

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VYUŽITÍ PROGRAMU SOLIDWORKS K PŘÍPRAVĚ MODELŮ CFD

USING SOLIDWORKS FOR MODEL PREPARATION IN CFD

BAKALAŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK ŠVAŇHAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PAVEL RUDOLF, PH.D.

BRNO 2008

Anotace

Tato bakalářská práce analyzuje využití programu SolidWorks k přípravě modelů CFD (výpočet proudění metodou konečných objemů). Práce v první části popisuje způsob přípravy modelu kapaliny protékající oběžným kolem Francisovy turbíny a uvádí obzvláště užitečné funkce a vhodné postupy. V druhé části je rozebrány výhody přípravy modelů v programu SolidWorks. V poslední části je popsána tvorba sítě konečných objemů pro sestrojený model v programu Gambit. Závěrem je zhodnocen celkový přínos použití dodatečného, specializovaného softwaru typu SolidWorks při přípravě modelů CFD.

Anotation

This bachelor's thesis objective is to analyze utilization of program SolidWorks for preparing CFD (Computational Fluid Dynamics) models. First part describes the process of modelling a finite volume of a Francis turbine rotor. Also, the most useful functions and modelling procedures are presented. Second part analyzes pros and cons of using SolidWorks for CFD model preparation. In the last part the model is imported to pre-processor Gambit where meshing tools and procedures are introduced. In conclusion the thesis summarizes the main benefits of using a stand-alone specialized CAD software for CFD modelling.

Klíčová slova

SolidWorks
CFD
Gambit
modelování geometrie

Keywords

SolidWorks
CFD
Gambit
geometry modelling

Bibliografická citace VŠKP

ŠVAŇHAL, R. *Využití programu SolidWorks k přípravě modelů CFD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Rudolfa, Ph.D. a v seznamu jsem uvedl všechny použité zdroje informací.

V Brně dne 23. 5. 2008

.....

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za jeho spolupráci a cenné rady.

Obsah

Úvod	11
1.0 Úvod k práci v programu SolidWorks.....	12
1.1.0 Přehled a popis důležitých funkcí.....	12
1.1.1 Geometrické podmínky pro práci ve skicáři.....	12
1.2.2 Speciální metody sestrojování křivek typu <i>spline</i>	13
2.0 Sestrojení modelu lopatky stroje.....	14
2.1.0 Sestrojení středové plochy lopatky	14
2.1.1 Vstupní data popisující geometrii	14
2.1.2 Formátování datového souboru se souřadnicemi	14
2.1.3 Importování křivek z datového souboru do SolidWorks	14
2.1.4 Sestrojení středové plochy ze sítě křivek.....	14
2.2.0 Sestrojení objemu lopatky kolem středové plochy	15
2.2.1 Úprava středové plochy před konstrukcí pomocné sítě křivek.....	15
2.2.2 Příprava pomocné sítě křivek k sestrojení objemu lopatky	15
2.2.3 Sestrojení objemu lopatky ze sítě křivek	16
3.0 Příprava geometrického modelu pro preprocesor Gambit	18
3.1.0 Konstrukce objemu kapaliny protékající strojem	18
3.1.1 Sestrojení bočního profilu.....	18
3.1.2 Řez profilu plochami za účelem dosažení předepsaného tvaru dle výkresu	20
3.1.3 Sestrojení objemu kapaliny.....	20
3.1.4 Vložení modelu lopatky a odečtení jejího tvaru od objemu kapaliny	20
3.2.0 Vhodné úpravy před exportováním modelu.....	22
3.2.1 Úvaha nad vhodným umístěním řezných ploch.....	22
3.2.2 Sestrojení řezných ploch.....	22
3.2.3 Rozdělení modelu plochami	23
3.2.4 Další úpravy modelu před exportováním	23
3.3.0 Exportování modelu.....	25
3.3.1 Přehled a popis formátů výstupních souborů.....	25
3.3.2 Exportování geometrie.....	25
4.0 Rozvaha nad použitím programu SolidWorks pro přípravu geometrických modelů pro Gambit	26
4.1 Výhody práce v prostředí SolidWorks	26
4.2 Vlastnosti a přesnost exportované geometrie	26
4.3 Úpravy již sestrojené geometrie	27

5.0 Nanesení výpočetní sítě v Gambitu	28
5.1 <i>Úprava geometrie před nanášením sítě</i>	28
5.1.1 Import geometrie	28
5.1.2 Sjednocení hran a ploch.....	28
5.2 <i>Příprava hran a ploch pro síťování</i>	28
5.2.1 Dělení hran na konečné prvky	28
5.2.2 Kontrola vrcholů ploch a jejich úprava	29
5.3 <i>Zadání sítě konečných objemů</i>	29
5.3.1 Zadání sítě na bočních plochách při zachování podmínky periodicity.....	29
5.3.2 Vytvoření 3D sítě.....	29
5.4 <i>Kontrola kvality a exportování sítě</i>	30
Závěr	31
Seznam použitých zdrojů	32
Seznam příloh.....	33
Příloha 1.....	34
Příloha 2.....	35
Příloha 3.....	36
Příloha 4.....	37
Příloha 5.....	38

Úvod

V dnešní době jsou čím dál tím více využívány analytické systémy umožňující řešit složité výpočty metodou konečných objemů. V oblasti proudění tekutin se tyto výpočty označují CFD (Computational fluid dynamics). Tyto výpočty jsou prováděny na síti konečného počtu objemů, kterou je vyplněn analyzovaný model. Příprava modelu stojí na počátku celého procesu a již zde je potřeba, aby návrhář či konstruktér byl zběhlý při práci s CAD systémy pro modelování 3D objektů. Výsledky získané z předchozí analýzy mají často za následek to, že původní model je třeba upravit. Efektivita práce v modeláři a znalost všech jeho nástrojů tedy může přispět k úspoře času při samotném modelování. Navíc vhodně, ale častěji nevhodně sestrojený model může ovlivnit přesnost CFD výpočtů a jejich časovou náročnost.

Pro přípravu modelu je možné použít nástroje zabudované již v samotných výpočetních programech nebo jejich preprocesorech. V případě výpočetního programu Fluent se jedná o preprocesor jménem Gambit. Na trhu ale existují produkty, které se zaměřují výhradně na 3D modelování a umožňují následně data importovat do CFD programů. Jedním z těchto 3D modelářů je program SolidWorks. Cílem této práce je připravit model pro zadanou typovou úlohu v tomto programu, následně převést data do Gambitu a nanést na model síť konečných objemů.

Práce je zaměřena na to, aby prozkoumala, jaké nástroje jsou k dispozici pro konstrukci CFD modelů. Práce má také poukázat na slabiny Gambitu při konstrukci geometrie a najít snadnější způsob, jakým lze tyto konstrukce provádět v SolidWorks. V neposlední řadě má také tento text sloužit jako příručka pro někoho, kdo se zabývá výpočty CFD a má již za sebou práci v modelářích a chtěl by připravovat svoje modely v SolidWorks.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. V první části jsou popsány nástroje SolidWorks, které usnadňují práci při modelování a jsou často používány. Druhá část je napsána formou návodu na konstrukci CFD modelu pro výpočet proudění v rotoru Francisovy turbíny. Tento návod názorně demonstruje, jak jsou nástroje, které jsou obecně popsány v první části, použity v konkrétní úloze. Třetí část je rozvahou nad vhodností použití SolidWorks pro sestrojování CFD modelů a nad tím, jaké výhody přináší v porovnání s Gambitem. Také jsou zde shrnuty vlastnosti výstupních dat. Závěrečná část popisuje, jakým způsobem se již v programu Gambit nanáší na model výpočetní síť.

1.0 Úvod k práci v programu SolidWorks

Při práci v programu SolidWorks či jakémkoliv jiném 3D modelovacím programu lze aplikovat dva základní přístupy pro sestrojování geometrie. Jednomu se říká „odspodu nahoru“ (anglicky bottom-up approach), kdy modelování začíná sestrojením přímk, ze kterých se získají plochy a následně objemy, které už mají požadovanou podobu nebo se jí blíží. Druhému přístupu se říká „shora dolů“, kdy modelování začíná sestrojením hrubého objemu, který je následně tvarován do požadované podoby.

Tento návod ke konstrukci využívá první z uvedených přístupů. Tato volba ovlivňuje následně práci v tom, že člověk se musí tomuto přístupu přizpůsobit a při řešení konstrukce musí používat vhodné funkce. Následuje přehled a popis funkcí, které jsou nejčastěji při tomto přístupu používány.

1.1.0 Přehled a popis důležitých funkcí





Jedná se především o funkce pro konstrukci křivek typu *spline* a o funkce pro zadávání geometrických podmínek pro přímky a křivky. Křivky různého typu jsou během modelování velmi často používány k sestrojení pomocné sítě, z níž se následně sestrojují plochy či objemy. SolidWorks usnadňuje práci tím, že nabízí různé speciální možnosti konstrukce jako například konstrukce křivky na obecné ploše či konstrukce UV parametrických křivek plochy. Při konstrukci jsou důležité také geometrické podmínky, které SolidWorks umožňuje zadávat a které značně usnadňují a urychlují práci. Jedná se například o podmínky stejnolehlosti bodů, zadání tečen či podmínky kolmosti.

Tyto funkce a zavádění podmínek budou velmi často používány a bude na ně odkazováno v tomto textu. Proto následuje jejich stručný přehled a popis.

1.1.1 Geometrické podmínky pro práci ve skicáři

Geometrické podmínky se zadávají ve skicáři (*Sketch*), v němž pomocí klávesy Ctrl označíme dvě entity a objeví se nabídka přístupných podmínek.

Často používané geometrické podmínky:

-  **Stejnolehlost bodů** (anglicky Merge)
-  **Bod náležící přímce/křivce** (Coincident)
-  **Bod ležící na ploše** (On surface)
-  **Kolmost přímky/křivky na přímku/plochu** (Perpendicular)

Jedná-li se o křivku (obvykle typu *spline*), je kolmá k dané entitě její tečna v daném stykovém bodě.

-  **Přímka/křivka tečná k přímce/křivce/ploše** (Tangent)

Jedná-li se o křivku, je tečnou k dané entitě ve vybraném stykovém bodě.

-  **Rovnoběžnost přímek** (Parallel)

1.2.2 Speciální metody sestrojování křivek typu *spline*

Tyto funkce jsou využívány ve 3D skicáři.

Sestrojění UV křivek plochy (Face curves)

Jsou vhodné obzvláště při konstrukci pomocné sítě křivek pro sestrojění plochy a pro sestrojění jedné povrchové křivky, která má směr a tvar vycházející z parametrů plochy.

Sestrojění křivky na ploše (Spline on surface)

Přímka je geometricky vázána na plochu či povrch tělesa. Funkce je vhodná obzvláště při sestrojování dělících ploch při úpravě modelu kapaliny určeného k exportu do preprocesoru Gambit.

Sestrojění průsečnice dvou ploch (Face intersection)

Funkce je opět využito k zadávání řezných ploch modelu před exportem. Obzvláště mají-li na sebe navazovat.

Sestrojění kopie hrany (Convert entities)

Funkce vytvoří kopii vybrané hrany v podobě křivky typu spline, což je vhodné, chceme-li využít hrany již sestrojených objektů při rýsování sketchů.

2.0 Sestrojení modelu lopatky stroje

Sestrojení lopatky je nezbytná část celého procesu modelování výsledného objemu kapaliny, která tuto lopatku obtéká. Středová plocha této lopatky je jednak použita k určení tvaru boční plochy modelu a také je použita sama lopatka, jež je v jedné z dalších fází konstrukce od modelu odečtena.

2.1.0 Sestrojení středové plochy lopatky

2.1.1 Vstupní data popisující geometrii

Nejčastěji se jedná o soubor souřadnic několika křivek profilu ať už v podélném, nebo příčném směru. Křivky mohou být zadány i na strojnickém výkresu polárními souřadnicemi v tabulce. Dále je nutné znát, jak se mění profil po délce lopatky. Lopatka bývá na vstupu širší a směrem k výstupu se zužuje nebo naopak. Toto bývá uvedeno na strojnickém výkresu.

2.1.2 Formátování datového souboru se souřadnicemi

Souřadnice lze importovat ze souboru s příponou txt a musí být zapsány v této podobě:

X_1	Y_1	Z_1
X_2	Y_2	Z_2
	...	
X_n	Y_n	Z_n

K snadnému zapsání takového souboru lze použít program Excel, ve kterém můžeme hodnoty dle potřeby i lehce přepočítat, jsou-li například zadány v polárních souřadnicích. Ukládáme-li pak soubor, zadáme příponu txt.

2.1.3 Importování křivek z datového souboru do SolidWorks

V SolidWorks lze k importování bodů použít příkazu *Curve Through XYZ Points*, kdy můžeme zvolit jako zdroj dat náš soubor.

2.1.4 Sestrojení středové plochy ze sítě křivek

Importujeme-li křivky profilu, můžeme z nich pak pomocí funkce *Boundary surface* sestrojít plochu. Je nutné je však napřed ve 3D sketchi převést na křivky spline pomocí příkazu *Convert entities*.

2.2.0 Sestrojení objemu lopatky kolem středové plochy

Náročnost konstrukce objemu kolem středové plochy závisí na předpisu, kterým je určena normálová tloušťka lopatky. Tato tloušťka může být v nejjednodušším případě konstantní. Potom stačí k sestrojení objemu použít funkci *Thicken*.

Hydraulické rotační stroje ale často fungují tak, že na lopatku směrem od středu na obvod působí různé tlaky. Tloušťka lopatky je proto v místech vyšších tlaků větší a postupně se podle daného předpisu v místech nižších tlaků zužuje. Tím se konstrukce zkomplikuje, protože samotný tvar lopatky je již většinou obecná trojrozměrná plocha a v SolidWorks neexistuje příkaz, který by tvořil automaticky objem o proměnné tloušťce nad takovou plochou. Proto je nutné tento problém obejít a sestrojít si napřed pomocnou síť křivek, za jejichž pomoci sestrojíme plochu a z ní následně objem celé lopatky.

2.2.1 Úprava středové plochy před konstrukcí pomocné sítě křivek

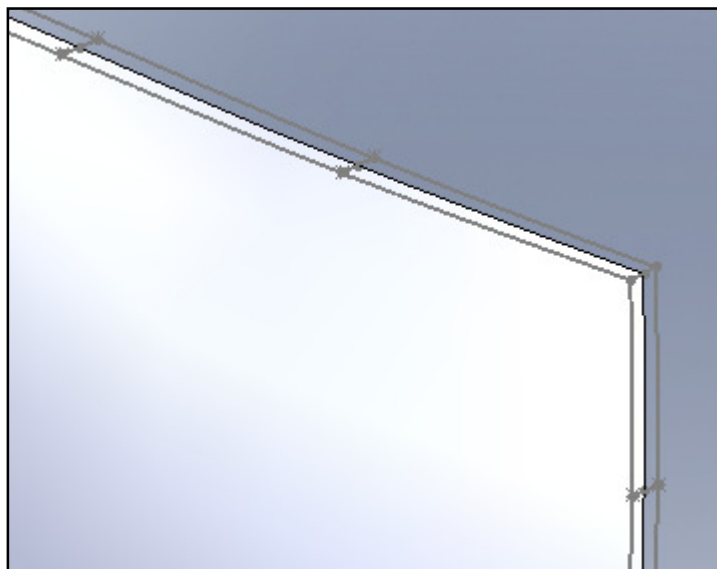
Před samotnou konstrukcí pomocné sítě křivek je třeba provést úpravu středové plochy. Plochu je nutné nejprve pomocí funkce *Extend* protáhnout směrem nahoru a dolů tak, aby se posléze všechny sestrojený objem dostal nad i pod pomyslné rotační plochy věnce a náboje. Objem totiž bude nanášen ve směru kolmém k ploše. Jelikož je plocha v různých místech jinak natočená, mohlo by dojít k tomu, že při budoucím odečítání lopatka nebude protínat celý objem kapaliny.

2.2.2 Příprava pomocné sítě křivek k sestrojení objemu lopatky

Při této konstrukci si nejprve připravíme dva normálové profily na každé boční hraně středové plochy o předepsané tloušťce. V cvičné úloze, v níž byla modelována lopatka Francisovy turbíny, měla vstupní hrana tloušťku profilu 12 mm. Tento profil lze sestrojít přímo ve *3D Sketch* zadáním rozměrů a podmínek kolmosti.

Pokud je ale hrana zakřivená jako v případě výstupní hrany cvičně modelované lopatky, je nutné si nejprve předpřipravit několik úseček po délce této hrany (**Obr. 1**). Ty lze zadat jako kolmé na středovou plochu v každém příslušném bodu pomocí podmínky kolmosti na plochu. S pomocí těchto úseček pak lze sestrojít požadovaný normálový profil na výstupní hraně.

Máme-li sestrojeny normálové profily, potřebujeme ještě křivky, podél nichž budou tyto profily taženy. Křivky sestrojíme tak, že si opět připravíme pomocné úsečky kolmé na středovou plochu po délce horní a spodní hrany lopatky. Jejich délku budeme měnit podle předepsané tloušťky lopatky v daném místě. U lopatky Francisovy turbíny bylo zadáno, že lopatka se má zužovat lineárně směrem od vstupní hrany o tloušťce 12 mm až po výstupní hranu o tloušťce 5 mm. Můžeme si tedy sestrojít například deset pomocných úseček a jejich tloušťku měnit krokově o 0,7 mm. Pravidelné rozložení úseček po délce lopatky zaručíme tak, že si sestrojíme pomocných deset křivek použitím funkce *Face Curves*. Konce úseček na každé straně lopatky spojíme křivkou spline a získáme tak dvě dvojice řídicích křivek podél horní a spodní hrany lopatky. Ty použijeme u konstrukce plochy lopatky.

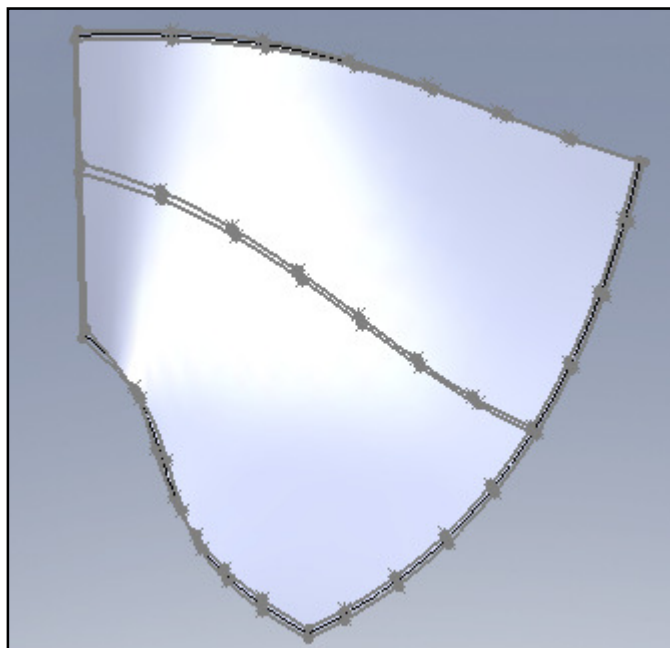


Obrázek 1, kap. 2.2.2 - Detail pomocných úseček a křivek

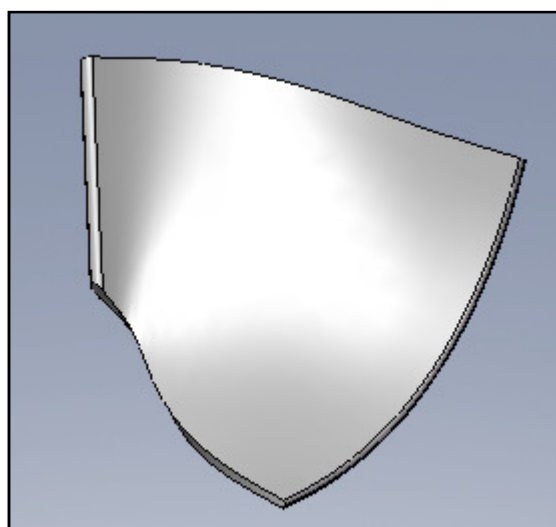
Pro zvýšení přesnosti při konstrukci plochy lopatky si lze sestrojít ještě třetí dvojici řídicích křivek vedených podél střední křivky středové plochy (**Obr. 2**). Konstrukce je obdobná. Středovou křivku získáme ve *3D Sketchi* opět funkcí *Face Curves*, při jejímž zadání nastavíme umístění v pozici 50 %.

2.2.3 Sestrojení objemu lopatky ze sítě křivek

Nejdříve sestrojíme plochu lopatky pomocí funkce *Surface Loft* zadáním pomocných profilů a řídicích křivek. Funkcí *Surface Fill* vyplníme plochami prázdné konce v místech vstupní a výstupní hrany. Všechny plochy pak sjednotíme funkcí *Knit Surfaces*, u níž také povolíme příkaz *Pokusit se sestrojít objem (Try to form solid)*. Tak vznikne plný objem lopatky. Posléze ještě přidáme zaoblení na vstupní a výstupní hraně funkcí *Fillet/Round* (**Obr. 3**).



Obrázek 2, kap 2.2.2 - Zobrazení celé sítě pomocných křivek a normálových profilů



Obrázek 3, kap. 2.2.3 - Kompletní lopatka

3.0 Příprava geometrického modelu pro preprocesor Gambit

Preprocesor Gambit od firmy Fluent slouží k nanášení výpočetní sítě do objemu kapaliny protékající strojem. Nanášení této sítě se řídí svými specifickými pravidly. Model v SolidWorks je třeba připravit tak, aby mohla vzniknout kvalitní síť s co nejpravděpodobnějšími prvky. Je třeba sestrojít část celkového rotačně symetrického objemu protékajícího strojem (je-li rotačně symetrický). Tato část by měla být zlomkem celého objemu podle počtu lopatek. (Např. je-li lopatek 16, sestrojujeme 1/16 objemu.) Objem musí být také doplněn o předepsané vstupní a výstupní části podle konkrétního zadání. Dále je vhodné, aby byl objem rozdělen na několik segmentů, což je detailněji popsáno v kapitole 3.2.0.

3.1.0 Konstrukce objemu kapaliny protékající strojem

Aby bylo dosaženo dobrých výsledků při sestrojování výpočetní sítě, je třeba, aby byl daný model kapaliny vhodně předpřipraven. Měl by proto mít mimo jiné i vhodný tvar. Je proto využita již sestrojená středová plocha z konstrukce lopatky, pomocí které dosáhneme pravidelnosti našeho modelu.

3.1.1 Sestrojení bočního profilu

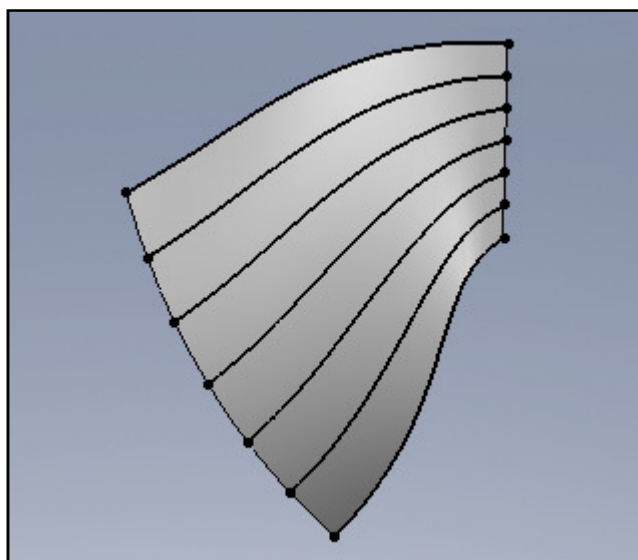
Protože se bude jednat o rotačně symetrický model, můžeme sestrojít boční plochu, kterou následně rotací zkopírujeme o daný úhel a pospojujeme tyto dvě plochy dalšími plochami dohromady. Z nich pak můžeme sestrojít plný model.

Ke konstrukci je využita středová plocha lopatky. Máme-li v SolidWorks tuto plochu importovanou nebo sestrojenou, zvolíme zadání nového 3D Sketche. Použijeme příkaz *Face curves* na středovou plochu a zvolíme sestrojění podélných křivek (**Obr. 4**). Obecně volíme křivky v podélném nebo příčném směru podle toho, jak budeme chtít naši plochu sestrojovat.

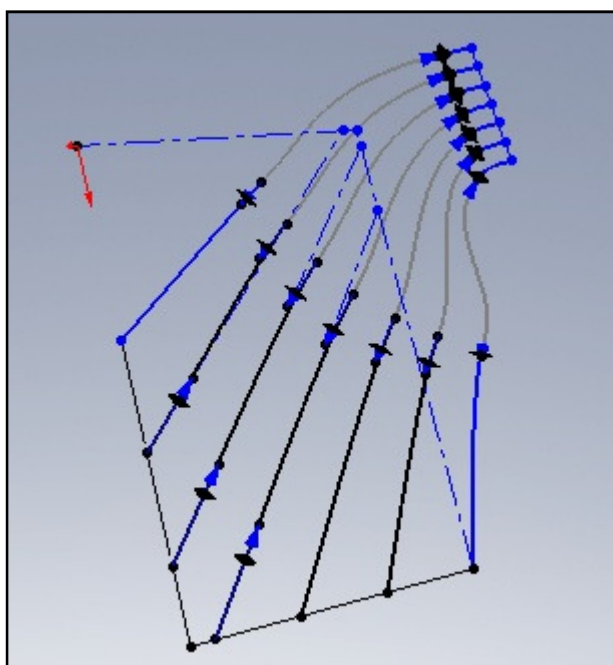
Nyní je potřeba dokončit síť pomocí vhodně polohovaných křivek typu spline (**Obr. 5**). Boční profil by měl být protažen ve směru vstupní hrany tak, aby vznikl prostor pro budoucí nanášení sítě objemů mezi vstupní hranou modelu lopatky a vstupní plochou. Rýsujeme-li tyto spliny, je také vhodné vždy zadat podmínku jejich tečnosti na již sestrojené povrchové křivky. Vznikne tak pak souvislá plocha nepřerušovaná hranami a nerovnostmi [1].

V druhém, výstupním směru by měly být spliny narýsovány tak, aby formovaly tvar budoucí plochy podle toho, jak vypadá výstup, který modelujeme. Například u cvičně modelované Francisovy turbíny, jež ústí do výstupního kužele, budeme spliny zadávat tak, aby už daná hrana námi sestrojené plochy byla pod úhlem 5 stupňů vzhledem k hlavní ose, jak je zadáno výkresem.

Jak již ale bylo řečeno, zadané spliny by měly být tečné k povrchovým křivkám. Dojde tedy k tomu, že křivky se budou natačovat a tvarovat. Dané rozšiřování pod úhlem 5 stupňů jsme schopni dodržet, sestrojíme-li si pomocnou rotační plochu, která bude částí povrchu výstupního kužele. Krajní z řídících křivek pak můžeme zadat na této ploše pomocí funkce *Spline on surface*.



Obrázek 4, kap. 3.1.1 - Povrchové UV křivky



Obrázek 5, kap. 3.1.1 - Síť řídicích křivek

Dále je vhodné, abychom při konstrukci dodrželi pravidelnost rozdělení křivek tak, jak byly sestrojeny na středové ploše. Dosáhneme tak lepší kvality při sestrování plochy. Můžeme si k tomu například sestrojít pomocný obdélník z čerchovaných konstrukčních čar. Na jeho hrany, na které budeme uchycovat konce splinu, umístíme body podle počtu splinů a pravidelně je rozmístíme zadáním kót.

Na obrázku 5 si je také možno všimnout, že spodní hrana není narýsována plnou čarou. Necháme-li tento konec takto volný, bude pak mít sestrojená plocha hladší tvar. Nerovnosti a zaoblění plochy, které v těchto místech nezadané hrany vzniknou, nejsou relevantní, jelikož plocha bude zarovnána a vytvarována řezem v následujícím kroku.

Plochu sestrojíme funkcí *Surface Loft* a vybereme připravené řídicí křivky.

3.1.2 Řez profilu plochami za účelem dosažení předepsaného tvaru dle výkresu

Plochu řezu sestrojíme rotací 2D sketche, jež narýsujeme podle výkresu udávajícího tvary turbíny (**Obr. 6**). Použijeme příkaz Řez plochou (Surface - Trim).

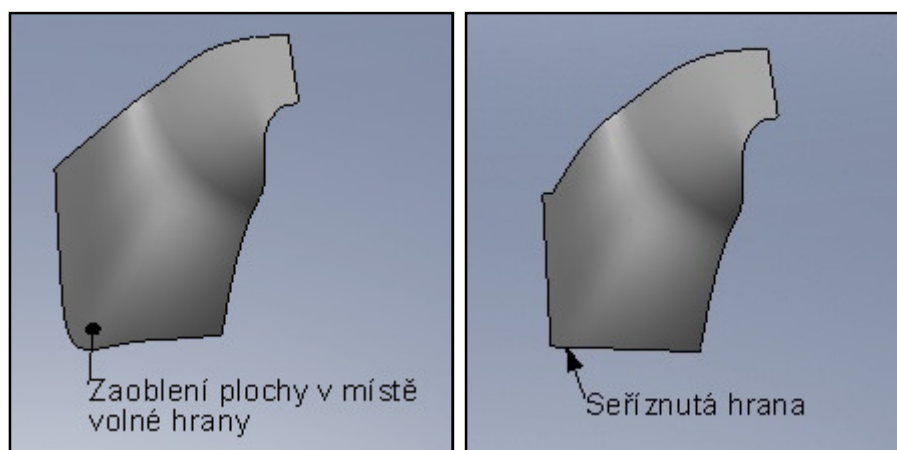
U již zmíněné Francisovy turbíny musela odřezaná část představovat kuželový náboj. Zaoblená strana sestrojěné plochy byla tímto řezem také zarovnána.

3.1.3 Sestrojení objemu kapaliny

Jak již bylo krátce popsáno v úvodu kapitoly, objem sestrojíme tak, že nejprve zhotovíme jednotlivé plochy, které pak vyplníme.

Sestrojený boční profil si okopírujeme rotací použitím funkce *Circular pattern*. Další plochy sestrojíme funkcí *Sweep*. Jako profil použijeme jednotlivé hrany, které přeměníme ve 3D sketchi funkcí *Convert entities*. Jako řídicí křivku vždy použijeme oblouk, který sestrojíme se středem na hlavní ose mezi dvěma si odpovídajícími vrcholy ploch. Úhel pro rotační okopírování a úhel oblouku jsou dány počtem lopatek, jimž rozdělíme 360 stupňů.

Všechny takto sestrojěné plochy můžeme spojit funkcí *Knit surfaces*. V nastavení lze i zadat příkaz *Try to form solid*, který vyplní tento prostor objemem, jedná-li se o plochy ohraničující uzavřený prostor jako v našem případě,.

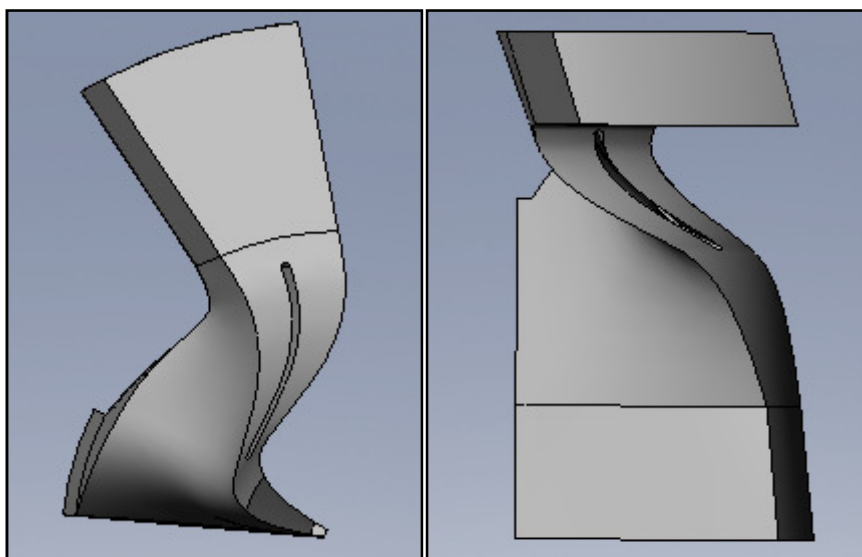


Obrázek 6, kap. 3.1.2 - Řez profilu

3.1.4 Vložení modelu lopatky a odečtení jejího tvaru od objemu kapaliny

Dříve připravenou lopatku je nyní třeba od modelu kapaliny odečíst. Na plochy vzniklé dutiny se ve výpočetních CFD programech budou zadávat okrajové podmínky. Lopatku lze vložit z uloženého souboru příkazem *Insert part*. Lopatku pak můžeme umístit do správné polohy rotací a posunutím. Pokud je už před vložením správně natočena, stačí zadat jako bod umístění počátek souřadnic.

Lopatku odečteme od objemu kapaliny funkcí *Combine*. V nabídce zvolíme možnost *Subtract* (**Obr. 7**).



Obrázek 7, kap. 3.1.4 - Objem kapaliny bez odečtené lopatky
v různých pohledech

3.2.0 Vhodné úpravy před exportováním modelu

Sestrojujeme-li výpočetní síť, je žádoucí, aby byl daný objem rozdělen do segmentů, které lze nejlépe vyplnit šestistěnnými prvky. Pro tento účel můžeme využít pracovní prostředí SolidWorks tak, že sestrojíme plochy, pomocí nichž pak objem kapaliny rozdělíme na tyto segmenty. Ušetříme si tak práci s jejich přípravou v preprocesoru Gambit, který je primárně určen pro síťování a je v něm náročnější provádět úpravy složité geometrie.

3.2.1 Úvaha nad vhodným umístěním řezných ploch

Řezné plochy by měly být navrženy tak, aby vzniklé segmenty byly šestistěnné a co nejvíce se blížily tvaru kvádrů. Segmenty ale nemusí být šestistěnné striktně. Mají-li stěn více, je možno je v některých případech sjednotit tak, aby vznikl šestistěnný tvar. Podaří-li se nám takovéto segmenty získat, je žádoucí, aby se rozměry protilehlých stěn příliš nelišily. Tak se opět budeme nejlépe blížit ideálnímu tvaru kvádrů.

3.2.2 Sestrojení řezných ploch

Plochy lze sestrojít funkcí *Boundary surface*, máme-li k dispozici jejich obvodové křivky. Lze je také sestrojít příkazem *Sweep*, máme-li připravenou křivku profilovou a řídící, po které bude profil tažen.

Použití funkce *Sweep* k přípravě řezných ploch:

Při zadávání okrajových podmínek a pro spuštění výpočtu je nutné, aby na sebe boční strany všech rotačně kopírovaných prvků přesně doléhaly. Za tímto účelem použijeme právě funkci *Sweep* (**Obr. 8**).

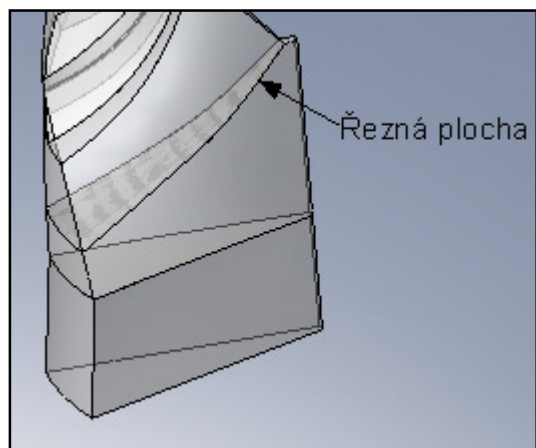
Připravíme-li si profilovou křivku a jako řídící křivku použijeme oblouk se středem na hlavní ose, který začíná na jedné boční hraně a končí na druhé, dosáhneme toho, že na každé straně modelu budou hrany řezné plochy stejné. K přípravě profilové křivky použijeme funkci k sestrojení křivky na ploše – *Spline on surface*.

Funkci *Sweep* tedy používáme tehdy, sestrojujeme-li řeznou plochu, která bude použita k řezu bočních stran modelu, u nichž chceme dodržet rotační symetrii.

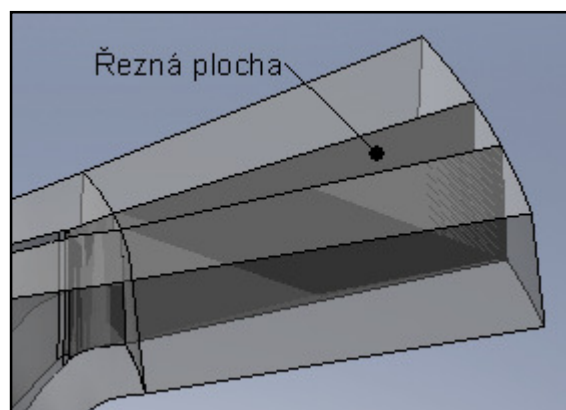
Příprava řídících křivek a sestrojení plochy funkcí *Boundary surface*:

Ve 3D sketchi lze s výhodou použít příkazy k sestrojení křivek spline, které jsou popsány v kapitole 3.2.2. Nyní jsou obzvláště přínosné, protože tak snadno sestrojíme křivku na ploše (*Spline on surface*), UV parametrické povrchové křivky (*Face curves*) či průsečnice dvou ploch (*Face intersection*). Připravíme si tak čtyři hrany, které zadáme jako řídící křivky při zadávání plochy.

Funkci *Boundary surface* (**Obr. 9**) používáme tehdy, sestrojujeme-li plochu, kterou budeme provádět řez vnitřních částí modelu nebo řez stran, u nichž nevyžadujeme rotační symetrii.



Obrázek 8, kap. 3.2.2 - Plocha sestrojená funkcí *Sweep*



Obrázek 9, kap. 3.2.2 – Plocha sestrojená funkcí *Boundary Surface*

3.2.3 Rozdělení modelu plochami

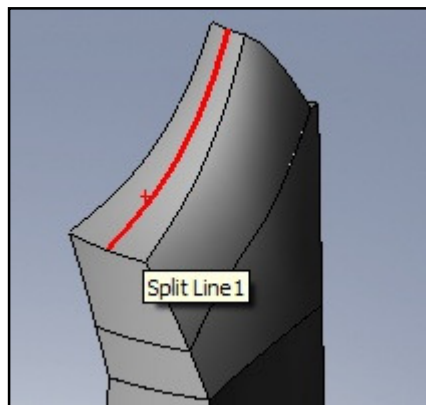
Máme-li připravené řezné plochy, použijeme příkazu *Split* k rozdělení modelu na segmenty. Jejich příprava bývá často prací metodou pokus omyl, kdy se řídíme převážně intuicí a lepších výsledků dosahujeme se zkušenostmi. Nařežeme-li model a chceme-li vyzkoušet, jak kvalitně lze vyplnit síť objemů třeba jen jeden segment z celkového počtu, lze jej uložit do samostatného souboru. V možnostech nastavení funkce *Split* poklepeme myší na vybraný díl v seznamu všech segmentů a SolidWorks nám nabídne jeho uložení do samostatného souboru. Tento osamocený segment pak můžeme exportovat stejným způsobem jako celý model. Postup při exportování bude popsán v kapitole 3.3.0.

3.2.4 Další úpravy modelu před exportováním

Při přípravě modelu k nanášení sítě v preprocesoru je nutné, aby byly všechny stykové plochy jednotlivých segmentů spojeny. Toto nelze provést přímo v SolidWorks. Plochy vždy budou prezentovány samostatně na sobě, každá náležící jednomu ze segmentů.

Může ale nastat situace, kdy se plocha jednoho segmentu bude stýkat s více plochami jiných segmentů. Aby mohlo dojít k spojení těchto ploch, musí být plocha prvního segmentu rozdělena na více částí.

Toto rozdělení je snadněji proveditelné v SolidWorks. Použijeme funkci *Split line* a vybereme příslušné řezné plochy a plochu segmentu, kterou chceme rozdělit (**Obr. 10**).



Obrázek 10, kap. 3.2.4 - Rozdělení plochy podobjemu

3.3.0 Exportování modelu

Aby mohl být model otevřen v programu Fluent, je třeba ho napřed exportovat v kompatibilním formátu. Výstupní formáty mají rozdílné vlastnosti. Liší se například přesností geometrie. Je-li tato přesnost příliš nízká, není Gambit schopen pracovat s danou geometrií jako reálnou a musí ji převádět na virtuální, se kterou nelze provádět některé operace. Dále se pak formáty liší podobou exportovaných dat – model může být reprezentován buď objemy, nebo plochami. Snahou je, abychom exportovaný model získali v podobě objemů, plochy by do nich jinak totiž musely být sjednocovány ručně, což by při větší složitosti modelu bylo náročné a zdlouhavé.

3.3.1 Přehled a popis formátů výstupních souborů

1. ACIS (*.sat)

Jedná se o formát s vysokou přesností. Někdy však SolidWorks není schopen exportovat modely v tomto formátu, vyskytují-li se v nich příliš složitě plochy. Exportovaný model je v tomto formátu reprezentován objemy.

2. STEP AP203/AP214 (*.step)

Tento formát nemá tak vysoký stupeň přesnosti, ale na druhou stranu je SolidWorks schopen v tomto formátu ukládat modely i při velké složitosti jejich geometrie. Exportovaný model je také reprezentován objemy.

3. IGES (*.igs)

Tento formát se vyznačuje tím, že model převádí na jednotlivé plochy.

3.3.2 Exportování geometrie

Export v různých formátech lze v SolidWorks zadat při ukládání modelu použitím příkazu *Uložit jako ...*.

4.0 Rozvaha nad použitím programu SolidWorks pro přípravu geometrických modelů pro Gambit

Chceme-li připravit model pro výpočet ve Fluentu, je možno zvolit několik postupů. Relativně levnější a snazší se zdá být použít jeden program, v tomto případě preprocesor Fluentu – Gambit a v něm sestrojít jak geometrii, tak i síť. Geometrii lze sestrojít také v nějakém modelovacím programu, například SolidWorks, a posléze si ji exportovat do Gambitu a v něm už jen nanést na model síť. Tento postup je ale nákladnější (je třeba vlastnit licenci k programu SolidWorks) a také náročnější (je nutné se naučit ovládat nejenom Gambit, ale i SolidWorks). V následujících odstavcích jsou uváděny argumenty pro použití SolidWorks.

4.1 Výhody práce v prostředí SolidWorks

Součástí Gambitu je modelář, jehož pomocí lze sestrojovat geometrii. Jelikož je ale Gambit primárně určen k meshování, neobsahuje tento modelář některé pokročilé funkce, které jsou právě často vhodným nástrojem při sestrojování složitějších modelů, jako je například lopatka o proměnné tloušťce. Jedná se především o možnost sestrojovat plochy s proměnným profilem při zadání řídicích křivek a profilů. V SolidWorks je tato funkce přítomna pod jménem Loft a byla použita v předcházejícím návodu v mnoha případech.

Značné usnadnění práce přináší SolidWorks i v případě sestrojování řezných ploch. K jejich konstrukci jsou využity povrchové křivky na modelu. Pro jejich zadávání má SolidWorks značné množství nástrojů.

Dalším argumentem pro SolidWorks je, že tento program je od začátku vyvíjen s důrazem především na 3D modelování. Obsahuje tudíž spoustu pomocných funkcí, které nám umožňují zadávat geometrické podmínky, jimiž můžeme navzájem propojovat jednotlivé části modelu. Navíc SolidWorks je čistě windowsovská aplikace a uživatel tak může očekávat možnosti a výhody, které tato skutečnost umožňuje. Lze editovat uživatelské panely a přizpůsobovat nabídky podle osobní preference. Gambit je po této stránce značně omezený a v porovnání se SolidWorks je jeho používání více složitě a uživatelsky náročné.

4.2 Vlastnosti a přesnost exportované geometrie

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3.0, exportovaná data mohou mít podobu ploch nebo objemů. Vhodnější jsou objemy, protože tak se vyhneme tomu, abychom museli plochy v Gambitu ručně spojovat. I export přes objemy však přináší komplikaci a při přechodu do Gambitu je nutné model upravit. Když totiž rozdělíme model řeznými plochami, vzniknou segmenty, které na sebe doléhají plochami. Každý segment má však svou vlastní plochu, a tak jsou v místě styku přítomny dvě identické plochy. Tyto je v Gambitu nutné spojit, protože ponechání obou by mohlo generovat chyby při nanášení sítě. Obecně lze však říci, že export přes objemy přináší méně dodatečné práce než export přes plochy.

Modelování v SolidWorks se řídí jistou přesností. Mají-li být dvě přímky nebo plochy stejnohlé, je tomu tak vždy jen do jisté hodnoty tolerance. Obzvláště při dělení modelu řeznými plochami lze pozorovat, že vzniklé segmenty mají menší přesnost a nedoléhají na sebe těsně. Takto je však nastaven program SolidWorks a je nutno s tím počítat. Program Gambit má však nastavení jiné a může se stát, že tolerance v SolidWorks pro nějaký prvek ještě

dostačující už přesahuje v Gambitu povolenou mez. Chceme-li pak takovouto geometrii například spojit, nelze s ní již pracovat jako s reálnou, ale jako virtuální, která nemá takové nároky na přesnost. To nebrání nanášení sítě, ale omezuje naše možnosti při úpravě geometrie samotné. Proto by měl být model přichystán v SolidWorks tak, aby již žádné zásahy do rozměrů či tvarů nebyly nutné a bylo třeba jen spojit sousedící plochy a nanést síť.

Ještě je nutno podotknout, že přejdeme-li z reálné geometrie do virtuální při současné ztrátě přesnosti, neznamená to, že by snad model příliš změnil své rozměry a že by to nějakým způsobem ovlivnilo případný výpočet. Už samotný výpočet je totiž prováděn na síti konečných objemů, které vyplňují model díky své velikosti nedokonale.

4.3 Úpravy již sestrojené geometrie

Další výhodou práce v SolidWorks je, že daný model lze při dodržování určitých pravidel parametrizovat a lze tak některé jeho rozměry měnit, aniž by musel být přebudován celý model. Kdy hlavně je třeba zvolit vhodný postup je případ, kdy sestrojujeme sketche, které posléze používáme pro sestrojení modelů. Jednotlivé prvky geometrie jsou řazeny do vývojového stromu. Zde si lze ověřit, jak jsou jednotlivé části na sobě závislé a ve kterých případech musí jedna předcházet druhé (lze zkontrolovat příkazem Parent/Child). Změníme-li parametry jednoho prvku z vývojového stromu, ostatní, které na něj navazují, se také automaticky upraví podle zadaných podmínek.

Zadáváme-li body, přímkou či křivky, je třeba dbát na to, abychom pečlivě zadávali příslušné geometrické podmínky každému prvku. Také je vhodné nové sketche geometricky svázat s již existující geometrií například zadáváním bodů na hrany či plochy již sestrojené geometrie či zadáváním podmínek kolmosti nebo tečnosti pro přímkou. Případně lze určité rozměry i okótovat. SolidWorks je v tomto ohledu nápomocen tak, že ukazuje stav právě editovaného sketche a zda-li je už plně geometricky definován, tj. všechny jeho prvky jsou svázané podmínkami.

V SolidWorks sice existuje nástroj pro automatické zadání geometrických podmínek pro daný sketch. Tento však nelze doporučit používat, protože ne vždy jsou podmínky zadány tak, jak si představuje uživatel. Při vlastnoručním zadávání lze navíc ovlivnit, které rozměry budou rozměrově dány a které budou na těchto rozměrech závislé a měnit se podle nich. Dále by neměl být používán příkaz *Fixed* - zakotvení, nejsme-li si opravdu jisti, že s daným prvkem sketche již nebude manipulováno. Tato funkce může v některých případech vést k předefinování sketche. To nastane tehdy, brání-li nám zakotvení některého prvku v aplikaci některé ze zadaných geometrických podmínek.

Dostaneme-li se do situace, kdy potřebujeme smazat již sestrojenou část modelu – objem, či plochu a nahradit ji jinou, považuje SolidWorks dané podmínky za neplatné, což nám zkomplikuje další činnost. Je nutné tedy jednotlivé navazující části, které SolidWorks označí jako obsahující chybu, krok po kroku upravit. Stále je ale výhoda v tom, že není třeba při jedné změně rozměru navazující části mazat a modelovat je celé od začátku.

Naopak čemu se nevyhneme, musíme-li změnit tvar či rozměry geometrie, je to, že daný model je nutno znovu exportovat a od začátku připravit k meshování a následně vymeshovat v Gambitu. Při exportu se jedná o zcela nový soubor a přecházející model nelze pouze doplnit o provedené změny při zachování již dříve sestrojené sítě.

5.0 Nanesení výpočetní sítě v Gambitu

Při práci ve Fluentu musí být splněny určité podmínky, aby výpočet na síti mohl být vůbec zahájen. Splnění těchto podmínek a získání kvalitní sítě bez chyb dosáhneme tak, že budeme následovat některá důležitá pravidla, kterými se práce v Gambitu řídí.

5.1 Úprava geometrie před nanášením sítě

5.1.1 Import geometrie

Zadáme v Gambitu příkaz importovat soubor typu STEP, ve kterém byl model exportován ze SolidWorks. Zaškrtnutím příslušných políček v nabídce nastavíme příkazy Heal Geometry (oprava importovaných dat), Make Tolerant (automatická úprava geometrie za účelem splnění podmínek tolerance Gambitu) a No stand-alone vertices, edges a faces (smazání bodů, přímek a ploch, které by nebyly spjaty s žádným z objemů modelu).

5.1.2 Sjednocení hran a ploch

Pro snadné zadávání prvků sítě na hrany je vhodné, aby každá hrana byla složena jen z jedné přímky či křivky. Při přenosu geometrie ze SolidWorks se může stát, že v některém místě hrany je přítomen bod dělící na dvě části. Toto sjednocení provedeme v modeláři příkazem *Merge Edges*. Jsou-li někde přítomné plochy, které jsou obdobně rozděleny hranou, sjednotíme je příkazem *Merge Faces*.

Máme-li sjednocené hrany a plochy, je nyní třeba spojit vždy dvě na sebe doléhající plochy v místech styků jednotlivých částí modelů. Toto lze provést příkazem z modeláře *Connect Faces*. Již nyní se může stát, že spojení nebude povoleno z důvodu nízké přesnosti doteku příslušných dvou ploch. V tomto případě je nutné nastavit v příkazu spojení přechod na virtuální geometrii – Virtual (Forced).

5.2 Příprava hran a ploch pro síťování

Výpočetní síť by měla být nanášena tak, aby zohledňovala chování kapaliny a napomohla tak kvalitnějšímu výpočtu [2]. Proto je například třeba zhustit síť v místech, kde budou předpokládané změny tlaků a rychlostí veliké a pro nás důležité.

Síť by proto měla být hustější, čím více se přibližujeme jakékoliv hraniční ploše. Větší hustota je požadována u ploch lopatky. Dále od lopatky se dostáváme do prostor středu kanálu, kde může být síť méně hustá. Totéž platí ve směru od jednoho nosného věnce na druhý. U kovové plochy věnců požadujeme zhuštění sítě.

5.2.1 Dělení hran na konečné prvky

Měnit hustotu sítě v Gambitu lze tak, že si vhodně připravíme dělení hran, než začneme síťovat plochy a objemy. Dělení přímky na prvky lze provést příkazem *Mesh Edges*. Zhuštění můžeme zadat zaškrtnutím možnosti *Grading*, které lze nastavit jednostranně či oboustranně. Posléze zadáme hodnotu koeficientu od 0.2 do 5.0 podle toho, jestli chceme síť více či méně hustou. Tímto koeficientem pak bude násobena nejdelší nebo nejkratší délka dělení směrem od jednoho konce na druhý nebo od středu na okraje.

Toto dělení je nutné zadat pro každou hranu, u které ho požadujeme. Při zadání například pouze jedné ze čtyř a následném vymeshování objemu by byly zbylé tři hrany děleny pouze rovnoměrně. Práci s dělením více hran stejnými poměry si lze usnadnit příkazem *Link Edge Meshes*. Pak nám stačí mít pouze jeden vzor, podle kterého se budou dělit všechny ostatní hrany. Je však nutno kontrolovat orientaci jednotlivých hran, která je označena šipkou při jejich označení. Aby bylo zhuštění provedeno ve stejném směru jako u vzoru, musí být tato orientace stejná. Orientaci můžeme změnit zmáčknutím prostředního tlačítka myši nad danou hranou.

5.2.2 Kontrola vrcholů ploch a jejich úprava

Při přípravě ploch se nám jedná hlavně o to, aby u vrcholů každé plochy bylo správně určeno, jedná-li se o koncový bod, nebo bod na straně. Někdy totiž nastane situace, že plocha má například 5 vrcholů, ale z toho jeden spojuje dvě strany, které na sebe navazují pod velice velkým úhlem. Takovéto plochy lze síťovat jako čtyřhranné, ale tento vrchol je nutno označit jako bod na straně. Správné označení vrcholů na plochách lze ověřit a případně upravit funkcí *Set Face Vertex Type*.

5.3 Zadání sítě konečných objemů

Síť je nanášena postupně, a to tak, že postupujeme od přípravy rozdělení hran, sestrojení sítě plochy a následně objemu. Je vhodné použít pravidelnou síť ze šestistěnných prvků – *Hex Mapped*, která přináší přesnější výsledky [2]. Proto stačí mít například připravenou jednu síť na podstavné ploše, která je vymeshovaná čtyřhrannými prvky typu *Quad Mapped*, a rozdělenou jednu boční hranu. Při zadání sítě ze šestistěnných (*Hex*) je celý objem plně definován jako pravidelný (*Mapped*).

5.3.1 Zadání sítě na bočních plochách při zachování podmínky periodicity

Při výpočtu ve Fluentu se počítá chování kapaliny v celém objemu. Jelikož máme ale připravenou jen část, která bude rotačně okopírována, potřebuje Fluent, abychom zajistili návaznost sítí na sebe. Proto boční strany modelu, které na sebe budou doléhat při rotačním kopírování, musí mít identickou síť, aby na ně bylo možno úspěšně zadat periodickou okrajovou podmínku. Proto si nejprve přichystáme síť na všech plochách jedné strany modelu. Ty sestrojíme příkazem *Mesh Faces*. Potom každou z ploch propojíme s jí příslušnou plochou na druhé straně modelu pomocí příkazu *Link Face Meshes*. Tak se nám vytvoří vždy i síť na každé z příslušných ploch. Při zadávání spojení je opět třeba kontrolovat orientaci šipek na hranách plochy. Pokud je opačná než u vzorové plochy, musíme zaškrtnout možnost *Reverse Orientation*.

5.3.2 Vytvoření 3D sítě

Jakmile máme nachystány všechny boční plochy, můžeme začít meshovat objemy. Dělení hran by mělo být nachystáno z předchozích kroků a pokud někde chybí, stačí jej opět dodělat příkazem *Mesh Edges* a zadat požadovaný počet prvků.

Jak již bylo řečeno, měli bychom nanášet pokud možno pravidelnou síť se šestistěnnými prvky. Pokud na některý objem nelze tuto nanést (podstavná plocha má například jen 3 strany), použijeme místo toho nepravidelnou síť se šestistěnnými prvky – na podstavné plochy

naneseme síť typu *Quad Tri Primitive* (místo *Quad Mapped*). Prvky Quad jsou čtyřhranné prvky, ale nastavení *Tri Primitive* je nanáší na plochu o třech stranách.

5.4 Kontrola kvality a exportování sítě

Kvalitu sítě lze zkontrolovat pomocí příkazu *Examine Mesh*. Zde existuje hodně možností nastavení, ale obvyklé je zkontrolovat parametr *EquiAngle Skew*. Ten hodnotí kvalitu šestistěnného prvku podle toho, jak moc se blíží ideální krychli. Parametr má hodnotu od nuly do jedné, kde nula označuje ideální krychli a jedna je její maximální zploštění. Je vhodné, aby síť neobsahovala prvky s kvalitou horší než 0.85 [2]. Gambit ukazuje i četnostní rozdělení prvků v intervalech po 0.1. Více prvků by mělo být kvalitnějších a mít nižší hodnotu parametru.

Export sítě do souboru kompatibilního s Fluentem lze provést v menu *File > Export > Mesh*.

Závěr

Efektivní a rychlé modelování v programech typu SolidWorks je vždy nevyhnutelně spojeno s potřebou mít za sebou již jistou praxi v práci s nimi. Tato práce nebyla zaměřena na to, aby popsala práci v SolidWorks od úplných základů. Předpokladem bylo, že uživatel již zná jednotlivé základní příkazy tohoto programu a jejich použití. Snahou pak bylo ukázat inovativní použití vybraných funkcí při přípravě CFD modelů a také to, jaký celkový postup zvolit.

Přístup upřednostněný v této práci je modelování od bodů a přímek, ze kterých se postupně tvarují plochy a objemy. Touto cestou má uživatel větší možnost kontroly zadávané geometrie a lze tak její rozměry i snadněji parametrizovat. Při konstrukci sketchů byly shledány obzvláště přínosné pokročilé funkce SolidWorks pro zadávání geometrických podmínek a speciálních křivek jako například UV křivek plochy. Co se týče sestrojování ploch a objemů, má SolidWorks hlavní výhodu jako modelář v tom, že umožňuje sestřít jednu funkcí (*Loft*) tvary s měnícími se profily vedenými po obecných křivkách. Jim pak lze nastavovat i různé vlastnosti a podmínky jako například tečnost k již existující ploše. Díky těmto nástrojům lze modelování v SolidWorks označit za více intuitivní a přehledné na rozdíl od Gambitu. Gambit samotný ovšem však nelze označit za nedostačující. Hlavní rozdíl je především v rychlosti a přehlednosti modelování.

Nedílnou součástí této práce byla i příprava samotných modelů. Sestrojovány byly modely pro analýzu hydraulických strojů. Samotné modelování bylo mnohdy značně zdlouhavé, protože snaha byla vyzkoušet různé funkce. Postupně ale byly vybrány určité postupy, tak jak jsou popsány v textu, díky nimž se práce zrychlovala. Funkčnost modelu byla ověřena zdárným importováním do Gambitu a nanesením sítě. Celkově byl na závěr model validován tím, že se jej podařilo přenést i se sítí do výpočetního prostředí Fluentu, zadat zde okrajové podmínky a spustit výpočet.

Celkově lze tedy celou práci shrnout tak, že použití SolidWorks přináší výhody při sestrojování modelů. Má-li výpočtář možnost jej použít, je tak určitě schopen ušetřit čas a současně sestřít model, který lze snadno v případě potřeby upravovat a měnit jeho parametry. Následně je schopen jej snadno přenést a použít již jen pro samotné síťování v Gambitu. Na druhou stranu je však nutno říci, že určitě existují i jiné nástroje. Obzvláště vhodné mohou být ty, které automaticky konstruují objem okolní tekutiny kolem zadané geometrie lopatky. Zakoupení těchto programů je však vždy spojeno s finančními možnostmi daného podniku či univerzity a s mírou jejich specializace v daném oboru.

Seznam použitých zdrojů

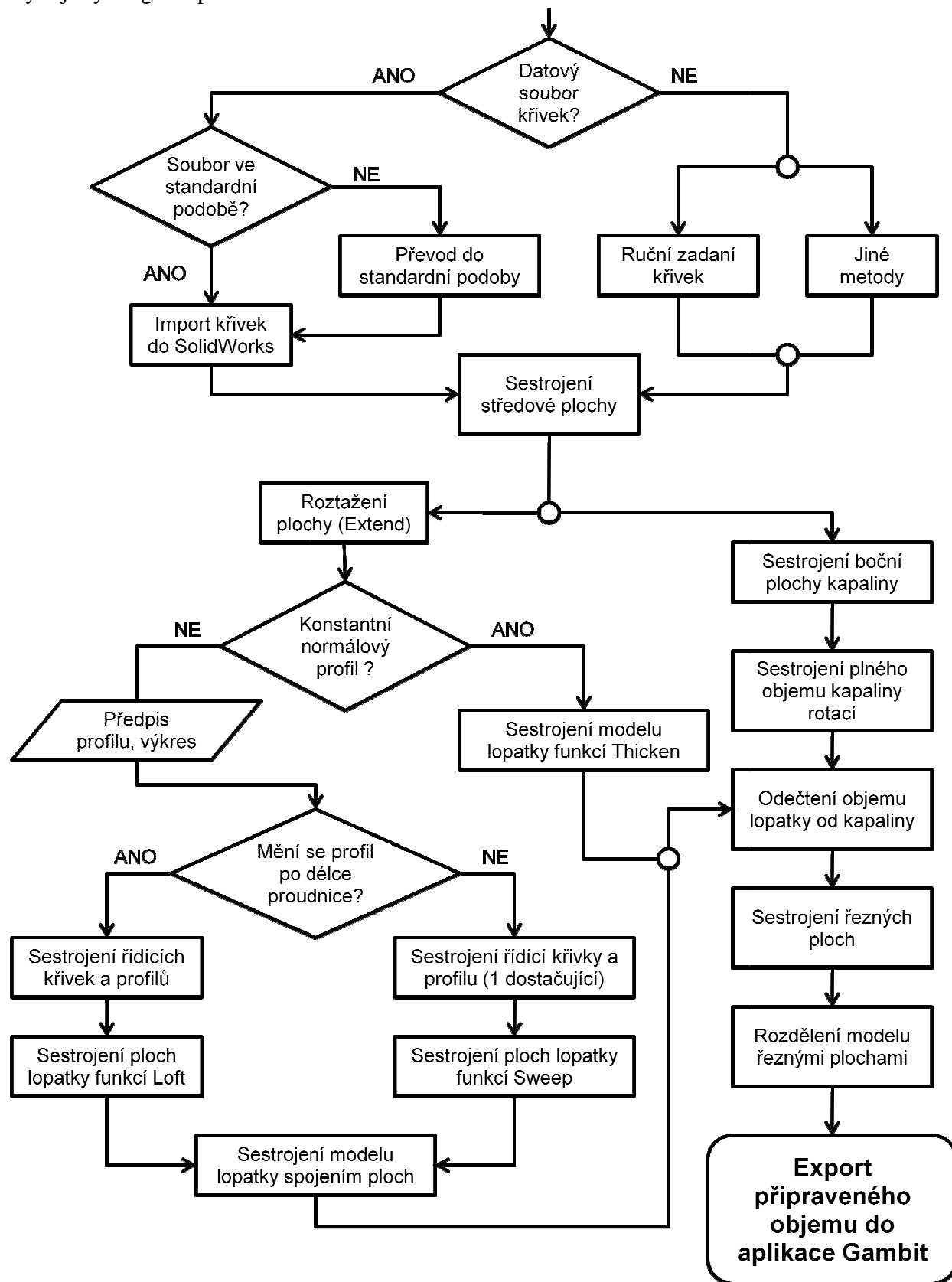
- [1] EATON, Edward T. *Curvy Stuff – The Basics of Loft* [online]. [cit. 2007-02-03].
URL:<http://www.dimontegroup.com/Tutorials/CS6-The_basics_of_loft_02-03-07.zip>
- [2] *GAMBIT Documentation* [online]. Version 2.0. [cit.2008-04-20].
URL:<<http://www.ent.ohiou.edu/~juwt/HTMLS/fluent/gambit2/index.htm>>

Seznam příloh

1. Vývojový diagram pro konstrukci CFD modelu
2. Kompletní v SolidWorks sestrojený model kapaliny protékající rotorem Francisovy turbíny
3. Výpočetní síť nanesená v Gambitu na periodicky se opakující část modelu
4. Ukázka rozložení prvků sítě podle kvality
5. Analýza kvality sítě provedená v Gambitu

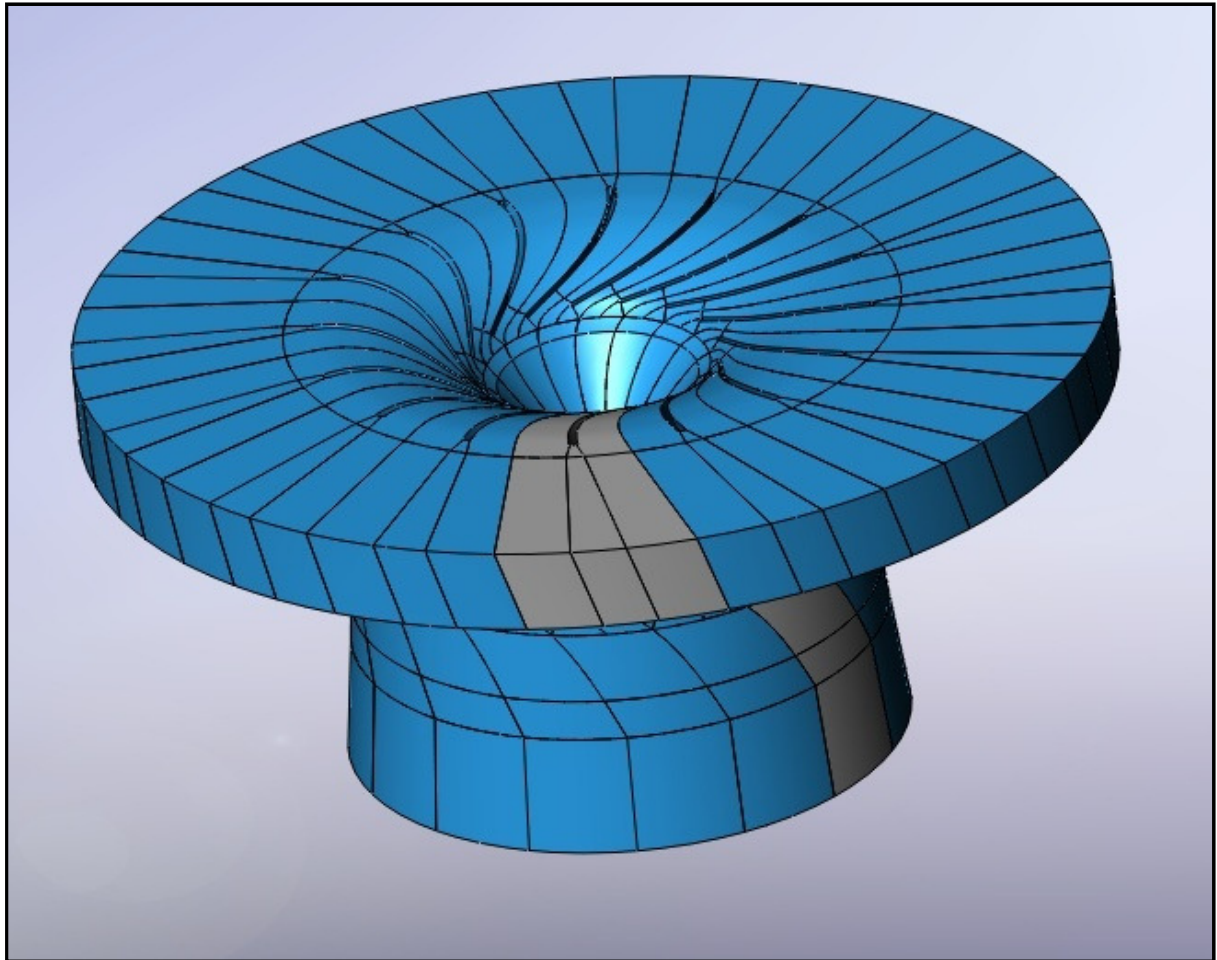
Příloha 1

Vývojový diagram pro konstrukci CFD modelu



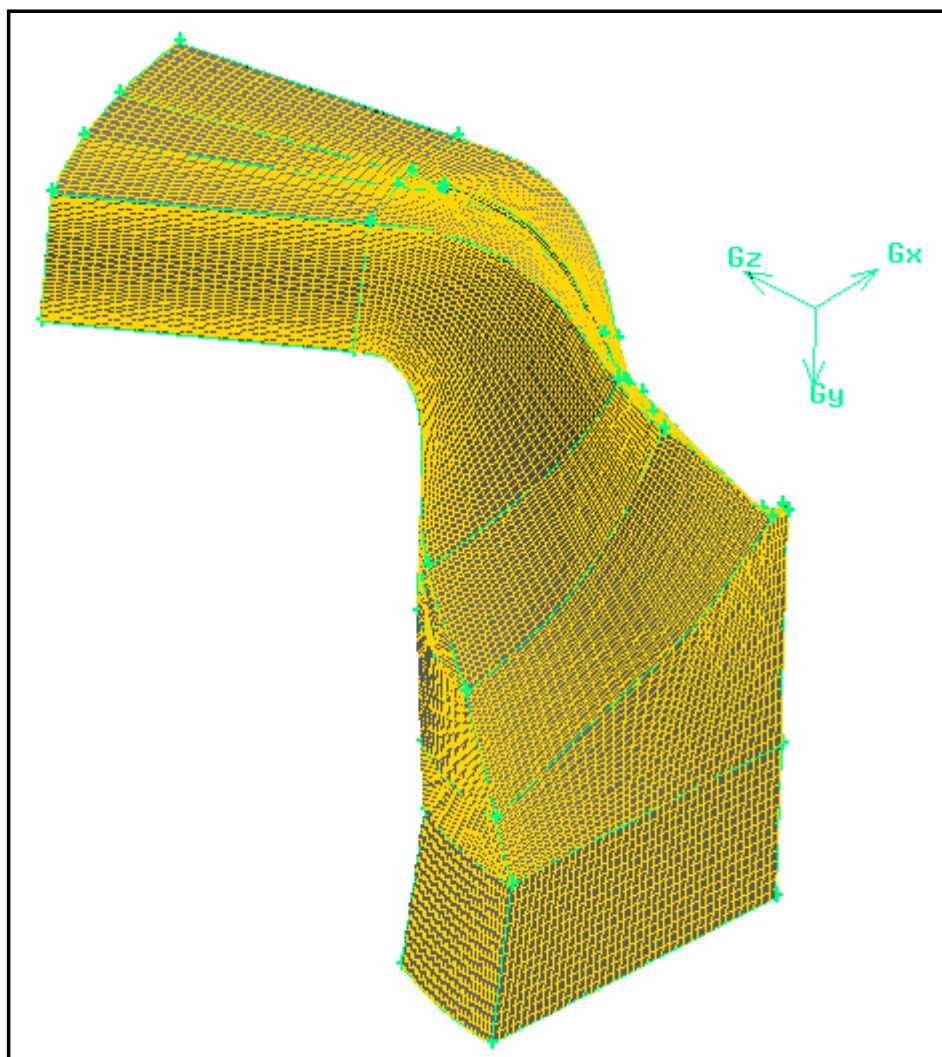
Příloha 2

Kompletní model kapaliny protékající rotorem Francisovy turbíny sestavený v SolidWorks



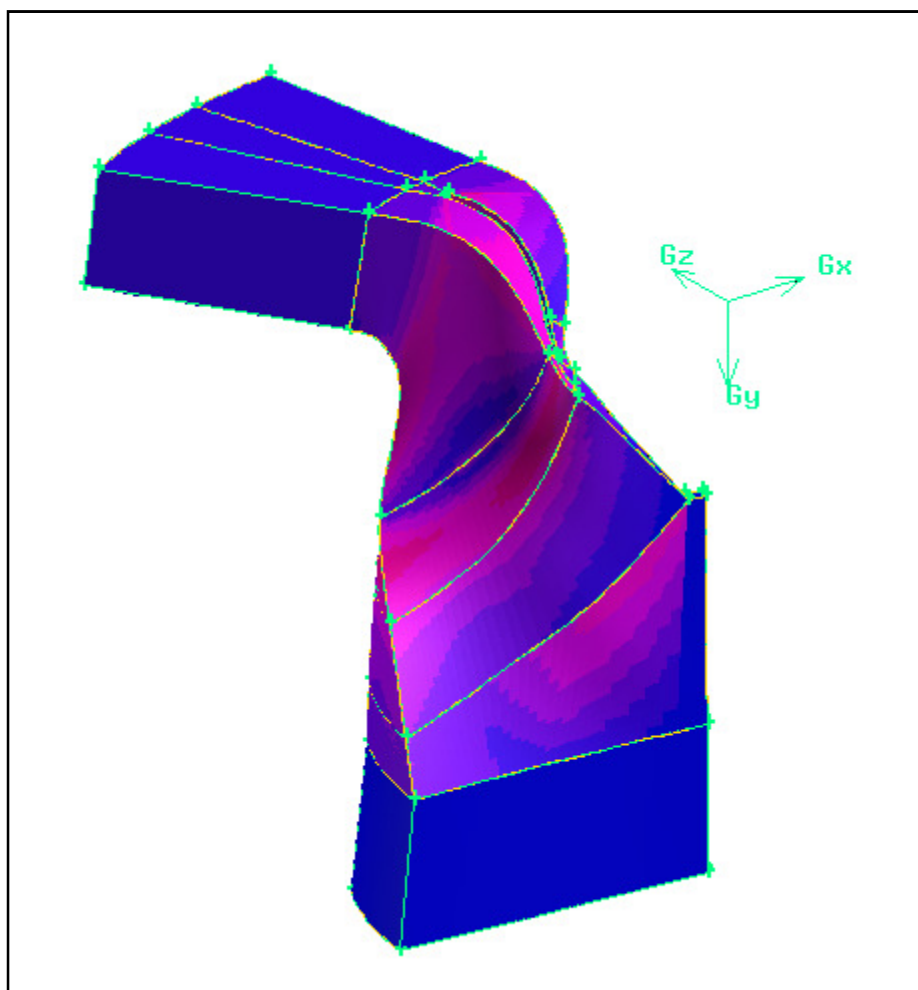
Příloha 3

Výpočetní síť nanesená v Gambitu na periodicky se opakující část modelu



Příloha 4

Ukázka rozložení prvků sítě podle kvality



Příloha 5

Analýza kvality sítě provedená v Gambitu

