

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra zemních, těžebních a stavebních strojů

Konstrukční řešení generátoru vodní elektrárny

Design Solution of Hydroelectric Power Plant Generator

Student:

Bc. Jiří Dvorák

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Dvorák**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 70 Zemní, těžební a stavební stroje
Téma: **Konstrukční řešení generátoru vodní elektrárny**
Design Solution of Hydroelectric Power Plant Generator
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce proveďte stručnou rešerši a analýzu dané problematiky. Navrhněte konstrukční řešení generátorové části vodní elektrárny o výkonu 10,4 MW, jako součást renovace strojní části vodní elektrárny. Proveďte potřebné kinematické a pevnostní výpočty. Konstrukční návrh podložte technickou dokumentací v odpovídajícím rozsahu a kvalitě. Konkrétní technické a provozní parametry konzultujte se zadavatelem – firma Hansen Electric, spol. s r.o.

Seznam doporučené odborné literatury:

JEŘÁBEK, K. *Metodika navrhování strojů*. 1. vydání, Praha: Ediční středisko ČVUT v Praze, 1999. 119 s.
BROŽ, L. *Hutnictví železa*. Praha: SNTL, Praha 1988. 460 str.
BOLEK, A. a kol. *Části strojů*. Praha: SNTL Praha, 1990.
ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36s.
ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: ČNI, srpen 1996. 32s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci, včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:....12.3. 2017.....

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large 'D' followed by a stylized 'B' and some smaller characters, all written in a cursive style.

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevydělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, neuzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je neoprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáváním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....12.3. 2017.....



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Dvorák Bc.

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Dětřichov nad Bystřicí č. p. 198, 793 03

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Jiřímu Friesovi, Ph.D. za jeho cenné a odborné rady. Dále také kolektivu konstrukčního oddělení firmy Hansen Electric, spol. s. r.o., za pomoc a vedení, při řešení práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

DVORÁK, J. *Konstrukční řešení generátoru vodní elektrárny: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra: Zemní, těžební a stavební stroje, 2017, 59 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.

Práce se zabývá konstrukčním návrhem generátoru vodní elektrárny o výkonu 10,4 MW, nacházející se v Gruzii na vodním toku Ajaristskali. Obsahuje rešerši stávajících zařízení pro výrobu elektrické energie za pomoc obnovitelných vodních zdrojů s jejich obecným rozdělením těchto strojů. V hlavní části se pak nachází shrnutí stavu soustrojí vodní elektrárny před rekonstrukcí, jakož i požadavky, které jsou na generátor kladeny. Dále pak vlastní zpracování konkrétního řešení generátoru, společně s pevnostní kontrolou některých jeho klíčových prvků. Výsledkem práce je konstrukční dokumentace představující řešení konstrukce generátoru.

ANNOTATION OF MASTER THEISIS

DVORÁK, J. *Design Solution of Hydroelectric PowerPlant Generator: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department: Earthmining and construction machinery, 2017, 59 p. Master Thesis head: doc. Ing. Jiří Fries, Ph.D.

The thesis deals with the construction design of the generator for hydropower plants with an output of 10.4 MW, located in Gruzia on a watercourse Ajaristskali. It contains a research of existing equipment to produce electricity from renewable water resources with their general distribution of these machines. The main part contain the state of hydropower plant before reconstruction, as well as the demands that are placed on the generator. In the next stage of thesis is the actual processing of a particular solution generator, together with the strength check of some of its key elements. The result is a design documentation presenting solutions to the generator frame.

Obsah

Úvod.....	10
1 Vodní elektrárny	11
1.1 Rozdělení vodních elektráren	12
1.2 Umístění elektráren do vodního toku.....	13
1.3 Obecné konstrukční řešení vodních elektráren.....	13
1.3.1 Generátor vodní elektrárny	15
1.3.2 Turbína vodní elektrárny	15
2 Analýza současného stavu vodního díla	19
2.1 Hlavní údaje o vodním díle.....	19
2.2 Popis stavebních částí vodní elektrárny.....	20
2.3 Popis zařízení strojní části před rekonstrukcí	21
2.3.1 Uzávěr před turbínou	21
2.3.2 Turbína.....	21
2.3.3 Generátor	21
2.3.4 Hydraulická regulace	26
2.3.5 Chlazení a mazání.....	26
2.3.6 Hrazení výtoku.....	26
2.3.7 Jeřáb ve strojovně	27
2.4 Analýza rekonstrukce strojní části.....	27
2.4.1 Rekonstrukce turbíny.....	27
2.4.2 Rekonstrukce generátoru	28
2.4.3 Rekonstrukce hydraulického regulačního zařízení turbíny	30
2.4.4 Rekonstrukce systému chladící vody a mazání ložisek.....	30
2.4.5 Rekonstrukce hrazení výtoku z turbíny	31
3 Konstrukční řešení generátoru vodní elektrárny.....	32
3.1 Stator.....	32

3.2	Rotor	36
3.3	Ložiska	38
3.4	Sběrné ústrojí	38
3.5	Brzdy	39
3.6	Chlazení	40
3.7	Vývody	41
3.8	Kryty a konstrukce	42
3.9	Nátěry	42
4	Výpočtová část konstrukce	43
4.1	Kontrola kostry statoru	43
4.1.1	Zatížení kostry	44
4.1.2	Zpracování problematiky v systému ANSYS	44
4.2	Kontrola magnetického obvodu	49
5	Uvedení do provozu	55
6	Závěr	56
	Seznam použitých zdrojů	57
	Seznam příloh	58

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ, ZKRATEK, TERMÍNŮ, APOD.

σ_1	ohybové namáhání desky	MPa
p_s	spojité zatížení tlakem	MPa
M_k	krouticí moment	Nm
W_K	kvadratický moment plochy	mm ³
σ_D	dovolené napětí	MPa
σ_d	namáhání v tlaku	MPa
π	Ludolfovo číslo	(-)
p_s	rovnoměrný tlak	MPa
p_{sv}	tlak drážkové části	MPa
M_n	jmenovitý moment generátoru	Nm
n_d	počet drážek	(-)
n_s	počet svorníků	(-)
b_d	šířka drážky	mm
d_s	průměr svorníků	mm
h_d	výška drážky	mm
D_s	roztečný průměr svorníku	mm
R_s	roztečný poloměr svorníku	mm
l_s	délka svorníku	mm
D_{es}	vnější průměr magnetového obvodu statoru	mm
D_{is}	vnitřní průměr magnetového obvodu statoru	mm
q_s	spojité zatížení po délce svorníku	N.m ⁻¹
M_{oMAX}	maximální ohybový moment	N.m ⁻¹
W_o	modul průřezu v ohybu	mm ³
M_o	ohybový moment 0	N.m ⁻¹
M_1	ohybový moment 1	N.m ⁻¹
M_2	ohybový moment 2	N.m ⁻¹
A_d	plocha příčného průřezu všech statorových drážek	m ²
F_v	výsledné stahovací síly magnetového obvodu statoru	N
A_{js}	plocha průřezu jádra svorníku	mm
D_{ed}	vnější průměr statorové desky	mm
D_{id}	vnitřní průměr statorové desky	mm
t_d	tloušťka desky	mm
D_p	myšlený průměr působíště výsledné stahovací síly F_v	mm

T_{S1}	činitel poměru D_{is}/D_{es}	(-)
T_2	činitel vnějšího průměru magnetového obvodu statoru	(-)
TG1	turbosoustojí číslo 1	(-)
TG2	turbosoustojí číslo 2	(-)
LMZ	Leningradsky Metallichesky Zavod	(-)
VE	Vodní elektrárna	(-)

Úvod

V rámci své diplomové práce jsem zpracoval konstrukci stroje určeného k výrobě elektrické energie. Jedná se o renovaci vodní elektrárny o výkonu 10,4 MW, která se nachází v Gruzii v oblasti Batumi.

Od navrženého stroje se očekává, že bude schopen maximálního využití energie, alokované ve vodním toku Ajaristskali.

Cíle mé diplomové práce jsou:

- rešerše stávajících konstrukcí vodních elektráren
- analýza současného stavu využívané techniky
- analýza vyskytujících se problémů
- návrh a konstrukce renovace generátoru vodního díla
- vypracování výkresové dokumentace

1 Vodní elektrárny

Vodní elektrárna je technologický celek, který přeměňuje potenciální energii vody na elektrickou energii. Jedná se tudíž o vodní dílo ve smyslu platných právních předpisů. Obvyklý typ říční vodní elektrárny se skládá z přehradní hráze nebo jezu, tj. vodního díla, které zadržuje vodu a strojovny, obsahující vodní turbíny a alternátory. Turbíny s alternátory tvoří vždy soustrojí umístěné na společném hřídeli, nebo jsou spolu spojeny nějakým typem převodu. Řadí se mezi obnovitelné zdroje energie, což je dáno využíváním hydrologického cyklu neboli stálého koloběhu vody na Zemi. Původem této energie je sluneční záření dopadající na naši planetu. Neprodukují při výrobě elektřiny žádné emise a jsou tedy vhodným energetickým zdrojem v moderním pojetí energetiky, které se vyznačuje snahou o snížení emisí skleníkových plynů. Je možné je konstruovat od těch nejmenších průtočných elektráren o výkonech v řádu desítek kW až po megalomanské přehradní elektrárny s výkony v řádu tisíců MW. Navíc disponuje schopností rychlého najetí na plný výkon a mohou sloužit jako zdroje pro start ze tmy, neboli „nastartovat“ celou soustavu po výpadku. Ve vodních elektrárnách je využíváno energie vodních toků v podobě potenciální a kinetické energie. Potenciální energie – polohová, tlaková energie. Vzniká důsledkem působení gravitace a závisí na spádu neboli výškovém rozdílu hladin. Kinetická energie – závisí na rychlosti proudění toku. V České republice nejsou podmínky pro budování velkých obnovitelných děl ideální především z důvodu nedostatečného spádu a množství vody. Podíl vodních elektráren na celkové výrobě je tedy poměrně nízký a využívá se spíše jejich schopnosti rychlého najetí na vysoký výkon a tedy jejich příznivý vliv na regulaci elektrizační soustavy. Princip funkce vodní elektrárny Přitékající voda předává svou kinetickou, resp. potenciální energii turbíně, která roztáčí generátor připojený ke společné hřídeli. Rotační energie se v generátoru mění na základě elektromagnetické indukce na energii elektrickou. Soustrojí turbíny a generátoru dohromady tvoří tzv. turbogenerátor.

Základní terminologie:

- Spád – Výškový rozdíl hladin ve vtokové části nad vodní elektrárnou a v odpadu pod ní.
- Průtok – Množství vody protékající určitým profilem toku za 1 sekundu.
- Průtok turbínou – Celkové množství protékající turbínou za 1 sekundu. Používá se pojem hltnost turbíny.

1.1 Rozdělení vodních elektráren

Podle instalovaného výkonu:

malé – do 10 MW

střední – do 100 MW

velké – nad 100 MW

Podle využívaného spádu:

nízkotlaké – spád do 20 m

středotlaké – spád od 20 do 100 m

vysokotlaké – spád nad 100 m

Průtočné vodní elektrárny – využívají přirozený průtok řeky, který nelze ovlivňovat. Při překročení průtoku, na který je elektrárna dimenzována (závislý na hltnosti turbíny) je přebytečné množství vody odvedeno bez využití.

- jezové vodní elektrárny. Které využívají jezu pro vzedmutí hladiny a soustředění spádu. Spád se v tomto případě pohybuje mezi 10-20 m a jedná se tedy o nízkotlaké vodní elektrárny.

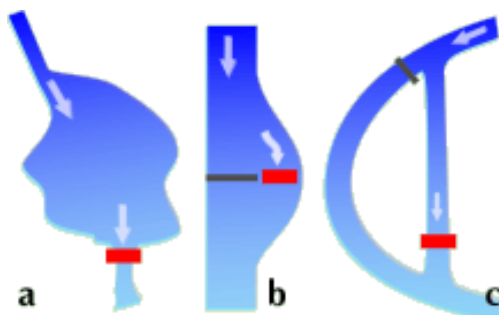
- derivační elektrárny. Které využívají derivačního přivaděče (potrubí, kanálu, štoly), který odvádí vodu z koryta řeky k turbíně vodní elektrárny. Následně je voda odpadním kanálem vrácena zpět do řečiště. Derivačního kanálu (Obr. 1.1) se využívá takovým způsobem, aby se část řeky zkrátila a tím se zvýšil využívaný spád.



Obr. 1.1 Derivační kanál elektrárny Atsi

1.2 Umístění elektráren do vodního toku

„Umístění vlastní elektrárny může být různé.(Obr. 1.2)



Obr. 1.2 Tři základní varianty vodních děl, a - přehradní údolní nádrž
b - jezová elektrárna, c - s náhonem (derivační). [3]

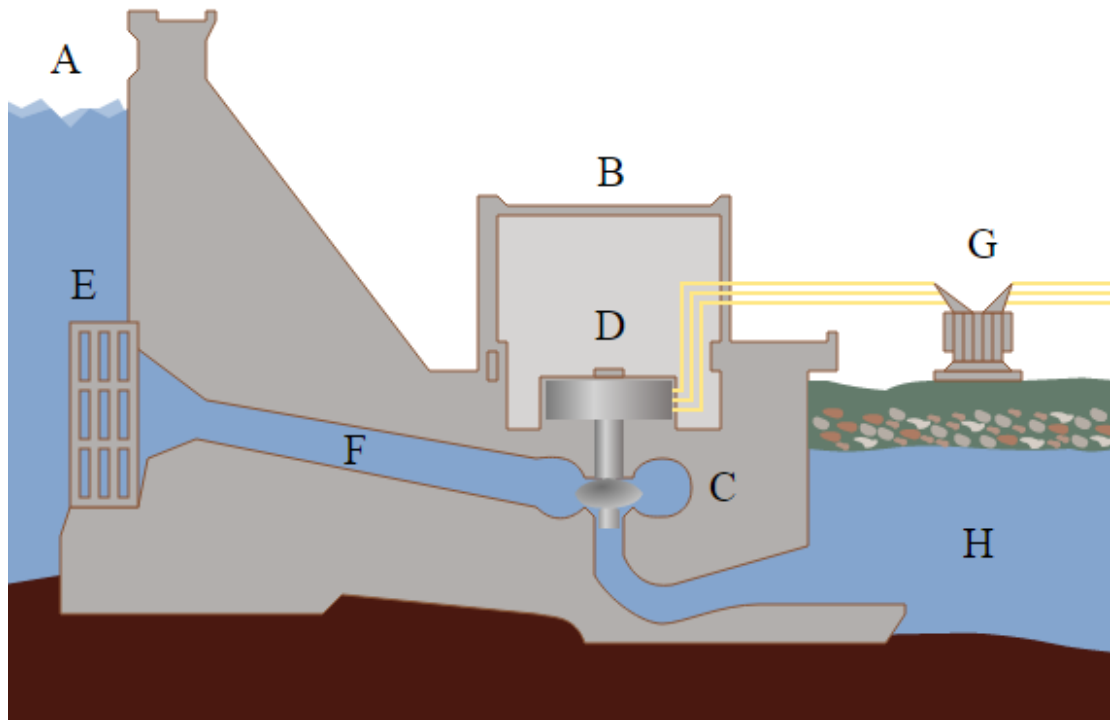
Cílem je co nejlépe využít zadržené vody, a její energie. Jsou elektrárny zabudované přímo do tělesa hráze. Jinde je elektrárna vystavěna hluboko v podzemí. Voda se k ní přivádí tlakovým potrubím a odvádí se podzemním kanálem do vyrovnávací nádrže. Vše záleží na tvaru terénu, výškových a spádových možnostech a na množství vody, které je k dispozici. Elektrárny, které využívají sice menšího množství vody, ale s velkým výškovým rozdílem, často používají tlakového potrubí položeného na povrchu terénu. Srdcem každé vodní elektrárny je vodní motor, turbína s generátorem. K turbíně je voda přiváděna z odběrných zařízení hráze. Energeticky využitá voda pak odtéká do vývařiště hráze, nebo do vyrovnávací nádrže.“ [3]

1.3 Obecné konstrukční řešení vodních elektráren

Existuje celá řada typů vodních elektráren, všechny bez rozdílu však využívají základního principu fungování. Voda přitékající přívodním kanálem roztáčí turbínu, která je na společné hřídeli s generátorem elektrické energie. Dohromady tvoří tzv. turbogenerátor. Mechanická energie proudící vody se tak mění na základě elektromagnetické indukce (v otáčející se smyčce elektrického vodiče v magnetickém poli se indukují střídavé elektrické napětí) na energii elektrickou. Ta se transformuje a odvádí do míst spotřeby.

Průřez vodní elektrárnou (Obr. 1.3):

„Hráz přehrady bývá většinou tvořena litým betonem, v praxi se vyskytují i menší hráze sypané. Uvnitř hráze se nachází revizní, větrací a drenážní chodby pro odvod prosakující vody. Ocelovým potrubím je voda vedena k vodním turbínám. Vstup vody do potrubí je opatřen čistícím zařízením zvaným česle a rychlouzávěrem, který při poruše uzavře přívod vody.“ [2]



Obr. 1.3 Schematické znázornění vodní elektrárny [2]

Popis obrázku:

A - hladina přehradní nádrže

B - budova elektrárny

C - turbína, kolem ní rozváděcí kolo a pod ní odtokový kanál

D - generátor na společné ose s turbínou

E - česle a uzávěr

F - přívodní kanál

G - transformátor, napojující elektrárnu do rozvodné sítě

H – odtok

Mezi nejznámější typy vodních elektráren patří akumulární elektrárny. Jsou charakterizovány hrází a jezerem, kde je shromážděna velká zásoba vody. Tato vodní díla v sobě spojují více úloh než pouhou výrobu energie. Pod hrází stabilizují průtoky vod říčním korytem, chrání před povodněmi a podporují plavební možnosti toku. Břehy nádrží mohou sloužit jako rekreační oblasti. Mnohdy jsou nádrže také zdrojem pitné, technologické, nebo závlahové vody. Hráze bývají budovány jako sypané (gravitační s těsnícím jádrem), kde hráz vzdoruje tlaku vody svou hmotností a objemností. Jiné jsou hráze klenbové, kde se proti tlaku vody vzpírá poměrně tenká železobetonová protiproudě vyklenutá skořepina. Na řekách jsou stavěny jezy se zabudovanými elektrárenskými objekty. V poslední době se rozšiřuje i výstavba takzvaných malých vodních elektráren, kde akumulace vody je nenáročná a mnohde stačí malý jez s náhonem. Hráz velkých vodních děl je technicky složitá stavba protkaná sítí kontrolních chodeb s množstvím pevných bodů, které jsou pravidelně kontrolovány a přeměřovány. Samotná hráz je zabezpečena proti přelití spodními výpustěmi a horními přelivovými hranami, které jsou obvykle stavitelné. Tato zařízení umožňují také průběžně upravovat výšku hladiny ve zdrži. Výpusti a přelivy jsou na vzdušné straně hráze ukončeny vývařistěm. Pod velkými vodními díly se staví další vyrovnávací nádrž. Jejím úkolem je zachytit velké průtoky vody turbínami a rovnoměrně je rozložit tak, že průtok řečištěm je stabilizovaný.

1.3.1 Generátor vodní elektrárny

Generátor je zdrojem elektrického proudu vodních elektráren, který funguje na principu přeměny mechanické energie na elektrickou. Otáčením rotoru, na jehož konci jsou připevněny měděné cívkové vinutí statoru, který má vinutí rovněž z téhož vodiče, vzniká elektromagnetická indukce. Ta je pak pomocí transformátoru přeměněna na střídavý elektrický proud směřující do rozvodné sítě.

1.3.2 Turbína vodní elektrárny

Pracovním prvkem turbín je oběžné kolo, ve kterém je u rovnotlaké turbíny využívána kinetická energie, v případě přetlakové turbíny z části i tlaková energie vody. Vodní elektrárny vyžadují využití turbín mnoha typů a rozměrů v závislosti na podmínkách konkrétní instalace. Charakteristika turbín v závislosti na spádu a průtoku.

Rozdělení turbín:

Z hlediska způsobu přenosu energie:

Rovnotlaké – tlak vody se při průchodu vody nemění, využívá se tedy pouze kinetické energie vody. Rovnotlaké turbíny jsou označovány jako akční turbíny.

Přetlakové – tlak vody je před oběžným kolem větší než za ním, v tomto případě je tedy částečně využita i tlaková energie vody. Přetlakové turbíny jsou označovány jako reakční.

Z hlediska polohy hřídele:

Horizontální

Vertikální

Šikmé

Nejčastější typy vodních turbín:

„Francisova turbína (Obr. 1.4) – jedná se o nejdéle používaný typ moderní turbíny. Využívá se pro velké průtoky a spády a umožňuje využití jako čerpadlová turbína v přečerpávacích vodních elektrárnách, kdy při opačném směru otáčení funguje jako čerpadlo. Řadí se mezi přetlakové turbíny s radiálně-axiálním prouděním vody skrze oběžné kolo. Regulace je zajištěna pomocí natáčivých rozváděcích lopatek.“[3]



Obr. 1.4 Francisova turbína [5]

„Kaplanova turbína (Obr. 1.5) – tato turbína vznikla vylepšením vrtulové turbíny profesora Kaplana a konstrukčně je složitější než Francisova. Jedná se o přetlakovou axiální turbínu. Lopatky oběžného kola je možné regulovat hydraulicky, případně mechanicky u menších turbín, Kaplanova turbína díky tomu dosahuje vysoké účinnosti v širokém pásmu průtoků.“[3]



Obr. 1.5 Kaplanova turbína [6]

„Peltonova turbína (Obr. 1.6) – rovnotlaká turbína využívající tzv. dýzy, ve které se tlaková energie vody mění na kinetickou energii paprsku vstříkovaného na lopatky turbíny. Regulace je zajištěna změnou výtokového otvoru dýzy. Lopatky jsou korečkového typu (miskovitý tvar) a jsou umístěny po obvodu turbíny.“[3]

Peltonova turbína má ideální tvar pro vysoké spády



Obr. 1.6 Peltonova turbína [6]

„Bánkiho turbína (Obr. 1.7) – rovnotlaká turbína využívaná pro malé a střední spády. Zajímavostí u této turbíny je, že voda prochází přes lopatky dvakrát, při vstupu do oběžného kola a následně i při jeho opuštění.“[3]



Obr. 1.7 Bánkiho turbína [7]

2 Analýza současného stavu vodního díla

Následující dokumentace bude řešit rekonstrukci strojní části vodní elektrárny Atsi, která spočívá v kompletní výměně technologicky a fyzicky zastaralého turbosoustrojí s označením TG1 včetně pomocného strojního zařízení, za nové zařízení moderní koncepce. Předmětem této diplomové práce nebude stavební část, ani soustrojí turbíny, která jsou zahrnuta v samostatném projektu.

Lokace rekonstruované vodní elektrárny (Obr. 2.1):

- Název elektrárny: VE Atsi
- Země: Gruzie
- Oblast: Batumi, západní část Gruzie
- Vodní tok: Ajaristskali



Obr. 2.1 Lokace vodní elektrárny [8]

2.1 Hlavní údaje o vodním díle

Vodní elektrárna je součástí vodního díla nacházejícího se v západní části Gruzie, (oblast Batumi) na řece Ajaristskali. Do plného provozu byla elektrárna uvedena v roce 1937. Vodní dílo je tvořeno nízkou přehradní hrází se stavidly, vtokovým objektem se stavidlovými uzávěry hrubými česlemi, usazovací nádrží s proplachem, dále jemnými česlemi, derivačním tlakovým tunelem délky 2,86 km o průměru 4,4 až 3,9 m, vyrovnávací komoru vylámanou ve skále, umístěnou cca 80 m před budovou vodní

elektrárny, budovou transformovny a venkovní rozvodnou. Odbočka na přívodním potrubí bezprostředně před vodní elektrárnou se rozděluje společné přívodní potrubí na dvě větve, z nichž každá vede k jedné turbíně. Vodní elektrárna je derivačního typu, je situovaná na úpatí svahu bezprostředně na břehu řeky, výtok z elektrárny je vyústěn téměř kolmo na směr toku řeky. Budova elektrárny sestává z komory uzávěrů před turbínami, ze strojovny turbosoustrojí a z krátkého výtokového kanálu.

2.2 Popis stavebních částí vodní elektrárny

- Komora uzávěrů: tvoří propojený prostor šířky 3,5 m, výšky cca 9,5 m a délky 26,75 m, umístěný pod úroveň terénu, v jehož spodní části jsou umístěny uzávěry před turbínami. Návodní stranu komory tvoří kotevní bloky pro kuželové přechody přívodního potrubí. Na návodní straně je nad komorou umístěna drenážní chodba pro odvod průsaků. Nad uzávěry je jeřábová dráha pro manipulační jeřáb. Nad komorou se nachází chodba kabelových vývodů z generátorů, která pokračuje z elektrárny podzemím až do prostoru rozvodny a transformovny.

- Strojovna turbosoustrojí: přiléhá návodní obvodovou stěnou ke komoře uzávěrů a sestává ze spodní a horní stavby, které jsou tvořeny železobetonovou konstrukcí. Ve spodní stavbě jsou vedle sebe instalována dvě stejná vertikální turbosoustrojí tvořená turbínou Francis, která je přímo spojená s generátorem. V nejnižší části spodní stavby je dno vývaru (104,00 m n. m.), nad ním podlaží spirály (111,20 m n. m.) a nejvyšší úroveň je na podlaží generátoru (118,25 m n. m.). Spodní stavba je řešena zejména v části výtoků z turbíny velmi úsporně a na úkor kvality hydraulického řešení. Výtokový profil kuželové savky turbíny je umístěný poměrně blízko dna vývěru a šikmý náběh výtokového prahu je velmi strmý a blízko umístěný kuželu savky. Horní stavba je vybudována nad podlažím generátorů, vnitřní půdorysné rozměry jsou cca 10 x 26,75 m, výška stropu nad podlahou je cca 9,5 m. Nad podlažím horní stavby je instalován mostový jeřáb pro manipulaci s částmi turbosoustrojí.

- Výtokový kanál: navazuje bezprostředně na spodní stavbu strojovny, jeho dno tvoří železobetonová deska na úrovni dna řeky (105,90 m n. m.), délka desky je cca 7,9 m. Boční stěna kanálu na straně TG2 je tvarována do oblouku ve směru toku vody v řece (chrání desku dna před bezprostředním účinkem proudu v řece), druhá stěna na straně

TG1 tvoří opěrnou zeď břehu za výtokem. Světla šířka výtoku z každé turbíny je 7,1 m, šířka dělicího pilíře mezi výtoky je 2,8 m.

2.3 Popis zařízení strojní části před rekonstrukcí

Vodní elektrárna je rozsáhlé dílo, které má, mimo řešený generátor, také další prvky. Ty jsou pro správné fungování neméně důležité.

2.3.1 Uzávěr před turbínou

Původní klapkový uzávěr před každou turbínou byl vyměněn v roce 2010/11 u obou strojů za nové nožové šoupátko, které plní funkci těsného revizního uzávěru i havarijního rychlouzávěru. Otočná nožová deska je uložena ve skříni, je ovládaná dvěma hydraulickými servomotory a dosedá do samo-těsnícího kruhu ovládaného tlakem vody z přívodního potrubí. Ovládací olej do servomotorů zajišťuje samostatný hydraulický agregát. Uzávěr je vybaven obtokovým potrubím, dvěma zavzdušňovacími a jedním odvzdušňovacím ventilem. Při rekonstrukci TG1 zůstane stávající nový uzávěr zachován a jeho funkce budou zahrnuty do systému automatiky nově instalovaného soustrojí.

2.3.2 Turbína

Ve strojovně jsou instalovány dvě vertikální spirální Francisovy turbíny přímo spojené se synchronními generátory. Turbíny byly vyrobeny ve firmě LMZ přibližně v polovině 30. let minulého století. Současný stav turbín je následující. U soustrojí TG2 byla provedena provozovatelem oprava turbíny a jejího příslušenství a obnova nátěrů, turbína je v provozu, ve kterém zatím setrvává. Soustrojí TG 1 – jak jeho hlavní části, tak zařízení tvořící jeho příslušenství se nachází v neuspokojivém stavu a je doposud občas v provozu.

2.3.3 Generátor

Součástí každého soustrojí je vertikální synchronní generátor přímo spojený s turbínou. Generátor je výrobkem firmy Leningradský závod „Elektrosila“, typové označení stroje je SV 425/60 24.

Hlavní části generátoru:

- Stator (Obr. 2.2): je složen z dělené kostry svařované z oceli, z paketu magnetového obvodu z ocelových plechů stažených svorníky a z vinutí. Spodní část statoru je vybavena patkami pro uchycení na kotevní desky. Plášť statoru má po obvodu otvory pro průchod ohřátého vzduchu z prostoru generátoru. V horní části je stator upraven pro uložení horní traverzy s kombinovaným ložiskem. Vnitřní průměr statoru je cca 3600 mm.



Obr. 2.2 Původní zabudovaný stator

- Kotvení statoru: je tvořeno šesti kusy kotevními deskami (Obr. 2.3), ke kterým jsou přišroubovány patky statoru.



Obr. 2.3 Kotevní desky zabudované v základu

- Rotor generátoru: je tvořen hřídelem a magnetovým kolem (Obr. 2.4). Hřídel je vykován z oceli, má odstupňovaný průměr a v dolní části je opatřen přírubou pro připojení turbínového hřídele, délka hřídele je 4400 mm. Magnetové kolo sestává z kostry (hvězdy) a z věnce, na kterém jsou připevněny pólové nástavce s vinutím. Kostra rotoru je horizontálně dělená na 3 kotouče, které jsou staženy pomocí svorníků. Na krajních kotoučích kostry jsou upevněny lopatky ventilátoru umožňující cirkulaci chladícího vzduchu v prostoru generátoru. K dolnímu kotouči je připevněn disk sloužící jako kluzná plocha pro brzdy.



Obr. 2.4 Magnetové kolo na hřídeli s demontovanými cívkami a transportním hřídelovým nástavcem

- Dolní vodící ložisko: je pánvové kompozitové, uložené v dolní traverze, mazání ložiska je zajištěno cirkulací chlazeného oleje.

- Horní kombinované ložisko: je uloženo na horní traverze a sestává ze segmentového axiálního ložiska, nad kterým je umístěno pánvové kompozitové vodící ložisko. Olej v ložisku je chlazen pomocí vodního chladiče

- Dolní traverza: je tvořena svařovanou rámovou konstrukcí sestávající z podélných a příčných nosníků a je uložena na kotevní desky. Traverza slouží jako podpěra dolního vodícího ložiska generátoru, ve které je uloženo těleso ložiska. Na traverze uloženy válce brzd generátoru.

- Horní traverza (Obr. 2.5): je tvořena tuhou svařovanou konstrukcí sestávající ze dvou nosníků, mezi nimiž je uprostřed nosná konstrukce kombinovaného ložiska tvořící současně uzavřený prostor pro olejovou náplň ložiska. Nosníky traverzy jsou uchyceny na horní části statoru.



Obr. 2.5 Horní traverza

- Budič a sběrací ústrojí (Obr. 2.6): Budič je rotační, umístěný na horním konci hřídele nad závěsným ložiskem. Sběrací ústrojí je pak sestávající z kroužků a kartáčů je uchyceno nad budičem.



Obr. 2.6 Zobrazení (zleva) budiče a sběracího ústrojí

- Brzdy jsou uloženy na nosnících dolní traverzy, každá brzda sestává z tělesa válce s pístem, pružinou a z obložení. Brzdnou plochu tvoří spodní čelní plocha dolního kotouče na magnetovém kole.

- Chladiče: (2 ks) zajišťující chlazení vinutí a železa jsou umístěny v boční šachtě vedle generátoru. Ohřátý vzduch z generátoru je vyfukován ventilátorem z vnitřního prostoru generátoru do kanálu kolem statoru a proudí přes vodní chladiče. Ochlazený vzduch z chladiče je zpět nasáván ze spodu do vnitřního prostoru generátoru. Celý vnitřní prostor generátoru je opatřen kapotáží, která zajišťuje těsnost prostoru. Voda do chladiče je přiváděna gravitačně potrubím z přivaděče, ohřátá voda pak odtéká do výtokového kanálu za turbínou.

- Kryty a ocelové konstrukce (Obr. 2.7): kapotáž uvnitř uzavírající vnitřní chlazený prostor generátoru, vzduchové potrubí propojující výfuk ochlazeného vzduchu z chladiče s vnitřním prostorem, kterým je nasáván vzduch do generátoru, kryty kanálů ohřátého vzduchu v podlaze u generátoru a schody se zábradlím na horní traverzu.



Obr. 2.7 Pohled na kryty a konstrukce

2.3.4 Hydraulická regulace

Regulační zařízení sestává z čerpacího agregátu s olejo-vzduchovým větrníkem, z kompresoru pro dodávku vzduchu do větrníku, ze silové hydraulické části regulátoru, ze servomotorů ovládání rozváděcích lopat turbíny a z propojovacího potrubí oleje. Systém regulace je nízkotlaký, tlak regulačního oleje je cca 2 MPa. Regulátor je elektrohydraulický, typové označení R-100, sovětské výroby z roku 1956, v atypickém provedení, umístěný ve skříni. Na betonovém bloku u spirály jsou umístěny dva hydraulické lineární servomotory spojené táhly s regulačním kruhem turbíny. Jeden servomotor je vybaven blokováním v zavřené poloze. Údaj o poloze servomotoru je přenášen mechanickou zpětnou vazbou do regulátoru. Průměr pístu servomotoru je 460 mm, zdvih je 220 mm.

2.3.5 Chlazení a mazání

- Systém chladící vody: Systém zajišťuje chlazení generátoru a u TG 2 byla provedena jeho rekonstrukce – dodány nové automatické filtry, propojovací nerezové potrubí a armatury. Voda je odebírána z přivaděče v místě před nožovým uzávěrem a je přiváděna k hrubým automatickým samo-čisticím filtrům. Z filtrů je dále voda přiváděna jednak do dvou chladičů generátoru (voda/vzduch) a jednak do chladiče oleje z ložisek generátoru (voda/olej). Odpadní ohřátá voda je vypouštěná do výtoku za vodní elektrárnou. U TG1 je zachován původní systém, který je doposud občas v provozu.

- Systém mazání ložisek generátoru: Mazací systém u TG2 byl v nedávné době rekonstruován – byl dodán nový mazací agregát s čerpadlem oleje, nádrží a filtry, umístěný na plošině nad hrdlem spirály, nový chladič oleje, propojovací potrubí a armatury. U TG1 je zachován původní systém.

2.3.6 Hrazení výtoku

Zařízení pro hrazení výtoku sestává ze dvou hradicích tabulí, z dolního prahu, bočního těsnícího rámu, z průběžného nosníku profilu I nad drážkami hrazení uchyceného do stavby, na kterém je zavěšená traverza pro manipulaci s tabulemi. Tabule jsou společné pro obě turbíny, každá z nich je zavěšena v jedné drážce hrazení. Tabule jsou ocelové s nýtovanými výztužnými nosníky. Dosedací prahy, boční těsnění a vedení jsou zhotoveny z dřevěných hranolů, které jsou k tabuli přišroubovány. Hradicí šířka tabule

je 7 m, celková hradící výška obou tabulí na sobě je 2,05 m, horní hrana horní tabule při zahrazení je na kótě 107,95 m n. m. (odpovídá cca hladině při průtoku 45 m³/s). Hmotnost těžší z obou tabulí (dolní) je cca 2900 kg.

2.3.7 Jeřáb ve strojovně

Strojovna je vybavena mostovým jeřábem s elektrickým pohonem. Nosnost hlavního zdvihu je 60 tun a nosnost pomocného zdvihu je 10 tun. Jeřáb nebude předmětem rekonstrukce.

2.4 Analýza rekonstrukce strojní části

Kompletní rekonstrukce strojní části vodní elektrárny zahrnuje krom řešeného generátoru ještě další prvky. Popis rekonstrukce či výměny klíčových částí elektrárny je shrnut ve zbytku kapitoly.

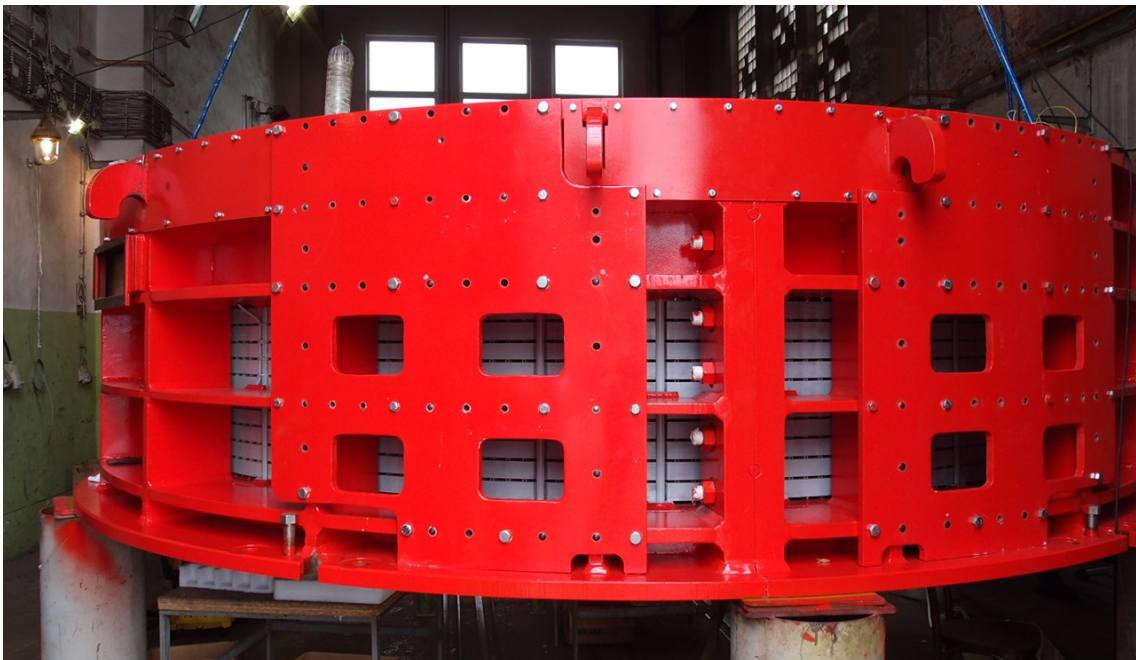
2.4.1 Rekonstrukce turbíny

Bude dodána kompletní nová turbína soustrojí TG1. Koncepce nové turbíny bude splňovat následující požadavky:

- Turbosoustrojí bude svým uspořádáním a rozměry vyhovovat existující stavbě. Turbína bude zachovávat výškové i půdorysné umístění původního soustrojí - bude dodrženo umístění osy a průměr vstupu do spirály a umístění vertikální osy soustrojí.
- Turbína bude moderní konstrukce s vertikální kolenovou savkou, která bude vyhovovat hloubce a šířce stávajícího vývodu bez požadavku na bourání vertikálních nosných konstrukcí spodní stavby strojovny.
- Turbína musí vyhovět stávajícím podmínkám z hlediska kavitace - bude zachována stávající výšková kóta osy vstupu do spirály a kóty dolní hladiny vody.
- Hydraulický profil turbíny bude umožňovat dosažení vysoké účinnosti, maximální účinnost prototypu nebude menší než 93 %.
- Nová turbína bude konstruována pro návrhový průtok 26 m³/s, provoz při tomto průtoku bude bezpečný vzhledem ke kavitaci. Kavitační opotřebení oběžného kola za 8000 hodin provozu nepřekročí hodnoty doporučené normou (IEC 609-1978).
- Turbína bude navržena moderní koncepcí s ohledem na zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu, prodloužení životnosti zařízení, automatizace a optimalizace řízení provozu, zlepšení životního prostředí – snížení objemu olejových náplní, bezmazná uložení, zamezení rizika úniku ropných produktů.

2.4.2 Rekonstrukce generátoru (Obr. 2.8 – 2.10)

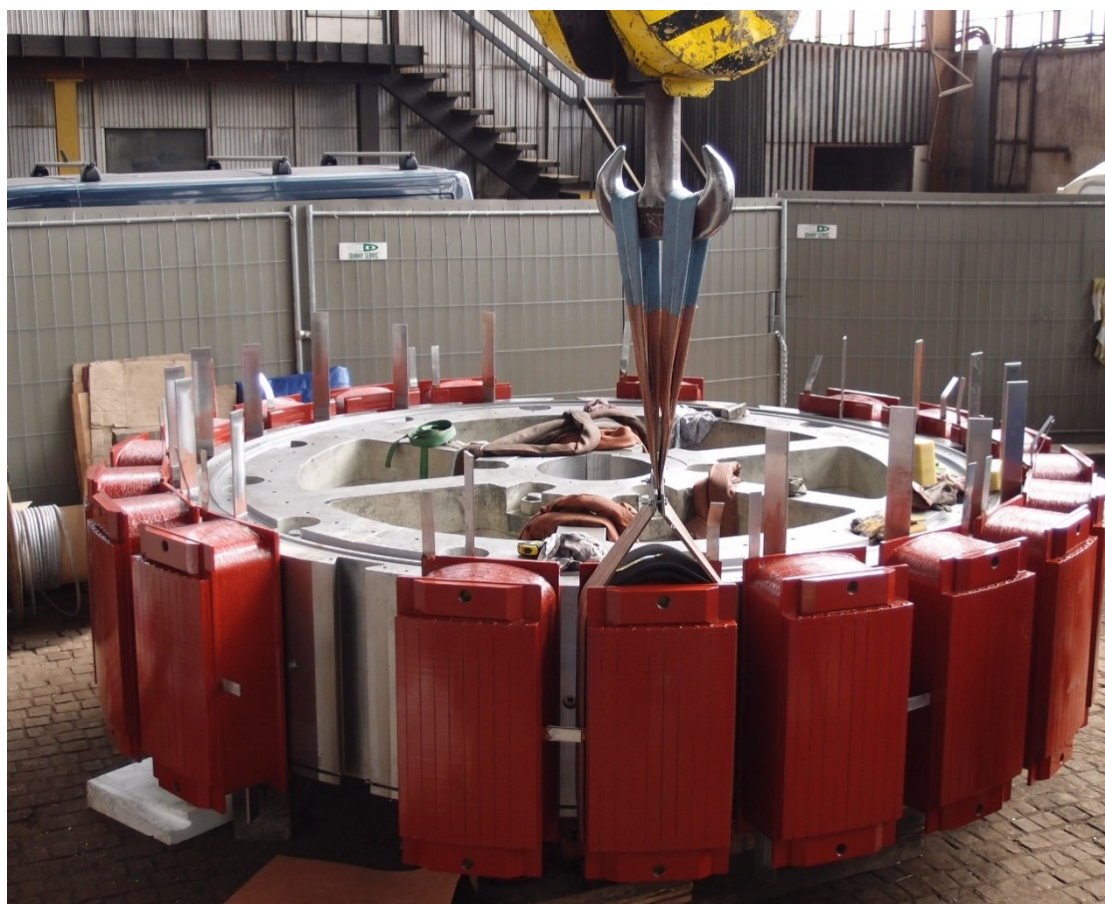
Bude dodán nový vertikální, synchronní generátor pro přímé spojení s novou Francisovou turbínou soustrojí TG1. Generátor bude navržen podle platných norem ČSN s přihlédnutím na normy IEC, EN. Generátor bude umístěn na podlaží strojovny 118,25 m n. m. v prostoru šachty původního generátoru. Vertikální osa generátoru bude totožná s osou původního generátoru. Základní koncepce nového generátoru bude shodná s generátorem původním, z důvodu rozměrů a tvarů existující stavby a zachování stejného schématu přenosu sil do stavby. Setrvačná hmota rotoru bude splňovat požadavek, aby přechodné zvýšení otáček při výpadku plného výkonu nepřekročilo 45 % jmenovitých otáček (odpovídá havarijnímu času závěru turbíny 7 s). U nového generátoru bude využitý kotevní rám statoru a dolní vodící ložisko původního generátoru (části zabetonované ve stavbě). Chlazení generátoru bude pomocí vodních chladičů a bude zachována stejná koncepce jako u původního generátoru. Buzení generátoru bude statické, budicí souprava bude dodávkou firmy specializované na systémy buzení. Generátor bude navržen pro jmenovitý výkon rovný max. výkonu na spojce turbíny. Otáčení generátoru bude ve smyslu hodinových ručiček při pohledu od spojky.



Obr. 2.8 Nový stator generátoru



Obr. 2.9 Instalace vinutí statoru generátoru



Obr. 2.10 Instalace cívek rotoru generátoru

2.4.3 Rekonstrukce hydraulického regulačního zařízení turbíny

Bude dodáno kompletně nové moderní zařízení pro regulaci soustrojí TG1, jehož koncepce bude splňovat následující požadavky:

- Hydraulický agregát bude zajišťovat spolehlivé ovládání rozváděcích lopat turbíny a bude dodávat ovládací olej pro brzdy generátoru a pro ovládání zavzdušňovacího ventilu savky turbíny.
- Hydraulický obvod bude vysokotlaký, předpokládaný maximální pracovní tlak oleje 15 MPa, hydrogenerátory tlakového oleje budou konstruovány pro max. tlak 25 MPa.
- Pro akumulaci tlakové energie budou použity pístové akumulátory s připojenými láhvemi s dusíkem.
- Hydraulické prvky budou sériově vyráběné osvědčenými výrobci.
- Nádrž agregátu bude vybavena záchytnou vanou pro stejný objem oleje jako v nádrži.
- Veškeré trubkování regulace včetně armatur a spojovacího materiálu bude z nerezové oceli.
- Hydraulický obvod bude naplněn minerálním hydraulickým olejem.
- Hydraulický agregát nebude vyžadovat chlazení.

2.4.4 Rekonstrukce systému chladicí vody a mazání ložisek

System bude zajišťovat odvedení ztrátového tepla z vinutí a železa generátoru a z ložisek generátoru nového soustrojí TG1 a pro chlazení ucpávky. System bude sestávat z jednoho otevřeného okruhu, voda do tohoto okruhu bude odebírána z přivaděče skrz sací koš v místě před uzávěrem u turbíny, bude filtrována prvně 2000 μm hrubým filtrem a potom 500 μm jemným filtrem. Dále bude voda protékat přes chladiče a bude odvádět ztrátové teplo z vinutí a železa generátoru, a také ložiska generátoru. Voda ohřátá v chladičích bude vytékat do výtoku za elektrárnou.

Mazání bude pak zajišťovat systém mazání ložisek generátoru soustrojí TG1, u kterých bude zajištěna vnější cirkulace oleje. Do všech ložisek bude pomocí čerpadla v mazacím agregátu přiváděný olej ochlazený v deskovém výměníku olej/voda napojeném na okruh chladicí vody a na výtlač oleje z mazacího agregátu. Z ložisek pak bude ohřátý olej odtékat gravitačně zpět do nádrže mazacího agregátu a odtud bude znovu čerpán přes výměník do ložisek. Mazací agregát bude navržen společný pro všechna ložiska generátoru (závěsné, horní vodící, dolní vodící), stejně jako bude společný i deskový výměník okruhu chladicí vody.

2.4.5 Rekonstrukce hrazení výtoku z turbíny

Kompletní hrazení výtoku pro turbínu TG1 bude nové moderní konstrukce a bude sestávat z 2 kusů svařovaných hradících tabulí s těsněním z profilové pryže (horní tabule bude těsnit i proti hornímu prahu), z vedení a prahu tabulí, ze zdvihací traverzy, nosné konstrukce zdvihacího zařízení, zdvihacího zařízení a z krytů drážek. Hradidla budou uskladněna v prostoru nad výtokem turbíny, horní tabule bude uložena ve skládce z nosníků uchycených k pilířům výtoku, dolní tabule bude zavěšena nad drážkou. Nové zdvihací zařízení a traverza budou navrženy tak, aby s jejich pomocí bylo možno manipulovat i se starými hradidly na TG2. Poněvadž po provedení rekonstrukce TG1 nebude možné využít pro uskladnění jedné ze starých tabulí drážku za TG1 (bude zde nová tabule), budou vybudovány dvě skládky – jedna pro novou tabuli za drážkou TG1, druhá pro starou tabuli za drážkou TG2.

3 Konstrukční řešení generátoru vodní elektrárny

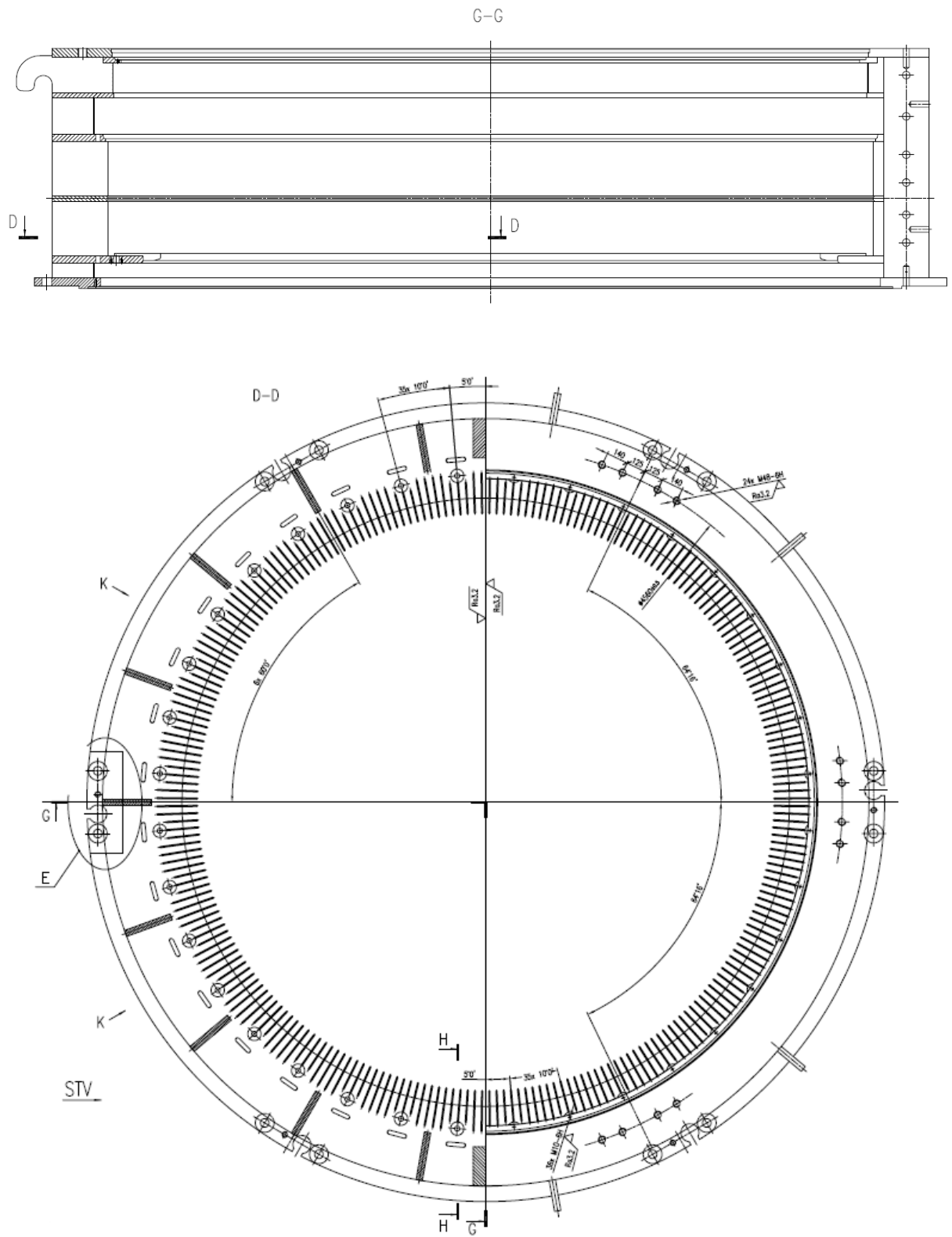
Generátor je třífázový synchronní vertikální a je určen pro vnitřní instalaci. Je konstruován pro přímé připojení k hřídeli Francisovy turbíny. Generátor je konstruován podle platných norem. Základní normy jsou normy řady EN 60034. Umístění generátoru je na podlaží strojovny 118.25 m n. m. v prostoru šachty původního generátoru. Vertikální osa generátoru bude totožná s osou původní turbíny. Při instalaci bude využito původních stavebních úprav, bude využit kotevní rám statoru a dolního vodícího ložiska. Jmenovité údaje generátoru jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1 Jmenovité údaje generátoru:

Typové označení	HSGV 13000/6.3/22
Zdánlivý výkon	13000kVA
Činný výkon	10400kW
Druh zatížení	S1
Napětí	6300V
Proud	1191A
Účinnost	0.80
Otáčky provozní	272.7ot/min
Otáčky průběžné	600ot/min
Jmenovitý moment	346.2kNm
Zkratový moment (třífázový zkrat)	2950kNm
Zkratový moment (dvoufázový zkrat)	3800kNm
Budicí systém	Statické buzení
Jmenovité budicí napětí	230V
Jmenovitý budicí proud	275A
Budicí napětí naprázdno	95V
Budicí proud naprázdno	140A
Tvar stroje	IM 8425
Chlazení	IC 31W9
Izolační třída / Oteplení stroje	F
Moment setrvačnosti rotoru	82216kg·m ²

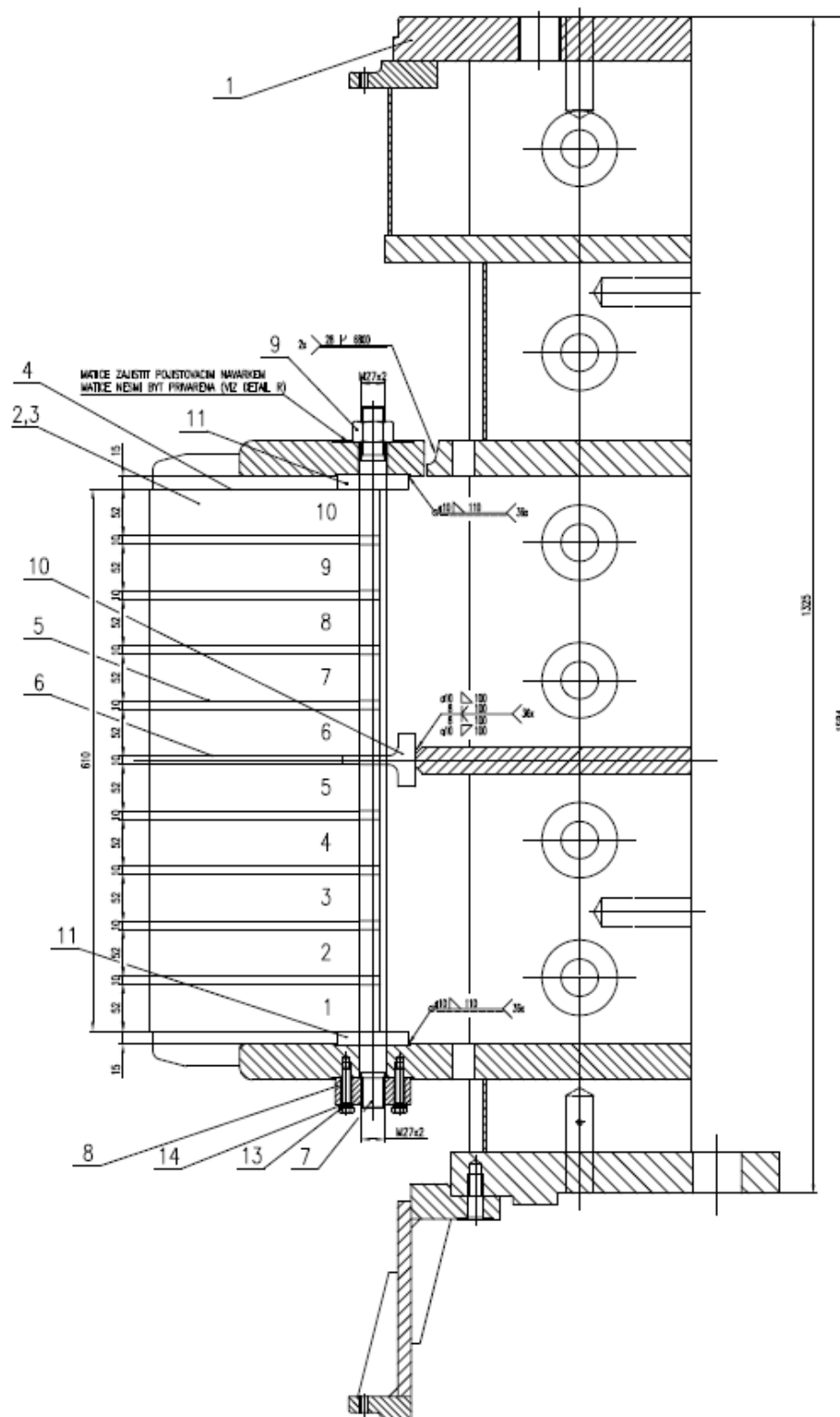
3.1 Stator

Stator je tvořen svařovaným statorovým rámem (Obr. 3.1) děleným na dvě poloviny. Obě poloviny jsou při montáži spojeny šrouby a kolíky. Tento rám je opatřen v horní části patkami pro usazení horní traverzy se závěsným ložiskem generátoru. V dolní části má statorový rám patky pro montáž na původní základový rám.



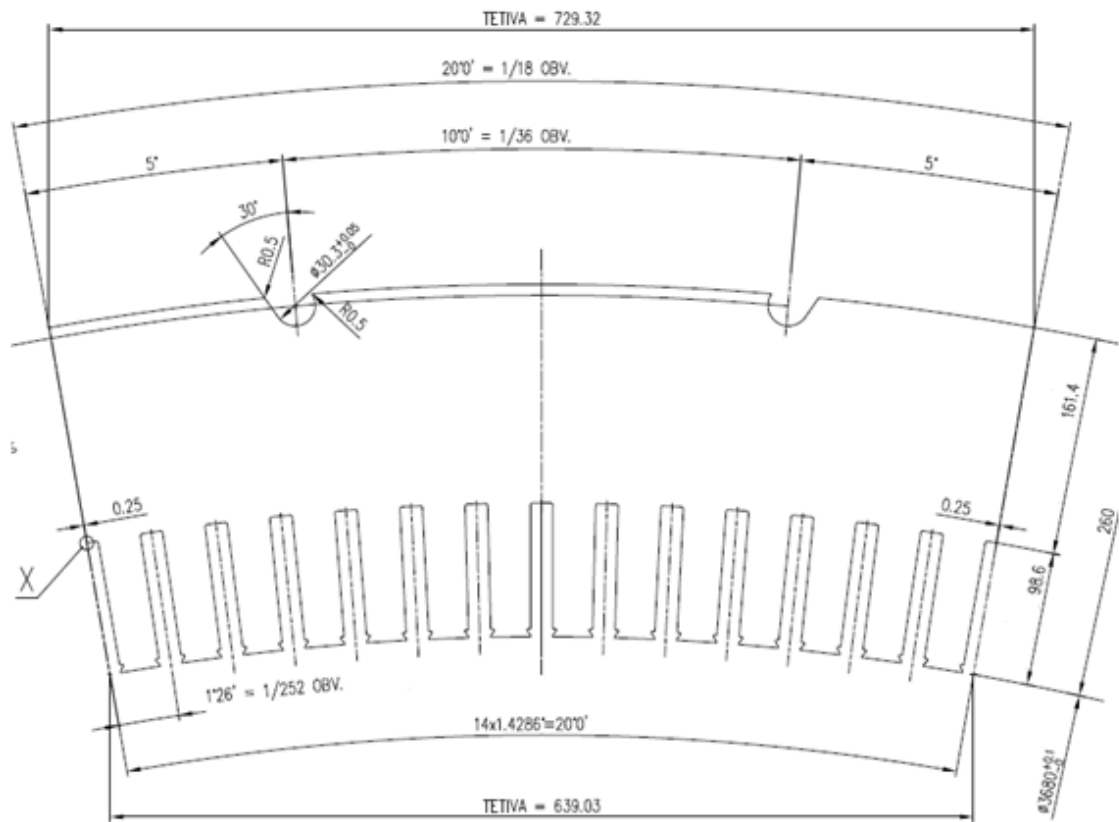
Obr. 3.1 Rám statoru

Do svařovaného rámu je umístěn magnetický obvod statoru generátoru (Obr. 3.2). Ten je také půlený a je při montáži stroje montován spolu se statorovým rámem.



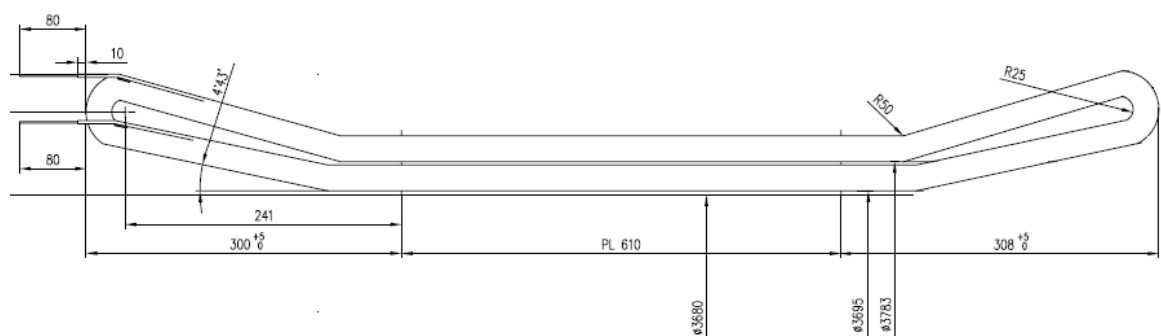
Obr. 3.2 Složení magnetických plechů v rámu statoru

Magnetický obvod je složen z jednotlivých segmentů (Obr. 3.3) z izotropních plechů pro elektrotechniku, válcovaných za studena s označením M350-50A podle EN 10106.



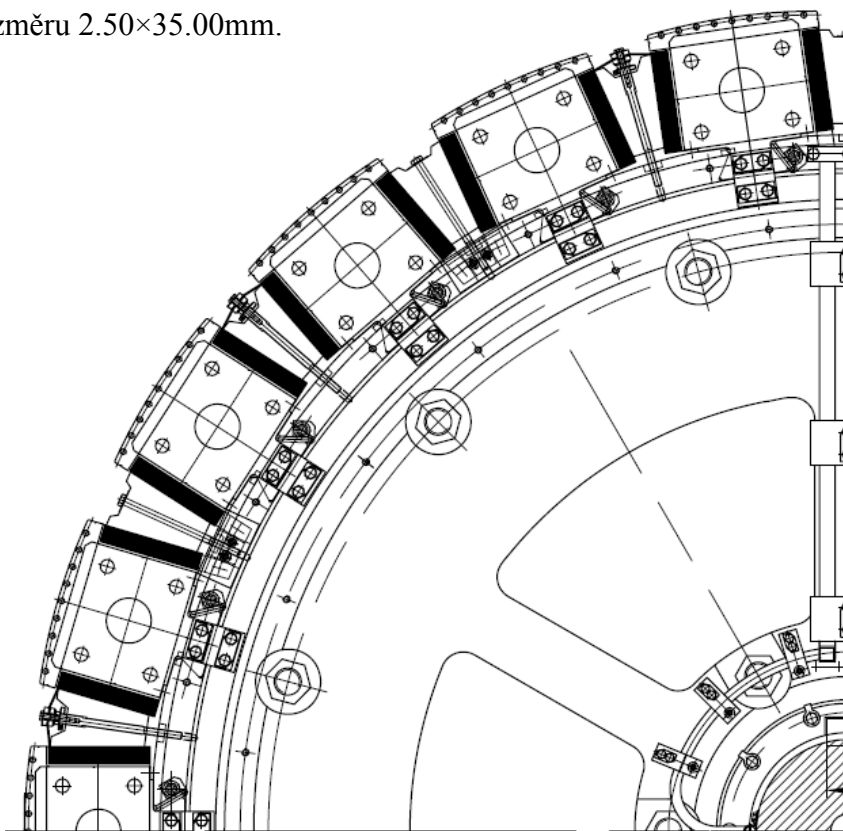
Obr. 3.3 Segment statorových plechů

Tyto plechy mají tloušťku 0,5mm. Povrch plechů je izolován elektroizolačním lakem. V elektromagnetickém obvodu je dvouvrstvé vysokonapěťové vinutí, složené s cívek (Obr. 3.4) navíjené měděným vodičem pravoúhlého průřezu o rozměru 2.50×11.20mm.



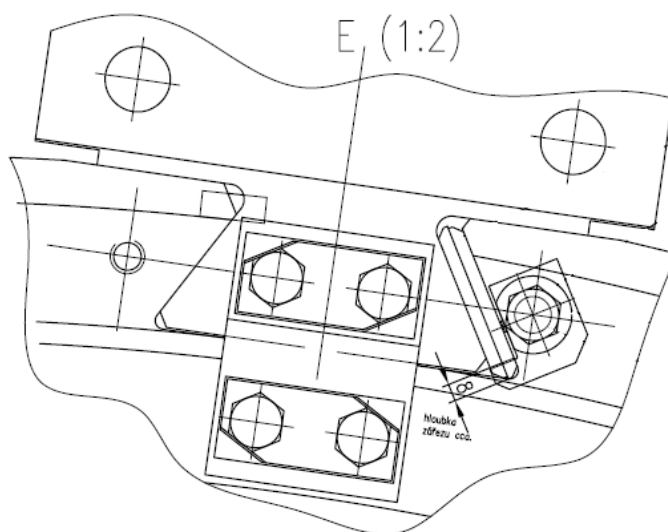
Obr. 3.4 Cívka vinutí statoru

Uložení magnetového kola na hřídeli je s přesahem a moment je přenášen pomocí pera. Po obvodu magnetového kola jsou drážky, ve kterých jsou umístěny rotorové póly s pólovými cívkami (Obr. 3.7). Póly jsou složeny z plechů. Vinutí je měděné z pásové mědi o rozměru 2.50×35.00mm.



Obr. 3.7 Částečný pohled na uložení cívek v magnetovém kole

Rotorové póly jsou v drážkách rotorového kola zajištěny klíny (Obr. 3.8). V pólových nástavcích je umístěno měděné tlumící vinutí (amortizér).



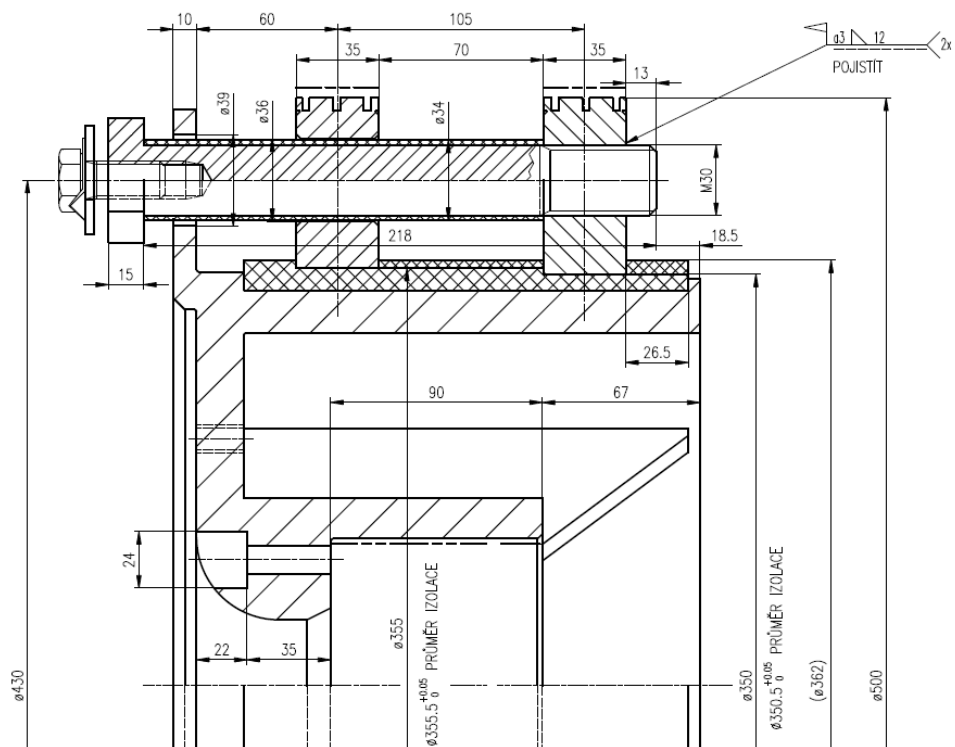
Obr. 3.8 Detail uložení cívek v magnetovém kole

3.3 Ložiska

Generátor je vybaven kluznými ložisky. Kombinované závěsné ložisko, které je součástí horní traverzy, a je umístěno na horní části statorového rámu. Toto ložisko má za úkol zachytit hmotnost rotoru generátoru, hmotnost rotoru turbíny a hydraulické zatížení od turbíny. Vodicí ložisko i se spodní traverzou je umístěno samostatně na základovém rámu v šachtě pod generátorem. Hlavní závěsné ložisko generátoru je chlazené vodou. Horní traverza i s ložisky je, podobně jako soustrojí turbíny, zahrnuta v samostatném projektu.

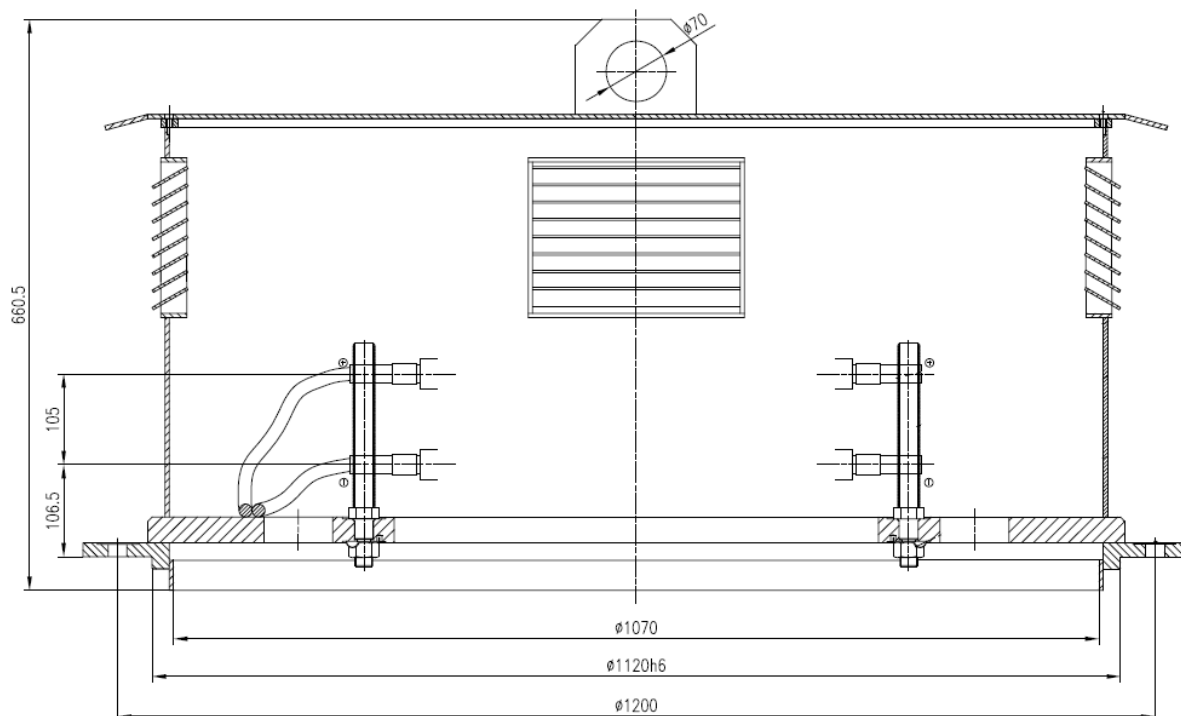
3.4 Sběrné ústrojí

Sběrné ústrojí je složeno ze dvou ocelových kroužků, které jsou izolovaně uloženy na samostatném náboji (Obr. 3.9). Tento náboj je nasazen na hřídel generátoru v prostoru nad závěsným ložiskem.



Obr. 3.9 Sběrné ústrojí

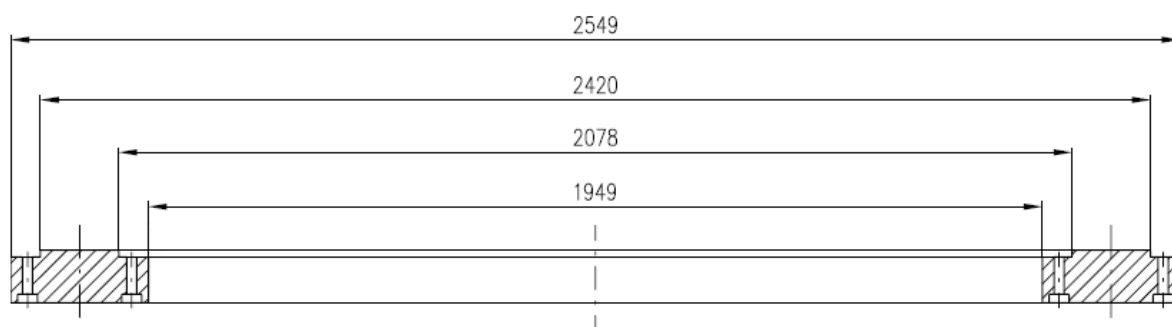
Na konstrukci jsou dále uchyceny držáky uhlíků s uhlíkovými kartáči (Obr. 3.10). Vinutí rotoru je přímo spojeno s jednotlivými kroužky pomocí vodičů. Na jednotlivé uhlíky je pak přivedeno budící napětí ze soustavy statického buzení.



Obr. 3.10 Držáky uhlíků

3.5 Brzdy

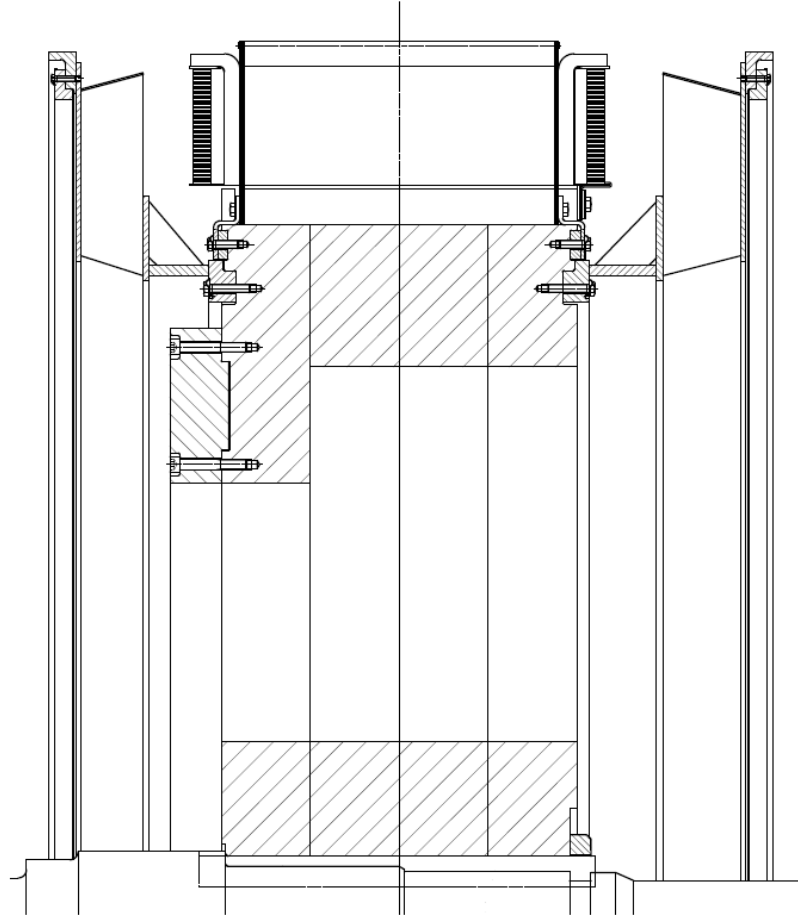
Na spodní segment rotorového kola je uchycena opracovaná brzdná dráha (Obr. 3.11). Vlastní tělesa hydraulických brzd jsou umístěna na traverze dolního vodícího ložiska turbíny.



Obr. 3.11 Brzdící disk

3.6 Chlazení

Na horní i spodní části rotoru generátoru jsou umístěny podobně konstruované ventilátory (Obr. 3.12). Tyto ventilátory ženu chladicí vzduch přes ventilační kanály statoru generátoru do uzavřeného chladicího okruhu.

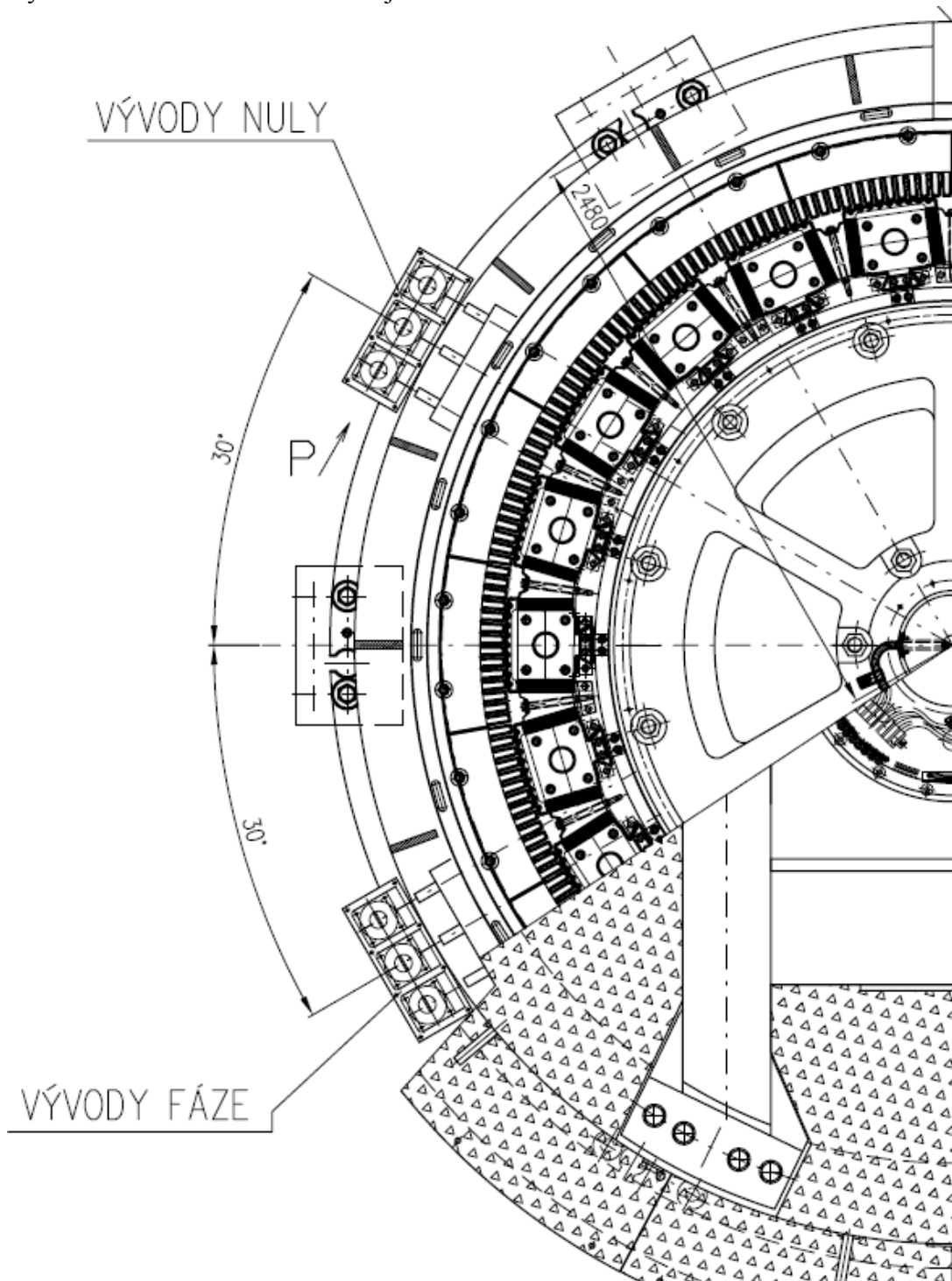


Obr. 3.12 Ventilátory smontované s magnetickým kolem

Uzavřený chladicí okruh obsahuje tepelný výměník, který ochlazuje teplý vzduch z generátoru. Tento ochlazený vzduch je v uzavřeném okruhu dále znovu nasáván do prostoru generátoru. Výměníkem protéká chladicí voda, která zajišťuje vlastní chlazení. Voda do výměníku je přivedena z prostoru vtoku turbíny s využitím tlaku vody před turbínou, za výměníkem je voda volně vypouštěna do výtoku za turbínou.

3.7 Vývody

Silové vinutí generátoru je vyvedeno na šest průchodkových proudových transformátorů, a to tři na vývodech generátoru a tři v nulové fázi generátoru (Obr. 3.13). Průchodkové proudové transformátory jsou uchyceny na kostru statoru a zajišťují vyvedení vinutí mimo kostru stroje.



Obr. 3.12 Vývody vinutí

V prostoru šachty generátoru jsou pak proudové transformátory zapojeny přímo na sběrnou rozvodnou soustavu generátoru. Proudové transformátory jsou dvou jádrové a odpovídají požadavkům pro připojení do systému měření a ochrany generátoru. Přístrojové vybavení generátoru (čidla, anti-kondenzační topení, systém zemnění rotoru) je vyvedeno do vlastních svorkových skříní.

3.8 Kryty a konstrukce

K soustrojí generátoru patří také sada krytů. Jedná se o kryty šachty generátoru v úrovni podlahy strojovny a v úrovni stropu pod generátorem. Které jsou důležité z hlediska bezpečnosti. Dále také vzduchovod, vedoucí chladicí vzduch z generátoru přes tepelný výměník do prostoru pod generátor.

3.9 Nátěry

Nátěry jsou zvoleny podle korozních tříd. Nátěry budou provedeny ve výrobním závodě, kromě poslední vrstvy, která se provede po montáži na stavbě spolu s opravou částí poškozených při transportu.

4 Výpočtová část konstrukce

Vybrané klíčové prvky konstrukce jsem podložil výpočtem, který dokazuje, že tyto části vyhovují ve zkouškách na namáhání.

4.1 Kontrola kostry statoru

Byl proveden mechanický výpočet kostry statoru generátoru metodou konečných prvků. Kostra statoru je svařované konstrukce (Obr. 4.1) a je v jedné ose svisle dělená. Ve spodní části má kostra přírubu, která leží na základovém kotevním rámu. Zatížení není přenášeno celou spodní přírubou, ale pouze šesti patkami. Horní částí má kostra také přírubu, na které je umístěna konstrukce horního závěsného ložiska. Tato konstrukce není umístěna na celé ploše příruby, ale pouze na šesti patkách.



Obr. 4.1 Fotografie poloviny statorové kostry ve výrobě

4.1.1 Zatížení kostry

Celkové zatížení kostry statoru od hmotnosti dílů horního ložiska, od hmotnosti rotoru generátoru, od hmotností sběracích kroužků a sběrného ústrojí, od hmotnosti rotoru turbíny a od axiálního tahu turbíny je 1706,6kN.

Na spodní přírubu působí navíc zatížení od aktivních částí statoru (magnetický obvod, stahovací konstrukce a kompletní vinutí) o velikosti 171,2kN.

4.1.2 Zpracování problematiky v systému ANSYS

„ANSYS je obecně nelineární, multi-fyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednoduše provádět jednotlivě, ale díky multi-fyzikálnímu pojetí programu ANSYS je lze také zahrnout do jediné, společné analýzy. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti.“ [4]

Zadané okrajové podmínky:

- Model je pevně vetknut v místě šesti patek na spodní přírubě. Patky jsou umístěny přímo pod působícími silami, plocha jedné patky je 162991,8 mm².

-Na vrchní přírubě jsou zadány síly od zatížení ložiskem na šesti plochách dle výkresu. Celková síla je 1706,6 kN.

-Celková hmotnost modelu je 28,64 t.

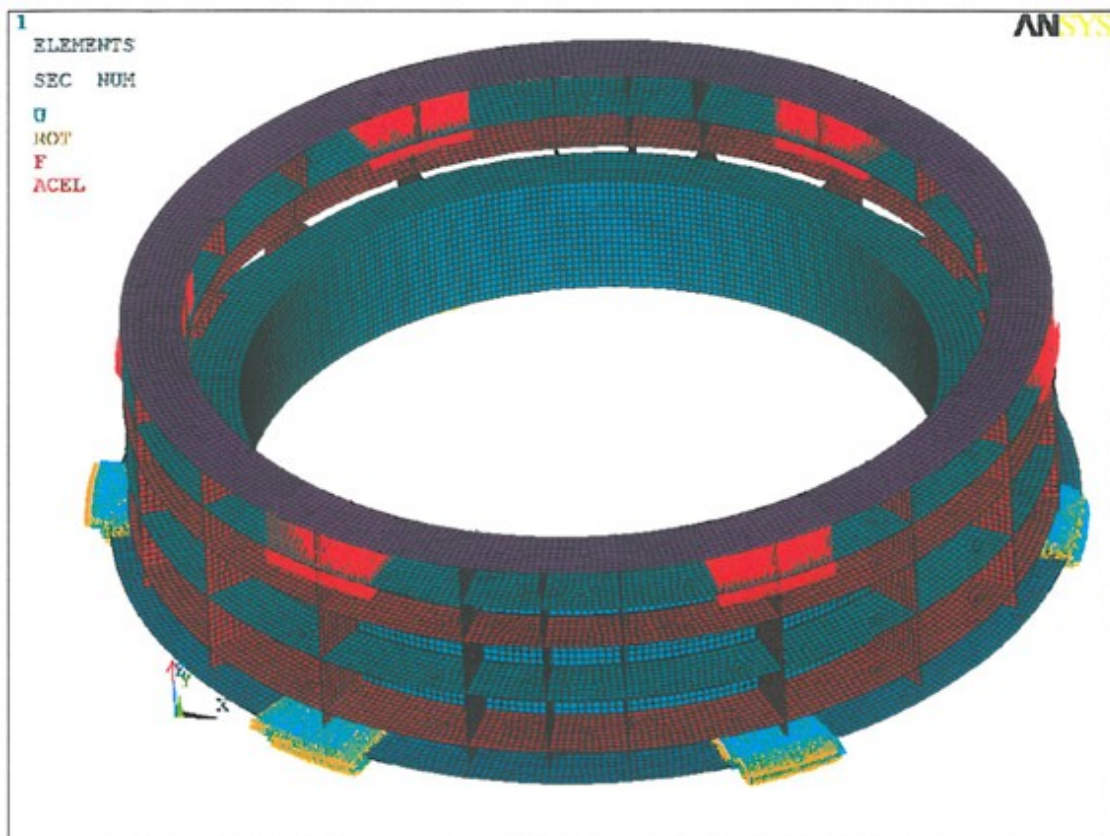
-Hmotnost statoru (prstenec uvnitř kostry) je 17,12 t.

-K vytvoření sítě jsou použity SHELL elementy s mezi-uzly a SOLID elementy bez mezi-uzlů. Celkově je k vytvoření sítě použito 129963 uzlů a 66258elementů.

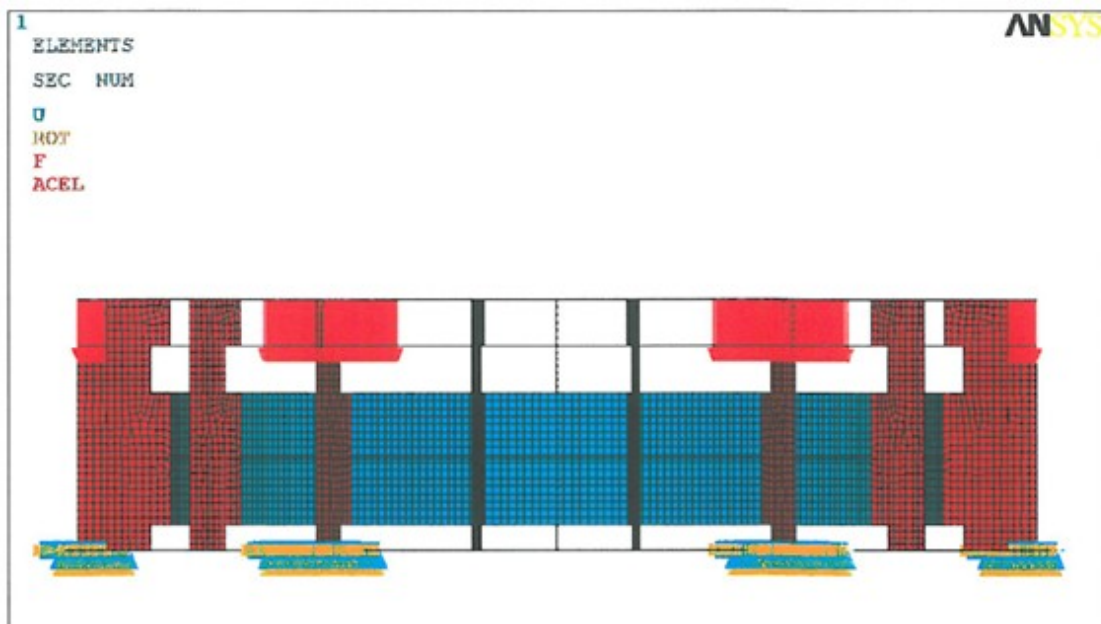
-Pro všechny plechy tvořící kostru je použit klasický lineární model pro ocel s $E=210000\text{MPa}$, $\rho=7850\text{kg/m}^3$ a $\mu=0,3$.

-Pro objem statorového svazku je použit materiál s nízkým modulem pružnosti, aby tuhost svazku byla co nejnižší a nezvyšovala tak při výpočtu tuhost celého systému. Ve skutečnosti bude tuhost systému vyšší než při teoretickém výpočtu a v reálu je tak možné očekávat nižší deformace a napětí. Hustota je upravena tak, aby vypočtená hmotnost této části odpovídala skutečné hmotnosti. $E=1000\text{Mpa}$, $\rho=7939,8\text{kg/m}^3$ a $\mu=0,3$.

Výstup ze systému ANSYS - namáhání kostry statoru:

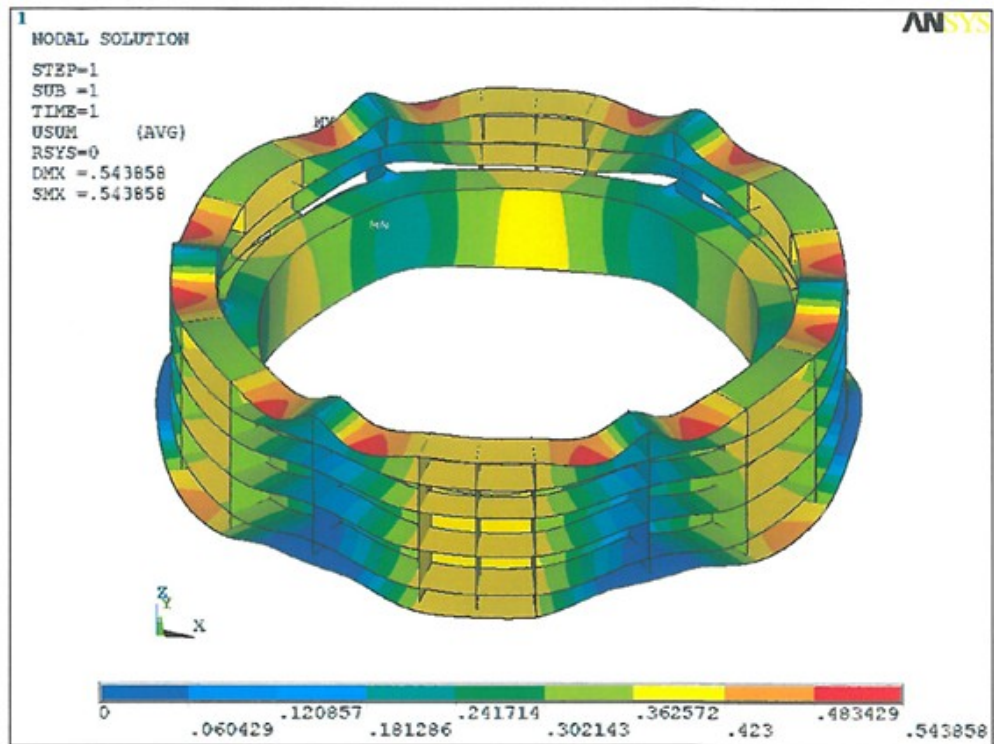


Obr. 4.2 Model statoru v systému ANSYS

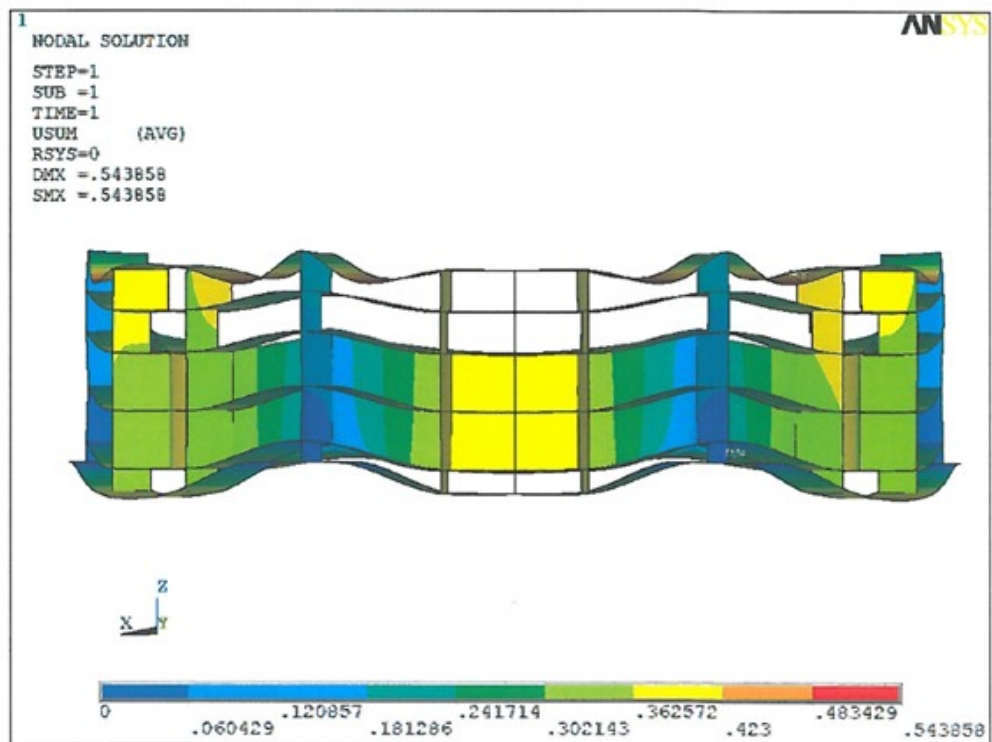


Obr. 4.3 Model statoru v systému ANSYS

Zobrazení deformace:

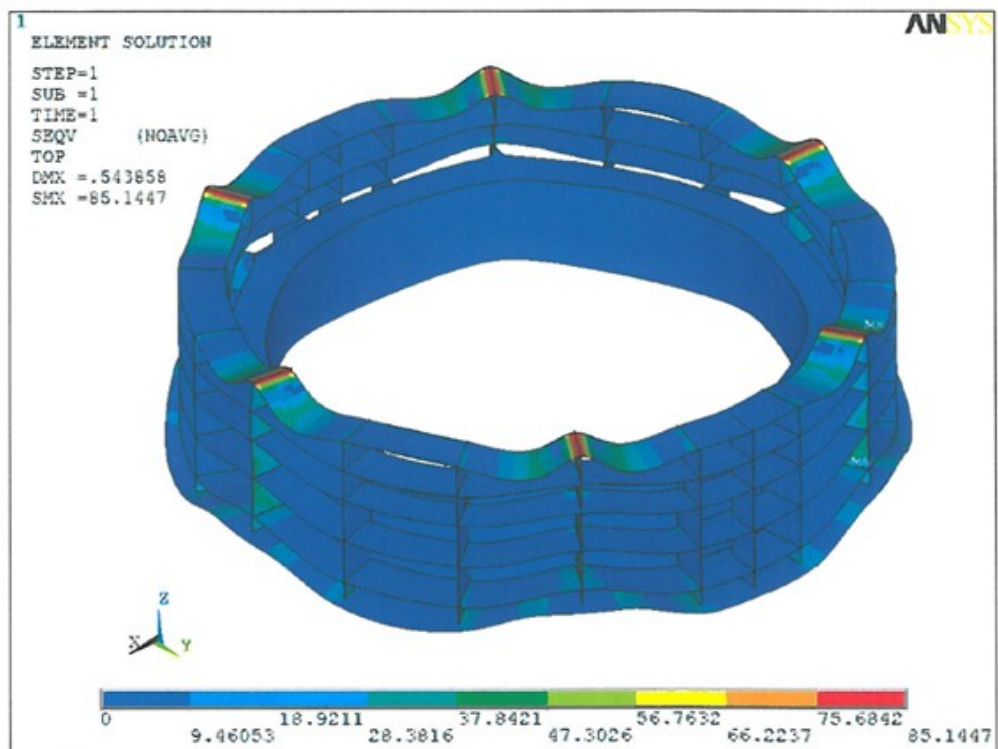


Obr. 4.4 Zatížený model statoru v systému ANSYS

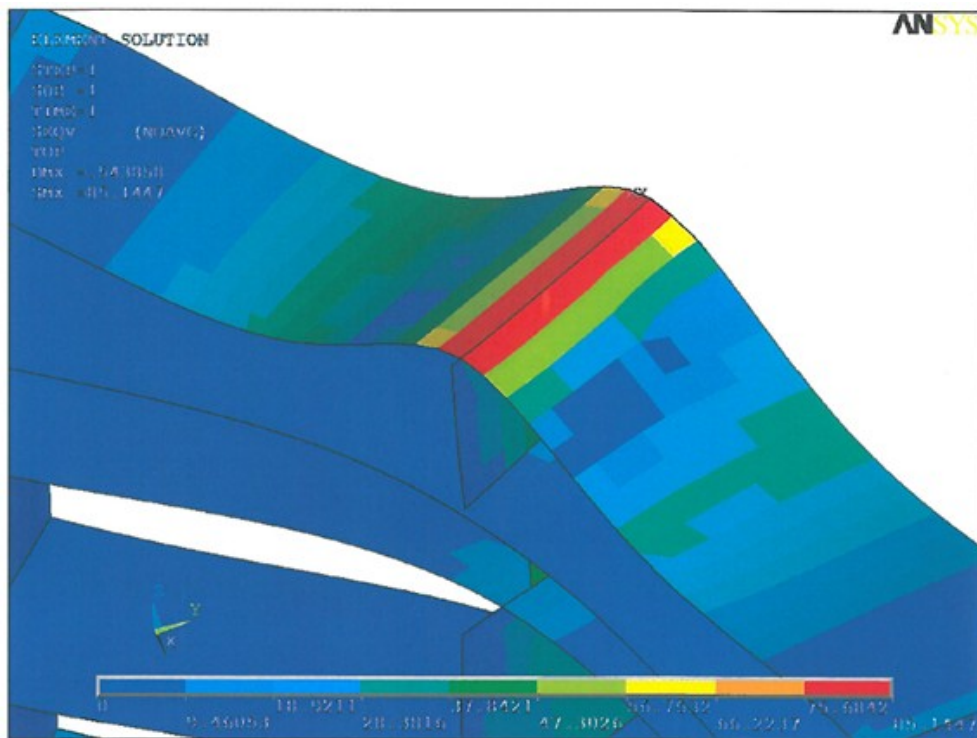


Obr. 4.5 Zatížený model statoru v systému ANSYS

Zobrazení napětí:

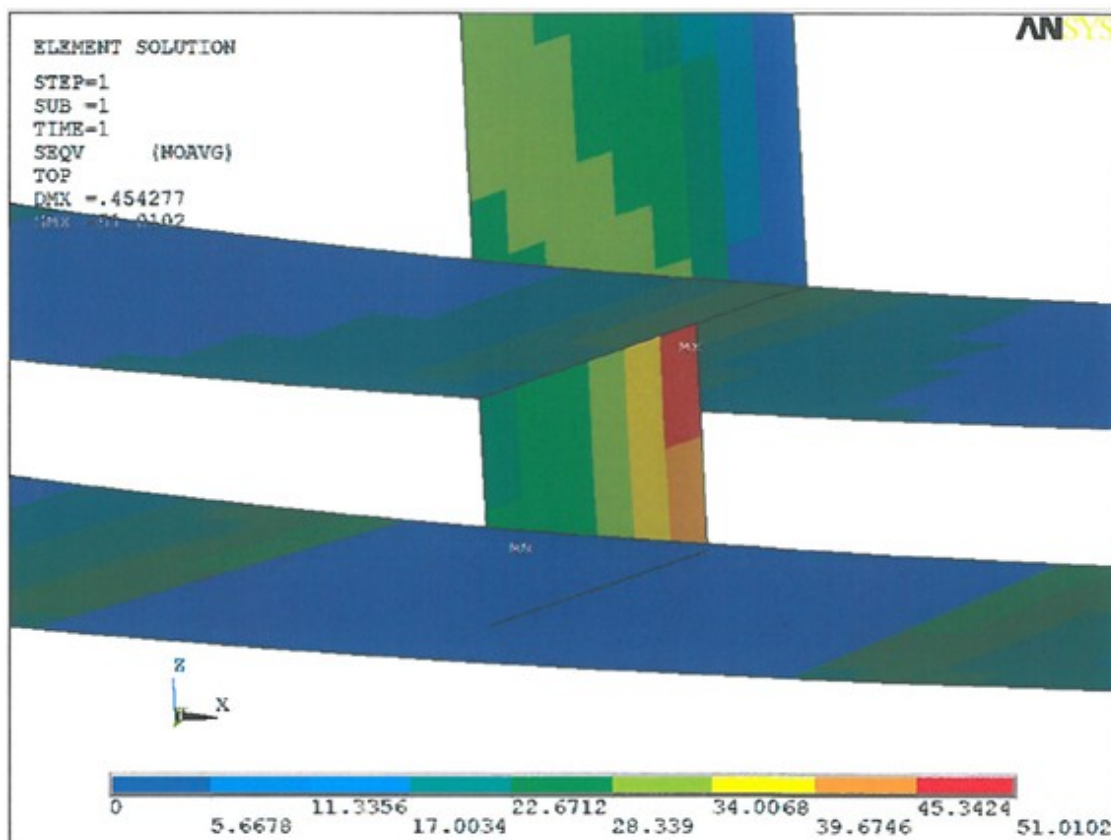


Obr. 4.6 Zatížený model statoru v systému ANSYS



Obr. 4.7 Zatížený model statoru v systému ANSYS.

Detail výrazného napětí č. 1



Obr. 4.8 Zatížený model statoru v systému ANSYS.

Detail výrazného napětí č. 2

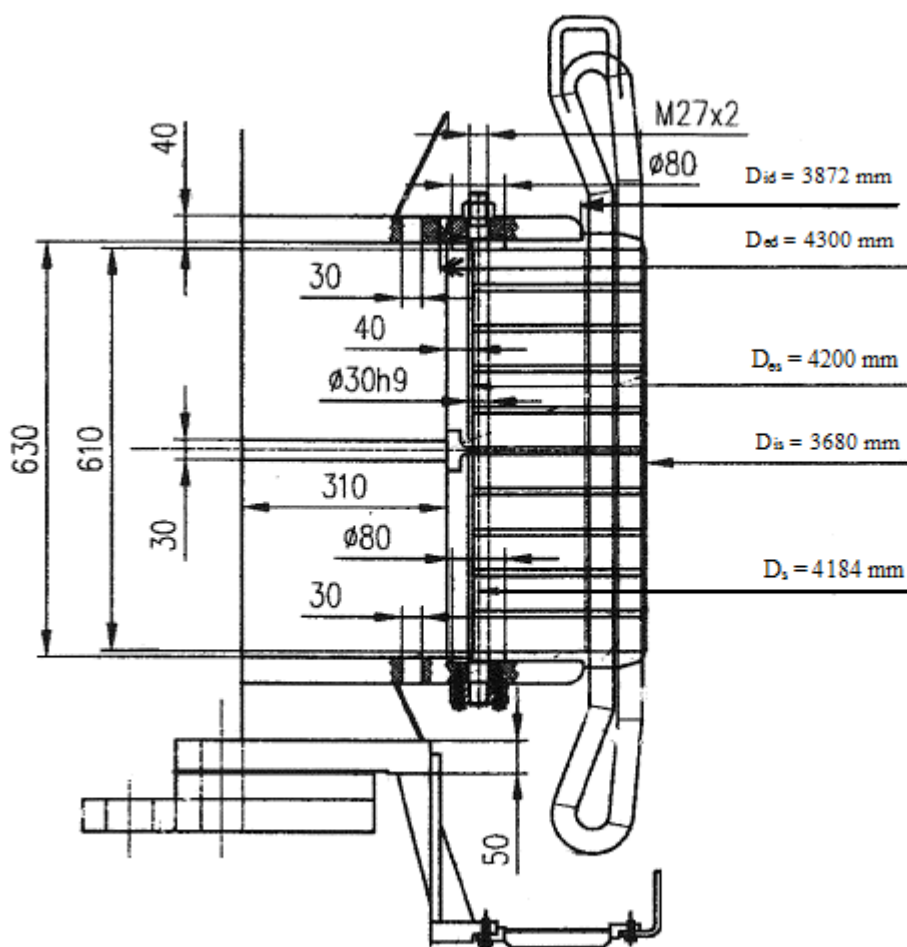
Vyhodnocení:

Maximální výchylka vyvolaná zatížením je 0,54mm a maximální napětí vyvolané od zatížení je 85MPa, což je hluboko pod bezpečnou hodnotu povoleného kombinovaného napětí 120MPa.

Výsledky kontrolního mechanického výpočtu jsou tedy VYHOVUJÍCÍ.

4.2 Kontrola magnetického obvodu

Je složen ze segmentů. Zakládání plechů je provedeno na svorníky, které se stahují pomocí stahovací desky svazek potřebným tlakem a přenášejí na kostru krouticí moment vyvozený magnetickými silami. Radiálně je svazek navíc podepřen podélnými nosnými žebry kostry. Mechanický výpočet kontrolovaných částí statorového svazku vychází ze zjednodušujícího předpokladu, že axiálním stažením dosáhne rovnoměrného tlaku p_s . Předpokládáme, že velikost p_s je v rozmezí 10,7 až 10,5 Mpa.



Obr. 4.9 Magnetický obvod statoru.

Pokles tlaku p_{sv} drážkové části, způsobený poddajností statorových zubů, se zanedbává.

4.2.1 Kontrola stahovacích svorníků:

Hodnoty potřebné pro výpočet:

Jmenovitý moment generátoru $M_n = 364,2 \text{ kNm}$

Počet drážek $n_d = 252$

počet svorníků $n_s = 36$

šířka drážky $b_d = 17,2 \text{ mm}$

průměr svorníků $d_s = 30 \text{ mm}$

výška drážky $h_d = 91,8 \text{ mm}$

závit na koncích svorníku M27 x 2

roztečný průměr svorníku $D_s = 4184 \text{ mm}$

délka svorníku $l_s = 670 \text{ mm}$

vnější průměr magnetového obvodu statoru $D_{es} = 4200 \text{ mm}$

vnitřní průměr magnetového obvodu statoru $D_{is} = 3680 \text{ mm}$

Síla působící v tečném směru na poloměru $R_s = D_s/2 = 2092 \text{ mm}$.

$$T_1 = \frac{M_n}{R_s \cdot n_s} = \frac{364,2}{2,092 \cdot 36} \cdot 10^3 = 4836 \text{ N} \quad (1)$$

Spojitě zatížení po délce svorníku $q_s \text{ N.m}^{-1}$

$$q_s = \frac{T_1}{l_s} = \frac{4836}{0,67} = 7218 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2)$$

Maximální ohybový moment:

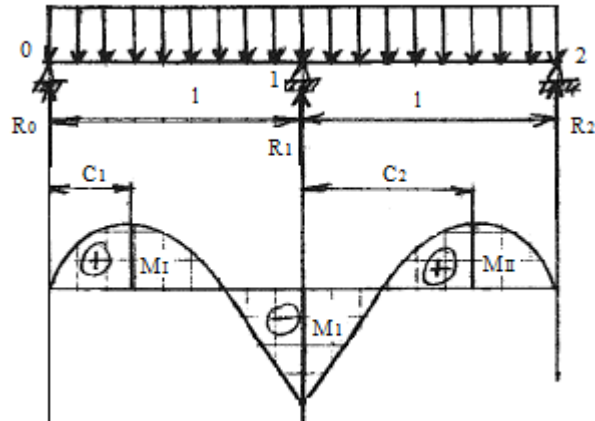
$$M_{oMAX} = \frac{q_s \cdot l_s^2}{8} = \frac{7218 \cdot 0,67^2}{8} = 405 \text{ Nm} \quad (3)$$

$$W_o = \frac{\pi \cdot d_s^3}{32} = \frac{\pi \cdot 0,03^3}{32} = 2,649 \text{ mm}^3 \quad (4)$$

Ohybové namáhání:

$$\sigma_o = \frac{M_{oMAX}}{W_o} = \frac{405}{2,649} \cdot 10^6 = 153 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 153 \text{ MPa} \quad (5)$$

Svorníky se uvažuje podepřeny v polovině délky l_s a vypočítáme ohybové momenty po délce nosníku. Svorník bude podepřen momentovou příložkou, která bude přivařena po obvodu k vnitřní desce kostry.



Obr. 4.10 Zatížení svorníku magnetického obvodu

V krajních podporách platí, že momenty M_0 a M_2 jsou nulové.

Moment ve střední podpoře:

$$M_1 = -\frac{1}{8} \cdot q_s \cdot l^2 = -\frac{1}{8} \cdot 7218 \cdot 0,335^2 = -102 \text{ Nm} = M_{\text{MAX}} \quad (6)$$

Největší kladný moment v poli 0 – 1 se spočte ze vztahu:

$$M_I = M_0 + \frac{1}{2} \cdot q_s c_1^2 + \frac{1}{2} \cdot q_s c_1^2 \quad (7)$$

$$M_I = M_{II} = \frac{7218 \cdot 0,1253^2}{2} = 57 \text{ Nm} \quad (8)$$

Reakce v podporách tedy jsou:

$$R_0 = R_2 = q_s \cdot c_1 = 7218 \cdot 0,1253 = 905 \text{ N} \quad (9)$$

$$R_1 = q_s \cdot (l - c_1 + l - c_1) = 2q_s \cdot (l - c_1) = 2 \cdot 7218(0,335 - 0,1253) = 3028 \quad (10)$$

Ohybové namáhání svorníků:

$$\sigma_{01} = \pm \frac{M_1}{W_o} = \frac{102}{2,649} \cdot 10^6 = 39 \text{ MPa} \quad (11)$$

Stanovení výsledné stahovací síly magnetového obvodu statoru F_V :

Plocha příčného průřezu všech statorových drážek A_d :

$$A_d = n_d \cdot b_d \cdot h_d = 252 \cdot 0,0172 \cdot 0,0918 = 0,4 \text{ m}^2 \quad (12)$$

Činitel T_{S1} závislý na poměru $d = D_{is}/D_{es}$:

$$d = \frac{D_{is}}{D_{es}} = \frac{3,68}{4,2} = 0,876 \quad (13)$$

$$T_{S1} = 0,785(1 - d^2) = 0,785(1 - 0,876^2) = 0,1823 \quad (14)$$

$$F_V = p_s \cdot (T_{S1} D_e^2 - A_d) = 1 \cdot 10^6 \cdot (0,1823 \cdot 4,2^2 - 0,4) = 2,82 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (15)$$

Namáhání svorníku normálovým napětím:

A_{js} – plocha průřezu jádra svorníku, pro závit M 27 x 2

$$A_{js} = 496 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{F_V}{n_s \cdot A_{js}} = \frac{2,82 \cdot 10^6}{36 \cdot 496} = 158 \text{ MPa} \quad (16)$$

Namáhání krajních vláken svorníku:

Materiál svorníků 13 240.6 kde $Re = 440 \text{ MPa}$.

$$\sigma_{min} = \sigma_t - \sigma_{01} = 158 - 39 = 119 \text{ MPa} \quad (17)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_t + \sigma_{01} = 158 + 39 = 197 \text{ MPa} \quad (18)$$

4.2.2 Kontrola stahovacích desek a přitlačných palců:

Hodnoty potřebné pro výpočet:

Vnější průměr statorové desky $D_{ed} = 4300$ mm

Vnitřní průměr statorové desky $D_{id} = 3870$ mm

Tloušťka desky $t_d = 40$ mm

Myšlené působíště výsledné stahovací síly F_V je na průměru D_p

Činitel vnějšího průměru magnetového obvodu statoru T_2 :

$$T_2 = 0,524 \cdot (1 - \alpha^3) = 0,524 \cdot (1 - 0,876^3) = 0,1718 \quad (19)$$

$$D_p = \frac{T_2 \cdot D_{es}^3 - A_d(D_{is} + h_d)}{T_{S1} \cdot D_{es}^2 - A_d} = \frac{0,1718 \cdot 4,2^3 - 0,4(3,68 + 0,0918)}{0,1823 \cdot 4,2^2 - 0,4} = 3,984m \quad (20)$$

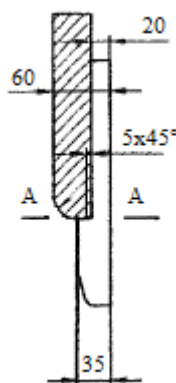
Stahovací kruh je zatížen ohybovým momentem M_1 :

$$M_1 = \frac{F_V(D_{ed} - D_p)}{2} = \frac{2,82(4,3 - 3,984)}{2} \cdot 10^6 = 0,446 \cdot 10^6 Nm \quad (21)$$

Ohybové namáhání desky

$$\sigma_1 = \frac{6 \cdot M_1}{\pi \cdot \left(\frac{D_{ed} + D_{id}}{2}\right) \cdot t_d^2} = \frac{6 \cdot 0,446 \cdot 10^6}{\pi \cdot \left(\frac{4,3 + 3,87}{2}\right) \cdot 0,04^2} = 131 MPa \quad (22)$$

Přitlačné palce (Obr. 4.11) jsou v řezu A – A namáhány ohybovým momentem M_2 , vypočítaným ze spojitého zatížení tlakem p_s .



Obr. 4.11 Přitlačné palce

Ohybový moment M_2 :

$$M_2 = \frac{p_s}{n_d} \left[\left(\frac{D_{id}}{10} \right)^3 \cdot T_3 - \frac{A_d}{2} \cdot (D_{id} - D_{is} - h_d) \right] \quad (23)$$

$$M_2 = \frac{1 \cdot 10^6}{252} [0,3572^3 \cdot 0,94975 - 0,2 \cdot (3,872 - 3,68 - 0,0918)] = 140 \text{ Nm} \quad (24)$$

Ohybová napětí přítláčných palců s příčným průřezem B x H je:

$$\sigma_2 = \frac{6 \cdot M_2}{B \cdot H^2} = \frac{6 \cdot 140}{0,02 \cdot 0,02^2} = 105 \text{ MPa} \quad (25)$$

Při volbě materiálu S 460N, který má $Re = 440 \text{ MPa}$.

Spočtená napětí σ_{\max} , $\bar{\sigma}_1$ a $\bar{\sigma}_2$ jsou menší než hodnoty dovolených napětí použitých ocelí.

Výsledky kontrolního mechanického výpočtu jsou tedy VYHOVUJÍCÍ.

5 Uvedení do provozu

Spolu s generátorem bude dodána i sada přípravků pro montáž a transport částí generátoru. Budou dodány následující přípravky:

- Přípravek pro transport statoru a rotoru
- Přípravek pro montáž statoru a rotoru
- Vázací přípravky pro rotor a stator
- Přípravky pro odložení statoru a rotoru
- Přípravek pro montáž pólů rotoru

Při uvádění stroje do provozu po montáži budou provedeny zkoušky všech technologických celků dodávky. Z pohledu generátoru budou prováděny následující zkoušky:

- rozběh soustrojí s postupným zvyšováním otáček až na jmenovité
- kontrola mechanického stavu stroje a teplot ložisek
- zatížení generátoru na 30%, kontrola oteplení
- zatížení generátoru na 30%, zkouška havarijního odstavení
- postupné zvyšování výkonu generátoru na 100%
- vypínací zkoušky z výkonu 30%, 50%, 75% a 100%, kontrola zvýšení otáček
- komplexní zkoušky pop dobu 72hodin v různých provozních stavech

Generátor může pracovat v několika provozních režimech, a to jak:

- generátor s dodávkou činné elektrické energie a dodávkou jalové elektrické energie
- generátor s dodávkou činné elektrické energie a spotřebou jalové elektrické energie
- kompenzátor s dodávkou jalové elektrické energie

6 Závěr

Ve zpracování práce jsem provedl rešerši z oblasti vodních elektráren. Skrze kterou jsem představil pojem vodní elektrárny a přiblížil pohled na dané téma. Dále shrnul původní konstrukci generátoru a přiblížil požadavky na náhradu. Následně jsem dle zadaných parametrů elektrárny, zhotovil konstrukční návrh, provedl potřebné pevnostní kontroly a zhotovil sestavné výkresy.

Navržený generátor se skládá ze svařované konstrukce statoru skládající se převážně ze silných plechových výpalků. Je navržen tak, aby přesně dosedl do stávající stavby vodního díla. Dalším konstrukčním prvkem jsou patky v horní části určené pro usazení horní traverzy se závěsným ložiskem generátoru. Jeho hlavní funkcí je však nesení magnetického obvodu. Ten je složen z jednotlivých segmentů z izotropních plechů pro elektrotechniku s povrchovou úpravou ve formě elektroizolačního laku. V elektromagnetickém obvodu je dvouvrstvé vysokonapěťové vinutí, složené s cívek navíjené měděným vodičem. To v kombinaci s rotačním pohybem pólových cívek vytváří elektromagnetické pole, které se transformuje v elektrickou energii. Póly jsou složené z plechů a vinutí je měděné z pásové mědi. Ty jsou pak zasunuty v tvarované drážce vyfrézované v magnetovém kole a zajištěny klínem. Magnetové kolo je horizontálně děleno na čtyři části, které jsou svorníky staženy do jednoho celku. Tyto části jsou výpalky a po stažení byla společně opracována. Je na hřídeli uloženo s přesahem. Pro potřeby případného brzdění je na spodní segment rotorového kola uchycen opracovaný brzdový kotouč. Pro přenos krouticího momentu je jak kolo, tak i hřídel vybaveno drážkou pro pero. Hřídel samotná je pak vykovaná a následně opracovaná z jednoho kusu, na spodním konci montážní přírubou pro přímé spojení s hřídelem turbíny a na horním konci šroubovaným nástavcem pro unášení sběrných kroužků. Hřídel, magnetové kolo a pólové cívky jsou dohromady nazývány rotor. Rotor je zavěšen v kombinovaném ložisku uloženém v horní traverze, která je umístěna na statorovém rámu. Toto ložisko má za úkol zachytit hmotnost rotoru generátoru, hmotnost rotoru turbíny a hydraulické zatížení od turbíny. Vodičí ložisko i se spodní traverzou je umístěno samostatně na základovém rámu v šachtě pod generátorem. Celá soustava je řádně zakrytována a chlazení zajišťují ventilátory připevněné na horní i spodní část rotoru.

Tato vodní elektrárna je schopna vyrobit až 10,4 MW elektrické energie.

Seznam použitých zdrojů

Knižní publikace

- [1] ŘASA, Jroslav a Josef ŠVERCL. *STROJNICKÉ TABULKY 1: pro školu a praxi*. Praha 6: Scientia, spol. s r. o., 2004. ISBN 80-7183-312-6.

Internetové zdroje

- [2] *Wikipedie* [online]. 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Vodn%C3%AD_elektr%C3%A1rna
- [3] *ENERGIE VODY* [online]. 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z:
http://ok1zed.sweb.cz/s/el_vodniel.htm
- [4] *Ansys* [online]. 2016 [cit. 2016-04-11]. Dostupné z:
<https://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>
- [5] *ČKD Blansko* [online]. 2014 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z:
<http://www.ckdblansko.cz/o-nas/referencni-projekty-spolecnosti/francisovy-turbiny/francisova-rev-turbina/dalesice>
- [6] *Výuka Jihlavsko* [online]. 2014 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z:
<http://vyuka.jihlavsko.cz/elektrina-vyroba/>
- [7] *Vodní turbíny. Kovo Viták* [online]. 2013 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z:
<http://www.opravymve.cz/mve-cvrcovice-2/>
- [8] *Mapy. Google* [online]. 2013 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z:
<https://www.google.cz/maps/place/Batumi,+Gruzie/@47.6538524,21.2667629,5z/data=!4m5!3m4!1s0x406786304ea2d221:0x7a3053a9e12ea967!8m2!3d41.6167547!4d41.6367455>

Seznam příloh

Příloha č. 1	500-ATS-21M06-1c 1; Kostra statoru opracování
Příloha č. 2	500-ATS-21M06-1c 2; Kostra statoru opracování
Příloha č. 3	500-ATS-21M06a; Magnetický obvod statoru
Příloha č. 4	500-ATS-21M06-2b; Segment statoru (vnitřní a krajní)
Příloha č. 5	500-ATS-21M03-1c; Cívka statoru
Příloha č. 6	500-ATS-21M25-2c; Hřídel generátoru
Příloha č. 7	500-ATS-21M12-1h; Magnetové kolo opracování
Příloha č. 8	500-ATS-21M08b; Rotor - sestava
Příloha č. 9	500-ATS-21M20; Kroužky - sestava
Příloha č. 10	500-ATS-21M21; Sběrací ústrojí - sestava
Příloha č. 11	500-ATS-21M24b; Brzdící disk - opracování
Příloha č. 12	500-ATS-21M14; Ventilátor horní - svařenec
Příloha č. 13	500-ATS-21M05a; Vývody