

# Vysokootáčkový elektrický generátor HFG 125T

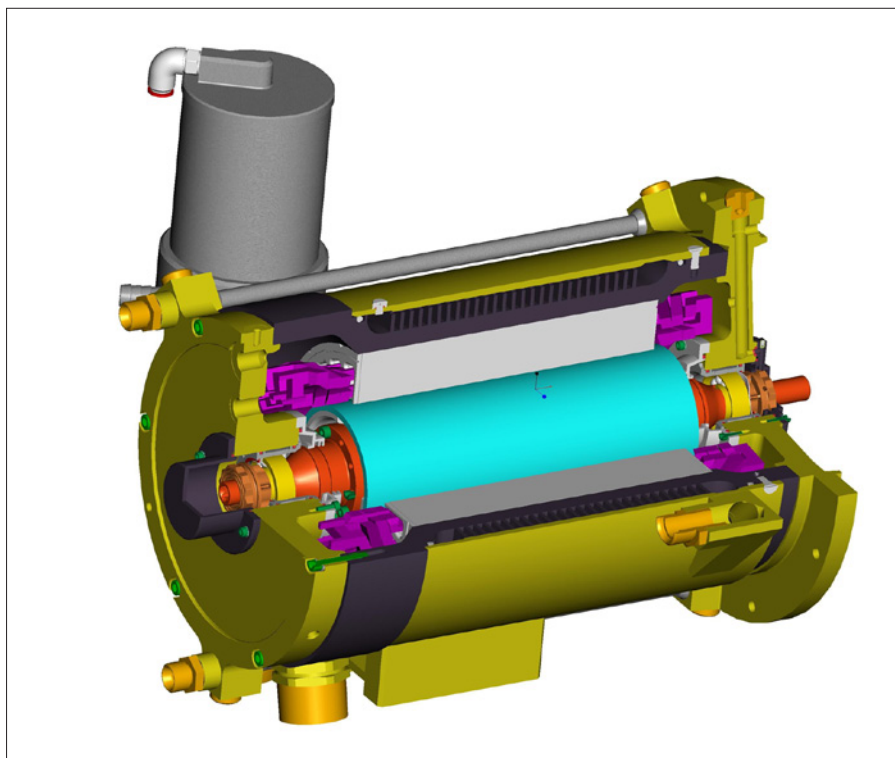
Ing. Libor Neklapil, Ing. Roman Kolka,  
PBS Velká Bíteš, a. s.

## Úvod

Rostoucí ceny energií nejenom vedou k hledání dalších zdrojů, ale umožňují také vznik zařízení, jejichž provoz byl dříve z ekonomického hlediska neefektivní. Proto mají značný potenciál malé lokální zdroje elektric-

ter zdroje tepelné energie a způsob regulace mikroturbín často nemožné. Rovněž rozměry a hmotnost „třítisícového“ generátoru budou několikanásobně převyšovat parametry samotné mikroturbíny. Standardním technickým řešením je proto přímé spojení rotoru mikroturbíny s vysokootáčkovým elektric-

užito osvědčené know-how, které firma využívá při výrobě leteckých pomocných energetických jednotek (APU – *Auxiliary Power Unit*). Výkonová hladina mikroturbín 100 kW byla zvolena s ohledem na konkurenci a požadavky zákazníků. K této vysokootáčkové pohonné jednotce nebylo možné získat sériově vyráběný a cenově dostupný elektrický generátor. Proto byl v PBS Velká Bíteš zahájen jeho vlastní vývoj, jehož výsledkem je vysokootáčkový elektrický generátor HFG 125T (základní parametry viz tabulka). Jde o synchronní generátor buzený permanentními magnety. Uvedený elektrický generátor byl vyvíjen za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR v rámci programu IMPULS.



Obr. 1. Generátor HFG 125T

ké energie využívající biomasu nebo odpadní teplo z technologických procesů. Tyto zdroje mohou v malých a středních provozech zlepšit celkovou bilanci spotřeby elektrické energie, popř. mohou pracovat zcela na komerční bázi. Jde o malé kogenerační jednotky postavené na bázi mikroturbín. Vstupním médiem je zde ohřátý stlačený vzduch, výstupem elektrická energie. Mezi hlavní výhody patří malé rozměry, vysoká úroveň spolehlivosti a malé požadavky na údržbu. Charakteristickým znakem mikroturbín jsou velké provozní otáčky, které v závislosti na výkonu mikroturbíny dosahují hodnot od 30 000 do 100 000  $\text{min}^{-1}$ .

Standardní elektrický generátor s pracovními otáčkami 1 500 nebo 3 000  $\text{min}^{-1}$  je pro takovou aplikaci v podstatě nepoužitelný. Jednak je nutné použít reduktor a jednak je třeba provozovat mikroturbínu na konstantních otáčkách, což je s ohledem na charak-

kým generátorem, který je zapojen do měniče frekvence zajišťujícího výstupní síťové napětí  $3 \times 400 \text{ V}/50 \text{ Hz}$ .

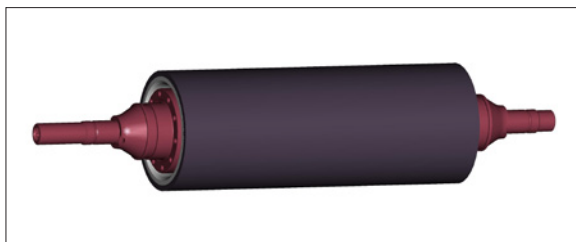
První brněnská strojírna (PBS) Velká Bíteš, a. s., dlouhodobě vyvíjí a vyrábí vysokootáčkové lopatkové stroje. Rozšíření výrobního sortimentu o mikroturbíny pro energetiku bylo odpovědí na požadavky trhu. Při vypracovávání návrhu mikroturbín bylo vy-

## Návrh generátoru

Pro předběžný návrh generátoru se používají iterační metody, kdy se ve výpočtu magnetického obvodu kombinují různé druhy materiálů magnetů, tvar magnetů, průměr a délka rotoru a variantní provedení statoru. Úvodní etapa návrhu generátoru představuje výběr topologie rotoru. V tomto případě bylo posouzeno několik variant tvaru magnetů a jejich způsobu uchycení na rotor. Jako nejvhodnější byla zvolena varianta s tvarovanými segmenty magnetů, jejichž vnější tvar odpovídal průměru rotoru. Tato konfigurace dává velký magnetický výkon, má malou hodnotu celkového harmonického zkreslení (THD – *Total Harmonic Distortion*) a průběhu vlny zpětné elektromotorické síly (EMF – *Electro Motive Force*). Tvar segmentových magnetů je rovněž příznivý z hlediska silového působení magnetů na rotorovou bandáž; ta je jedním z klíčových prvků celého generátoru.

Další optimalizační úlohu představoval výběr vhodného materiálu magnetů. Z vysokoenergetických materiálů je možné použít samarium-kobalt (SmCo) a neodým-železobor (NdFeB). Magnety SmCo mají sice mnohem větší teplotní stabilitu než NdFeB, ale s ohledem na odolnost ostatních použitých materiálů byla zvolena alternativa magnetů NdFeB, které umožňují dosáhnout většího výkonu.

Omezující rozměr při navrhování vysokootáčkového generátoru představuje průměr rotoru. Ten při zadaných otáčkách turbíny musí respektovat pevnost rotorové bandáže, která zachycuje odstředivé



Obr. 2. Rotor generátoru HFG 125T

síly permanentních magnetů. Vlastní rotorová bandáž je klíčovým prvkem vysokootáčkového generátoru. Musí mít dostatečnou pevnost a zároveň co nejmenší výšku, aby byla minimalizována vzduchová mezera mezi magnety a statorovým svazkem. Generátor HFG 125T je vysokofrekvenční elektrický stroj a tloušťka bandáže má zásadní vliv na složku ztrát, které vznikají vířivými proudy. Materiál bandáže musí být rovněž nemagnetický. Je třeba, aby bandáž měla určitou geometrickou přesnost a tuhost pro zamezení radiálního posuvu magnetů za provozu v rámci pružné deformace materiálu bandáže. Z předběžných výpočtů bylo zřejmé, že tyto požadavky mohou splnit pouze kompozitní materiály. PBS Velká Bíteš neměla s kompozity žádné zkušenosti, a proto navázala spolupráci se specializovanou firmou. Po uskutečnění upřesňujících výpočtů byla navržena rotorová bandáž z uhlíkových vláken s pevností min. 3 800 MPa. Na zkušebním zařízení, které bylo k tomuto účelu navrženo, se na segmentu rotoru (jedna šestina skutečné délky rotoru) ověřovala pevnost vzorků bandáže za zvýšených teplot (150 °C) až do 90 000 min<sup>-1</sup>. Při těchto testech nikdy nedošlo k destrukci bandáže, pouze u některých druhů návinu se vyskytovalo odmotání vláken způsobené přerušením vláken při obrábění vnějšího tvaru bandáže. Dodavatel bandáže optimalizoval technologii návinu způsobem zaručujícím geometrickou přesnost bez nutnosti dalšího obrábění. Vlastní technologie výroby bandáže představuje špičkové know-how v oboru. Obvodová rychlost rotoru je 223 m·s<sup>-1</sup>. Výška bandáže je pouhých 3,6 mm, přičemž jenom odstředivá síla magnetů dosahuje hodnoty 162 tun. Malá výška bandáže souvisí i s chlazením rotoru. Teplotu v rotoru zvyšují dva hlavní faktory – tření vzduchu a ztráty vířivými proudy. Vzhledem k tomu, že bandáž z uhlíkových vláken funguje jako tepelný izolant, je rotor citlivější na vliv vířivých proudů než rotory konvenčních strojů. Zajistit účinné chlazení rotoru je proto velmi obtížné. Teplo z jádra rotoru lze odvést v podstatě pouze chlazením volných konců hřídele a ložiskových uzlů.

### Uložení rotoru

Při vlastním konstrukčním řešení vysokootáčkového stroje se vyskytují problémy, se kterými se u běžných strojů nelze setkat. Důležitou roli hraje dynamika celé soustavy rotoru generátoru připojeného spojkou k rotoru turbomotoru. Správný návrh vyžaduje důkladnou analýzu dynamického chování celé soustavy, tj. posouzení kritických otá-

ček ve vazbě na vlastní frekvence. Jde o návrh tzv. pružného rotoru, který je provozován v nadkritické oblasti otáček. Velká přesnost výroby všech rotačních dílů, dokonalé vyvážení a montáž jsou základní předpoklady za-

Vhodným řešením tlumení se odstraní vliv provozních vibrací nejenom na samotná ložiska, ale i na vlastní rotor s bandáží a magnety.

Vysokootáčkové rotory nelze ukládat na tuhé ložiskové podpory, jaké se používají



Obr. 4. Generátor HFG 125T

jištění podmínek potřebných pro spolehlivou funkci ložisek.

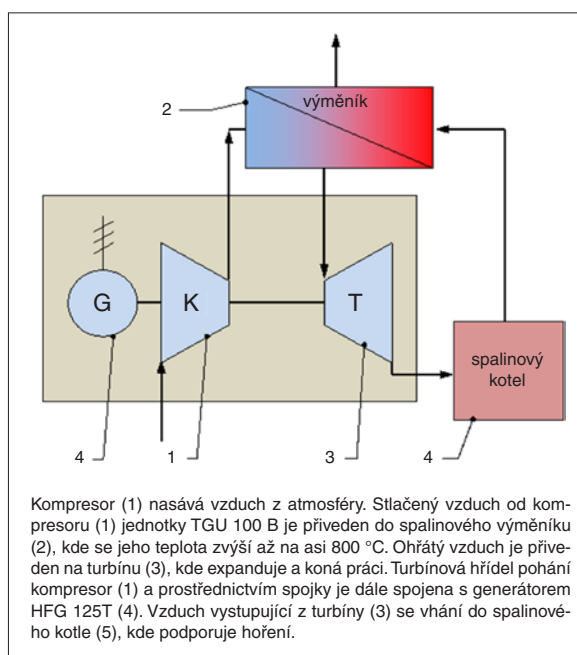
Pro omezení přetížení ložisek a rotoru při přechodu kritických otáček bylo navrženo a ověřeno několik typů pružných a tlumících ložiskových podpor.

u běžných točivých elektrických strojů. Vysokootáčkový rotor většinou není možné pokládat za tuhé těleso, což přináší komplikace při navrhování uložení rotoru a při jeho vyvažování.

Za pružný je považován rotor, jehož kritické otáčky jsou menší než otáčky provozní. Pružný rotor vyžaduje vyvažování při provozních otáčkách stroje. V případě skládaného rotoru, složeného z hřídele, permanentních magnetů a bandáže, vzniká při běžném způsobu výroby velká nevyváženost rotoru, kterou je nutné správně kompenzovat. Avšak ani provozním vyvažováním nelze zabránit změně nevyváženosti za provozu vlivem odstředivých sil a teplotních deformací.

Ložiskové podpory u vysokootáčkového stroje tak plní několik funkcí a musí zaručit spolehlivý provoz při přejezdu kritických otáček rotoru i při zvýšené nevyváženosti. Tohoto se dosahuje laděním ložiskových podpor. Vhodnou kombinací tuhosti a tlumení ložiskových podpor lze zaručit široký rozsah provozních otáček pružného rotoru.

Je-li poddajnost ložiskových podpor značně větší než ohybová poddajnost rotoru, rotor krouží při svých prvních dvou kritických otáčkách jako tuhé těleso. Tyto kritické otáčky lze vhodným naladěním umístit pod volnoběžné otáčky stroje a jejich přejezd je možné účinně tlumit použitím hydrodynamických tlumičů v místech podpor rotoru.



Kompresor (1) nasává vzduch z atmosféry. Stlačený vzduch od kompresoru (1) jednotky TGU 100 B je přiveden do spalinového výměníku (2), kde se jeho teplota zvýší až na asi 800 °C. Ohřátý vzduch je přiveden na turbínu (3), kde expanduje a koná práci. Turbinová hřídel pohání kompresor (1) a prostřednictvím spojky je dále spojena s generátorem HFG 125T (4). Vzduch vystupující z turbíny (3) se vhání do spalinového kotle (5), kde podporuje hoření.

Obr. 3. Schéma nepřímého ohřevu



Obr. 5.  
Použití TGU  
100 B

Při vypracování návrhu elektrického generátoru bylo doporučeno a vyzkoušeno několik různých typů pružného uložení rotoru. Prvním zkoušeným typem pružné podpory byl tzv. nosníčkový typ pružného pouzdra s možností hydraulického tlumení. Tato konstrukce se používá k uložení leteckých turbínových motorů. Změnou rozměrů nosníků bylo možné měnit tuhost ložiskových podpor a nalézt optimální hodnoty tuhosti a tlumení. Avšak tato konstrukce byla pro svou složitost nevhodná pro sériovou produkci. Proto byly nově navrženy ložiskové podpory, které jsou výrobně jednodušší a kompaktnější. Optimalizací jejich geometrie a použitím pryžových kroužků se podařilo vhodně naladit jejich tuhost a tlumení.

Rotor generátoru je uložen pomocí dvojice velmi přesných bezklecových hybridních ložisek s kosouhlým stykem. Pečlivým návrhem bylo dosaženo optimálních provozních podmínek ložisek, a tím byl vytvořen předpoklad pro jejich velkou spolehlivost a dlouhou životnost. Co se týče mazání ložisek, byla zvolena osvědčená řešení využívaná u leteckých motorů. Vlastní ložiskový prostor byl utěsněn labyrintovými ucpávkami, které jsou pro jejich správné fungování zahlcovány vzduchem přiváděným od kompresoru mikroturbíny. Olejový systém zajišťuje kromě mazání ložisek rovněž odvod ztrátového tepla z rotoru. Ložiskový prostor je odvětráván přes odlučovač oleje, který tvoří nedílnou součást generátoru.

### Konstrukce statoru

Důležitým hlediskem při navrhování statoru je volba pólů. S ohledem na rostoucí ztráty, které souvisejí s vysokými frekvencemi, byl zvolen čtyřpólový stator, přestože stroj se dvěma póly by měl poloviční hodnotu frekvence. Důvodem bylo snížení reakčního vlivu kotvy na permanentní magnety, kdy magnety mohou mít ve srovnání s dvoupólovým statorem menší výšku, a tím men-

ší hmotnost, což snižuje požadavky na roto-rovou bandáž. Čtyřpólová koncepce statoru rovněž přispívá ke kratšímu „převisu“ vinutí na konci statorového svazku, což umožňuje generátor celkově zkrátit. Vlastní statorové plechy jsou s ohledem na minimalizaci ztrát vířivými proudy vyrobeny ze speciálních plechů o tloušťce 0,2 mm. Pracovní vinutí je tří-fázové, zapojené do dvojité hvězdy. Počátky

### Základní parametry generátoru HFG 125 T

Parametr	Hodnota
jmenovitý výkon	100 kV-A
jmenovité napětí	3× 440 V
jmenovitá frekvence	1 867 Hz
jmenovité otáčky	56 000 min <sup>-1</sup>
účinnost	0,96
chlazení	kapalinové
hmotnost	35 kg

vinutí jsou spojeny do dvou galvanicky oddělených samostatných uzlů. Uvnitř statoru jsou na vývody vinutí připojeny propojovací vodiče v délce 5 m, které ze statoru vystupují přes průchodky. Vinutí je navrženo pro zapojení do dvojitého třífázového usměrňovače. Přestože výkonový měnič se používá ke změně napětí i frekvence na parametry sítě, bylo důležité navrhnout generátor tak, aby splňoval povolené rozmezí výstupního napětí. Jde o omezení dané konstrukcí použitého výkonového měniče. Velikost indukovaného napětí je dána velikostí magnetického toku odpovídajícího počtu závitů a otáčkám. Magnetický tok je určen přímo permanentními magnety, a to jejich vlastnostmi a uspořádáním. Vysokotáčkové stroje mají velmi malý počet závitů (obvykle dva až čtyři), z čehož vyplývá velmi malý činný odpor vinutí a velmi malá indukčnost. S rostoucím zatížením generátoru roste i úbytek napětí. Ten je způsoben průchodem proudu činným odporem vinutí, rozptylovou reaktancí a ponejvíce reaktancí reakce

kotvy. Velikost výstupního napětí dále kolísá s ohledem na chlazení a teplotu generátoru. S rostoucí teplotou permanentních magnetů klesá jejich remanentní indukce i koerzivní síla. Elektrický generátor musí být přizpůsoben použitému výkonovému měničovi a naopak. Bylo velmi obtížné najít vhodné pracovní rozmezí pro turbínový motor, elektrický generátor a výkonový měnič.

### Chlazení

Vzhledem k malému objemu generátoru bylo nutné zajistit spolehlivé odvedení ztrátového výkonu v podobě tepla. Největší podíl ztrát mají elektromagnetické ztráty ve statoru (70 až 75 %), ztráty rotoru třením o vzduch (15 až 20 %) a ztráty v ložiskách (10 %). Ztrátové teplo ze statoru a část tepla vzniklého třením o vzduch se odvádějí vnějším pláštěm chlazeným kapalinou, do kterého je nalísován statorový paket. Chladič byl navržen a podroben analýze CFD v programu Fluent a termální analýze v programu Pro/Mechanica. U vysokotáčkového generátoru je velmi důležité, aby chladič odváděl teplo rovnoměrně, tj. aby na plášti nikde nevznikala teplejší a chladnější místa. Teplotní nerovnoměrnost pláště generátoru by v důsledku teplotní roztažnosti způsobila deformaci pláště generátoru. Ztrátové teplo z ložisek a rotoru se odvádí prostřednictvím mazacího oleje a zahlcovacího vzduchu labyrintových ucpávek.

### Ochranné funkce

Pro zajištění spolehlivého provozu generátoru jsou ve statorovém vinutí a u ložisek instalovány snímače teploty. Tyto snímače jsou vyvedeny do konektoru na plášti generátoru. Řídicí systém mikroturbíny sleduje kromě teplot v generátoru ještě teplotu a minimální průtok chladičí vody. Překročí-li kterákoliv sledovaná hodnota stanovenou mez, řídicí systém indikuje danou poruchu a jednotku odstaví.

### Použití

Generátor HFG 125 T je součástí mikroturbínové jednotky TGU 100 B, která je vyráběna v PBS Velká Bíteš. Jednotka TGU 100 B představuje zařízení, které pracuje na principu tzv. nepřímého ohřevu, při němž spaliny neprocházejí turbínou, ale přes výměník ohřívají pracovní médium. Funkce jednotky je znázorněna na obr. 3.

U dosavadních instalací jednotky TGU 100 B je nejčastěji používaným palivem dřevní štěpka nebo různé formy dřevního odpadu. Jednotku je možné rovněž použít ve všech provezech, kde se vyskytuje dostatečné množství odpadního tepla, které zajistí ohřev pracovního média – vzduchu alespoň na 750 °C při množství 1,15 kg/s. V úvalu přicházejí teplárny, popř. chemické nebo metalurgické provozy.

[www.pbsvb.cz](http://www.pbsvb.cz)