



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ŠIROKOPÁSMOVÁ FRANCISOVA TURBINA

WIDE RANGE FRANCIS TURBINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAN PAVLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV HALUZA, CSc.

BRNO 2011

Abstrakt / Annotation

Cílem této diplomové práce je hydraulický návrh oběžného kola širokopásmové Francisovy turbíny; kromě vlastních hydraulických výpočtů obsahuje i přehled použité teorie, modelování v SolidWorks a výpočet ve Fluentu.

This diploma thesis deals with hydraulic design of runner of wide range Francis turbine; in addition to hydraulic calculation it consists overview of used theory, modelling in SolidWorks and computing in Fluent.

Klíčová slova / Keywords

Lopatka, meridián, oběžné kolo, konformní zobrazení, metoda singularit, Eulerova rovnice, rychlostní trojúhelník

Vane, meridian, vane wheel impeller, conform transformation, singularity method, Euler equation, velocity triangle

Bibliografická citace

PAVLÍK, J. *Širokopásmová Francisova turbína*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 57 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Miloslav Haluza, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně. Vycházel jsem ze svých znalostí, odborných konzultací a uvedené literatury.

V Brně dne 23.5.2011

.....

Jan Pavlík

Poděkování

Na tomto místě chci poděkovat všem, kteří se podíleli na této diplomové práci, jmenovitě:

doc. Ing. Miloslavu Haluzovi, CSc. - za vedení diplomové práce, poskytnutí velkého množství podkladů, znalostí, a za jeho čas a ochotu

Ing. Pavlu Rudolfovi, PhD. - za návrh meridiálního řezu ve Fluentu

Ing. Zdeňku Říhovi – za CFD výpočet oběžného kola

Ing. Petru Fialovi a Bc. Petru Bukovskému – za pomoc s konstruováním v SolidWorks

Obsah

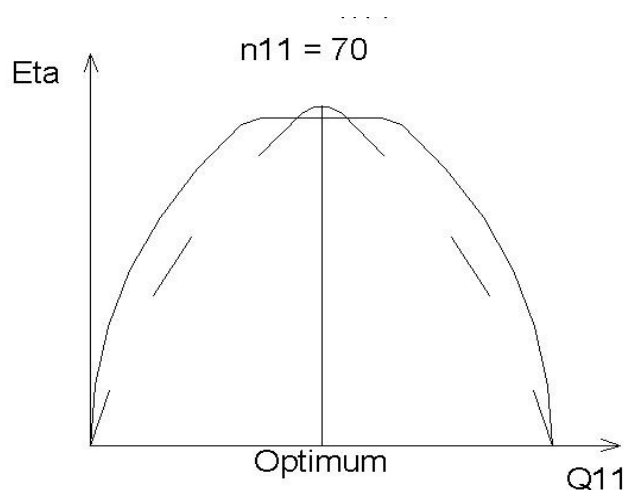
1. Úvod	6
1.1 Uvedení do problematiky.....	6
1.2 Požadované parametry turbíny	7
2. Použitá teorie	8
2.1 Metoda singularit	8
2.2 Singularitní řešení radiální lopatkové mříže	12
2.3 Konformní zobrazení	14
3. Hydraulické výpočty	18
3.1 Návrh meridiálního řezu	18
3.2 Výpočet nastavení úhlu lopatek rozvaděče.....	25
3.3 Konformní zobrazení	26
3.4 Metoda singularit	27
3.4.1 Řešení pro náboj $n_s = 115$	27
3.4.2 Řešení pro věnec $n_s = 115$	27
3.4.3 Řešení pro náboj $n_s = 120$	27
3.4.4 Řešení pro věnec $n_s = 120$	28
3.4.5 Řešení pro náboj $n_s = 110$	28
3.4.6 Řešení pro věnec $n_s = 110$	29
3.5 Souřadnice ξ – η	29
3.6 Převod do kartézského souřadného systému.....	31
4. Konstruování oběžného kola v programu SolidWorks	37
5. Pevnostní výpočty	43
5.1 Výpočet hřídele.....	43
5.2 Výpočet per.....	44
5.3 Výpočet tloušťky oběžné lopatky	44
5.4 Výpočet tloušťky desek oběžného kola	45
5.5 Namáhání od odstředivé síly.....	46
5.6 Výpočet odlehčovacích otvorů	47
6. Řešení rozváděcích lopatek.....	48
6.1 Výpočet rychlostí.....	49
7. CFD výpočet.....	50
8. Závěr.....	55
9. Seznam použité literatury.....	55
10. Seznam citací.....	55
11. Seznam použitých symbolů a zkratk.....	56

1. Úvod

1.1 Uvedení do problematiky

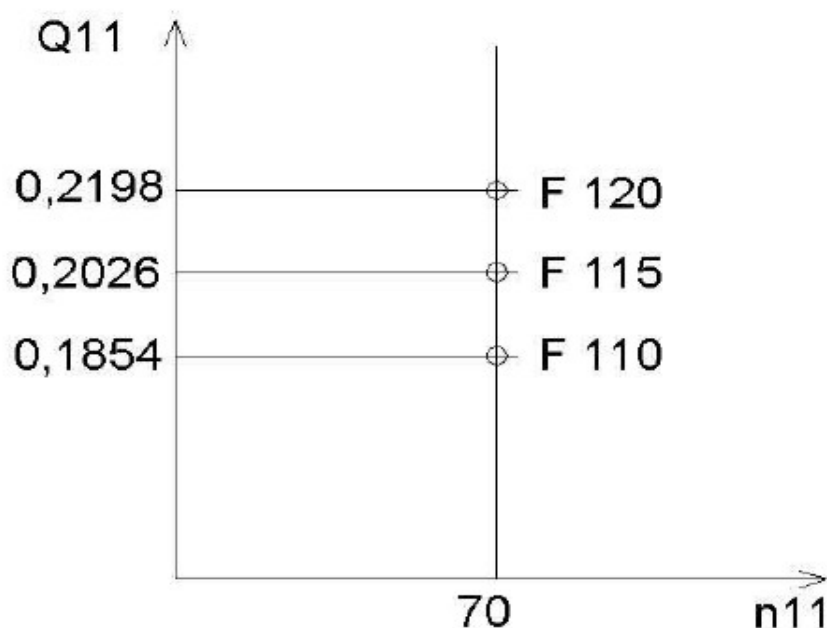
Při provozování vodní turbíny dochází často ke změnám průtoku, zejména, jedná-li se o průtočnou vodní elektrárnu, kde průtok závisí na ročním období a aktuálních klimatických podmínkách.

Klasická Francisova turbína má nejvyšší účinnost v optimálním provozním bodě; pokud však dojde kvůli vnějším podmínkám k jeho změně, účinnost klesá. Z toho důvodu byla navržena modifikace: oběžné kolo turbíny má tři typy lopatkových mříží; každá je nalaďena na jiný provozní bod (klasická Francisova turbína má všechny lopatky totožné). Účinnost v optimu je oproti klasické Francisově turbíně snižena, avšak účinnost v obou krajních provozních bodech by měla být vyšší. Mění se tedy pouze průtok, spád a otáčky se nemění.



Obr.1: Předpokládané srovnání klasické a širokopásmové Francisovy turbíny z hlediska účinnosti

Účinnost širokopásmové FT je znázorněna plnou čarou, klasické FT přerušovanou čarou.



Obr.2: Provozní body širokopásmové turbíny

1.2 Požadované parametry turbíny

Průměr OK	$D = 350 \text{ mm}$
1. specifické otáčky	$n_s = 110$
2. specifické otáčky	$n_s = 115$
3. specifické otáčky	$n_s = 120$
Průtok při $n_s = 110$	$Q = 160,56 \text{ l.s}^{-1}$
Průtok při $n_s = 110$	$Q = 175,5 \text{ l.s}^{-1}$
Průtok při $n_s = 115$	$Q = 191,2 \text{ l.s}^{-1}$
Spád	$H = 50 \text{ m}$
Otáčky	$n = 1414,2 \text{ min}^{-1}$
Hydraulická účinnost	$\eta_h = 86\%$
Vstupní šířka OK	$b_0 = 34 \text{ mm}$
Výstupní šířka OK	$b_4 = 126,96 \text{ mm}$

Pozn.: Oběžné kolo širokopásmové Francisovy turbíny vychází z oběžného kola klasické Francisovy turbíny $n_s = 115$ s 11 lopatkami, které bylo navrženo dříve. Hydraulika obou kol je samozřejmě jiná.

2. Použitá teorie

Při hydraulických výpočtech lopatek oběžného kola bylo použito konformního zobrazení a metody singularit. V této kapitole bude popsána podstata obou výpočtů, které se kvůli jejich náročnosti prováděly přes počítač v programu BASIC.

Použitá teorie je detailně probrána ve [2], v této diplomové práci je problém pouze nastíněn a poté je uvedeno přímo řešení.

2.1 Metoda singularit

Tato metoda řeší obtékání profilů tekutinou, jejím cílem je určit v každém bodě rychlost a tlak. Při obtékání vzniká kolem profilů cirkulace, která je spojena s existencí vírových jader; celková cirkulace kolem nich tvoří cirkulaci kolem daného profilu.

Při obtékání profilu skutečnou kapalinou o nízké viskozitě vzniká v těsné blízkosti profilu mezní vrstva, ve které se částice kapaliny pohybují vířivě kvůli tangenciálním silám; mimo mezní vrstvu je možné proudění považovat za potenciální. Zavedeme souřadný systém $[x,y]$ ve směru tečny a normály a na ose y uvažujme element kapaliny v mezní vrstvě. Elementární cirkulace kolem něj se určí takto:

$$d^2\Gamma = \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) dx dy \quad (1)$$

Podle Prandtlovy teorie mezní vrstvy můžeme zanedbat člen dv_y/dx oproti členu dv_x/dy a výraz pro elementární cirkulaci se tak zjednoduší:

$$d^2\Gamma = \frac{\partial v_x}{\partial y} dx dy \quad (2)$$

Pokud tento výraz zintegrujeme podle souřadnice y , dostaneme rychlost na okraji mezní vrstvy. Zavedeme veličinu povrchovou hustotu cirkulace určenou vztahem

$$\chi_k = \frac{d\Gamma}{dK} \quad (3)$$

kde dK je element obrysu.

Zintegrováním tohoto vztahu po obrysu dostaneme cirkulaci kolem celého profilu

$$\Gamma = \int_K \chi_{\kappa} dK \quad (4)$$

Lopatky hydraulických strojů jsou poměrně tenké a proto můžeme tento vztah zjednodušit – zavedeme pojem tenký profil, který definujeme takto

$$dK_h = dK_d = dL \quad (5)$$

Výpočet cirkulace na tenkém profilu lze provést integrací podél střední čáry

$$\Gamma = \int_L \chi dL \quad (6)$$

Střední rychlost na střední čáře se určí jako průměrná hodnota rychlostí na horní a dolní straně tenkého profilu

$$v_{LS} = \frac{1}{2}(v_{Kh} + v_{Kd}) \quad (7)$$

Z toho vyplývají i vztahy pro rychlosti v_{kh} a v_{kd}

$$v_{Kh} = v_{LS} + \frac{\chi}{2}$$

$$v_{Kd} = v_{LS} - \frac{\chi}{2} \quad (8)$$

Tyto vztahy však platí pouze v případech, kdy jsou tečny střední čáry a povrchu prakticky rovnoběžné. Pokud tomu tak není, nahrazujeme rychlost v_k její tečnou složkou v_{kt} :

$$v_{kt} = v_{LS} \pm \frac{\chi}{2} \quad (9)$$

Mezi rychlostí v_k a její tečnou složkou v_{kt} platí tento vztah:

$$v_K = \frac{v_{Kt}}{\sqrt{1 + \delta'^2}}$$

$$\frac{d\delta}{dL} = \delta'$$

(10)

kde δ je poloviční tloušťka profilu.

Zavedli jsme rychlost na střední čáře profilu; to znamená, že jsme zavedli do profilu proudění. Obrys profilu K musí být tvořen uzavřenou proudnicí, což znamená, že uvnitř profilu se nachází zdroje a propady, jejichž celková mohutnost se rovná nule.

Při uvažování tenkého profilu je umístíme na střední čáru – na jejím elementu dL je zdroj o mohutnosti dQ . Pak zavádíme hustotu zdrojů q :

$$q = \frac{dQ}{dL}$$

(11)

Ze zdroje o mohutnosti dQ vytéká kapalina tak, že na obě strany proudí symetricky průtok $dQ/2$. Rychlost vyvolaná tímto elementárním zdrojem je kolmá na element dL a její velikost se rovná

$$v_{rv} = \frac{1}{2} \frac{dQ}{dL} = \frac{q}{2}$$

(12)

Na střední čáře se tedy nachází elementární cirkulace – zdroje a propady. Tyto útvary se nazývají singularity. Bod, ve kterém je singularita umístěna, se nazývá singulární.

Za účelem zkoumání proudových poměrů umístíme osamocený profil do souřadného systému $\eta - \xi$. Tento profil je umístěn v paralelním proudu o rychlosti v_∞ , takže proudové pole je vytvořeno superpozicí paralelního proudu a proudění indukovaného singularitami na střednici.

Je třeba splnit dvě kinematické podmínky

1. Relativní rychlost je tečná ke střední čáře profilu ve všech jejích bodech.

2. Na elementární ploše profilu platí rovnice kontinuity.

Singularita umístěná v ξ'_L vyvolá v bodě ξ_L komplexně sdruženou rychlost

$$dv_i = \frac{q' + i\eta'}{2\pi} \frac{dL'}{\xi_L - \xi'_L} \quad (13)$$

V tomto bodě indukují všechny singularity na střední čáře profilu rychlost danou tímto vztahem

$$v_i = \frac{1}{2\pi} \int_L (q' + i\eta') \frac{dL'}{\xi_L - \xi'_L} \quad (14)$$

Tato rovnice je dále poměrně složitě řešena ve [2] pomocí Glauertových řad a výsledek vypadá takto

$$\left| \frac{v_K}{v_{\infty}} \right| = |A_0| \sqrt{\frac{2h}{R} \cos \alpha_1} \quad (15)$$

čímž je stanovena rychlost na povrchu obtékaného profilu. Tlaky plynou z Lagrangeova integrálu (unášivá rychlost je rovna 0).

$$\frac{v_K^2}{2} + \frac{p_K}{\rho} = \frac{v_{\infty}^2}{2} + \frac{p_{\infty}}{\rho} \quad (16)$$

2.2 Singularitní řešení radiální lopatkové mříže

Tato kapitola je rozšíření předchozí teorie řešení osamoceného profilu.

Podle základních předpokladů je pole absolutních rychlostí potenciální na proudové ploše i v Gaussově rovině. Základní proud o rychlosti c_∞ je superponován rychlostmi indukovanými zdrojovými a vírovými singularitami na středních čarách profilů i rychlostmi indukovanými plošně rozloženými zdroji.

Zdroj d^2Q umístěný v bodě ξ'_L indukuje v bodě ξ_L referenčního profilu elementární komplexně sdruženou rychlost

$$d^2 c_B = \frac{d^2 Q}{2\pi} \frac{1}{\xi'_L - \xi_L} = - \frac{1}{2\pi} \frac{1}{b} \frac{db}{d\xi} c_\xi \frac{1}{\xi_L - \xi'_L} d\xi'_L d\eta'_L \quad (17)$$

kde $d\xi'_L d\eta'_L$ je elementární plocha v okolí bodu ξ'_L .

Cílem je stanovit rychlost c_B jako funkci referenčního profilu. Proto se zavádí oblast T obsahující referenční profil. V této oblasti se výsledná rychlost určí takto

$$c_B = - \frac{1}{2t} \int_T \left[\frac{1}{b} \frac{db}{d\xi} c_\xi \coth \frac{\pi}{t} (\xi_L - \xi'_T) d\xi'_T d\eta'_T \right] \quad (18)$$

kde t je šířka oblasti ve směru η .

Rychlost c_B je tedy funkcí c_ξ , neboli její složky do směru osy ξ . Není ji tedy možné určit v jednom kroku, takže je třeba nahradit c_B její první aproximací $c_B^{(1)}$. Při jejím určení se vyjde z průměrných rychlostí c' ve směrech os, která se skládá z rychlosti c_∞ , průměrné rychlosti indukované zdroji a víry na středních čarách profilů a z průměrné rychlosti c_B z plošně rozložených elementárních zdrojů.

Proudění v Gaussově rovině si lze představit jako průtok vrstvou proměnné tloušťky b , přičemž b se mění pouze ve směru osy ξ . Proudění v této vrstvě se skládá ze základního proudu, přicházejícího z místa 0 a z rychlostí indukovaných singularitami na středních čarách profilu (odpovídají průtoky Q_0 a Q_1).

Celkový průtok Q se určí jejich součtem

$$Q = Q_0 + Q_1 = c_m t b_R + \int_{\xi_1}^{\xi_2} q^* b' d\xi' \quad (19)$$

Indukovaná rychlost vypadá takto

$$c_i = \frac{1}{2\pi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} (q^{*'} + i\gamma^{*'}) \frac{\pi}{t} (\xi_T - \xi') \coth \frac{\pi}{t} (\xi_T - \xi_L') \quad (20)$$

Po úpravách dostáváme

$$- \operatorname{sign} \omega \frac{2\pi}{Nt} \frac{r^2 |\omega|}{c_m} = - \operatorname{sign} \omega \frac{R |\omega|}{c_m} \frac{2\pi}{Nt} R \left(\frac{r}{R} \right)^2 = - \operatorname{sign} \omega \frac{U}{c_m} \left(\frac{r}{R} \right)^2 = - \operatorname{sign} \omega \frac{1}{\varphi} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \quad (21)$$

φ je rychlostní číslo definované jako poměr meridiální a unášivé rychlosti. Je stejná na proudové ploše i v Gaussově rovině.

$$\varphi = \frac{c_m}{u} \quad (22)$$

S využitím předcházející rovnice můžeme psát energetickou přeměnu mezi vstupem a výstupem do oběžného kola

$$\Delta Y = \operatorname{sign} \omega (c_{m3} u_3 \cotg \alpha_3 - c_{m0} u_0 \cotg \alpha_0) \quad (23)$$

Zavádíme tlakové číslo ψ definované jako poměr energetické přeměny ΔY_k měrné kinetické energie.

$$\psi = \frac{\Delta Y}{\frac{u_R^2}{2}} \quad (24)$$

S jeho využitím dostáváme finální tvar Eulerovy rovnice pro metodu singularit

$$\frac{\psi}{2\varphi} = \operatorname{sign} \theta \left(\frac{c_{3\xi}}{c_m} \cot g u_3 - \frac{c_{0\xi}}{c_m} \cot g u_0 \right) = \operatorname{sign} \theta \left(\frac{b_R}{b_3} \cot g u_3 - \frac{b_R}{b_0} \cot g u_0 \right) \quad (25)$$

2.3 Konformní zobrazení

Účelem konformního zobrazení je transformovat proudovou plochu S^* do Gaussovy roviny.

Důvodem pro tuto transformaci je to, že přímé singularitní řešení na prostorovém útvaru by bylo velmi náročné. Proto se převádí proudová plocha do roviny ζ , ve které se vyřeší rychlostní poměry, ty se zpětně převedou do plochy S^* , kde se dopočítá rozložení tlaků.

Gaussova rovina ζ má souřadnice ξ a η . Na proudové ploše zavádíme meridiánovou souřadnici σ a úhlovou souřadnici φ . Zobrazení má být takové, aby se meridiální směr ve směru souřadnice σ na ploše S^* převedl v rovině ζ do směru osy ξ a aby obvodovému směru na ploše S^* (souřadnice r φ) odpovídal směr osy η .

Důležitou vlastností konformního zobrazení je zachování úhlů. Pro úhel α v obou obdélnících platí

$$\operatorname{tg} u = \frac{r(\sigma) \cdot d\varphi}{d\sigma} = \frac{d\eta}{d\xi} \quad (26)$$

přičemž poloměr r je funkcí nezávislé proměnné σ .

Konformní zobrazení také zachovává poměry elementárních délek. Pro obecný bod A platí

$$\mu(A) = \frac{d\xi}{d\sigma} = \frac{d\eta}{r(\sigma) \cdot d\varphi} \quad (27)$$

Za těchto předpokladů je postup výpočtu následující:

Určení konstant k_1 a k_2

Ze vstupního a výstupního rychlostního trojúhelníku známe úhly β_1 a β_2 . Úhly β_1' a β_2' určíme takto

$$\beta_1' = 90 - \beta_1$$

$$\beta_2' = 90 - \beta_2$$

(28)

Pomocí těchto úhlů určíme hodnoty k_1 a k_2

$$k_1 = \frac{\beta_1' + \beta_2'}{2}$$

$$k_2 = \frac{\beta_2' - \beta_1'}{h}$$

(29)

obvykle volíme $h = 100$

Určení bodů o souřadnicích x a r

- volíme dle geometrie oběžného kola, krajní body jsou známy, vnitřek je rovnoměrně rozdělen

Určení souřadnice σ

$$\sigma_1 = 0$$

$$\sigma_n = \sqrt{(r_n - r_{n-1})^2 + (x_n - x_{n-1})^2}$$

(30)

Určení integrálu

Integrál

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r}$$

určujeme numericky, pomocí lichoběžníkové metody

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} = \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}{2} (\sigma_2 - \sigma_1)$$

$$\int_{\sigma_1}^{\sigma_3} \frac{d\sigma}{r} = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{r} + \frac{\frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_2}}{2} (\sigma_3 - \sigma_2)$$

(31)

Dále postupujeme analogicky.

Určení konstanty a

$$a = \int_{\sigma_1}^{\sigma_n} \frac{d\sigma}{r} = \frac{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_n}}{2} \cdot \sigma_n$$

(32)

Určení souřadnice ξ

$$\xi = h \left(\frac{1}{a} \int_{\sigma_1}^{\sigma} \frac{d\sigma}{r} - \frac{1}{2} \right)$$

(33)

Určení souřadnice η

$$\eta_1 = 0$$

$$\eta_n = \frac{1}{k_2} \ln \frac{\cos \left(k_1 - k_2 \frac{h}{2} \right)}{\cos \left(k_1 + k_2 \frac{\xi_n}{2} \right)} + \eta_{n-1}$$

(34)

Určení úhlu φ

$$\varphi = \frac{a}{h} \cdot \eta$$

(35)

Určení souřadnic střední čáry lopatky

$$y = R \cdot \sin \varphi$$

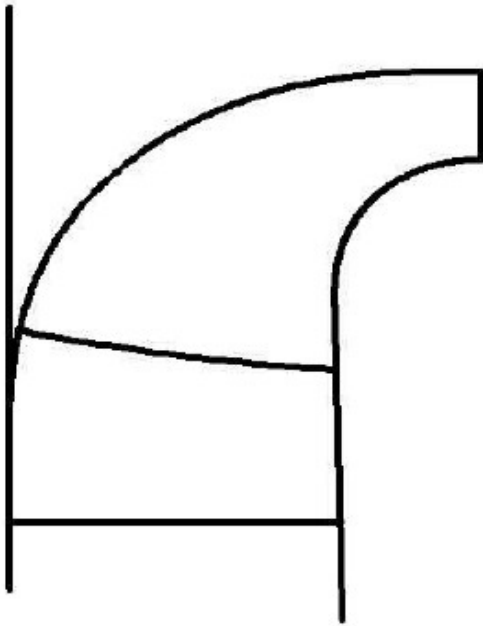
$$z = R \cdot \cos \varphi$$

(36)

3. Hydraulické výpočty

3.1 Návrh meridiálního řezu

Při návrhu meridiálního řezu bylo použito tvaru meridiánu podle prof. Nechleby.



Obr.3 : Tvar meridiánu dle [1]

Pro výpočet meridiální rychlosti c_m vyjdeme ze vztahu:

$$c_m = \frac{Q}{2\pi r b}$$

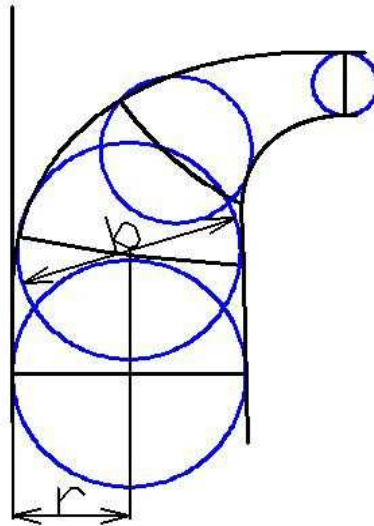
Dostáváme tedy vstupní a výstupní rychlosti

$$c_{m0} = 4,7 \text{ m.s}^{-1}$$

$$c_{m4} = 3,6 \text{ m.s}^{-1}$$

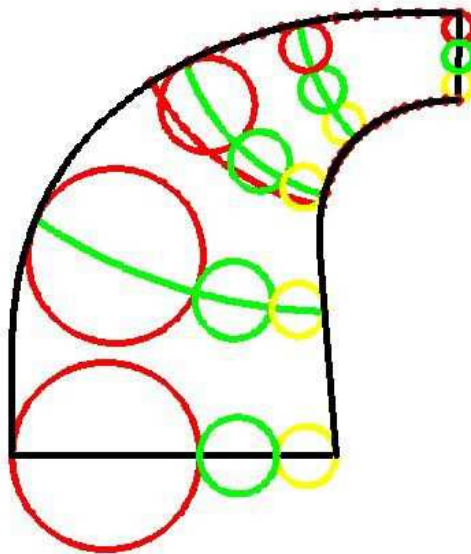
Pro návrh meridiálního řezu bylo použito nejprve Francisovy metody, která předpokládá na ekvipotenciále konstantní meridiální rychlost, a proto se zde nepoužívá proudových kol.

Předpokládáme přibližně konstantní meridiální rychlost.



Obr. 4 : Francisova metoda

Ekvipotenciály jsou zde vyznačeny pro zpřesnění Francisovy metody pomocí proudových kol. Ze zkušeností vyplývá, že rychlost na ekvipotenciále konstantní není, v místě největšího zakřivení jsou rychlosti v proudových kolech v poměru přibližně 0,8:1:1,2. Rychlosti v druhém proudovém kole jsou stejné jako u Francisovy metody, v prvním a třetím kole došlo k jejich poklesu, resp. nárůstu.



Obr. 5: Proudová kola

Legenda

Červené kružnice – první proudové kolo

Zelené kružnice – druhé proudové kolo

Žluté kružnice – třetí proudové kolo

Pro určení polohy a velikosti kružnic na výstupní hraně bylo použito Stokesovy proudové funkce ψ ,

kteřá je na proudnici konstantní. V meridialním řezu můžeme za proudnice považovat i nábojovou a věncovou hranu, na které je samozřejmě rychlost nulová. Na věncové hraně zavádíme

$$\psi_A = 0$$

Pro změnu proudové funkce platí:

$$\Delta \psi = \frac{Q}{2\pi}$$

Můžeme tedy určit hodnotu proudové funkce na nábojové hraně:

$$\psi_B = \frac{Q}{2\pi} = \frac{0,1755}{2\pi} = 0,0279 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Pro proudnici mezi prvním a druhým proudovým kolem platí:

$$\psi_1 = \psi_B - \frac{Q_p}{2\pi} = 0,0279 - \frac{0,0585}{2\pi} = 0,0186 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

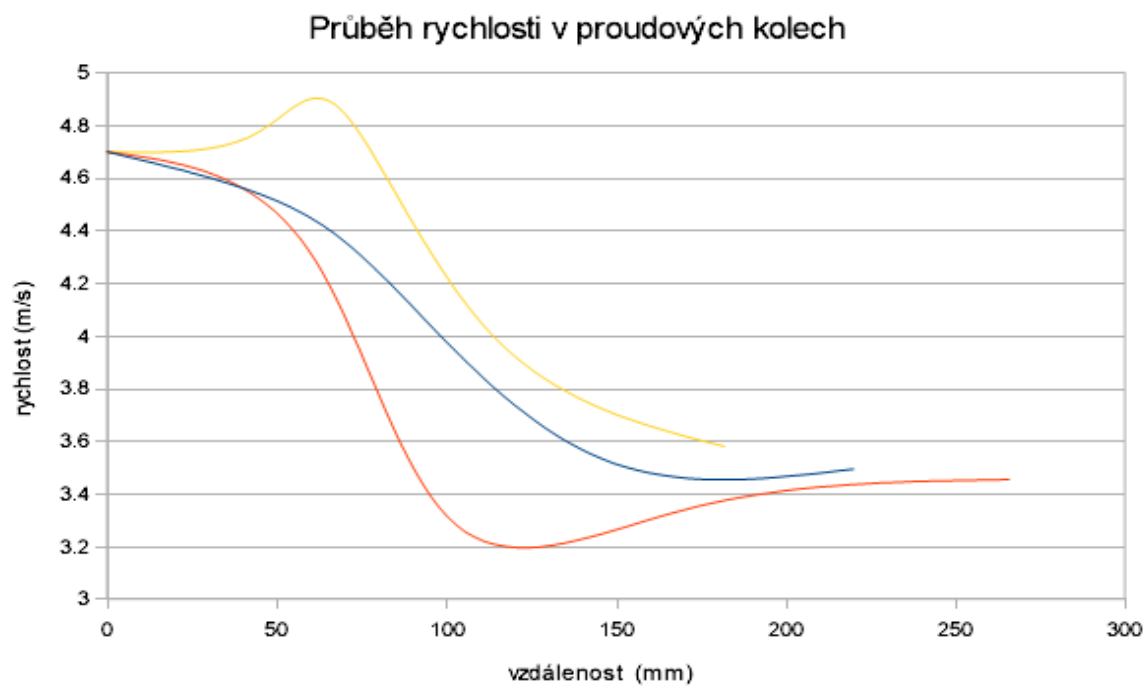
A pro proudnici mezi druhým a třetím proudovým kolem:

$$\psi_2 = \psi_B - \frac{Q_p}{\pi} = 0,0279 - \frac{0,0585}{\pi} = 0,00927 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro polohu proudnic na výstupní hraně platí:

$$r_1 = b_4 \cdot \sqrt{\frac{\psi_1}{\psi_B}} = 0,12696 \cdot \sqrt{\frac{0,0186}{0,0279}} = 0,1036 \text{ m}$$

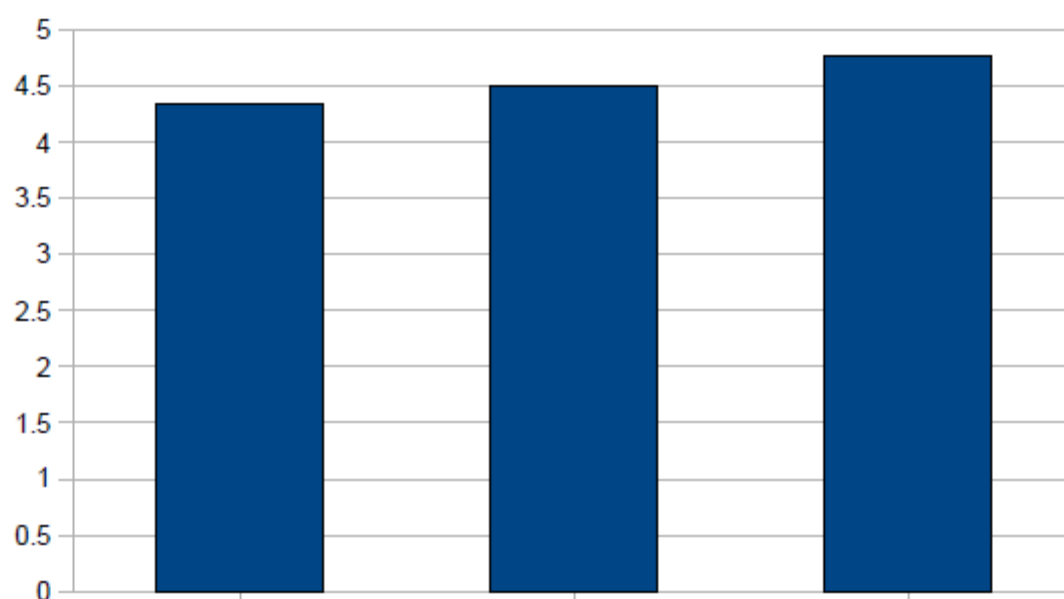
$$r_2 = b_4 \cdot \sqrt{\frac{\psi_2}{\psi_B}} = 0,12696 \cdot \sqrt{\frac{0,009279}{0,0279}} = 0,0732 \text{ m}$$



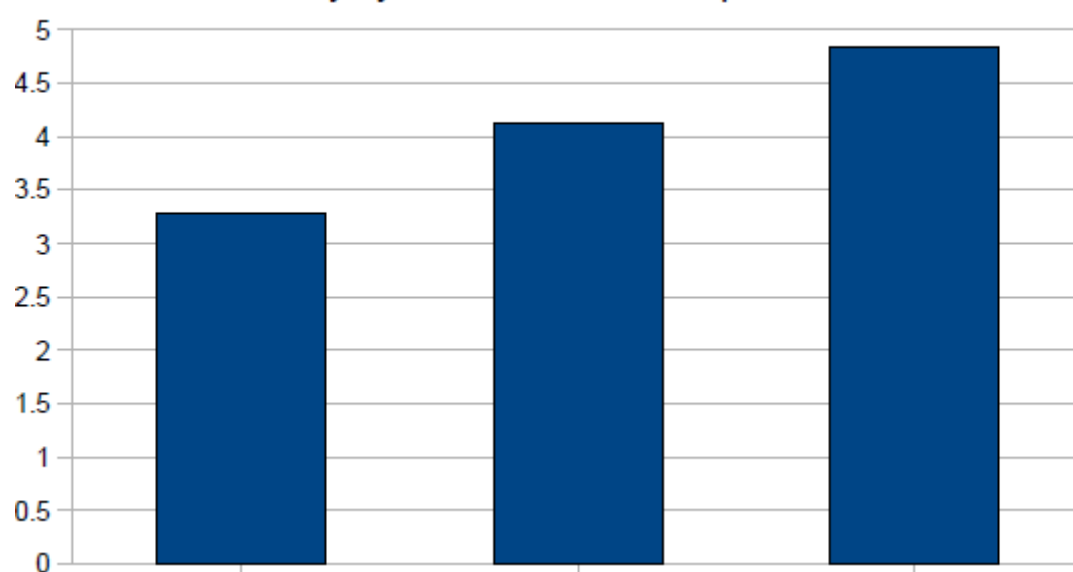
Obr. 6: Průběh rychlosti v jednotlivých proudových kolech

Následující grafy představují hodnoty rychlostí pro jednotlivá proudová kola na ekvipotenciálách.

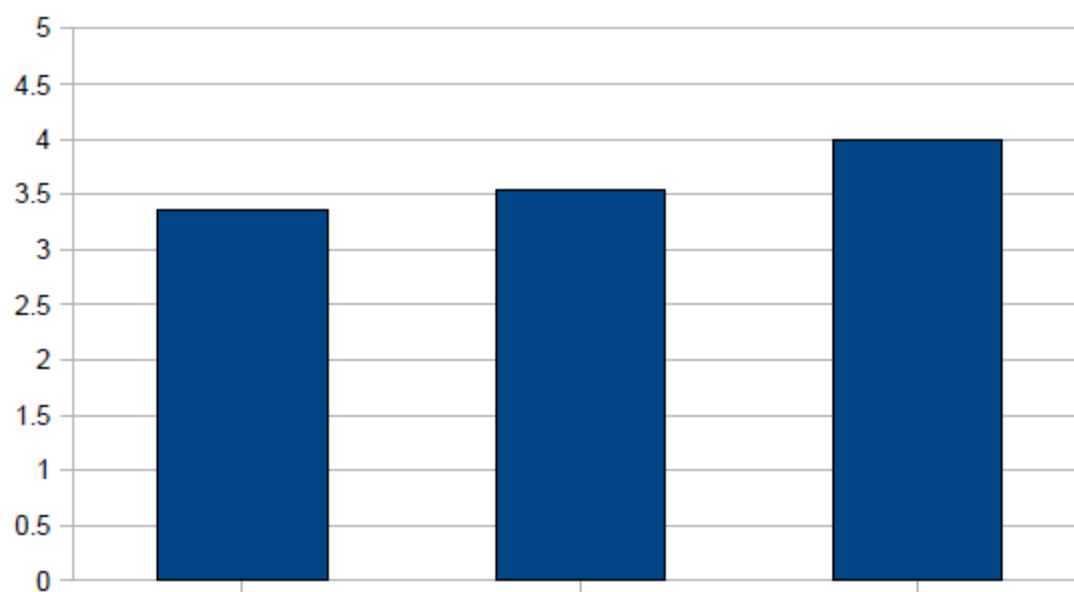
Hodnoty rychlostí na druhé ekvipotenciále



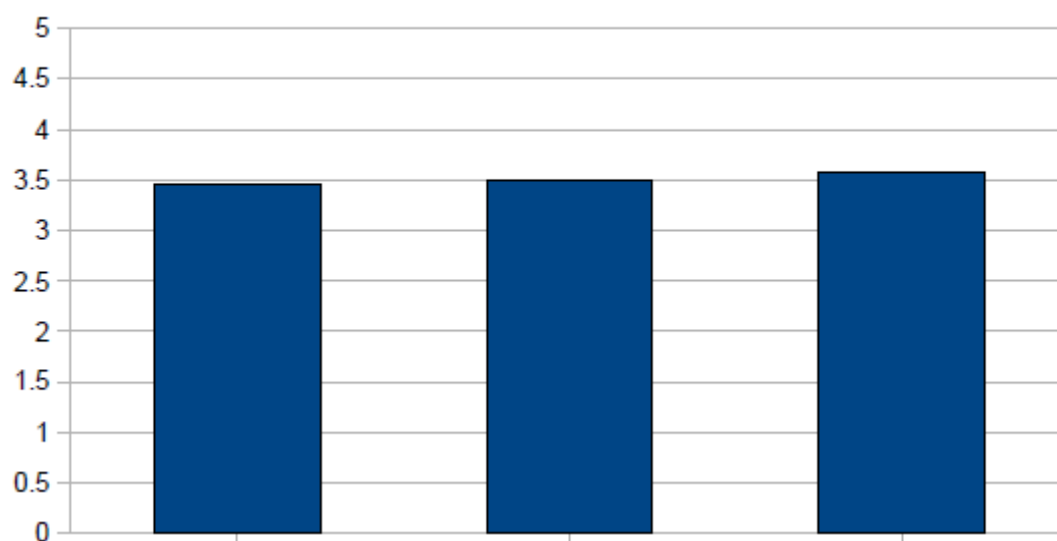
Hodnoty rychlostí na třetí ekvipotenciále



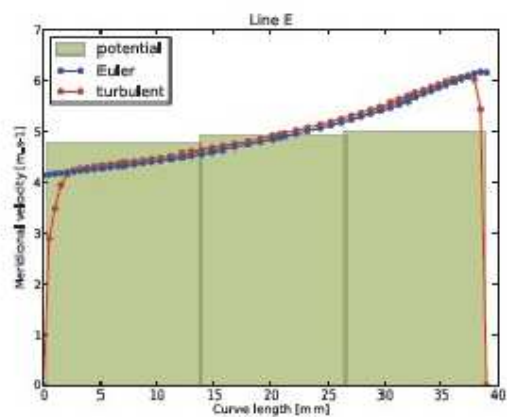
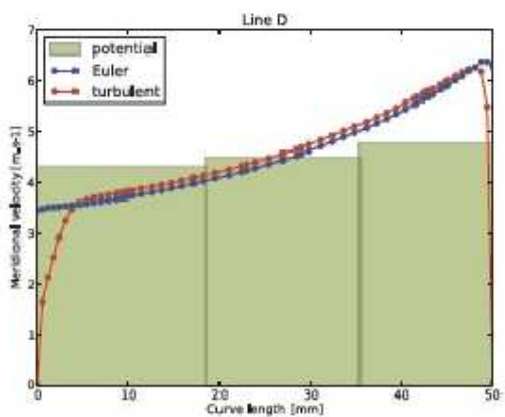
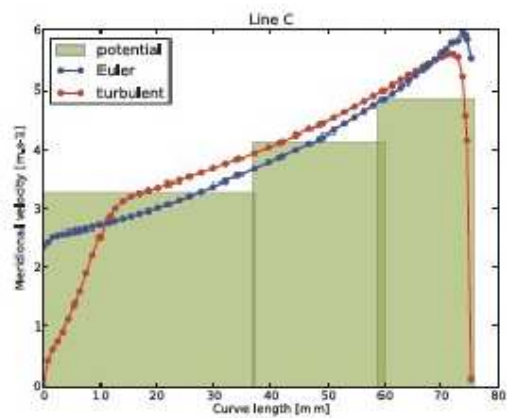
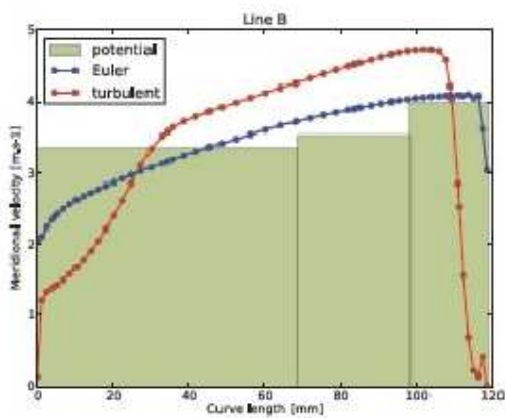
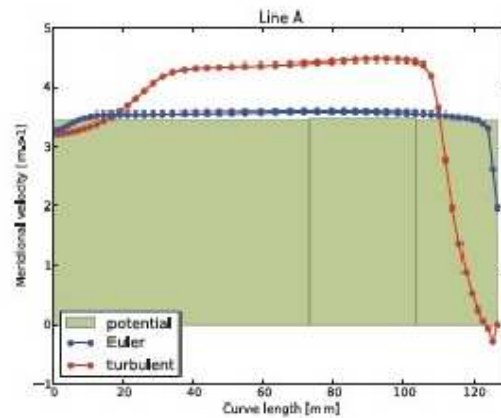
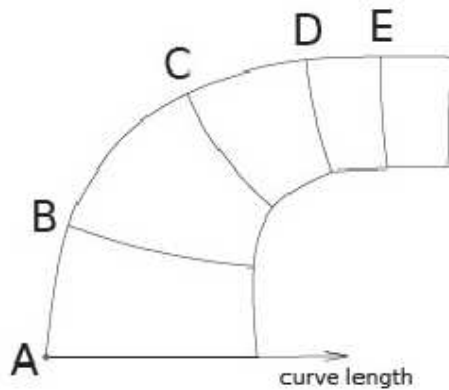
Hodnoty rychlostí na čtvrté ekvipotenciále



Hodnoty rychlostí na výstupu (pátá ekvipotenciála)



Výpočet pomocí Fluentu



Zhodnocení obou postupů

Mírné odlišnosti rychlostí jsou způsobeny tím, že Fluent narozdíl od metody proudových kol počítá s viskozitou i vířením, zatímco metoda proudových kol viskozitu neuvažuje. Svou roli samozřejmě hraje i to, že metoda proudových kol je spíše historická metoda a má tedy oproti Fluentu poněkud nižší přesnost.

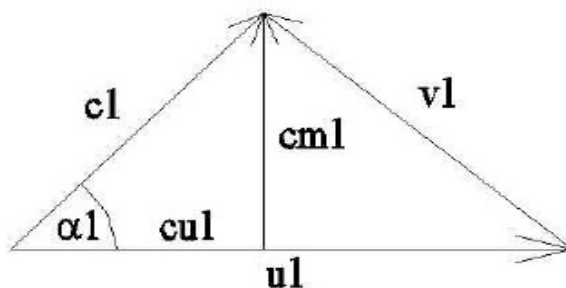
3.2 Výpočet nastavení úhlu lopatek rozvaděče

Vyjdeme z Eulerovy turbínové rovnice, předpokládáme, že člen $u_2 c_{u2}$ je roven 0.

$$u_1 \cdot c_{u1} = g \cdot H \cdot \eta_{11}$$

a pro velikost rychlosti c_{u1} tedy platí:

$$c_{u1} = \frac{gH\eta_H}{u_1} = \frac{gH\eta_H}{2\pi R\omega} = \frac{9,81 \cdot 50 \cdot 0,86}{2\pi \cdot 0,175 \cdot 23,57} = 16,276 \text{ ms}^{-1}$$



Obr. 7: Rychlostní trojúhelník

Rychlost c_{u1} se se změnou specifických otáček n_s nemění, protože otáčky zůstávají konstantní.

Pro základní $n_s = 115$ platí:

$$c_{m1} = 4,7 \text{ ms}^{-1}$$

$$\text{tg} \alpha_1 = \frac{c_{m1}}{c_{u1}} = \frac{4,7}{16,276} = 0,28876$$

$$\alpha_1 = 16^\circ 6'$$

Při změně průtoku dochází ke změně meridiální rychlosti c_m a tedy i ke změně úhlu α_1 .

Pro $n_s = 110$ platí:

$$c_{m1} = 4,3 \text{ ms}^{-1}$$

$$\text{tg} \alpha_1 = \frac{c_{m1}}{c_{u1}} = \frac{4,3}{16,276} = 0,264$$

$$\alpha_1 = 14^\circ 47'$$

Pro $n_s = 120$ platí:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{c_{m1}}{c_{u1}} = \frac{5,12}{16,276} = 0,3145$$

$$c_{m1} = 5,12 \text{ ms}^{-1}$$

$$\alpha_1 = 17^\circ 27'$$

3.3 Konformní zobrazení

Při konformním zobrazení středních čar lopatek byla nejprve použita teorie lineární změny úhlu β na souřadnici ξ . Byl vytvořen program v programu MS Excel, kde se jako vstup zadávaly hodnoty β_1 s pruhem a β_2 s pruhem; výstupní hodnoty byly body o souřadnicích η a ξ . Bylo nutné použít šest sešitů MS Excel, protože střední čára lopatky byla vytvořena pro věncovou i nábojovou stranu a uvažujeme tři hodnoty specifických otáček. Po zpětném převedení na souřadnice x , y , z a vykreslení střednice se však tento postup ukázal jako málo přesný, proto byla nasazena teorie kvadratické změny úhlu β na souřadnici ξ . Jedna se o iterační výpočet, který je poměrně náročný a byl proto na něj použit program v BASICu; výpočet byl poté doladěn metodou singularit.

Výpočet byl prováděn pro mříž s 11 lopatkami, které má OK srovnávací klasické Francisovy turbíny; při změně počtu lopatek na 12 se změní pouze jejich rozteč.

3.4 Metoda singularit

3.4.1 Řešení pro náboj $n_s = 115$

$\varphi = 0,181135171$
 $t = 46,413181 \text{ mm}$
 $\eta = -120,545 \text{ mm}$
 $\alpha_0 = 74^\circ$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{ob} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [\text{m}]$
-35	-71	75,62543	20,4518	49,3586
-35	-72	75,63081	13,73665	49,6922
-35	-73	75,65575	6,185651	50,009

3.4.2 Řešení pro věnec $n_s = 115$

$t = 98,70949208 \text{ mm}$
 $\eta = -244,1502701 \text{ mm}$
 $\alpha_0 = 74^\circ$
 $\varphi = 0,181135171$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{ob} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [\text{m}]$
-40	-72	73,47324	-1,71543	50,61726
-45	-71	72,82892	9,893849	48,3937
-35	-73	74,01006	-13,7853	52,9609
-35	-71,6	73,96575	-3,47393	50,95191
-35	-71,3	73,95644	-1,3755	50,55266
-35	-71	73,94714	0,673669	50,16348

3.4.3 Řešení pro náboj $n_s = 120$

$t = 46,413181 \text{ mm}$
 $\eta = -120,545 \text{ mm}$
 $\alpha_0 = 72,55^\circ$
 $\varphi = 0,19657$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{ob} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [\text{m}]$
-35	-73	74,27753	-8,88708	50,23801
-40	-72,5	73,101	-1,24332	49,84859
-43	-73	73,63628	-2,9512	49,93491
-47	-73	73,24706	0,264578	49,77247
-52	-73,5	72,67367	0,45593	49,76281
-53	-74	72,54841	-2,89223	49,93193

3.4.4 Řešení pro věnec $n_s = 120$

$$t = 98,70949208 \text{ mm}$$

$$\eta = -244,1502701 \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = 72,55^\circ$$

$$\varphi = 0,19657$$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{ob} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [m]$
-53	-71	69,06367	2,296754	49,31576
-43	-71	71,04041	-7,80763	51,40765
-38	-69,5	71,68359	-3,05692	50,41623
-33	-69	72,26067	-4,37926	50,69027
-30	-68	72,54153	-1,1873	50,03076

3.4.5 Řešení pro náboj $n_s = 110$

$$t = 46,413181 \text{ mm}$$

$$\eta = -120,545 \text{ mm}$$

$$\alpha_0 = 75,2182^\circ$$

$$\varphi = 0,165243$$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{ob} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [m]$
-15	-72	77,82813	18,79726	49,02675
-5	-73	78,13419	4,580498	49,6634
-35	-73	77,05163	23,39237	48,8257
-35	-75	77,0602	6,005542	49,6074
-45	-76	76,51023	3,752898	49,6932
-55	-77	75,73925	1,938318	49,7109
-60	-77	75,20397	7,710884	49,5283

Pozn.: V tomto případě je zpracováváný spád přibližně o 0,5 m nižší; projeví se to nižší účinností.

Vyšší hodnota není možná, protože výstupní úhel je již na krajní hodnotě a při jeho překročení by došlo k ucpání kanálu.

3.4.6 Řešení pro věnec $n_s = 110$

$t = 98,70949208 \text{ mm}$

$\eta = -244,1502701 \text{ mm}$

$\alpha_0 = 75,2182^\circ$

$\varphi = 0,165243$

$\beta_1 [^\circ]$	$\beta_2 [^\circ]$	$\beta_{obl} [^\circ]$	$\beta_3 [^\circ]$	$H_{86\%} [m]$
-30	-72	76,11444	8,605289	48,35401
-40	-73	75,40215	10,09238	48,08932
-45	-74,5	74,97929	2,949389	49,34467
-43	-75	75,19101	-3,8289	50,52034
-43	-74,75	75,18323	-1,51515	50,11864
-43	-74,7	75,18166	-1,06337	50,04038

3.5 Souřadnice $\xi-\eta$

Náboj

ξ (stejně pro všechny n_s)	η ($n_s = 110$)	η ($n_s = 115$)	η ($n_s = 120$)
-50	5,744751	5,744751	5,744751
-46,9727	0,832024	3,629216	1,879644
-42,3775	-5,59257	0,424499	-3,48231
-38,3578	-10,4478	-2,38745	-7,77039
-33,4406	-15,6696	-5,85987	-12,617
-28,9404	-19,9262	-9,09093	-16,7544
-23,942	-24,22	-12,7658	-21,1023
-19,2185	-27,9708	-16,3485	-25,0432
-13,6122	-32,1636	-20,7784	-29,5965
-8,36687	-35,9435	-25,14	-33,8167
-2,22569	-40,3323	-30,5773	-38,8164
4,467406	-45,2498	-37,0075	-44,4833
12,65533	-51,7718	-45,7896	-51,9917
19,03793	-57,5315	-53,5369	-58,5339
28,20221	-67,5249	-66,5406	-69,5759
38,53643	-83,1648	-85,1537	-85,9321
50	-114,8	-114,8	-114,8

Věvec

ξ (stejně pro všechny n_s)	η ($n_s = 110$)	η ($n_s = 115$)	η ($n_s = 120$)
-50	0	0	0
-44,7614	-5,1936	-4,04219	-3,43333
-38,7195	-11,9856	-9,68326	-8,46418
-33,5079	-18,5834	-15,465	-13,8121
-27,4013	-27,2532	-23,428	-21,4035
-22,7869	-34,5249	-30,3779	-28,1961
-17,6324	-43,4323	-39,1802	-36,9811
-12,4715	-53,2331	-49,1846	-47,1731
-6,39477	-65,9754	-62,611	-61,1335
-0,70685	-79,1443	-76,8811	-76,2423
5,40607	-94,6895	-94,0803	-94,6884
10,11758	-107,67	-108,595	-110,336
15,56125	-123,738	-126,561	-129,638
19,92784	-137,422	-141,703	-145,72
26,00993	-157,555	-163,44	-168,299
33,49243	-183,742	-190,278	-195,046
41,18207	-211,719	-216,695	-219,921
50	-244,15	-244,15	-244,15

3.6 Převod do kartézského souřadného systému

Z těchto bodů v souřadnicích ξ a η dostáváme body v kartézském souřadném systému pomocí převodních vztahů.

Pro každý typ lopatky jsou vytvořeny 3D křivky znázorňující náboj, střednici a věnec.

Věnec, $n_s = 120$

x	y	z
84,66	175	7,63E-06
84,07686	165,9786	6,132619
82,59464	157,9496	13,40287
80,58408	150,7213	21,36166
78,37401	144,0031	29,70741
75,68642	137,5845	38,1487
73,18647	131,1581	46,64206
70,65003	124,5933	55,01808
68,11882	117,7629	63,18014
65,64636	110,577	71,04897
63,16253	102,9925	78,53036
60,68136	94,98154	85,55372
58,17739	86,54348	92,04839
55,62599	77,69491	97,95124
52,98797	68,47347	103,2095
50,21856	58,92953	107,7802
47,28996	49,12178	111,6358
44,14902	39,1261	114,777
40,69828	29,04325	117,244
36,85001	18,96854	119,0687

Střednice, $n_s = 120$

x	y	z
101,66	174,7814	-6,18106
101,3682	167,3944	0,956019
100,6296	160,1746	8,406717
99,60072	152,9938	15,8728
98,41124	145,6624	23,13833
96,83949	138,1335	30,05309
95,11594	130,3255	36,59436
93,11184	122,2726	42,66962
90,83176	113,9988	48,25412
88,2944	105,5351	53,35267
85,53987	96,92818	57,96415
82,54842	88,20379	62,12449
79,39497	79,3811	65,86292
76,1179	70,47217	69,21072
72,78262	61,48182	72,18945
69,45325	52,41032	74,80051
66,21941	43,23288	77,02472
63,13693	33,96295	78,79338
60,23075	24,63894	80,03986
57,5321	15,27884	80,71071

Náboj, $n_s = 120$

x	y	z
118,66	174,5628	-12,3621
118,6596	168,8103	-4,22058
118,6665	162,4097	3,422056
118,6379	155,4065	10,51645
118,5402	147,8519	17,02041
118,2721	139,8082	22,90251
117,7006	131,3465	28,14204
116,8539	122,5403	32,73757
115,7147	113,4657	36,7049
114,2473	104,1996	40,07948
112,5525	94,7951	42,92221
110,5084	85,33064	45,30138
108,2114	75,83816	47,3096
105,6843	66,3486	49,03827
103,0177	56,86303	50,56855
100,3098	47,3654	51,94102
97,70053	37,8127	53,13977
95,30424	28,18046	54,01751
93,22147	18,45341	54,38021
91,56001	8,611469	54,05839

Věvec, $n_s = 115$

x	y	z
84,66	175	0
84,13325	166,3992	6,687402
82,77265	158,5699	14,16631
80,84979	151,3592	22,13254
78,70927	144,5409	30,38546
76,04315	137,971	38,68515
73,44134	131,3949	47,00207
70,80466	124,6925	55,20618
68,12605	117,7587	63,2019
65,48941	110,5049	70,92209
62,83531	102,8889	78,27875
60,19008	94,87891	85,20714
57,5375	86,46828	91,63995
54,86416	77,66708	97,5175
52,13921	68,5046	102,7875
49,33929	59,01958	107,4075
46,45538	49,25719	111,3462
43,44965	39,27971	114,5973
40,26402	29,16076	117,1707
36,85001	18,96862	119,0687

Střednice, $n_s = 115$

x	y	z
101,66	174,7814	-6,18107
101,3978	166,6551	0,161484
100,7158	158,8128	6,765509
99,71604	151,1869	13,48036
98,48534	143,5878	20,12469
96,71808	135,9023	26,51599
94,7067	128,0534	32,67048
92,39615	120,0575	38,53513
89,77251	111,9304	44,08064
86,96415	103,6556	49,31015
83,90972	95,2841	54,18957
80,70638	86,79594	58,7251
77,39539	78,20757	62,8995
74,03751	69,51511	66,69662
70,68867	60,72443	70,08797
67,4085	51,82453	73,03751
64,26416	42,79668	75,50034
61,29267	33,66859	77,41659
58,51904	24,47162	78,73531
55,97257	15,21516	79,40842

Náboj, $n_s = 115$

x	y	z
118,66	174,5628	-12,3621
118,6624	166,9109	-6,36443
118,6589	159,0558	-0,63529
118,5815	151,0129	4,826459
118,3502	142,7991	10,02277
117,789	134,439	14,95335
116,9355	125,9542	19,62252
115,8089	117,3656	24,0369
114,3816	108,6977	28,20285
112,7813	99,95207	32,13708
110,9012	91,16119	35,83978
108,8312	82,3222	39,32062
106,5981	73,43741	42,57616
104,2577	64,49431	45,58898
101,8729	55,4741	48,31981
99,50976	46,34697	50,69773
97,24367	37,0853	52,61912
95,12808	27,70053	53,92597
93,21488	18,20686	54,45642
91,56001	8,611404	54,0584

Věvec, $n_s = 110$

x	y	z
84,66	175	3,05E-05
84,22759	167,1627	7,557342
83,07657	159,7206	15,43471
81,33995	152,594	23,49551
79,33253	145,6558	31,65887
76,81461	138,8426	39,78143
74,06211	132,0194	47,82391
71,31515	125,0645	55,75292
68,41401	117,9307	63,46646
65,5219	110,5323	70,92898
62,59089	102,8339	78,0657
59,6718	94,79742	84,82413
56,7704	86,40639	91,14486
53,89173	77,65832	96,97227
51,02375	68,56628	102,2527
48,17359	59,14965	106,9397
45,3505	49,43505	110,993
42,53592	39,46846	114,3841
39,70755	29,29844	117,0859
36,85001	18,96876	119,0687

Střednice, $n_s = 110$

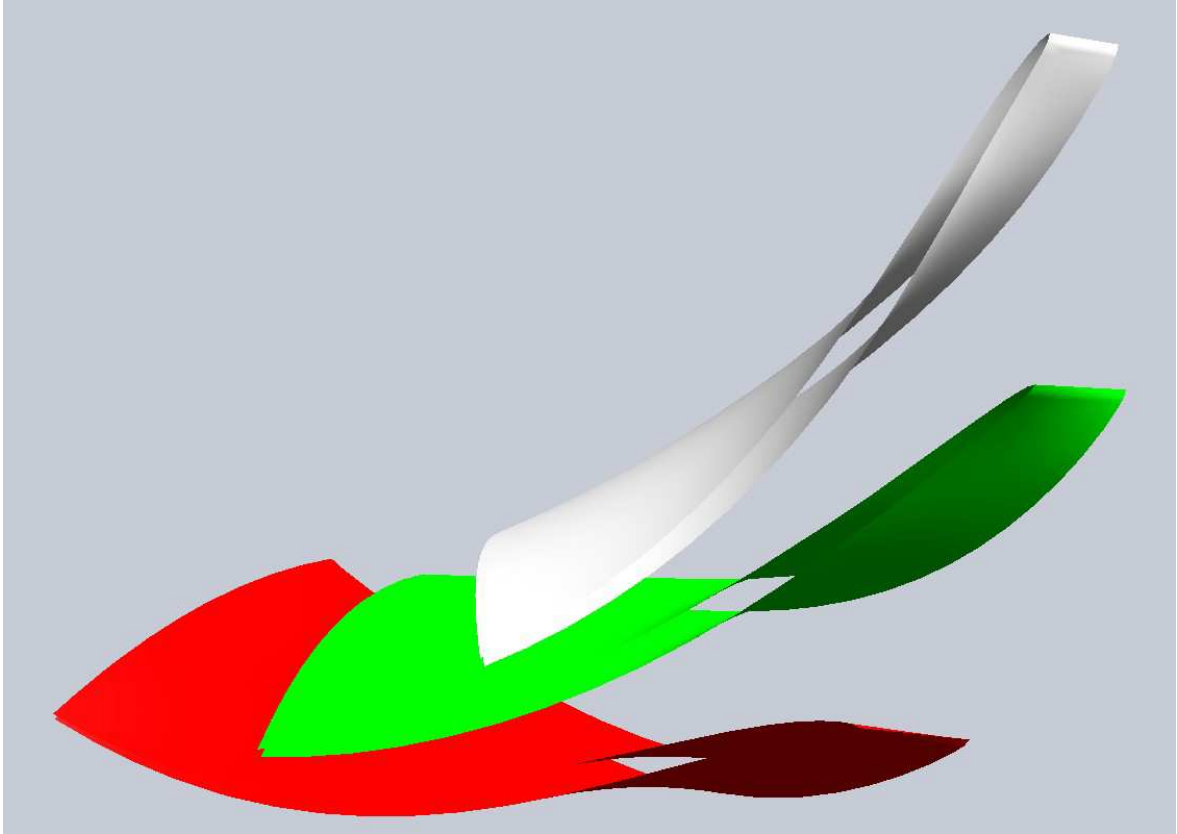
x	y	z
101,66	174,7814	-6,18105
101,4428	168,4388	2,026601
100,8708	161,8612	10,1273
99,98707	154,9782	17,95823
98,91949	147,6907	25,38355
97,49448	140,0333	32,30539
95,73283	132,0262	38,68312
93,70584	123,707	44,50037
91,31799	115,1744	49,71477
88,61832	106,4713	54,37273
85,65235	97,66934	58,50064
82,42683	88,79735	62,17495
79,01319	79,87361	65,46891
75,47676	70,89487	68,46247
71,90669	61,84747	71,22019
68,41451	52,6916	73,78065
65,13908	43,38345	76,13897
62,16438	33,92435	78,15453
59,55971	24,31656	79,72186
57,40351	14,54968	80,71867

Náboj, $n_s = 110$

x	y	z
118,66	174,5628	-12,3621
118,658	169,7148	-3,50414
118,6669	164,0127	4,830535
118,6536	157,505	12,55114
118,5881	150,247	19,57148
118,4159	142,3176	25,82151
117,9749	133,8141	31,24885
117,2287	124,8456	35,82956
116,1848	115,5252	39,57482
114,7636	105,974	42,5311
113,0645	96,27739	44,79192
110,9815	86,53956	46,48066
108,5726	76,81348	47,76161
105,8804	67,13438	48,81687
103,0121	57,50045	49,82364
100,1089	47,88536	50,90501
97,37379	38,23001	52,08828
94,95173	28,49127	53,17327
92,96801	18,63202	53,90383
91,56001	8,611404	54,0584

Z těchto prostorových křivek jsou vytvořeny skelety jednotlivých typů lopatek. Tyto skelety jsou poté “vyšity”, čímž se získá střední plocha lopatky. Pomocí profiláže dostaneme horní a dolní povrch lopatky, což je výsledek hydraulických výpočtů a základ pro konstruování OK.

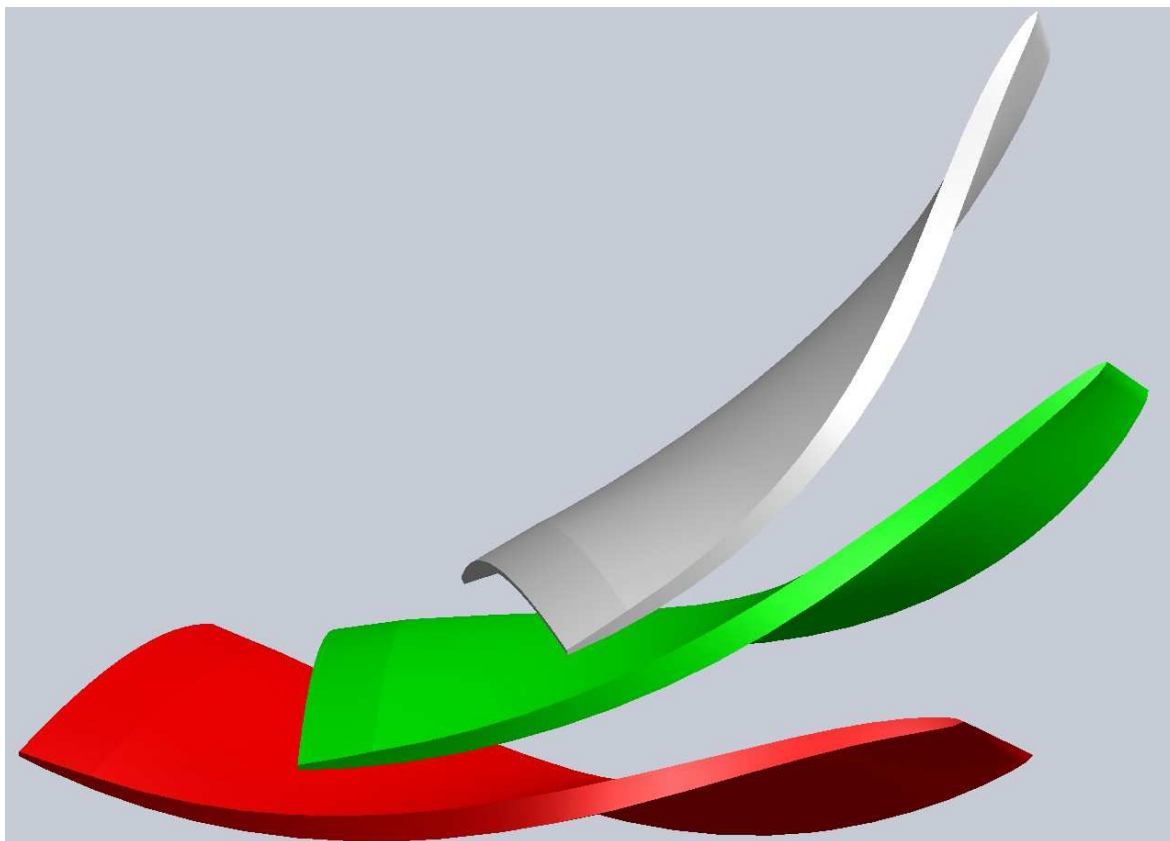
4. Konstruování oběžného kola v programu SolidWorks



Obr. 8: Horní a dolní povrchy lopatek

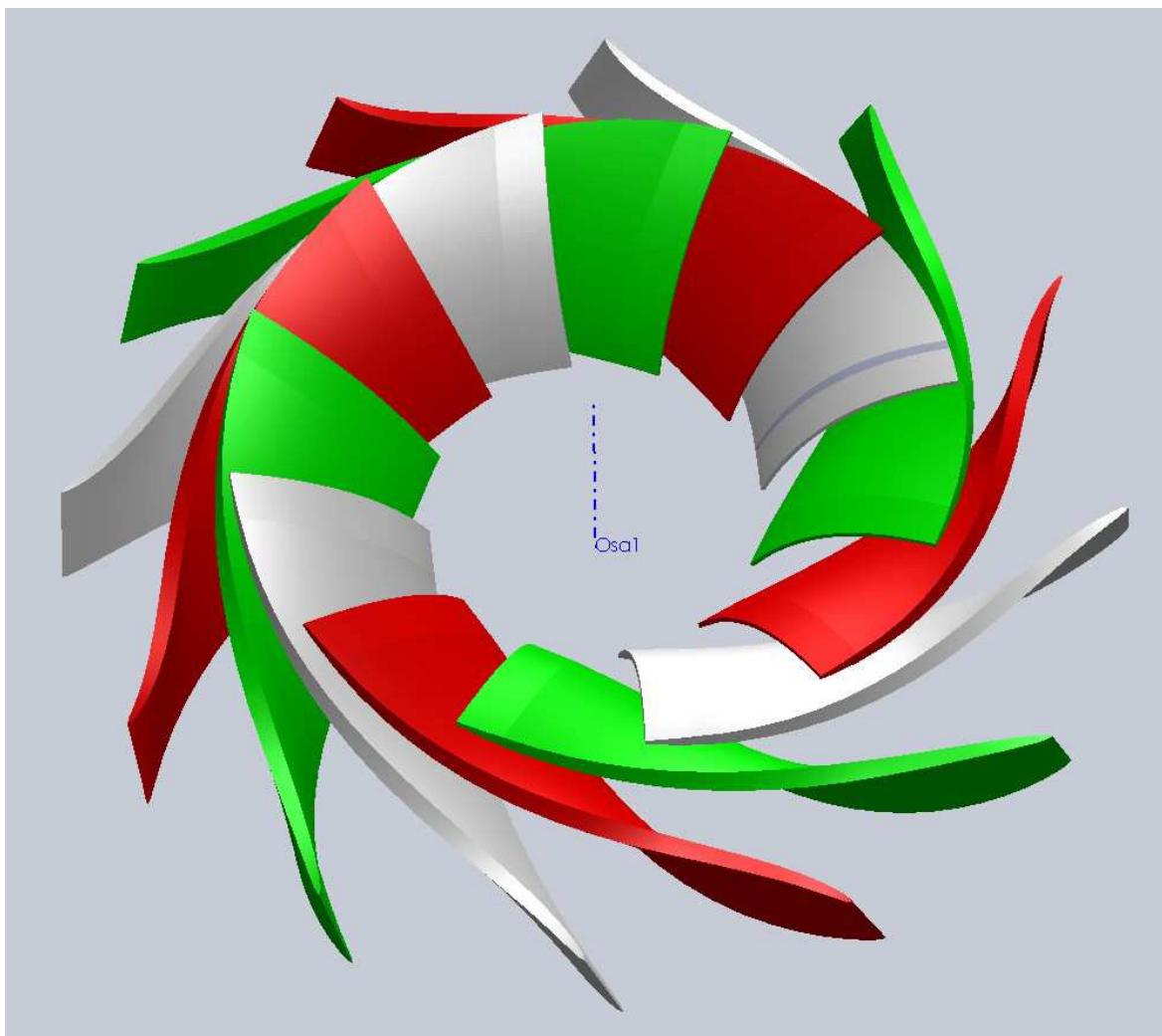
Bílé plochy odpovídají $n_s = 115$, zelené plochy $n_s = 110$ a červené plochy $n_s = 120$.

Z těchto ploch je poté jejich spojením vytvořena trojice lopatek. Jsou provedeny jako objemová těla, nátoková hrana je zaoblена a odtoková hrana zkosena.



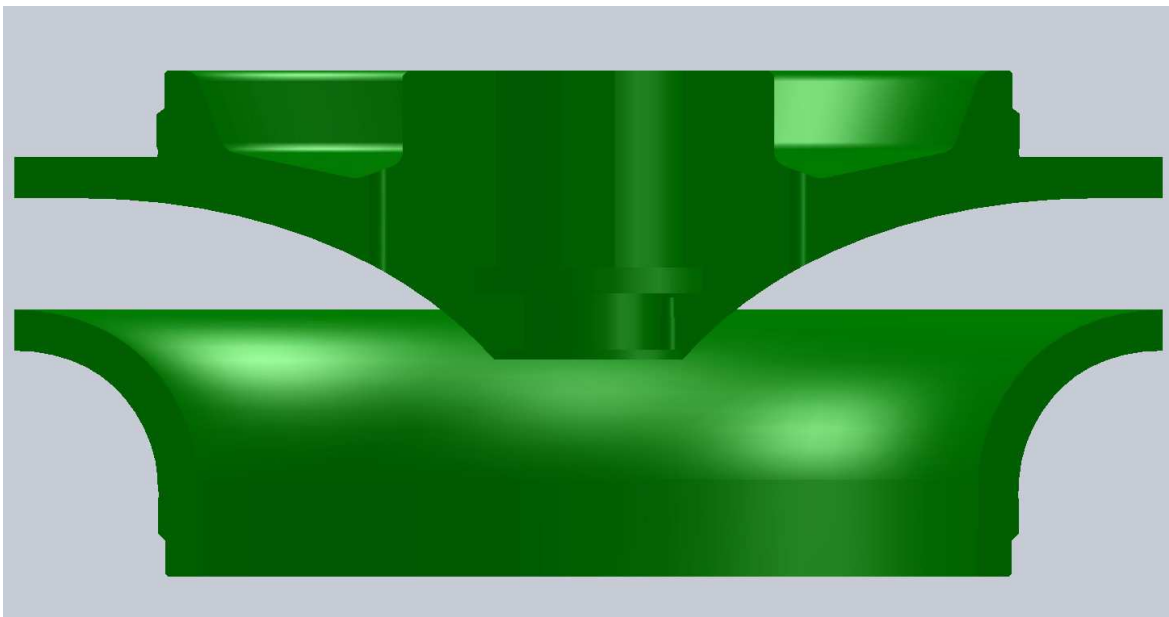
Obr. 9 : Trojice lopatek

Z této trojice lopatek je pomocí kruhového pole a osy y vytvořena lopatková mříž.

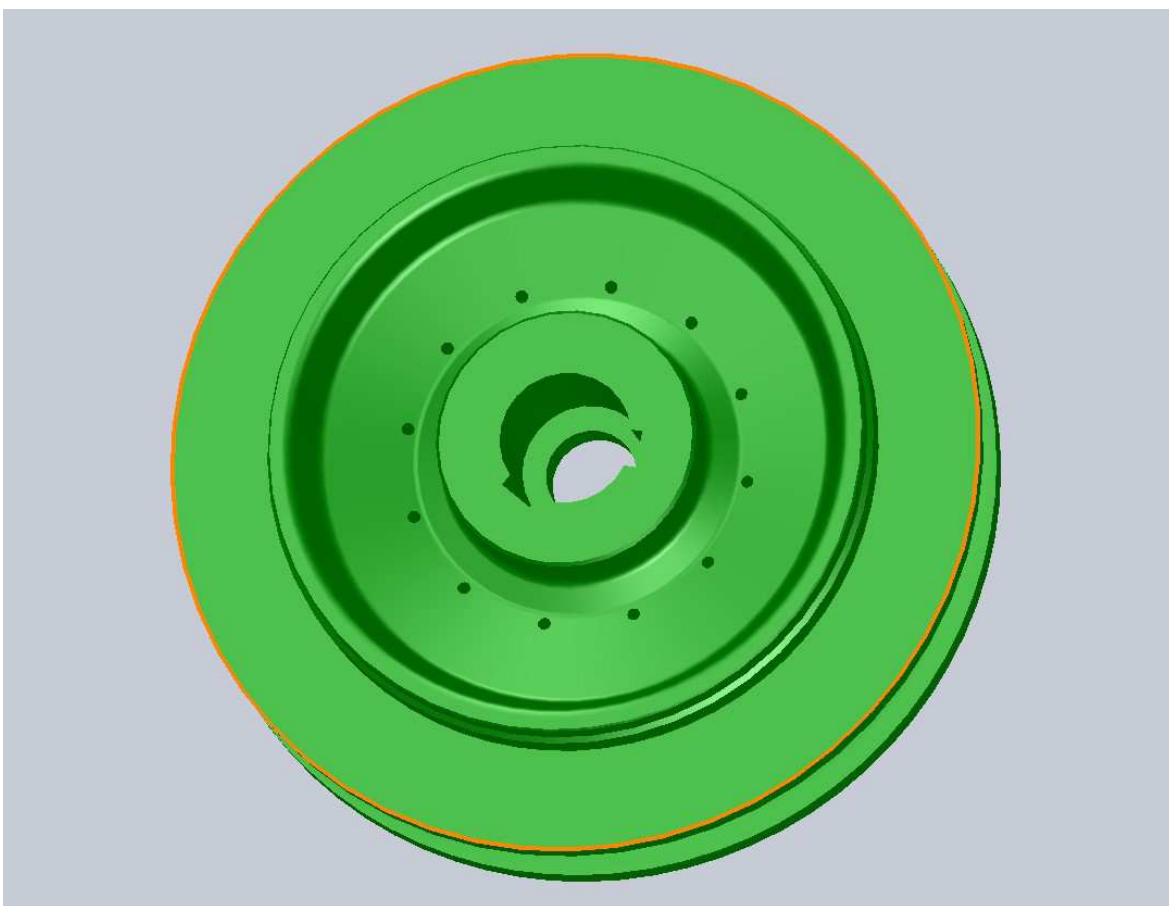


Obr. 10: Lopatková mříž

Konstrukce meridiánu vychází z pevnostních výpočtů; tvar a rozměry těsnících kruhů byly převzaty z výkresu oběžného kola klasické Francisovy turbíny $n_s = 115$, na kterém probíhal výpočet ve Fluentu před tímto oběžným kolem.

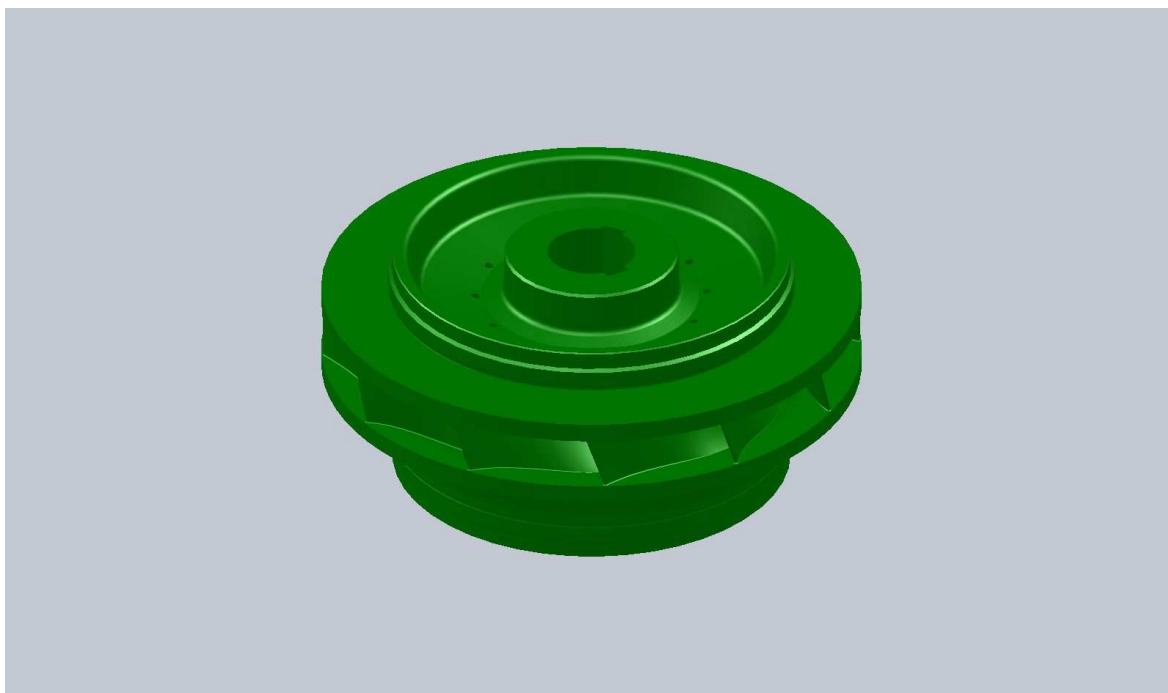


Obr. 11: Řez meridiánem

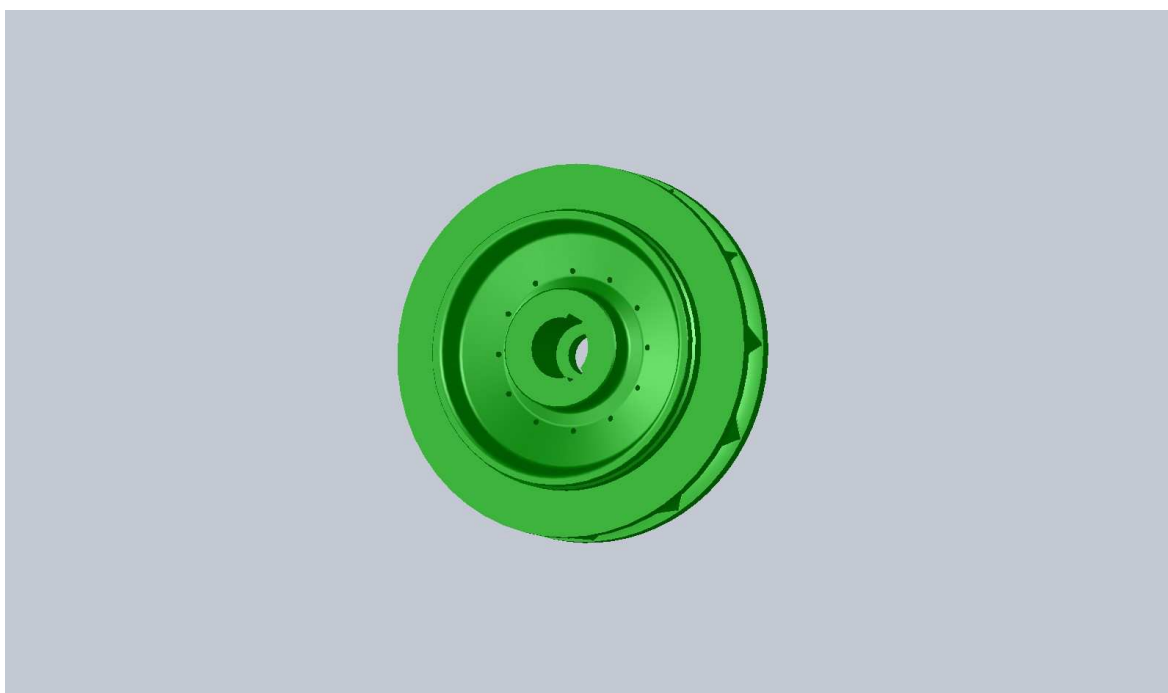


Obr. 12: Obecný pohled na meridián

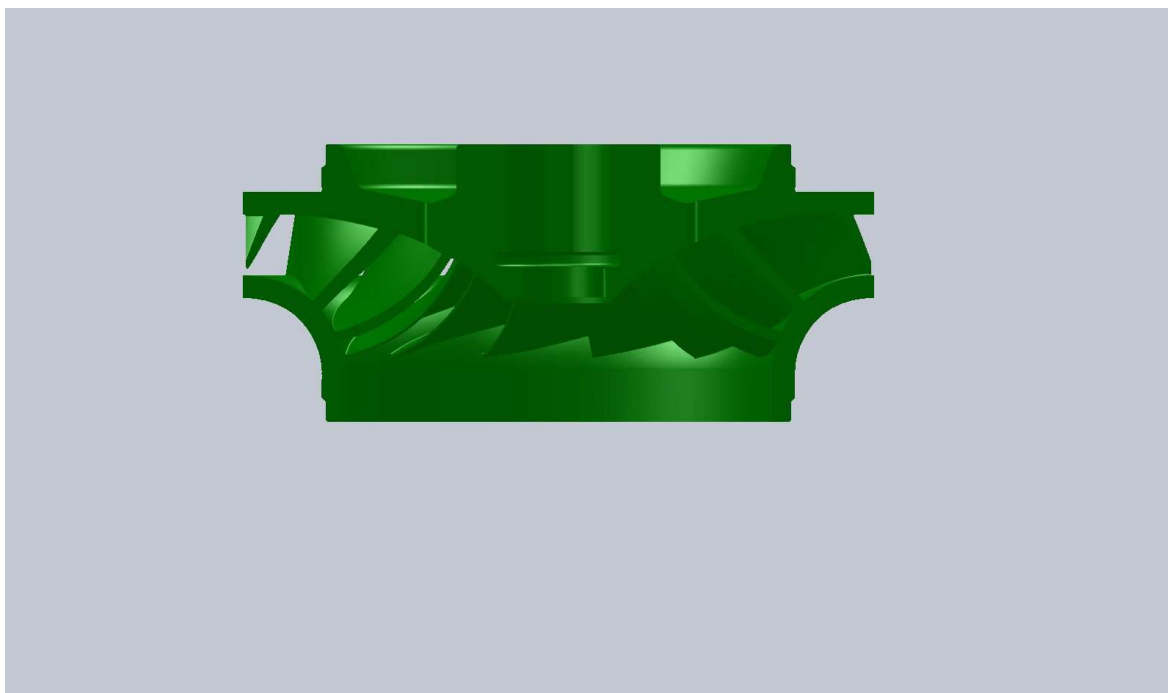
Připojením lopatkové mříže k meridiánu a jejich kombinací vzniklo finální oběžné kolo. Mezi lopatkovou mříží a deskami meridiánu byly vytvořeny rádiusy.



Obr. 13: OK



Obr. 14: Boční pohled na OK



Obr. 15: Řez OK

5. Pevnostní výpočty

5.1 Výpočet hřídele

Hřídel je třeba dimenzovat na krut při největším zatížení, tj. pro nejvyšší provozní průtok.

Dovolené napětí v krutu je 25 MPa.

$$P = \rho Q g H \eta H = 1000 \cdot 0,1912 \cdot 9,81 \cdot 50 \cdot 0,86 = 80653,8 W$$

$$M_k = \frac{P}{2\pi n} = \frac{80653,8}{2\pi \cdot 23,57} = 544,61 Nm$$

$$\tau_{dov} = \frac{M_k}{0,2d^3}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_k}{0,2\tau_{dov}}} = \sqrt[3]{\frac{544,61}{0,2 \cdot 25 \cdot 10^6}} = 0,0477 m = 47,7 mm$$

Oběžné kolo je na hřídeli spojeno pery. Je třeba k tomuto vypočtenému průměru připočítat ještě hloubky drážek pro pero, takže průměr hřídele se bude pohybovat v rozmezí 50 až 58 mm. Podle normy ČSN 02 2562 je pro tento rozsah průměrů hřídele hloubka drážky pro pero v hřídeli

$$t = 6,2 \text{ mm}$$

Budou použity dvě pera s pootočením o 120°.

$$D = d + t(1 + \cos 120^\circ) = 47,7 + 5,5 \cdot 1,5 = 57 mm$$

Volím nejbližší vyšší průměr:

$$D = 58 \text{ mm}$$

5.2 Výpočet per

Hřidel

$$F_1 = \frac{M_k}{D - t} = \frac{544,61}{0,058 - 0,0062} = 10513,7N$$

$$p_1 = \frac{F_1}{l \cdot t} = \frac{10513,7}{0,0626 \cdot 0,0062} = 27,08MPa$$

Náboj

$$F_2 = \frac{M_k}{D + t_1} = \frac{544,61}{0,058 + 0,0038} = 8812,45N$$

$$p_2 = \frac{F_2}{l \cdot t_1} = \frac{8812,45}{0,0626 \cdot 0,038} = 37,04MPa$$

Přeotevření rozvaděče

Rozvaděč Francisovy turbíny lze přeotevřít o 30%, proto je zde potřeba tuto skutečnost zohlednit.

$$p_1' = 1,3p_1 = 1,3 \cdot 27,08 = 35,2MPa$$

$$p_2' = 1,3p_2 = 1,3 \cdot 37,04 = 48,15MPa$$

Maximální povolená hodnota tlaku je 80 MPa, takže tato varianta vyhovuje.

5.3 Výpočet tloušťky oběžné lopatky

Tato Francisova turbína má specifické otáčky n_s v rozsahu 110-115-120, takže se jednoznačně jedná o pomaluběžnou turbínu. Proto je použit tento vzorec

$$s = 0,005D \sqrt{\frac{H}{z}} + 0,002 = 0,005 \cdot 0,35 \sqrt{\frac{50}{12}} + 0,002 = 5,57mm$$

Skutečná tloušťka lopatky je 8 mm, takže vyhovuje pevnostnímu výpočtu.

5.4 Výpočet tloušťky desek oběžného kola

Vycházíme z předpokladu, že voda mezi horním víkem a nábojem rotuje 80% rychlostí oběžného kola.

Výpočtový tlak p je dán jako 2/3 maximálního tlaku $p_{\max}$.

$$p_{\max} = 0,8 \rho \omega^2 \frac{R^2 - r^2}{2} = 0,8 \cdot 1000 \cdot 148,09^2 \cdot \frac{0,175^2 - 0,032^2}{2} = 259667,65 \text{ Pa}$$

$$p = \frac{2}{3} p_{\max} = \frac{2}{3} \cdot 259667,65 = 173111,76 \text{ Pa}$$

Ze vztahu pro radiální napětí

$$\sigma_{rad} = \varphi \frac{p R^2}{\delta_n^2}$$

určíme tloušťku desky δ_n

$$\delta_n = R \sqrt{\frac{\varphi \cdot p}{\sigma_{rad}}}$$

Koeficient φ je určen pomocí regresní analýzy

$$\begin{aligned} \varphi &= 7,5548 - 23,515 \frac{r}{R} + 25,655 \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 9,8485 \left(\frac{r}{R} \right)^3 = 7,5548 - 23,515 \cdot \frac{0,032}{0,175} + 25,655 \cdot \left(\frac{0,032}{0,175} \right)^2 - \\ &- 9,8485 \cdot \left(\frac{0,032}{0,175} \right)^3 = 4,0525 \end{aligned}$$

Za radiální napětí σ_{rad} je dosazena její krajní hodnota 140 MPa a dostaneme tak minimální tloušťku desky

$$\delta_n = R \sqrt{\frac{\varphi \cdot p}{\sigma_{rad}}} = 0,175 \sqrt{\frac{4,0525 \cdot 173111,76}{140 \cdot 10^6}} = 12,38 \text{ mm}$$

Skutečná tloušťka desek je 12,5 mm.

5.5 Namáhání od odstředivé síly

Pro výpočet namáhání byly zjištěny tyto hodnoty:

$$\begin{aligned} S_n &= 0,1153633 \text{ m}^2 \\ r_{TN} &= 0,12459 \text{ m} \\ r_N &= 0,088565 \text{ m} \\ m_L &= 20,214 \text{ kg} \\ r_L &= 0,14317 \text{ m} \\ S_v &= 0,00324423 \text{ m}^2 \\ r_{TV} &= 0,14849 \text{ m} \\ r_v &= 0,116 \text{ m} \end{aligned}$$

Lopatky

$$F_{OLC} = 0,1578 \cdot z \cdot m_L \cdot r_L \cdot \omega^2 = 0,1578 \cdot 12 \cdot 20,214 \cdot 0,14317 \cdot 148,09^2 = 120181,87 \text{ N}$$

Náboj

$$F_{ONC} = \pi \cdot S_n \cdot r_{TN} \cdot \rho_n \cdot r_n \cdot \omega^2 = \pi \cdot 11,53633 \cdot 10^{-3} \cdot 0,12459 \cdot 7800 \cdot 0,088565 \cdot 148,09^2 = 68408,32 \text{ N}$$

$$\sigma_t = \frac{F_{OLC} + F_{ONC}}{2S_n} = \frac{120181,87 + 68408,32}{2 \cdot 11,53633 \cdot 10^{-3}} = 8,17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_v = \sigma_{rad} + \sigma_t = 140 + 8,17 = 148,17 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{\sigma_K}{\sigma_v} = \frac{440}{148,17} = 2,97$$

Věvec

$$F_{OV} = \pi \cdot S_v \cdot r_{TV} \cdot \rho \cdot r_v \cdot \omega^2 = \pi \cdot 3,244 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14849 \cdot 7800 \cdot 0,116 \cdot 148,09^2 = 30028,38 \text{ N}$$

$$\sigma_t = \frac{F_{OLC} + F_{OV}}{2S_v} = \frac{120181,87 + 30028,38}{2 \cdot 3,244 \cdot 10^{-3}} = 23,152 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{\sigma_K}{\sigma_t} = \frac{440}{23,152} = 19$$

Pozn.: U věnce se počítá pouze tahové napětí.

5.6 Výpočet odlehčovacích otvorů

Odlehčovací otvory slouží ke snížení axiální síly a jejich počet je stejný, jako počet oběžných lopatek. Pro jejich návrh se vychází z rozměrů těsnicí spáry, které byly navrženy takto:

$$D = 0,3 \div 0,35 \text{ mm}$$

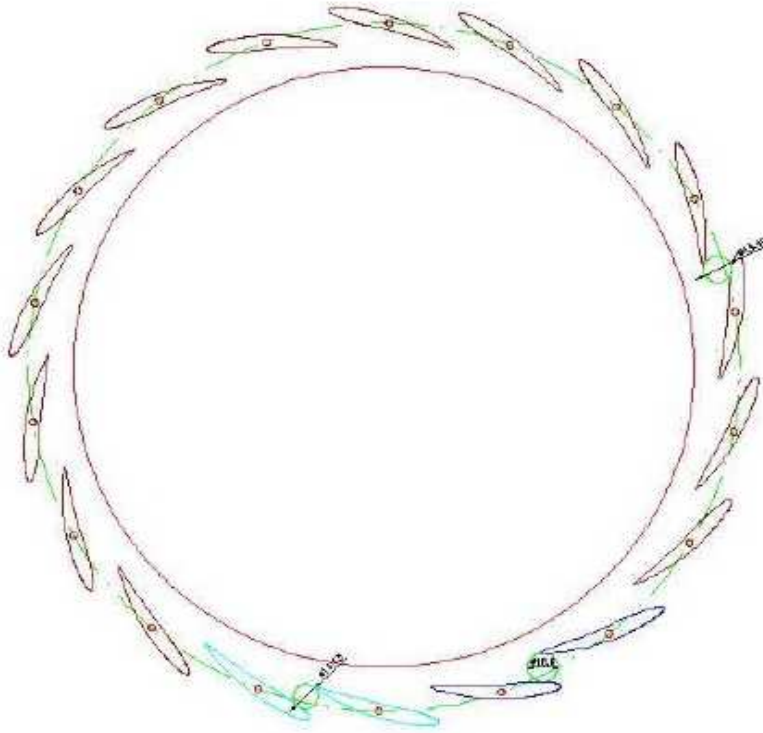
$$l = 20 \text{ mm}$$

$$r = 115 \text{ mm}$$

Bude tedy použito 12 odlehčovacích otvorů o průměru 5,36 mm; průměr roztečné kružnice byl zvolen 150 mm.

6. Řešení rozváděcích lopatek

Byla zvolena varianta rozvaděče s 18 lopatkami. Tvar a počet lopatek byl řešen tak, aby výstupní rychlost z rozvaděče nepřesáhla 20 ms^{-1} .



Obr. 16: Rozváděcí lopatky

Pozn.: Fialové lopatky zobrazují základní provozní stav ($n_s = 115$, $\alpha_1 = 16^\circ 6'$), světle modré provozní stav s nižším průtokem ($n_s = 110$, $\alpha_1 = 14^\circ 47'$) a tmavě modré provozní stav s vyšším průtokem ($n_s = 120$, $\alpha_1 = 17^\circ 27'$).

6.1 Výpočet rychlostí

$$n_s = 115$$

$$v = \frac{Q}{18bd} = \frac{0,1755}{18 \cdot 0,034 \cdot 0,01549} = 18,51 \text{ m.s}^{-1}$$

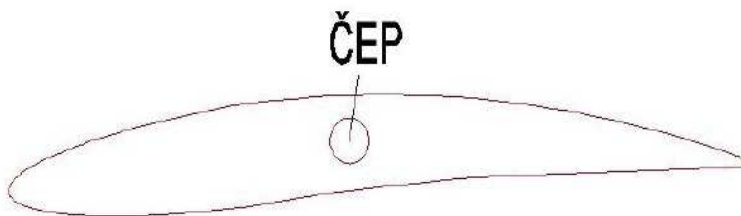
$$n_s = 110$$

$$v = \frac{Q}{18bd} = \frac{0,16056}{18 \cdot 0,034 \cdot 0,01413} = 18,57 \text{ m.s}^{-1}$$

$$n_s = 120$$

$$v = \frac{Q}{18bd} = \frac{0,191}{18 \cdot 0,034 \cdot 0,0169} = 18,48 \text{ ms}^{-1}$$

Pozn.: Hodnoty b a d byly zjištěny odměřením rozměrů v programu AutoCad.



Obr. 18: Profil rozváděcí lopatky

7. CFD výpočet

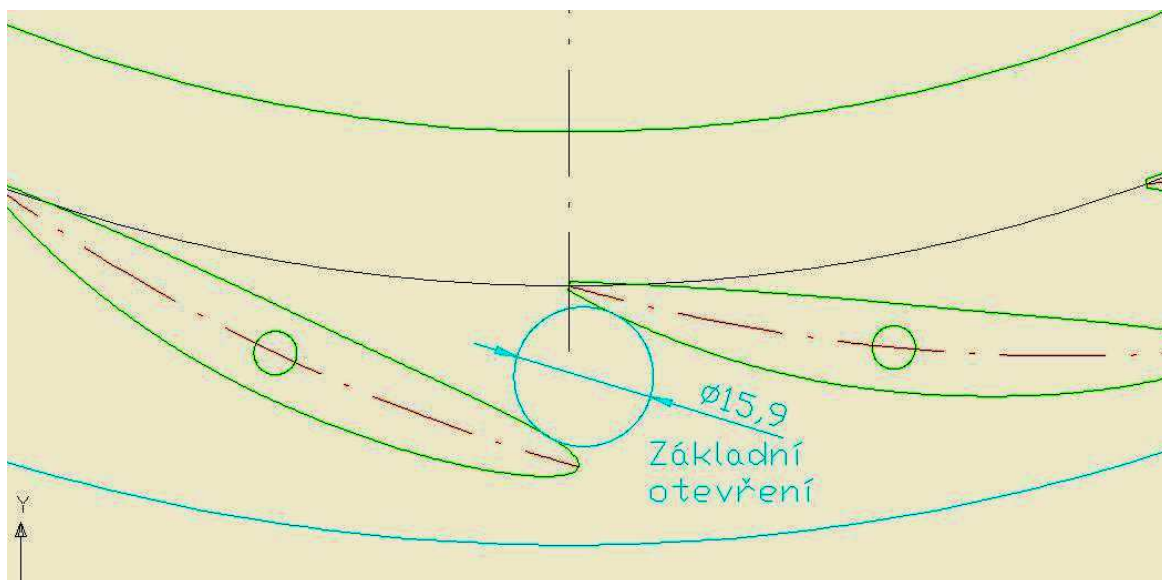
Model OK v SolidWorks byl následně upraven pro výpočet ve Fluentu – byly odstraněny rádiusy a odlehčovací otvory a model byl uložen do formátu STEP. V několika provozních bodech byla pomocí CFD výpočtu stanovena účinnost, která se poté vyhodnotila a porovnala s výsledky klasické Francisovy turbíny, jejíž OK bylo na výpočtu dříve. Výpočet probíhal pro dvě pootevření rozvaděče.

Pozn.: Modré body znázorňují klasickou FT, fialové (případně červené) širokopásmovou FT.

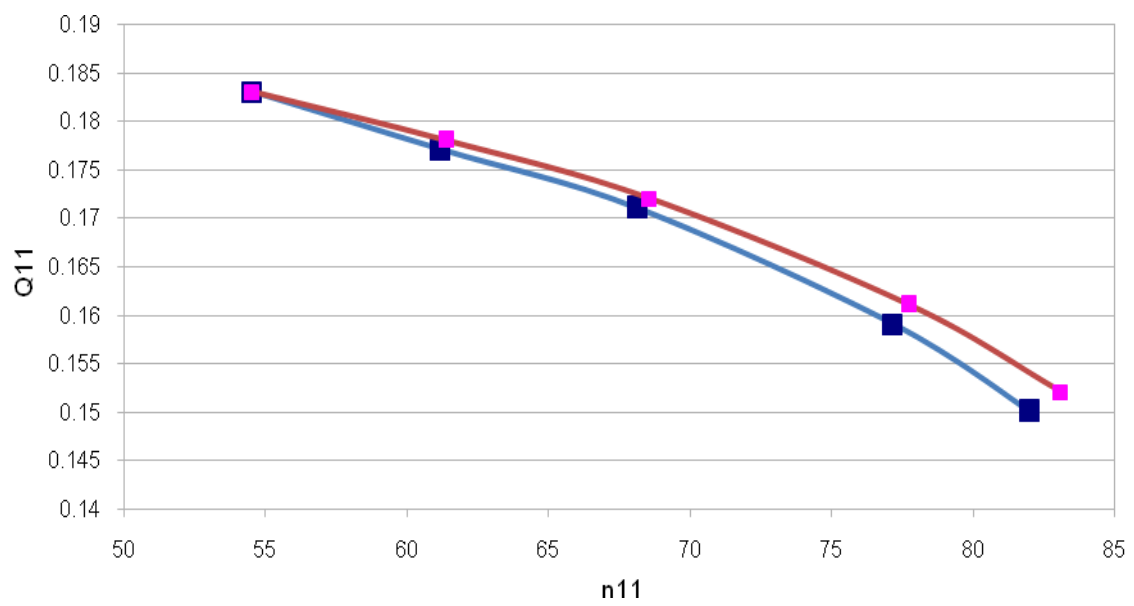
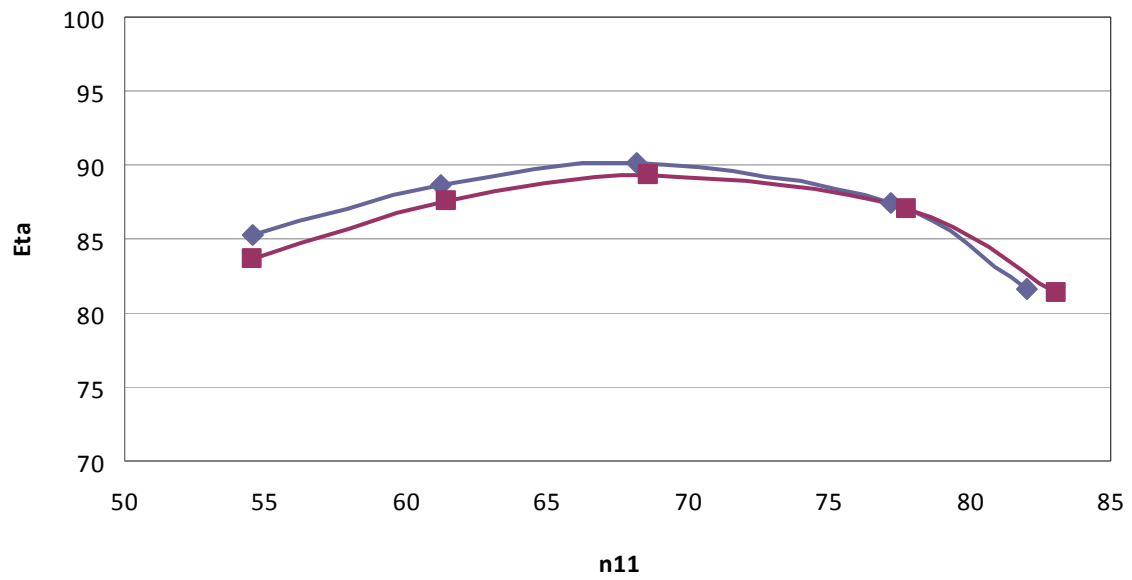
Základní pootevření

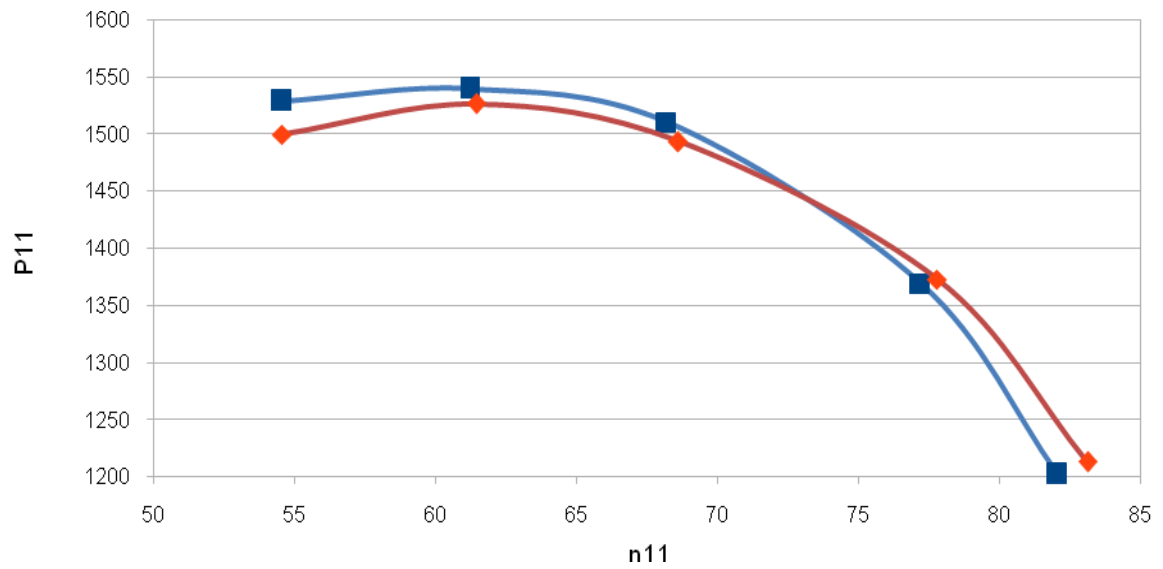
Klasická FT				
Q11	n11	Eta	H	P11
0.177	61.2	88.62	65.4	1539.51828
0.171	68.17	90.11	70.3	1509.86217
0.159	77.17	87.48	80.6	1368.93627
0.150	82.03	81.65	91.1	1201.81876
0.183	54.54	85.25	61.4	1528.45332

Širokopásmová FT				
Q11	n11	Eta	H	P11
0.178	61.44	87.52	64.9	1526.25443
0.172	68.59	89.36	70.7	1493.05371
0.161	77.77	87.06	79.4	1372.62021
0.152	83.11	81.36	88.8	1212.95988
0.183	54.56	83.64	61.4	1499.58752



Obr.19: Základní otevření rozvaděče





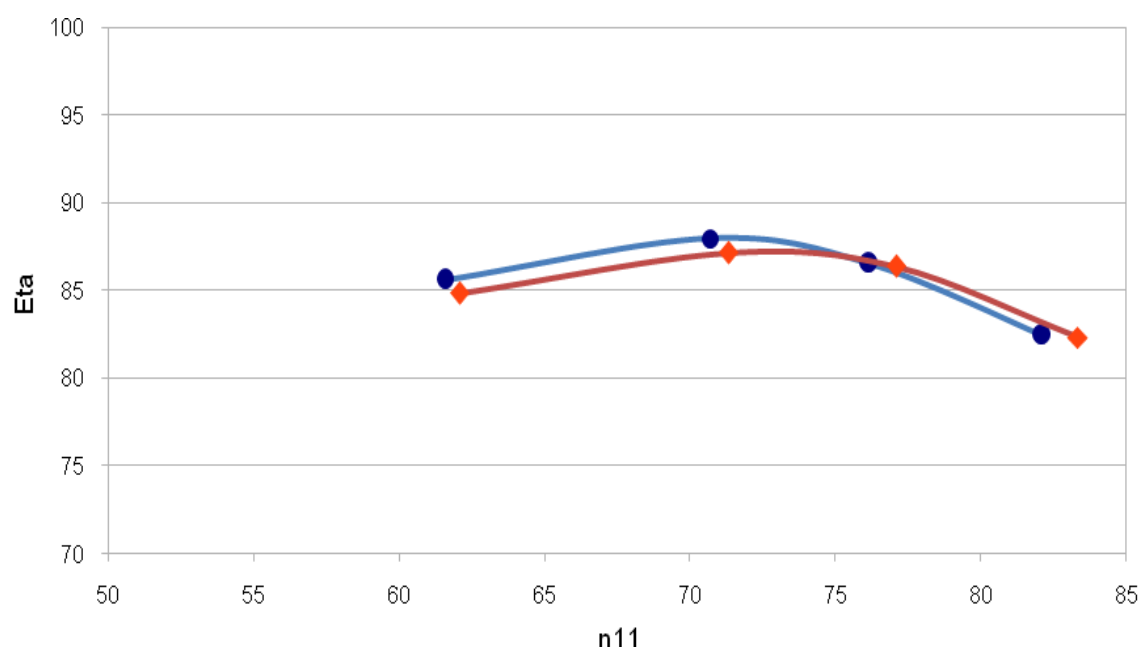
Pootevření o 4,5°

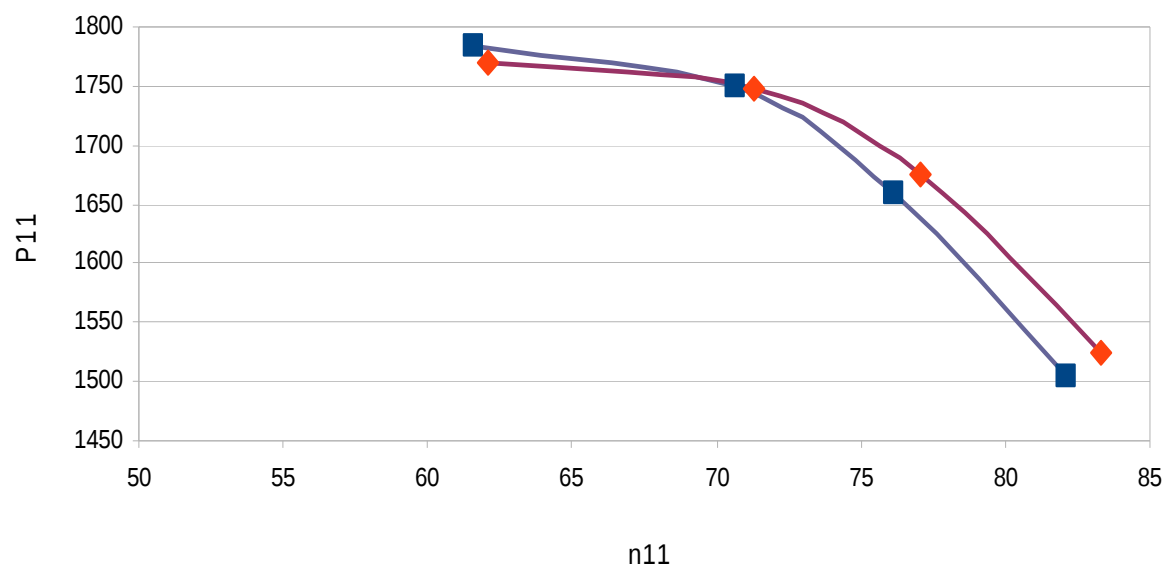
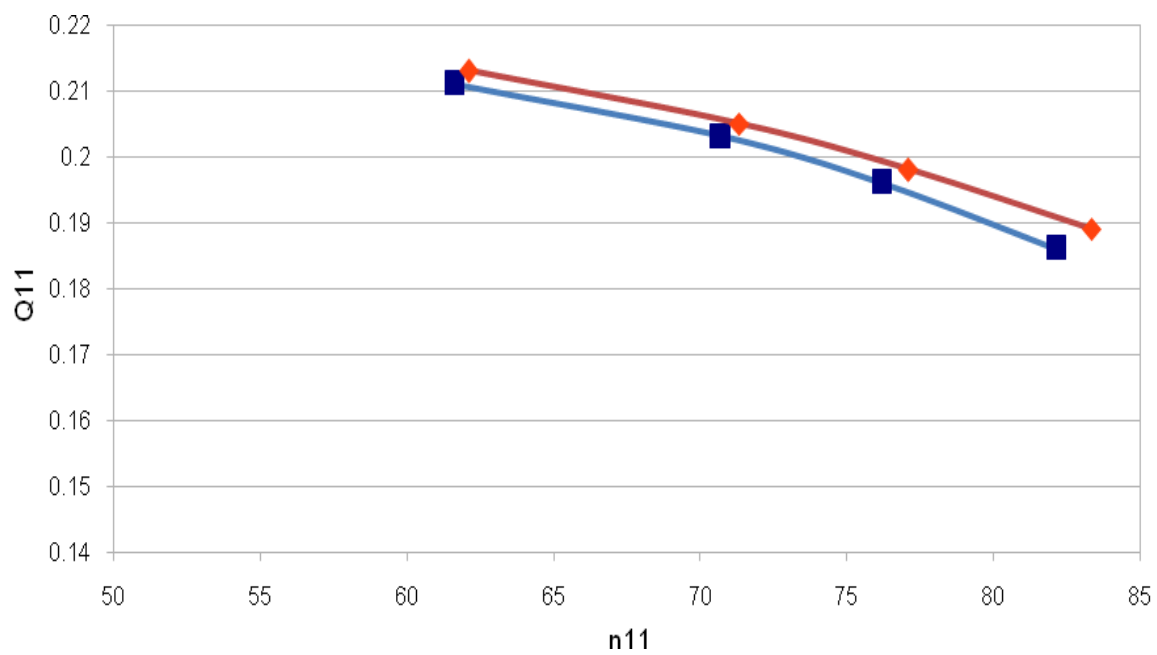
klasická FT				
Q11	n11	Eta	H	P11
0.186	82.12	82.45	59.3	1504.19898
0.211	61.59	85.61	45.5	1783.03873
0.196	76.17	86.55	53.7	1659.28851
0.203	70.69	87.97	49.9	1749.54975

širokopásmová FT				
Q11	n11	Eta	H	P11
0.189	83.33	82.33	57.6	1524.01363
0.213	62.09	84.85	45.4	1769.15506
0.198	77.09	86.36	52.4	1676.05771
0.205	71.32	87.16	49.1	1747.50511



Obr.20: Pootevření rozvaděče o 4,5°





Z CFD výpočtu vyplývají tyto dva důležité poznatky:

1. Klasická FT s 11 lopatkami má v nižších n_{11} má vyšší účinnost a P_{11} .
2. Širokopásmová FT s 12 lopatkami má ve vyšších n_{11} vyšší účinnost i P_{11} a navíc je ve všech bodech hltnější, což zaručuje lepší kavitační vlastnosti.

8. Závěr

Širokopásmová Francisova turbína dosahuje velmi dobrých parametrů, na její klasickou variantu však nepatrně ztrácí, výsledky CFD výpočtu přesně neodpovídají původní představě o průběhu účinnosti. Vzhledem k většímu množství hydraulických výpočtů a náročnější výrobě není v současné chvíli vhodné ji vyrábět, protože klasická FT vyjde levněji a dosahuje lepších výsledků.

Jsem však toho názoru, že myšlenka širokopásmové FT je dobrá a užitečná, jen je ji potřeba ještě dále vyvíjet. V tomto případě má chaotická mříž tři typy oběžných lopatek, což se tedy ukázalo jako ne úplně vhodné řešení – takže se dále může zkoušet mříž se dvěma, čtyřmi, či ještě více typy oběžných lopatek (i když s více typy lopatek také podstatně vzroste množství hydraulických výpočtů).

Věřím, že tato diplomová práce splnila svůj účel a může dobře posloužit jako podklad pro další vývoj širokopásmové Francisovy turbíny.

9. Seznam použité literatury

Nechleba, M.: Vodní turbíny, jejich konstrukce a příslušenství. SNTL Praha, 1962.

Fleischner, P., Nechleba, M.: Hydromechanika lopatkových strojů. Skripta VUT v Brně, 1976.

Nechleba, M., Druckmüller, M.: Vodní turbíny I. Skripta VUT v Brně, 1990.

10. Seznam citací

[1] Nechleba, M.: Studie lopatkování Francisových turbín jako podklad pro CAD, VUT v Brně, Fakulta strojní, červen 1987, č. zprávy VZ – HSZ – 040

[2] Fleischner, P., Nechleba, M.: Hydromechanika lopatkových strojů. Skripta VUT v Brně, 1976.

11. Seznam použitých zkratk a symbolů

D [m]	průměr oběžného kola; rozměr těsnící spáry; průměr hřídele
d [m]	vypočtený průměr hřídele
Q [m ³ s ⁻¹]	průtok
Q_{11} [-]	jednotkový průtok
P [W]	výkon
P_{11} [-]	jednotkový výkon
n [min ⁻¹]	otáčky
n_{11} [min ⁻¹]	jednotkové otáčky
n_s [min ⁻¹]	specifické otáčky
M_k [Nm]	kroučící moment
H [m]	spád
$H_{86\%}$ [m]	uvažovaný spád při hydraulické účinnosti 86%
g [ms ⁻²]	tíhové zrychlení
ω [rad.s ⁻¹]	úhlová rychlost
ρ [kg.m ⁻³]	hustota
z [-]	počet lopatek
ΔY [J.kg ⁻¹]	změna měrné energie
p [Pa]	tlak
$p_{\max}$ [Pa]	maximální tlak
p_1 [Pa]	tlak mezi perem a hřídelí
p_2 [Pa]	tlak mezi perem a nábojem
p'_1 [Pa]	tlak mezi perem a hřídelí při přeotevření rozvaděče
p'_2 [Pa]	tlak mezi perem a nábojem při přeotevření rozvaděče
p_K [Pa]	tlak na obrysu profilu
p_∞ [Pa]	tlak mimo profil
η [-]	účinnost; souřadnice konformního zobrazení
η_h [-]	hydraulická účinnost
x [-]	souřadnice kartézského souřadného systému
y [-]	souřadnice kartézského souřadného systému
ξ [-]	souřadnice konformního zobrazení
$u, u_0, u_1, u_2, u_3, u_R$ [m.s ⁻¹]	unášivá rychlost
v, v_0, v_1, v_2, v_3 [m.s ⁻¹]	relativní rychlost
c, c_1, c_2 [m.s ⁻¹]	absolutní rychlost
v_{LS} [m.s ⁻¹]	střední rychlost na střední čáře
v_{kd} [m.s ⁻¹]	rychlost na dolní straně tenkého profilu
v_{kh} [m.s ⁻¹]	rychlost na horní straně tenkého profilu
v_∞ [m.s ⁻¹]	rychlost mimo profil
v_K [m.s ⁻¹]	rychlost na obrysu profilu
v_{Kt} [m.s ⁻¹]	tečná složka rychlosti na obrysu profilu
v_x [m.s ⁻¹]	rychlost ve směru osy x
v_y [m.s ⁻¹]	rychlost ve směru osy y
v_i, c_i [m.s ⁻¹]	rychlost indukovaná singularitami
$v_{0\xi}$ [m.s ⁻¹]	rychlost ve směru osy ξ
c_B [m.s ⁻¹]	výsledná rychlost jako funkce referenčního profilu
$c_{B(1)}$ [m.s ⁻¹]	první aproximace výsledné rychlosti c_B
$c_m, c_{m0}, c_{m1}, c_{m2}, c_{m3}$ [m.s ⁻¹]	meridiální rychlost
$c_u, c_{u0}, c_{u1}, c_{u2}, c_{u3}$ [m.s ⁻¹]	složka celkové rychlosti ve směru unášivé rychlosti
$c_{3\xi}$ [m.s ⁻¹]	složka rychlosti c_3 ve směru osy ξ
k [-]	koefficient bezpečnosti
k_1, k_2 [-]	koefficienty konformního zobrazení
a [-]	konstanta konformního zobrazení
S^*	proudová plocha
ζ	Gaussova rovina
σ [-]	souřadnice konformního zobrazení
φ [-]	rychlostní číslo; koefficient regresní analýzy pro tloušťku desek
ψ [-]	tlakové číslo; Stokesova proudová funkce

Γ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	.....	cirkulace
χ_k [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	.....	povrchová hustota cirkulace
dK [m]	.....	element obrysu lopatky
dK_h [m]	.....	element horního obrysu lopatky
dK_d [m]	.....	element dolního obrysu lopatky
dL [m]	.....	element střední čáry lopatky
δ [m]	.....	poloviční tloušťka profilu
q [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]	.....	hustota zdrojů
v_{TV} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	.....	rychlost vyvolané elementárním zdrojem
ξ_L, ξ'_L [-]	.....	singularitní body
s [m]	.....	tloušťka lopatky
F_1 [N]	.....	síla působící mezi perem a hřídelem
F_2 [N]	.....	síla působící mezi perem a nábojem
F_{OLC} [N]	.....	odstředivá síla přenášená lopatkami
F_{ONC} [N]	.....	odstředivá síla přenášená nábojem
F_{OV} [N]	.....	odstředivá síla přenášená věncem
τ_{DOV} [Pa]	.....	dovolené smykové napětí
σ_K [Pa]	.....	mez kluzu
σ_{rad} [Pa]	.....	radiální napětí
σ_t [Pa]	.....	tečné napětí
σ_v [Pa]	.....	výsledné napětí
δ_n [m]	.....	tloušťka desek meridiánu
l [m]	.....	rozměr těsnící spáry; délka pera
r [m]	.....	rozměr těsnící spáry
t_l [m]	.....	hloubka drážky pro pero v hřídeli
t [m]	.....	hloubka drážky pro pero v náboji
r_L [m]	.....	poloměr těžiště lopatky
r_V [m]	.....	poloměr těžiště poloviny věnce
r_N [m]	.....	poloměr těžiště poloviny náboje
S_N [m^2]	.....	plocha náboje
S_V [m^2]	.....	plocha věnce
r_{TN} [m]	.....	poloha těžiště plochy náboje
r_{TV} [m]	.....	poloha těžiště plochy věnce
m_L [kg]	.....	hmotnost lopatky
r [m]	.....	vnitřní poloměr meridiánu; obecný poloměr
R [m]	.....	vnější poloměr meridiánu, poloměr oskulační kružnice
β_1 [°]	.....	vstupní úhel lopatky
β_2 [°]	.....	výstupní úhel lopatky
β_3 [°]	.....	úhel odtoku z lopatkové mříže (směr od meridiální rychlosti)
β'_1 [°]	.....	doplňkový vstupní úhel kapaliny
β'_2 [°]	.....	doplňkový výstupní úhel kapaliny
β_{ob} [°]	.....	úhel nátoku na lopatkovou mříž oběžného kola bez vstupního rázu (bezrázový úhel nátoku)
$\mu_{(A)}$ [-]	.....	poměr konformního zobrazení
h [-]	.....	konstanta konformního zobrazení; délka profilu
A_0 [-]	.....	konstanta metody singularit
b [m]	.....	proměnná šířka oblasti základního proudu
b_R [m]	.....	proměnná šířka oblasti základního proudu odpovídající vztažnému poloměru R
b_0 [m]	.....	vstupní šířka kanálu
b_3, b_4 [m]	.....	výstupní šířka kanálu
FT	.....	Francisova turbína
OK	.....	oběžné kolo
CFD	.....	Computational Fluid Dynamics (angl.) – výpočtové modelování proudění