



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky

Návrh turbínového soustrojí pro MVE Vydra II

Design of turbine unit for SHPP Vydra II

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Bc. Jiří Souček

Praha 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

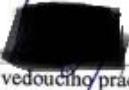
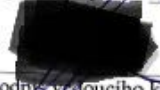
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE


I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Souček</u>	Jméno: <u>Jiří</u>	Osobní číslo: <u>410105</u>
Zadávací katedra: <u>142 - 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>Návrh turbinového soustrojí pro MVE Vydra II</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Design of turbine unit for SHPP Vydra II</u>	
Pokyny pro vypracování: Provedení rešerše zahraniční i domácí literatury v oblasti vodních mikroelektráren včetně technických řešení českých i evropských výrobců mikroturbin. Prostudování již zpracovaných výsledků, ověření možnosti matematického modelování na již vyzkoušeném prototypu axiální mikroturbíny s obtékaným generátorem firmy Elzaco. Provedení návrhu soustrojí pro lokalitu Vydra II a následné ověření parametrů pomocí metody CFD. Ověřené parametry zpracovat pro zpřesnění odhadované roční výroby elektrické energie v dané lokalitě.	
Seznam doporučené literatury: Miroslav Nechleba - Vodní turbíny - jejich konstrukce a příslušenství Novak, P. Guinot, V. Jeffrey, A. Reeve, D. - Hydraulic Modelling - an Introduction CFD forum, Ansys tutorials	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Dr. Ing. Petr Nowak</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>4.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>8.1.2018</u>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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 nutně 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“.</i>	
<u>4.10.2017</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně pod vedením Dr. Ing. Petra Nowaka a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování: Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce Dr. Ing. Petru Nowakovi a Ing. Evě Škařupové a Ing. Martinu Kantorovi PhD. za rady, ochotu a poskytnuté konzultace. Nakonec bych rád poděkoval své přítelkyni, která mě významně podporovala.

Anotace: Cílem této diplomové práce bylo navrhnout turbínové soustrojí pro lokalitu Vydra II. Nejprve bylo provedena rešerše literatury s cílem prostudovat možnosti použití turbín pro mikrozdroje. Následně byly vytvořeny a porovnány varianty matematických modelů axiální mikroturbíny s obtékaným generátorem firmy Elzaco navržené pro použití v lokalitě Bělidlo. Po vyhodnocení výsledků matematických modelů turbíny Bělidlo, bylo navrženo soustrojí pro lokalitu Vydra II. a následně ověřeno matematickým modelem v *Ansys CFX*. Pro varianty návrhu stroje byly vyčísleny roční výroby elektrické energie pro danou lokalitu.

Klíčová slova: Turbína, Bělidlo, Vydra, *ANSYS CFX*, CFD, *ICEM-CFD*, *Turbogrid*, matematický model, výpočetní síť, rotační periodičita

Annotation: The aim of this diploma thesis was to design turbine sets for the Vydra II site. Initially, a literature search was conducted to study the use of micro-turbine turbines. Subsequently, variants of the mathematical models of the axial microturbine with the Elzaco spinning generator were designed and compared for use in the Bělidlo site. After evaluating the results of the mathematical models of the Bělidlo turbine, the set for the Vydra II site was designed and then verified by a mathematical model in *Ansys CFX*. For machine design variants, annual electricity production for the site was calculated.

Keywords: Turbine, Bělidlo, Vydra, *ANSYS CFX*, CFD, *ICEM-CFD*, *Turbogrid*, mathematical model, mesh, rotational periodicity

Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Rozdělení vodních elektráren	1
1.2	Malé vodní elektrárny	1
2	Turbíny pro mikrozdroje	3
2.1	Reakční (přetlakové) turbíny pro mikrozdroje	3
2.1.1	Kaplanova turbína a její modifikace	3
2.1.2	Francisova turbína	5
2.2	Rovnotlaké turbíny pro mikrozdroje	6
2.2.1	Peltonova turbína	6
2.2.2	Turbína Turgo	7
2.2.3	Bánkiho turbína	8
3	Kompaktní soustrojí s obtékaným generátorem „Bělídlo“	9
3.1	Matematický model „Bělídlo“	10
3.1.1	Geometrie soustrojí	10
3.1.2	Výpočetní síť jednotlivých domén	11
3.1.3	Problematika mezních vrstev	15
3.1.4	Další nastavení výpočtu	17
3.1.5	Vyhodnocení výsledků	19
3.2	Matematické modely s využitím rotační periodicity.....	24
3.2.1	Varianta „třetinového“ matematické modelu	24
3.2.2	Varianta různého poměru výseků nátoku na rozvaděč a RK	28
3.2.3	Varianta s celou savkou a výtokovou sekčí	29
3.2.4	Vyhodnocení variant využívající rotační periodicitu.....	30
3.3	Obměna původního celého modelu s jemnou výpočetní sítí.....	32
4.	Kompaktní soustrojí s obtékaným generátorem „Vydra“	38
4.1	Varianta soustrojí s proměnnými otáčkami (Varianta A)	38
4.2	Varianta s konstantními provozními otáčkami (Varianta B)	40
4.3	Referenční matematický model.....	41

4.3.1	Hydraulický profil.....	41
4.3.2	Lopatky OK a RK.....	42
4.3.3	Výpočetní síť nátoků na rozvaděč, savky a výtokové sekce.....	46
4.3.4	Vyhodnocení modelu	47
4.4	Matematické modely pro různé vazby OK-RK	53
4.4.1	Finální model pro OK 0°	55
4.4.2	Další matematické modely.....	56
4.5	Hlavní univerzální charakteristika	60
4.6	Variety strojů pro lokalitu Vydra II	62
4.6.1	Varianta stroje o stávajícím průměru D=600 mm a proměnných otáčkách (Varianta C).....	62
4.6.2	Varianta stroje o stávajícím průměru D=600 mm a pevných otáčkách (Varianta D)	64
4.6.3	Varianta stroje o průměru D= 530 mm a proměnných otáčkách (Varianta E).....	65
4.6.4	Varianta stroje o průměru D= 530 mm a pevných otáčkách (Varianta F)	66
4.6.5	Varianta stroje o průměru D= 500 mm a proměnných otáčkách (Varianta G)	67
4.6.6	Varianta stroje o průměru D= 500 mm a pevných otáčkách (Varianta H)	67
4.7	Vynesení variant návrhů stroje do hlavní univerzální charakteristiky	68
4.8	Přibližná hodnota roční výroby energie	69
4.9	Vynesení bodu z charakteristiky soustrojí Bělídlo do grafu hlavní univerzální charakteristiky	71
5	Závěr	72
6	Náměty na další postup.....	73
7	Literatura a zdroje informací	74
8	Seznam obrázků	75
9	Seznam tabulek	76
10	Seznam grafů	77

1 Úvod

V dnešní době je v ČR naprostá většina významných vodních zdrojů pro výstavbu vodních elektráren již využita. Zbývají tedy lokality s malým energetickým potenciálem. Jelikož se často jedná o lokality na menší vodních tocích, kde je výstavba konvenčních elektráren ekonomicky nerentabilní, je třeba využít jiných konceptů a přístupů s ohledem na technologickou a provozní jednoduchost a nízkou ekonomickou náročnost použitých vodních turbín.

Tato práce si klade za cíl vhodně navrhnout turbínové soustrojí pro lokalitu Vydra II pomocí metody CFD. Návrh tohoto soustrojí bude vycházet z konceptu vyzkoušeném na lokalitě Bělidlo.

1.1 Rozdělení vodních elektráren

Vodní elektrárny lze dělit dle různých parametrů. My si uvedeme ty nejzákladnější. Dle schematického uspořádání - přehradní, jezová a derivační. Dle velikosti využívané polohové energie - nízkotlaké ($E < 200$ J/kg), středotlaké ($E < 1000$ J/kg) a vysokotlaké ($E > 1000$ J/kg). Podle způsobu provozu rozlišujeme vodní elektrárny průtočné (bez akumulčního prostoru) a špičkové (s akumulční nádrží). Nejdůležitější rozdělení je podle velikosti instalovaného výkonu. Velké VE ($P > 100$ MW), střední (100 MW $> P > 10$ MW) a malé ($P < 10$ MW). V Evropské unii se za MVE považují vodní elektrárny s výkonem do 5 MW.

1.2 Malé vodní elektrárny

Pro tuto práci je nejdůležitější kategorie malých vodních elektráren (dále jen MVE), které je možno dále dělit na více kategorií [1]:

- Průmyslové $P > 60$ kW - dále se dělí na veřejné ($P > 100$ kW) a závodní ($P > 60$ kW)
- Drobné $P < 60$ kW - minielektrárny $P > 35$ kW
 - Mikro zdroje $P < 35$ kW
 - Mobilní elektrárny $P < 2$ kW

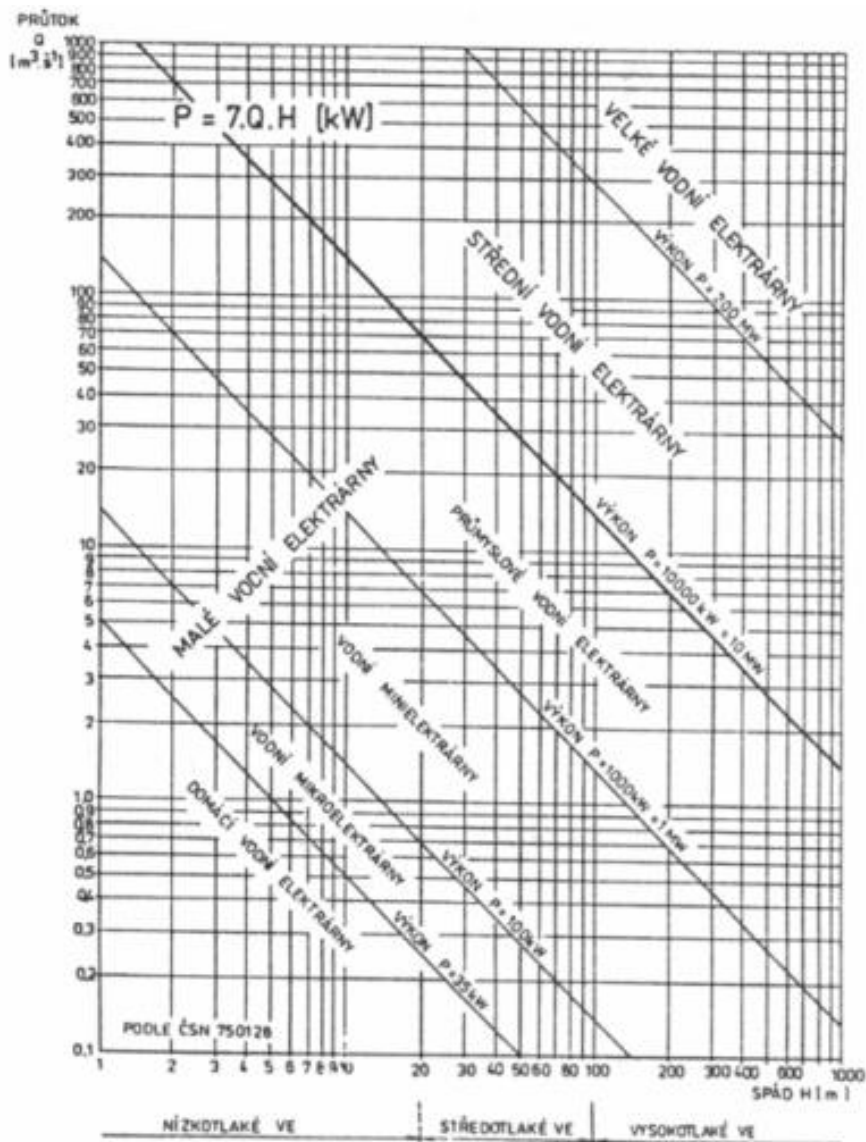
Dále lze MVE dělit dle využitelného spádu na:

- Vysokotlaké
- Středotlaké
- Nízkotlaké

Vysokotlaké MVE využívají spád nad 50 metrů, vyskytují se většinou na horních úsecích toků s malými průtoky. Vyznačují se dlouhým tlakovým přivaděčem a často je nutná ochrana před rázovými jevy, pomocí vyrovnávacích komor nebo vhodných uzávěrů. Nejpoužívanější typy turbín jsou Pelton, Bánki nebo Francis.

Středotlaké MVE využívají spády od 10 do 50 metrů. Voda je většinou přiváděna menším tlakovým přiváděčem, v případech se spády blížícími se dolní hranici kategorie, často dlouhým náhonem. Nejčastější typy turbín jsou Francisovy, Kaplanovy a variantní řešení Kaplanových turbín.

Nízkotlaké MVE využívají spády do 10 metrů. Bývají situovány na náhonech s volnou hladinou, velmi vhodné je využití v místech jezů vytvářejících využitelný spád. Často se používají i turbíny Bánkiho typu, kde je nižší účinnost vyvážena technologickou nenáročností. U toků nesoucí množství plavenin se může použít i Archimédova šroubu.



Obrázek 1 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu [2]

2 Turbíny pro mikrozdroje

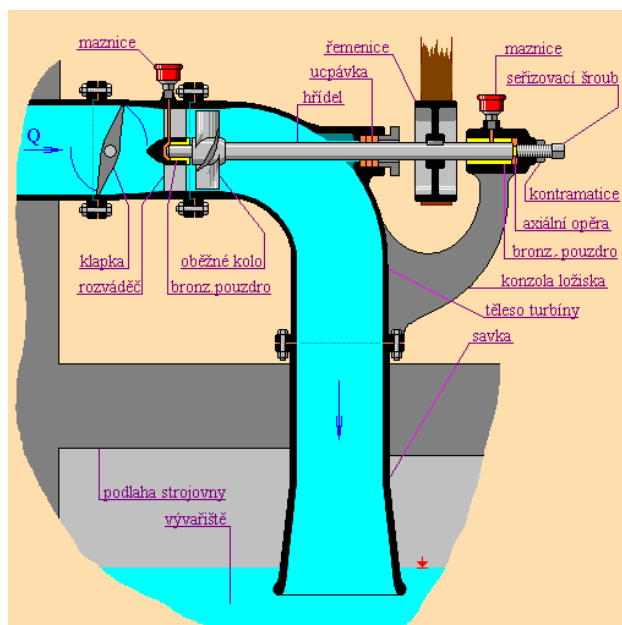
V této části rozdělíme turbíny dle způsobu přenosu energie na oběžné kolo turbíny. Dále si vyjmenuje základní typy turbín a jejich modifikace používané v lokalitách s malým energetickým potenciálem.

2.1 Reakční (přetlakové) turbíny pro mikrozdroje

U turbín přetlakových vtéká voda z pevných zakřivených rozváděcích kanálů do kanálů oběžných, zakřivených v opačném směru než kanály rozváděcí. [3] Část tlakové měrné energie v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu je přeměněna v kinetickou energii a zbývající část tlakové měrné energie se mění v kinetickou měrnou energii při průchodu vody oběžným kolem. [4]

2.1.1 Kaplanova turbína a její modifikace

Původní Kaplanova turbína je přetlaková axiální turbína s možností regulace lopatek rozváděcího kola (RK) i oběžného kola (OK), tudíž je často využívána tam, kde nelze zajistit stabilní průtok nebo spád, tudíž mají dobrou účinnost v poměrně velkém rozsahu průtoků. Původní propelerové (vrtulové) turbíny se vyznačovali velmi dobrou účinností pouze v malém rozsahu otáček. Obecně se Kaplanova turbína používá pro spády v řádu jednotek metrů až do hodnot kolem 50 metrů a pro průtoky od stovek l/s až po desítky m³/s .



Propelerové (vrtulové) turbíny

Pro mikrozdroje se často vracíme ke konceptu vrtulových turbín (nemají regulaci OK ani RK), jelikož i přes nižší celkovou účinnost a malou schopnost regulace (pomocí otáček stroje nebo změnou spádu) jsou ekonomicky výhodnější a technicky jednoduché.

Zajímavým a poměrně jednoduchým konceptem jsou násoskové propelerové turbíny, které v ČR vyrábí firma MAVEL. Při uvedení do chodu je nutno nejdříve naplnit násosku vodou. To se provádí tak, že při zapojení soustrojí do sítě pracuje soustrojí chvíli jako čerpadlo, až po naplnění násosky vodou přejde soustrojí automaticky do turbínového chodu. Odstavení soustrojí se provádí zavzdušněním násosky.

S – turbína

Jedná se o horizontální turbínu s esovitě tvarovanou savkou, často využívanou při rekonstrukcích starších vodních děl, kde nahrazuje vertikální Francisovu turbínu, jelikož je výhodnější díky širšímu regulačnímu rozsahu průtoku. Nejčastěji se využívá pro spády 2 až 4 m při průtocích od 500 do 3000 l/s. Výhodou této přímoproudé turbíny jsou malé náklady na stavební část. Hřídel je vodorovně vyváděná, tím pádem je nutné mít esovitě zahnutou savku, která snižuje účinnost o několik procent ve srovnání se savkou přímou.

Výhodou tohoto uspořádání je malá stavební výška, tudíž je možná instalace do malých strojoven u jezových elektráren nebo v jezových pilířích. Regulace oběžného i rozváděcího kola umožňuje regulovat průtok v širokém rozsahu, lze i téměř zastavit průtok strojem, a proto se před vstup do turbíny osazuje pouze havarijní uzávěr, nejčastěji stavidlo, u větších spádu klapka nebo hradící deska.

Nevýhodou této turbíny je nutnost údržby dvou hřídelových ucpávek a nepřístupné ložisko pod vodou. Klasická S – turbína má regulované rozváděcí i oběžné lopatky, čímž se kromě mechanické složitosti zvyšují náklady na údržbu a roste i celková cena stroje.

Na zdrojích s menší rozkolísaností průtoků je výhodnější použít např. vrtulové (propelerové) S – turbíny nebo turbíny typu Semi – Kaplan. [6]

Semi – Kaplan

Na rozdíl od S – turbíny je tato modifikace levnější a jednodušší, jelikož se průtok turbínou reguluje jen pomocí lopatek oběžného kola. Na rozdíl od S – turbíny má vyšší hltnost a při stejném průměru OK i vyšší výkon. Použitím pevného rozvaděče se významně snižuje regulační schopnost, tím pádem se tento typ turbíny vyplatí použít na zdrojích s menší rozkolísaností průtoku.

Výrobce turbín Semi – Kaplan pro mikrozdroje je např. firma Elzaco spol. s.r.o. Šumperk. Jedná se o turbíny s regulovanými lopatkami OK, pevným rozvaděčem a vodorovně vyváděnou hřídel.

	ELZA 250	ELZA 350	ELZA 500	ELZA 750	ELZA 1100
Hn(m) (Čistý provozní rozdíl hladin)	1,4 – 6,5	1,4 – 6,5	1,4 – 6,5	1,4 – 6,5	1,4 – 6,5
Qt (m ³ /s) (Dosahovaná hltnost turbíny)	0,04 – 0,351	0,072 – 0,687	0,148 – 1,402	0,333 – 3,155	0,716 – 6,787
Pt (kW) (Dosahovaný výkon na hřídeli)	0,3 – 17,5	0,5 – 34,2	1,0 – 69,7	2,3 – 156,9	4,9 – 337,6

Tabulka 1 Parametry turbín typu Semi-Kaplan vyráběných firmou Elzaco [7]

Turbína s obtékaným generátorem (Bulb)

Jedná se o ponořené soustrojí turbína – generátor. Generátor je umístěn do hydraulicky tvarované skříňe navazující na náboj oběžného kola. U větších soustrojí je tato skříň uložena na podpěrných lopatách nebo sloupech, u turbín pro mikrozdroje je v případech řešení s pevným rozvaděčem možné využít lopatky rozvaděče jako podpěry.

U nejjednodušší varianty soustrojí, tedy bez regulovatelných lopatek RK i OK, je regulace průtoku zajištěna změnou provozních otáček. Na rozdíl od klasických turbín má toto řešení minimální nároky na nadzemní stavební část. Kromě nižší ekonomické náročnosti je absence strojovny také výhodná v lokalitách, kde by nová budova esteticky rušila ráz lokality.

Instalace takového soustrojí je vhodná na nízkých spádech (většinou nízké jezové stupně derivačních elektráren). Na takových lokalitách dochází při povodňových průtocích k zvýšení hladiny horní i dolní vody. Tato vysoká návrhová povodňová hladina zdražuje výstavbu klasických suchých strojoven, o estetické stránce takové výstavby nemluvě. V případě ponořeného soustrojí riziko zatopení odpadá.

Z konceptu soustrojí s obtékaným generátorem vychází návrh soustrojí „Bělídlo“, kde se předpokládají pevné lopatky OK i RK. Vytvoření lopatek oběžného kola se předpokládá z plastu metodou 3 D tisku, tudíž je nutno vytvořit lopatky s větší tloušťkou, a to z důvodu vyšší pevnosti lopatek. V návrhu soustrojí „Vydra“ jsme zašli ještě dál a z plastu předpokládáme také vytvoření lopatek rozvaděče.

2.1.2 Francisova turbína

Historicky patřila k nejrozšířenějším turbínám využívaným na MVE. Nejčastější byly dva typy Francisovy turbíny podle uložení hřídele – horizontální a vertikální. Francisovy turbíny se u mikrozdrojů příliš nepožívají zejména kvůli nákladné výstavbě strojovny a přivaděče.

Francisova horizontální turbína

Většinou bývala umísťována na derivační kanály s otevřeným přivaděčem nebo tlakovým přivaděčem a otevřenou kašnou. Toto u spořádání s vodorovnou hřídelí se používá na spádech od 2 do 8 m a průtocích do 2 m³. Historicky byla tato turbína používána také jako mechanický pohon mlýnů, pil apod. Turbína bývá zpravidla umístěna na stěně kašny, voda je na oběžné kolo přiváděna rozvaděčem radiálním směrem, v oběžném kole se mění směr proudění na axiální.

Na rozdíl od vertikální turbíny je hydraulická účinnost stroje nižší, nicméně díky jednodušším převodům vodorovné hřídele je celková účinnost srovnatelná. U lokalit s malými spády a většími průtoky se používá rychloběžných turbín.



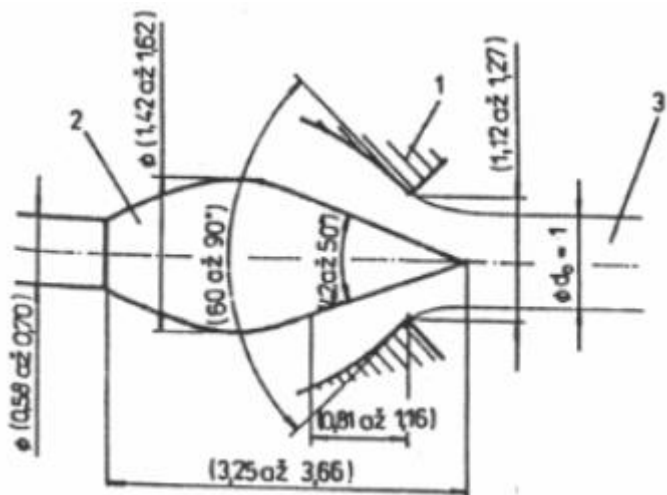
Obrázek 3 Francisova horizontální turbína [8]

2.2. Rovnotlaké turbíny pro mikrozdroje

Jestliže se veškerá tlaková měrná energie přemění v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu v kinetickou měrnou energii, je na vstupu a výstupu oběžného kola stejný tlak, a tudíž tyto turbíny nazýváme rovnotlaké. [9]

2.2.1 Peltonova turbína

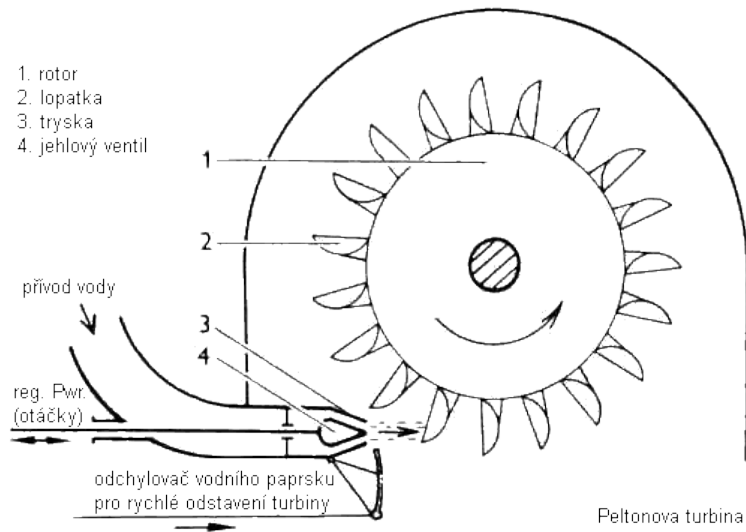
Jedná se o nejčastěji používaný typ rovnotlaké turbíny. Rozváděcí ústrojí tvoří dýza (v některých případech až šest), z níž ve tvaru volného paprsku kruhového průřezu vystupuje voda ostříkující na roztečném průměru lopatky oběžného kola. V dýze se celková měrná energie vody transformuje na energii kinetickou. Vystřikující voda z dýzy tangenciálně vstoupí do oběžného kola osazeného lžícovitými lopatkami. Břit uprostřed



Obrázek 4 Geometrie dýzy Peltonovy turbíny [10]

lopatek rozdělí paprsek na dvě poloviny a lžícovitý tvar lopatky se snaží otočit směr tekoucí vody zpět. Turbína se reguluje zasouváním jehly do dýzy, na úplné zastavení přítoku se většinou používá šoupátko na přívodním potrubí.

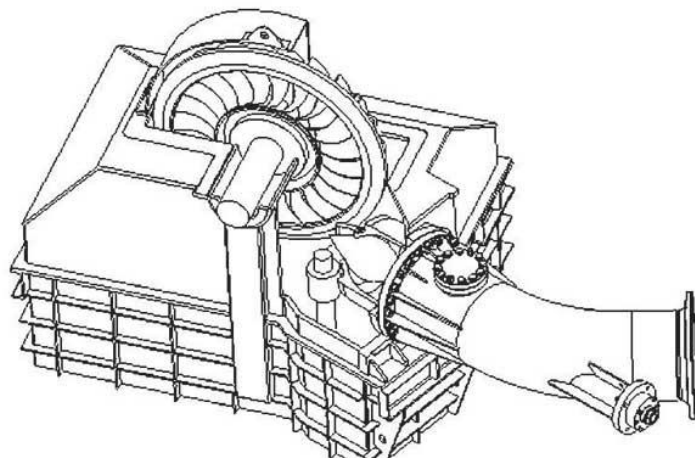
Běžně mají Peltonovy turbíny 18 až 26 lopatek. Použití této turbíny je pro spády nad 15-30 m, je ale možné použití jak pro malé průtoky (i v řádech litrů za sekundu), tak pro průtoky v řádech metrů kubických za sekundu.



Obrázek 5 Peltonova turbína [11]

2.2.2 Turbína Turgo

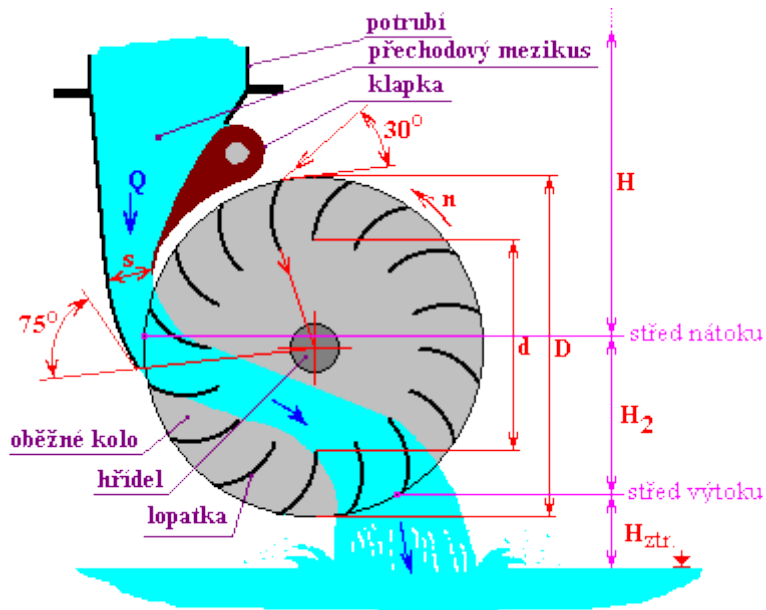
Rozváděcí ústrojí turbíny Turgo je v podstatě totožné s ústrojím Peltonovy turbíny, tudíž se vlastně jedná o její modifikaci. Oběžné kolo je tvořeno dvěma prstenci, mezi kterými jsou zakřivené lopatky. Použití je pro spády nad 10 m a pro průtoky od litrů za sekundu až po metry kubické za sekundu. Na rozdíl od Peltonovy turbíny je konstrukčně jednodušší, levnější a technologicky nenáročná.



Obrázek 6 Turbína Turgo [12]

2.2.3 Bánkiho turbína

Typově se jedná o radiální turbínu s dvojnásobným průtokem. Tato turbína bývá řazena mezi rovnotlaké, ale ve skutečnosti je rovnotlaký pouze druhý průtok turbínou. První průtok turbínou je přetlakový nebo mezní, jelikož výstupní hrana vstupního tělesa má minimální vzdálenost od vstupní hrany lopatek. Tím pádem má voda na vstupu do oběžného kola určitou minimální hodnotu měrné tlakové energie.



Obrázek 7 Princip Bánkiho turbíny [13]

Obvykle je voda na turbínu přiváděna potrubím kruhového průřezu, na které je před oběžným kolem vložen mezikus měnící průřez na obdélník. Na konci mezikusu je umístěn regulační orgán, nejčastěji klapka. Voda vstupuje tangenciálně do oběžného kola s umístěnými dlouhými lopatkami. Orientačně lze říci, že při prvním průtoku lopatkami se tvoří $\frac{3}{4}$ celkového výkonu, zbylá $\frac{1}{4}$ výkonu je získána druhým průtokem lopatkami. Turbína se používá pro spády do 30 m při průtocích do řádu metrů kubických za sekundu.

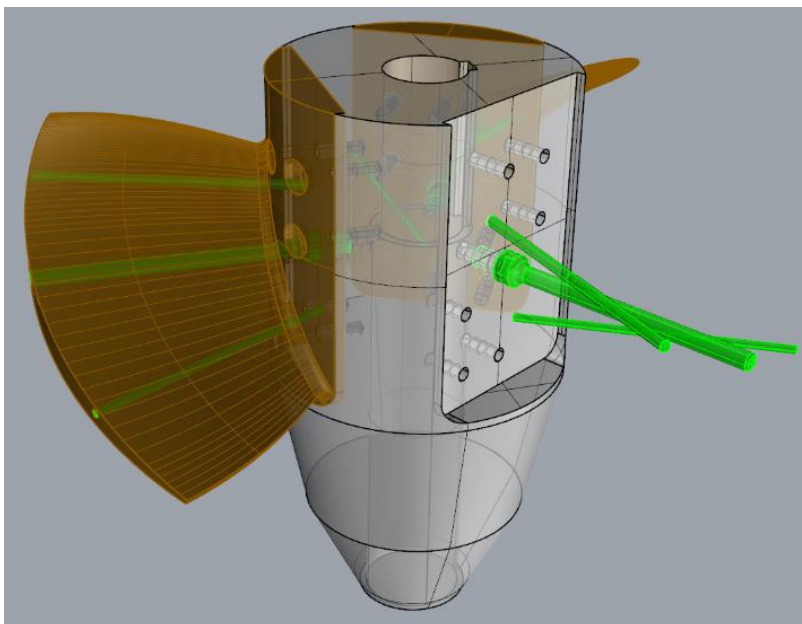
Ideální je instalace Bánkiho turbíny v lokalitách, kde bylo původně instalováno vodní kolo na horní vodu. Konstrukce turbíny je velmi jednoduchá, lopatky se obvykle vyrábějí jako podélný výřez z trubky v obvyklém počtu 32 ks na kolo. Průtok se dá velmi dobře regulovat i při zachování dobré účinnosti.

3 Kompaktní soustrojí s obtékaným generátorem „Bělídlo“

Jedná se o Kaplanovu turbínu, konkrétně o axiální BULB vrtulovou turbínu s pevným rozvaděčem a pevnými lopatkami oběžného kola. Následují základní návrhové údaje turbíny:

Návrhový spád:	1,50 m
Návrhový průtok:	0,40 m ³ /s
Jmenovitý výkon generátoru:	5,50 kW
Počet lopatek OK:	3
Počet lopatek RK:	10
Průměr náboje:	140 mm
Průměr oběžného kola:	350 mm
Nábojový poměr:	0,4
Provozní otáčky:	600 ot/min
Specifické otáčky:	277 ot/min

Byl uvažován válcový náboj, výměnné lopatky OK vytvořené metodou 3D tisku FDM (Fused deposition modeling). Z důvodu použití plastu, který má horší pevnostní charakteristiky než ocel, bylo nutno předpokládat větší tloušťky lopatky a vyztužit ji ocelovými trny spojenými s nábojem. Díky použití plastu lze lopatky snadno a rychle vyměnit.



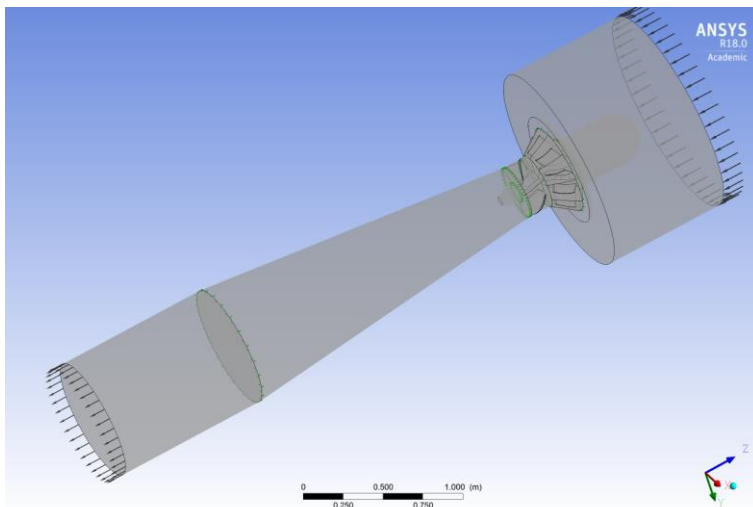
Obrázek 8 Náboj s připojenými lopatkami [14]

3.1 Matematický model „Bělídlo“

Cílem mého modelu soustrojí „Bělídlo“ bylo ověřit hodnoty charakteristik turbinového soustrojí vypočítané Ing. Markem Hosnedlem v jeho diplomové práci. Proběhlo mnoho úprav nastavení modelu i úprav ve výpočetní síti, až nakonec byla vytvořena varianta s velice jemnou výpočetní sítí.

3.1.1 Geometrie soustrojí

Byl sestaven matematický model z geometrie převzaté z diplomové práce Ing. Marka Hosnedla, s totožnými lopatkami RK i lopatkami OK (OK150915).



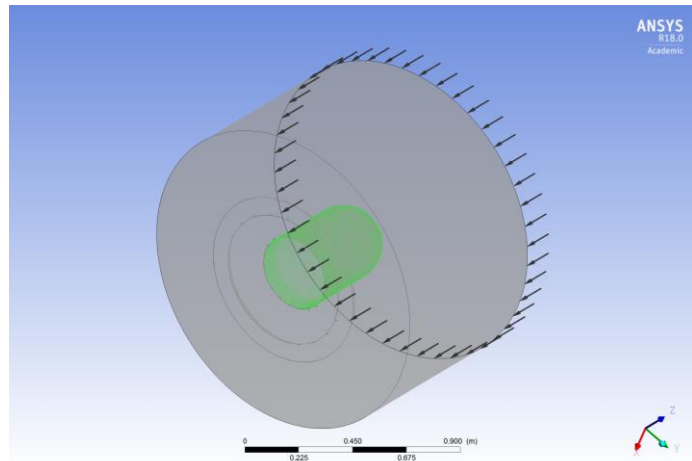
Obrázek 9 Celá geometrie matematického modelu

- Nátok na rozváděč: slouží k oddálení horní okrajové podmínky
- Rozváděč (RK): 10 lopatek
- Komora oběžného kola (OK): 3 lopatky OK150915
- Savka: stěna se rozšiřuje pod úhlem 6°
- Výtoková sekce: slouží pouze k oddálení dolní okrajové podmínky

3.1.2 Výpočetní síť jednotlivých domén

Nátok na rozvaděč

Tato část slouží zejména k oddálení vtokové okrajové podmínky. Výpočetní síť byla vytvořena jako nestrukturovaná v programu *ICEM CFD*. Jako vtoková podmínka byl použit výraz *UpPress* o hodnotě 1,5 m neboli 14666 Pa nastaven jako *Total pressure (stable)*. Turbulence byla zvolena *Medium (Intensity = 5%)*. U turbín se obvykle volí vyšší intenzita, ale zatím ponecháme tuto



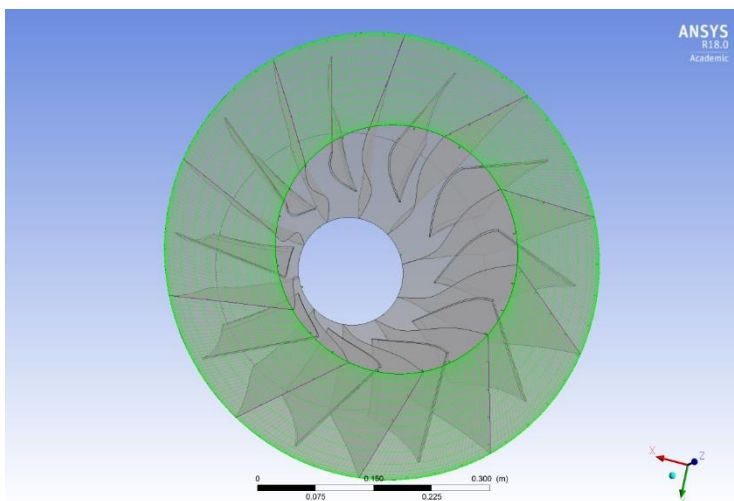
Obrázek 10 Nátoková část, zeleně je vyznačen obtékaný generátor

předdefinovanou volbu. Změna turbulence na vtoku bude diskutována v jedné z variant. Stěna rovnoběžná se směrem proudění je uvažována jako *Free Slip Wall* (žádná mezní vrstva). Celkový počet elementů byl 588 tisíc, uzlů 143 tisíc.

Rozvaděč

Výpočetní síť byla vytvořena v programu *Turbogrid*, který automaticky vytvoří strukturovanou výpočetní síť pro jednu lopatku rozvaděče.

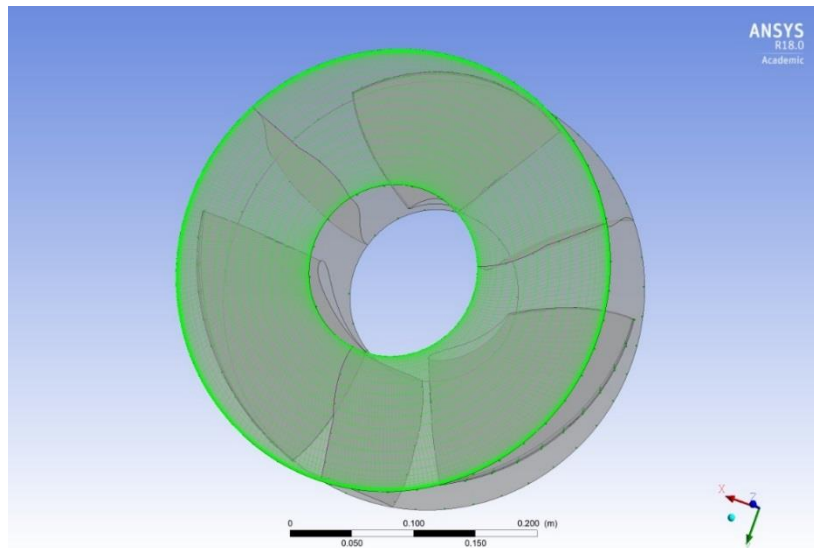
Do CFX-Pre se vkládá pouze jedna lopatka a ta se nakopíruje rotováním kolem osy z. V našem případě je celkově 10 lopatek a celý rozvaděč má 1 533 tis. uzlů a 1 448 elementů.



Obrázek 11 Lopatky rozvaděče, zeleně je vyznačená nátoková část

Komora oběžného kola

Výpočetní síť se stejně jako u rozvaděče vytvoří v programu *Turbogrid*. Jedná se strukturovanou síť, do *CFX-Pre (Setup)* se opět naimportuje pouze jedna lopatka a nakopíruje se rotováním okolo osy z. Celkem jsou tedy v OK tři lopatky, celkem se jedná o 1708 tis. uzlů a 1640 tis. elementů.



Obrázek 12 Komora oběžného kola, zeleně je vyznačená nátoková část

Velice důležitým parametrem je vzdálenost hrany oběžného kola od stěny komory, v našem případě se jedná o 1 mm. Vlivem šířky mezery jsme se v návrhu tohoto modelu turbíny nezabývali. Jedná se ale o podstatný parametr, který při modelování a samozřejmě i realizaci soustrojí může výrazně ovlivnit účinnost a tím i výkon soustrojí. [15]

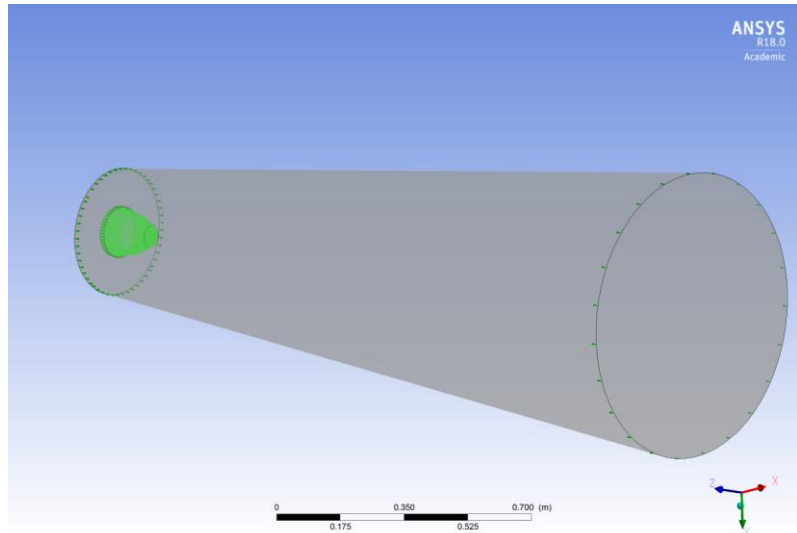
Nejprve bylo počítáno se třemi variantami natočení původní lopatky OK150915, jelikož předchozí modely vytvořené Ing. Markem Hosnedlem ukazovaly menší hltnost při provozních otáčkách než návrhových $0,40 \text{ m}^3/\text{s}$. Po prvotních výpočtech bylo rozhodnuto, že natočení lopatek OK vůbec nebudeme řešit, spíše se budeme snažit vytvořit matematický model s využitím rotační periodicity.

Savka

Výpočetní síť byla vytvořena jako strukturovaná v programu *ICEM CFD*. Problém se strukturovanou sítí nastává při komplikovanější geometrii, jako je např. náboj zasahující do savky. Z tohoto důvodu se často využívá nestrukturované sítě, jelikož je její tvorba daleko rychlejší a v některých případech i jediná možná. Nicméně výpočty s nestrukturovanou sítí jsou daleko pomalejší a méně přesné, respektive abychom dosáhli sítě, která má obdobné vlastnosti, je třeba vytvořit síť s větším počtem elementů.

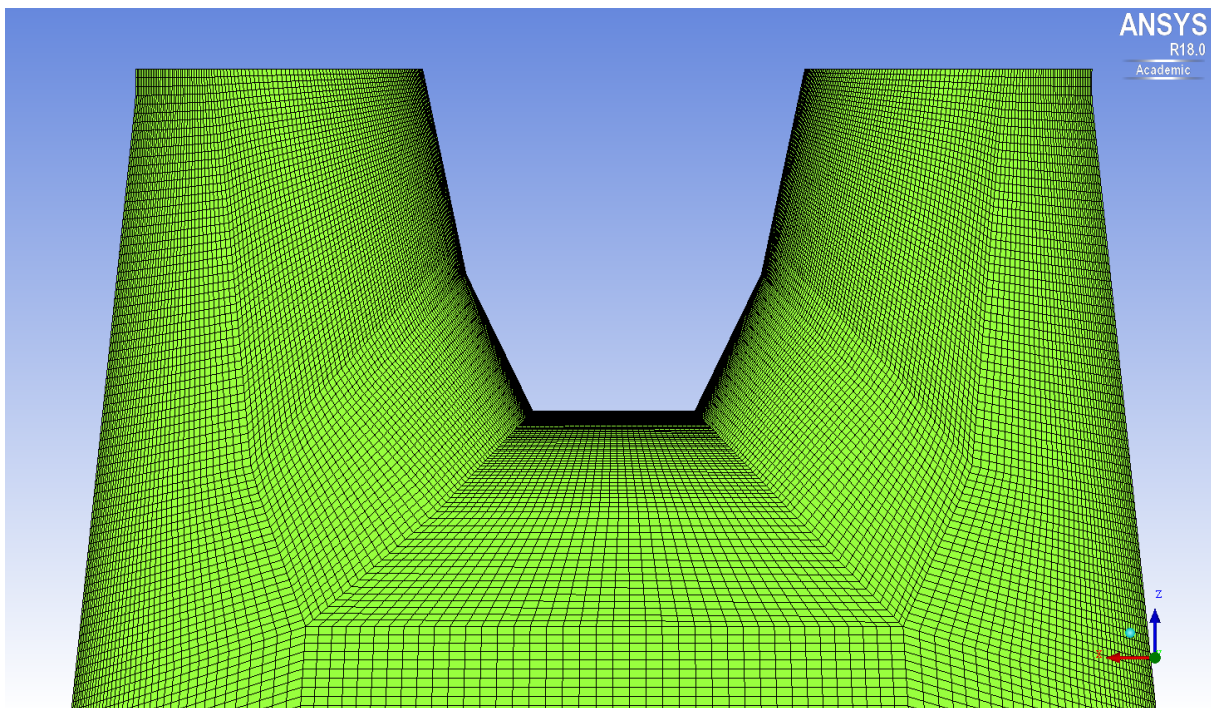
Tvorba strukturované sítě může zabrat mnoho času. Jedná se o více méně iterační proces, kde se vzájemně ovlivňuje mnoho faktorů. Důležitým ukazatelem kvality sítě v *ICEM CFD* je determinant (vlastně převrácená hodnota Jakobiánu). Pro praktickou aplikaci je důležité vědět, že má být u strukturované sítě větší než 0. Častým problémem, zejména u strukturované sítě s velkým počtem malých elementů a vnořeným objemem (v našem případě náboj), je vytvoření elementů se „záporným“ objemem.

Velmi důležitá je také správná výška prvního elementu u stěny, která by měla být menší anebo rovna výšce mezní vrstvy. To je ale u složitější geometrie problém, jelikož se výška mezní vrstvy po délce stěny savky a náboje mění. Navíc pokud je výška prvního elementu postihujícího mezní vrstvu velmi malá, musíme vytvořit v síti mnoho elementů, jelikož tempo růstu elementů by ideálně mělo být menší než 1,2. Více o výšce prvního elementu v další kapitole.



Obrázek 13 Savka, pohled proti vodě, zeleně je vyznačen náboj

Celkový vytvořený počet uzlů je 2,66 milionu, elementů je 2,62 milionu.



Obrázek 14 Střední podélný řez strukturovanou sítí savky

Výtoková sekce

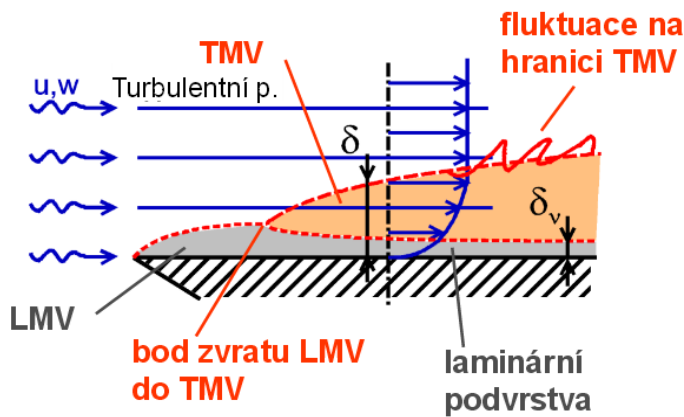
Je umístěna za savku z důvodu oddálení dolní okrajové podmínky, která je definovaná jako tlak na výtoku 0 Pa. V *ICEMU CFD* byla ve výtokové sekci vytvořena strukturovaná síť. Kvůli úspoře elementů nebyla ani uvažována mezní vrstva. Celkový počet uzlů je 79 tis., elementů 75 tisíc.

Domain	Nodes	Elements
R1	1708035	1640196
S0	142700	587669
S1	1532520	1447680
S2	2660148	2622906
S3	78760	74880
All Domains	6122163	6373331

Tabulka 2 Počty elementů v jednotlivých doménách - R1 je komora oběžného kola, S0 je nátok na rozvaděč, S1 je rozvaděč, S2 je savka, S3 je výtoková sekce

3.1.3 Problematika mezních vrstev

Základem správně nastaveného matematického modelu je vyřešení problematiky proudění u stěn těles. Prvního výpočetního elementu u stěny musí mít takovou výšku, aby parametr y^+ (viz konec této stránky) byl menší než určitá hodnota (obvykle uváděno 100). Pouze při správné maximální výšce prvního elementu u stěny může simulace proudění proběhnout korektně.



Obrázek 15 Mezní vrstvy [16]

Ke stanovení výšky prvního elementu u stěny byl využit on-line generátor. [17]

1. Jako první krok generátor vypočítá Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{freestream} \cdot L_{boundarylayer}}{\mu}$$

2. Odhad součinitele tření C_f

$$C_f = [2 \cdot \log_{10}(Re_x) - 0.65]^{-2.3} \text{ vhodné pro } Re < 10^9$$

3. Výpočet smykového napětí na stěně (Shear stress) τ_w

$$\tau_w = C_f \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot U_{freestream}^2$$

4. Výpočet třecí rychlosti u_*

$$u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$$

5. Výpočet maximální výšky prvního výpočetního elementu y

$$y = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot u_*}$$

Problém bývá se stanovením charakteristického rozměru (Boundary layer length) a také rychlost (Freestream velocity).

Input

Freestream velocity:	<input type="text" value="5"/>	[m/s]
Density:	<input type="text" value="997"/>	[kg/m ³]
Dynamic viscosity:	<input type="text" value="0.0013"/>	[kg/ms]
Boundary layer length:	<input type="text" value="0.35"/>	[m]
Desired Y+ value:	<input type="text" value="100"/>	[]

Output

Reynolds number:	<input type="text" value="1.3e+6"/>	[]
Estimated wall distance:	<input type="text" value="6.2e-4"/>	[m]

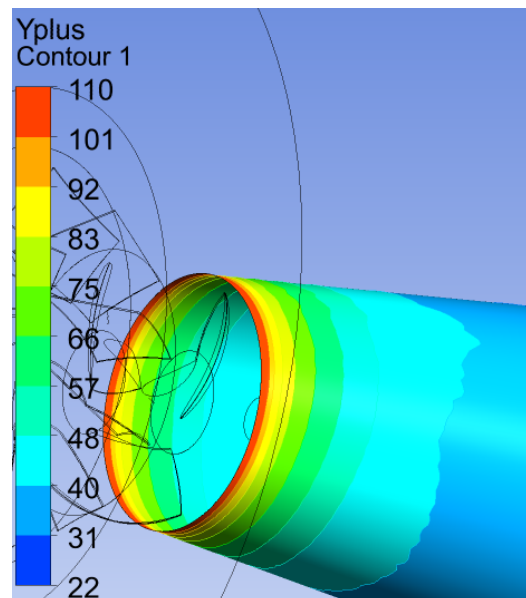
Obrázek 16 Výška prvního elementu u stěny savky [16]

U všech částí soustrojí, kromě stěny výtokové sekce, byla řešena výška prvního elementu u stěny. Nejkomplikovanější bylo vytváření výpočetní sítě s prizmatickými elementy u stěny v savce. Jako první „náštel“ jsme použili na začátku savky hodnotu rychlosti 5 m/s a délku mezní vrstvy jako průměr OK 0,35 m. Výška mezní vrstvy byla vypočtena na 0,62 mm u stěny savky (viz Obrázek). My jsme zvolili hodnotu nižší, konkrétně 0,54 mm. Na náboji byla vypočtena velikost prvního elementu 0,32 mm a na konci savky 1,1 mm.

Ve skutečnosti bychom měli výšku první vrstvy elementů nastavit podle měnící se rychlosti volného proudu a charakteristického rozměru, což je ale v praktické aplikaci, zejména u složitějších geometrií, velmi obtížné.

Naštěstí v *Post-processingu (Results)* po dopočítání výsledků je možné využít nástroj y^+ , který nám vypočte hodnotu parametru y^+ a můžeme si tak ověřit, zda jsme hodnotu y^+ nepřekročili. Hodnotu y^+ lze dle praktických poznatků považovat za uspokojivou do hodnot 200 až 300.

Například na stěně savky byla zjištěna maximální hodnota y^+ 109 pro případ hodnoty otáček 550 ot./min.



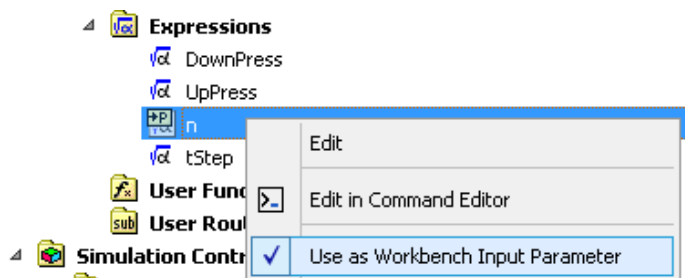
Obrázek 17 Hodnota y^+ na stěně savky

3.1.4 Další nastavení výpočtu

Do preprocesoru *CFX-Pre* bylo třeba vložit jednotlivé části modelu s vytvořenou výpočetní sítí. *Ansys CFX-Pre* obsahuje nástroj *Turbo mode*, který je při vhodně pojmenovaných částech importovaných sítí přiřadí k výpočetním doménám. Dále také vytvoří rozhraní (*interfaces*) mezi doménami. Samozřejmě vše je nutné zkontrolovat, případně manuálně upravit.

Jedná se o ustálené proudění (*Steady State*), ve všech doménách je nastaven model turbulence SST. Nastavíme Advekcční schéma - *High Resolution, Turbulence Numerics - High Resolution*. Počet iterací nastavíme na 1200, délku časového kroku nastavíme výrazem $tStep=0.1/n$, kde n jsou otáčky za minutu, které program automaticky přepočte na základní jednotky, tedy na radiány za sekundu. Toto automatické přepočítávání je dost matoucí a je potřeba dát si pozor, abychom počítali se správným časovým krokem.

Výraz (*expression*) n je nutno zvolit jako vstupní parametr (viz Obrázek 18). Celkem nastavíme n pro 450, 500, 550, 600, 650, 700 a 750 otáček za minutu. To jsou naše jednotlivé výpočetní body (*Design Point*).



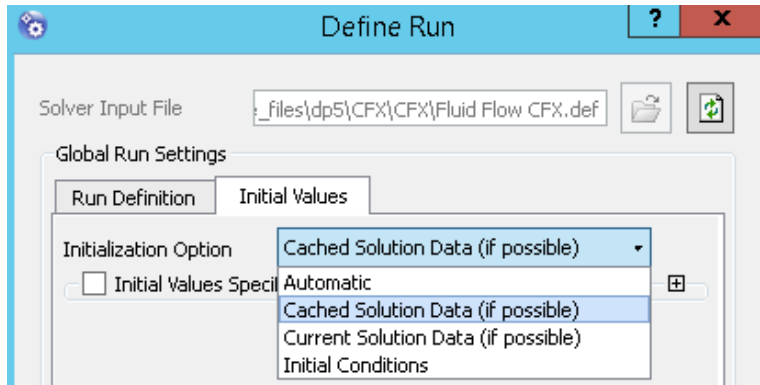
Obrázek 18 Parametr n

Nyní můžeme *CFX-Pre* zavřít. Důležité je v základním rozhraní po kliknutí na položku *Solution* zaškrtnout políčko *Cache Solution Data* (viz Obrázek 19). Tato volba je velmi nápomocná, jelikož kdybychom po dokončení výpočtů chtěli dále počítat, řešič by jednoduše navázal ve výpočtech pro každou hodnotu parametru n . Naopak kdybychom zvolili *Current Solution Data* a chtěli po dokončení výpočtů dále počítat, řešič by navázal pro každou hodnotu parametru n na námi zvolený aktuální parametr n (*Current Design Point*) např. 450 ot./min. Tudíž by výpočet trval mnohem déle.

Properties of Schematic A3: Solution		
	A	B
1	Property	Value
2	General	
3	Component ID	Solution
4	Directory Name	CFX
5	Keep Latest Solution Data Only	<input type="checkbox"/>
6	Cache Solution Data	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Initialization Option	Update from cached so...
8	Execution Control Conflict Option	Warn

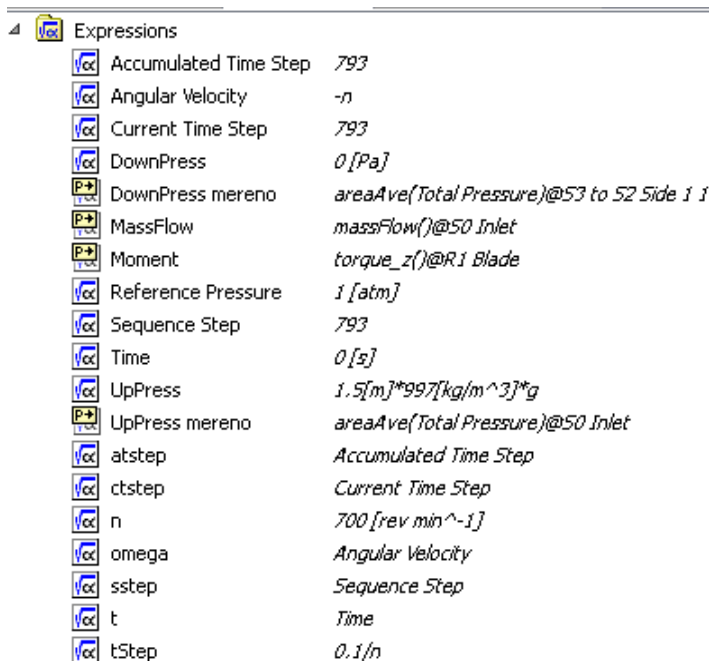
Obrázek 19 Cache Solution Data

Výpočet byl prováděn na serveru 147.32.134.250 na 18 z celkových 24 jader. Důležité je nastavit v položce *Initial Values – Initialization Option* volbu *Cached Solution Data* (viz Obrázek 20), což, jak jsme si řekli, bude znamenat možnost hladkého navázání výpočtu na každý výpočetní bod n.



Obrázek 20 Počáteční podmínka výpočtu

Výpočet se spustí a po několika iteracích se zastaví, abychom mohli nastavit co a kde se bude měřit pro jednotlivé hodnoty otáček lopatek OK. Zajímá nás absolutní tlak (tlaková + rychlostní výška) na konci savky (přechod mezi savkou a výtoková sekce) - pojmenováno *DownPress mereno*, hmotnostní průtok – pojmenováno *MassFlow*, a kroutící moment na hřídeli – pojmenováno *Moment*. Pro kontrolu také měříme absolutní tlak na vtoku, jelikož jak víme, musí nabývat hodnoty 1,5 m vodního sloupce.



Obrázek 21 Výrazy (expressions) ve výsledcích (Results)

Dále musíme nastavit šablonu vizualizace výsledků - např. kontury rychlostí v podélném řezu, proudnice atp. Když je vše nastaveno, znovu se spustí výpočet.

3.1.5 Vyhodnocení výsledků

Výpočet trval na „starém serveru“ 147.32.134.250 cca 90 hodin. Po dopočítání je možné si prohlížet vizuální výsledky i průběhy konvergence. Nás zajímají výsledky průtoků, tlaků na konci savky a kroutícího momentu turbíny pro námi zvolené hodnoty otáček lopatek OK. Tyto výsledky lze nalézt v základním zobrazení *Parameters set – Table of Design points*. Tyto výsledky exportujeme do programu *Excel* a vykreslíme grafy.

Abychom mohli charakteristiky turbíny lehce a přehledně srovnávat s ostatními turbínami, je nutné přepočítat veličiny na jednotkové – tzn. veličiny odpovídající jednotkovému spádu a jednotkovému průměru oběžného kola.

Jednotkové otáčky:
$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}}$$

Jednotkový průtok:
$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}}$$

Jednotkový výkon:
$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot \sqrt{H^3}}$$

Jednotkový moment:
$$M_{11} = \frac{M}{D^3 \cdot H}$$

Specifické otáčky:
$$n_q = \frac{n \cdot \sqrt{Q}}{H^{3/4}} = n_{11} \cdot \sqrt{Q_{11}}$$

Účinnost:
$$\eta = \frac{P \cdot 100}{(\rho \cdot Y \cdot Q)}$$

Čistý spád H:
$$H = \frac{Y}{g}$$

Měrná energie:
$$Y = \frac{(UpPress\ mereno) - (Down\ Press\ mereno)}{\rho}$$

Kde:

n_{11} jednotkové otáčky [ot/min]

n provozní otáčky [ot/min]

D průměr oběžného kola [m]

Y měrná energie [J/kg]

H návrhový čistý spád [m]

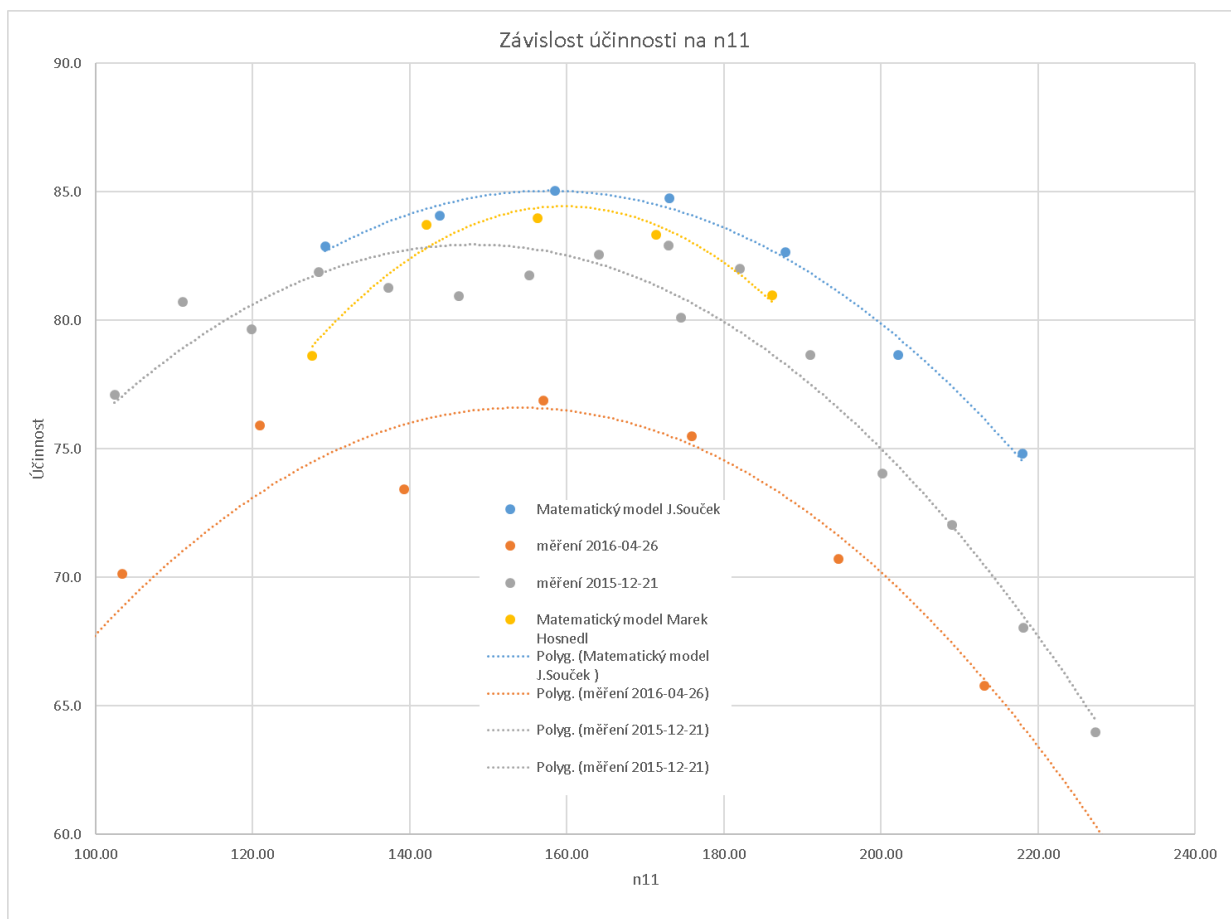
Q_{11} jednotkový průtok [m³/s]

Q návrhový průtok [m³/s]

- P_{11} jednotkový výkon [kW]
 P výkon [kW]
 M_{11} jednotkový moment [N.m]
 M moment [N.m]
 n_q specifické otáčky
 η účinnost [%]
 ρ hustota vody [997 kg/m³]
 g gravitační zrychlení [9,81 m/s²]
 Up_{Press} absolutní tlak na vstupu do soustrojí [Pa]
 $Down_{Press}$ absolutní tlak na konci savky [Pa]

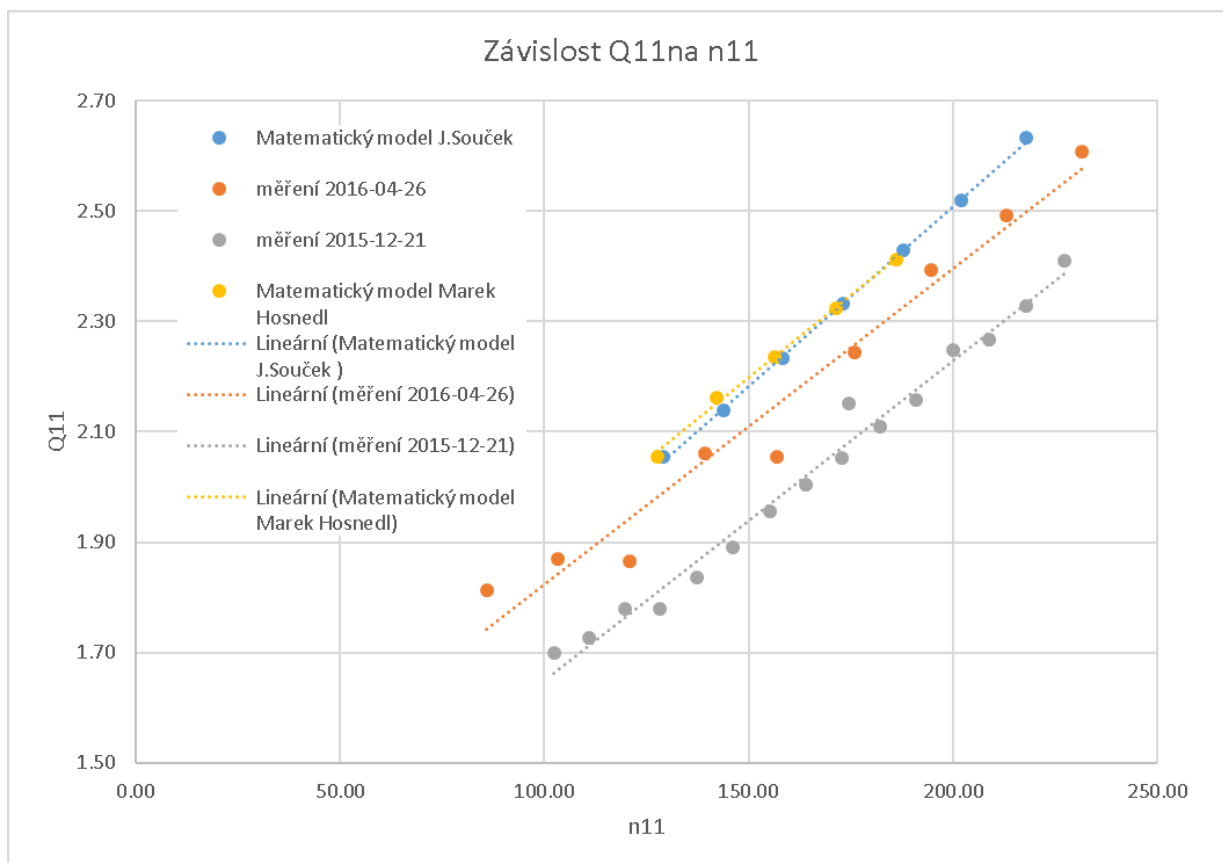
n	min ⁻¹	450	500	550	600	650	700	750
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPress	Pa	138.08	176.02	234.14	271.45	317.00	302.02	480.06
Q	kg/s	305.96	317.90	331.44	345.41	359.16	372.99	387.31
Mk	N.m	-78.40	-74.19	-70.84	-67.28	-62.78	-57.66	-52.49
Q	m³/s	0.31	0.32	0.33	0.35	0.36	0.37	0.39
Y	J/kg	14.57	14.53	14.48	14.44	14.39	14.41	14.23
H	m	1.49	1.48	1.48	1.47	1.47	1.47	1.45
Q11	m³/s	2.06	2.14	2.23	2.33	2.43	2.52	2.63
n11	ot/min	129.23	143.78	158.47	173.10	187.83	202.17	217.96
nq	ot/min	185.28	210.25	236.87	264.30	292.66	320.94	353.69
P	W	3694.73	3884.47	4080.06	4227.32	4273.28	4226.80	4122.66
P11	kW	16.66	17.59	18.58	19.33	19.63	19.39	19.27
M11	N.m	1231.12	1167.96	1119.74	1066.23	998.07	915.74	844.10
eta	%	82.9	84.1	85.0	84.8	82.7	78.7	74.8

Tabulka 3 Vypočtené charakteristiky pro původní polohu lopatek OK150915



Graf 1 Závislost účinností na jednotkových otáčkách, porovnání s měřeními a předchozím mat. modelem.

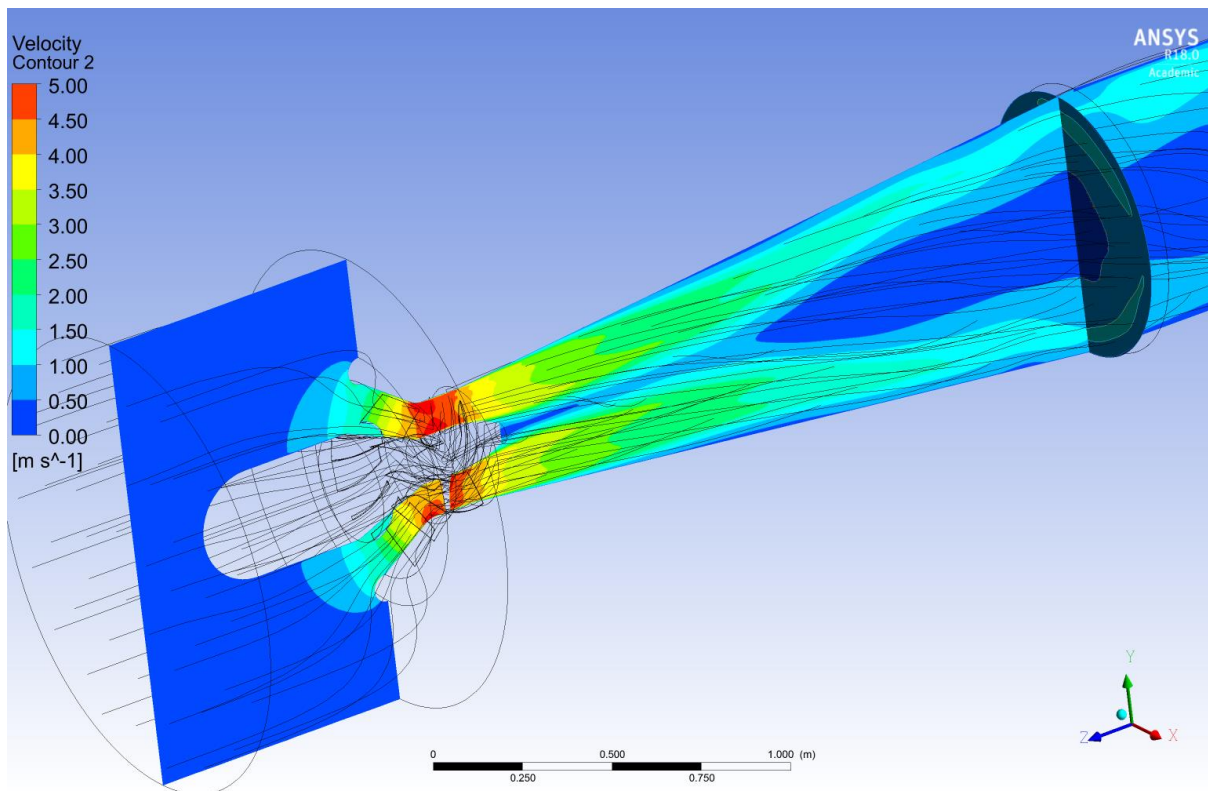
Dle Dr. Ing. Petra Nowaka nelze hodnoty měření považovat za seriózní. Naše výsledky lze tedy porovnat s výsledky matematického modelu Ing. Marka Hosnedla. Dle Grafu 2 (na následující stránce) se průtoky soustrojí pro jednotlivé otáčky prakticky shodují. Hodnoty účinnosti jsou ale dosti odlišné, jediná podobnost je, že pro hodnotu cca 158 jednotkových otáček za minutu se dosáhne maximální účinnosti soustrojí.



Graf 2 Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách

Výsledky lze vyhodnotit také vizuálně. Ve složce jejíž název končí „_files“ jsou jednotlivé výpočetní body pro které lze výsledky prohlížet. Například pro bod 600 ot./min (Obrázek 22 na následující stránce) lze vidět, že se proud od stěny savky neodtrhává a za nábojem se v savce vytváří úplav s velmi turbulentním prouděním, ale poměrně malými rychlostmi.

Výsledky byly konzultovány s Ing. Martinem Kantorem, který doporučil následující postup: Délka časového kroku $0,1/n$ je příliš malá, je lépe zvolit časový krok $0,5/n$ až $1/n$ a zhruba 2000 iterací. Důležité je monitorovat průběh účinnosti v průběhu výpočtu, jelikož je účinnosti velmi citlivá na výkyvy veličin, na kterých je závislá, tím pádem je ustálení hodnoty účinnosti dobrým ukazatelem konvergence výpočtu. Dále bylo doporučeno využít rotační periodicity a dosáhnout celkového počtu elementů soustrojí 0,5-0,7 milionu, z toho maximálně 300 tisíc elementů na savku.



Obrázek 22 Vizualizace rychlostí v soustrojí pro 600 ot./min a původní natočení lopatek OK

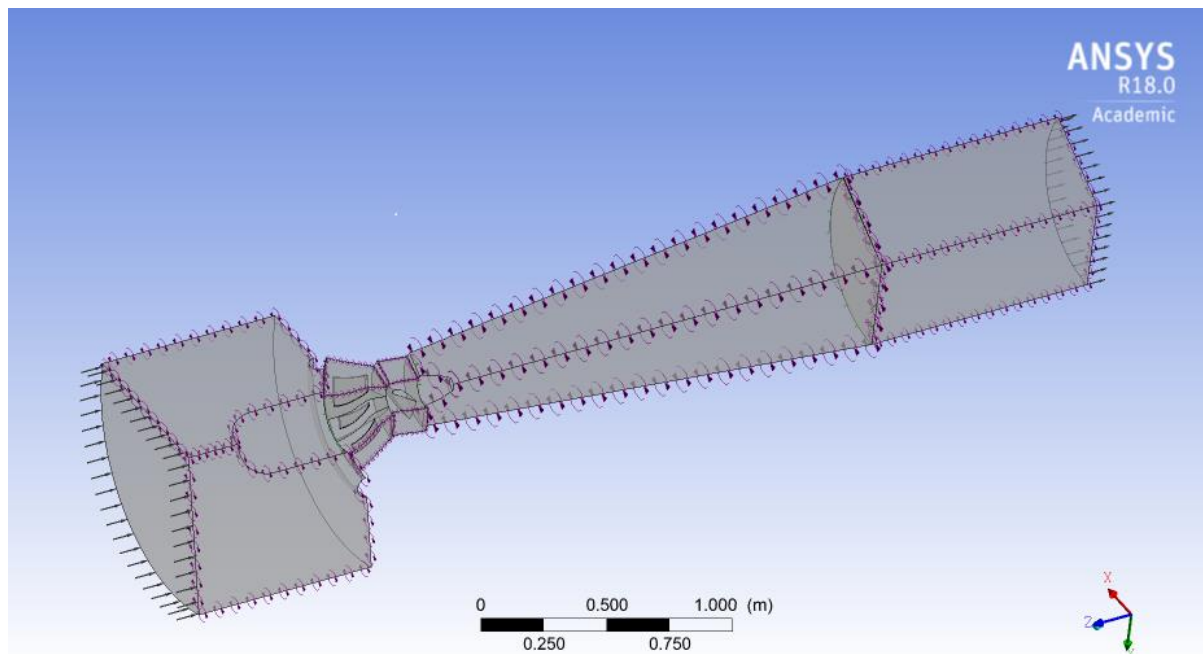
3.2 Matematické modely s využitím rotační periodicity

Využívá se rotační symetrie soustrojí okolo osy z, s cílem co nejvíce zredukovat počet elementů tak, aby výpočet probíhal rychleji a výsledky modelu byly přijatelné a odpovídaly realitě. Tyto výpočty byly realizovány na „novém“ serveru 147.32.134.251, který má 32 jader a má frekvenci 3,10 GHz oproti serveru 147.32.134.250 se 24 jádry a frekvencí 2,66 GHz.

3.2.1 Varianta „třetinového“ matematického modelu

Byla sestrojena varianta sestávající z následujících domén:

- Nátok na rozvaděč – z celého nátoky „vyseknuty“ 3/10
- Rozvaděč – využity 3 lopatky z 10
- Komora oběžného kola - 1 lopatka 0K150915
- Savka – z celé savky vyseknuta 1/3
- Výtoková sekce – z celého sekce vyseknuta 1/3



Obrázek 23 Geometrie „třetinového“ modelu

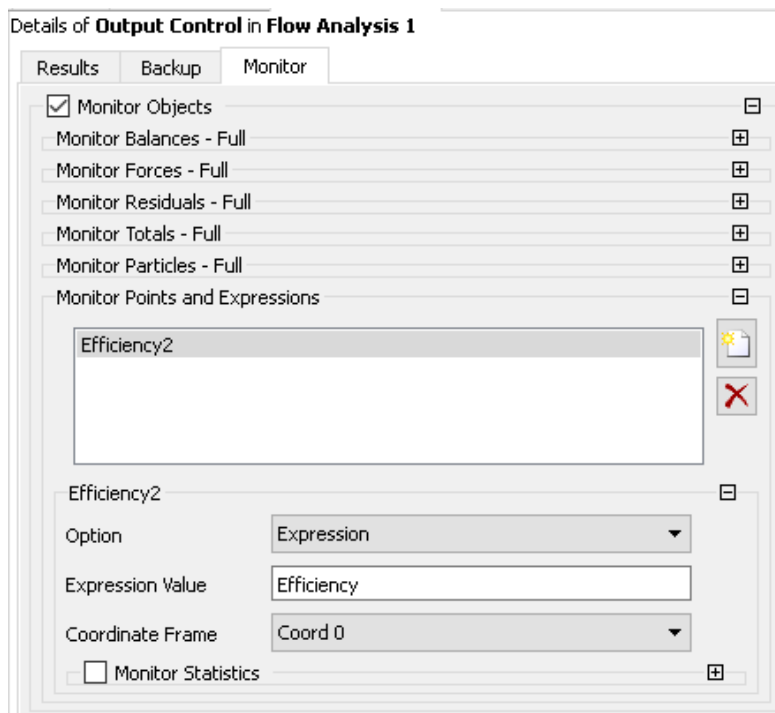
Byly vytvořeny výpočetní sítě pro jednotlivé domény s počty prvků uvedených v tabulce 4, kde lze vidět, že celkový počet elementů je 10x menší než v případě celého modelu (tzn. kdyby model nevyužíval rotační periodicitu, byl by počet elementů zhruba 3x nižší).

Dále bylo v CFX-Pre nastavena délka výpočetního kroku 0,5/n a maximální počet iterací 1500, s tím, že v případě potřeby by se po dopočítání všech výpočetních bodů přidaly dle potřeby další iterace.

Domain	Nodes	Elements
R1	134363	124210
S0	29109	116409
S1	153072	139740
S2	251761	238128
S3	41496	38148
All Domains	609801	656635

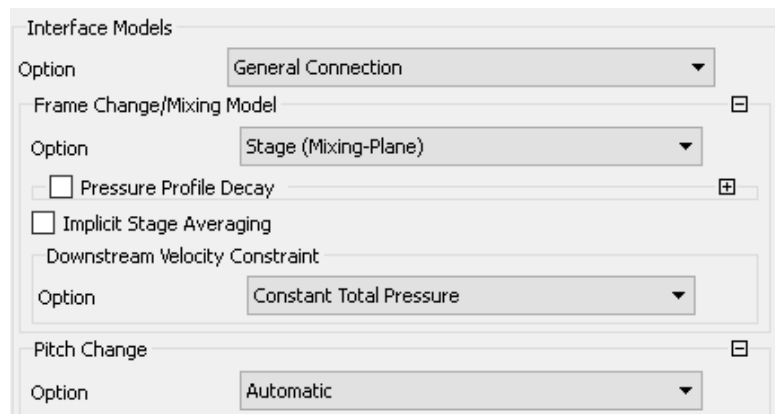
Tabulka 4 Počty elementů v jednotlivých doménách

Kvůli monitorování účinnosti během výpočtu bylo nutné zavést do *Expressions* další proměnné. V kartě *Output Control* je nutné zaškrtnout *Monitor Object* a účinnost zavést jako monitorovanou hodnotu (viz. Obrázek vpravo). Samozřejmě je možné monitorovat i další hodnoty například průtok. Nicméně účinnost je veličina závislá na průtoku i kroutícím momentu, čili je velice citlivá na výkyvy těchto měřených hodnot a tudíž bude sloužit jako výborný indikátor konvergence výpočtu.



Obrázek 24 Monitorování účinnosti

Důležité je také nastavení rozhraní (*interface*) mezi jednotlivými doménami. Rozhraní je nastaveno jako *Stage (Mixing-Plane) - Pitch Change* je nastavena na *Automatic*. *Pitch Change* určuje poměr stran rozhraní. Například pokud mezi RK a OK je poměr $108^\circ/120^\circ$, veličiny jako např. průtok se na druhé straně rozhraní (v našem případě OK) vynásobí obrácenou hodnotou tohoto poměru.

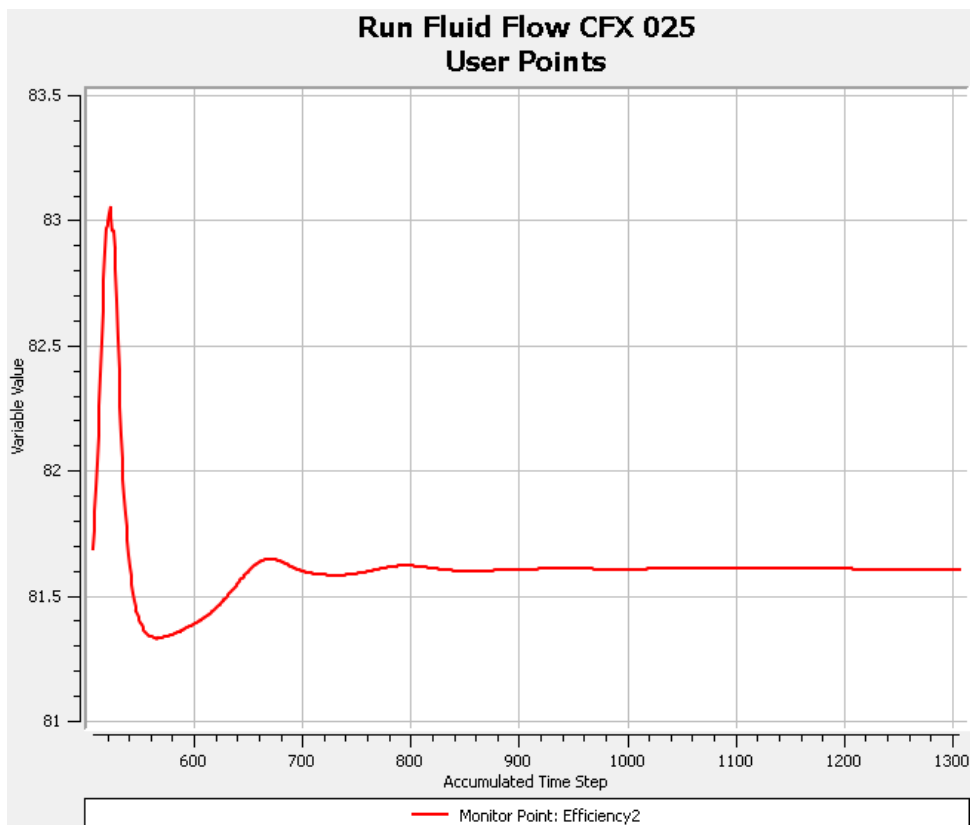


Obrázek 25 Rozhraní domén modelu

Při volbě *Stage (Mixing-plane)* se po cylindrických řezech rozhraní průměrují charakteristiky proudění na výtoku a převádějí se na druhou stranou rozhraní. Nastavení *Stage* vyžaduje více výpočetního času než volba *Frozen Rotor*, často se výpočet nejprve „rozjede“ méně iteracemi s volbou *Frozen Rotor* a posléze se změní na *Stage*. Navíc při volbě *Frozen Rotor* musí být poměr obou stran rozhraní co nejbližší číslu 1. V případě nastavení *Stage* toto nemusí být splněno, jelikož se charakteristiky průměrují. [18] Tato skutečnost byla ověřena ve variantě matematického modelu 3.2.2 Varianta různého poměru výseků nátoku a RK.

Vyhodnocení

Výpočet byl prováděn pro celou sadu otáček 450 až 750 ot./min. pro původní nenatočenou lopatku OK150915. Pro časový krok 0,5/n a tuto výpočetní síť trvá 1500 iterací přibližně 1,5 h. Tedy celkový výpočet všech výpočetních bodů přes 10 h. Ukázalo se, že 1500 iterací bylo zbytečně mnoho a zejména pro výpočty pro menší počet otáček za minutu (450, 500 i 550) stačilo 1000 iterací. Jelikož byly první výpočetní body průběžně sledovány, často jsem jejich výpočet předčasně ukončil, abych ušetřil výpočetní čas na výpočetních bodech, u kterých se průběh monitorované účinnosti ustálil a nebude se již dále měnit (viz graf níže).



Graf 3 Průběh účinnosti během výpočtu pro 450 ot./min. pro posledních 800 iterací

n	min ⁻¹	450	500	550	600	650	700	750
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPress	Pa	290.04	286.18	285.71	303.30	264.55	316.16	349.25
Q	kg/s	299.32	311.66	325.39	340.13	356.70	369.77	382.48
Mk	N.m	-74.64	-70.33	-66.70	-63.38	-61.44	-55.17	-47.84
Q	m ³ /s	0.30	0.31	0.33	0.34	0.36	0.37	0.38
Y	J/kg	14.42	14.42	14.42	14.41	14.44	14.39	14.36
H	m	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
Q11	m ³ /s	2.02	2.10	2.20	2.30	2.41	2.50	2.59
n11	ot/min	129.91	144.33	158.76	173.29	187.48	202.27	216.97
nq	ot/min	184.71	209.37	235.32	262.71	290.86	319.79	349.07
P	W	3517.30	3682.61	3841.40	3982.35	4182.15	4044.19	3757.71
P11	kW	16.11	16.86	17.59	18.27	19.11	18.58	17.32
M11	N.m	1184.39	1115.75	1058.02	1006.67	973.23	877.04	762.35
eta	%	81.5	81.9	81.8	81.3	81.2	76.0	68.4

Tabulka 5 Vypočtené charakteristiky pro „třetinový“ matematický model

3.2.2 Varianta různého poměru výseků nátoků na rozvaděč a RK

V této variantě oproti předchozí je pouze měněná domény nátoků a rozvaděče. Konkrétně poměr 1/3 nátoků a 3/10 rozvaděče, dále varianta 1/3 nátoků a 1/10 rozvaděče a jako poslední varianta 2/10 nátoků a 2/10 rozvaděče. U OK, savky i přílepků je vytvořena jen 1/3.

	Nátok 1/3, RK 3/10	Nátok 1/3, RK 1/10	Nátok 2/10, RK 2/10
Počet uzlů	610 tis.	509 tis.	570 tis.
Počet elementů	652 tis.	559 tis.	644 tis.

Tabulka 6 Počty elementů u jednotlivých variant

V tabulce jsou přehledně vypsány počty elementů a uzlů výpočetní sítě u jednotlivých variant. Zejména u druhé varianty (Nátok 1/3, RK 1/10) je počet uzlů 509 tisíc velice výhodný, jelikož pokud je počet uzlů pod 512 tis., má ČVUT k dispozici daleko více multilicencí, než pro síť nad 512 tis. uzlů. Časový krok byl stejně jako v předchozí variantě 0,5/n a počet iterací zvolen na 1200.

Vyhodnocení

n	min ⁻¹	Nátok 1/3, RK 3/10			Nátok 1/3, RK 1/10			Nátok 2/10, RK 2/10		
		450	550	650	450	550	650	450	550	650
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPress	Pa	291.94	289.08	262.76	290.56	288.57	265.51	290.88	288.59	266.69
Q	kg/s	300.74	326.62	357.79	300.74	326.61	357.74	300.89	326.76	357.92
Mk	N.m	-76.03	-67.91	-62.57	-76.07	-67.95	-62.58	-76.18	-68.06	-62.71
Q	m ³ /s	0.30	0.33	0.36	0.30	0.33	0.36	0.30	0.33	0.36
Y	J/kg	14.42	14.42	14.45	14.42	14.42	14.44	14.42	14.42	14.44
H	m	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47
Q11	m ³ /s	2.03	2.21	2.41	2.03	2.21	2.41	2.03	2.21	2.42
n11	ot/min	129.92	158.77	187.47	129.91	158.77	187.49	129.91	158.77	187.50
nq	ot/min	185.16	235.81	291.28	185.15	235.80	291.30	185.20	235.86	291.39
P	W	3582.87	3911.50	4259.30	3584.48	3913.47	4259.58	3589.88	3919.98	4268.75
P11	kW	16.42	17.92	19.46	16.42	17.92	19.46	16.45	17.95	19.51
M11	N.m	1206.63	1077.58	991.06	1207.05	1078.08	991.31	1208.90	1079.88	993.53
eta	%	82.6	83.0	82.4	82.7	83.1	82.4	82.7	83.2	82.6

Tabulka 7 Vypočtené charakteristiky pro varianty různého poměru výseků nátoků na rozvaděč a RK

Jelikož mě zajímal také vliv nastavení turbulence na vtok (*50 Inlet*), byla pro variantu 1/3 nátoků a 3/10 RK změněna pouze turbulence z *Medium (Intensity = 5%)* na *High (Intensity = 10%)*. Hypotézou bylo, že vlivem vyšší turbulence by mělo docházet k větší disipaci energie a tím pádem vypočtená účinnost by měla být nižší. Po dokončení výpočtu se ale ukázalo, že se snížil kroutící moment Mk o desetiný promile a obdobně tedy účinnost. Závěrem je tedy skutečnost, že na nastavení turbulence nebude pro tento typ turbíny při využití rotační periodicity záviset, a proto bude ponechávána ve výchozím nastavení *Medium (Intensity = 5%)*.

Dále bylo pro variantu 1/3 Nátoku a 3/10 RK vyzkoušeno porovnání výpočetní rychlostí na starém (147.32.134.250 – 24 jader; 2,66 GHz) a novém (147.32.134.251 – 32 jader; 3,10 GHz) serveru.

Nový server	Délka výpočtu	s	3043	4468	4468
		hodin	0.8*	1.2	1.2
Starý server	Délka výpočtu	s	7126	7117	7272
		hodin	2.0	2.0	2.0

Tabulka 8 Porovnání výpočetní doby na novém a starém serveru (hvězdičkou označený bod byl ručně ukončen, jelikož byl dokonvergován)

Z tabulky je možné vyčíst, že nový server dosahuje 166% rychlosti starého serveru, respektive výpočetní úloha na novém serveru trvá 60% výpočetního času na starém.

3.2.3 Varianta s celou savkou a výtokovou sekcí

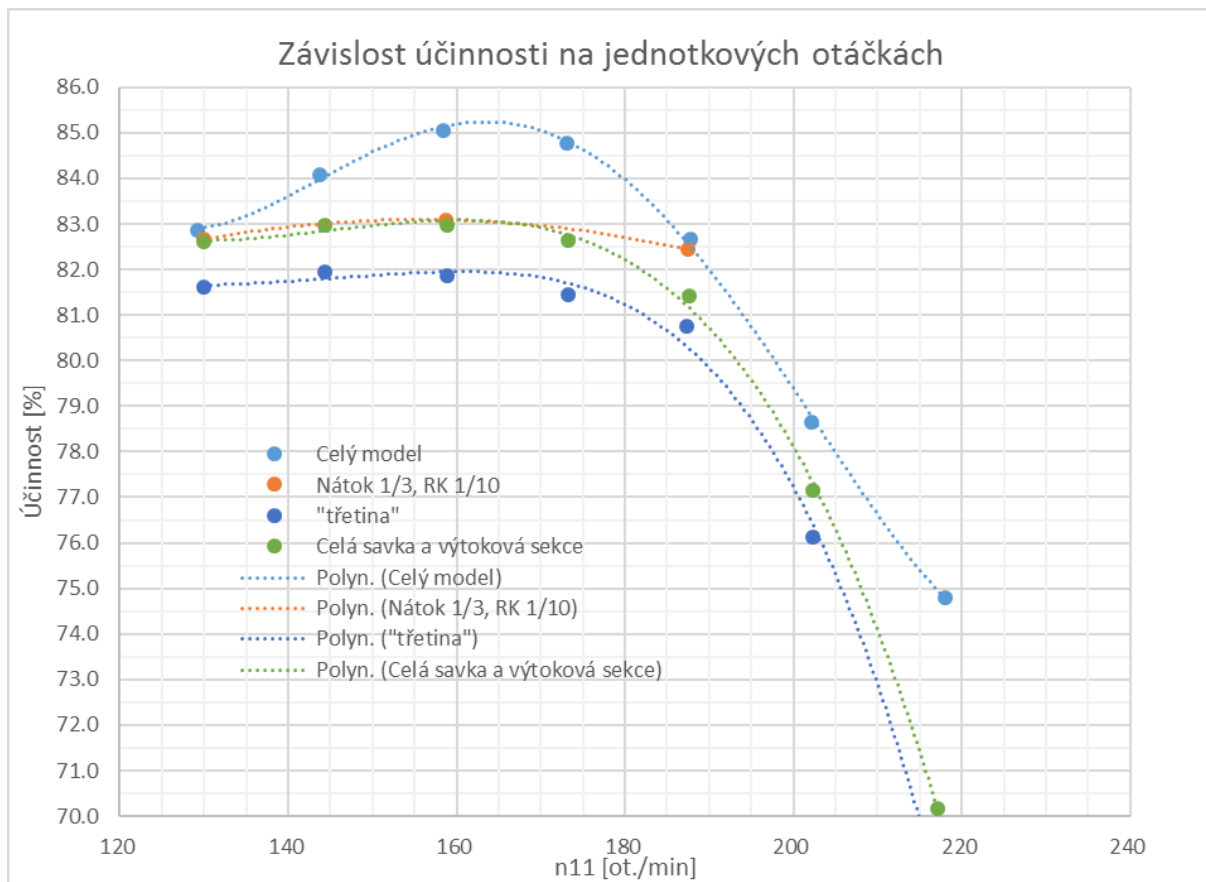
Další variantou bylo namodelování celé savky, jelikož byla obava, že třetina modelované savky nedokáže správně postihnout vývoj proudění. Byla tedy namodelována varianta s 1/3 nátoku na rozvaděč, 1/10 RK, 1/3 OK a s celou savkou a výtokovou sekcí. Celkem výpočetní síť obsahovala 615 tisíc uzlů a 670 tisíc elementů. Časový krok byl opět zvolen na 0,5/n. Počet iterací byl zprvu zvolen na 1000. Po dopočítání 1000 iterací byl u každého výpočetního bodu prohlédnut průběh chování účinnosti během výpočtu, a jelikož u některých výpočetních bodů se nezdál průběh účinnosti ustálený, byl spuštěn výpočet na dalších 500 iterací pro každý výpočetní bod.

n	min ⁻¹	450	500	550	600	650	700	750
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPress	Pa	285.18	281.01	295.52	298.05	290.73	320.41	370.09
Q	kg/s	300.24	312.29	325.98	340.91	356.29	370.14	383.56
Mk	N.m	-75.91	-71.40	-67.69	-64.62	-61.45	-56.05	-49.14
Q	m ³ /s	0.30	0.31	0.33	0.34	0.36	0.37	0.38
Y	J/kg	14.42	14.43	14.41	14.41	14.42	14.39	14.34
H	m	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
Q11	m ³ /s	2.03	2.11	2.20	2.30	2.41	2.50	2.60
n11	ot/min	129.89	144.30	158.81	173.26	187.65	202.30	217.12
nq	ot/min	184.94	209.53	235.66	262.94	291.09	320.02	349.94
P	W	3577.21	3738.24	3898.57	4060.23	4182.86	4108.50	3859.78
P11	kW	16.38	17.11	17.87	18.62	19.16	18.88	17.83
M11	N.m	1204.16	1132.20	1074.50	1025.98	975.17	891.25	784.19
eta	%	82.6	83.0	83.0	82.6	81.4	77.1	70.2

Tabulka 9 Vypočtené charakteristiky

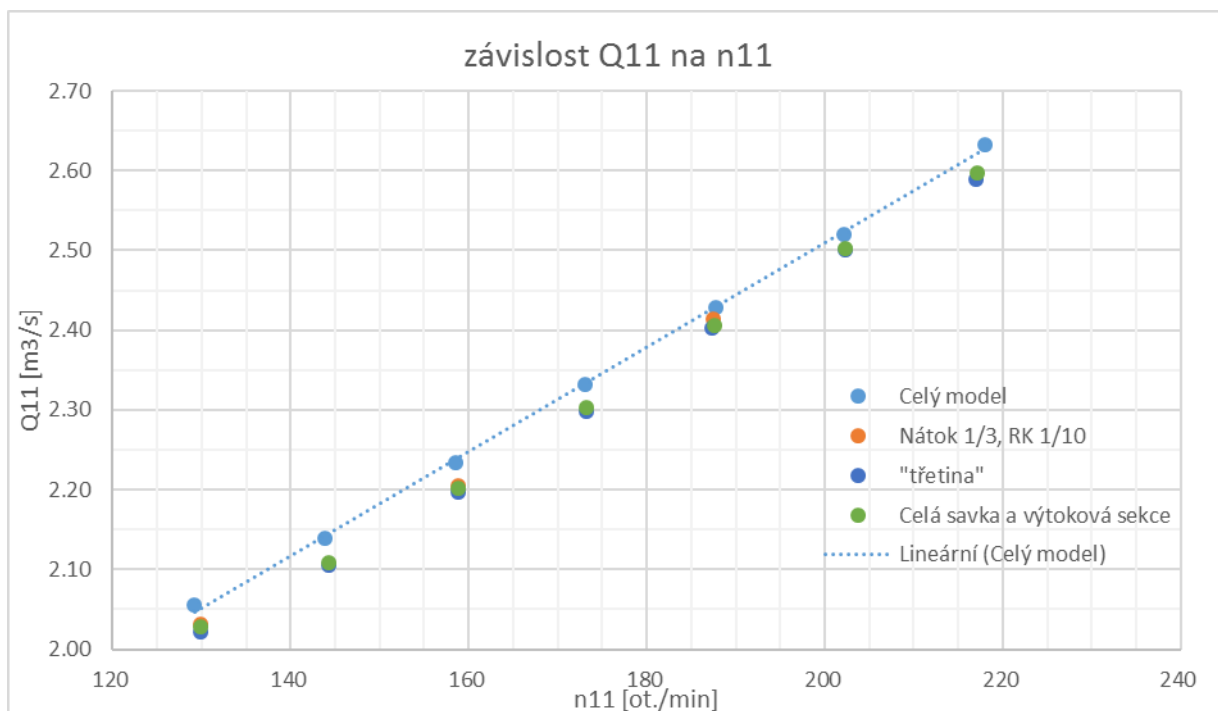
3.2.4 Vyhodnocení variant využívající rotační periodicitu

Po dopočítání variant matematický modelů využívající rotační periodicitu byly porovnány s výsledky pro původní model celého soustrojí s velmi jemnou výpočetní sítí (Graf 4).

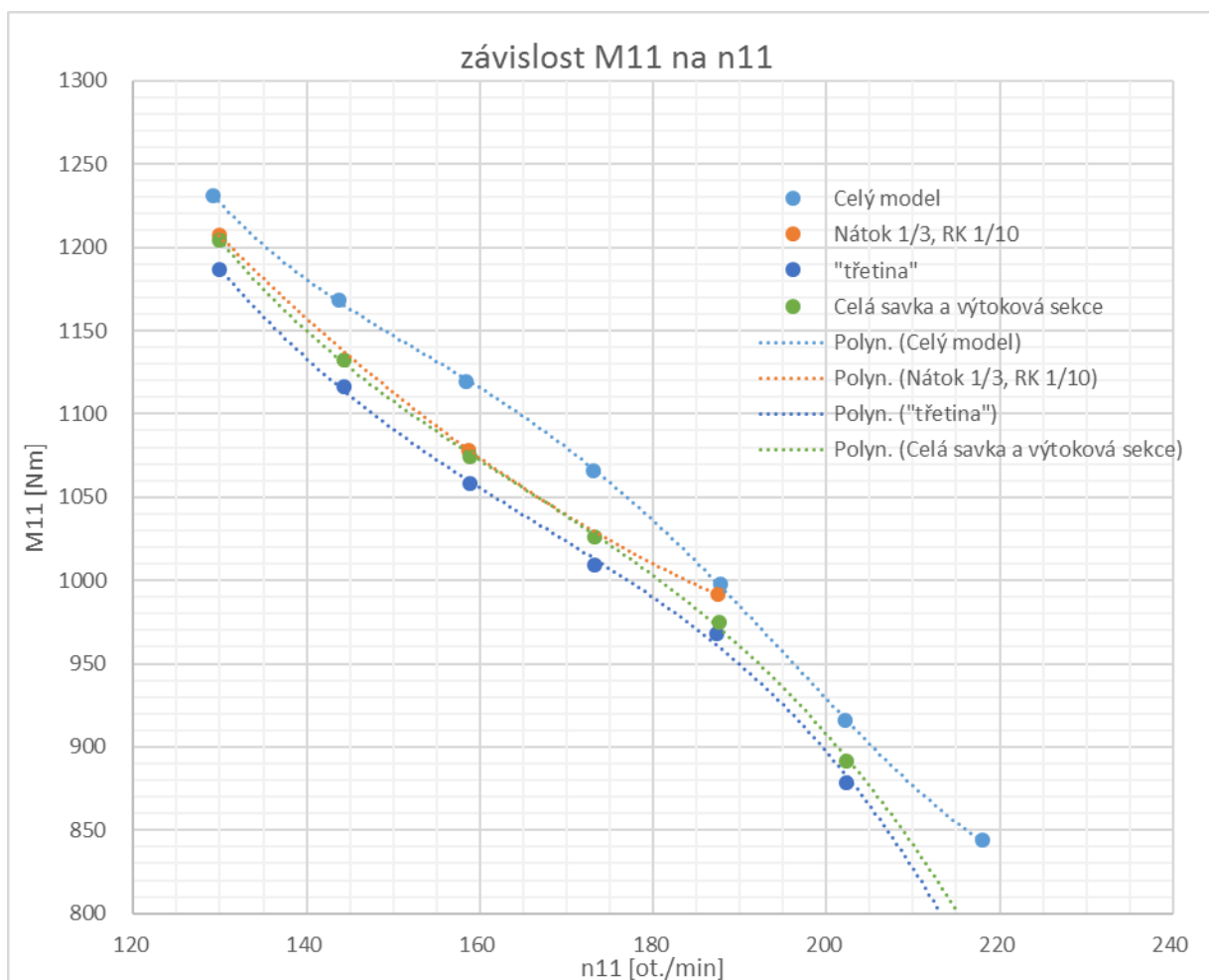


Graf 4 Závislost účinností na jednotkových otáčkách, porovnání modelů využívajících rotační periodicitu a původního modelu s velmi jemnou výpočetní sítí

Body jednotlivých variant byly proloženy polynomem 4. řádu. Jelikož se žádným modelem využívající rotační periodicity nepodařilo přiblížit původnímu celému modelu, stále tím nebyla vyřešena otázka, kde může být chyba. Ve grafu 4 je vidět, že u všech modelů využívajících rotační periodicitu se jednotkové průtoky pro jednotkové otáčky prakticky rovnají. Odlehlost jednotkových průtoků pro původní model je prakticky konstantní, v průměru kolem 2 %. Na grafu 5 je vidět závislost jednotkového momentu na jednotkových otáčkách. Tento jednotkový moment je v celém rozpětí otáček daleko vyšší u původního celého modelu než u modelů využívající rotační periodicitu. Vyšší hodnota momentu a průtok soustrojím mají synergický účinek na účinnost, a proto je hodnota účinnosti původního celého modelu vyšší.



Graf 5 Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách



Graf 6 Závislost jednotkového momentu na jednotkových otáčkách

3.3 Obměna původního celého modelu s jemnou výpočetní sítí

Po vytvoření modelů využívajících rotační periodicitu bylo vytvořeno a zkusmo vyhodnoceno ještě několik obměn a variant. Z jejich vyhodnocení vyplývalo, že bude zřejmě problém s původním modelem celého soustrojí, jelikož v té době ještě nebyl vytvořen monitoring účinnosti, a tudíž jsme vlastně neviděli průběh účinnosti během výpočtu. Tím pádem bylo těžší říci, zda výpočet konverguje, respektive je-li průběh účinnosti již ustálený.

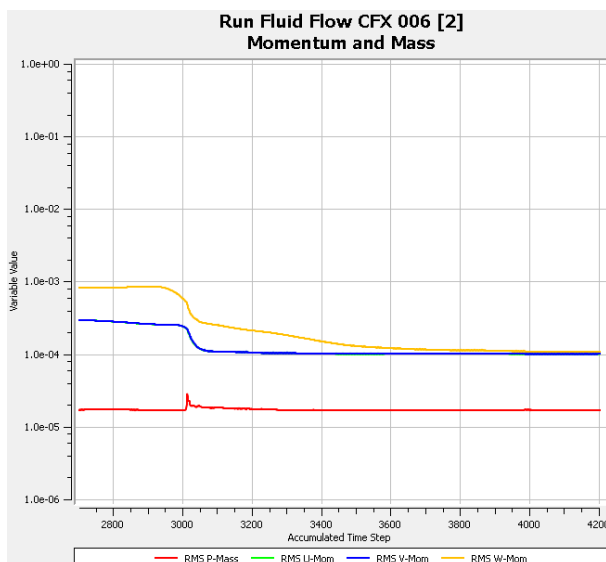
Byly tedy ponechány všechny domény, jejichž výpočetní sítě obsahují přes 6 milionů elementů. Časový krok byl ponechán na hodnotě $0,1/n$, počet iterací v původním modelu byl 1200. Tento model na něj navázal s dalšími 3000 iteracemi a jako konvergenční kritérium byla zvolena hodnota $RMS 10^{-5}$. Následně byl přidán monitoring účinnosti. Poté byl spuštěn výpočet na „novém“ serveru 147.32.134.251 na 24 jádrech.

Celkem 4200+ iterací		n [min -1]						Celkem	
		450	500	550	600	650	700		750
Délka výpočtu	s	46990	63530	66940	154000	150000	85700	81350	180.1
	hodin	13.1	17.6	18.6	42.8	41.7	23.8	22.6	

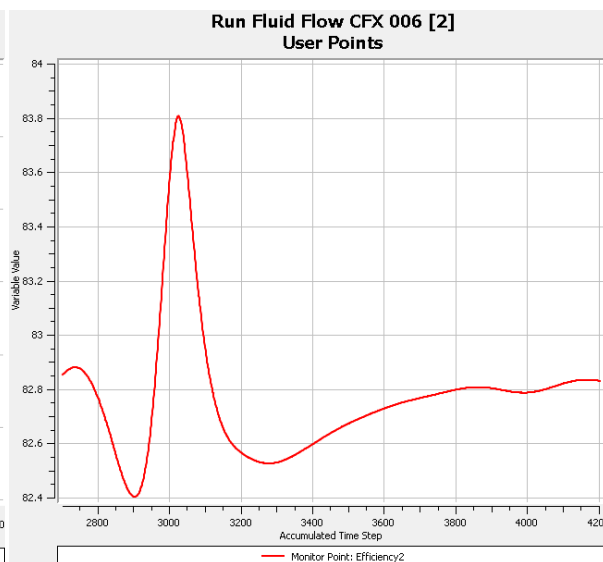
Tabulka 10 Výpočetní čas (výpočetní bod pro 450 ot./min. dosáhl $RMS 10^{-5}$ při 1823 iteracích)

Po dokončení výpočtu, který trval pro všechny výpočetní body přes 7 dní, byly prohlédnuty průběhy konvergence a průběhy účinností pro jednotlivé výpočetní body a usouzeno, že výpočet je dokonvergovaný.

Na grafu 8 je vidět průběh reziduí pro výpočetní bod 550 ot./min. pro posledních 1500 iterací. Zhruba po 3000 iteracích od úplného začátku dochází k náhlému poklesu reziduí. Tomu odpovídá v grafu 7 náhlý vzrůst, respektive výkyv, v hodnotě monitorované účinnosti. Dále je v grafu 7 vidět postupné, až téměř limitně se přibližující hodnoty reziduí k nějaké hodnotě. V monitorování účinnosti se to odráží postupným ustalováním účinnosti na hodnotě 82,8 %. Pokud bychom zkusmo přidali např. 1000 iterací, hodnota účinnosti by se změnila odhadem maximálně $\pm 0,1 \%$ a to je vzhledem k extrémně dlouho trvajícím výpočtům nedůležité.



Graf 8 Průběh RMS během výpočtu

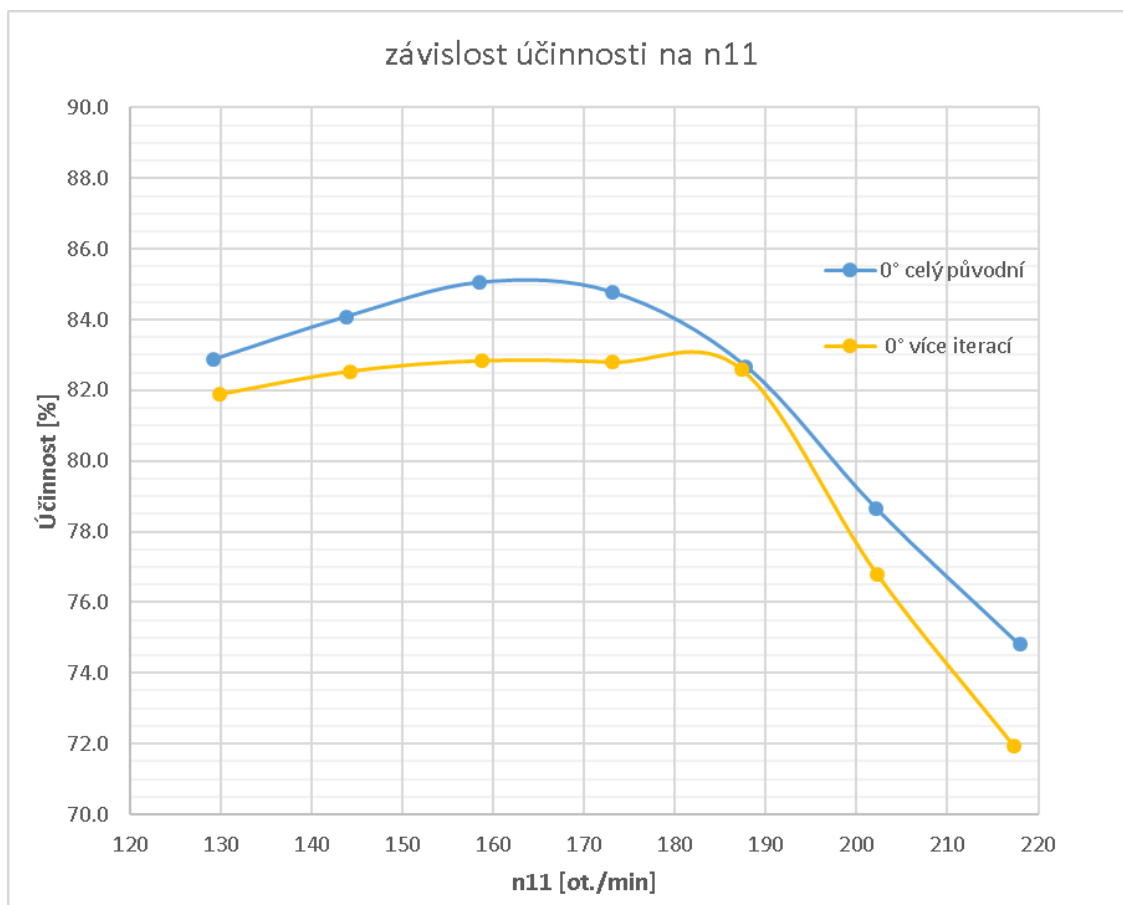


Graf 7 Průběh účinnosti během výpočtu

Celkem 4200+ iterací		n [min -1]						
		450	500	550	600	650	700	750
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPress	Pa	277.00	272.16	280.48	279.48	248.01	318.05	395.78
Q	kg/s	303.38	315.21	328.59	343.24	359.21	371.18	385.28
Mk	N.m	-76.08	-71.73	-68.18	-65.26	-63.03	-55.96	-50.51
Q	m ³ /s	0.30	0.32	0.33	0.34	0.36	0.37	0.39
Y	J/kg	14.43	14.44	14.43	14.43	14.46	14.39	14.31
H	m	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
Q11	m ³ /s	2.05	2.13	2.22	2.32	2.42	2.51	2.61
n11	ot/min	130	144	159	173	187	202	217
nq	ot/min	186	210	236	264	292	320	351
P	W	3585	3756	3927	4101	4290	4102	3967
P11	kW	16.40	17.17	17.97	18.76	19.57	18.85	18.38
M11	N.m	1206	1137	1081	1035	997	890	807
eta	%	81.9	82.5	82.8	82.8	82.6	76.8	71.9

Tabulka 11 Vypočtené charakteristiky

V následující tabulce lze vidět vypočtené charakteristiky pro dokonvergovanou původní velice jemnou síť s výpočetním krokem 0,1/n.



Graf 9 Porovnání původního průběhu účinnosti pro původní nedokvergovaný model a dokvergovaný model

Na grafu 9 lze vidět, že průběh účinnosti je po dokvergování pro každý výpočetní bod nižší o 1 až 2 % s výjimkou pro výpočetní bod 650 otáček za minutu, kde je účinnost prakticky totožná s výpočetním bodem pro nedokvergovaný model.

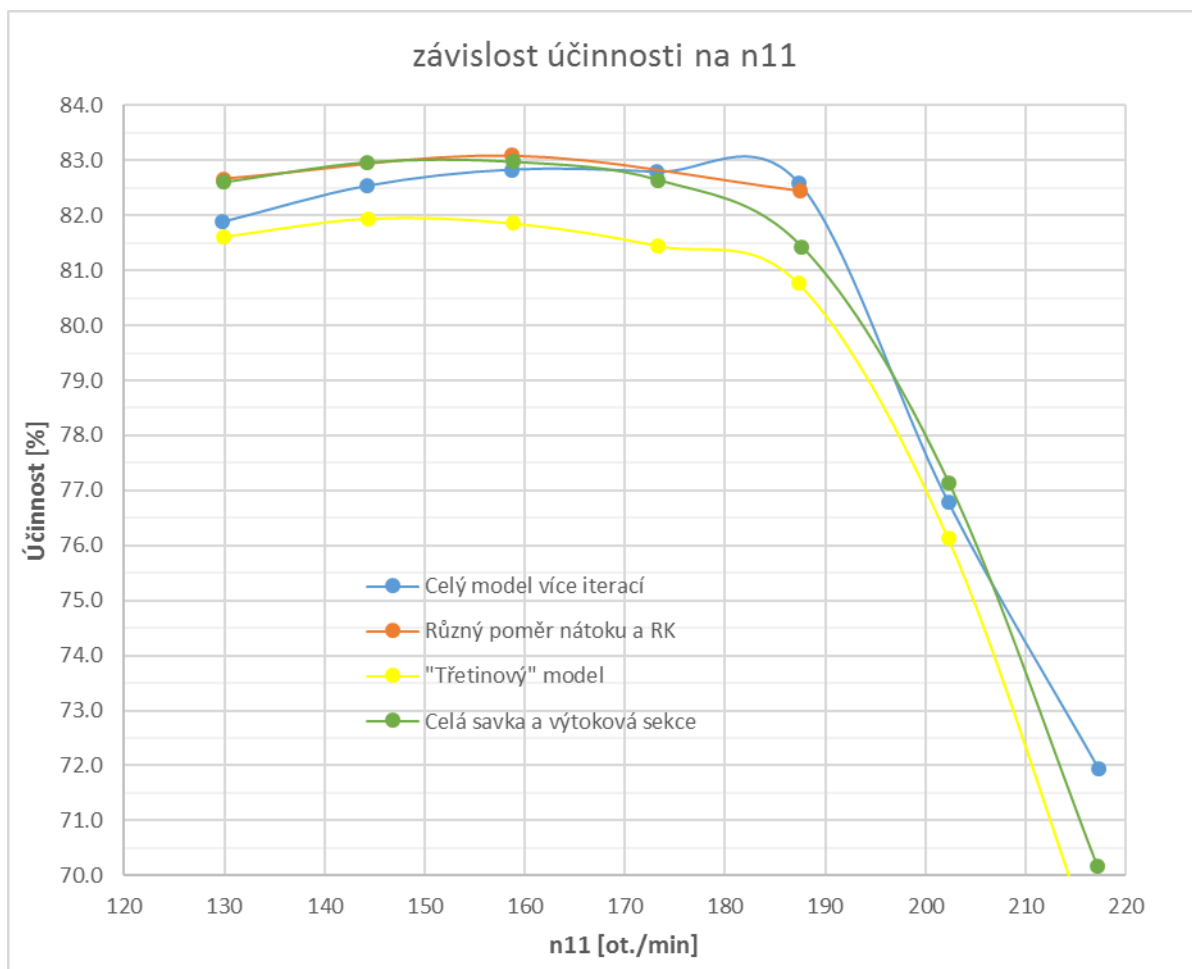
Jako zajímavost bych uvedl, že byla snaha o změnu časového kroku modelu a jeho porovnání s tímto modelem o časovém kroku $0,1/n$. Vždy byl zkusmo zpuštěn výpočet pro jeden výpočetní bod, konkrétně pro 650 ot./min. Byli postupně zpuštěny výpočty pro časový krok $1/n$ a $0,5/n$. Pro obě tyto varianty se výpočet po cca 120 krocích rozpadl. Což by mohlo indikovat, že pro takto jemnou síť je nutno zvolit menší časový krok. Poté byl zpuštěn výpočet s časovým krokem $0,17/n$, který bez problémů konvergoval.

Název modelu	Celkový počet elementů (tis.)	Výsek částí				
		Nátok	RK	OK	Savka	Výt. Sekce
Původní celý	6373	Celá	Celá	Celá	Celá	Celá
"Třetinový" model	657	3/10	3/10	1/3	1/3	1/3
Různý poměr nátoků a RK 3x	559-652	různé	různé	1/3	1/3	1/3
Celá savka a výtoková sekce	669	1/3	1/10	1/3	Celá	Celá
Celý model více iterací	6373	Celá	Celá	Celá	Celá	Celá
Název modelu	Celkový počet elementů (tis.)	Počty elementů (tis.)				
		Nátok	RK	OK	Savka	Výt. Sekce
Původní celý	6373	588	1448	1640	2623	75
"Třetinový" model	657	117	140	124	238	38
Různý poměr nátoků a RK 3x	559-652	různé	různé	124	238	38
Celá savka a výtoková sekce	669	112	47	124	311	75
Celý model více iterací	6373	588	1448	1640	2623	75
Název modelu	Celkový počet elementů (tis.)	Časový krok	Počet iterací	Model Turbulence	Počet DP	Celková doba výpočtu (h)
Původní celý	6373	0.1/n	1200	SST	7	90
"Třetinový" model	657	0.5/n	1500	SST	7	8
Různý poměr nátoků a RK 3x	559-652	0.5/n	1200	SST	3x3	10
Celá savka a výtoková sekce	669	0.5/n	1500	SST	7	10
Celý model více iterací	6373	0.1/n	1200+3000	SST	7	160

Tabulka 12 Komparační tabulky pro různé varianty modelů

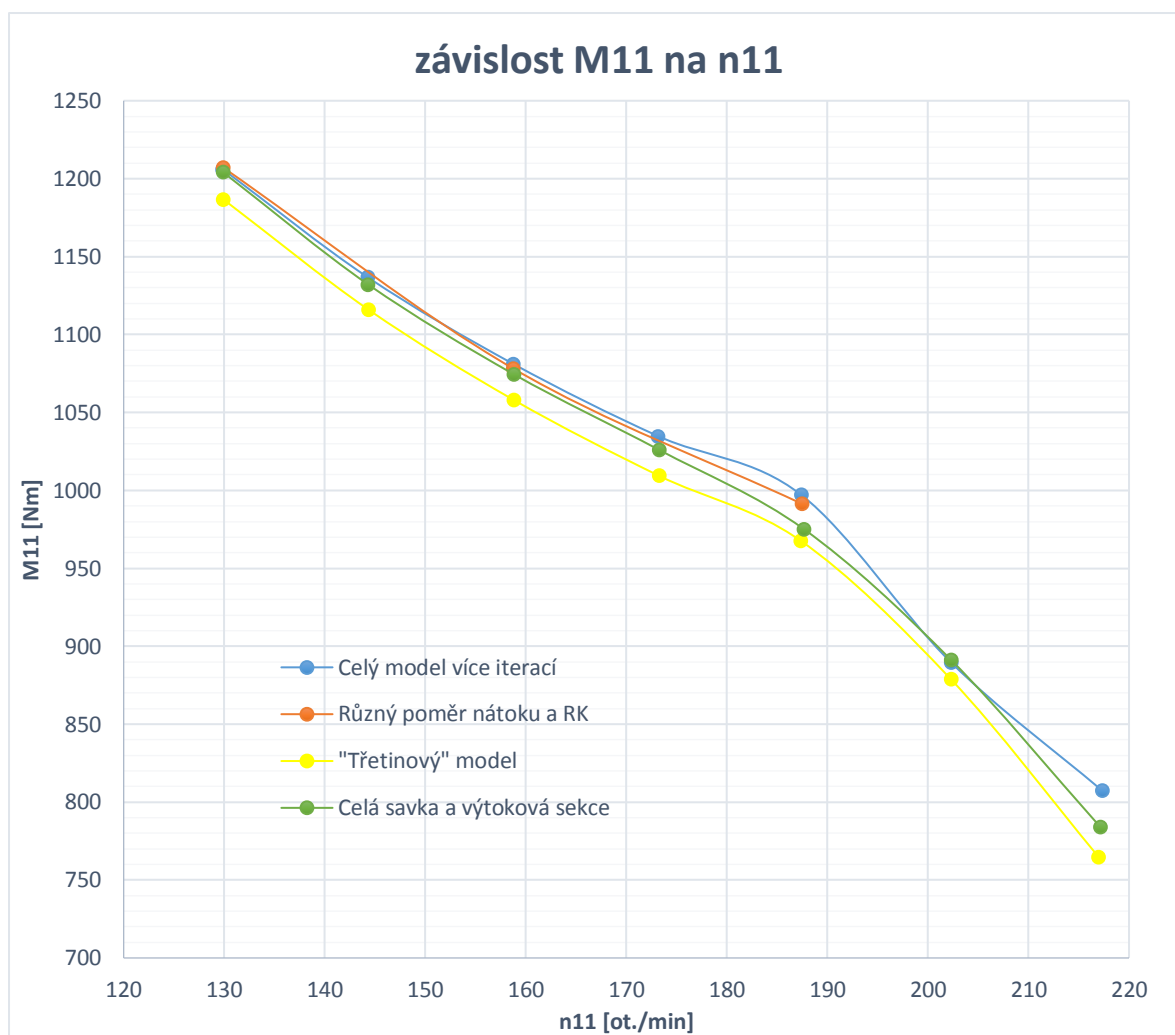
V grafu 10 (na následující stránce) je vidět průběh účinností pro různé matematické modely soustrojí. Velmi dobrá shoda je mezi modelem s velmi jemnou výpočetní sítí (Původní celý) s malým výpočetním krokem 0,1/n a modelem využívající rotační periodicitu v RK a OK (Celá savka a výtoková sekce). Tento model má desetinu výpočetních elementů a výpočetní krok 0,5/n. Výpočetní čas celé sady otáček (7 výpočetních bodů) byl 20krát nižší! Pokud bychom v modelu „Původní celý“ vyloučili výpočetní bod s 650 ot./min, je shoda účinností v závislosti na jednotkových otáčkách velmi dobrá. Hodnoty účinností se liší v hodnotách dále od maximální účinnosti, tedy pro hodně velké (nad 200 ot./min) a pro hodně malé jednotkové otáčky.

Na porovnání těchto dvou modelů je vidět, že se v neextrémních hodnotách jednotkových otáček vyplatí použít model využívající rotační periodicitu. Tohoto poznatku bude využito v rámci modelování soustrojí Vydra. Jelikož je předpokládán průměr OK turbíny soustrojí Vydra 0,6 m, muselo by být vytvořeno mnohonásobně více elementů při zachování jejich velikosti. To by při nevyužití rotační periodicity a zároveň malého výpočetního kroku vedlo k extrémně dlouhému výpočtu (týdny). Ve zkratce řečeno, u modelování soustrojí Vydra dojde k akceptovatelné výměně přesnosti výpočtu za výpočet trvající rozumný čas.



Graf 10 Srovnání účinnosti různých modelů

Graf závislosti jednotkového objemu na jednotkových otáčkách není třeba uvádět, jelikož je u všech modelů velmi dobrá shoda, odchylky jsou v rámci desetin procenta.



Graf 11 Závislost jednotkového momentu na jednotkových otáčkách

4 Kompaktní soustrojí s obtékaným generátorem „Vydra“

Soustrojí bude využívat zbytkového spádu MVE Vydra v obci Čeňkova Pila v CHKO Šumava. MVE Vydra je derivační elektrárna využívající akumulární nádrž o objemu 63 760 m³. Nádrž je napájena Vchynicko-Tetovským kanálem. Přivaděčem do elektrárny je potrubí DN1000 o délce 904 m, překonávající výškový rozdíl 227,67 m. Strojovna MVE Vydra je osazena dvěma turbínami typu Francis o maximální hltnosti 2x1,85 m³/s. Regulace průtoku je prováděna natáčením lopatek rozváděcího kola. Voda z turbín odpadá do vývaru, který je na konci ukončen prahem s pohyblivou ocelovou klapkou. Z vývaru bude voda odebírána naším navrženým soustrojím. Na práh navazuje koryto se zaústěním do řeky Vydry. Z vývaru je v současné době vedeno odpadní potrubí DN1000. Předpokládá se napojení savky našeho soustrojí na toto potrubí. Díky využití stávajícího potrubí se projekt výrazně zlevní.

Nejjednodušší návrh turbíny je pomocí výpočtu parametrů soustrojí z převzatých jednotkových veličin jiného soustrojí. V našem případě se jedná o veličiny získané ze soustrojí Bělidlo. Následují varianty výpočtu pro soustrojí s proměnnými otáčkami a pro soustrojí s konstantními provozními otáčkami a proměnným spádem.

4.1 Varianta soustrojí s proměnnými otáčkami (Varianta A)

Na základě vypočtených charakteristik soustrojí Bělidlo bylo možné přepočtem z jednotkových veličin navrhnout parametry soustrojí Vydra. Charakteristika soustrojí získaná z předchozích výpočtů byla doplněna o 250 a 350 ot./min. Výpočet bodu pro 650 ot./min. byl vyloučen.

Celkem 4200+ iterací		n [min -1]							
		250	350	450	500	550	600	700	750
UpPress	Pa	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666	14666
DownPres	Pa	365.42	223.89	277.00	272.16	280.48	279.48	318.05	395.78
Q	kg/s	286.12	288.37	303.38	315.21	328.59	343.24	371.18	385.28
Mk	N.m	-111.89	-90.66	-76.08	-71.73	-68.18	-65.26	-55.96	-50.51
Q	m ³ /s	0.29	0.29	0.30	0.32	0.33	0.34	0.37	0.39
Y	J/kg	14.34	14.49	14.43	14.44	14.43	14.43	14.39	14.31
H	m	1.46	1.48	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46
Q11	m ³ /s	1.94	1.94	2.05	2.13	2.22	2.32	2.51	2.61
n11	ot/min	72	101	130	144	159	173	202	217
nq	ot/min	101	141	186	210	236	264	320	351
P	W	2929	3323	3585	3756	3927	4101	4102	3967
P11	kW	13.53	15.12	16.40	17.17	17.97	18.76	18.85	18.38
M11	N.m	1785	1432	1206	1137	1081	1035	890	807
eta	%	71.4	79.5	81.9	82.5	82.8	82.8	76.8	71.9

Tabulka 13 Charakteristika pro řadu provozních otáček doplněnou o 250 a 350 ot./min

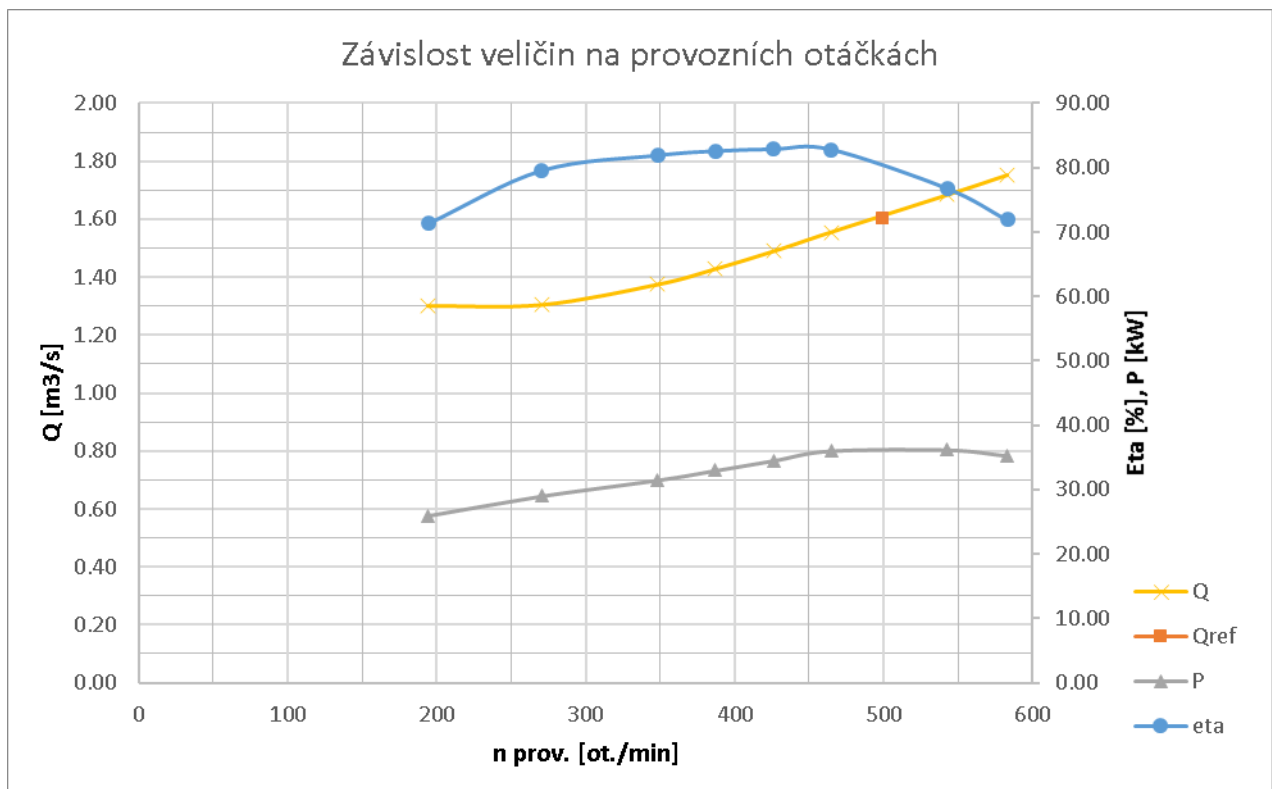
Ve variantě A se uvažovalo o soustrojí s proměnnými otáčkami. Návrhový průtok a spád diskutovaný v bakalářské práci Bc. Lucie Vodrážkové [19] byl uznán jako správný. Návrhový průtok je roven 1,60 m³/s a návrhový spád je 2,86 metru. Průměr oběžného kola jsme přepočítávali tak dlouho, dokud jsme nebyli spokojeni s rozsahem regulace průtoku pomocí změny otáček.

n 11	ot/min	72	101	130	144	159	173	202	217
Q11	m³/s	1.94	1.94	2.05	2.13	2.22	2.32	2.51	2.61
M11	N.m	1785	1432	1206	1137	1081	1035	890	807
P11	kW	13.53	15.12	16.40	17.17	17.97	18.76	18.85	18.38
n	ot/min	194	271	349	387	426	465	543	583
Q	m³/s	1.30	1.30	1.37	1.43	1.49	1.56	1.68	1.75
P	kW	25.96	29.02	31.48	32.97	34.50	36.02	36.18	35.27
M	N.m	1276	1024	863	813	773	740	636	577
eta	%	71.4	79.5	81.9	82.5	82.8	82.8	76.8	71.9

Tabulka 14 Charakteristika návrhu varianty Vydry

Nakonec bylo usouzeno, že při průměru oběžného kola D=630 mm a návrhovými provozními otáčkami n=500 ot./min bude soustrojí schopno regulovat průtok z 1,6 m³/s na 1,3 m³/s za cenu snížení účinnosti o cca 4%.

V tabulce 14 je pro kontrolu vypočítána i účinnost, která se musí pro stejné jednotkové otáčky shodovat s účinností soustrojí Bělidlo.



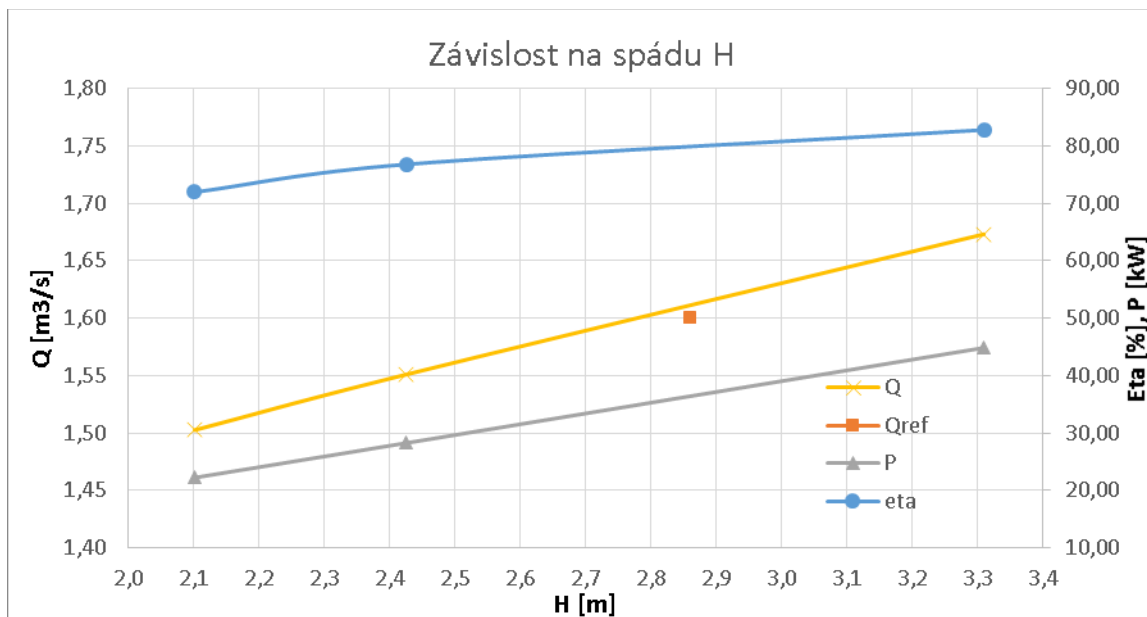
Graf 12 Závislost veličin na provozních otáčkách soustrojí Vydry

4.2 Varianta s konstantními provozními otáčkami (Varianta B)

Ve variantě B předpokládáme fixní provozní otáčky (bez frekvenčního měniče) $n = 500$ ot./min a totožný průměr oběžného kola jako ve variantě A, tedy 630 mm. Hodnoty spádu byly vypočítány z jednotkových otáček.

H	m	3,31	2,42	2,10
n 11	ot/min	173	202	217
Q11	m ³ /s	2,32	2,51	2,61
M11	N.m	1035	890	807
P11	kW	18,76	18,85	18,38
Q	m ³ /s	1,67	1,55	1,50
P	kW	44,84	28,25	22,21
M	N.m	856	539	424
eta	%	82,8	76,8	71,9

Tabulka 15 Charakteristika návrhu vydry pro proměnný spád a fixní provozní otáčky



Graf 13 Změna charakteristik v závislosti na změně spádu

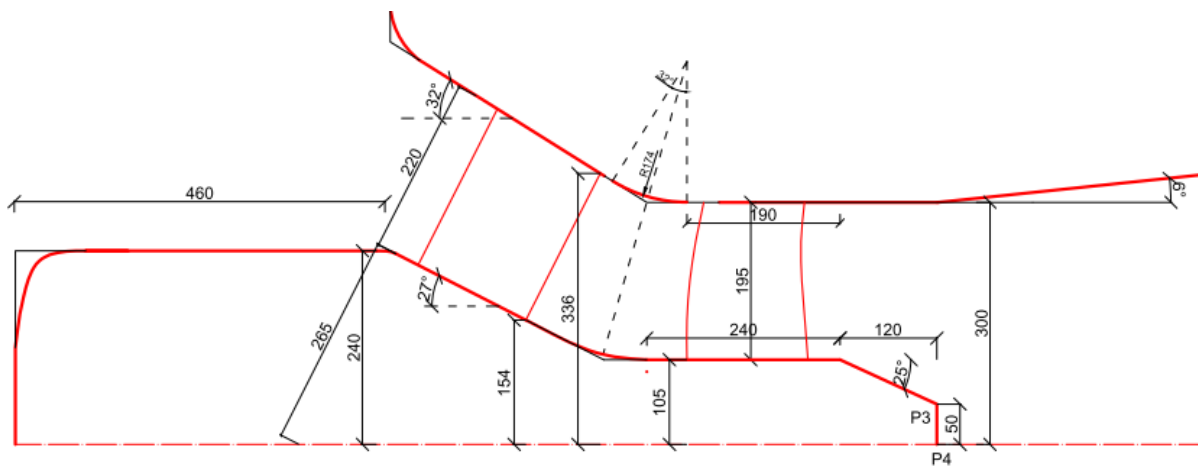
4.3 Referenční matematický model

Nejdříve jsme zafixovali tyto návrhové parametry:

Návrhový spád:	2,86 m
Návrhový průtok:	1,60 m ³ /s
Počet lopatek OK:	3
Počet lopatek RK:	10
Průměr náboje:	210 mm
Průměr oběžného kola:	600 mm
Nábojový poměr:	0,35
Provozní otáčky:	500 ot/min

4.3.1 Hydraulický profil

Hydraulický profil turbíny byl navržen s ohledem na rozměry generátoru PMG – generátor s permanentními magnety (předpokládán generátor Oswald TF-13.50), úhly stěn nátoku i další parametry jsou obdobné jako u soustrojí Bělidlo.

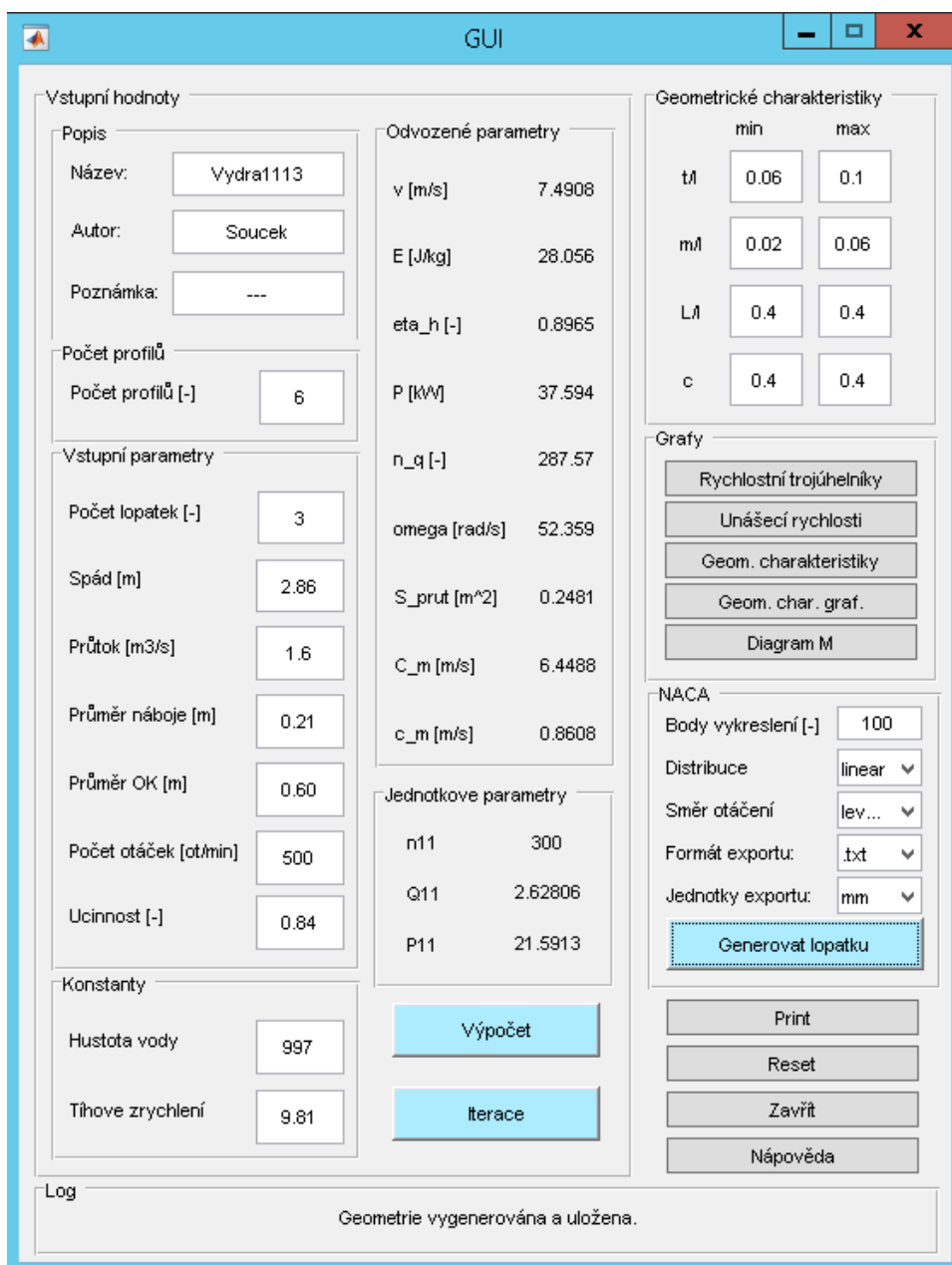


Obrázek 26 Hydraulický profil

Dle tohoto profilu byl v programu Rhinoceros vytvořen 3D model sestavy. Tato sestava byla rozdělena na jednotlivé části – nátok na rozvaděč, RK, OK, savka a výtoková sekce.

4.3.2 Lopatky OK a RK

K návrhu lopatek OK byl využit nástroj vytvořený Ing. Janem Buškem v rámci jeho bakalářské práce pomocí grafické rozhraní GUI v programu *MATLAB*. Tlačítkem „výpočet“ se spustí skript, který ze zadaných vstupních hodnot vypočítá odvozené parametry a geometrické charakteristiky lopatek (NACA profily). Kliknutím na tlačítko „iterace“ se vypočítají délky křídel z předchozích vygenerovaných parametrů. Nakonec kliknutím na tlačítko „Generovat lopatku“ se spustí skript, který vygeneruje jednotlivá křídla.



Obrázek 27 GUI návrhu lopatek v programu Matlab

Vygenerované hodnoty rychlostních trojúhelníků byly ověřeny výpočtem v programu *Excel*, který byl vytvořen dle klasické teorie využití v literatuře [20]. Nejdříve se určí specifická meridiální rychlost. Z provozních otáček vychází úhlová rychlost a specifické unášecí rychlosti

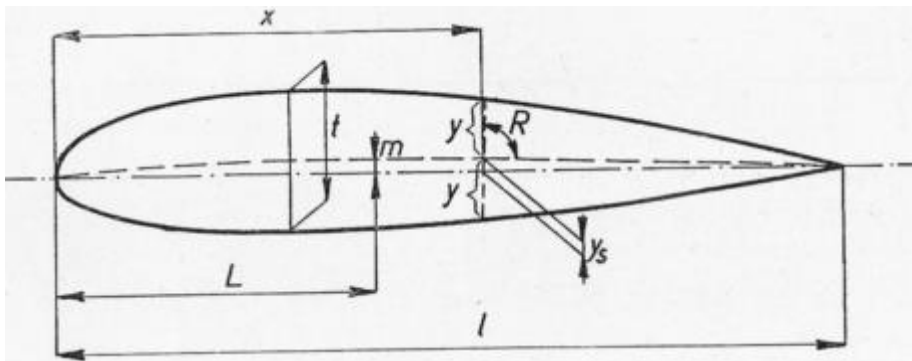
na zvolených válcových řezech. Dále se postupuje od výstupního trojúhelníku. Výpočet v programu *Excel* tedy selhával pouze u rychlostního trojúhelníku na stěně náboje.

Tři vygenerované profily skládající se z bodů vygenerované skriptem v *MATLABU* byly vloženy do programu *Rhinoceros 5.0*. První profil byl nabalen na válcovou plochu pláště komory, druhý profil na válcovou plochu tvořící náboj a profil v 60 % rozpětí, který průtočnou plochu dělí přibližně na dvě stejné plochy. Třetí profil byl nabalen na válcovou stěnu komory. Nabalení plochy na profily bylo vytvořeno v programu *Rhinoceros 5.0* pomocí příkazu *Surface from network of curves* (povrch ze sítě křivek).

V tabulce níže jsou uvedeny základní parametry vygenerovaných NACA profilů. Průměr D a poloměr R jsou parametry válcové plochy, na které budou profily navinuty. Parametr t/l značí poměr tloušťky lopatky k její délce. Parametr m/l je poměr maximálního vzepětí m k délce. A parametr L/l určuje umístění maximálního vzepětí střední křivky od náběžné hrany. Úhel β je úhel natočení lopatky.

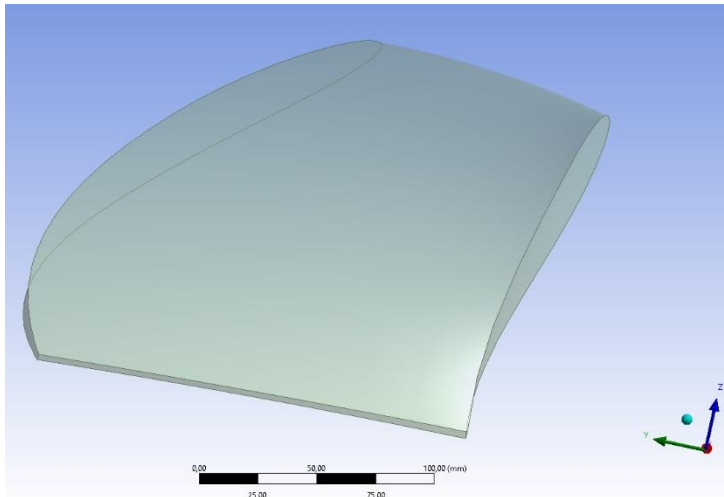
Rozpětí	D	R	t/l	m/l	L/l	β_{lop}	l
[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[°]	[m]
1,00	0,600	0,300	0,06	0,02	0,40	21,4	0,412
0,60	0,440	0,222	0,08	0,04	0,40	28,3	0,318
0,00	0,210	0,105	0,10	0,06	0,40	54,7	0,184

Tabulka 16 Parametry tří profilů lopatky OK



Obrázek 28 Parametry NACA profilu [10]

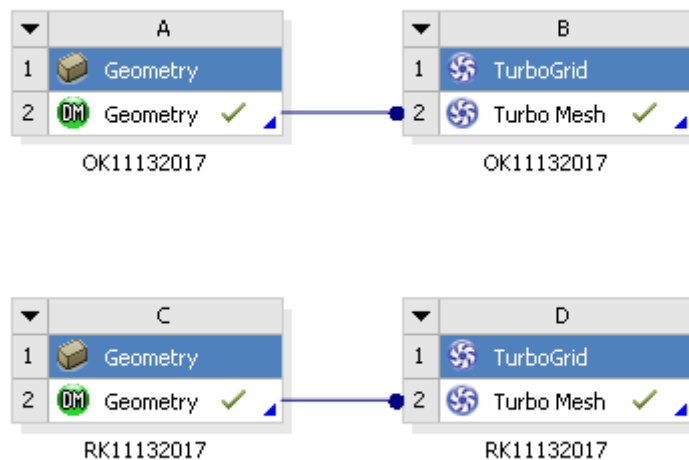
Poměr t/l je záměrně volen větší než obvykle, jelikož se předpokládá vytvoření lopatek metodou 3D tisku. Tyto plastové lopatky budou mít tudíž horší mechanické vlastnosti než lopatky z oceli. Z toho důvodu byla také oříznuta odtoková hrana. Generátor lopatek OK totiž vytvoří profil, jehož odtoková hrana má tloušťku pouze 0,5 mm. Vygenerované profily byly tedy zkráceny o cca 5-7 mm tak, aby odtoková hrana měla tloušťku 2,5 mm.



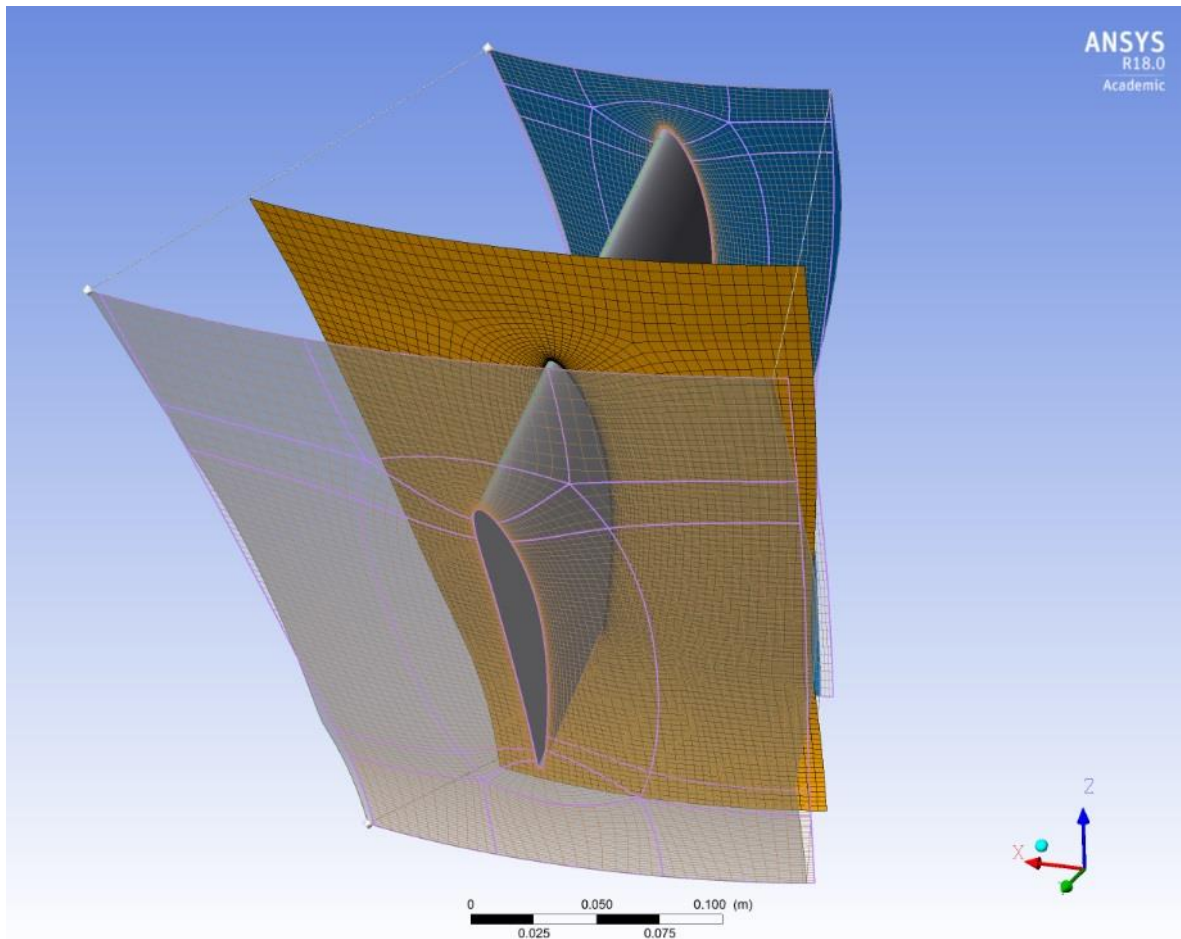
Obrázek 29 Lopátka OK

Jelikož byla snaha o zprovoznění matematického modelu, byly lopatky RK nejdříve vytvořeny z NACA profilů o délce řezu l 170 mm a maximální tloušťce 17 mm. Poměr t/l 0,10 je poměrně velký kvůli konstrukčním důvodům. Předpokládá se umístění lopatek na ocelový profil vyrobený jako podélný výřez z trubky. Tento NACA profil má úhel sklonu tětiny profilu v kuželovém řezu u vnějšího pláště komory 5° a u vnitřního pláště $8,4^\circ$. Výstupní úhel (tečny) u pláště komory je 10° a u náboje 22° .

Po vytvoření geometrie lopatek OK v programu *Rhinoceros* byla geometrie exportována do programu *Design modeler (DM)*, kde se zároveň importuje komora OK. Celá sestava se importuje do programu *Turbogrid*. Mezera mezi lopatkou OK a stěnou je zvolena 1 mm. Obdobně se postupuje při vkládání lopatek RK.



Obrázek 30 Export geometrie z DM do Turbogridu

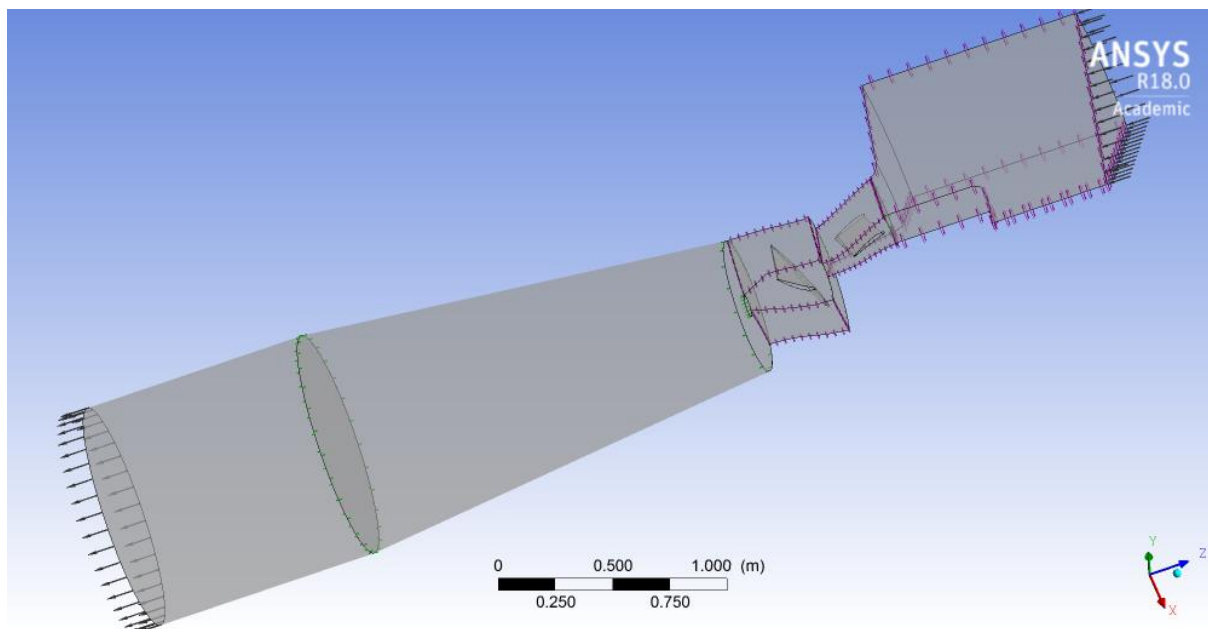


Obrázek 31 Ukázka vytvořené výpočetní sítě RK v programu Turbogrid

V programu *Turbogrid* se vytvoří výpočetní síť, která musí odpovídat limitům parametrů nastavených v programu, například minimálnímu úhlu stěn buněk (min. 15°) atp. Zejména se ale jedná o výskyt elementů s negativním objemem. Síť lze vyexportovat i přes překročení limitů parametrů sítě, nicméně se bude jednat o síť s malou kvalitou a v některých případech nemusí výpočet proudění probíhat korektně. Pokud vyexportujeme síť obsahující elementy s negativním objemem, program *ANSYS CFX* nebude schopen výpočet provést. Velmi problematická bývá odtoková hrana lopatky (*Trailing Edge*). Na této hraně se velmi často objevují problematické elementy. Jelikož se výpočetní síť generuje automaticky, tak se úprava sítě provádí ručně posunem bodů symbolizující odtokovou hranu.

4.3.3 Výpočetní síť nátoku na rozvaděč, savky a výtokové sekce

Sítě těchto domén byly vytvořeny v programu *ICEM CFD*. Velikosti elementů výpočetní sítě byly voleny obdobně jako v případě matematického modelu - Bělídlo s celou savkou a výtokovou sekcí.



Obrázek 32 Model soustrojí

Nátok na rozvaděč

Jelikož se od počátku tvorby modelu počítalo s využitím rotační periodicity, byla v programu *Rhinoceros 5.0* vyseknuta 1/10 (36°) nátoku a v programu *ICEM CFD* vytvořena nestrukturovaná výpočetní síť. Samozřejmě byly u stěn vytvořené prizmatické elementy o výšce 0,5 mm, tedy o výšce předpokládané mezní vrstvy. Horní okrajová podmínka na vtoku je 2,86 m, neboli 27 963 Pa zvolena jako *Total Pressure (stable)*.

Savka

Ze zkušeností z vytváření výpočetní sítě soustrojí Bělídlo byl model soustrojí Vydra rozdělen tak, aby rotující náboj byl v doméně OK. V savce byl ponechán pouze rotující konec (stěna) náboje. Byla vytvořena strukturovaná síť s ohledem na mezní vrstvu u stěn. Výška první vrstvy byla u rotující stěny náboje a na začátku savky 0,3 mm, na konci savky 2 mm.

Výtoková sekce

Na rozdíl od výtokové sekce v matematickém modelu Bělídlo, byla zde vytvořena výpočetní síť s ohledem na mezní vrstvu u stěn (první vrstva výšky 2 mm). Celkový počet elementů v doméně se ale nijak výrazně nezvýšil. Dolní okrajová podmínka je tlak na výtoku 0 Pa.

Domain	Nodes	Elements
R1	455558	433260
S0	54644	229549
S1	205407	192416
S2	890156	878370
S3	170560	163995
All Domains	1776325	1897590

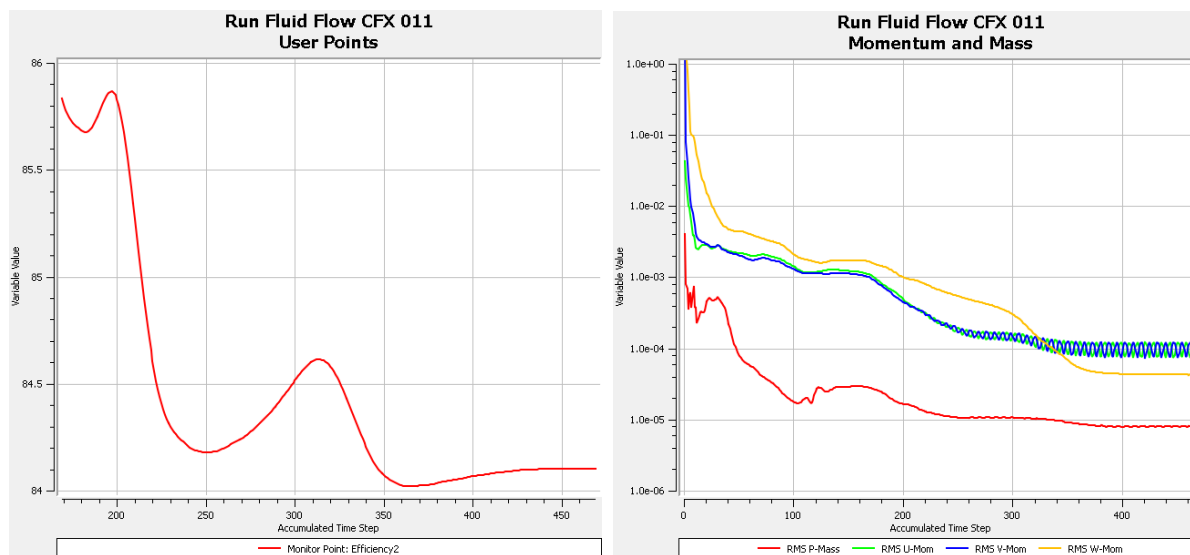
Tabulka 17 Tabulka počtu prvků výpočetní sítě

Je nutno dodat, že veškeré předpokládané hodnoty výšky mezní vrstvy by se měly po prvotním výpočtu ověřit ve výsledcích nástrojem Yplus v případě zjištění nevyhovujících hodnot ($y^+ > 200$) je vhodné výpočetní síť předělat.

Dále bylo ve výpočetním modelu nastaveno 1000 iterací výpočtu, délka časového kroku zvolena $0,5/n$. Také byl nastaven monitoring účinnosti.

4.3.4 Vyhodnocení modelu

Výpočet byl prováděn na starém serveru *250. na 18 jádrech pro 4 výpočetní body 300, 400,500 a 600 ot./min pro stávající polohu lopatek OK a RK.



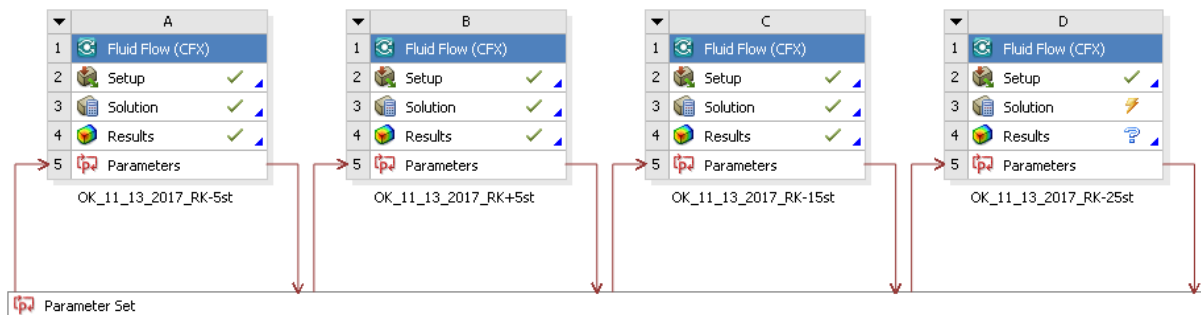
Graf 14 Průběh RMS pro 500 ot./min a průběh účinnosti v posledních 300 iteracích

Na grafu 14 je vidět průběh RMS a průběh účinnosti pro výpočetní bod 500 ot./min, který byl ručně ukončen po 470 iteracích, kde se hodnota účinnosti začala ustalovat na hodnotě 84,1%.

Vydra_11_13_2017		n [min ⁻¹]			
		300	400	500	600
UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963
DownPres	Pa	2190	1933	2225	2559
Q	kg/s	1264	1404	1555	1732
Mk	N.m	-819	-739	-645	-576
Q	m ³ /s	1,27	1,41	1,56	1,74
Y	J/kg	25,85	26,11	25,81	25,48
H	m	2,64	2,66	2,63	2,60
Q11	m ³ /s	2,17	2,40	2,67	2,99
n11	ot/min	111	147	185	223
nq	ot/min	163,30	227,80	302,23	386,50
P	kW	25,74	30,97	33,76	36,17
P11	kW	16,71	19,82	21,97	24,00
M11	N.m	1439,37	1286,23	1134,37	1026,06
eta	%	78,8	84,5	84,1	82,0

Tabulka 18 Vypočtené charakteristiky

Lopatky rozvaděče byly v referenční poloze velmi „otevřené“ (tzn. výsledná hltnost stroje je velmi velká, ale účinnost malá). Dále byly vytvořeny varianty s natočením lopatek rozvaděče +5° (ještě více otevřená), -5°, -15° a -25°. Tyto varianty natočení byla počítány pro 400, 500 a 600 ot./min.



Obrázek 33 Původní natočení lopatek OK a různé natočení lopatek RK

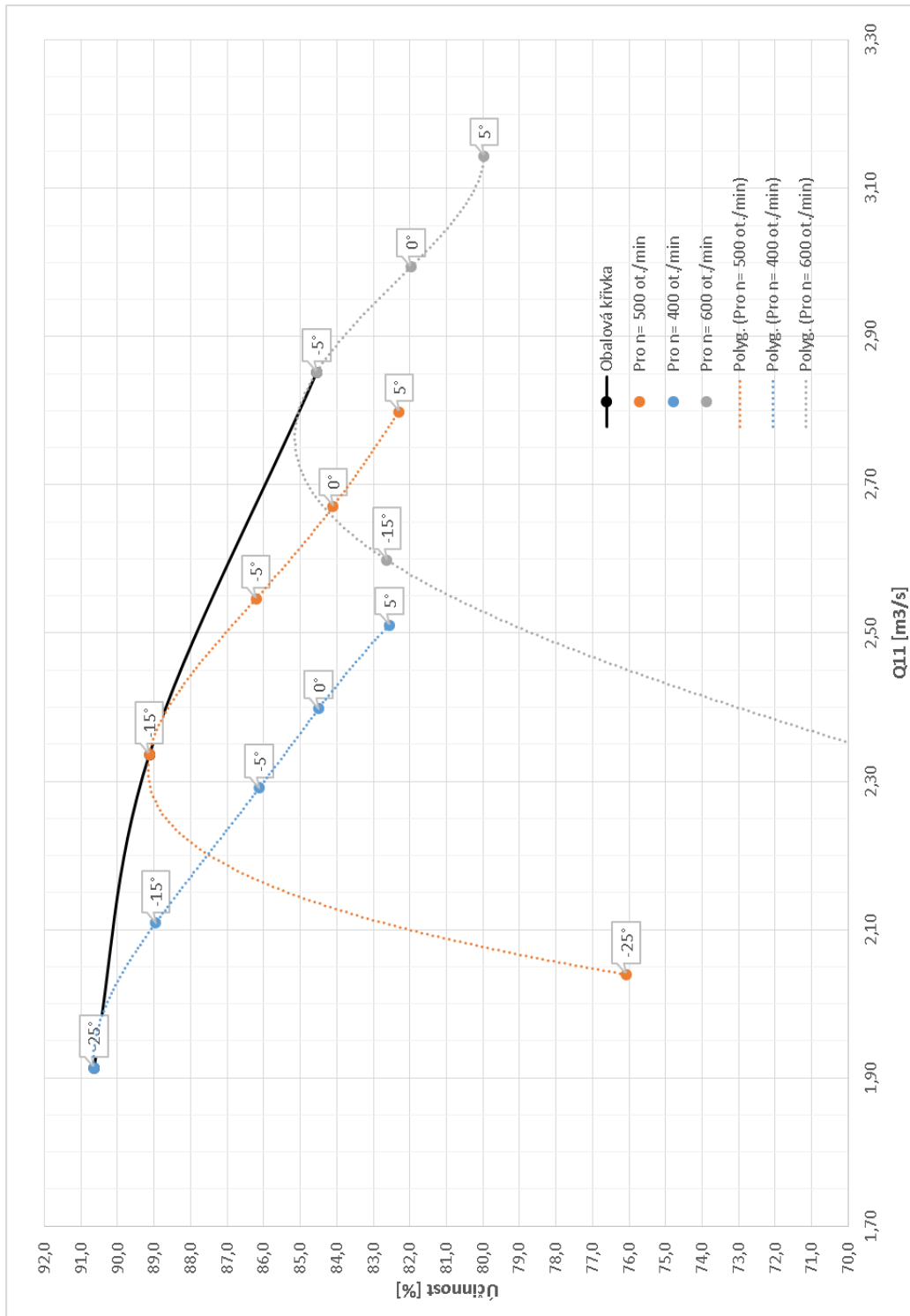
Výpočty byly realizovány na „starém“ serveru *250. Celková doba výpočtu těchto výpočtů (12 výpočetních bodů) byla okolo 70 hodin. Výpočty některých výpočetních bodů byly ukončovány ručně, jinak by se výpočetní čas blížil 100 hodinám (1000 iterací trvalo cca 8 hodin).

Výsledky byly vyneseny do následujících tabulek pro 400, 500 a 600 ot./min.

400 ot./min		úhel natočení lopatky RK [°]					500 ot./min		úhel natočení lopatky RK [°]				
		5°	0°	-5°	-15°	-25°			5°	0°	-5°	-15°	-25°
UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963	27963	UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963	27963
DownPress	Pa	2583	1933	1757	1423	1146	DownPress	Pa	2547	2225	1934	1612	1727
Q	kg/s	1452	1404	1346	1247	1137	Q	kg/s	1619	1555	1491	1376	1199
Mk	N.m	-728	-739	-727	-705	-662	Mk	N.m	-649	-645	-641	-619	-458
Q	m ³ /s	1,46	1,41	1,35	1,25	1,14	Q	m ³ /s	1,62	1,56	1,50	1,38	1,20
Y	J/kg	25,46	26,11	26,28	26,62	26,90	Y	J/kg	25,49	25,81	26,11	26,43	26,31
H	m	2,59	2,66	2,68	2,71	2,74	H	m	2,60	2,63	2,66	2,69	2,68
Q11	m ³ /s	2,51	2,40	2,29	2,11	1,91	Q11	m ³ /s	2,80	2,67	2,55	2,34	2,04
n11	ot/min	149	147	147	146	145	n11	ot/min	186	185	184	183	183
nq	ot/min	236,07	227,80	221,92	211,57	200,47	nq	ot/min	311,32	302,23	293,45	279,34	261,57
P	kW	30,51	30,97	30,47	29,52	27,72	P	kW	33,97	33,76	33,56	32,42	24,00
P11	kW	20,27	19,82	19,30	18,35	16,96	P11	kW	22,52	21,97	21,47	20,36	15,17
M11	N.m	1299	1286	1257	1203	1117	M11	N.m	1156	1134	1115	1064	791
eta	%	82,6	84,5	86,1	89,0	90,6	eta	%	82,3	84,1	86,2	89,1	76,1

600 ot./min		úhel natočení lopatky RK [°]				
		5°	0°	-5°	-15°	-25°
UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963	27963
DownPress	Pa	2924	2559	2271	2278	1845
Q	kg/s	1805	1732	1659	1511	1311
Mk	N.m	-577	-576	-575	-512	-340
Q	m ³ /s	1,81	1,74	1,66	1,52	1,32
Y	J/kg	25,11	25,48	25,77	25,76	26,20
H	m	2,56	2,60	2,63	2,63	2,67
Q11	m ³ /s	3,14	2,99	2,85	2,60	2,24
n11	ot/min	225	223	222	222	220
nq	ot/min	398,90	386,50	375,08	358,08	329,38
P	kW	36,25	36,17	36,14	32,17	21,39
P11	kW	24,58	24,00	23,58	21,00	13,61
M11	N.m	1043	1026	1014	903	590
eta	%	80,0	82,0	84,6	82,6	62,3

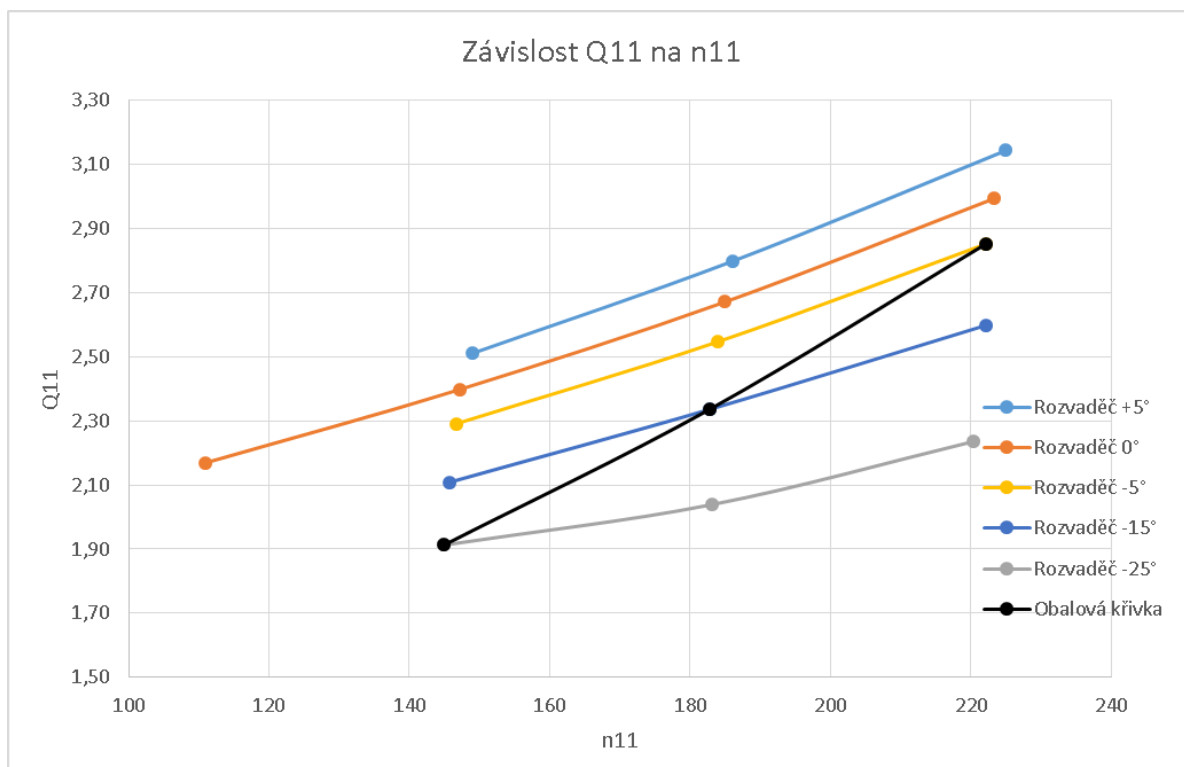
Tabulka 19 Charakteristiky pro 400, 500 a 600 ot./min pro původní natočení lopatek OK a různé natočení lopatek RK



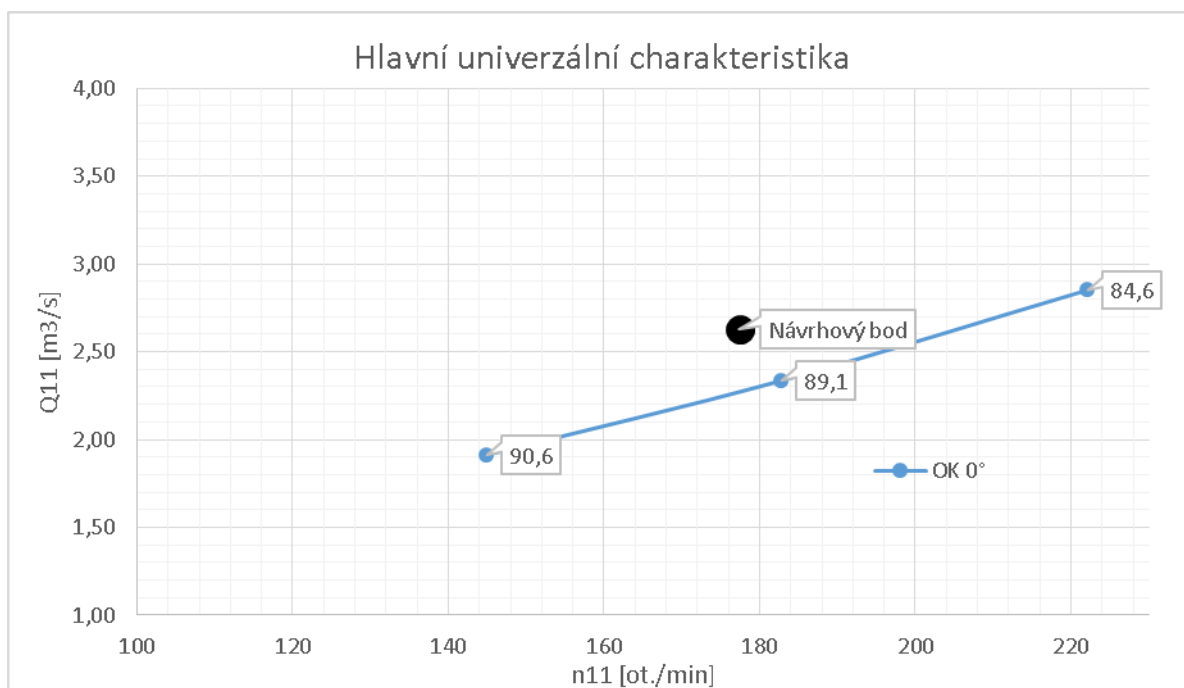
Graf 15 Prvotní vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 (popisky bodů označují natočení lopatek RK)

Body jednotlivých natočení RK pro jednotlivé otáčky se proložili vhodnými polynomy, v tomto případě polynomy 4. stupně a vykreslila se obalová křivka.

Po vytvoření obalové křivky pro odpovídající Q11 vyhledáme v grafu 17 jednotkové otáčky n11.



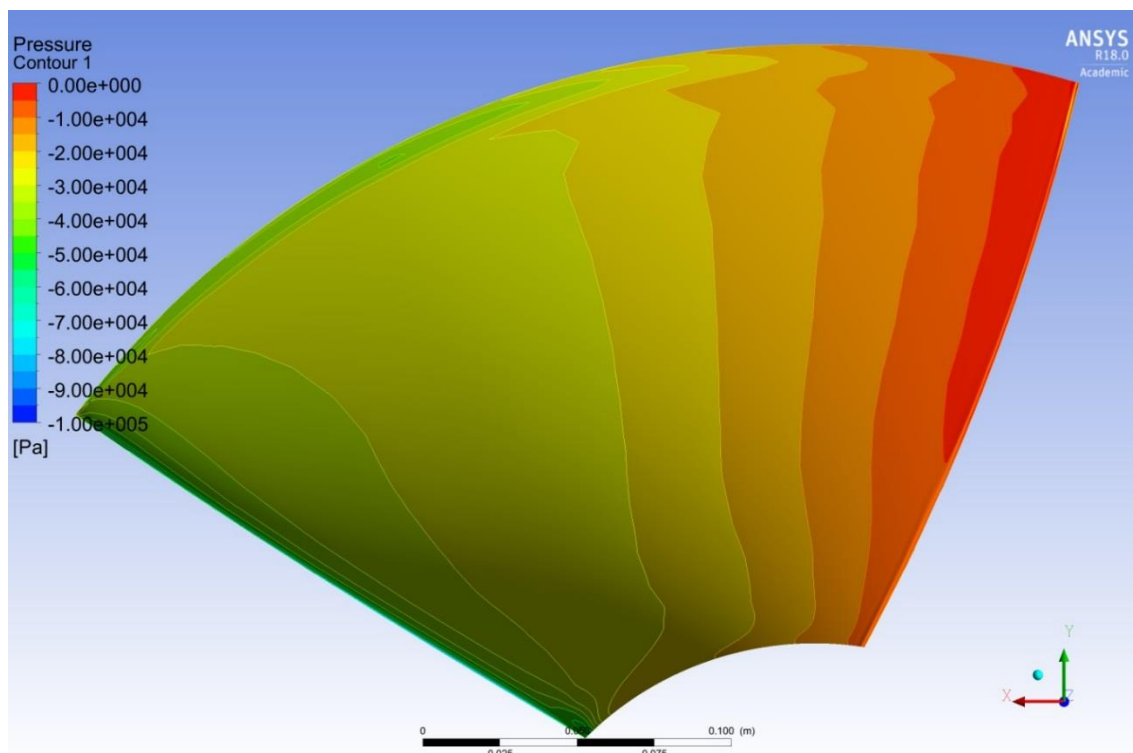
Graf 16 Závislost Q11 na n11



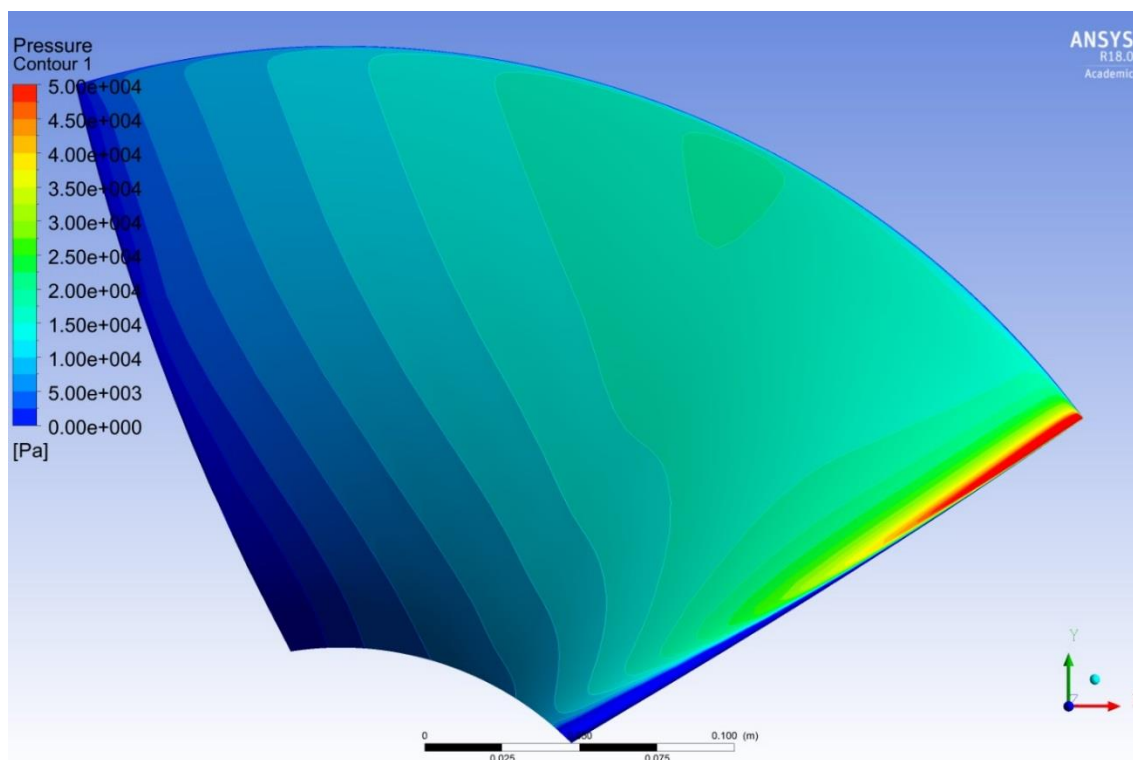
Graf 17 Prvotní vykreslení obalové křivky pro natočení OK 0°

Po vytvoření této prvotní verze jsme si uvědomili, že je možné vytvořit hlavní univerzální charakteristiku turbíny. Bude ale nutné vytvořit mnoho variant vazeb OK a RK, což bude velmi časově náročné, jak lidskou prací, tak časem strojových výpočtů. Zároveň je nutné veškeré výsledky okamžitě vyhodnocovat a rozhodovat se, které varianty vazby lopatek RK – OK a pro které otáčky se budou vytvářet matematické modely.

Jelikož nás zajímal průběh tlaku na tlakové i podtlakové straně lopatce OK, byly pro úhel sklonu lopatky RK -25° a 400 otáček za minutu, tedy pro vazbu RK-OK s nejvyšší účinností, v *post-processingu*, vykresleny průběhy tlaků.



Obrázek 34 Průběh tlaku na podtlakové straně (tzn. pohled proti vodě)

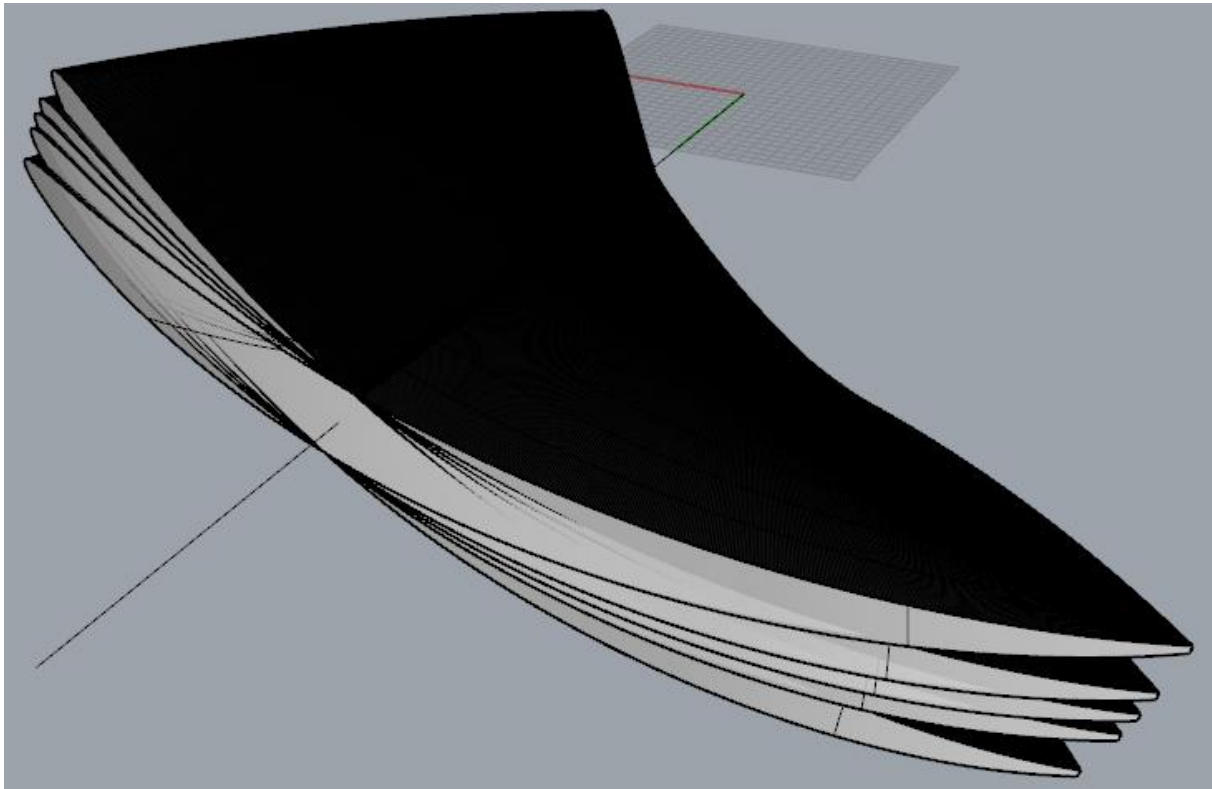


Obrázek 35 Průběh tlaku na tlakové straně (tzn. pohled po vodě)

4.4 Matematické modely pro různé vazby OK-RK

Jelikož hledáme vazbu OK – RK, která by splnila, anebo se alespoň přiblížila k našemu hlavnímu návrhovému parametru, tedy $Q=1,60 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Q_{11}=2,7 \text{ m}^3/\text{s}$), při co nejvyšší účinnosti, a tedy nejvyšším výkonu, je nutné natáčet lopatky OK a zároveň lopatky RK, tak abychom nakonec dostali hlavní univerzální charakteristiku naší turbíny.

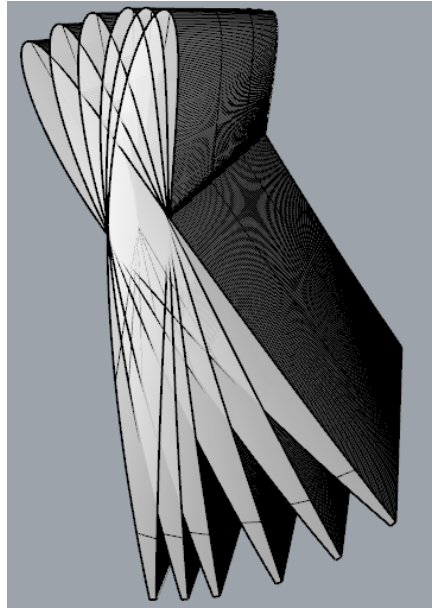
Původní referenční lopatka OK, kterou jsme označili jako lopatku o úhlu natočení 0° (natáčena byla v ose maximálního vzepětí profilu), byla nejprve natočena o $+10^\circ$ (+ značí „otevření“ lopatky, tedy větší hltnost turbíny). Z původního natočení byla dále natáčena o $+5^\circ$, o -5° a o $+2,5^\circ$.



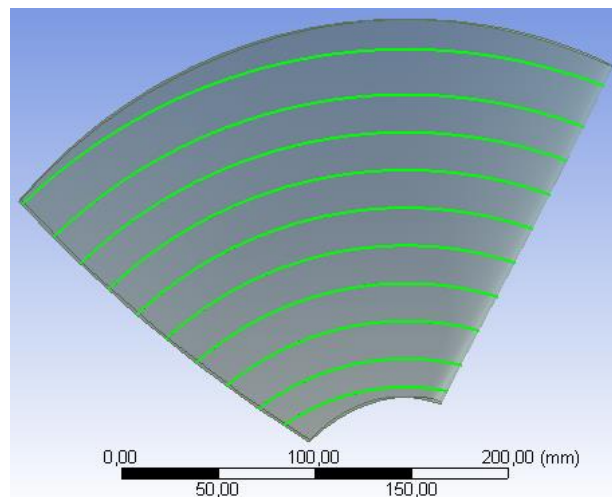
Obrázek 36 Lopatka OK v polohách -5° , 0° , $+2,5^\circ$, $+5^\circ$ a $+10^\circ$

Je potřeba si uvědomit, že natáčením lopatky OK se zvětšují mezery u komory i u náboje, což není dobře. Tento problém se řeší v *Design modeleru*, kde se importovaná lopatka „nařeže“ válcovými řezy, které se importují do *Turbogridu*. Tento postup lze aplikovat jen do určitého stupně natočení. Například natočení $+15^\circ$ je tak velké, že si s ním program již nedokáže poradit.

Obdobně se řeší natáčení lopatek RK. Lopatky se taktéž natáčeli v ose maximálního vzepětí profilu. Celkem byly vytvořeny natočení $+5^\circ$ (maximální otevření), 0° (původní referenční poloha), -5° , -15° , -25° a -35° .



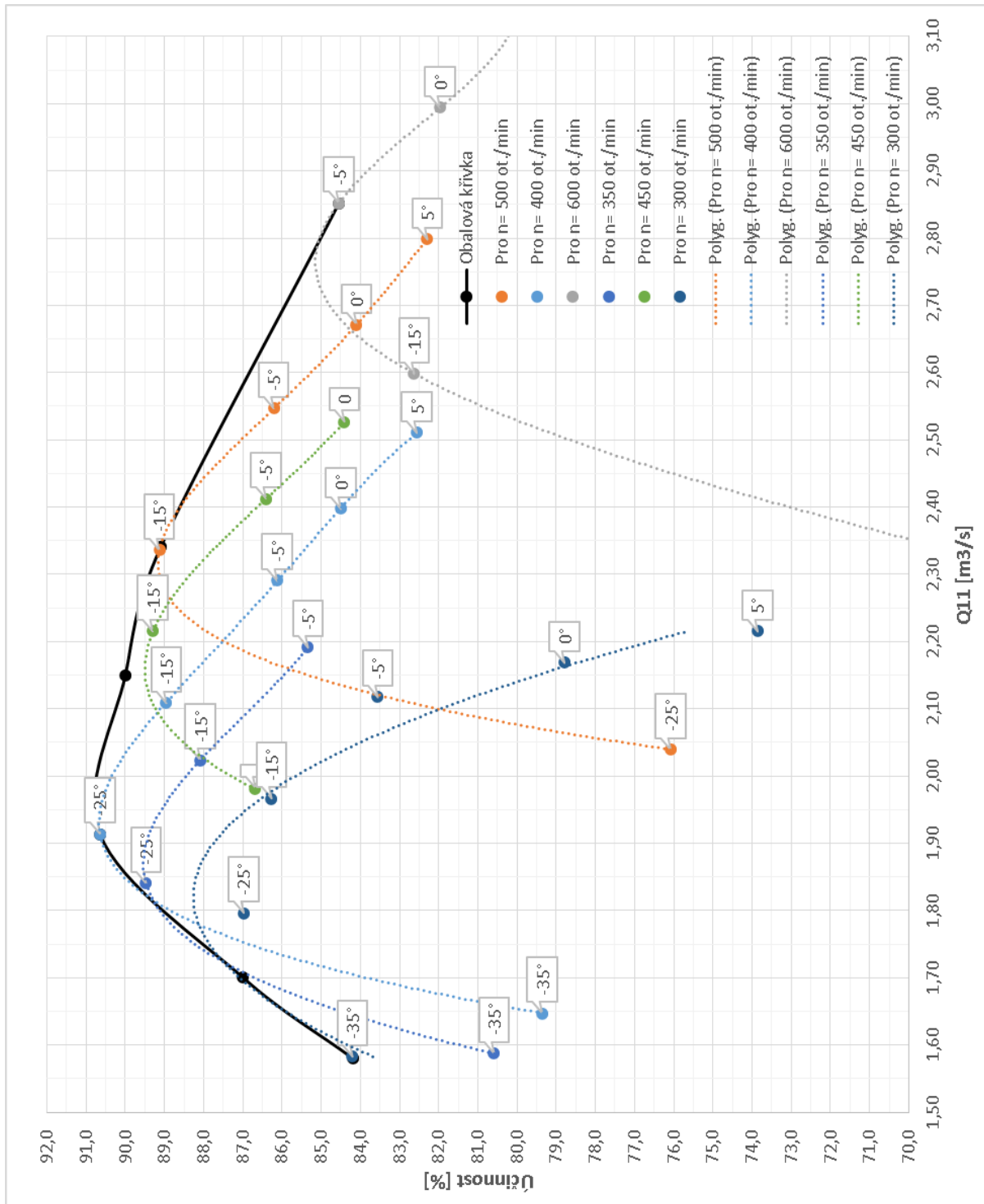
Obrázek 37 Lopatky RK v polohách $+5^\circ$, 0° , 5° , -15° , -25° a -35°



Obrázek 38 Exportní body v programu Design modeler (pohled shora pro lopatku OK $+10^\circ$)

4.4.1 Finální model pro OK 0°

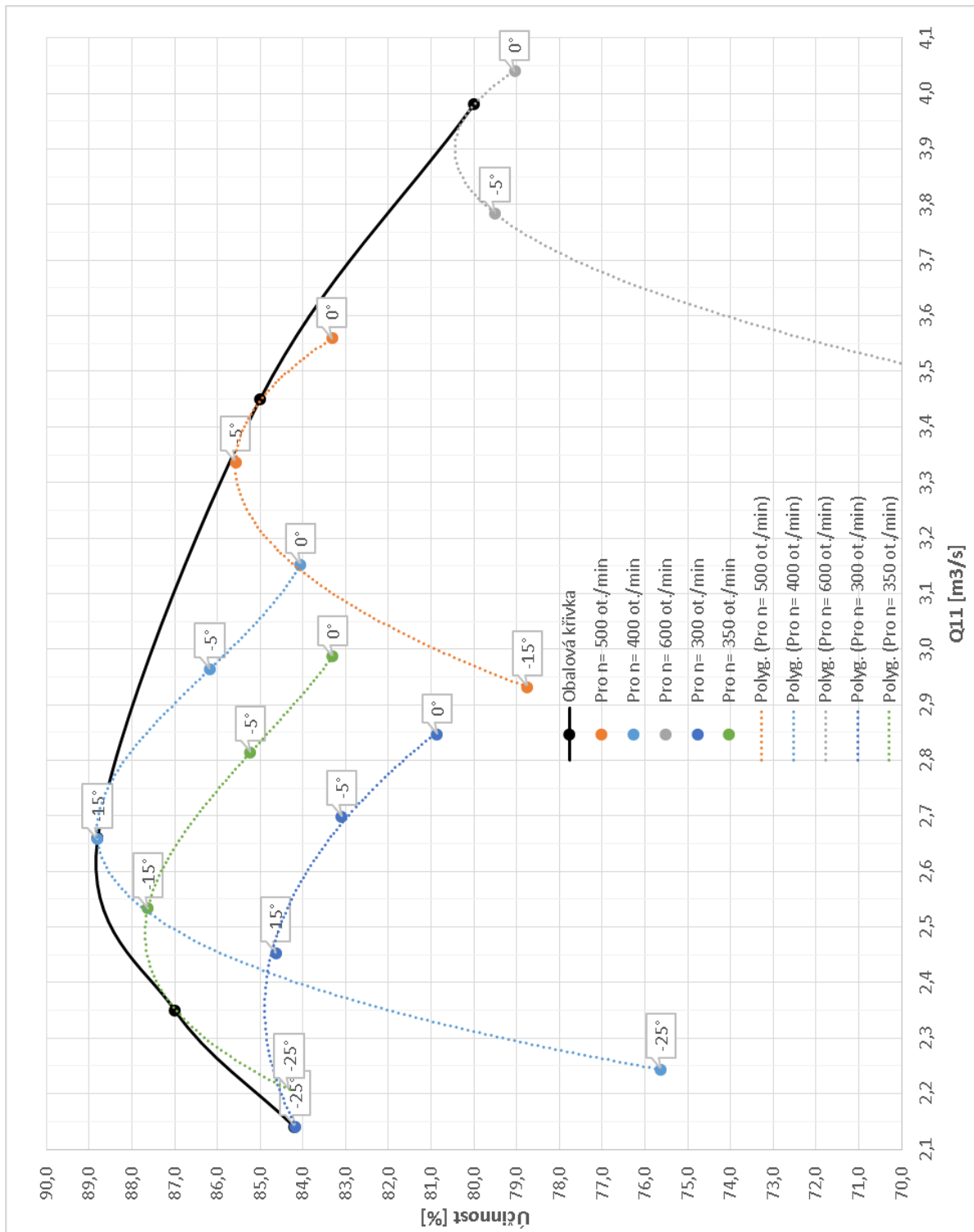
Původní model byl doplněn o sady otáček 300, 350 a 450. Stupně v bublinových popisích dat značí natočení lopatek RK.



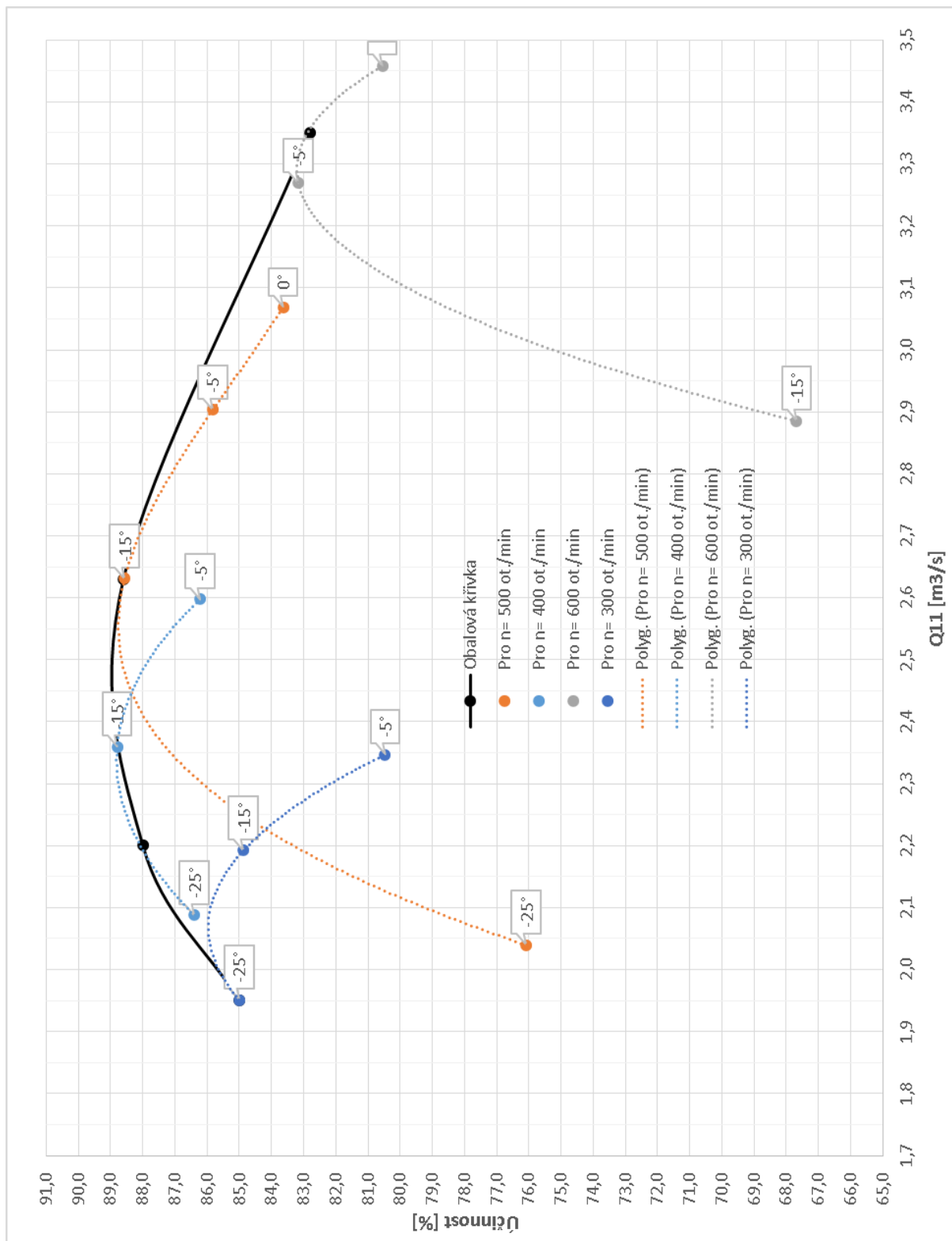
Graf 18 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK 0°

4.4.2 Další matematické modely

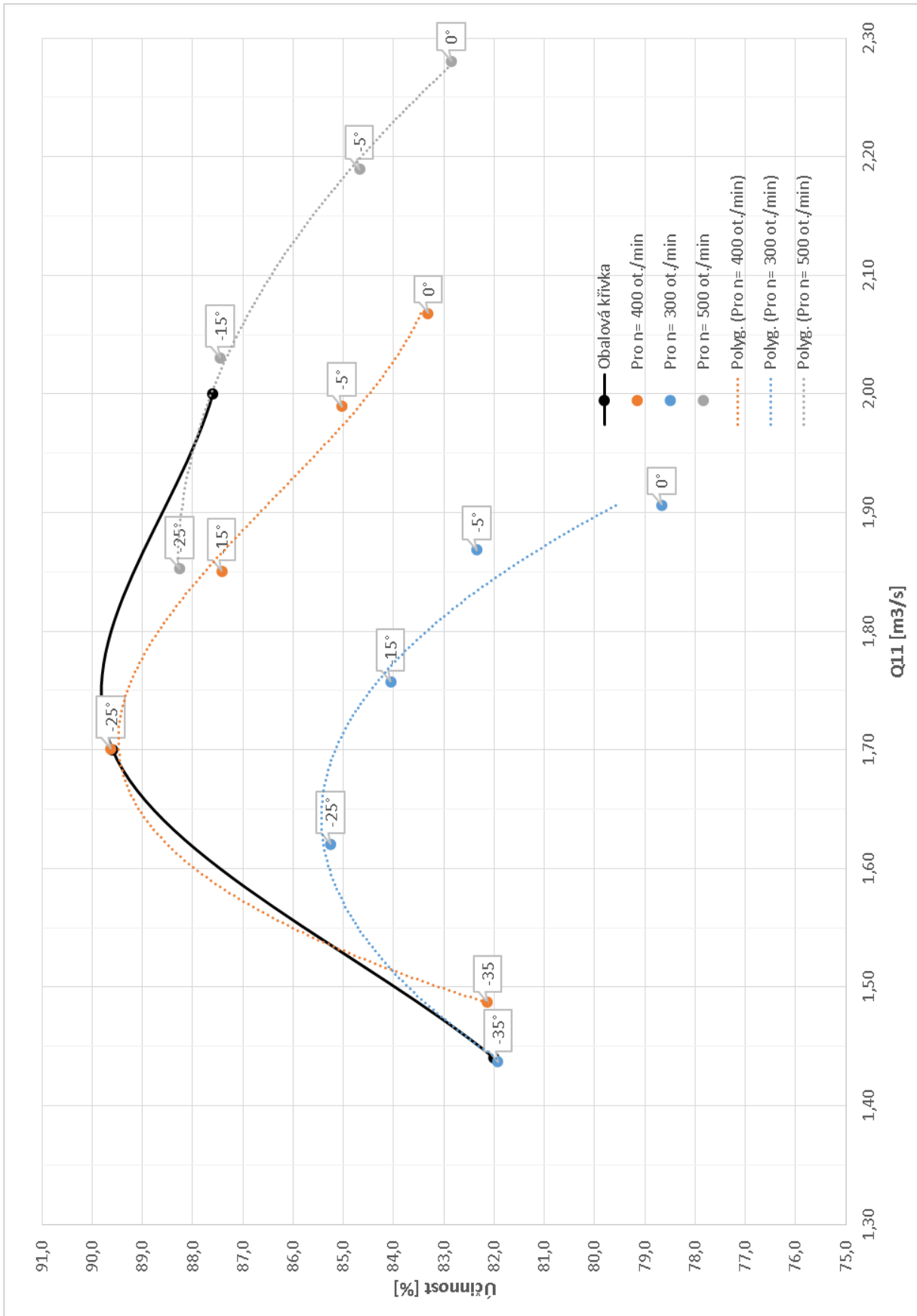
Nejdříve byla vytvořena varianta pro OK +10°, poté OK +5°, dále OK -5° a nakonec doplňující varianta OK +2,5°.



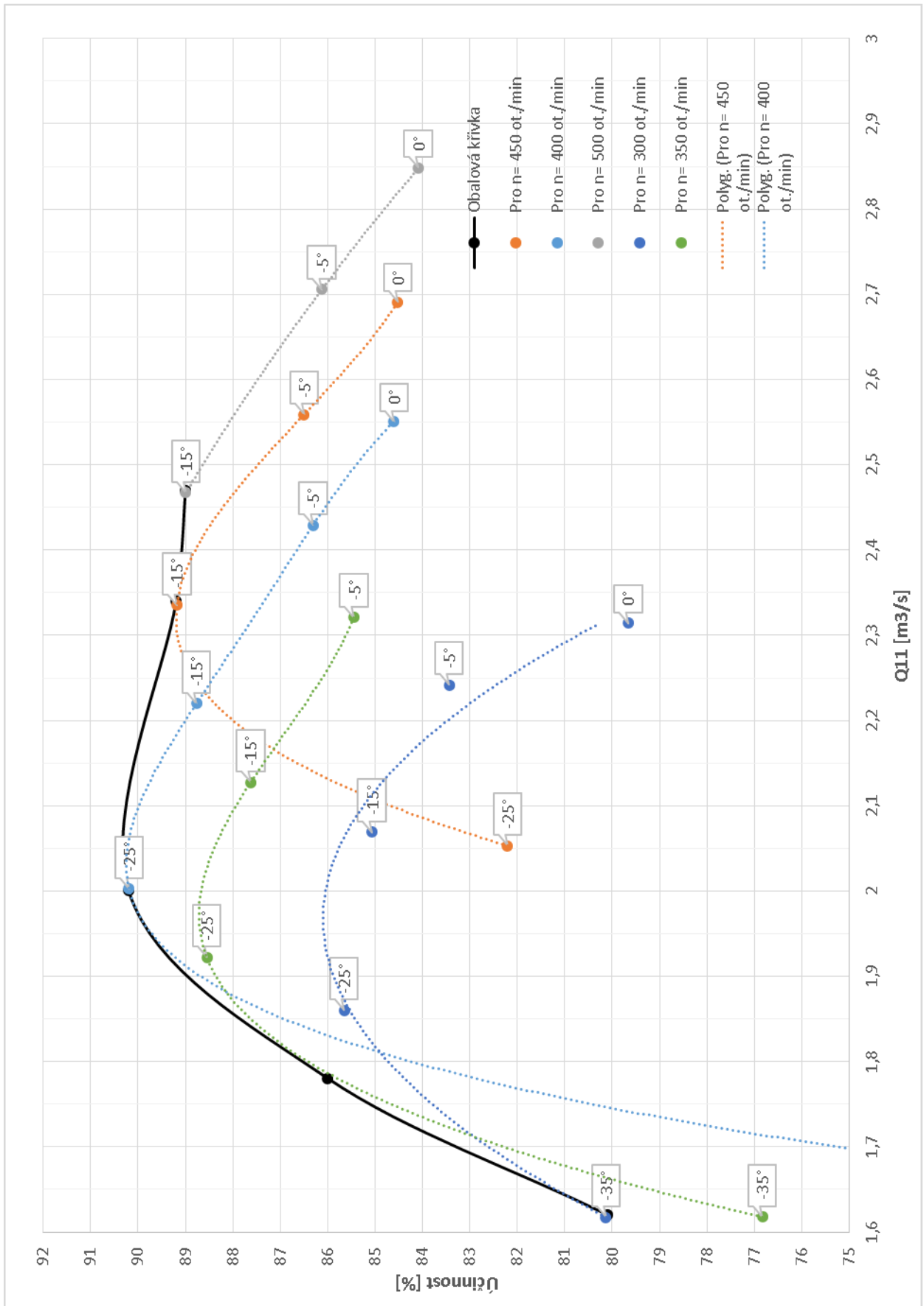
Graf 19 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +10°



Graf 20 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +5°



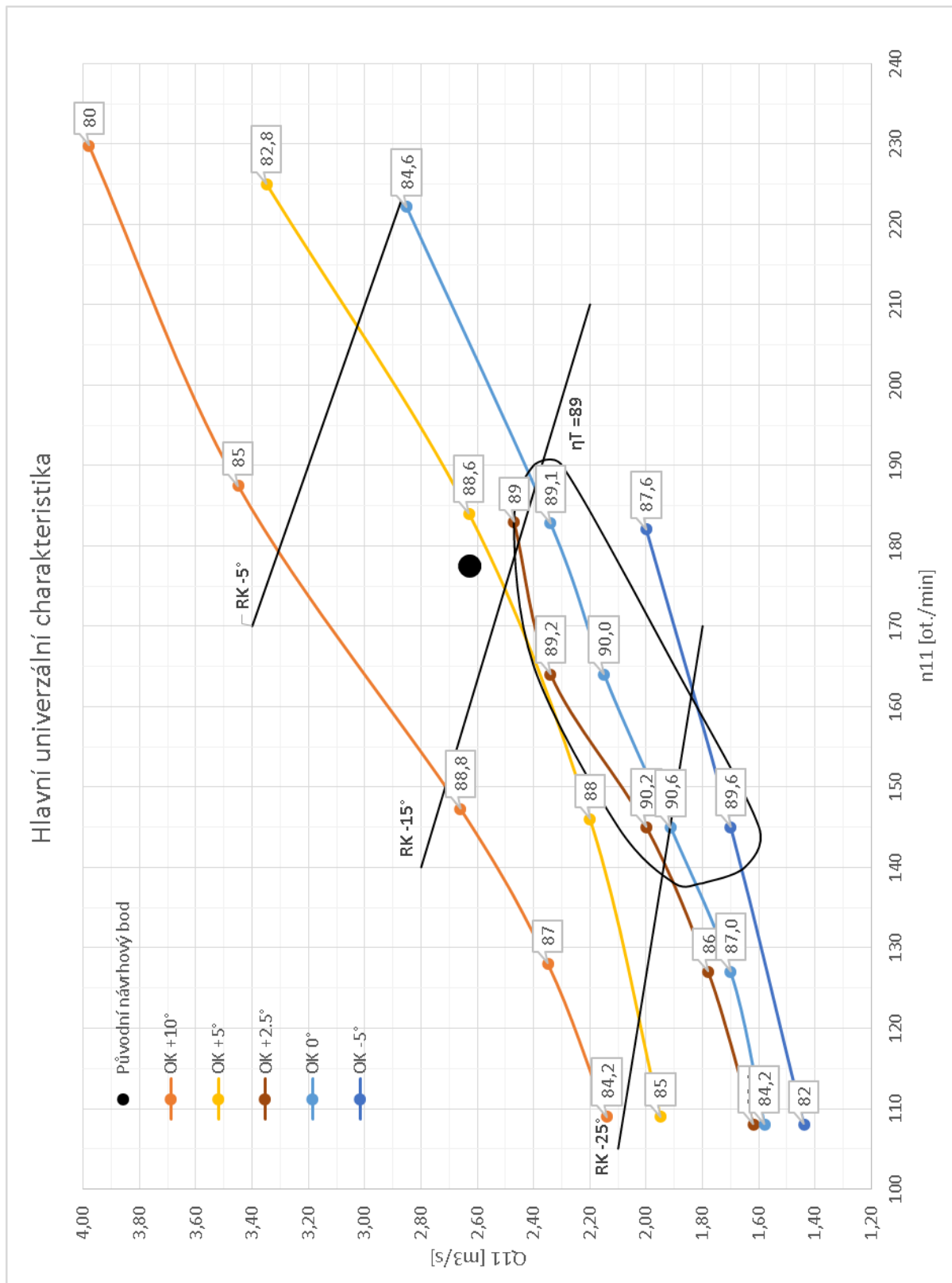
Graf 21 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK - 5



Graf 22 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +2.5°

4.5 Hlavní univerzální charakteristika

Z obalových křivek byla vytvořena hlavní univerzální charakteristika.



Graf 23 Hlavní univerzální charakteristika

Vytvoření této charakteristiky trvalo zhruba 500 hodin strojového času (300 strojových hodin na novém severu *251 a 200 hodin na starém severu *250). Lze vidět, že tato charakteristika není úplně přesná. Jedná se zejména o velmi hrubá natočení jednotlivých lopatek RK. Pokud by se dále pokračovalo v natáčení lopatek RK, zejména v mezipolohách mezi -5° a -15° a také -15° a -25° , daly by se takto vytvořit daleko přesnější průběhy grafů pro jednotlivé sady otáček. Dále by bylo také možné dopočítat další sady otáček mezi stávajícími sadami. V neposlední řadě by se také mohly vytvořit varianty pro další natočení OK.

4.6 Varianty strojů pro lokalitu Vydra II

4.6.1 Varianta stroje o stávajícím průměru D=600 mm a proměnných otáčkách (Varianta C)

V grafu hlavní univerzální charakteristiky je vidět náš návrhový bod pro otáčky $n=500$ ot./min ($n_{11}=177$ ot./min) a průtok $Q=1,60$ m³/s ($Q_{11}=2,63$ m³/s). Pro náš návrhový bod přibližně odpovídá vazba OK +5° a RK -15°. Pro tuto vazbu jsme měli vypočteny data pouze pro 300, 400, 500 a 600 ot./min, byly tedy dopočteny další otáčky v rozsahu 250 až 650.

Vydra 11_13_2017 OK+5° RK-15°		n [min ⁻¹]								
		250	300	350	400	450	500	550	600	650
UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963
DownPress	Pa	1613	1677	1635	1670	1796	2066	2542	3088	3521
Q	kg/s	1266	1290	1329	1388	1459	1536	1596	1651	1714
Mk	N.m	-997	-919	-839	-776	-725	-675	-570	-444	-324
Q	m ³ /s	1,27	1,29	1,33	1,39	1,46	1,54	1,60	1,66	1,72
Y	J/kg	26,43	26,36	26,41	26,37	26,25	25,97	25,50	24,95	24,52
H	m	2,69	2,69	2,69	2,69	2,68	2,65	2,60	2,54	2,50
Q11	m ³ /s	2,15	2,19	2,26	2,36	2,49	2,63	2,76	2,88	3,02
n11	ot/min	91	110	128	146	165	184	205	226	247
nq	ot/min	134	163	192	225	260	299	340	383	429
P	kW	26,10	28,86	30,74	32,51	34,14	35,34	32,83	27,88	22,03
P11	kW	16,40	18,20	19,34	20,49	21,67	22,78	21,77	19,10	15,49
M11	N.m	1713	1583	1443	1337	1254	1180	1015	808	600
eta	%	78,0	84,9	87,6	88,8	89,1	88,6	80,7	67,7	52,4

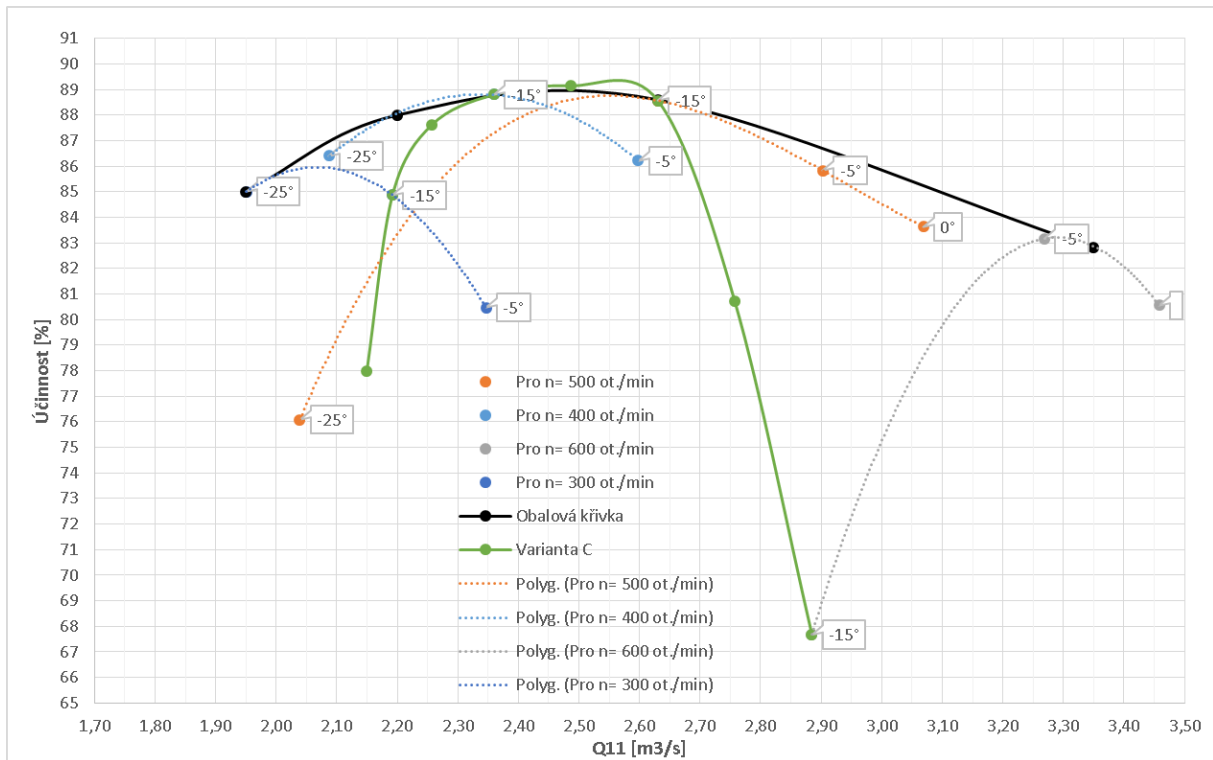
Tabulka 20 Vypočtené charakteristiky

Tuto vypočtenou charakteristiku je nutno přepočíst na stávající průměr D=0,600 m pro návrhový spád 2,86 metru.

n 11	ot/min	91	110	128	146	165	184	205	226	247
Q11	m ³ /s	2,15	2,19	2,26	2,36	2,49	2,63	2,76	2,88	3,02
M11	N.m	1713	1583	1443	1337	1254	1180	1015	808	600
P11	kW	16,40	18,20	19,34	20,49	21,67	22,78	21,77	19,10	15,49
n	ot/min	258	309	361	413	465	520	577	636	695
Q	m ³ /s	1,31	1,33	1,37	1,44	1,51	1,60	1,68	1,76	1,84
P	kW	28,55	31,68	33,67	35,67	37,74	39,67	37,90	33,25	26,98
M	N.m	1058	978	891	826	775	729	627	499	370
eta	%	78,0	84,9	87,6	88,8	89,1	88,6	80,7	67,7	52,4

Tabulka 21 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin

Abychom si lépe uvědomili, o kterou kombinaci OK – RK se jedná, je možné závislosti účinnosti na jednotkových otáčkách vykreslit do grafu.



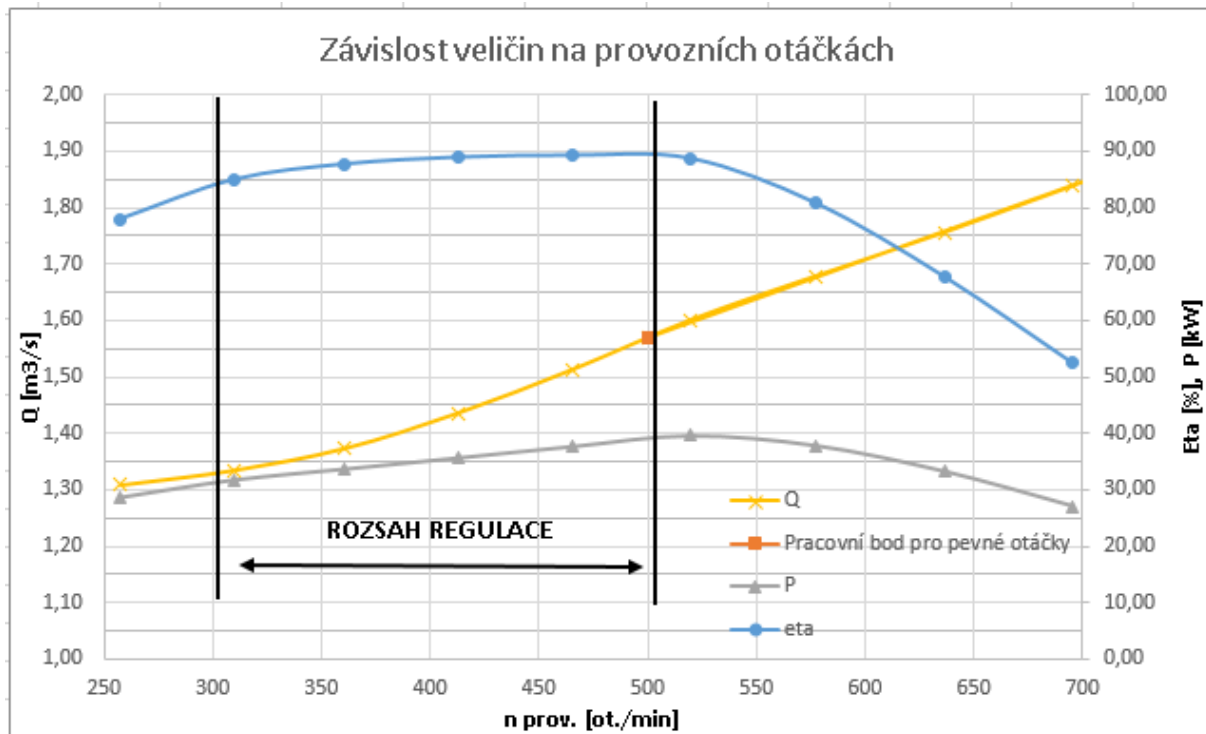
Graf 24 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11

Z tabulky lze vidět, že maximální výkon turbíny $P=39,7$ kW je při velmi dobré účinnosti 88,6 %. Dále je možno vidět, že bude vhodné omezit otáčky mezi 300 a 500 ot./min. Při hodnotě vyšší než 520 ot./min výrazně klesá výkon i při vyšší hltnosti. Při hodnotách nižších než 300 ot./min klesá výkon při pouze mírně se snižujícím průtoku a zároveň výrazně roste moment, což je nepříznivé pro generátor.

4.6.2 Varianta stroje o stávajícím průměru $D=600$ mm a pevných otáčkách (Varianta D)

Vycházíme z předchozí varianty C. Pracovní bod při otáčkách 500 ot/min a průtoku $1,56 \text{ m}^3/\text{s}$ je vykreslen níže v grafu společně s variantou proměnných otáček.

Pro přehlednost vyneseme do grafu závislosti průtoku, výkonu a účinnosti na provozních otáčkách pro přepočtenou charakteristiku. V tomto grafu vyznačíme rozsah regulace průtoku změnou otáček pomocí frekvenčního měniče.



Graf 25 Závislost veličin na provozních otáčkách

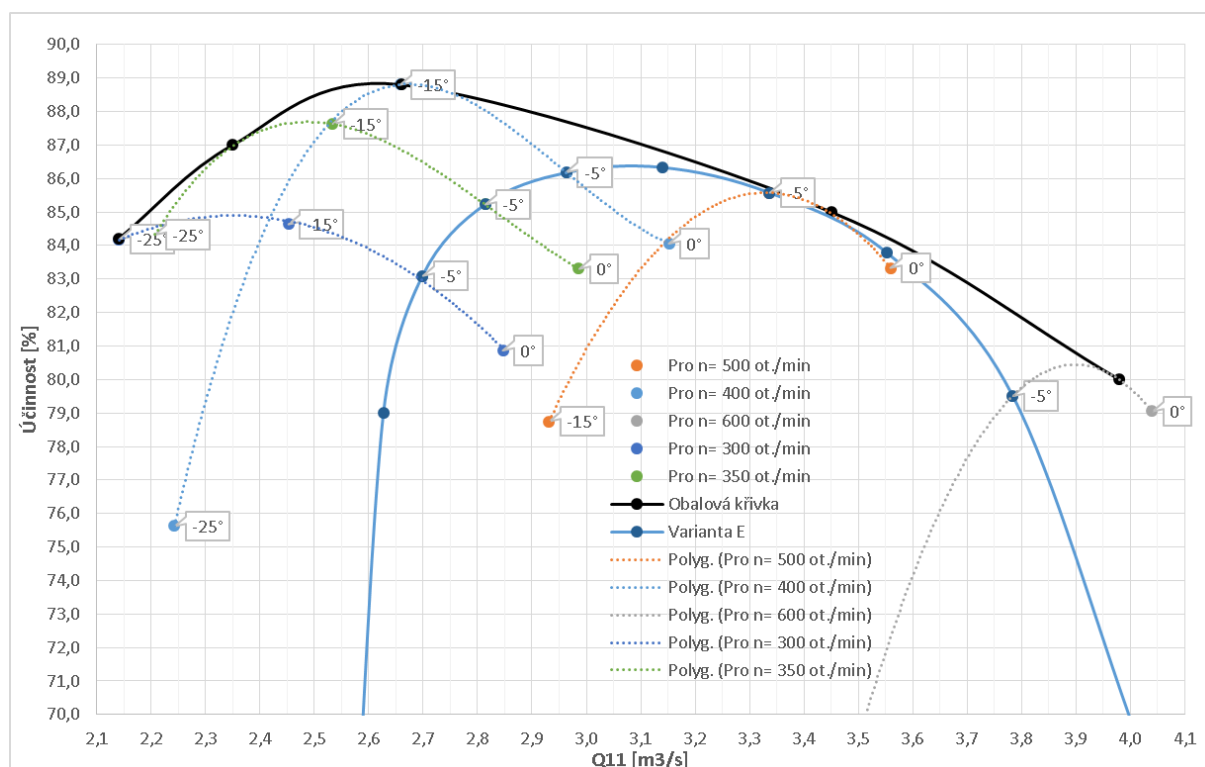
4.6.3 Varianta stroje o průměru D= 530 mm a proměnných otáčkách (Varianta E)

Pro tyto varianty vychází výborně vazba OK - RK s natočením lopatek OK +10° a RK -5°. Pro tuto vazbu byly dopočítány data.

Vydra_11_13_2017		n [min ⁻¹]									
Rozvaděč -5 st.		200	250	300	350	400	450	500	550	600	650
UpPress	Pa	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963	27963
DownPress	Pa	2558	2537	2380	2359	2451	2629	2910	3341	3949	4642
Q	kg/s	1486	1520	1566	1634	1718	1814	1917	2023	2128	2223
Mk	N.m	-1154	-1170	-1063	-976	-904	-844	-787	-727	-649	-530
Q	m ³ /s	1,49	1,52	1,57	1,64	1,72	1,82	1,92	2,03	2,13	2,23
Y	J/kg	25,48	25,50	25,66	25,68	25,59	25,41	25,13	24,70	24,09	23,39
H	m	2,60	2,60	2,62	2,62	2,61	2,59	2,56	2,52	2,46	2,38
Q11	m ³ /s	2,57	2,63	2,70	2,81	2,96	3,14	3,34	3,55	3,78	4,01
n11	ot/min	74	93	111	130	149	168	187	208	230	253
nq	ot/min	119	151	183	218	256	297	342	392	447	506
P	kW	24,16	30,62	33,40	35,76	37,88	39,79	41,22	41,86	40,76	36,07
P11	kW	16,03	20,30	21,93	23,45	24,98	26,51	27,93	29,11	29,43	27,21
M11	N.m	2056	2083	1882	1726	1605	1509	1423	1337	1223	1029
eta	%	63,8	79,0	83,1	85,2	86,2	86,3	85,6	83,8	79,5	69,4

Tabulka 22 Vypočtené charakteristik

Opět je možno vykreslit si závislost účinnosti na jednotkovém průtoku.



Graf 26 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11

Přepočtem z jednotkových veličin byl pro tento průměr zafixován spád 2,86 m a byly vypočteny následující charakteristiky.

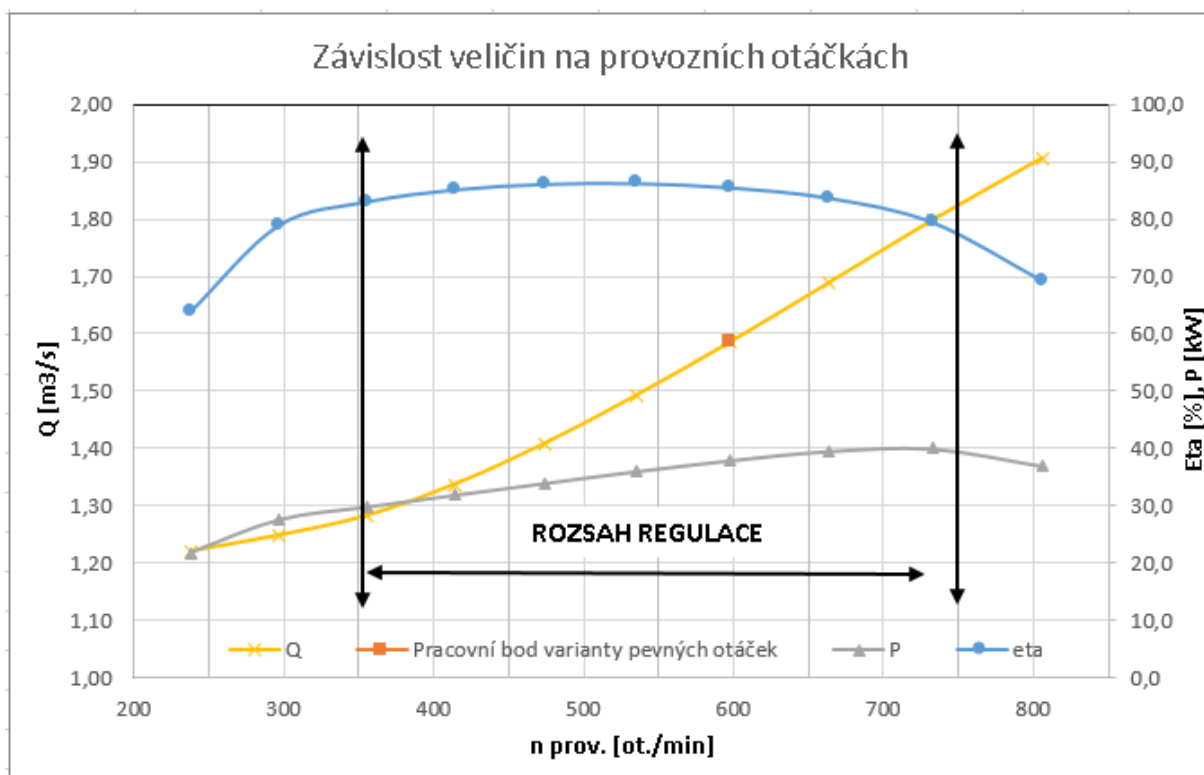
n 11	ot/min	74	93	111	130	149	168	187	208	230	253
Q11	m ³ /s	2,57	2,63	2,70	2,81	2,96	3,14	3,34	3,55	3,78	4,01
M11	N.m	2056	2083	1882	1726	1605	1509	1423	1337	1223	1029
P11	kW	16,03	20,30	21,93	23,45	24,98	26,51	27,93	29,11	29,43	27,21
n	ot/min	238	297	355	414	474	535	598	664	733	806
Q	m ³ /s	1,22	1,25	1,28	1,34	1,41	1,49	1,58	1,69	1,80	1,91
P	kW	21,78	27,57	29,80	31,87	33,94	36,02	37,94	39,55	39,98	36,97
M	N.m	876	887	801	735	683	643	606	569	521	438
eta	%	63,8	79,0	83,1	85,2	86,2	86,3	85,6	83,8	79,5	69,4

Tabulka 23 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin

Výkon tohoto stroje pro náš návrhový průtok 1,60 m³/s je zhruba 38 kW při 600 ot./min a při účinnosti 85,6 %. Bylo by možné jej provozovat při vyšším průtoku i pro vyšší otáčky asi do cca 750 ot./min, kdy se výkon bude blížit 40 kW. Dolní hranice otáček by byla 300 ot./min při průtoku 1,25 m³/s a výkonu 27,6 kW.

4.6.4 Varianta stroje o průměru D= 530 mm a pevných otáčkách (Varianta F)

Opět se jedná o úpravu předchozí varianty, kdy je využito pevných otáček. Pracovní bod varianty pevných otáček tzn. 600 ot./min a průtok 1,58 m³/s je vykreslen spolu s rozsahem regulace předchozí varianty v následujícím grafu.



Graf 27 Vykreslení pracovního bodu stroje s pevnými otáčkami a regulace strojem s proměnlivými otáčkami

4.6.5 Varianta stroje o průměru D= 500 mm a proměnných otáčkách (Varianta G)

Jedná se opět o přepočítání pro natočení lopatek OK +10° a RK -5°.

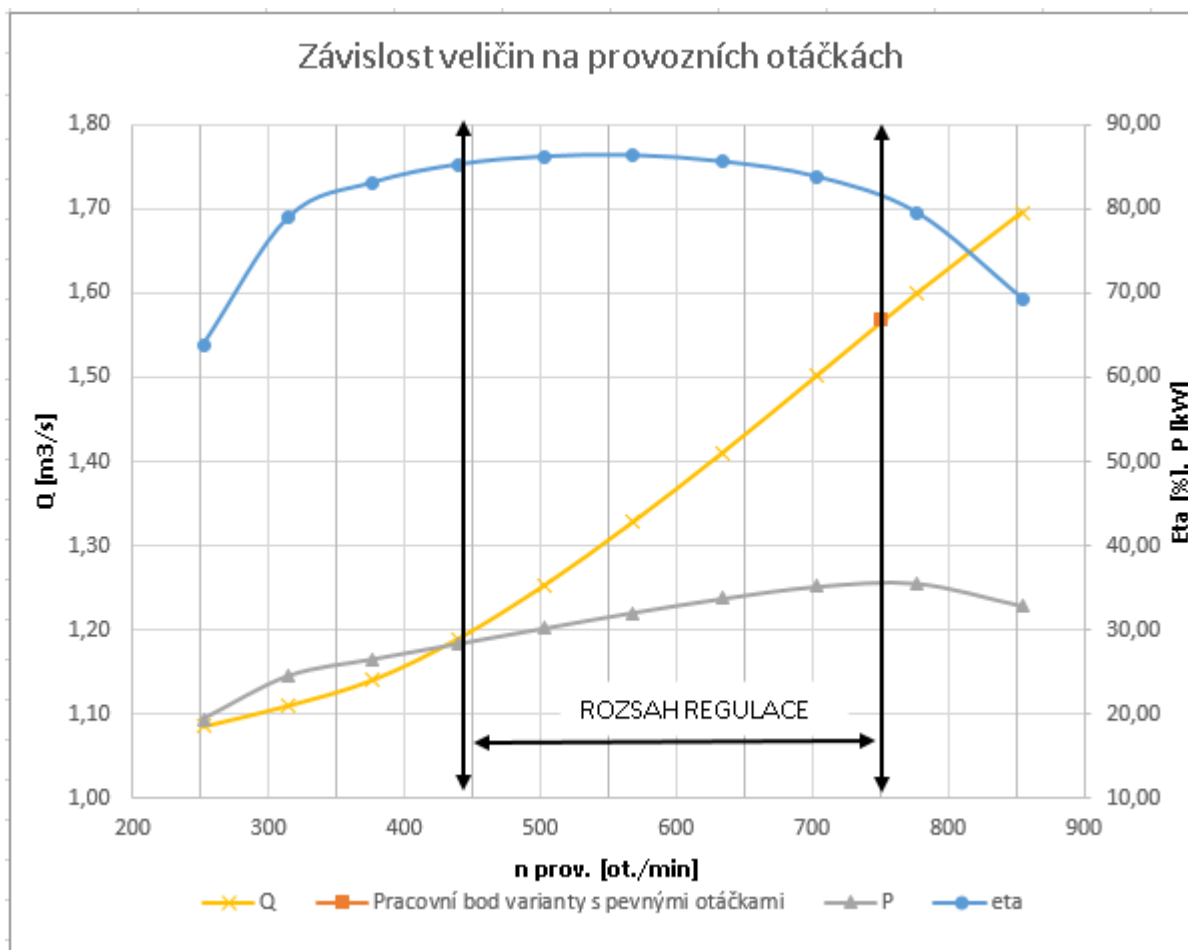
n 11	ot/min	74	93	111	130	149	168	187	208	230	253
Q11	m ³ /s	2,57	2,63	2,70	2,81	2,96	3,14	3,34	3,55	3,78	4,01
M11	N.m	2056	2083	1882	1726	1605	1509	1423	1337	1223	1029
P11	kW	16,03	20,30	21,93	23,45	24,98	26,51	27,93	29,11	29,43	27,21
n	ot/min	252	315	376	439	503	567	634	703	777	854
Q	m ³ /s	1,09	1,11	1,14	1,19	1,25	1,33	1,41	1,50	1,60	1,70
P	kW	19,39	24,54	26,52	28,36	30,21	32,06	33,77	35,20	35,58	32,90
M	N.m	735	745	673	617	574	540	509	478	437	368
eta	%	63,8	79,0	83,1	85,2	86,2	86,3	85,6	83,8	79,5	69,4

Tabulka 24 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin

Je předpokládána regulace zhruba z 750 ot./min na 450 ot./min, která umožní regulovat průtok mezi 1,19 m³/s a 1,57 m³/s.

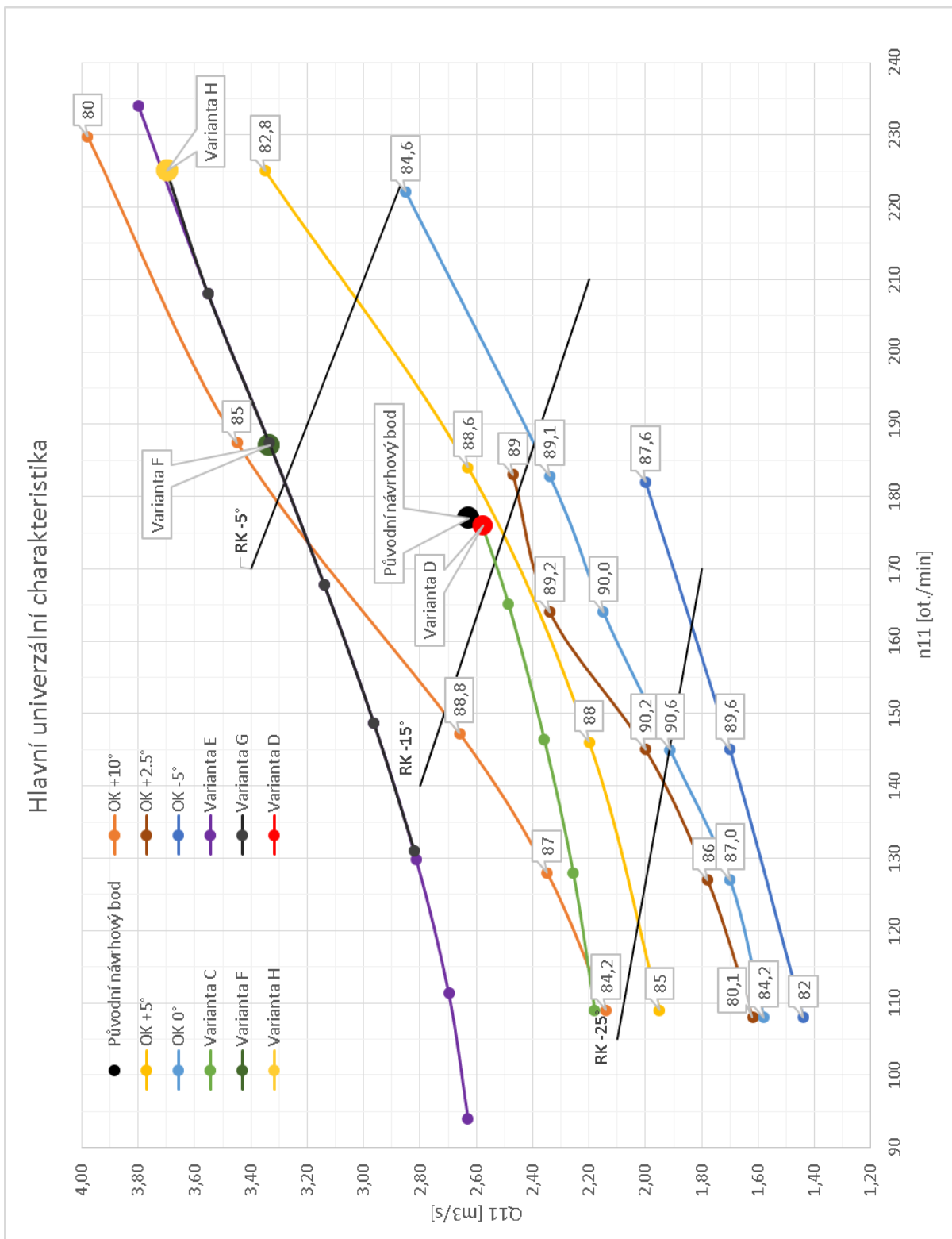
4.6.6 Varianta stroje o průměru D= 500 mm a pevných otáčkách (Varianta H)

Jedná se o stroj, který pracuje při pracovních otáčkách 750 ot./min a průtoku 1,57 m³/s.



Graf 28 Vykreslení pracovního bodu stroje s pevnými otáčkami a regulace strojem s proměnlivými otáčkami

4.7 Vynesení variant návrhů stroje do hlavní univerzální charakteristiky



Graf 29 Varianty návrhů soustrojí vynesené do hlavní univerzální charakteristiky

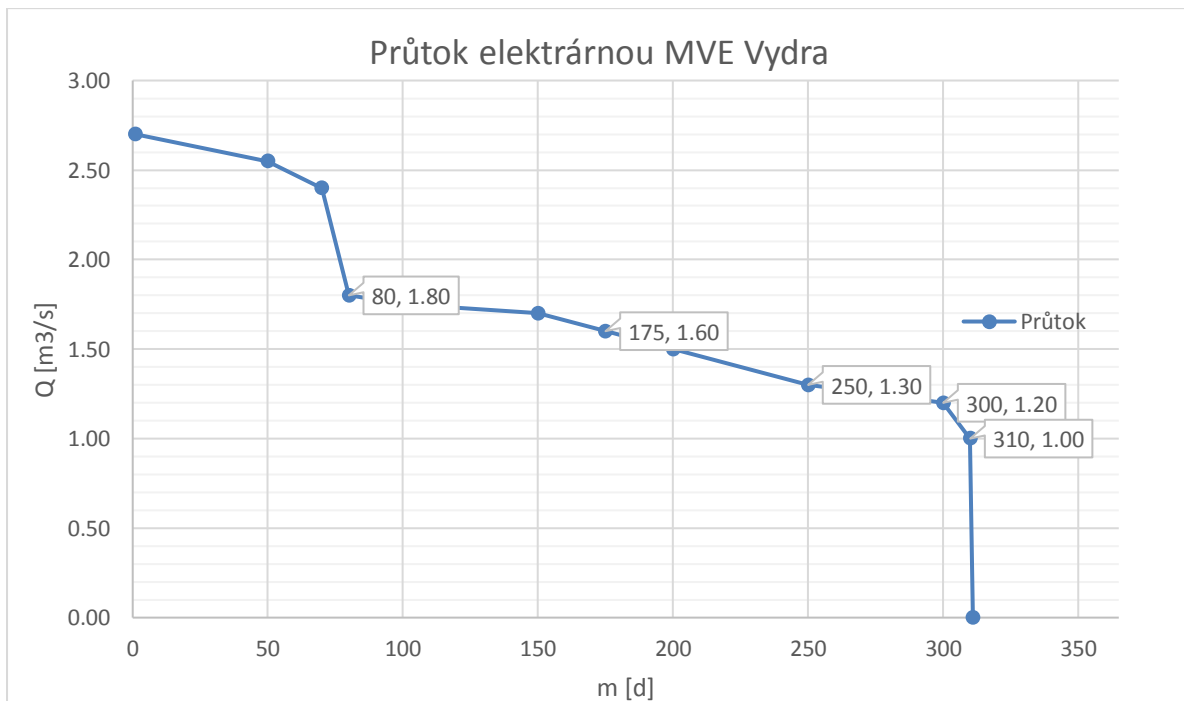
Tabulka pracovního rozsahu turbín		Návrhový bod	Varianta C	Varianta D	Varianta E	Varianta F	Varianta G	Varianta H
RK		-	.-15°	.-15°	.-5°	.-5°	.-5°	.-5°
OK		-	.+5°	.+5°	.+10°	.+10°	.+10°	.+10°
D_T	[mm]	600	600	600	530	530	500	500
n_{min}	[ot/min]	500	300	500	300	600	450	750
n_{max}	[ot/min]	500	500	500	750	600	750	750
otáčky		-	proměnn	pevné	proměnn	pevné	proměnn	pevné
Q_{11min}	[m ³ /s]	2,63	2,18	2,58	2,63	3,34	2,82	3,70
Q_{11max}	[m ³ /s]	2,63	2,58	2,58	3,80	3,34	3,70	3,70
n_{11min}	[ot/min]	177	109	176	94	187	131	225
n_{11max}	[ot/min]	177	176	176	234	187	131	225

Tabulka 25 Varianty návrhů stroje

Z grafu hlavní univerzální charakteristiky je vidět, že grafy dvou variant s proměnnými otáčkami, varianta G a varianta E, se překrývají, což je správně, jelikož se jedná o stroje různého průměru OK přepočtené z jednotkových charakteristik pro OK +10° a RK -5°.

4.8 Přibližná hodnota roční výroby energie

Z bakalářské práce Bc. Lucie Vodrážkové jsme převzali čáru překročení průtoků turbínami stávající MVE Vydra.



Graf 30 Průtok elektrárnou MVE Vydra

Nejprve byly průtoky stávající elektrárnou po dnech vloženy do tabulky, v dalším sloupci byly vypsány průtoky naší turbínou. Poté byla proložena závislost výkonu P na průtoku Q turbínou polynomem 4. stupně, čímž byly získány výkony turbíny po dnech. Následně byly denní výkony turbíny vynásobené účinnosti převodu. Celková výroba energie je suma denních výkonů vynásobena časem.

Z grafu denních průtoků lze vidět, že při proměnných otáčkách turbíny nemá význam regulovat průtok pod hodnotu 1,00 m³/s.

		Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D	Varianta E	Varianta F	Varianta G	Varianta H
typ		Bělídlo	Bělídlo	Vydra	Vydra	Vydra	Vydra	Vydra	Vydra
RK		-	-	.-15°	.-15°	.-5°	.-5°	.-5°	.-5°
OK		-	-	+.5°	+.5°	+.10°	+.10°	+.10°	+.10°
D_T	[mm]	630	630	600	600	530	530	500	500
n_{min}	[ot/min]	300	500	300	500	300	600	450	750
n_{max}	[ot/min]	500	500	500	500	750	600	750	750
otáčky		proměnné	pevné	proměnné	pevné	proměnné	pevné	proměnné	pevné
Q_{Tmin}	[m³/s]	1,30	1,60	1,33	1,56	1,25	1,58	1,19	1,57
Q_{Tmax}	[m³/s]	1,60	1,60	1,56	1,56	1,80	1,58	1,57	1,57
η_{T1}*	[%]	79,5	80,3	84,9	88,8	79,0	85,6	85,2	80,0
η_{Tmax}	[%]	82,8	80,3	89,1	88,8	86,3	85,6	86,3	80,0
η_{T2}**	[%]	80,3	80,3	88,8	88,8	79,5	85,6	80,0	80,0
P_{Tmax}	[kW]	36,4	36,4	38,9	38,9	40,0	37,9	35,7	35,7
M_{max}	[Nm]	960	669	978	740	887	606	617	450
η_G	[-]	0,94	0,92	0,94	0,92	0,94	0,92	0,92	0,92
P_{Gmax}	[kW]	34,2	33,5	36,6	35,8	37,6	34,9	32,9	32,9
E_{roční}	[MWh]	199	141	208	162	233	154	228	143
E_{porovnaní}	[%]	85	60	89	70	100	66	98	61

Tabulka 26 Komparační tabulka jednotlivých variant včetně roční výroby energie

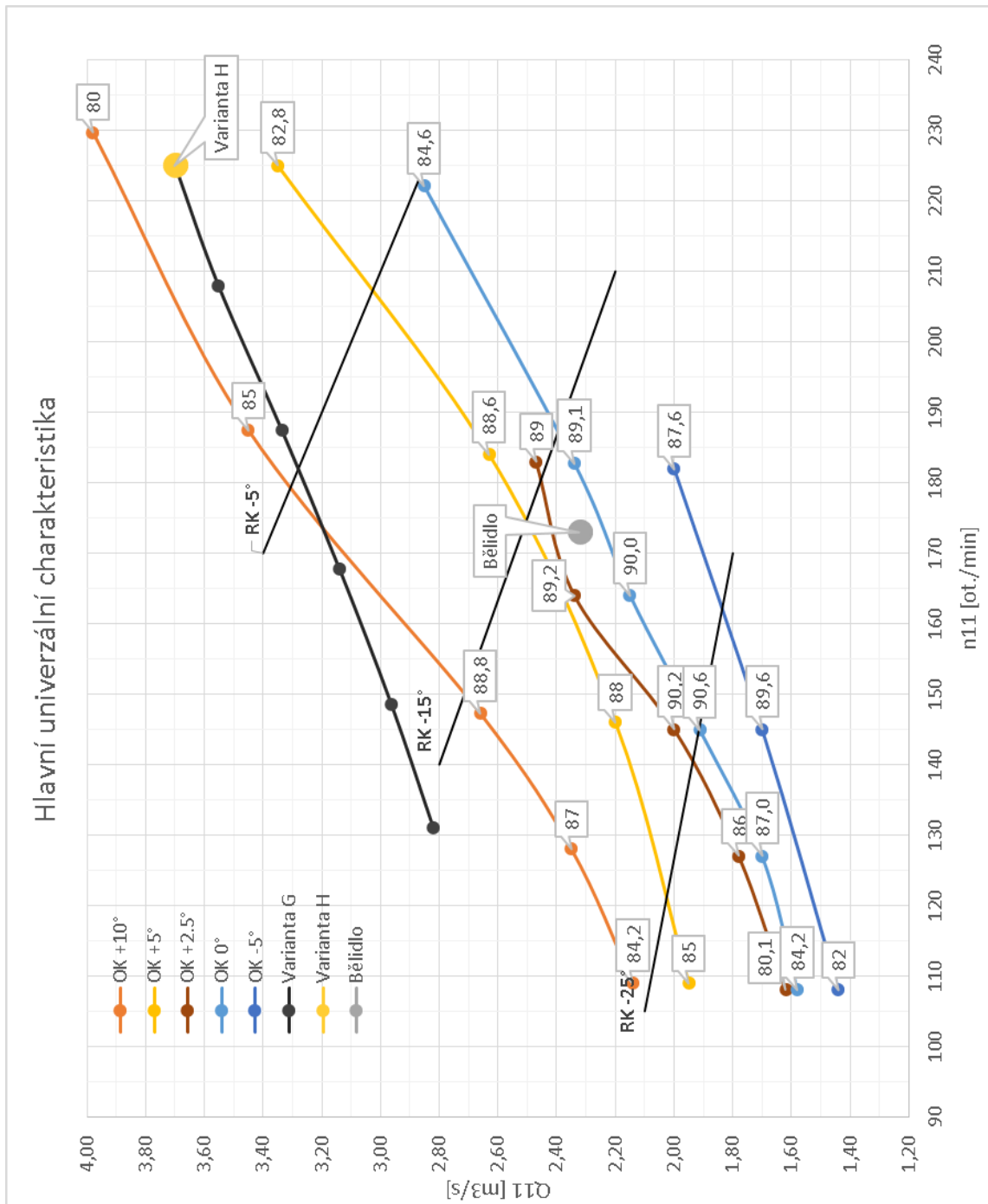
* Účinnost při nejnižších otáčkách

** Účinnost při nejvyšších otáčkách

Z těchto variant bych osobně vybral variantu G. Tato varianta soustrojí o průměru OK 500 mm s proměnnými otáčkami 450 až 750 ot/min je schopna regulovat průtok od 1,19 m³/s do 1,57 m³/s při max. účinnosti 86,3 %. Roční výroba takového soustrojí je 228 MWh, což je způsobeno díky poměrně slušné účinnosti i při nižších otáčkách, a tedy i velkému výkonu. Výhodou této menší turbíny s poměrně velkými otáčkami je i malý maximální moment dosažený při nejnižších otáčkách 450 ot./min.

4.9 Vynesení bodu z charakteristiky soustrojí Bělídlo do grafu hlavní univerzální charakteristiky

Do grafu hlavní univerzální charakteristiky byl vložen bod s nejvyšší účinností z finální charakteristiky soustrojí Bělídlo. Tento bod měl při $n_{11}=173$ ot./min a $Q_{11}=2,32$ m³/s účinnost 82,8 %. V grafu charakteristiky vytvořené pro soustrojí Vydra lze však vidět, že tento bod je v oblasti, kde se účinnosti pohybují okolo 89 %. To dokazuje, že náš návrh soustrojí Vydra, je lepší než návrh soustrojí Bělídlo.



Graf 31 Bod z charakteristiky soustrojí Bělídlo vynesení do hlavní univerzální charakteristiky.

5 Závěr

V této části diplomové práce byla převzata geometrie, lopatky OK a RK z původního matematického modelu Bělídlo. Pro tuto geometrii byly vytvořeny různé typy modelů s odlišnými výpočetními sítě, nastaveními apod. Na těchto modelech byly testovány a diskutovány rozdíly.

Dalším stupněm bylo vytvořit nový návrh soustrojí pro lokalitu Vydra. Vycházelo se ze zkušeností z tvorby modelů pro soustrojí „Bělídlo“. Nejprve byl vytvořen nový návrh hydraulického profilu, tedy rotační obrisy ocelové konstrukce. Při návrhu lopatek OK byl použit generátor válcových řezů NACA profilů vytvořený v bakalářské práci Ing. Jana Buška. Z plastu se předpokládá vytvoření lopatek OK i RK.

Bylo vytvořeno mnoho variant natočení lopatek OK a RK (vazby OK – RK) pro různé otáčky OK. Celkem se jednalo o 110 výpočetních bodů s celkovým strojovým výpočetním časem zhruba 500 hodin.

Graf hlavní univerzální charakteristiky tedy obsahuje optimální vazby OK – RK. Tento graf má obrovský potenciál pro využití turbíny v podobných lokalitách. Stačí zvolit průměr OK a návrhové otáčky. Poté můžeme dopočítat jednotkové otáčky n_{11} a jednotkový průtok Q_{11} . Bod se souřadnicemi n_{11} a Q_{11} umístíme do grafu, pro tento bod zjistíme vazbu OK – RK (natočení lopatek OK a RK) a na 3D tiskárně vytiskneme odpovídající lopatky. Také pokud by se změnili hydrologické poměry návrhové lokality, je možno vytisknout jiné lopatky OK nebo RK a vyměnit je.

Bylo vytvořeno několik variant návrhu stroje, z těchto variant byla vybrána varianta stroje s menším průměrem $D=500$ mm než původně předpokládáno, díky malému nábojovému poměru a díky dobrému hydraulickému profilu. Toto soustrojí s asynchronním motorem a frekvenčním měničem může regulovat průtok změnou otáček v rozsahu $1,19$ m³/s až $1,57$ m³/s. Předpokládaná roční výroba tohoto soustrojí na lokalitě Vydra II je 228 MWh.

6 Náměty na další postup

Předpokládáme, že základní návrh počtu lopatek RK i OK hydraulický profil i úhel stěny savky je v pořádku. Pokud jsou tyto parametry zafixovány, bylo by dobré pokusit se znovu navrhnout tvary lopatek OK i RK tak, abychom vytvořili soustrojí s maximální účinností, respektive výkonem pro vyšší jednotkové průtoky. Tím by se nám podařilo vytvořit návrh, jehož výsledkem by byl poměrně hltný stroj menšího průměru s vysokou roční výrobou energie.

Pokud by se opět vytvářela hlavní univerzální charakteristika nového návrhu, bylo by dobré zvážit následující fakta při tvorbě matematických modelů:

- Jelikož je výpočet časově poměrně náročný, je třeba snížit počet elementů výpočetních sítí jednotlivých domén, představa je okolo 1 milionu elementů celého modelu oproti současným zhruba 1,8 milionu elementů
- Zejména počet elementů savky (nyní 880 tis.) je příliš vysoký, zejména kvůli snaze o neignorování mezní vrstvy na rotující špičce (stěně) náboje v savce, v případě zanedbání této skutečnosti by bylo možno snížit počet prvků na 400-500 tisíc.
- Ponechat časový krok 0,5/n i počet iterací, ale bylo by dobré využít možnost *Interrupt Control* v *CFX-Pre (Setup)*, tedy přerušeni výpočtu při dosažení určitých podmínek, např. je-li směrodatná odchylka monitorované účinnosti (v procentech) za předchozích 200 nižší než 0,1

Využitím těchto možností by bylo možno snížit časovou náročnost výpočtu, respektive ušetřený čas věnovat např. jemnějšímu natáčení lopatek RK a OK. Samozřejmě je třeba počítat s méně kvalitnějšími výsledky např. u monitorované účinnosti $\pm 0,5\%$, což je ale u našeho návrhu soustrojí přijatelná oběť.

7 Literatura a zdroje informací

- [1] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2,10] GABRIEL, Pavel, Petr KALANDRA a František ČIHÁK. *Malé vodní elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [3] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, 299 s. ISBN 80-01-01808-3.
- [4,9] BEDNÁŘ, Josef. *Malé vodní elektrárny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] Propelerová turbína Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/mala-vrtulovka.htm>
- [6] Informace o turbíně S-Kaplan. Dostupné z:
<http://mve.energetika.cz/pretlakoveturbiny/kaplan-s.htm>
- [7] Turbína Semi-Kaplan. Dostupné z: <http://www.elzaco.cz/cs/node/103>
- [8] Francisova turbína. Dostupné z:
http://www.vaptech.bg/uploads/project/11/BB7_IMG_5428.JPG
- [11] Princip Peltonovy turbíny. Dostupné z: <http://ok1zed.sweb.cz/img/ev-pelton.gif>
- [12] Obrázek turbíny Turgo. Dostupné z:
http://www.hydroelectric.co.nz/images/turgo_impulse_turbine.jpg
- [13] Princip Bánkiho turbíny. Dostupné z:
[\[http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm\]](http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm)
- [14] ŠKAŘUPOVÁ, Eva. *Energetické využití sanačních průtoků kompaktní soustrojí s obtékaným generátorem* - prezentace. 2016
- [15] HOSNEDL, Marek Bc. *Využití CFD metod pro určení charakteristik axiálních turbín*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta Stavební. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak.
- [16] Prof. Dr. Ing. Václav Matoušek. *Hydraulika 3 pro magisterské studium*, přednášky
- [17] Nástroj pro výpočet výšky mezní vrstvy. Dostupné z: <https://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php>
- [18] *Chapter 12- Moving Zones, Introduction to CFX*, © 2009 Ansys, Inc.– prezentace.
- [19] VODRÁŽKOVÁ, Lucie. *Hydroenergetické využití zbytkového spádu MVE Vydra*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta Stavební. Vedoucí práce Dr. Ing. Petr Nowak
- [20] NECHLEBA, I. D. M. *Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství*. Praha: Státní vydavatelství technické literatury, 1954.

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 Rozdělení vodních elektráren podle instalovaného výkonu [2]	2
Obrázek 2 Historický koncept vrtulové turbíny [5]	3
Obrázek 3 Francisova horizontální turbína [8].....	6
Obrázek 4 Geometrie dýzy Peltonovy turbíny [10].....	6
Obrázek 5 Peltonova turbína [11]	7
Obrázek 6 Turbína Turgo [12]	7
Obrázek 7 Princip Bánkiho turbíny [13].....	8
Obrázek 8 Náboj s připojenými lopatkami [14]	9
Obrázek 9 Celá geometrie matematického modelu	10
Obrázek 11 Lopatky rozvaděče, zeleně je vyznačená nátoková část.....	11
Obrázek 10 Nátoková část, zeleně je vyznačen obtékaný generátor	11
Obrázek 12 Komora oběžného kola, zeleně je vyznačená nátoková část	12
Obrázek 14 Střední podélný řez strukturovanou sítí savky	13
Obrázek 13 Savka, pohled proti vodě, zeleně je vyznačen náboj	13
Obrázek 15 Mezní vrstvy [16]	15
Obrázek 16 Výška prvního elementu u stěny savky [16].....	16
Obrázek 17 Hodnota y_+ na stěně savky	16
Obrázek 18 Parametr n	17
Obrázek 19 Cache Solution Data	17
Obrázek 20 Počáteční podmínka výpočtu	18
Obrázek 21 Výrazy (expressions) ve výsledcích (Results).....	18
Obrázek 22 Vizualizace rychlostí v soustrojí pro 600 ot./min a původní natočení lopatek OK23	
Obrázek 23 Geometrie „třetinového“ modelu	24
Obrázek 24 Monitorování účinnosti.....	25
Obrázek 25 Rozhraní domén modelu	25
Obrázek 26 Hydraulický profil.....	41
Obrázek 27 GUI návrhu lopatek v programu Matlab	42
Obrázek 28 Parametry NACA profilu [10].....	43
Obrázek 29 Lopatka OK	44
Obrázek 30 Export geometrie z DM do Turbogridu	44
Obrázek 31 Ukázka vytvořené sítě RK v programu Turbogrid	45
Obrázek 32 Model soustrojí.....	46
Obrázek 33 Původní natočení lopatek OK a různé natočení lopatek RK.....	48
Obrázek 34 Průběh tlaku na podtlakové straně (tzn. pohled proti vodě).....	52
Obrázek 35 Průběh tlaku na tlakové straně (tzn. pohled po vodě)	52
Obrázek 36 Lopatka OK v polohách -5° , 0° , $+2,5^\circ$, $+5^\circ$ a $+10^\circ$	53
Obrázek 37 Lopatky RK v polohách $+5^\circ$, 0° , 5° , -15° , -25° a -35°	54
Obrázek 38 Exportní body v programu Design modeler (pohled shora pro lopatku OK $+10^\circ$) 54	

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 Parametry turbín typu Semi-Kaplan vyráběných firmou Elzaco [7]	4
Tabulka 2 Počty elementů v jednotlivých doménách - R1 je komora oběžného kola, S0 je nátok na rozvaděč, S1 je rozvaděč, S2 je savka, S3 je výtoková sekce	14
Tabulka 3 Vypočtené charakteristiky pro původní polohu lopatek OK150915	20
Tabulka 4 Počty elementů v jednotlivých doménách	24
Tabulka 5 Vypočtené charakteristiky pro „třetinový“ matematický model	27
Tabulka 6 Počty elementů u jednotlivých variant	28
Tabulka 7 Vypočtené charakteristiky pro varianty různého poměru výseků nátoku na rozvaděč a RK	28
Tabulka 8 Porovnání výpočetní doby na novém a starém serveru (hvězdičkou označený bod byl ručně ukončen, jelikož byl dokonvergován)	29
Tabulka 9 Vypočtené charakteristiky	29
Tabulka 10 Výpočetní čas (výpočetní bod pro 450 ot./min. dosáhl RMS 10^{-5} při 1823 iteracích)	32
Tabulka 11 Vypočtené charakteristiky	33
Tabulka 12 Komparační tabulky pro různé varianty modelů	35
Tabulka 13 Charakteristika pro řadu provozních otáček doplněnou o 250 a 350 ot./min	38
Tabulka 14 Charakteristika návrhu varianty Vydry	39
Tabulka 15 Charakteristika návrhu vydry pro proměnný spád a fixní provozní otáčky	40
Tabulka 16 Parametry tří profilů lopatky OK	43
Tabulka 17 Tabulka počtu prvků výpočetní sítě	47
Tabulka 18 Vypočtené charakteristiky	48
Tabulka 19 Charakteristiky pro 400, 500 a 600 ot./min pro původní natočení lopatek OK a různé natočení lopatek RK	49
Tabulka 20 Vypočtené charakteristiky	62
Tabulka 21 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin	62
Tabulka 22 Vypočtené charakteristiky	65
Tabulka 23 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin	66
Tabulka 24 Vypočtené charakteristiky vzniklé přepočtem z jednotkových veličin	67
Tabulka 25 Varianty návrhů stroje	69
Tabulka 26 Komparační tabulka jednotlivých variant včetně roční výroby energie	70

10 Seznam grafů

Graf 1 Závislost účinností na jednotkových otáčkách, porovnání s měřeními a předchozím mat. modelem.....	21
Graf 2 Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách	22
Graf 3 Průběh účinnosti během výpočtu pro 450 ot./min. pro posledních 800 iterací.....	26
Graf 4 Závislost účinností na jednotkových otáčkách, porovnání modelů využívajících rotační periodicitu a původního modelu s velmi jemnou výpočetní sítí.....	30
Graf 5 Závislost jednotkového průtoku na jednotkových otáčkách	31
Graf 6 Závislost jednotkového momentu na jednotkových otáčkách.....	31
Graf 7 Průběh účinnosti během výpočtu.....	33
Graf 8 Průběh RMS během výpočtu	33
Graf 9 Porovnání původního průběhu účinnosti pro původní nedokonvergovaný model a dokonvergovaný model	34
Graf 10 Srovnání účinnosti různých modelů.....	36
Graf 11 Závislost jednotkového momentu na jednotkových otáčkách.....	37
Graf 12 Závislost veličin na provozních otáčkách soustrojí Vydra	39
Graf 13 Změna charakteristik v závislosti na změně spádu	40
Graf 14 Průběh RMS pro 500 ot./min a průběh účinnosti v posledních 300 iteracích	47
Graf 15 Prvotní vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 (popisky bodů označují natočení lopatek RK)	50
Graf 16 Závislost Q11 na n11	51
Graf 17 Prvotní vykreslení obalové křivky pro natočení OK 0°	51
Graf 18 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK 0°	55
Graf 19 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +10°	56
Graf 20 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +5°	57
Graf 21 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK - 5	58
Graf 22 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11 pro OK +2.5°	59
Graf 23 Hlavní univerzální charakteristika.....	60
Graf 24 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11.....	63
Graf 25 Závislost veličin na provozních otáčkách	64
Graf 26 Vykreslení účinnosti v závislosti na Q11.....	65
Graf 27 Vykreslení pracovního bodu stroje s pevnými otáčkami a regulace strojem s proměnlivými otáčkami.....	66
Graf 28 Vykreslení pracovního bodu stroje s pevnými otáčkami a regulace strojem s proměnlivými otáčkami.....	67
Graf 29 Varianty návrhů soustrojí vynesené do hlavní univerzální charakteristiky	68
Graf 30 Průtok elektrárnou MVE Vydra.....	69
Graf 31 Bod z charakteristiky soustrojí Bělidlo vynesení do hlavní univerzální charakteristiky.	71