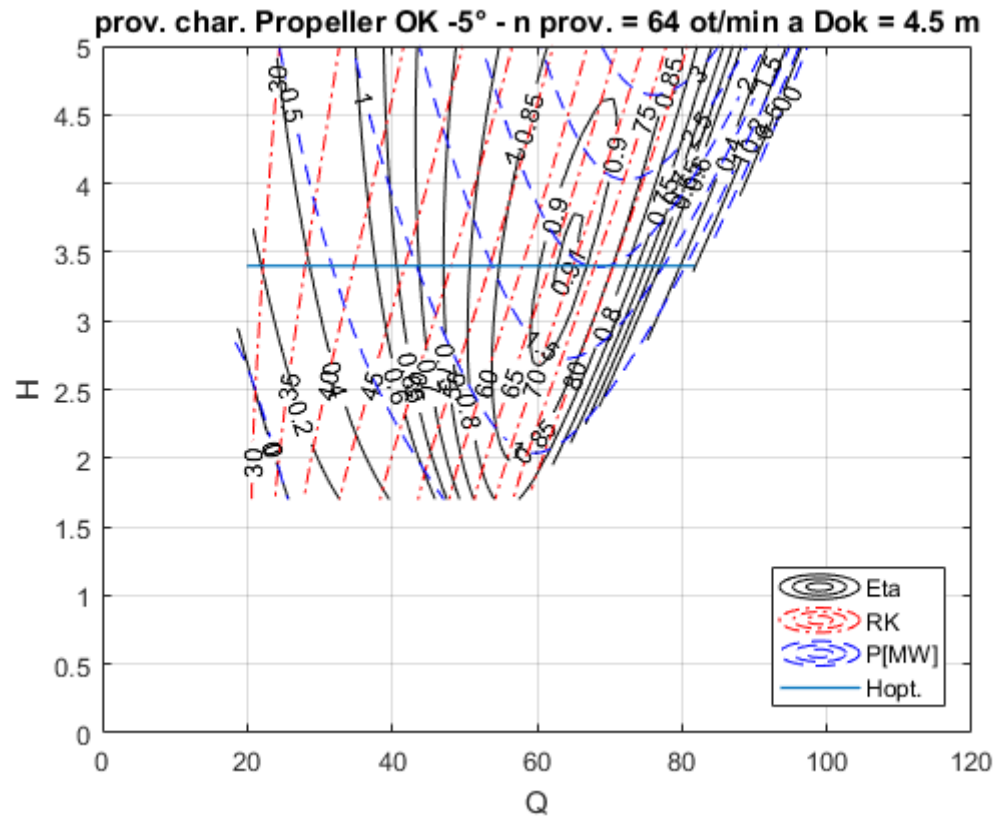
Graf 9.3 Universální charakteristika - Propeller OK +5°



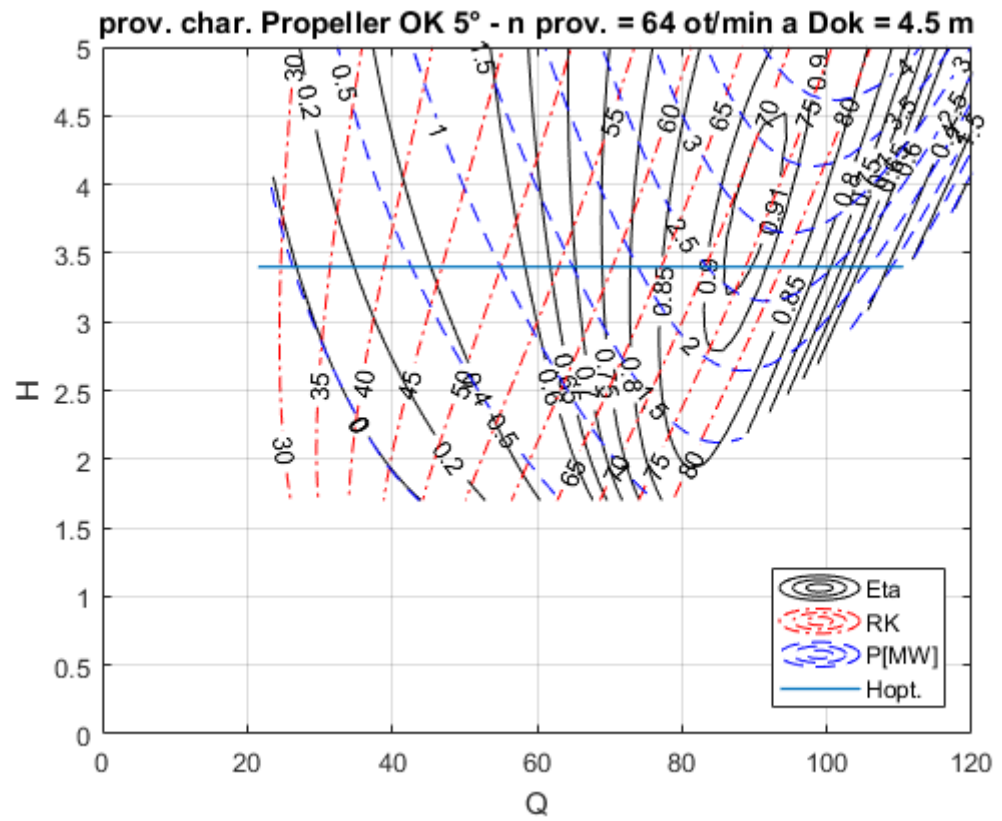
Graf 9.4 Universální charakteristika - Propeller OK +10°



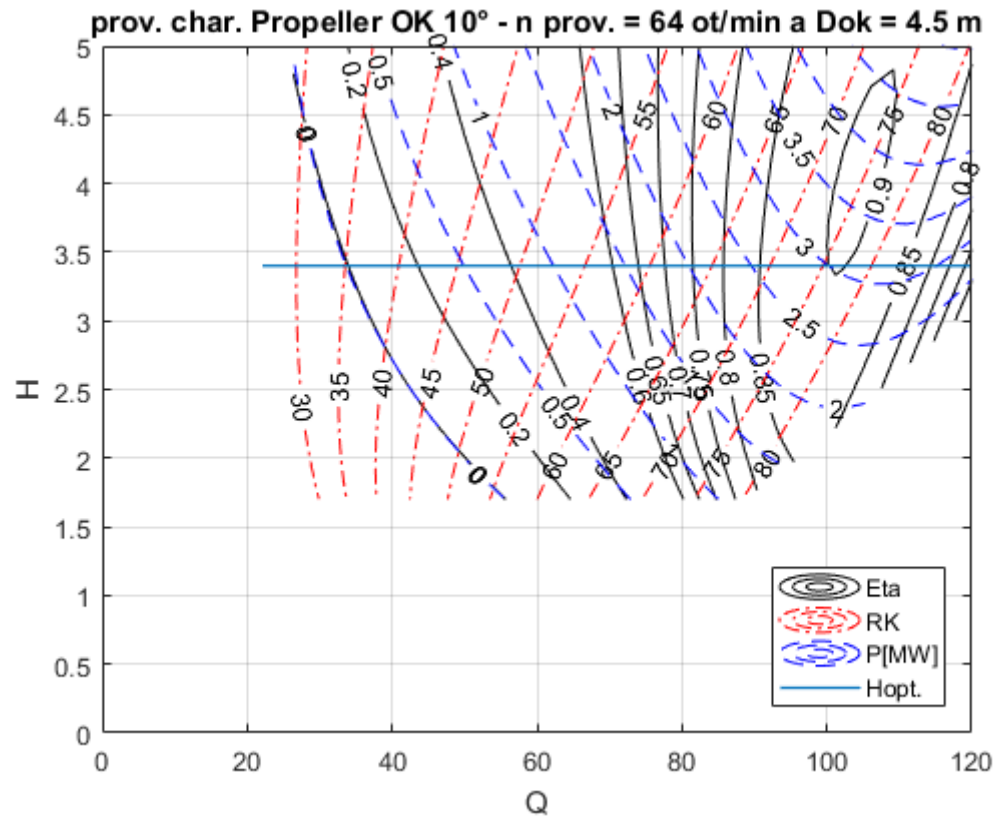
Graf 9.5 Provozní charakteristika - Propeller OK -10°



Graf 9.6 Provozní charakteristika - Propeller OK -5°

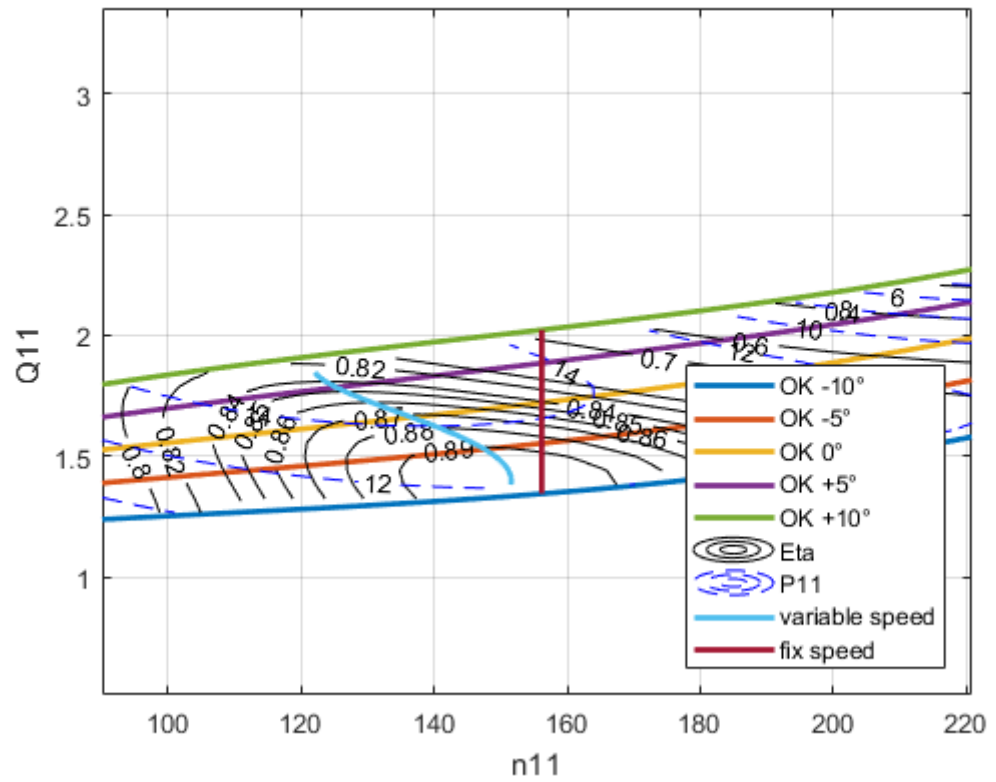


Graf 9.7 Provozní charakteristika - Propeller OK +5°



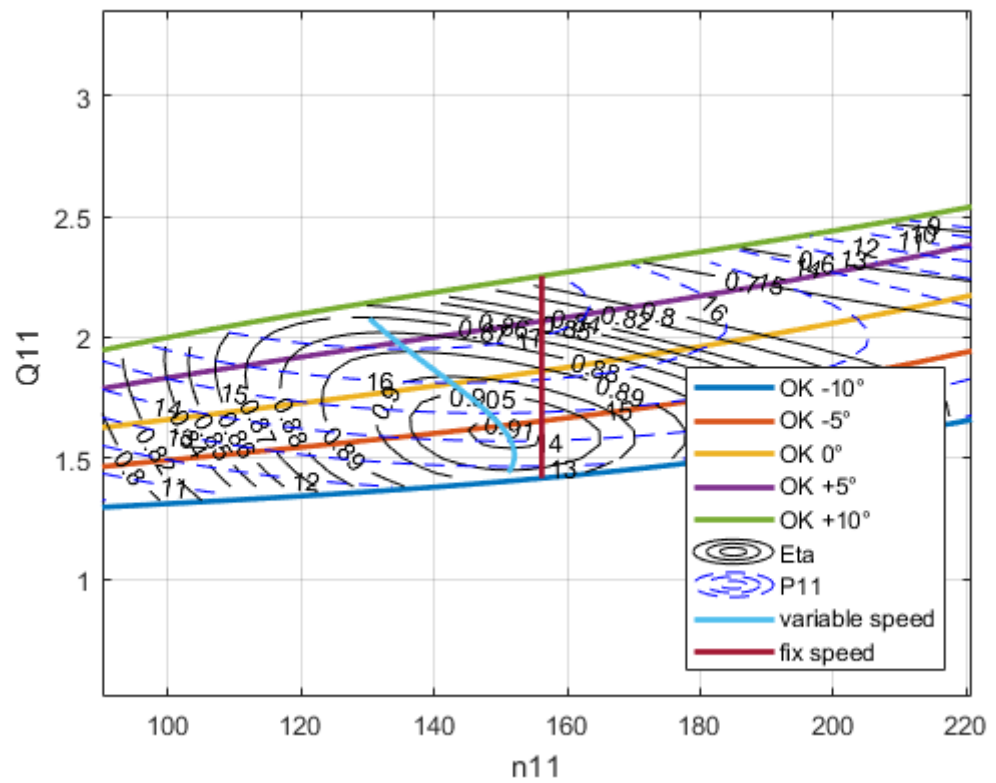
Graf 9.8 Provozní charakteristika - Propeller OK +10°

univ. char. Thomann RK 60 ° - kontura Eta a P11



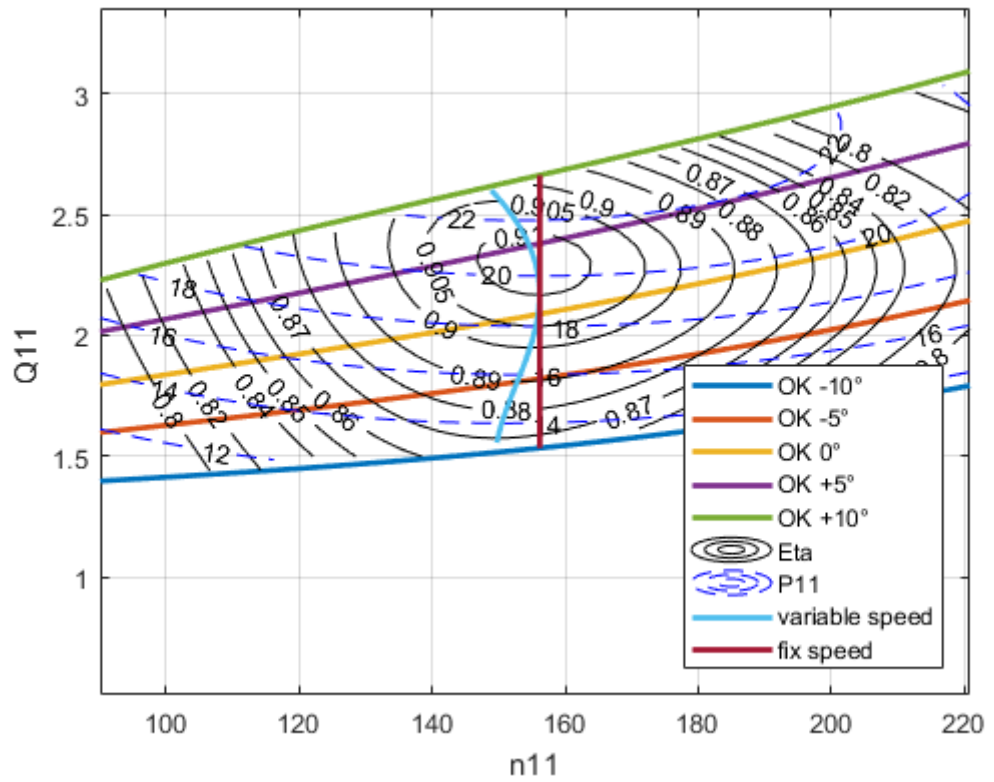
Graf 9.9 Universální charakteristika - Thomann RK 60°

univ. char. Thomann RK 65 ° - kontura Eta a P11



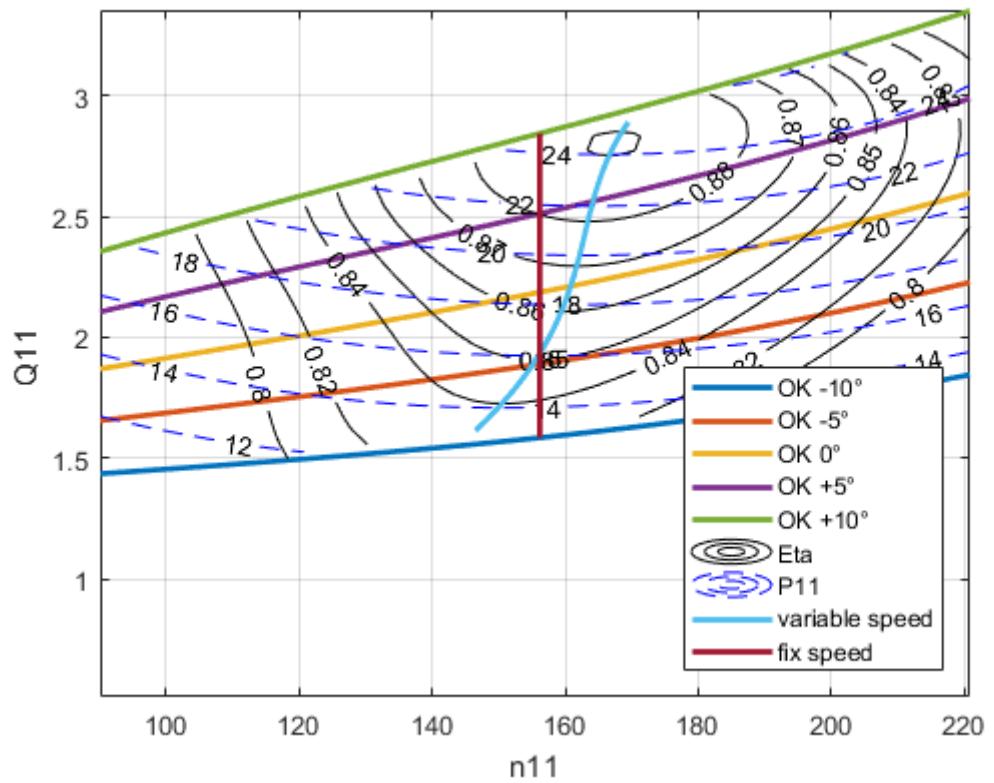
Graf 9.10 Universální charakteristika - Thomann RK 65°

univ. char. Thomann RK 75 ° - kontura Eta a P11

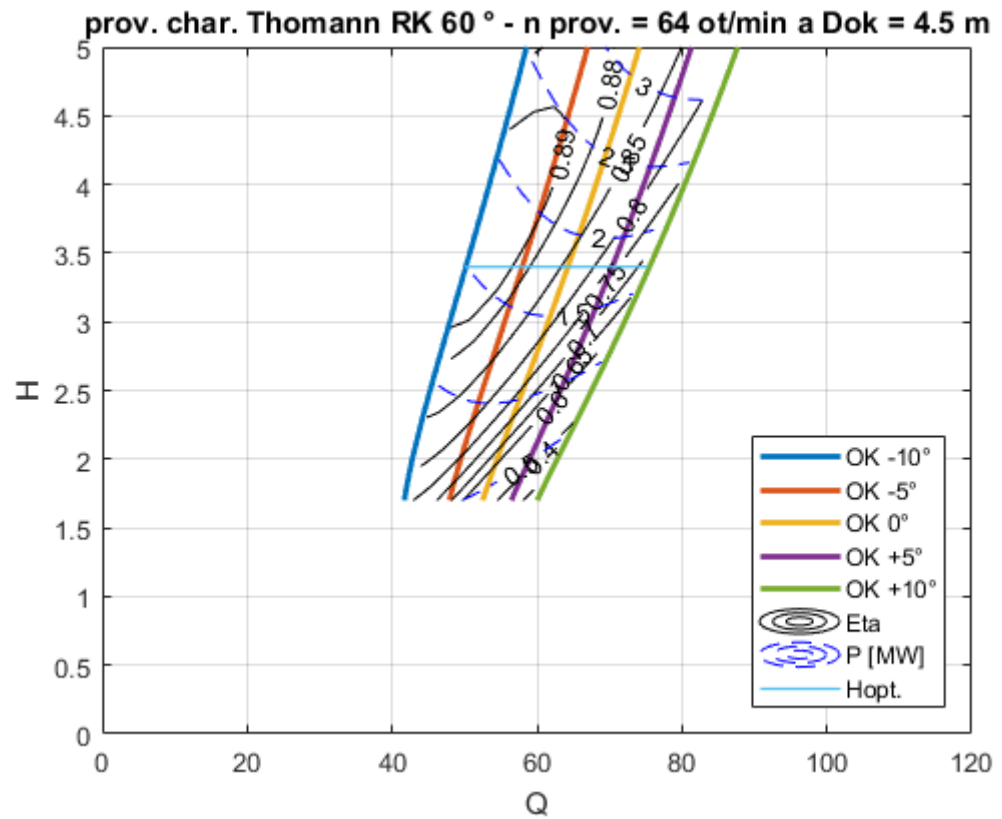


Graf 9.11 Universální charakteristika - Thomann RK 75°

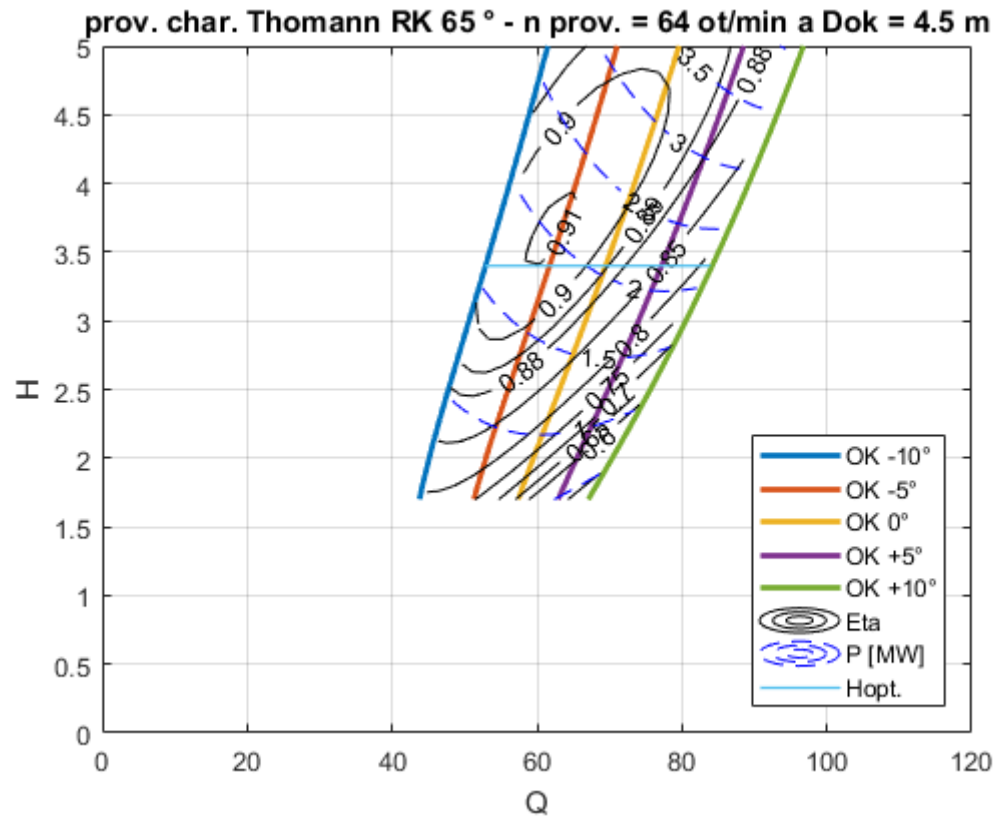
univ. char. Thomann RK 80 ° - kontura Eta a P11



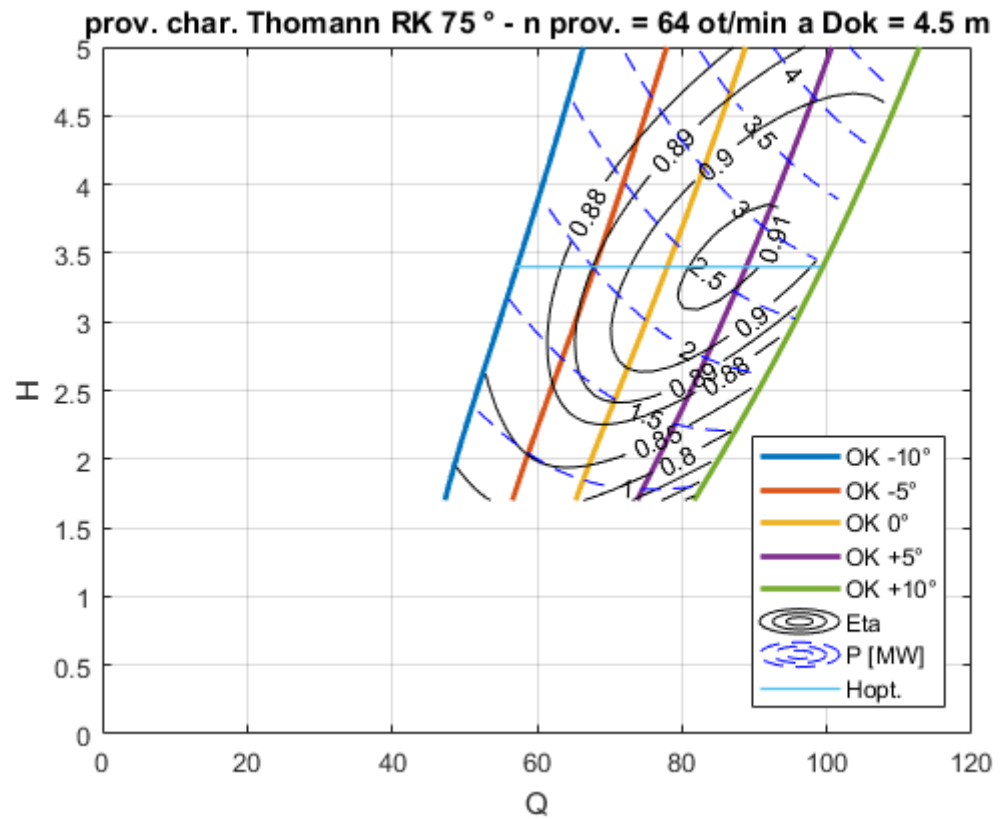
Graf 9.12 Universální charakteristika - Thomann RK 80°



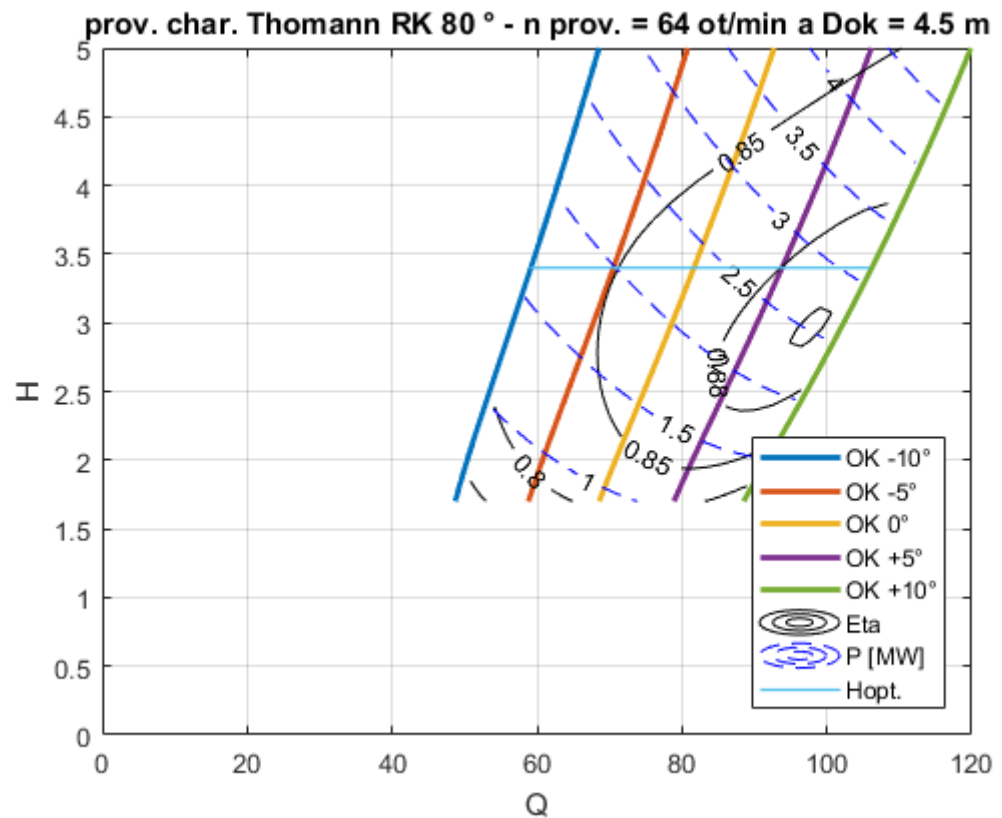
Graf 9.13 Provozní charakteristika - Thomann RK 60°



Graf 9.14 Provozní charakteristika - Thomann RK 65°



Graf 9.15 Provozní charakteristika - Thomann RK 75°



Graf 9.16 Provozní charakteristika - Thomann RK 80°