

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vysokonapět'ové generátory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej NOVOTNÝ**  
Osobní číslo: **E10B0090P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vysokonapěťové generátory**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

Vypracujte přehled vývoje vysokonapěťových generátorů

1. Porovnejte generátory s blokovým transformátorem a vysokonapěťové genrátory.
2. Popište projekty vysokonapěťových generátorů.
3. Shrňte výhody a nevýhody vysokonapěťových generátorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

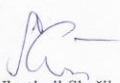
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Řezáček, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je rešerše o generátorech. Konkrétně se jedná o generátor s blokovým transformátorem a vysokonapětové generátory. Práce obsahuje popis generátorů, stavbu, princip funkce, popis rozdílů mezi zmíněnými dvěma typy a shrnutí výhod a nevýhod vysokonapětových generátorů.

## **Klíčová slova**

Generátor, vysokonapětový generátor, transformátor, stator, rotor

**Abstract**

The bachelors's theses is a search about generators. Namely about the generator with block transformer and high-voltage generators. The theses contains description of the generators, construction, function principle, description of the differences between the mentioned two types and a summary of pros and cons of high-voltage generators.

**Key words**

Generator, high-voltage generator, transformer, stator, rotor

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Ondřej Novotný

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Řezáčkovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady a za trpělivé vedení práce.

# 1 Obsah

<b>1</b>	<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>SEZNAM SMYBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>11</b>
4.1	OBEČNĚ O TRANSFORMÁTORU.....	11
4.1.1	<i>Princip činnosti transformátoru</i> .....	11
4.2	BLOKOVÝ TRANSFORMÁTOR .....	12
<b>5</b>	<b>GENERÁTOR</b> .....	<b>14</b>
5.1	SYNCHRONNÍ STROJE.....	14
5.2	FUNKCE GENERÁTORU.....	14
5.3	STAVBA GENERÁTORU.....	15
<b>6</b>	<b>PROJEKTY VYSOKONAPĚŤOVÝCH GENERÁTORŮ</b> .....	<b>18</b>
6.1	SIEMENS VYSOKONAPĚŤOVÝ GENERÁTOR 1FC4.....	18
6.1.1	<i>Popis</i> .....	18
6.1.2	<i>Stavba stroje 1FC4</i> .....	18
6.1.3	<i>Elektrické vlastnosti 1FC4</i> .....	19
6.2	JYOTI VYSOKONAPĚŤOVÝ GENERÁTOR .....	23
6.2.1	<i>Profil firmy Jyoti</i> .....	23
6.2.2	<i>Mechanický návrh generátorů Jyoti</i> .....	24
6.2.3	<i>Elektrický návrh generátorů Jyoti</i> .....	25
6.2.4	<i>Automatický regulátor napětí (AVR) a budicí systém</i> .....	26
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>29</b>



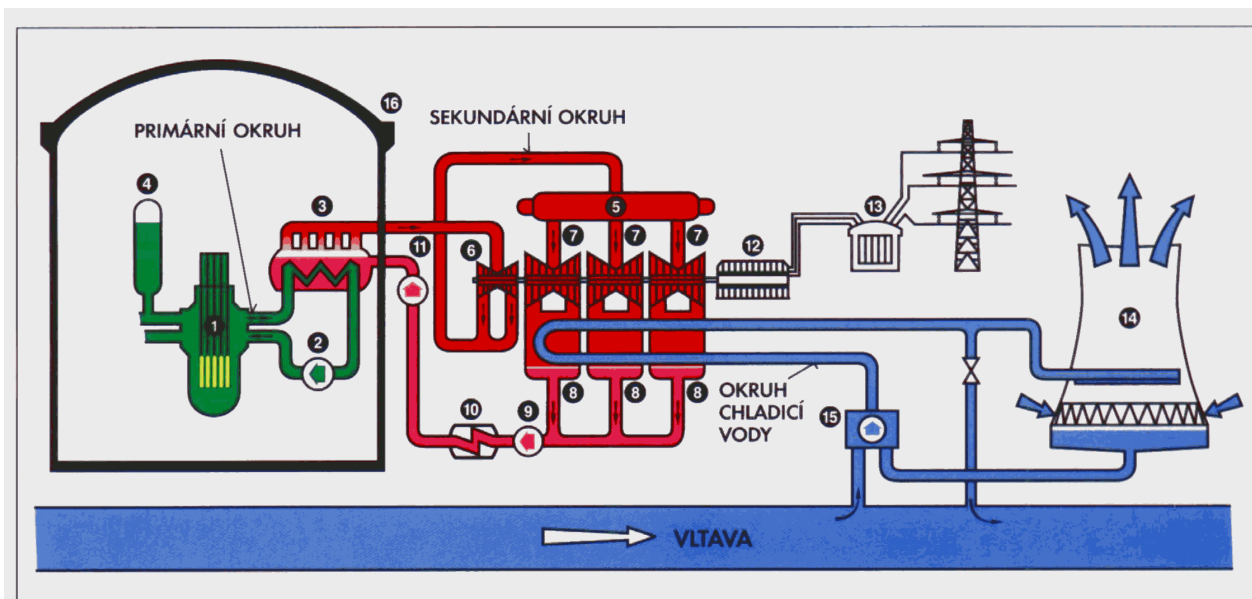
## 2 Seznam symbolů a zkratk

VA	voltampér, jednotka zdánlivého výkonu S
kVA	kilovoltampér, násobek VA
MVA	megavoltampér, násobek VA
kV	kilovolt, násobek jednotky volt, která je jednotkou elektrického napětí U
kA	kiloampér, násobek jednotky ampér, která je jednotkou elektrického proudu I
MW	megawatt, násobek jednotky watt, která je jednotkou činného výkonu P
YNd	zapojení transformátoru do trojúhelníka na straně nižšího napětí a do hvězdy se středním vodičem na straně vyššího napětí
V <sub>vn</sub>	velmi vysoké napětí
Z <sub>vn</sub>	zvlášť vysoké napětí
nS1	synchronní otáčky
$\beta$	zátěžný úhel, jednotka – stupeň elektrický
$\Phi$	magnetický tok, jednotka Weber [Wb]
cos $\Phi$	účinník
AS	strana stroje s vyvedenou hřídelí
NS	strana stroje s budičem
Hz	Hertz, jednotka frekvence
CAD	computer-aided drafting - počítačem podporované kreslení
%	procento
s	sekunda (Tab. 1, konec strany 20)
min	minuta (Tab. 1)
h	hodina (Tab. 1)
SRN	Spolková republika Německo
VDE	Německé sdružení pro elektrotechnické elektronické a informační technologie
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
AC	střídavé napětí
DC	stejnoseměrné napětí

### 3 Úvod

Tato práce je zaměřena na popis synchronního generátoru s blokovým transformátorem, projektů vysokonapěťových generátorů a rozdílů mezi nimi.

Text je rozdělen do tří částí. První část se zabývá transformátorem, vysvětluje jeho princip a pokračuje popisem blokového transformátoru. Druhá část je zaměřena na generátor, vysvětlení jeho funkce a následný popis stavby generátoru s blokovým transformátorem. O generátoru s blokovým transformátorem můžeme mluvit pouze, když tvoří generátor a transformátor jednotku, tzv. blok. Takový generátor se používá v tepelných, jaderných i vodních elektrárnách. V tepelných a jaderných je to turboalternátor a ve vodních hydroalternátor. Pro ukázkou je na obrázku 1 zobrazeno schematické umístění turboalternátoru s transformátorem v jaderné elektrárně Temelín. Jedná se o prvky číslo 12 a 13.



**SCHÉMA JE TEMELÍN:** 1. Reaktor, 2. Hlavní cirkulační čerpadlo, 3. Parogenerátor, 4. Kompenzátor, 5. Separátor - přehřívák, 6. Vysokotlaký díl turbíny, 7. Nízkotlaký díl turbíny, 8. Kondenzátor, 9. Kondenzátní čerpadlo, 10. Regenerace, 11. Napájecí čerpadlo, 12. Elektrický generátor, 13. Transformátor, 14. Chladicí věž, 15. Čerpací stanice, 16. Ochranná obálka

Obr. 1 Schéma JETE [1]

Ve třetí části následuje popis konstrukce a funkce vysokonapěťových generátorů a v závěru práce je uvedeno shrnutí rozdílů těchto dvou typů generátorů a výhod a nevýhod vysokonapěťových generátorů.

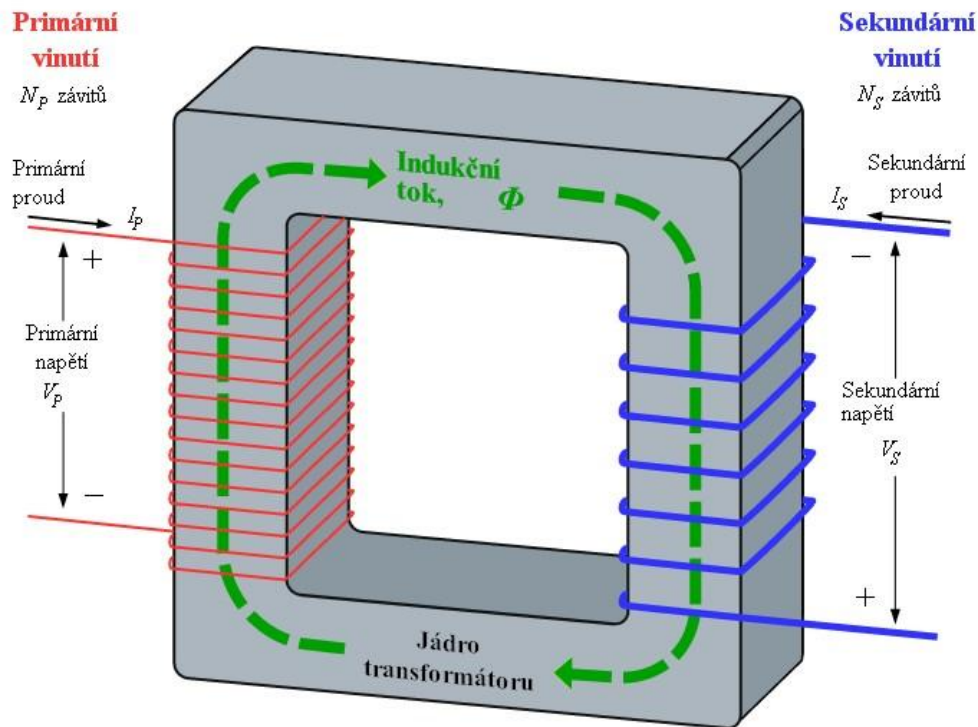
## 4 Transformátor

### 4.1 Obecně o transformátoru

Transformátor je zařízení transformující elektrickou energii. To znamená, že mění její parametry, avšak na vstupu i výstupu transformátoru je stále elektrická energie. V transformátoru se nenachází žádné rotační části. Je to poměrně jednoduché zařízení s vysokou účinností přenosu elektrické energie. Transformátory jsou důležitou částí řady elektrických zařízení (od vazebních a napájecích transformátorků až po blokové a přenosové transformátory). Výkony se pohybují od zlomků VA do stovek MVA. Stejně, jako je velký rozsah výkonů, je i rozsah napětí od malých až po vvn. Transformátory mohou být jednofázové i vícefázové. [2]

#### 4.1.1 Princip činnosti transformátoru

Princip transformátoru je založen na zákonu elektromagnetické indukce, tzn., že magnetický tok vybuzený jedním vinutím indukuje napětí ve druhém vinutí. Skládá se tedy z uzavřeného magnetického obvodu a obvykle dvou cívek (primární a sekundární). Do primárního vinutí přivedeme střídavé napájecí napětí. Protože je elektrický obvod primární cívky uzavřený, prochází jejím vinutím střídavý proud. Okolo primární cívky, jako kolem každého vodiče s proudem se vytvoří střídavé magnetické pole, jehož magnetický tok  $\Phi$  se uzavírá převážně jádrem transformátoru. Svými účinky zasahuje i vinutí sekundární cívky. Vlivem časové změny magnetického toku (je střídavý) se v sekundárních vodičích indukuje střídavé napětí. Velikost tohoto napětí závisí na kmitočtu přiváděného napětí a počtu závitů.



Obr. 2 Schéma transformátoru [3]

Výkon, který je vyznačen na štítku transformátoru, je výkon zdánlivý (ve voltampérech). Činný výkon (ve wattech) se mění podle druhu zatížení, tedy podle velikosti účinníku  $\cos \phi$ . [2,4]

## 4.2 Blokový transformátor

Blokové transformátory patří mezi hlavní transformátory elektrárny. Nazývají se blokové pouze tehdy, pokud tvoří jednotku s příslušným alternátorem. Převod blokového transformátoru je atypický tím, že je menší než 1, na rozdíl od ostatních transformátorů v síti, jejichž převod je větší než 1. Jsou propojené vedením s příslušným přístrojovým vybavením a s odbočkou na vlastní spotřebu. Výkon blokových transformátorů je velmi často dimenzován v souladu s výkonem alternátoru přesto, že jím prochází výkon menší o výkon odebraný vlastní spotřebou. Uvedená rezerva se může uplatnit například v případě, že vlastní spotřeba je napájena ze záložního zdroje. Pro vyvedení výkonu alternátoru se užívá jednoho trojfázového transformátoru - výkon shodný s alternátorem. Dvou paralelně spojených trojfázových transformátorů - výkon poloviční výkonu bloku. Třetím řešením je tři

jednofázové jednotky s třetinovým výkonem. Jejich zapojení odpovídá požadovanému hodinovému úhlu. Nejlevnější je řešení s jedním trojfázovým transformátorem. To však nemusí být technicky nejlepší. Pro jednofázové jednotky je výhodné použít záložní fázi, která je společná pro celou elektrárnu a po určitém přerušení umožňuje nahradit poškozenou jednotku a obnovit přenos elektrické energie. Od určitého výkonu může nastat takový stav, že daný stroj v trojfázovém provedení nelze již přepravit, ale při jednofázovém provedení je takováto realizace možná. [5,6]



Obr. 3 Blokový transformátor [7]

Např. pro jadernou elektrárnu s bloky 1000 MW je u nás navrženo použití blokových transformátorů  $420/\sqrt{3}/24$  kV, 1200 MVA. Blokový transformátor se skládá ze tří jednofázových jednotek s výkonem asi 400 MVA. Na straně 400 kV je transformátor připojen lanovými vodiči na vnější vedení do rozvodny 400 kV. Strana 24 kV je připojena zapouzdřenými vodiči 28 kA na vývod alternátoru. Napětí nakrátko je 14% a zapojení YNd. Jako další příklad lze uvést v SRN normalizovaný trojfázový blokový transformátor 850 MVA, který může být dočasně přetěžován výkonem 1100 MVA. Dva takovéto paralelně

zapojené transformátory jsou vhodné pro jaderné bloky 1300 MW. Omezujícími prvky pro růst jednotkového výkonu blokových transformátorů jsou dopravní cesty, dopravní prostředek, zálohování na stanovišti a otázky spolehlivosti. Dalším omezujícím faktorem jsou možnosti výrobců. Blokované transformátory pracují s velkými proudy na straně alternátoru a s vysokým napětím na straně sítě (vedení). Jmenovité proudy velkých transformátorů jsou 10 až 20 kA i více. Vyžadují konstrukci transformátoru na připojení zapouzdřených vodičů ze strany alternátoru, ze strany sítě je připojení přes vnější průchodky vvn (zvn). [5]

## 5 Generátor

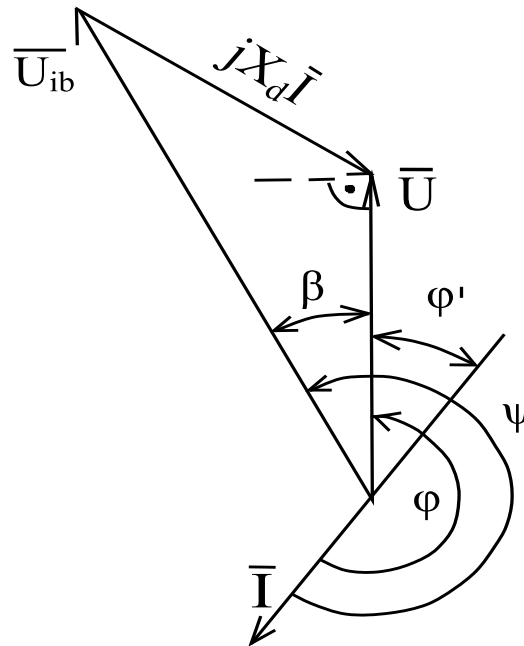
### 5.1 Synchronní stroje

Synchronní stroje se řadí mezi hlavní a nejdůležitější zařízení pro výrobu elektrické energie. Nazývají se synchronní generátory nebo také alternátory (nejčastěji třífázové). Alternátory v elektrárnách, které jsou poháněny parními turbínami a jejichž rychlost otáčení je 3000 otáček za minutu, se nazývají turboalternátory. Generátory poháněné vodními turbínami s podstatně nižší rychlostí otáčení jsou hydroalternátory. [8]

### 5.2 Funkce generátoru

Otáčí-li poháněcí stroj (např. turbína) nabuzeným rotorem, indukují se v jednotlivých cívkách statoru střídavá napětí sinusového průběhu, která jsou v jednotlivých cívkách vzájemně časově posunutá o úhel  $120^\circ$ . Připojí-li se ke svorkám vinutí statoru trojfázová zátěž (tzn., že se alternátor zatíží), vinutím statoru bude procházet střídavý elektrický proud. Prochází-li vinutím statoru střídavý trojfázový proud, vzniká stejně jako u asynchronního stroje točivé magnetické pole s otáčkami  $nS1$ , které má stejnou rychlost otáčení jako rotor a jeho magnetické pole, skluz (rozdíl otáček) stroje je tedy nulový. Proto se stroj nazývá synchronní. Rotor stroje je vychýlen oproti magnetickému poli o určitý kladný úhel (předbíhá). Tento úhel se nazývá zátěžný úhel  $\beta$ , tj. úhel, o který rotor u generátoru předbíhá výsledný tok, resp. o který se u motoru zpožďuje za výsledným tokem [8,9]

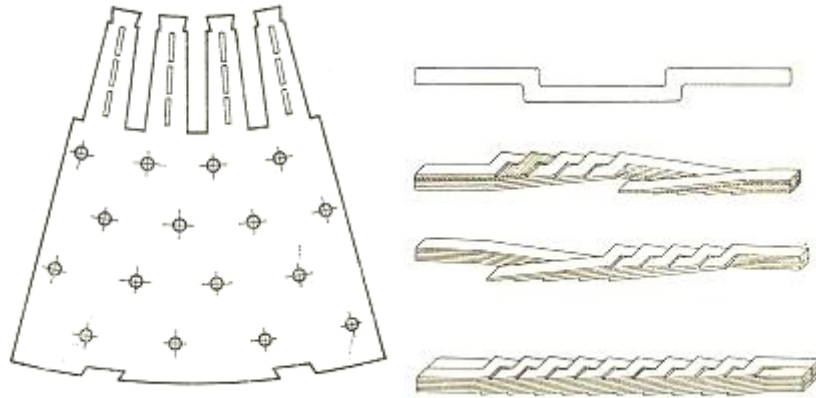




Obr. 4 Zjednodušený fázorový diagram synchronního stroje v generátorickém režimu (převzato z [2])

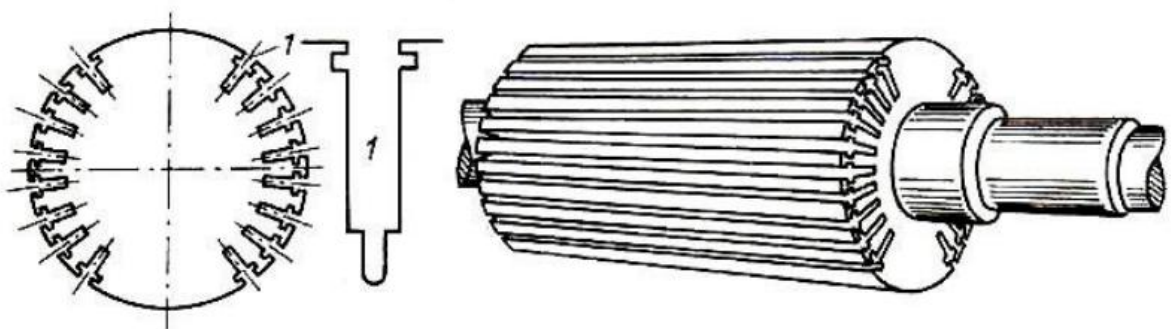
### 5.3 Stavba generátoru

Ve statoru alternátoru, který se podobá dutému válci, je magnetický obvod složený z plechů. Plechy se izolují lakem nebo zvláštním druhem papíru. Jsou v nich vytvořeny chladičí kanály, kudy vzduch nebo jiný plyn odvádí z magnetického obvodu teplo. U generátorů je možné použít 2 typy chlazení, a to radiální a radiálně axiální. Radiální chlazení se běžně používá u hydroalternátorů. Druhý typ se využívá u turboalternátorů chlazených vzduchem nebo plynem, protože při radiálním chlazení by se turboalternátor ochladil jen na jednom konci. Na vnitřním obvodu plechů jsou drážky s měděnými vodiči, které vytvářejí trojfázové vinutí. Začátky vinutí jsou připojeny na svorky alternátoru, odkud se střídavý elektrický proud odebírá a vede se do rozvodny a dále ke spotřebitelům. Konce vinutí jsou spojeny do uzlu. Jednotlivé vodiče jsou izolovány.



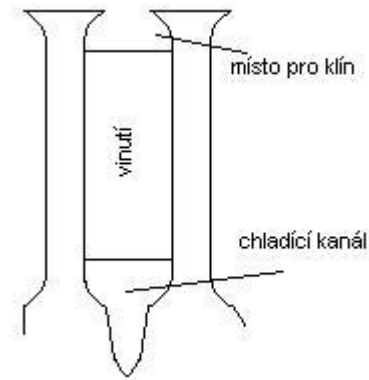
Obr. 5 Stator s chladícími kanály [11]      Obr. 6 Roeblova tyč [11]

Podle konstrukce rotoru se synchronní stroje dělí na stroje s vyniklými póly a na stroje s hladkým rotorem. Jak již bylo zmíněno v úvodu, budeme se věnovat turboalternátoru. U turboalternátorů se používá hladký rotor, protože při 3000 ot/min dochází ke značným odstředivým silám. Kvůli velkému magnetickému odporu vzduchu je vzduchová mezera mezi rotorem a státorem velmi malá (milimetry). Rotor je vyroben z jednoho kusu oceli a má tvar hladkého válce s podélnými drážkami po obvodu. Ty zaujímají asi dvě třetiny obvodu a jsou souměrně rozloženy. Průměr rotoru turboalternátoru je maximálně 1 m. V drážkách je uloženo budicí vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Rotor turboalternátoru je obvykle dvoupólový. Někdy se však používají stroje čtyřpólové. Jejich otáčivá rychlost je 1500 ot/min. [2,10]



Obr. 7 Rotor turboalternátoru s drážkami [11]





Obr. 8 Drážka na rotoru generátoru [12]

### Paralelní chod generátorů

Dodává-li jediný generátor elektrickou energii do vlastní sítě, uvede se do chodu tak, že se dosáhne jmenovitého napětí. Stroj se připojí k síti a začne zatěžovat. Podle toho jak se zatížení zvětšuje, zvětšuje se i budící proud, aby svorkové napětí nekleslo. Současně se přidává pohonná energie (pára, plyn, voda), aby se rychlost nezmenšovala a neměnil se kmitočet proudu. Pokud chceme připojit generátor do sítě, musíme splnit určité podmínky.

- 1) Generátor i síť musí mít stejný sled fází.
- 2) Kmitočet generátoru se musí rovnat kmitočtu sítě. Odchytky představují nárazy činného proudu. Tyto nárazy způsobují velké mechanické namáhání turbíny a alternátoru.
- 3) Generátor musí mít stejné napětí jako je napětí sítě. Stejně napětí sítě a připojovaného generátoru je při fázování nutné, neboť rozdíl mezi oběma napětími se při zapnutí projeví jako náraz jalového proudu (tj. proud vznikající v důsledku indukční nebo kapacitní zátěže při přechodovém jevu).
- 4) Napětí generátoru musí být v okamžiku připojení ve fázi s napětím sítě.

Jakmile je generátor připojen k síti, drží se v synchronismu samočinně synchronizační silou. [13,14]

## 6 Projekty vysokonapětových generátorů

Jako ukázky projektu vysokonapětových generátorů byly zvoleny stroje od společností Siemens [15] a Jyoti [16].

### 6.1 Siemens Vysokonapětový generátor 1FC4

Veškeré údaje v kapitole 6.1 se týkají pouze vysokonapětového generátoru Siemens 1FC4.

#### 6.1.1 Popis

Jedná se o třífázový synchronní generátor pro vysoké napětí. Rotor má vyniklé póly v bezkartáčovém provedení. Skládá se z generátoru střídavého proudu a z budiče s rotujícím usměřňovačem. Rotor hlavního stroje a budič se nachází společně s rotujícím usměřňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Součásti pro regulaci napětí jsou umístěny ve svorkovnicové skříni. Spolu se svařovaným krytem a ložisky tvoří tyto díly stavební jednotku.

#### 6.1.2 Stavba stroje 1FC4

##### Značení konců stroje

Konce stroje jsou značeny dvojicí písmen AS a NS. AS je strana nacházející se u volného konce hřídele, kde se připojuje pohon generátoru. O směru otáčení stroje můžeme rozhodnout při pohledu na tuto stranu stroje. Opačná strana stroje se označuje jako NS, hřídel zde není vyvedena a nachází se zde budič s rotujícím usměřňovačem.

##### Rotor

Rotor hlavního stroje se s budičem nachází společně s rotujícím usměřňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Rotor generátoru je kompaktní díl stroje s vyniklými póly a klecí tlumiče v magnetickém poli. Je nalisován na hřídeli a buzen pomocí integrovaného budiče. Rotor budiče s hladkými póly se nachází na NS straně stroje. Usměřňovač v obvodu rotoru je umístěn vně stroje na NS straně. Po demontáži chladiče usměřňovače je usměřňovač přístupný.

## **Stator**

Stator hlavního stroje se skládá z kostry svařované konstrukce. V kostře je stator nalisován a statorový svazek je zajištěn proti otočení. Statorový svazek se skládá z jádra tvořeného statorovými plechy, z hlavního a pomocného vinutí. Pomocné vinutí se také nazývá startovací a je využíváno pouze pro startování stroje, kdy je proud v pomocném vinutí fázově posunut oproti hlavnímu vinutí a napomáhá tak ke vzniku točivého momentu. Stator budiče se nachází v ložiskovém štítu na NS straně stroje. Jeho konstrukce je pólová a je vybaven permanentními magnety k nabuzení stroje při rozběhu.

## **Ložiska**

Generátor je standardně vybaven valivými ložisky, u kterých je zařízení pro domazávání a regulátor množství maziva. Jsou umístěná v ložiskových štítech. Provedení může být i s kluznými ložisky.

## **Svorkovnicová skříň**

Skříň svorkovnice hlavního vinutí se nachází na horní části skříně statoru generátoru. Obsahuje veškeré potřebné vybavení pro napojení a správnou funkci generátoru. Svorky jsou uspořádány na 6-svorkové lišty. Obvody regulace a měření jsou vyvedeny do samostatné nízkonapěťové svorkovnice umístěné odděleně od vysokonapěťových obvodů, aby byl zamezen přístup a manipulace v prostorách vysokého napětí neoprávněným osobám.

## **Měření a ochranné obvody**

Ve vinutí statoru jsou umístěna teplotní čidla. V ložiskových uzlech jsou ložiskové teploměry a generátor je vybaven také sondami pro montáž vyhřívacích těles.

### **6.1.3 Elektrické vlastnosti 1FC4**

## **Výkon a oteplení**

Stanovený výkon, který je udán na výkonovém štítku, platí pro dlouhodobý provoz při symetrickém zatížení, při stanovené frekvenci a napětí, při účinníku  $\cos\phi = 0,8$  až  $1,0$ , při

teplotě okolního vzduchu do 40 °C a při nadmořské výšce místa uložení stroje do 1000 m. Přitom je využíván stroj podle teplotní třídy F (do 155°C - slída, skleněné vlákno, azbest, upravené např. epoxidovými pryskyřicemi), dle IEC 34-1.

### Krátkodobé proudové přetížení

Stroje mohou být krátkodobě, bez škodlivých následků, přetíženy podle následující tabulky:

*Tab. 1 Proudové přetížení generátoru IFC4 [4]*

<b>I/In</b>	<b>1,10</b>	<b>1,15</b>	<b>1,30</b>	<b>1,5</b>	<b>3,0</b>
<b>t</b>	<b>1 h</b>	<b>25 min</b>	<b>6 min</b>	<b>15s</b>	<b>5 s</b>

Uvedená přetížení mohou být pouze ojedinělým jevem a po ukončení musí být stroj provozován po dobu nejméně jedné hodiny pouze se sníženým výkonem anebo nanejvýš se jmenovitým výkonem.

Pokud by nastal symetrický třífázový zkrat, hodnota zkratového proudu je minimálně třikrát vyšší než hodnota jmenovitého proudu a zkratový proud musí být do pěti vteřin vypnut.

## Napětí

Stroje jsou normálně dodávány se zapojením ve hvězdě pro napětí určeném v technických datech nebo na štítku stroje. Stroje, které byly dodány pro provoz při 50 Hz, mohou být provozovány při 60 Hz pouze po projednání a schválení výrobcem.

## Použití

Generátory jsou používány v centrálách pozemních zařízení a v lodních palubních sítích pro dlouhodobý nebo jako náhradní provoz a mohou být poháněny spalovacími motory, plynovými nebo vodními turbínami či elektromotory. Pracují samostatně, paralelně s obdobným zařízením nebo mohou být zapojeny na veřejnou síť.

## Regulace

Účelem regulace je udržovat konstantní svorkové napětí hlavního stroje nezávisle na zátěži a účinníku. K tomu regulátor napětí měří napětí generátoru a toto srovnává s nastavenou žádanou hodnotou. Budící vinutí budícího stroje získává potřebný stejnosměrný proud přes regulační orgán regulátoru napětí, který je napájen pomocným vinutím, vloženým do statoru hlavního stroje. Trojfázové vinutí budícího stroje napájí magnetové kolo hlavního stroje přes rotující usměrňovače. Svodič přepětí (varistor) v tomto omezuje vznikající špičky napětí na přípustné hodnoty. Regulátory napětí v kompaktním provedení jsou odolné vůči vlhkosti a chvění. Samovybuzení generátoru je zajištěno dostatečně vysokou remanencí ve statoru budícího stroje.

## Dynamické stavy napětí

Přechodný pokles napětí při zapojení plného zatížení s účinníkem  $\cos \phi$  činí normálně 15 až 20%. Tato hodnota je závislá na velikosti generátoru. Doba vyregulování činí dle velikosti generátoru 1,5 až 2 s.

## Paralelní chod

Synchronní generátory 1FCx jsou vhodné pro paralelní chod s jiným generátorem a sítí. Při paralelním chodu je rozdělení činné zátěže určeno poháněcími stroji. Aby byla činná zátěž rovnoměrně rozdělena, musí se regulátory otáček paralelně pracujících poháněcích strojů nastavit na stejnou charakteristiku. Mohou být rovněž vybaveny elektronickým regulátorem zatížení. Pro paralelní chod jsou také generátory vybaveny regulátorem statiky pro dobré rozdělení jalové zátěže. Pomocí nastavení odporu v regulátoru statiky může se měnit sklon charakteristiky jalového proudu. Statika je u výrobce nastavena na hodnotu asi 6% - při možném rozsahu nastavení 10%. Toto nastavení dovoluje v paralelním chodu síť kolísání napětí do  $\pm 2,5\%$ , aniž by byl překročen maximální jalový proud generátoru. Při větších kolísáních síťového napětí musí být statika buď zvětšena, anebo svorkové napětí regulováno pomocí regulátoru účinníku.

## Nulový vodič

Při paralelním chodu generátorů mezi sebou nebo se sítí se může rušivě projevit harmonická oscilace 3. řádu ve formě vyrovnávacích proudů. Tyto se přičítají k fázovým proudům a mohou vést k nepřijatelnému zahřátí generátorů. Nulový proud nesmí překročit 50% jmenovitého proudu. Při vyšších proudech je nutno přijmout vhodná opatření na omezení, kupříkladu tlumivku.

## 6.2 Jyoti Vysokonapěťový generátor

Kapitola 6.2 obsahuje pouze údaje o vysokonapěťových generátorech firmy Jyoti.

### 6.2.1 Profil firmy Jyoti

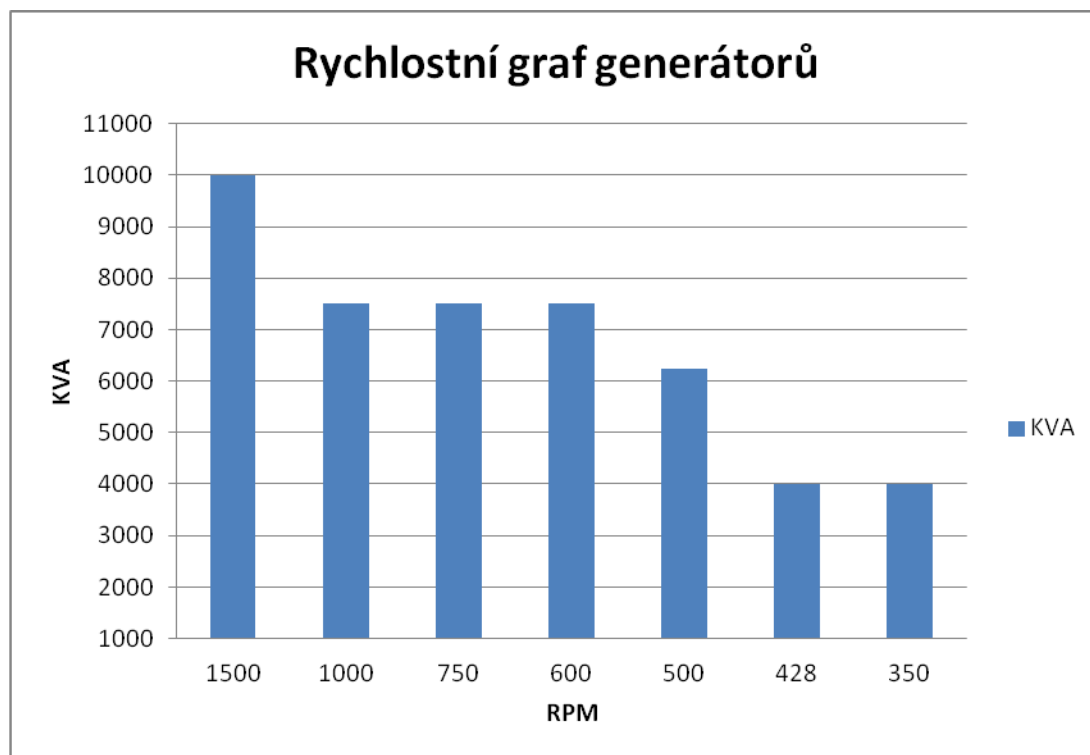
Jyoti je ve světě známa díky široké nabídce točivých elektrických strojů, které byly vyvíjeny a kterým byl poskytován excelentní servis více než 40 let. Jyoti je průkopníkem ve vývoji alternátorů (AC generátorů) pro dodávání elektrické energie. Tyto generátory jsou poháněny různými způsoby: dieslovými motory, parními turbínami a vodními turbínami. Variabilita generátorů se postupem času rozšiřovala, aby byly pokryty vyšší nároky a velikosti k uspokojení požadavků zákazníků.

Vysokonapěťové generátory Jyoti byly vyvinuty pro obstarávání ústrojí plnicích průmyslové energetické požadavky, hlavně díky nedostatku energie v Indii, která má energetické potřeby daleko přesahující tamní dodávky energie. Je také možné použít tyto generátory paralelně s rozvodnou sítí pro dodávání nadbytečné energie do sítě.

Zatímco byly tyto generátory vyvíjeny, Jyoti věnovalo maximální pozornost tomu, aby byly použity nejlepší možné materiály, kontrolované procesy a nejnovější techniky kontroly kvality. Výsledkem jsou vysoce spolehlivé generátory, navržené a vyrobené tak, aby vyhovovaly různorodým požadavkům zákazníků, především v Indii.

## Rozsah výstupů

Generátory jsou dostupné v různých napěťových rozsazích, rychlostech, konstrukcích a s různými kryty.



Graf 1 Rychlostní graf generátorů Jyoti ukazující závislost počtu otáček na výkonu [5]

### 6.2.2 Mechanický návrh generátorů Jyoti

#### Konstrukce

Generátory jsou normálně nabízeny v horizontální patkové konstrukci. Jsou obvykle vybaveny dvěma ložisky na koncích krytu pro malé výkony až do 1500 kVA a kluznými ložisky namontovanými na podstavci pro větší výkony. Ve speciálních případech může být poskytnuta konstrukce s jednoložiskovým provedením na NS konci a hřídel se spojovací přírubou na řídicím konci.

Normálně je generátor se dvěma ložiskovými stojany poskytován s volným prodloužením hřídele a vhodnou základovou deskou pro přimontování na povrch.



## Ložiska

Do 1500 kVA se používají valivá kuličková a válečková ložiska. Pro větší výkony Jyoti vyrobilo vlastní valivá a kluzná ložiska, která jsou připevněna na stojanech. Pro normální aplikace axiální ložiska se nepoužívají, ale pro správné seřízení se na každou stranu dávají axiální kroužky s distančními podložkami.

## Kostra generátoru

Kostra generátoru je silné, svařované ocelové konstrukce, která je schopná vystát namáhání za normálního provozu i extrémní namáhání v případě zkratů. Je toho docíleno díky používání CAD systémů. Rám potlačuje vibrace za chodu.

## Rotor

Rotory jsou vyniklé pólové konstrukce, buď s laminovanými pólovými svazky přišroubovanými k rotorové hvězdici, nebo nasazenými do rybin pro vysokorychlostní požadavky. V případě čtyřpólového generátoru jsou pólové nástavce z kované oceli našroubovány na hvězdici pro zatížení nad 1875 kVA.

## Chladicí systém

Za standardní teplotu okolního vzduchu užívaného pro chlazení je považováno 40 °C. Pro větší okolní teploty je uvažováno vhodné snížení výkonu. Normální nadmořská výška se pohybuje do 1000 m nad mořem. Pro vyšší nadmořské výšky je uvažováno vhodné snížení výkonu. Pro chlazení generátoru jsou namontovány buď jeden radiální, nebo dva radiálně axiální větráky na každou stranu rotoru. Jsou vhodně zvoleny příchozí a výchozí průchody. Pro dieselové generátory jsou poskytovány omyvatelné vstupní filtry.

### 6.2.3 Elektrický návrh generátorů Jyoti

Statorové svazky jsou vyrobeny ze střížených plechů, které jsou vyrobeny z nízko ztrátových a velice kvalitních plechů křemíkové oceli. Ty jsou izolovány na obou stranách izolačním lakem pro snížení ztrát. Pro skládání je použit speciální svazkový upínač, aby byly plechy poskládány co nejpřesněji.

Pro výrobu vysokonapěťových cívek jsou použity smaltované a laminátem izolované pravoúhlé měděné vodiče. Cívky jsou izolovány velice kvalitními epoxidovými slídovými páskami posílenými skelnou tkaninou. Všechny cívky jsou podrobeny zkouškám vysokého napětí, ztrát a výdrže přepětí podle norem VDE a IEC. Dále je přidána ochrana proti koróně.

Vinutý stator je impregnován lakem v podmínkách vakua, aby byly odstraněny všechny vzduchové mezery a aby se upevnilo vinutí ke svazkům.

Hlavní vinutí je vyrobeno z izolovaných pravoúhlých měděných vodičů pro malé jmenovité výkony a jedna vrstva holých měděných pásů s vhodnou epoxidovou izolací pro velké jmenovité výkony. Pólové cívky jsou zajištěny proti působení odstředivých sil způsobených rotací. Vinutí je napájeno střídavým budičem, uloženým na hřídeli, skrze rotující usměrňovač pro přeměnu AC na DC. Budicí síla je přiváděna na póly buzeného statoru pomocí automatického regulátoru napětí (AVR). Právě proto není mezi státorem a rotorem žádný kontakt (jedná se o bezkartáčový design). U velkých generátorů je vyvedeno 6 svorek, 3 na straně síťového napájení a 3 na neutrální straně.

## Paralelní chod

Generátory jsou uzpůsobeny pro paralelní spolupráci s dalšími generátory v elektrárně. Také mohou paralelně pracovat s rozvodnou sítí.

### 6.2.4 Automatický regulátor napětí (AVR) a budicí systém

Budicí síla je do AC budiče dodávána skrz elektronický AVR, aby bylo udrženo konstantní napětí na svorkách generátoru konstantní. AVR čerpá energii z transformátoru, který se nachází v panelu rozvaděče. Snímání napětí a proudu je obstaráváno transformátory proudu a napětí umístěnými na vhodných místech v panelech. AVR je normálně lokalizován v panelu pro AVR a buzení spolu s ostatními řídicími moduly, přepínači, měřicími zařízeními, kontrolními světly, atd. AVR a budicí systémy zajišťují rychlou reakci u náhlých změn zatížení, jako je rozběh motoru, atd.

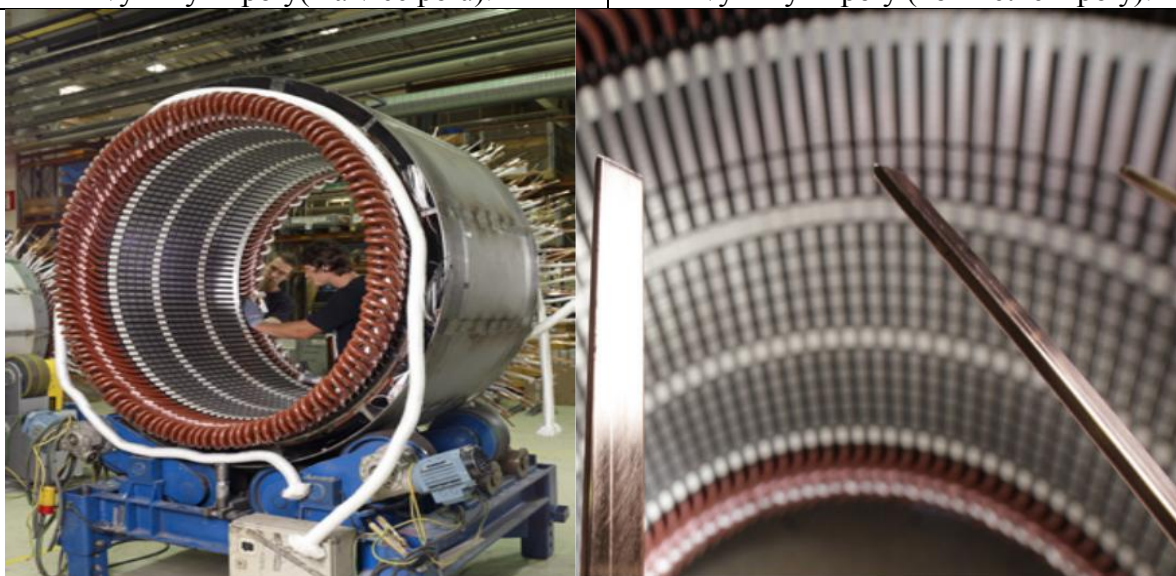
## 7 Závěr

Generátory s blokovým transformátorem se používají jako hlavní zdroje elektrické energie pro rozvodnou síť. Po generování napětí se napětí transformuje pomocí blokového transformátoru na vyšší hodnoty pro přenos vedením. Blokový transformátor je většinou chlazen olejem a může být umístěn i vně budovy. Jelikož jsou požadavky na blokový transformátor různé, liší se i cena. Ta záleží na velikosti transformátoru, jeho provedení a na výrobci. Mnou nalezené údaje naznačují, že se cena může pohybovat i v desítkách milionů korun.

Vysokonapěťové generátory se dají používat jako pomocné zdroje energie, pracující paralelně s generátory s blokovými transformátory. Jak bylo zmíněno v kapitole 6, používají se k dodávání potřebné energie při jejím nedostatku v síti. Tento problém se vyskytuje spíše v rozvojových zemích. Dále mohou být použity jako samostatný zdroj, a to třeba jako lodní generátor. Ten je poháněn parní turbínou.

Tab. 2

<b>Rozdíly generátoru s blokovým transformátorem a vysokonapěťovým generátorem</b>	
<b>Generátor s b. t.</b>	<b>Vysokonapěťový generátor</b>
Generátor má na výstupu vyšší hodnoty napětí.	Největší nalezená hodnota napětí na výstupu činí 11 kV.
Z názvu vyplývá, že se používá ve spojení s blokovým transformátorem.	Může se paralelně připojit ke generátoru, nebo k rozvodné síti.
Může mít hladký rotor (2 póly), nebo rotor s vyniklými póly (4 a více pólů).	Výše zmíněné projekty mají pouze rotor s vyniklými póly (konkrétně 4 póly).



Obr. 9 Statorové vinutí VN generátoru a Obr. 10 detail na konce statorového vinutí VN generátoru [17]

Tab. 3

<b>Vysokonapěťové generátory</b>	
<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Mohou být poháněny různými zdroji mechanické energie.	Pokud má spolupracovat s podobným zařízením, musí se přizpůsobit.
Možnost samostatné i paralelní práce. Bezkartáčová konstrukce.	Při připojení na síť je nutné generátor přizpůsobit síti, aby se nepoškodil, nebo nevznikla havárie.

## 8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] AUTOR NEZNÁMÝ. *Schéma Temelína* [online] [cit 31.5.2013]. Dostupné z: <http://www.fi.muni.cz/~tomp/envi/eseje/polacek/schema.gif>
- [2] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Elektrické stroje*. Plzeň, 2006. Dostupné z: <http://www.ulozto.cz/x97jLCd/vaclav-bartos-elektricke-stroje-rar>
- [3] AUTOR NEZNÁMÝ. *Princip transformátoru* [online] [cit 19.5.2013]. Dostupné z: [http://bastleni.skovstudio.cz/dokumentace/transformator\\_princip.jpg](http://bastleni.skovstudio.cz/dokumentace/transformator_princip.jpg)
- [4] AUTOR NEZNÁMÝ. *Princip činnosti transformátoru* [online]. [cit. 16.5.2013]. Dostupné z: [ovecka.tym.sk/Trafa/2,Princip%20trafa.doc](http://ovecka.tym.sk/Trafa/2,Princip%20trafa.doc)
- [5] DOČEKAL, Antonín a BOUČEK, Stanislav. *Elektrárny II PŘEDNÁŠKY*, Vydavatelství ČVUT, 1995. s. 132-134.
- [6] ONDRÁŠEK, Milan. *Elektrárny II*. první. SNTL - Nakladatelství technické literatury n. p., 1985.
- [7] AUTOR NEZNÁMÝ. *Blokový transformátor* [online]. [cit. 19.5.2013]. Dostupné z: [http://www.kolektor-etra.si/uploads/podobe/IMG\\_6741.JPG](http://www.kolektor-etra.si/uploads/podobe/IMG_6741.JPG)
- [8] KOČMAN, Stanislav a VRÁNA, Václav. *Synchronní stroje* [online]. Poslední změna 12.4.2013 [Cit. 12.4.2013]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab\\_synchronni\\_stroje\\_bc.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf)
- [9] AUTOR NEZNÁMÝ. *Synchronní stroje* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>
- [10] AUTOR NEZNÁMÝ. *Elektrické stroje* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupné z: [http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=1&ee\\_chapter=5.2.3](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=5.2.3)
- [11] AUTOR NEZNÁMÝ. *Generátory* [online]. [cit 3.6.2013]. Dostupné z: <http://stardas.hostujem.sk/skola/III.ro%EDk/Gener%Eltory.pdf>
- [12] TRNKA, Pavel. *Výrobní a technologické procesy PŘEDNÁŠKY*, Západočeská univerzita 2012.
- [13] AUTOR NEZNÁMÝ. *Synchronní alternátory* [online]. [cit. 31.5.2013]. Dostupné z: <http://maturitanazamku.kvalitne.cz/pdf/ELN16A.pdf>
- [14] AUTOR NEZNÁMÝ. *Fázování synchronního generátoru k síti* [online] [cit 31.5.2013]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/se/cast\\_B\\_el\\_stroje/se\\_es\\_c2\\_fazovani.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/se/cast_B_el_stroje/se_es_c2_fazovani.pdf)
- [15] SIEMENS, *Prospekt Synchronní stroje 1FC4* [online]. [cit. 20.4.2013]. Dostupné z: [http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/technika\\_pohonu/generatory/synchronni\\_generator/1fc4/opi\\_syn\\_gen\\_1fc4\\_2005\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/technika_pohonu/generatory/synchronni_generator/1fc4/opi_syn_gen_1fc4_2005_cz.pdf)
- [16] JYOTI Ltd. *'Jyoti' High Voltage Synchronous Generators* [online] [cit 26.3.2013]. Dostupné z: <http://www.indiamart.com/komal-enterprises/high-voltage-synchronous-generators.html>
- [17] ABB Ltd. *High voltage generators for diesel and gas engines Stator and windings* [online] [cit 3.6.2013]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/d60aa87ea7b6d8dcc12579910023e913/\\$file/technical%20note\\_%20hv%20gen\\_%20stator%20and%20windings\\_lowres.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/d60aa87ea7b6d8dcc12579910023e913/$file/technical%20note_%20hv%20gen_%20stator%20and%20windings_lowres.pdf)