



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Výkonová část statické budící soupravy pro generátor 57 MW

Power Part of the Static Exciter for 57MW Generator

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.

Vypracoval: Martin Mizner

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Martin Mizner**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Výkonová část statické budicí soupravy pro generátor 57 MW**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši typů synchronních generátorů do výkonu 100 MW
2. Provedte rešerši budicích soustav stávajících generátorů
3. Navrhněte budicí soustavu pro generátor 57 MW

Seznam odborné literatury:

- [1] Voženílek Petr, Novotný Vladimír, Mindl Pavel, Elektromechanické měniče, Česká republika – nakladatelství ČVUT 2011, ISBN 978-80-01-04875-7
- [2] Kolektiv autorů, Místní provozní předpis pro generátor TG 3, ETI, 2009

Vedoucí: prof. Ing. Jiří Pavelka, DrSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

prof. Ing. Jiří Lettl, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 3. 12. 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW apod.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 21. 5. 2014

.....

Martin Mizner

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Prof. Ing. Jiřímu Pavelkovi, DrSc. za cenné rady a připomínky při jejím zpracování.

Dále bych touto cestou rád poděkoval i mojí ženě za podporu po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá synchronními generátory do 100 MW a jejich budícími soupravami. První část se zabývá popisem synchronních generátorů, jejich konstrukcí a příklady použití. Druhá část je zaměřena na popis budících souprav, jejich rozdělení a typů. Ve třetí části je popsán konkrétní generátor 57 MW, jeho konstrukce a parametry. V poslední části je nejprve teoreticky, následně i konkrétně proveden návrh výkonové části budící soupravy.

Klíčová slova:

Buzení, budící soustava, synchronní generátor, řízený usměrňovač, oteplení, napětové dimenzování, proudové dimenzování

Abstract

This bachelor's thesis deals with synchronous generators up to 100 MW and exciters. The first part deals with the description of synchronous generators, construction and examples of their use. The second part focuses on the description of excitation systems, their classification and types. In the third part describes specific generator 57 MW, its construction and parameters. In the final part is the first theoretically, then was made a proposal specifically the power of the excitation system.

Keywords:

Excitation, excitation system, synchronous generator, controlled rectifiers, heating, voltage dimensioning, dimensioning current

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých zkratk a symbolů	7
1. Úvod	8
2. Synchronní generátory	8
2.1. Generátory s hladkým rotorem	9
2.2. Generátory s vyniklými póly	10
2.3. Generátory do 100 MW v ČR	12
3. Budicí soustavy	18
3.1. Nezávislá budicí soustava	18
3.2. Závislá budicí soustava	19
3.3. Budicí soupravy v ČR	21
4. Popis řešeného generátoru 57 MW	25
4.1. Stator generátoru	25
4.2. Rotor generátoru	28
4.3. Chlazení generátoru	29
4.4. Základní technická data generátoru	29
5. Návrh výkonové části budicí soustavy.....	30
5.1. Napěťové dimenzování součástek	30
5.2. Proudové dimenzování součástek	31
5.3. Návrh výkonových součástek budicí soustavy	32
5.4. Kontrola použitých součástek stávající budicí soustavy	35
6. Závěr	36
Seznam použité literatury	37
Seznam příloh	38
Přílohy	39

Seznam použitých zkratek a symbolů

R_{th}	$K.W^{-1}$	Tepelný odpor
R_{thjc}	$K.W^{-1}$	Tepelný odpor čip – základna
R_{thcr}, R_{thCH}	$K.W^{-1}$	Tepelný odpor základna – chladič
R_{thra}, R_{thHA}	$K.W^{-1}$	Tepelný odpor chladič - okolí
u_F, i_F	V, A	Okamžité hodnoty v propustném stavu
$P_{F(AV)}$	W	Střední hodnota ztrátového výkonu propustným proudem
$T_{c(AV)}$	°C	Střední hodnota teploty základny
T_a	°C	Teplota okolí
T_j	°C	Teplota přechodu
U_{TO}	V	Prahové napětí
U_{RWM}	V	Maximální pracovní napětí v závěrném směru
U_{DWM}	V	Maximální pracovní napětí v blokovacím směru
U_{RRM}	V	Opakovatelné špičkové závěrné napětí součástky
U_{DRM}	V	Opakovatelné špičkové blokovací napětí tyristoru
U_N	V	Jmenovité napětí
U_d, I_d	V, A	Výstupní napětí, výstupní proud
k_U	-	Koeficient bezpečnosti
k_K	-	Koeficient komutačního přepětí
k_{SP}	-	Koeficient náhodných přepětí
k_S	-	Koeficient nerovnoměrného dělení napětí mezi součástky
MTP	Měřicí transformátor proudu	
MTN	Měřicí transformátor napětí	
SBS	Statická budicí soustava	

1. Úvod

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši generátorů do 100 MW, dále pak rešerši budících souprav stávajících generátorů a navrhnout výkonovou část statické budící soupravy stávajícího turbogenerátoru 57 MW. V první části se věnuji obecnému popisu synchronních strojů a především generátorů, jejich rozdělení podle konstrukce a typického použití, v závěru první části jsem provedl rešerši generátorů v ČR a jejich výrobců. V druhé části jsem popsal rozdělení budících systémů a jejich výhody a nevýhody, v závěru druhé části pak rešerši budících systémů a jejich výrobců. V třetí části se pak věnuji popisu stávajícího turbogenerátoru TG 3 v Elektrárně Tisová, jeho konstrukci a technickým parametrům. V závěrečné části popisují postup při napěťovém a proudovém dimenzování součástek výkonové části budícího systému a konkrétní výpočty, volbou výkonových součástek a porovnáním se současným budícím systémem.

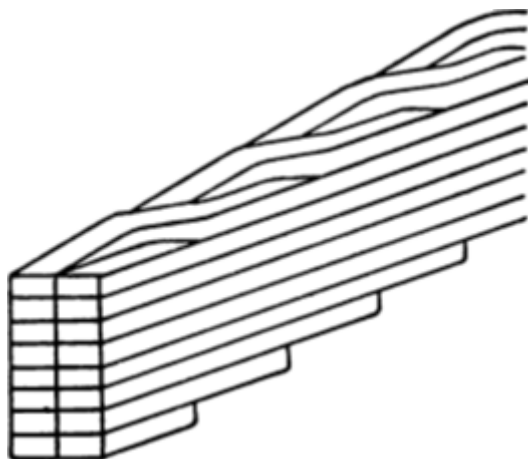
2. Synchronní stroje

Synchronní stroje jsou dosud považovány za nejdůležitější elektrický stroj pro výrobu elektrické energie. Tyto synchronní generátory nazývané také alternátory jsou nejčastěji trojfázové. Alternátory, které jsou v elektrárnách poháněny parními, méně již plynovými turbínami při rychlosti otáčení 3000 min^{-1} pro 50 Hz, nebo 3600 ot.min^{-1} pro 60 Hz, a nazývají se turboalternátory. Jsou-li poháněny vodními turbínami při rychlosti obvykle podstatně nižší, nazývají se hydroalternátory. Později se synchronní stroje začaly používat také jako motory pro pohony velkých čerpadel, ventilátorů a kompresorů (v průmyslových zařízeních, které nevyžadují časté spouštění a pracují s konstantní rychlostí a s málo proměnným zatížením).

Každý synchronní stroj se otáčí vždy synchronními otáčkami, jak už vyplývá z jejich názvu. Jako většina točivých elektrických strojů mají dvě hlavní části - stator a rotor.

Stator synchronních strojů je v podstatě shodný jako u asynchronních strojů. Tvoří jej plechy, které jsou navzájem od sebe odizolovány, a z drážek, ve kterých je uloženo třífázové vinutí obvykle spojené do hvězdy. U vinutí strojů s vysokým výkonem, kde tečou statorem velké proudy a vodič má velký průřez, může dojít ke vzniku vířivých proudů a k efektům vytlačujícím proud k okraji vodičů. To má za následek vznik přídavných Joulových ztrát.

Zabraňuje se tomu rozdělením průřezu na jednotlivé izolované vodiče, které se postupně střídají tak, aby i několikrát prošly od horní stany průřezu ke spodní straně a zpět. Toto uspořádání se nazývá Roeblova tyč.



Obr. 2.1 Detail Roeblovy tyče (převzato z [5])

Vzduchová mezera je u synchronních strojů daleko větší než u asynchronního motoru. Protože jalový výkon mohou synchronní stroje do sítě i dodávat, není velikost vzduchové mezery tímto faktorem ovlivněna. Rotor synchronního stroje většinou není složen z plechů, protože při běhu stroje sleduje točivé magnetické pole statoru a nevznikají v něm tak ztráty v železe. Bývá tedy zhotoven z ocelového výkovku.

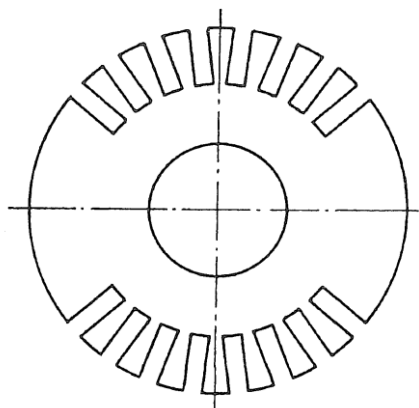
Zdroji budicího proudu může být stejnosměrné dynamo s paralelním buzením, dnes se nejčastěji používají tyristorové, pro menší výkony tranzistorové usměrňovače. Budící proud do budicího vinutí se přivádí přes kartáče a kroužky nebo v některých případech se používá buzení bezkartáčové.

Podle provedení rotoru můžeme synchronní stroje rozdělit na stroje s vyniklými póly a stroje s hladkým rotorem.

2.1. Stroje s hladkým rotorem

Stroje s hladkým rotorem (a tedy s nevystouplými póly) se nazývají turbostroje (turboalternátory). Turbostroje (turboalternátory) jsou většinou poháněny parní nebo plynovou turbínou. Tyto stroje mají v převážné většině jednu nebo ve výjimečných případech dvě pólové dvojice a při frekvenci 50 Hz se tedy otáčí synchronní rychlostí 3000 ot.min^{-1} , při frekvenci 60 Hz pak rychlostí 3600 ot.min^{-1} .

Rotor těchto strojů se vyznačuje malým průměrem a větší délkou. Asi po dvou třetinách obvodu rotoru jsou umístěny vyfrézované drážky, ve kterých je uloženo budicí vinutí. Toto vinutí rotoru je jištěno proti odstředivým silám pomocí klínů, které se vyrábějí z nemagnetické oceli nebo nemagnetických slitin. Čela budicího vinutí jsou spojena obručí, která je také vyrobena z nemagnetické oceli. Po zbytku obvodu rotoru drážky nejsou a uzavírá se tedy hlavní magnetický tok.



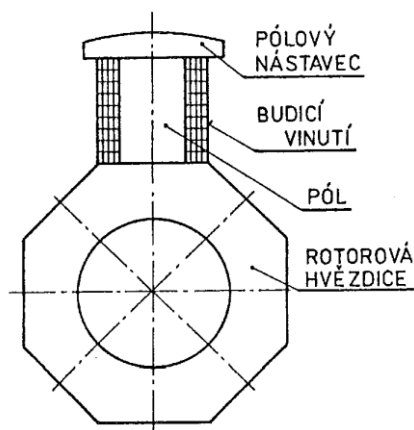
Obr. 2.2 Řez rotorem turbogenerátoru (převzato z [1])

Tlumičí vinutí je tvořeno kovovými klíny umístěnými v rotorových drážkách. Vinutí zabraňuje nepříznivému kývání rotoru a zlepšuje dynamickou stabilitu stroje.

2.2. Stroje s vyniklými póly

Stroje s vyniklými póly se také nazývají hydrostroje. Jsou konstruovány buď jako horizontální nebo jako vertikální. Tyto stroje jsou poháněny většinou vodní turbínou a jsou to stroje pomaloběžné, mají tedy velký počet pólů.

Horizontální konstrukce stroje se využívá např. u synchronních motorů nebo u alternátorů ve vodních elektrárnách s vysokým spádem. Vertikální stroje se používají ve vodních elektrárnách s nízkým spádem.



Obr. 2.2.1 Řez rotorem s vyniklými póly (převzato z [1])

Rotor s vyniklými póly se používá pro pomaloběžné stroje, musí tedy mít velký počet pólů (více jak čtyři). Rotor těchto strojů je krátký a má velký průměr. Hřídel je vykovaná vcelku s ložiskovými čepy a uprostřed má tvar čtyřbokého nebo šestibokého hranolu, na kterém jsou nasazeny póly. Dále se na hřídel nasazuje kované nebo lité jho rotoru buď přímo, nebo u větších průměrů rotoru pomocí rotorové hvězdice. Na jho se připevňují vyniklé póly zhotovené z masivní ocelové litiny nebo mohou u strojů s více póly být poskládané z plechů. Na pólech je nasazeno budicí vinutí. Vinutí se spojuje do série a je vytvořeno z měděného pásu ohýbaného na výšku. Jednotlivé vrstvy vinutí jsou ještě prokládány izolací. Přívod budicího proudu se zajišťuje buď přes kroužky, na které doléhají kartáče, nebo se používá budiče rotačního.

Jestliže synchronní generátor napájí energetickou síť společně s více generátory, je jeho výkon zanedbatelný oproti výkonům těchto ostatních generátorů. Musí se tedy svými provozními parametry přizpůsobit provozním parametrům sítě.

Aby nedocházelo při připojování generátoru na síť k vysokým proudovým nárazům, používá se proces fázování. Při fázování musíme dodržet tyto podmínky:

- 1) Stejný sled fází generátoru a sítě
- 2) Velikost napětí generátoru musí být stejná jako velikost napětí sítě
- 3) Frekvence generátoru se musí shodovat s frekvencí sítě
- 4) Stejný fázový posuv napětí generátoru a sítě

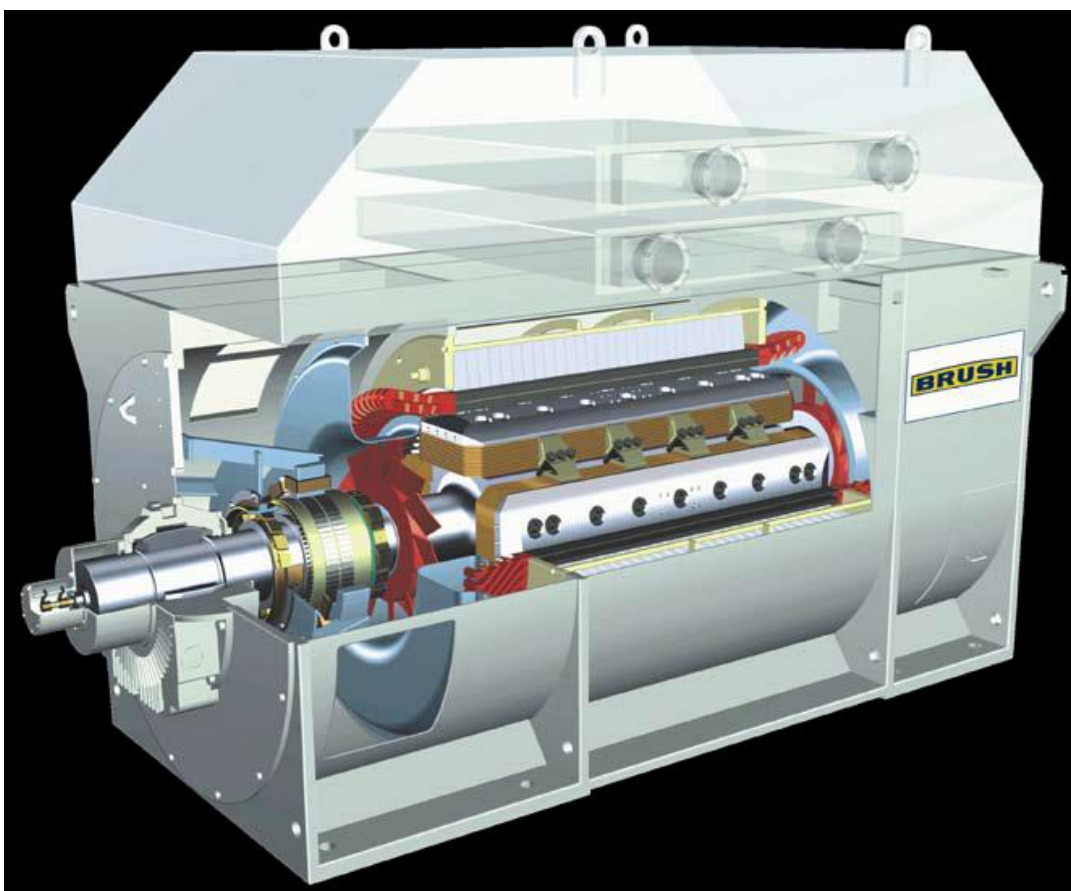
2.3. Generátory do 100 MW v ČR

Turbogenerátory dříve dodávaly firma Škoda nebo ČKD. Byly to generátory chlazené vzduchem do výkonu cca 70 MW, dále se používalo chlazení vodíkem u generátorů o výkonech vyšších.

V dnešní době se turbogenerátory vyrábějí ve firmách BRUSH SEM s.r.o., která převzala výrobu generátorů po firmě Škoda Plzeň, dále firma Siemens Electric Machines s.r.o., která převzala výrobu po MEZ Drásov vyrábějící generátory v několika výkonových řadách od výkonu řádu kVA až do výkonu řádu MVA. Z dalších výrobců bych zmínil i firmu EX-MONT ELEKTRO a.s. Brno, která vyrábí generátory vícepólové od výkonu řádu stovek kVA až do výkonu řádu MVA.

Firma BRUSH SEM vyrábí generátory v několika konstrukčních a výkonových řadách.

Řada DG se vyznačuje čtyřpólovým uspořádáním rotoru, generátor je vzduchem chlazený. Vyrábí se od výkonu 10 MVA až do výkonu 65 MVA, napětí statoru je pak až 15 kV při 1500 ot.min⁻¹ pro frekvenci sítě 50 Hz, resp. 1800 ot.min⁻¹ pro frekvenci sítě 60 Hz.



Obr. 2.3.1 Řez generátorem BRUSH SEM řady DG (převzato z [4])

Generátory této řady nacházejí uplatnění v kogeneračních jednotkách a průmyslových aplikacích. Jako pohon těchto generátorů se využívá zejména parní a plynové turbíny. Stator je složen z křemíkových ocelových plechů hydraulicky stlačených v průběhu montáže. Izolace statorového vinutí je tvořena sklolaminátem impregnované pryskyřicí. Cívky jsou vloženy do statorových drážek a propojeny. Nakonec po rozsáhlé podtlakové impregnaci se dokončený stator zahřívá v sušárně na vytvrzení izolace.

Rotor turbogenerátoru je vykován z jednoho kusu vysoce kvalitní legované oceli. Čtyři jednotlivé závitové vinutí rotoru jsou vytvořeny z měděných pásů pájených navzájem pomocí indukčního ohřevu stříbrnou pájkou. Měděné pásy jsou izolovány od sebe navzájem s vrstvou aramidu (Nomex - podobné tažné pevnosti jako polyamidová vlákna, při 175°C zůstává vlákno bez ztráty pevnosti. Vlákno je odolné proti organickým chemikáliím, alkáliím, bělidlům a záření beta a gama, tudíž je vynikající svou termickou odolností a elektroizolačními schopnostmi [6]), slepené epoxidovou pryskyřicí. Cívky jsou uchyceny na místě kovaných ocelových pólů, které jsou přišroubované na horní části každé pólového nástavce. Generátory jsou chlazeny vzduchem, a to buď v otevřeném okruhu, nebo uzavřeném oběhu vzduchu. Oběh chladicího vzduchu je kolem generátoru zajištěn pomocí dvou axiálních ventilátorů namontovaných na hřídeli rotoru. Otevřeně chlazené generátory jsou chlazeny okolním vzduchem nasávaného do stroje přes filtry. Generátory pracující například v těžkých pouštních podmínkách, ve velmi slabém prostředí nebo nevhodně znečištěném prostředí mohou vyžadovat použití uzavřeného oběhu vzduchu, kde je oteplený vzduch ochlazován pomocí sekundárním chladivem před návratem do vstupu. Sekundární chladivo je obvykle vzduch nebo voda.

Další řadou generátorů firmy BRUSH je řada DAX. Hlavními vlastnostmi u této řady je výkon 10-200 MW pro generátory chlazené vzduchem, 200-375 MW pro generátory chlazené vodíkem a nakonec 250-1000 MW pro kombinované chlazení vodou a vodíkem. Všechny tyto generátory jsou řešeny jako dvojpólové, tzn. otáčející se rychlostí 3000 ot.min⁻¹ pro frekvenci sítě 50 Hz resp. 3600 ot.min⁻¹ pro generátory pracující do sítě s frekvencí 60 Hz s napětím statoru až 20 kV.

Stator je řešen obdobně jako u řady DG – sestává se z křemíkových ocelových plechů. Rotor generátoru je vykován z jednoho kusu nikl-chrom-molybdenové oceli. Axiální drážky, ve kterých je usazeno vinutí, jsou vyfrézovány. Materiál vodičů cívky rotoru je vysokovodivostní slitina mědi a stříbra. Předem vytvořené cívky jsou vloženy do drážek, každý závit je izolován. Izolace vinutí je odolná proti vlhkosti, nárazům a schopná odolat vysokým mechanickým silám.



Obr 2.3.2 Řez generátorem BRUSH SEM řady DAX (převzato z [4])

Vinutí je před montáží elektricky ohřáto a zalisováno do správné hloubky a jsou drženy na místě klíny z hliníkové slitiny, které jsou propojeny na každém konci měděnými čtvrtkroužky a tvoří plně propojené tlumící vinutí. Generátory jsou chlazeny vzduchem, a to buď otevřený okruh, nebo uzavřený vzduchový okruh. Vnitřní systém generátoru je podobný ve všech případech. Oběh chladicího vzduchu je zajištěn nuceným chlazením kolem generátoru pomocí dvou axiálních ventilátorů namontovaných na hřídeli rotoru. Chladicí okruhy jsou navrženy tak, aby chlazení vinutí bylo rovnoměrné. Otevřeně chlazené generátory jsou chlazeny okolním vzduchem nasávaného do stroje přes filtry a výstup otepleného vzduchu je vyveden přes výstupní potrubí připojeného ke statoru. Generátory pracující například těžkých pouštních podmínkách, velmi slane prostředí nebo nevhodně znečištěném prostředí mohou vyžadovat použití uzavřeného oběhu vzduchu, kde je oteplený vzduch ochlazován pomocí sekundárním chladivem před návratem do vstupu. Sekundární chladivo je obvykle vzduch nebo voda.

Mezi další výrobce synchronních generátorů patří také firma Siemens Electric Machines s.r.o. Drásov. Podobně jako ostatní výrobci vyrábí synchronní generátory v různých řadách.

Generátory Siemens řady 1FC4 a 1FJ4 jsou třífázové synchronní generátory pro vysoké napětí s rotorem s vyniklými póly v bezkartáčovém provedení s počtem pólů od čtyř a vyšším. Elektrický výkon v této řadě se pohybuje od 630 kVA do 7000 kVA. Skládají se z generátoru střídavého proudu (hlavní stroj) a z budiče s rotujícím usměrňovačem.

Rotor hlavního stroje a budiče se nachází společně s rotujícím usměrňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Části, které slouží k regulaci napětí jsou umístěny ve svorkovnicové skříni, respektive jsou součástí dodávky stroje pro umístění v rozvaděči (pak je generátor vybaven nízkonapětovou svorkovnicí). Všechny tyto díly tvoří spolu se svařovaným krytem a ložisky jednu stavební jednotku.



Obr. 2.3.3 Generátor Siemens řady 1FJ4 (s vodním chladičem - převzato z [8])

Pro jasný popis je zavedeno označení konců stroje: AS strana se nachází u volného konce hřídele, zde se připojuje pohon generátoru. Směr otáčení stroje je definován při pohledu na tuto stranu. Opačná strana stroje se označuje jako NS, hřídel zde není vyvedena a nachází se zde budič s rotujícím usměrňovačem. Rotory hlavního stroje a budiče se nachází společně s rotujícím usměrňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Rotor generátoru je kompaktní díl stroje s vyniklými póly a klecí tlumiče (amortiséru) v magnetickém poli.

Je nalisován na hřídeli a buzen pomocí integrovaného budiče. Rotor budiče s hladkými póly se nachází na NS straně stroje. Usměrňovač v obvodu rotoru je umístěn vně stroje na NS straně a je přístupný po demontáži chladiče usměrňovače. Stator hlavního stroje se skládá z kostry svařované konstrukce, ve které je nalisován a zajištěn proti otočení statorový svazek.

Statorový svazek se skládá z jádra tvořeného statorovými plechy, z hlavního a pomocného vinutí. Stator budiče se nachází v ložiskovém štítu na NS straně stroje a je pólové konstrukce. Je vybaven permanentními magnety k nabuzení stroje při rozběhu.

Podle provozních podmínek a požadavků zákazníka se řídí způsob ventilace. Stroj je chlazen jedním z následujících dvou způsobů. Otevřený ventilační systém nasává na NS straně vzduch z okolí a průchozím způsobem chladí vinutí, ohřátý vzduch je vytlačován ventilátorem na AS straně do okolí. Druhý způsob chlazení využívá vnější chladič. Jedná se o uzavřený dvouokruhový systém cirkulace vzduchu, kdy se ohřátý vzduch chladí ve vodním (1FJ4), respektive vzduchovém chladiči (1FC4) a vrací se zpět do hlavního stroje. Tento systém je využíván, pokud je požadován vyšší stupeň krytí. Stroje jsou normálně dodávány se zapojením ve hvězdě pro napětí určeném v technických datech nebo na štítku stroje.

Synchronní generátory řady 1FC2, 1FC3 a 1FJ3 jsou třífázové synchronní generátory pro nízké napětí s rotorem s vyniklými póly v bezkartáčovém provedení o výkonu 16 – 3000 kVA u řady 1FC2 nebo 3 – 5 MVA pro řady 1FC3 a 1FJ3. Skládají se z generátoru střídavého proudu (hlavní stroj) a z budiče s rotujícím usměrňovačem. Rotory hlavního stroje a budiče se nachází společně s rotujícím usměrňovačem a ventilátorem na jedné hřídeli. Části, které slouží k regulaci napětí jsou umístěny ve svorkovnicové skříni. Všechny tyto díly tvoří spolu se svařovaným krytem a ložisky jednu stavební jednotku. Hlavní stroj má rotor s vyniklými póly. Třífázové vinutí je vyvedeno na čtyři svorky a zapojeno do hvězdy. Hvězda je vyvedena. Ke zlepšení dynamické stability u asymetrického zatížení je rotor vybaven tlumícím vinutím.



Obr. 2.3.4 Generátor řady 1FC2 (převzato z [8])

Budič je střídavý generátor s vnějšími póly se stejnoměrným budícím vinutím ve statoru. Střídavé vinutí rotoru napájí přes rotující usměrňovač vinutí v rotoru hlavního stroje. Rotující usměrňovač je diodový modul, zapojen do třífázového můstku, který je vybaven ochranou proti přepětí.



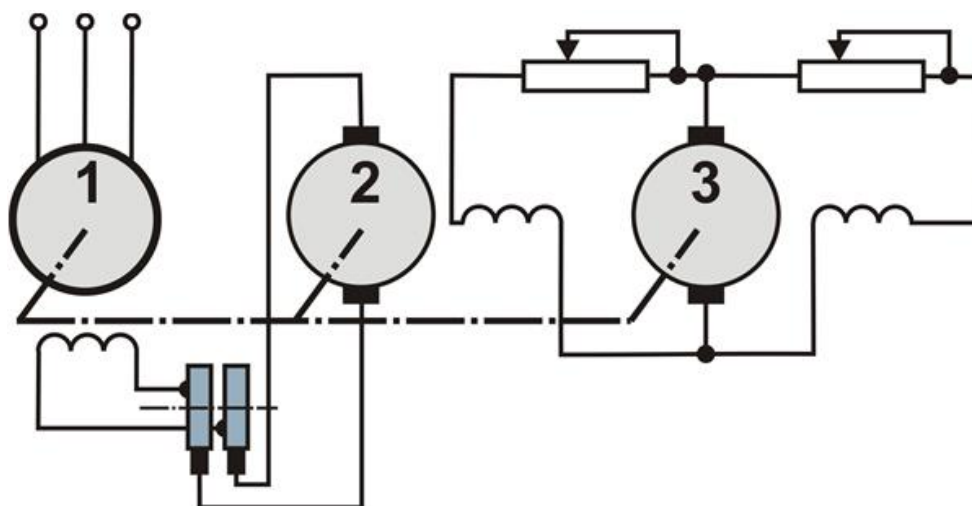
Obr. 2.3.4 Generátor řady 1FC3 (převzato z [8])

3. Budící soustavy

3.1. Nezávislé budící soustavy

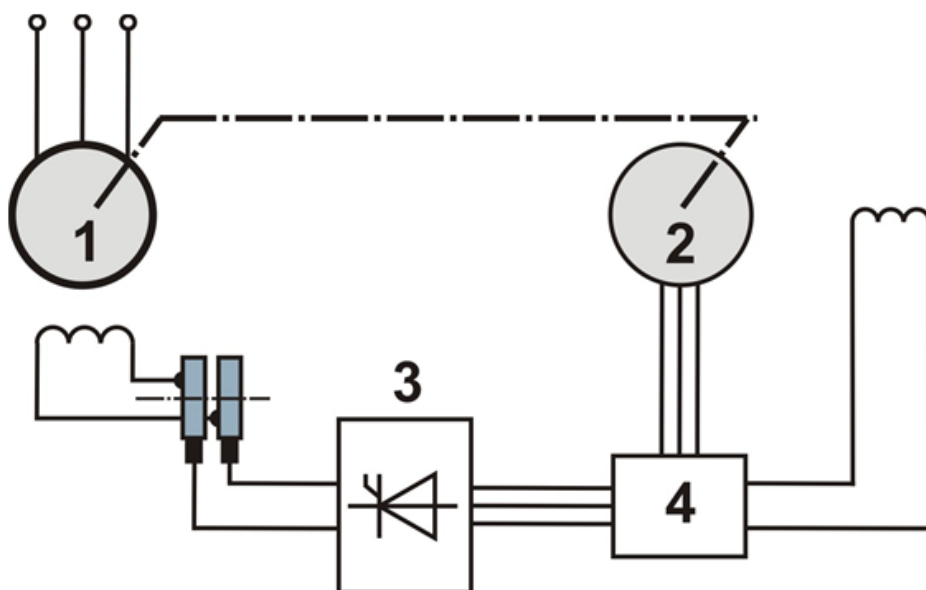
Je to taková souprava, která nezávisí na napájecí síti, ke které je buzený synchronní generátor připojen. Budící zdroj je točivý stejnosměrný nebo střídavý budič obvykle poháněný hřídelí buzeného stroje mnohdy umístěný přímo na hřídeli. Budič není závislý na stavu napájecí sítě, na kterou je buzený synchronní stroj připojen.

Jako první řešení nezávislého zdroje buzení je stejnosměrný budič. Zde je použit jako zdroj buzení stejnosměrný budič s paralelním buzením, nebo budič s pomocným paralelním budičem.



Obr. 3.1.1 Buzení synchronního generátoru (1) z rotačního budiče - budič (2) s buzením pomocného budiče (3) na jedné hřídeli (převzato z [1])

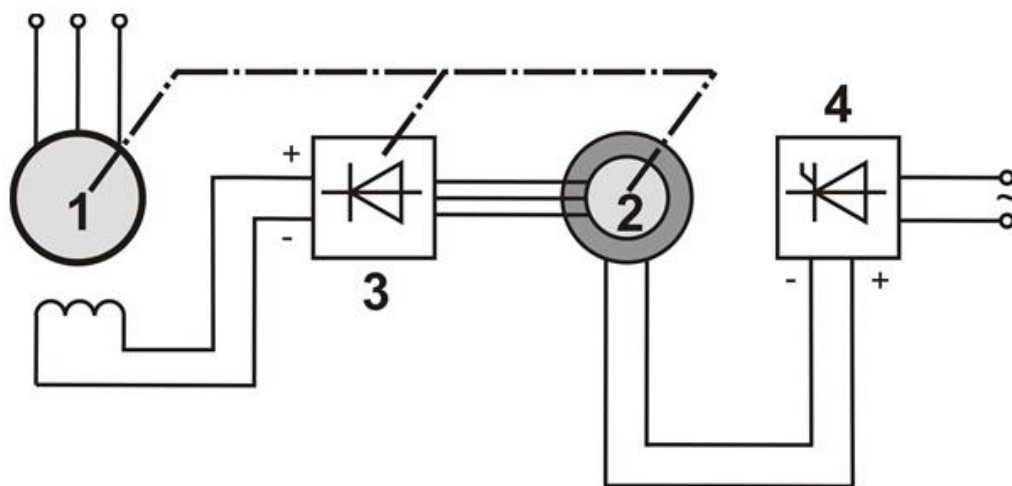
Další řešení nezávislého zdroje buzení je střídavý budič. Střídavý budič je mechanicky spojen s hřídelem synchronního stroje, jehož proud se usměrní v řízeném usměrňovači a přes sběrací kroužky se přivádí k budicímu vinutí synchronního stroje. Tato budící soustava má velmi rychlou odezvu. Na střídavé napájecí síti je nezávislá, nevýhodou jsou třecí kontakty.



Obr. 3.1.2 Buzení synchronního generátoru (1) pomocí střídavého budiče (2) a řízeného usměrňovače (3) a kompaundní budící soustavy (4) (převzato z [1])

3.2. Závislá budící soustava

Taková budící soustava střídavou elektrickou energii pro buzení odebírá ze sítě, na kterou pracuje a je nutno ji proto usměrnit na stejnosměrnou. První řešení závislé budící soustavy je buzení s nesenými ventily odstraňující nevýhody předchozího případu.

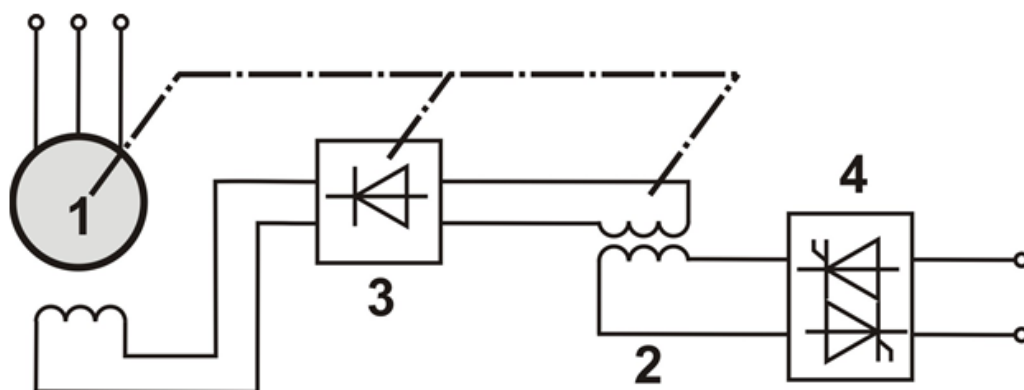


Obr. 3.2.1 Buzení s nesenými ventily (převzato z [1])

Synchronní stroj (1) pohání střídavý budič (2), jehož vinutí buzení je umístěné na statoru a střídavé třífázové vinutí na rotoru. Střídavé napětí se usměrňuje v neřízeném usměrňovači

na hřídeli, s kterým otáčí. Stejnoseměrný budicí proud z usměrňovače (3) se přivádí bez kroužků přímo k budicímu vinutí synchronního stroje. Budicí proud se řídí změnou budicího proudu střídavého budiče v řízeném usměrňovači (4). Tato soustava je vhodná pro rychloběžné stroje, kde konstrukčně vychází budič rozměrově menší.

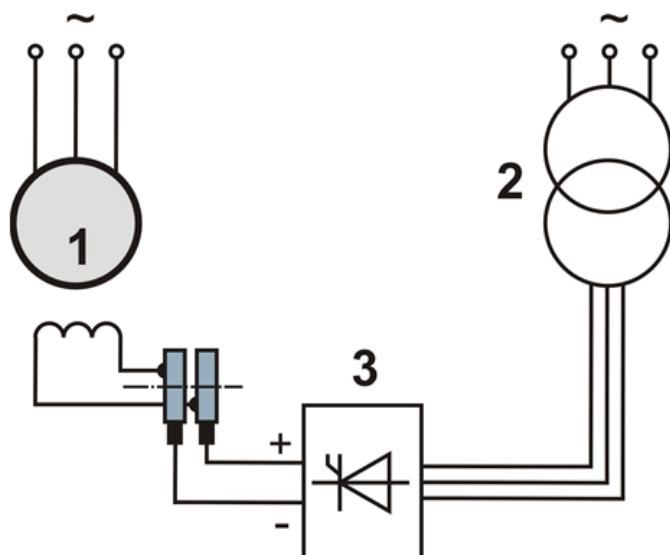
Dalším řešením vhodným spíše pro pomaloběžné generátory je buzení s rotačním transformátorem.



Obr. 3.2.2 Buzení s rotačním transformátorem (převzato z [1])

Na hřídeli je vinutí, které tvoří sekundární vinutí transformátoru (2) většinou jednofázového. Primární vinutí tohoto transformátoru se nepohybuje a napájí se střídavým proudem. Budicí proud se usměrní v neřízeném usměrňovači (3) umístěném podobně jako nesené ventily na hřídeli a přivádí budicí proud přímo do budicího vinutí synchronního generátoru.

V neposlední řadě je v hojné míře používáno řešení s řízeným usměrňovačem a přívodu budicího proudu na kroužky, na které je připojeno budicí vinutí synchronního generátoru. Přes budicí transformátor (2) je přivedeno střídavý třífázový proud k řízenému usměrňovači (3). Usměrněný proud je přiveden přes kartáče na kroužky budicího vinutí. Tomuto řešení se také říká statická budicí soustava.



Obr. 3.2.3 Buzení synchronního generátoru ze statického usměrňovače (převzato z [1])

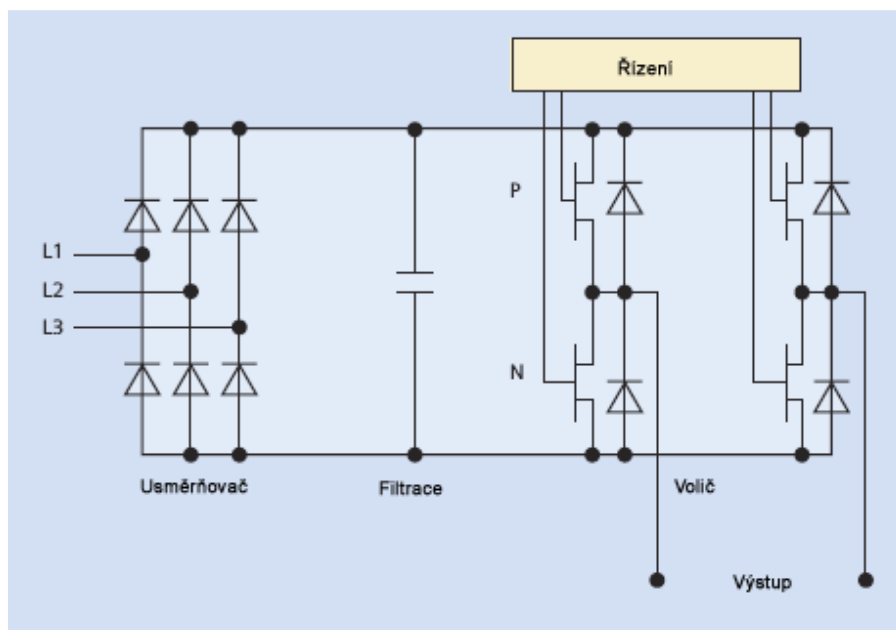
3.3. Budicí soustavy pro generátory do 100 MW

Budicí soupravy pro generátory do 100 MW jsou dnes vyráběny a dodávány specializovanými firmami, jako jsou ABB, Siemens, z českých firem bych zmínil ZAT nebo TENEL.

Budicí soupravy Siemens, stejně jako generátory, jsou vyráběny v různých výkonových řadách a různých provedení.

Řada SIPOLE je budicí soustava pro synchronní stroje s budičem a rotačními diodami. Může být také přímo připojena na sběrací kroužky generátoru. Tato řada budících souprav je vhodná pro použití v malých závodních a vodních elektrárnách pro generátory, jejichž budicí proud je do 20 A. Výkonovou část tvoří tranzistorový měnič připojený k budicímu vinutí nebo na sběrací kroužky generátoru.

Další řada budících souprav firmy Siemens je RG3. Je to statická budicí soustava pro synchronní generátory s budiči a rotačními diodami. Může být přímo připojena na sběrací kroužky generátoru, jejichž budicí proud je do 130 A. Výkonovou část tvoří stejně jako u řady SIPOLE tranzistorový měnič připojený k budicímu vinutí nebo na sběrací kroužky generátoru. Standardně je možno dodávat budicí soustavy, které odebírají budicí výkon buď z pomocného budiče s trvalým magnetem, z pomocného vinutí na statoru generátoru nebo přes budicí transformátor.



Obr. 3.3.1 Základní schéma zapojení tranzistorové výkonové části SIPOL (převzato z [8])

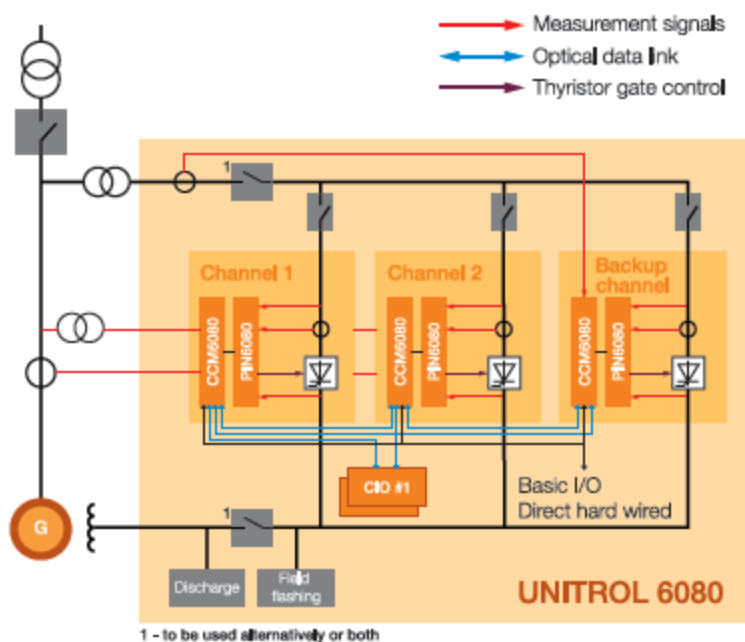
Budicí soustava THYRIPART[®] je statická budicí soustava s tranzistorovým regulátorem napětí napájená napětím a proudem generátoru. Energie potřebná k buzení generátoru se dodává přímo přes sběrací kroužky. Výkonové součástky jsou zde použity tyristory. Budicí soustava je schopna dodávat budicí proud až 1000 A.

Budicí soustava THYRISIEM[®] je budicí soustava pro synchronní generátory s rotačními budiči. Výkon je dodáván z pomocného budiče anebo z vlastní spotřeby generátoru. Maximální budicí proud dosahuje hodnoty 225 A.

THYRIPOL[®] je statická budicí soustava. Buzení synchronního stroje zajišťuje tyristorový usměrňovač řízený automatickým regulátorem napětí. Budicí proud se z výstupu usměrňovače přivádí přímo přes sběrací kroužky do rotoru. Jeho maximální velikost u tohoto typu budicí soustavy je 8000 A.

I budicí soupravy ABB jsou vyráběny v několika výkonových řadách. Řada UNITROL 1000 se používá pro generátory, jejichž budicí proud nepřesahuje 40 A. Celá budicí souprava je velmi kompaktní. Jako výkonové součástky jsou zde použity IGBT tranzistory. Tento systém se používá v mnoha aplikacích, např. v malých elektrárnách založených na plynové, parní nebo vodní turbíně menších výkonů, v námořní dopravě jako pomocné napájení dieselgenerátorem. Další řadou budicích souprav je UNITROL 6080. Tato řada je schopna dodávat budicí proud až do hodnoty 1600 A. V této řadě jsou jako výkonové součástky použity výkonové tyristory.

K zaručení spolehlivého provozu bývá budicí souprava konstruována tak, že buzení má dva identické kanály, které zaručují 100% zálohu, a další kanál zajišťující v případě poruchy hlavních kanálů 50% zálohu.



Obr. 3.3.3 UNITROL 6080- blokové schéma (převzato z [7])

Poslední řadou je řada UNITROL 6800. Tato řada statických budicích soustav využívá jako výkonové součástky tyristory. Ty jsou schopny dodávat budicí proud až do hodnoty 10 kA při napětí 1500 V.

Jako předposlední výrobce budicích soustav je firma ZAT a.s. Příbram. Stejně jako ostatní výrobci vyrábějí budicí systémy různých výkonů a provedení. Řada DC1A je budicí soustava se stejnosměrným budičem, řada AC2A je vyráběna jako bezkartáčový budicí systém, řada ST1A označuje statický budicí systém a nakonec AC4A je budicí systém s řízeným usměrňovačem napájeným z pomocného alternátoru. Typy výkonových měničů, které firma vyrábí, se dají rozdělit do dvou výkonových skupin.

První skupina jsou tyristorové usměrňovače, které jsou schopny dodat jmenovitý budicí proud od 40A do 8000A. Druhou skupinou jsou pak IGBT měniče s pulzně šířkovou modulací se jmenovitým budicím proudem do 15A.

Posledním výrobcem je firma TENEL ČR s.r.o. Tato firma vyrábí budící soustavy ve dvou základních řadách. První z nich je BBS/G, která je konstruována jako bezkartáčová se střídavým nebo stejnosměrným budičem pro buzení synchronních generátorů o výkonu 500 kW až 500 MW.

Druhá řada označena SBS/G je řada statických budících soustav pro buzení synchronních generátorů o výkonu 100 kW až do výkonu 500 MW.

4. Popis řešeného generátoru

Generátor je chlazený vzduchem, chladicí oběh vzduchu je uzavřený, vzduch je chlazen vodním chladičem. K buzení generátoru slouží statická budicí souprava.

Vyrobená elektrická energie je vyvedena na blokový transformátor a transformátor vlastní spotřeby bloku. Blokový transformátor napájí přes vývodovou kobku 110 kV samostatnou linkou sběrnou rozvodny Vítkov.

Odbočka na vlastní spotřebu napájí blokovou rozvodnu vlastní spotřeby 6 kV.

Pro připojení elektrických ochran, měřících přístrojů a SBS jsou součástí vývodu generátoru, vývodu 110 kV a odbočení z bloku měřící transformátory proudu (MTP) a napětí (MTN).

4.1. Stator generátoru

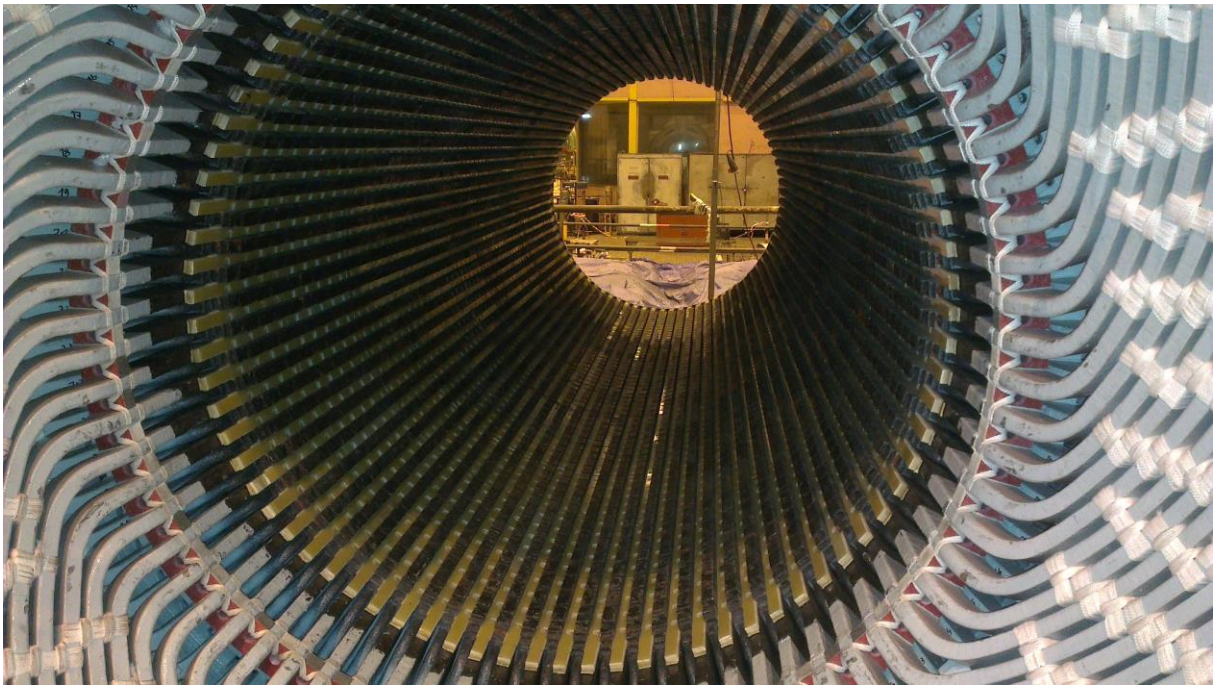
Stator má v monolitické kostře pevně a centricky uloženy statorové plechy a v nich statorové vinutí. Celý stator spočívá patkami na základovém rámu. Přívod chladicího vzduchu je spodem do čel vinutí a odvod rovněž spodem z prostředku statoru do vzduchové komory s vodním chladičem. Oběh vzduchu zajišťují ventilátory, které jsou součástí rotoru. Aktivní železo statoru je složeno ze segmentů dynamových plechů s malým ztrátovým číslem, plechy jsou navzájem izolované a složené do svazků, mezi nimiž jsou ventilační kanály. Statorové vinutí vyrobené z elektrolytické mědi je vloženo do otevřených drážek. Jednotlivé vodiče jsou tvořeny permutovanými tyčemi a izolovány izolací. Proti zkratovým silám jsou čela vinutá, vyztužená gumovými vložkami a připevněna bandáží ke konzolám upevněným na postranice kostry.



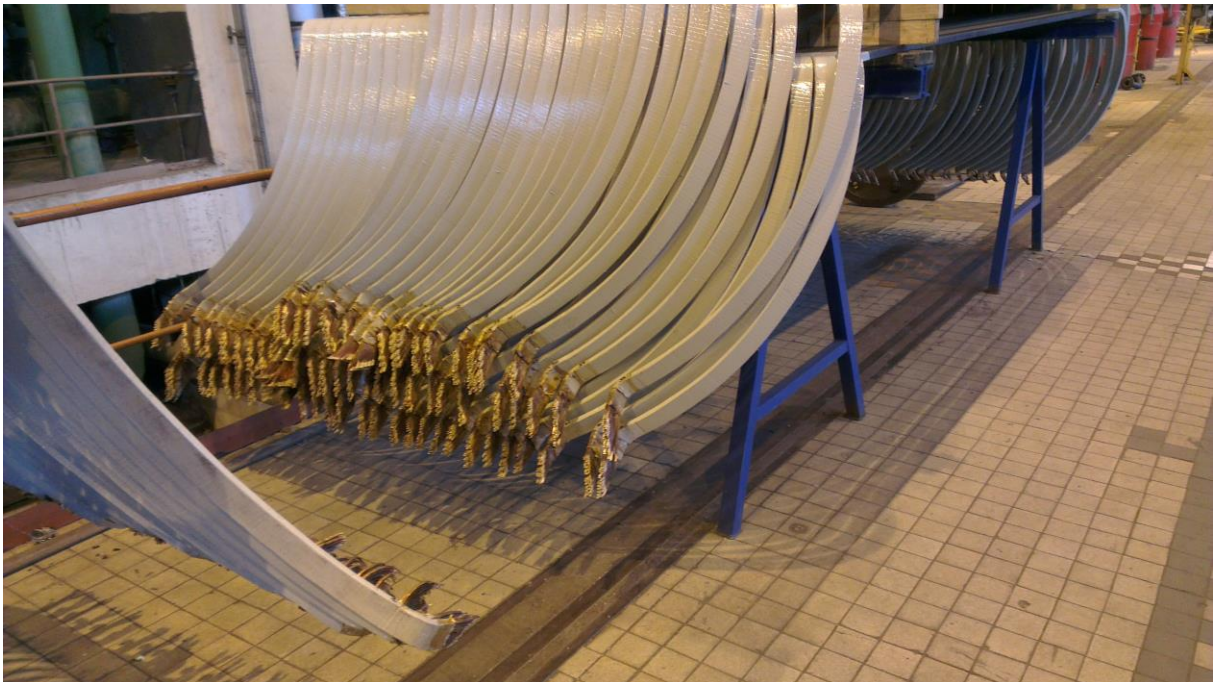
Obr. 4.1.1 Detail statorových plechů



Obr. 4.1.2 – Detail statorových plechů (zde s měřením teploty)



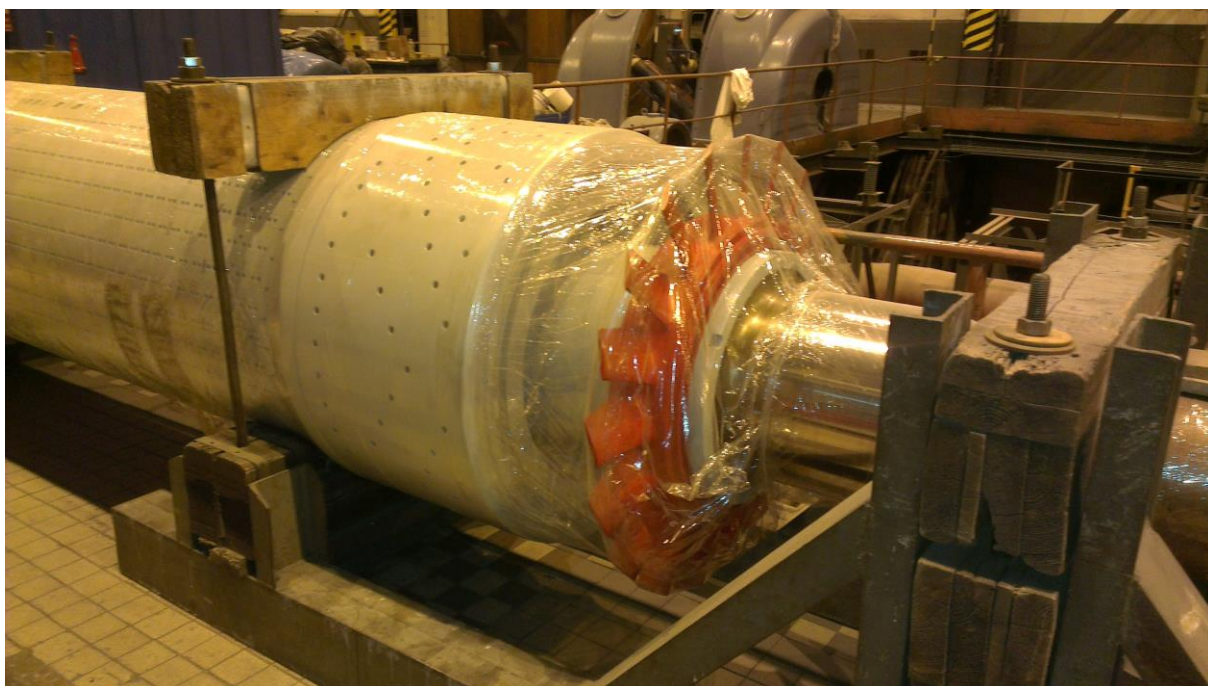
Obr. 4.1.3 Statorové drážky s vloženým vinutím



Obr. 4.1.4 Tyče statorového vynutí (každá tyč je vlastně půl závitu)

4.2. Rotor generátoru

Rotor je vykován z jednoho kusu speciální oceli. Vinutí rotoru je uloženo v radiálních drážkách na obvodě rotoru tak, aby bylo dosaženo potřebného tvaru magnetického pólu. Vinutí je vyrobeno z měděných plochých vodičů. Čela vinutí jsou vyztužena izolačními vložkami. Odstředivé síly v čelech vinutí zachycují nemagnetické kovové obruče, které stahují konce bronzových klínů uzavírajících drážky a tvoří tak spolehlivý tlumič. Na obou stranách těla rotoru je po jednom axiálním ventilátoru.



Obr. 4.2.1 Detail ventilátoru na hřídeli a kovové obruče

Na straně turbíny je uložen ve společném ložisku s turbínou, na straně sběracího ústrojí v samostatném ložiskovém stojanu. Sběrací ústrojí je provedeno jako zvláštní stojan a zakryto krytem. Na čepu rotoru jsou nasazeny dva větrané sběrací ocelové kroužky. Budící proud je od kroužků veden k rotorovému vinutí přívodem jdoucím vývrtem rotoru a utěsněným v průchodkách u kroužků a na konci vývrtní rotoru.

4.3. Chlazení generátoru

Chlazení vinutí rotoru, statoru a aktivního železa zajišťuje vzduch obíhající v uzavřeném cyklu generátorem, vzduchovou komorou a vodním chladičem vzduchu. Vzduchová komora je pod stolicí generátoru. Tvoří ji kanál výstupního otepleného vzduchu ze středu generátoru k chladiči. Od chladiče se pak vrací dva proudy ochlazeného vzduchu k čelům vinutí. Komora je těsně uzavřena včetně utěsnění mezi kanály teplého a ochlazeného vzduchu. Vstup do komory je utěsněnými dveřmi z prostoru "0" generátoru. Chladný vzduch z prostoru čel vinutí vstoupí do prostoru mezi statorem a rotorem a do kanálků v železe rotoru i statoru, kterými je rozváděn ke všem sekcím vinutí a železa, ze středu je vyháněn zpět k chladiči.

Chladič je vestavěn v komoře vodorovně. Je ocelový, voštinový. Vně komory má chladič snímací čela a armatury včetně hlavních uzavíracích šoupat. Přívod vody je možno volit buď z výtlaku chladících čerpadel, nebo z výškové nádrže. Oteplení vody v chladiči má být v rozmezí $4 \div 10^{\circ}\text{C}$. Teplota ochlazeného vzduchu nemá překročit $+40^{\circ}\text{C}$ a klesnout pod $+5^{\circ}\text{C}$.

4.4. Základní technická data generátoru

Jmenovitý zdánlivý výkon	71,25 MVA
Jmenovitý činný výkon	57 MW
Jmenovité napětí statoru	$10,5 \text{ kV} \pm 5 \%$
Jmenovitý proud statoru	3 918 A
Jmenovitý účinník $\cos\phi$	0,8
Jmenovité otáčky	$3\,000 \text{ ot. min}^{-1}$
Jmenovitý kmitočet	50 Hz
Rotorové napětí	$80 \div 339 \text{ V}$
Rotorový proud	$225 \div 695 \text{ A}$
Max. induktivní výkon při jmenovitém napětí	60 MVA _r
Max. kapacitní výkon při jmenovitém napětí	20 MVA _r

5. Návrh výkonové části budící soustavy

Při návrhu výkonové části budící soupravy si nejdříve zvolím typ usměrňovače s ohledem na konstrukci rotoru generátoru. Protože rotorové vinutí je vyvedeno na kroužky, zvolil jsem tedy statickou budící soupravu s řízeným tyristorovým usměrňovačem. Před samotným návrhem výkonové části budící soustavy je třeba součástky, použité v usměrňovači, dimenzovat jak napěťově, tak proudově.

5.1. Napěťové dimenzování součástek

Z podstaty napěťového průrazu polovodičového přechodu vyplývá, že k poškození přechodu může dojít i velmi krátkým napěťovým impulzem. Proto se při napěťovém dimenzování zjišťuje pouze maximální hodnota závěrného nebo blokovacího napětí. Při napěťovém dimenzování součástek nezapomínáme na to, že v síti se napětí mění a může dosahovat 1,1 až 1,15 násobku jmenovité hodnoty, v některých výjimečných případech až 1,3 U_n . Budeme tedy uvažovat koeficient kolísání napětí v síti k_{SIT} . Komutační přepětí U_k je způsobeno vypínacím pochodem polovodičové součástky. Pro jeho omezení se používají různé typy komutačních ochran. Tato komutační přepětí jsou periodická a objevují se při každé komutaci a jejich velikost při správně navržené komutační ochraně nepřevyšuje 1,3 U_{RWM} .

Zavádíme koeficient komutačního přepětí k_k . Náhodná přepětí jsou přepětí, která se přenesou až do měniče ze sítě a jejich příčinou mohou být buď spínání v síti (spínací přepětí), nebo atmosférické výboje (atmosférická přepětí). Pro snížení těchto přepětí se na vstup měniče připojují přepětěvé ochrany. Zavádíme koeficient náhodných přepětí k_{SP} , jehož reálná hodnota bývá menší jak 1,3. Polovodičové součástky musíme vybírat tak, aby její maximální opakovatelné napětí U_{RRM} (U_{DRM}) bylo menší než špička možného přepětí. Musí tedy platit

$$\frac{U_{RRM}}{U_{RWM}} = k_U > \frac{U_{MAX}}{U_{RWM}} = k_{SIT} * k_K * k_{SP}, \quad (1)$$

kde k_U je koeficient napěťové bezpečnosti.

Po dosazení reálných hodnot dostaneme

$$\frac{U_{RRM}}{U_{RWM}} = 1,15 * 1,3 * 1,3 \cong 2 . \quad (2)$$

V případě sériového řazení n součástek určíme nejprve napětí na jednu součástku U_{RWM1} .

Při rovnoměrném rozložení napětí bude napětí na jedné součástce

$$\frac{U_{RWM}}{n} = U_{RWM1} . \quad (3)$$

Koeficient napět'ové bezpečnosti získáme obdobně jako v předešlém případě, ale doplníme jej o koeficient nerovnoměrného dělení napětí mezi součástky k_S , který toto nerovnoměrné rozdělení napětí mezi součástky respektuje. Velikost koeficientu k_S bývá 1,1 až 1,2.

$$k_U = \frac{U_{RRM}}{U_{RWM}} > k_{SIT} * k_K * k_{SP} * k_S = 1,15 * 1,3 * 1,3 * 1,2 \cong 2,4 \quad (4)$$

Proto se doporučuje volit koeficient napět'ové bezpečnosti $k_U = 2$ až 3 podle důležitosti a také podle toho, jak je napájecí zdroj zabezpečen proti vzniku přepětí.

5.2. Proudové dimenzování součástek

Základním omezením určující možné zatížení polovodičové součástky je teplota přechodu T_j . Její velikost je závislá na ztrátách, které v polovodičovém přechodu vznikají, tepelném odporu R_{thja} případně tepelné impedanci Z_{thja} chladicího obvodu teplotě okolí T_a . Ztráty, které vznikají v přechodu můžeme rozdělit na ztráty způsobené propustným proudem, ztráty způsobené závěrným proudem, ztráty způsobené blokovacím proudem u tyristorů a tranzistorů, ztráty zapínací u tyristorů a vypínací u tranzistorů, GTO, IGBT a v poslední řadě ztráty řídicím proudem u tyristorů a tranzistorů. Při frekvenci do cca 200 Hz můžeme, kromě ztrát propustným směrem, ostatní ztráty zanedbat.

Okamžitý ztrátový výkon P_F je dán součinem okamžitých hodnot napětí u_F a proudu i_F . Předpokládáme-li, že tepelná časová konstanta vlastní součástky je podstatně delší než doba jedné periody můžeme dále počítat se středními ztrátami $P_{F(AV)}$, který spočítáme dle vztahu

$$P_{F(AV)} = U_{TO} * I_{F(AV)} + r_F * I_{FRMS}^2 \quad (5)$$

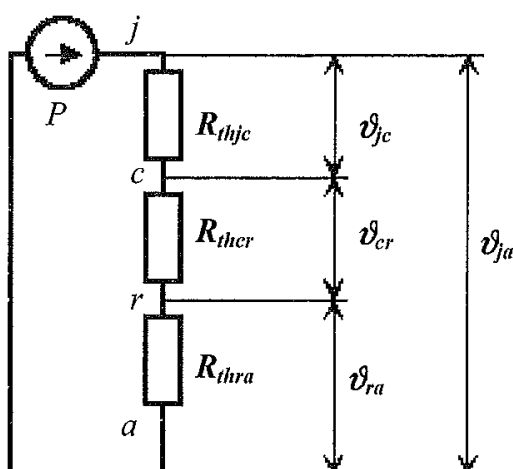
Ze vztahu vidíme, že ztráty závisejí částečně na střední hodnotě $I_{F(AV)}$ a částečně na efektivní hodnotě I_{FRMS} . Pokud umíme tyto dvě složky určit, použijeme pro stanovení ztrát výraz (5). Potřebné hodnoty U_{TO} a r_F bývají udávány v katalogu součástek. Pro usnadnění výpočtu bývají v katalozích výrobců udávány závislosti střední hodnoty celkového ztrátového výkonu na střední hodnotě proudu polovodičovou součástkou.

Dále musíme určit oteplení součástky, abychom teplo, produkované polovodičovým přechodem, mohli bezpečně ze součástky odvést a nedošlo by k jejím poškození. Trvalé zatížení je charakterizováno tím, že všechny ztráty, které se vyvinou v součástce, se odvedou do okolí.

Vztah mezi odváděným tepelným výkonem P_F a oteplením mezi přechodem a okolím je charakterizován tepelným odporem R_{thja} a je definovaný vztahem

$$T_j = P_F * R_{thja} + T_a = P_F * (R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}) + T_a \quad (6)$$

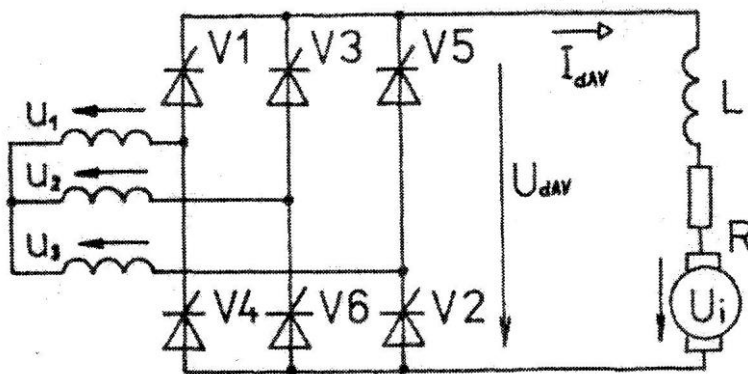
Na náhradním zjednodušeném tepelném schématu jsou patrné jednotlivá oteplení mezi přechodem a pouzdrem, pouzdrem a chladičem a nakonec mezi chladičem a okolím.



Obr. 5.2.1 Náhradní tepelné schéma pro ustálený stav (převzato z [2])

5.3. Návrh součástek pro statickou budicí soustavu

Z technických parametrů z předpisu pro generátor jsem zjistil jmenovité rotorové napětí a jmenovitý rotorový proud, který je $I_{BN} = 695 \text{ A}$ a $U_{BN} = 339 \text{ V}$. Teplota okolí, na kterou dimenzujeme součástky usměrňovače, je dle normy ČSN 350255 teplota 40°C .



Obr. 5.3.1 Schéma výkonové části (převzato z [2])

Ještě před začátkem výpočtu musím upravit proudové a napěťové parametry. Dle normy [4] musí být poměrné stropní napětí a poměrný stropní proud u závislé budicí soustavy alespoň 2,0. Z tohoto vyplývá, že výkonové součástky budu dimenzovat na dvojnásobek napětí a dvojnásobek proudu. Výsledné hodnoty tedy budou $I_d = 1390 \text{ A}$ a napětí $U_d = 678 \text{ V}$.

Pro jednotlivé součástky tedy bude střední hodnota proudu a efektivní hodnota proudu

$$I_{d(AV)} = \frac{I_{dMAX}}{3} = 463,33 \text{ A} \quad (7)$$

$$I_{def} = \frac{I_{dMAX}}{\sqrt{3}} = 802,52 \text{ A} \quad (8)$$

Střední hodnotu usměrněného napětí známe, potřebujeme dopočítat napětí sdružené

$$U_{d(AV)} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * U_S \rightarrow U_S = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} * U_{d(AV)} = 502,05 \text{ V} \quad (9)$$

Maximální hodnota napětí v závěrném směru je

$$U_{RWM} = \sqrt{2} * U_S = 710 \text{ V} \quad (10)$$

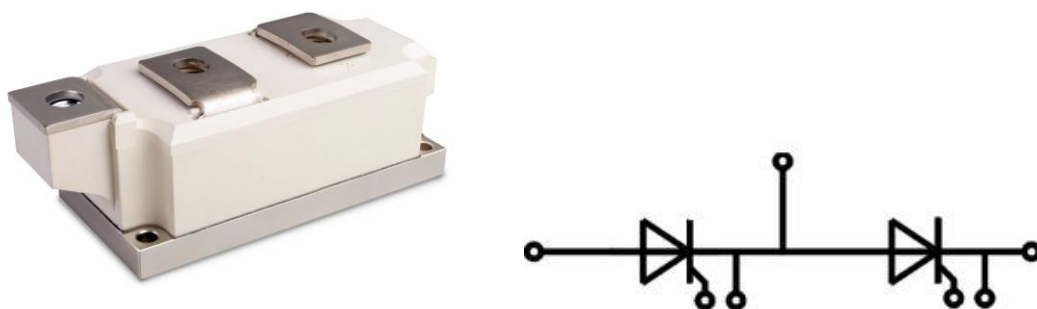
Z předchozí části o napěťovém dimenzování vypočítám z rovnice (4) pro koeficient k_U

$$k_U = \frac{U_{RRM}}{U_{RWM}} > 2 \rightarrow U_{RRM} > 2 * U_{RWM} \rightarrow U_{RRM} > 1420 \text{ V} \quad (11)$$

Z katalogu výkonových součástek nyní můžu vybrat součástku s odpovídajícími parametry. Zvolím si modul dvojice tyristorů SKKT 570/16E od firmy SEMIKRON s těmito katalogovými hodnotami:

$$I_{T(AV)} = 570 \text{ A} ; U_{TO} = 0,78 \text{ V} ; r_T = 0,32 \text{ m}\Omega ; T_{jmax} = 135 \text{ }^\circ\text{C} ; R_{thJC} = 0,036 \text{ K}\cdot\text{W}^{-1} ;$$

$$R_{thCH} = 0,01 ; U_{RRM} = 1600 \text{ V}$$



Obr. 5.3.2 Zvolený tyristorový modul SKKT 570/16E a vnitřní zapojení

Další hodnotu, kterou potřebuji znát, je hodnota středních ztrát v propustném směru. Můžu je vypočítat, nebo odečíst z katalogového listu součástky.

$$\begin{aligned} P_{F(AV)} &= U_{(TO)} * I_{F(AV)} + r_F * I_{FRMS}^2 = 0,78 * 466,33 + 0,32 \cdot 10^{-3} * 802,52^2 = \\ &= 569,82 \text{ W} \end{aligned} \quad (12)$$

Následně stanovím střední hodnotu teploty pouzdra. Tu lze opět odečíst z grafu uvedeného v katalogu součástky nebo jí mohu vypočítat ze vztahu (6), který plyne z náhradního tepelného schématu polovodičové součástky. Při výpočtu potřebujeme znát maximální možnou hodnotu teploty čipu součástky T_{jmax} a tepelný odpor mezi čipem součástky a pouzdrům součástky R_{thjc} . Tyto dvě hodnoty lze vyčíst z katalogového listu součástky.

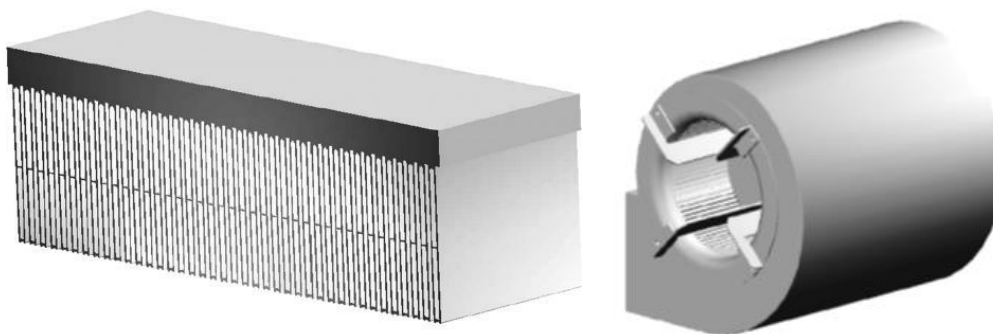
Protože v pouzdře jsou součástky dvě, počítám s nejnepříznivějším případem a výkon zvolím dvojnásobný

$$T_{c(AV)} = T_{jmax} - 2 * P_{F(AV)} * R_{thjc} = 135 - 2 * 569,82 * 0,036 = 93,97^{\circ}C \quad (13)$$

Dalším krokem návrhu je volba chladiče. Pro tepelný odpor chladiče R_{thra} musí platit

$$R_{thra} + R_{thcr} \leq \frac{T_c - T_a}{P_{F(AV)}} \rightarrow R_{thra} \leq \frac{T_c - T_a}{P_{F(AV)}} - R_{thcr} \rightarrow R_{thra} \leq \frac{93,97 - 40}{1139,64} - 0,01 \rightarrow R_{thra} \leq 0,037 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (14)$$

Podle vypočtené hodnoty vyhledám vhodný chladič z katalogu výrobce. Nejvhodnější chladič jsem vybral chladič Px 308 firmy SEMIKRON s odporem $R_{thra} = 0,0264 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$. V katalogu jsem našel i ventilátor doporučený výrobcem, protože v tomto katalogovém listu udává hodnotu tepelného odporu pouze s nuceným chlazením.



Obr. 5.3.3 Chladič Px 308 a doporučený ventilátor SKF 160

Výpočtem provedeme zpětnou kontrolu dle vzorce (6)

$$\begin{aligned} T_j &= P_F * R_{thja} + T_a = P_F * (R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}) + T_a = \\ &= 1139,64 * (0,036 + 0,01 + 0,0264) + 40 = 122,5^{\circ}C \end{aligned}$$

Použitý chladič tedy vyhovuje.

5.4. Kontrola použitých součástek stávající budící soupravy

Ve stávající budící soustavě jsou použity výkonové tyristory Infineon-Eupec TT550N16KOF s těmito parametry: $I_{T(AV)} = 570 \text{ A}$; $U_{TO} = 0,9 \text{ V}$; $r_T = 0,27 \text{ m}\Omega$;

$T_{jmax} = 135^{\circ}C$; $R_{thJC} = 0,0325 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$; $R_{thCH} = 0,01$; $U_{RRM} = 1600 \text{ V}$.

Z těchto parametrů vyplývá, že součástky jsem vybral s obdobnými parametry, které použil výrobce stávající budící soustavy.

6. Závěr

V první části této práce jsem nejdříve popsal synchronní generátory, jejich rozdělení a přehled vyráběných generátorů. Dále jsem se v druhé části práce věnoval rozdělení a popisu jednotlivých existujících budících soustav a jejich výrobců. Ve třetí části jsem popsal konstrukci řešeného generátoru a jeho technická data. V poslední části práce jsem popsal postup při proudovém a napět'ovém dimenzování usměrňovače. V případě proudového dimenzování kontrolujeme maximální dovolené oteplení součástky a jeho součástí je i volba příslušného chladiče. Při dimenzování napět'ovém určujeme nejvyšší možné opakovatelné hodnoty napětí na součástce v závěrném a blokovacím směru. Podle hodnot těchto napětí se součástky zařadí do napět'ové třídy. V samém závěru jsem vypočítal a navrhl dle konkrétního zadání výkonovou část budící soustavy a ověřil správnost výpočtů, které jsem poté porovnal se součástkami současné budící soustavy. Zadání bakalářské práce se mi podařilo naplnit.

Seznam použité literatury:

- [1] Voženílek P., Novotný V., Mindl P., *Elektromechanické měniče*, nakladatelství ČVUT 2011
- [2] Pavelka J., Čeřovský Z. : *Výkonová elektronika*, nakladatelství ČVUT 2009
- [3] KOLEKTIV AUTORŮ: *Místní provozní předpis pro generátory 61-63MKA 57MW*; 2013
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ: ČSN 35 0255: *Budicí systémy turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů. Technické požadavky a metody zkoušení*; Účinnost od 1. 7. 1988
- [5] Kučera J., Hapl J.: *Vinutí elektrických strojů točivých*, nakladatelství ČSAV 1959
- [6] BRUSH SEM s.r.o. (online ze dne 2. 2. 2014) dostupné z www.brush-sem.cz
- [7] ABB, (online ze dne 27. 2. 2014) dostupné z www.abb.com
- [8] SIEMENS, (online ze dne 13. 2. 2014) dostupné z www.siemens.com
- [9] TENEL ČR s.r.o., (online ze dne 17. 2. 2014) dostupné z www.tenel.cz
- [10] ZAT a.s., (online ze dne 19. 2. 2014) dostupné z www.zat.cz
- [11] SEMIKRON, (online ze dne 6. 3. 2014) dostupné z www.semikron.com
- [12] INFINEON – EUPEC,(online ze dne 7. 3. 2014) dostupné z www.infineon.com

Seznam příloh

Příloha A: Katalogový list tyristorového bloku SEMIKRON SKKT 570

Příloha B: Katalogový list tyristorového bloku EUPEC TT 570N

Příloha C: Katalogový list chladiče SEMIKRON Px 308

Příloha D: Katalogový list ventilátoru SKF 16O

SKKT 570, SKKH 570

SEMIPACK[®] 5

Thyristor / Diode Modules

SKKT 570

SKKH 570

Features

- Heat transfer through aluminium nitride ceramic insulated metal baseplate
- Precious metal pressure contacts for high reliability
- Thyristor with amplifying gate
- UL recognized, file no. E63632

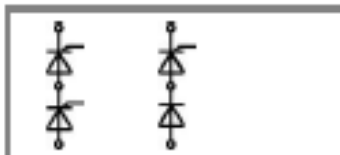
Typical Applications*

- AC motor softstarters
- Input converters for AC inverter drives
- DC motor control (e.g. for machine tools)
- Temperature control (e.g. for ovens, chemical processes)
- Professional light dimming (studios, theaters)

*) see assembly instructions

V_{RSM} V	V_{RSM} V_{DRM} V	$I_{T(RMS)} = 1000$ A (maximum value for continuous operation) $I_{T(RMS)} = 570$ A (sin. 180; $T_c = 85$ °C)		
1300	1200	SKKT 570/12 E		
1700	1600	SKKT 570/16 E	SKKH 570/16 E	
1900	1800	SKKT 570/18 E	SKKH 570/18 E	

Symbol	Conditions	Values	Units
$I_{T(RMS)}$	sin. 180; $T_c = 85$ (100) °C;	570 (435)	A
I_{TSM}	$T_{vj} = 25$ °C; 10 ms	16000	A
P _t	$T_{vj} = 135$ °C; 10 ms	15500	A
	$T_{vj} = 25$ °C; 8,3 ... 10 ms	1805000	A ² s
	$T_{vj} = 135$ °C; 8,3 ... 10 ms	1201250	A ² s
V_T	$T_{vj} = 25$ °C; $I_T = 1700$ A	max. 1,44	V
$V_{T(10)}$	$T_{vj} = 135$ °C	max. 0,78	V
r_T	$T_{vj} = 135$ °C	max. 0,32	mΩ
$I_{GD} - I_{GD}$	$T_{vj} = 135$ °C; $V_{GD} = V_{RSM}$; $V_{GD} = V_{DRM}$	max. 225	mA
t_{gd}	$T_{vj} = 25$ °C; $I_G = 1$ A; $dI_G/dt = 1$ A/μs	1	μs
t_{gr}	$V_D = 0,87 \cdot V_{DRM}$	2	μs
$(dI/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 135$ °C	max. 250	A/μs
$(dV/dt)_{cr}$	$T_{vj} = 135$ °C	max. 1000	V/μs
I_G	$T_{vj} = 135$ °C	100...200	μs
I_{sk}	$T_{vj} = 25$ °C; typ. / max.	150 / 500	mA
I_L	$T_{vj} = 25$ °C; $R_{th} = 33$ Ω; typ. / max.	300 / 2000	mA
V_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 3	V
I_{GT}	$T_{vj} = 25$ °C; d.c.	min. 200	mA
V_{GD}	$T_{vj} = 135$ °C; d.c.	max. 0,25	V
I_{GD}	$T_{vj} = 135$ °C; d.c.	max. 10	mA
$R_{T(j-c)}$	cont.; per thyristor / per module	0,069 / 0,034	KW
$R_{T(j-c)}$	sin. 180°; per thyristor / per module	0,072 / 0,036	KW
$R_{T(j-c)}$	rec. 120°; per thyristor / per module	0,077 / 0,038	KW
$R_{T(j-c)}$	per thyristor / per module	0,02 / 0,01	KW
T_{vj}		- 40 ... + 135	°C
T_{stg}		- 40 ... + 125	°C
V_{sca}	a.c. 50 Hz; r.m.s.; 1 s / 1 min.	3600 / 3000	V~
M_s	to heatlink	5 ± 15% ¹⁾	Nm
M_t	to terminals	12 ± 15%	Nm
a		5 * 9,81	m/s ²
m	approx.	1400	g
Case	SKKT	A 60b	
	SKKH	A 66b	



SKKT

SKKH

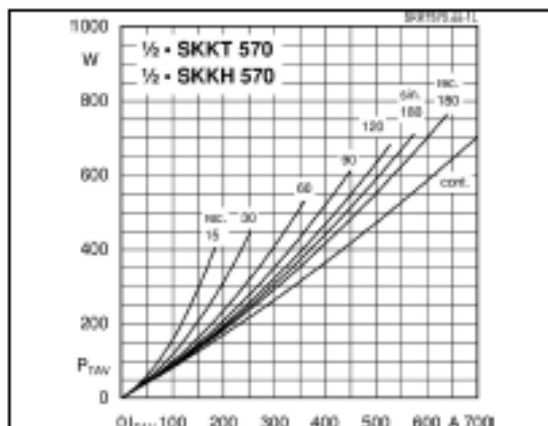


Fig. 1L Power dissipation vs. on-state current

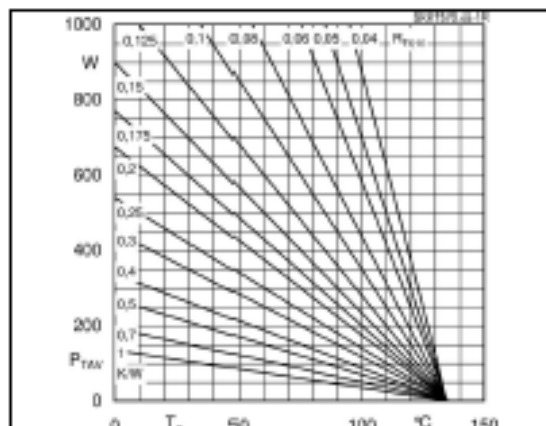


Fig. 1R Power dissipation vs. ambient temperature

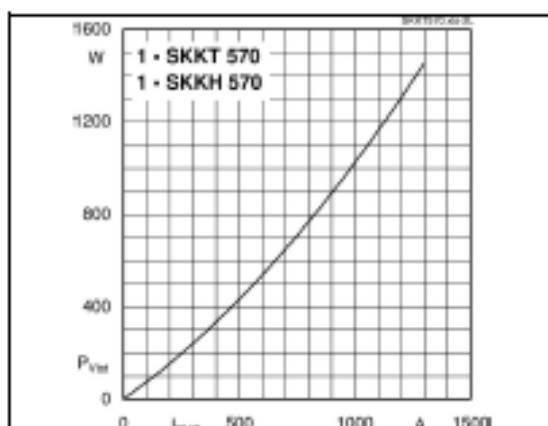


Fig. 2L Rated on-state current vs. case temperature

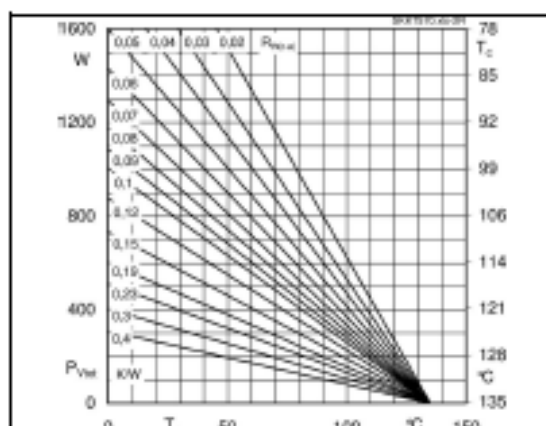


Fig. 2R Power dissipation per module vs. case temp.

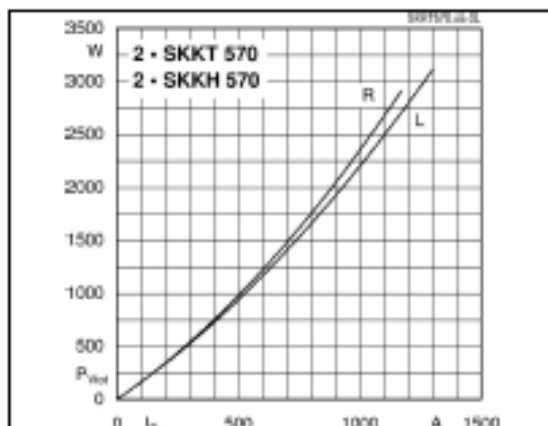


Fig. 3L Power dissipation of two modules vs. direct current

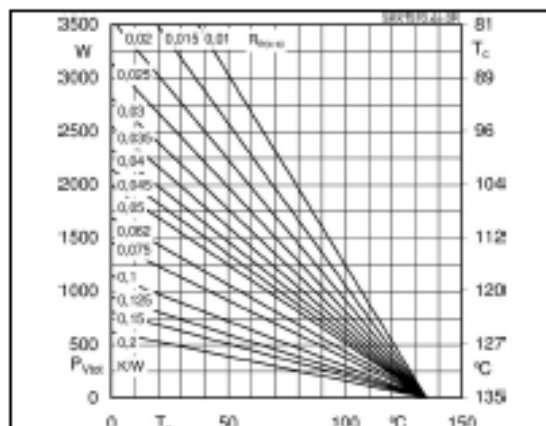


Fig. 3R Power dissipation of two modules vs. case temp.

SKKT 570, SKKH 570

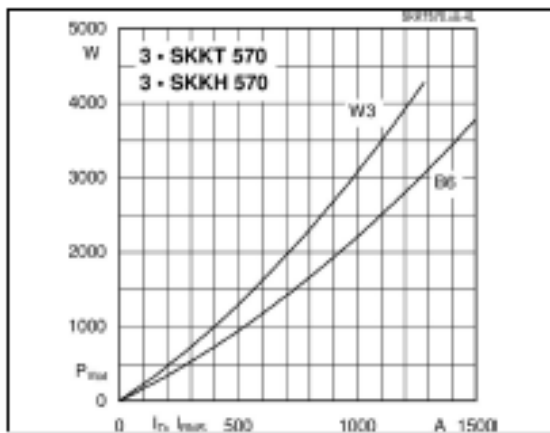


Fig. 4L: Power dissipation of three modules vs. direct and rms current

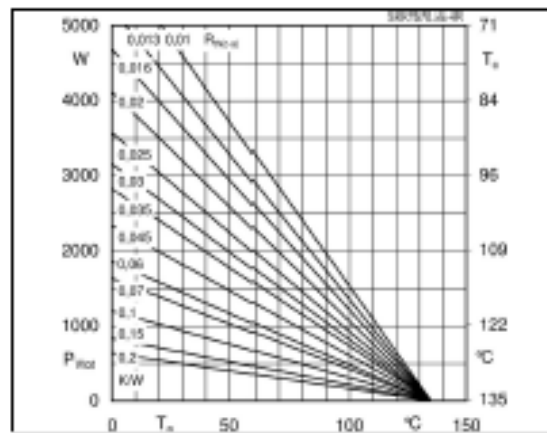


Fig. 4R: Power dissipation of three modules vs. case temp.

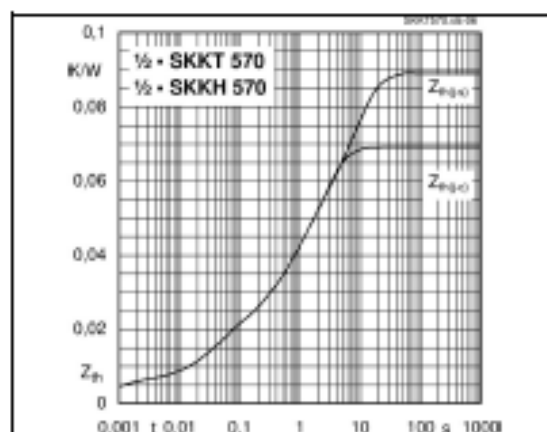


Fig. 6: Transient thermal impedance vs. time

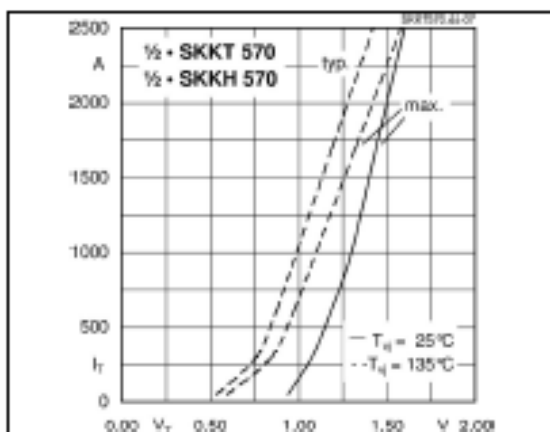


Fig. 7: On-state characteristics

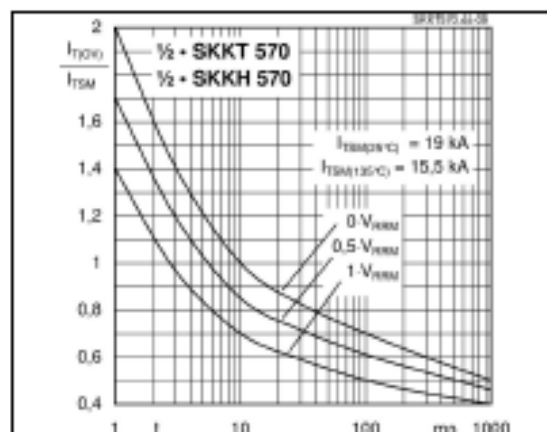
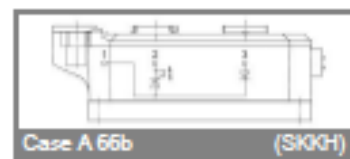
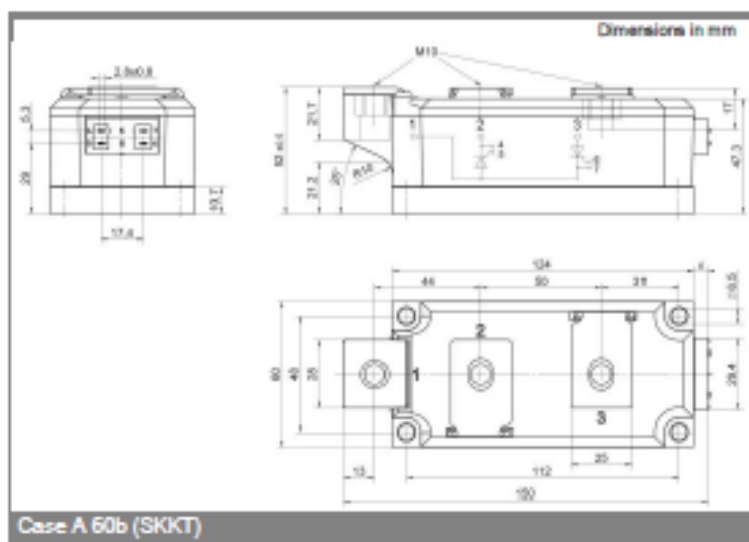
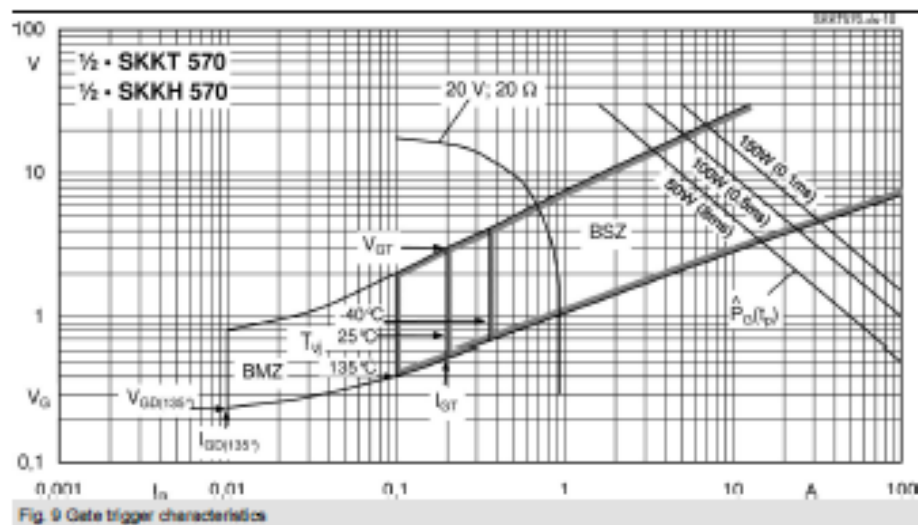


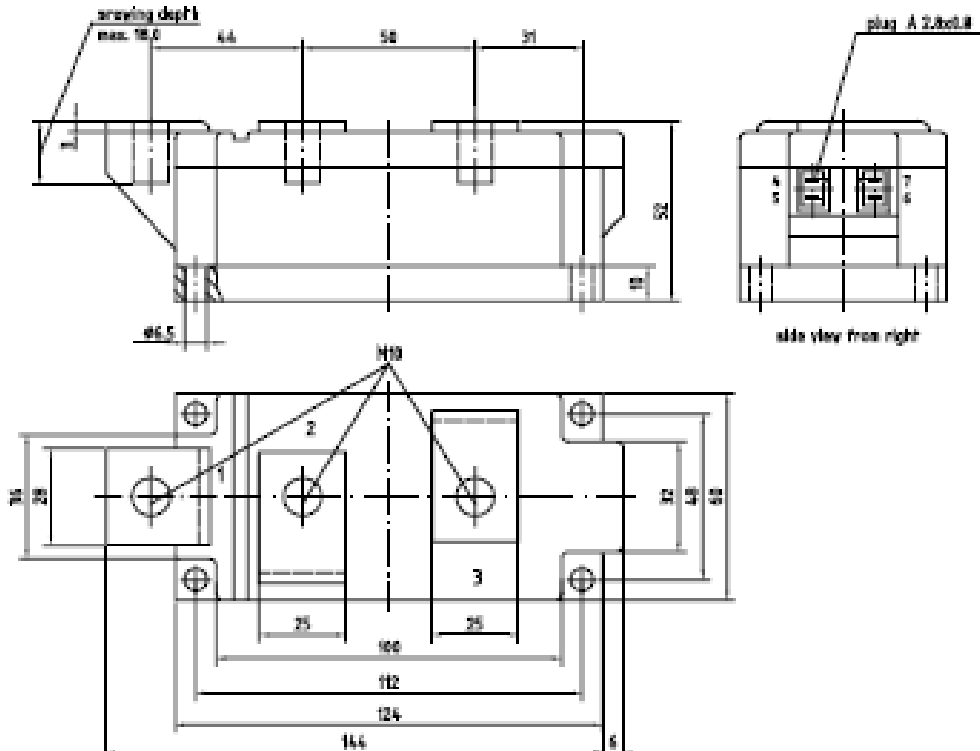
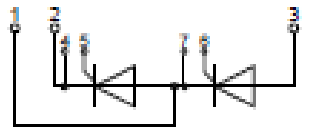
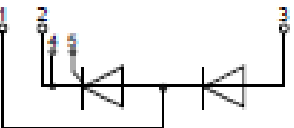
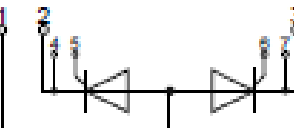
Fig. 8: Surge overload vs. time



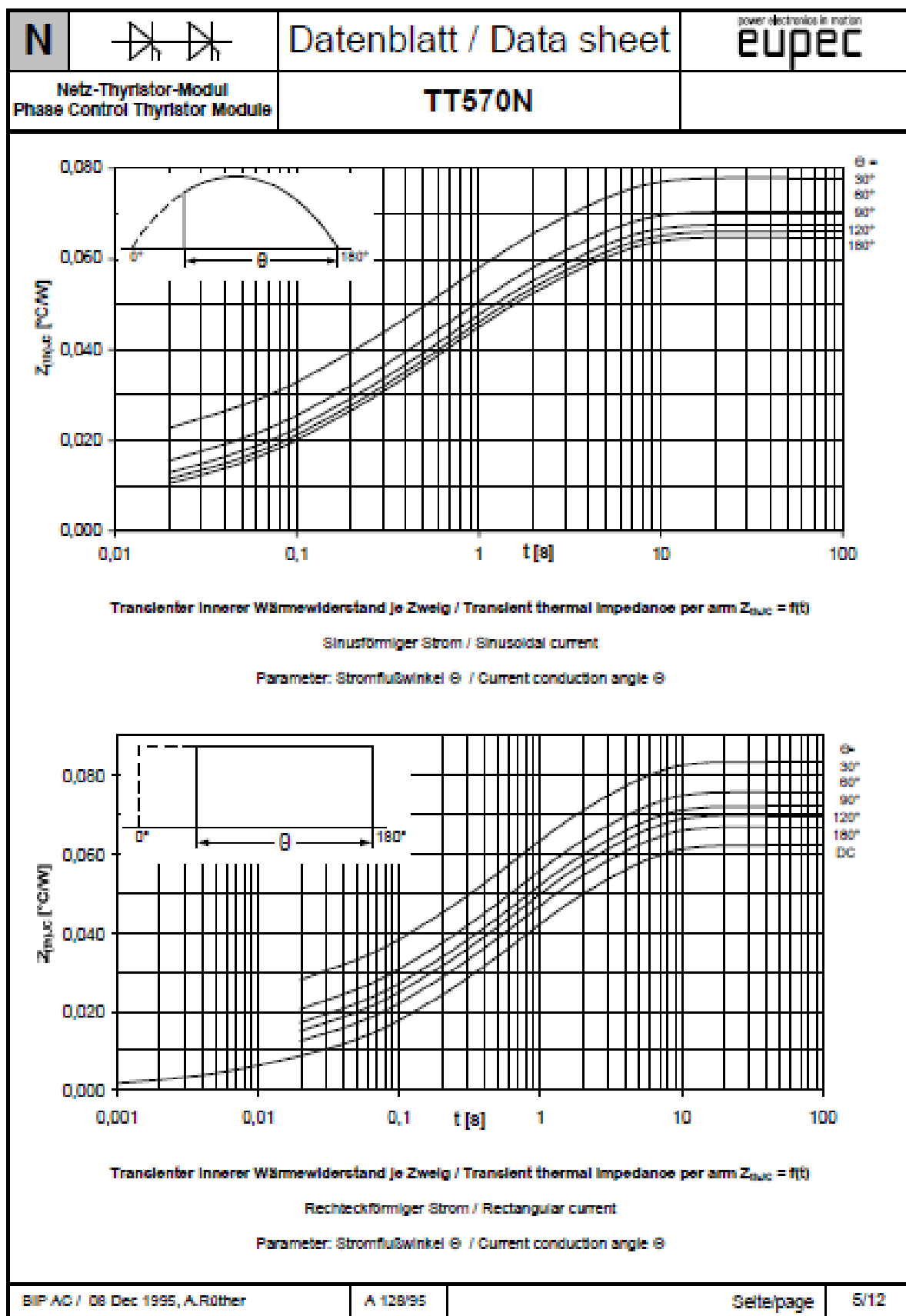
* The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. Components have to be tested for the respective application. Adjustments may be necessary. The use of SEMIKRON products in life support appliances and systems is subject to prior specification and written approval by SEMIKRON. We therefore strongly recommend prior consultation of our staff.

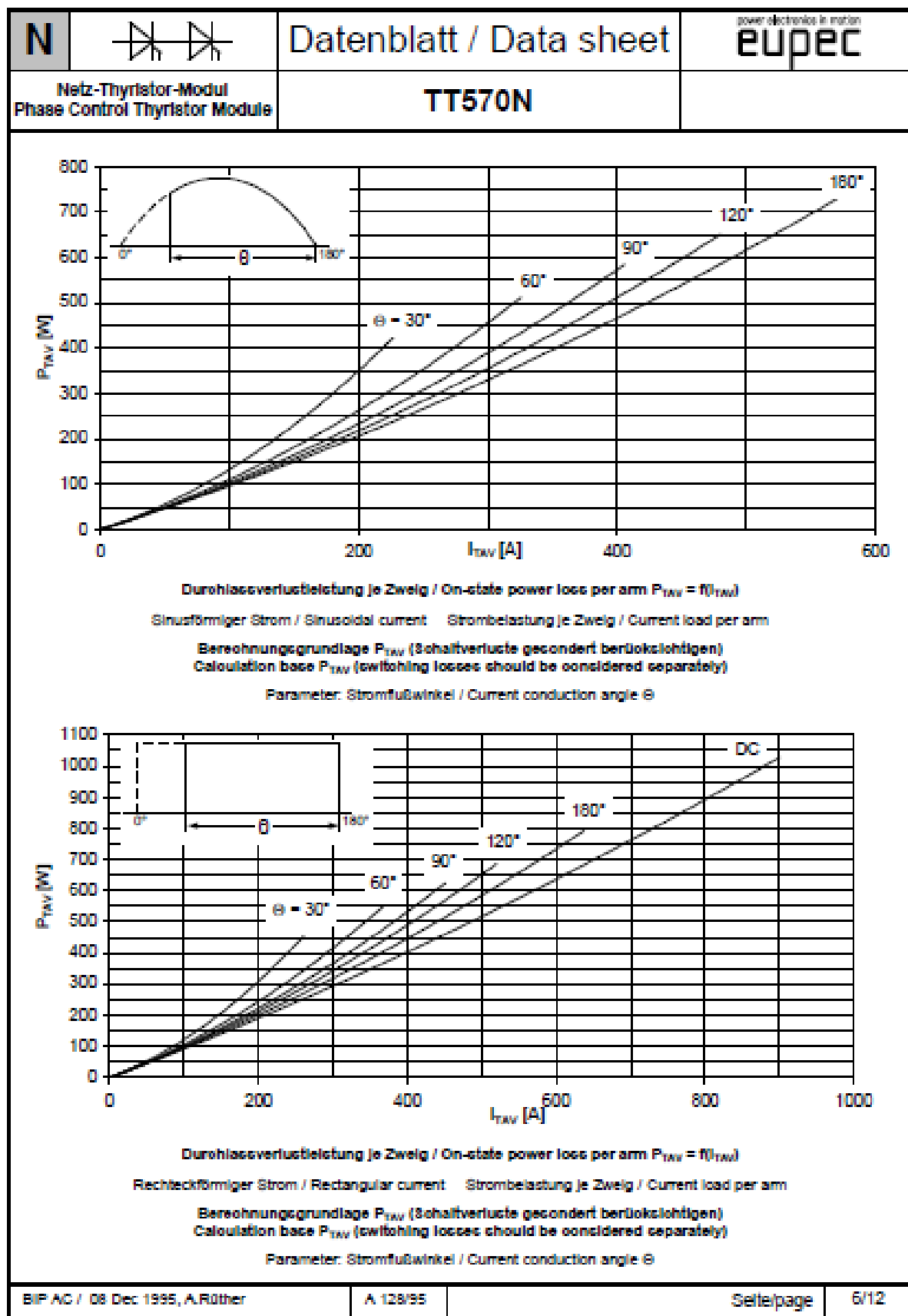
N		Datenblatt / Data sheet	power electronics in motion eupec									
Netz-Thyristor-Modul Phase Control Thyristor Module		TT570N										
TT570N TD570N TT570N...A												
Periodische Vorwärts- und Rückwärts-Spitzenspannung repetitive peak forward off-state and reverse voltages	$T_q = -40^{\circ}\text{C} \dots T_{q\text{max}}$	$V_{\text{DRM}}, V_{\text{RRM}}$	1000 1400	1200 1600 V								
Vorwärts-Stoßspitzenspannung non-repetitive peak forward off-state voltage	$T_q = -40^{\circ}\text{C} \dots T_{q\text{max}}$	V_{DRM}	1000 1400	1200 1600 V								
Rückwärts-Stoßspitzenspannung non-repetitive peak reverse voltage	$T_q = +25^{\circ}\text{C} \dots T_{q\text{max}}$	V_{RRM}	1100 1500	1300 1700 V								
Durchlaßstrom-Grenzwert maximum RMS on-state current		I_{RMS}		900 A								
Dauerstrom average on-state current	$T_c = 87^{\circ}\text{C}$	I_{TAV}		570 A								
Stoßstrom-Grenzwert surge current	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_q = T_{q\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	I_{TM}	17000 14000	A A								
Grenzlastintegral PI-value	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, t_p = 10 \text{ ms}$ $T_q = T_{q\text{max}}, t_p = 10 \text{ ms}$	PI	1445000 960000	A% A%								
Kritische Stromsteilheit critical rate of rise of on-state current	DIN IEC 747-8 $f = 50 \text{ Hz}, I_{\text{GM}} = 1 \text{ A}, dI/dt = 1 \text{ A}/\mu\text{s}$	$(dI/dt)_{\text{cr}}$		200 A/ μs								
Kritische Spannungssteilheit critical rate of rise of off-state voltage	$T_q = T_{q\text{max}}, V_D = 0,87 V_{\text{DRM}}$ 8.Kennbuchstabe / 8 th letter F	$(dV_D/dt)_{\text{cr}}$		1000 V/ μs								
Charakteristische Werte / Characteristic values												
Durchlaßspannung on-state voltage	$T_q = T_{q\text{max}}, I_T = 1700 \text{ A}$	V_T	max.	1,53 V								
Schleuenspannung threshold voltage	$T_q = T_{q\text{max}}$	V_{TO}		0,9 V								
Einschleifwiderstand slope resistance	$T_q = T_{q\text{max}}$	r_T		0,27 m Ω								
Zündstrom gate trigger current	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, V_D = 6 \text{ V}$	I_{GT}	max.	250 mA								
Zündspannung gate trigger voltage	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, V_D = 6 \text{ V}$	V_{GT}	max.	2,2 V								
Nicht zündender Steuerstrom gate non-trigger current	$T_q = T_{q\text{max}}, V_D = 6 \text{ V}$ $T_q = T_{q\text{max}}, V_D = 0,5 V_{\text{DRM}}$	I_{GO}	max. max.	10 5 mA								
Nicht zündende Steuerspannung gate non-trigger voltage	$T_q = T_{q\text{max}}, V_D = 0,5 V_{\text{DRM}}$	V_{GO}	max.	0,25 V								
Haltestrom holding current	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, V_D = 6 \text{ V}, R_{\text{th}} = 5^{\circ}\text{C}$	I_{H}	max.	300 mA								
Einschaltstrom latching current	$T_q = 25^{\circ}\text{C}, V_D = 6 \text{ V}, R_{\text{th}} \geq 10^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{GM}} = 1 \text{ A}, dI/dt = 1 \text{ A}/\mu\text{s}, t_p = 20 \mu\text{s}$	I_L	max.	1500 mA								
Vorwärts- und Rückwärts-Spernstrom forward off-state and reverse current	$T_q = T_{q\text{max}}$ $V_D = V_{\text{DRM}}, V_R = V_{\text{RRM}}$	I_S, I_{RS}	max.	140 mA								
Zündverzögerung gate controlled delay time	DIN IEC 747-8 $T_q = 25^{\circ}\text{C}, I_{\text{GM}} = 1 \text{ A}, dI/dt = 1 \text{ A}/\mu\text{s}$	t_{gr}	max.	4 μs								
<table><tr><td>prepared by:</td><td>C. Drilling</td><td>date of publication:</td><td>19.12.02</td></tr><tr><td>approved by:</td><td>J. Novotny</td><td>revision:</td><td>1</td></tr></table>					prepared by:	C. Drilling	date of publication:	19.12.02	approved by:	J. Novotny	revision:	1
prepared by:	C. Drilling	date of publication:	19.12.02									
approved by:	J. Novotny	revision:	1									
BIP AC / 08 Dec 1995, A.Röther		A 128/95	Seite/page	1/12								

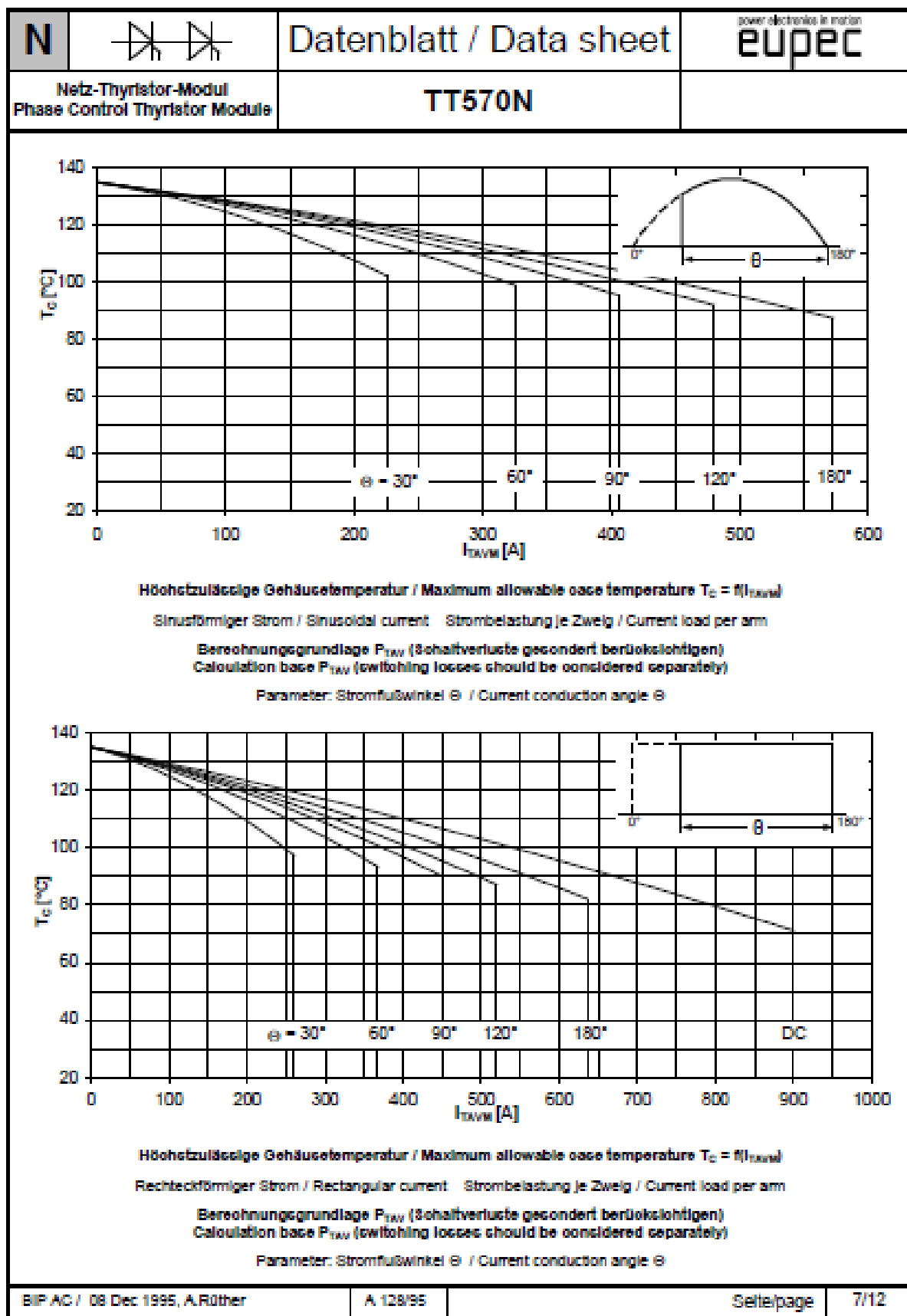
N		Datenblatt / Data sheet	power electronics in motion eupec	
Netz-Thyristor-Modul Phase Control Thyristor Module		TT570N		
Elektrische Eigenschaften / Electrical properties Charakteristische Werte / Characteristic values				
Freiwerdzeit circuit commutated turn-off time	$T_q = T_{q, max}, I_{HT} = I_{T, max}$ $V_{RM} = 100 \text{ V}, V_{TOM} = 0,87 V_{TOM}$ $dv/dt = 20 \text{ V}/\mu\text{s}, -di/dt = 10 \text{ A}/\mu\text{s}$ 5. Kennbuchstabe / 5 th letter O	I_q	typ.	250 μs
Isolations-Prüfspannung insulation test voltage	RMS, $f = 50 \text{ Hz}, t = 1 \text{ min}$ RMS, $f = 50 \text{ Hz}, t = 1 \text{ sec}$	V_{iso}		3,0 kV 3,8 kV
Thermische Eigenschaften / Thermal properties				
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro Modul / per Module, $\theta = 180^\circ \sin$ pro Zweig / per arm, $\theta = 180^\circ \sin$ pro Modul / per Module, DC pro Zweig / per arm, DC	R_{thJC}	max. max. max. max.	0,0325 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 0,0650 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 0,0310 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 0,0620 $^\circ\text{C}/\text{W}$
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per Module pro Zweig / per arm	R_{thCH}	max. max.	0,01 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 0,02 $^\circ\text{C}/\text{W}$
Höchstzulässige Sperrschichttemperatur maximum junction temperature		T_{jmax}		135 $^\circ\text{C}$
Betriebstemperatur operating temperature		T_{op}		-40...+135 $^\circ\text{C}$
Lagertemperatur storage temperature		T_{stg}		-40...+140 $^\circ\text{C}$
Mechanische Eigenschaften / Mechanical properties				
Gehäuse, siehe Anlage case, see annex				Seite 3 page 3
Si-Element mit Druckkontakt Si-pellet with pressure contact				
Innere Isolierung internal insulation				AlN
Anzugsdrehmoment für mechanische Anschlüsse mounting torque	Toleranz / Tolerance $\pm 15\%$	M1		8 Nm
Anzugsdrehmoment für elektrische Anschlüsse terminal connection torque	Toleranz / Tolerance $\pm 10\%$	M2		12 Nm
Steueranschlüsse control terminals	DIN 48 244			A 2,8 x 0,8
Gewicht weight		G	typ.	1500 g
Kriechstrecke creepage distance				19 mm
Schwingfestigkeit vibration resistance	$f = 50 \text{ Hz}$			50 m/s^2
	file-No.			E 83338
Mit diesem Datenblatt werden Halbleiterbauelemente spezifiziert, jedoch keine Eigenschaften zugesichert. Es gilt in Verbindung mit den zugehörigen technischen Erläuterungen. This data sheet specifies semiconductor devices, but promises no characteristics. It is valid in combination with the belonging technical notes.				
BIP AC / 08 Dec 1995, A.Rüther		A 128/95	Seite/page	2/12

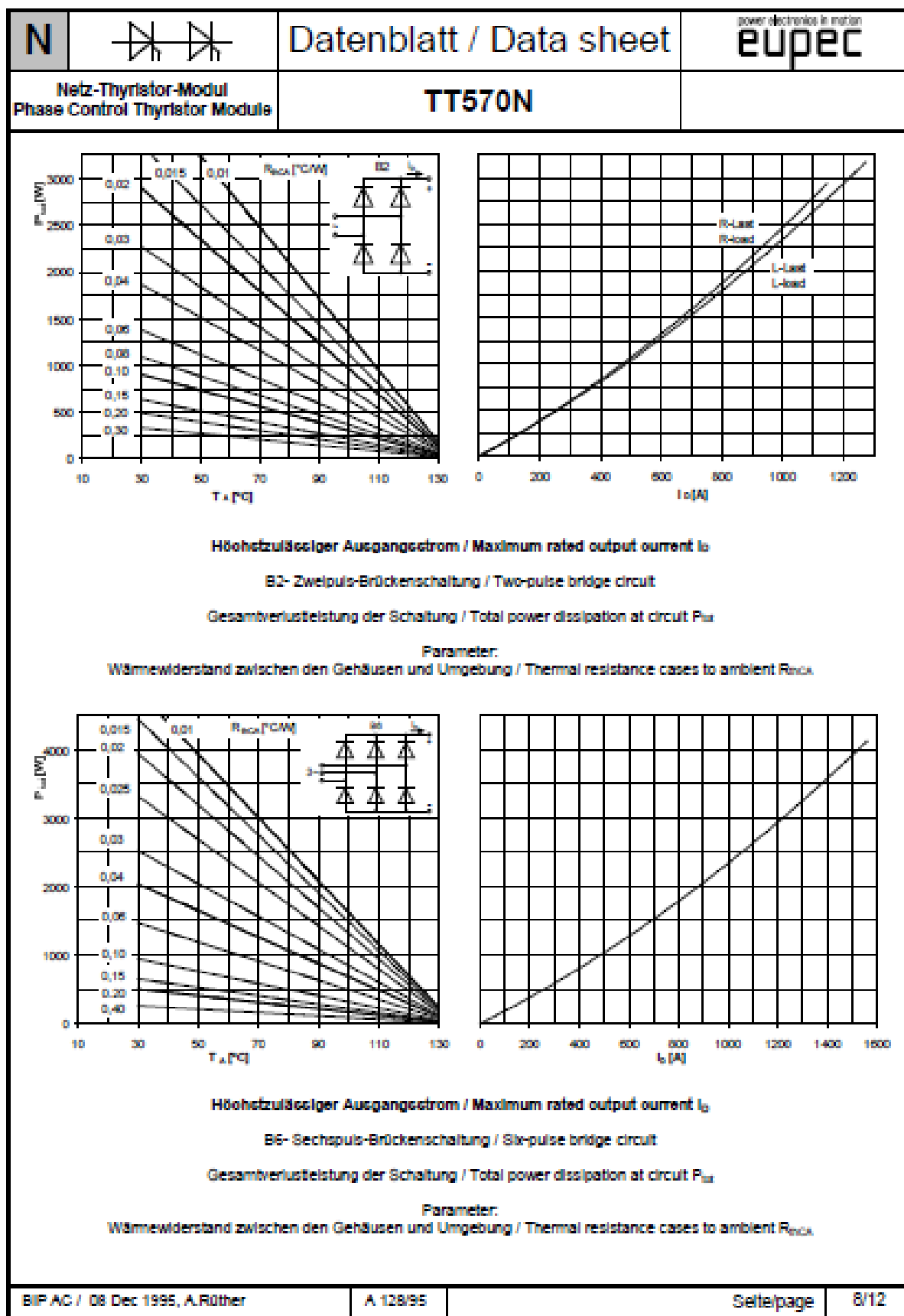
N		Datenblatt / Data sheet	power electronics in motion eupec
Netz-Thyristor-Modul Phase Control Thyristor Module		TT570N	
			
 TT	 TD	 TT-A	
BIP AG / 08 Dec 1995, A.Röther	A 128/95	Seite/page	3/12

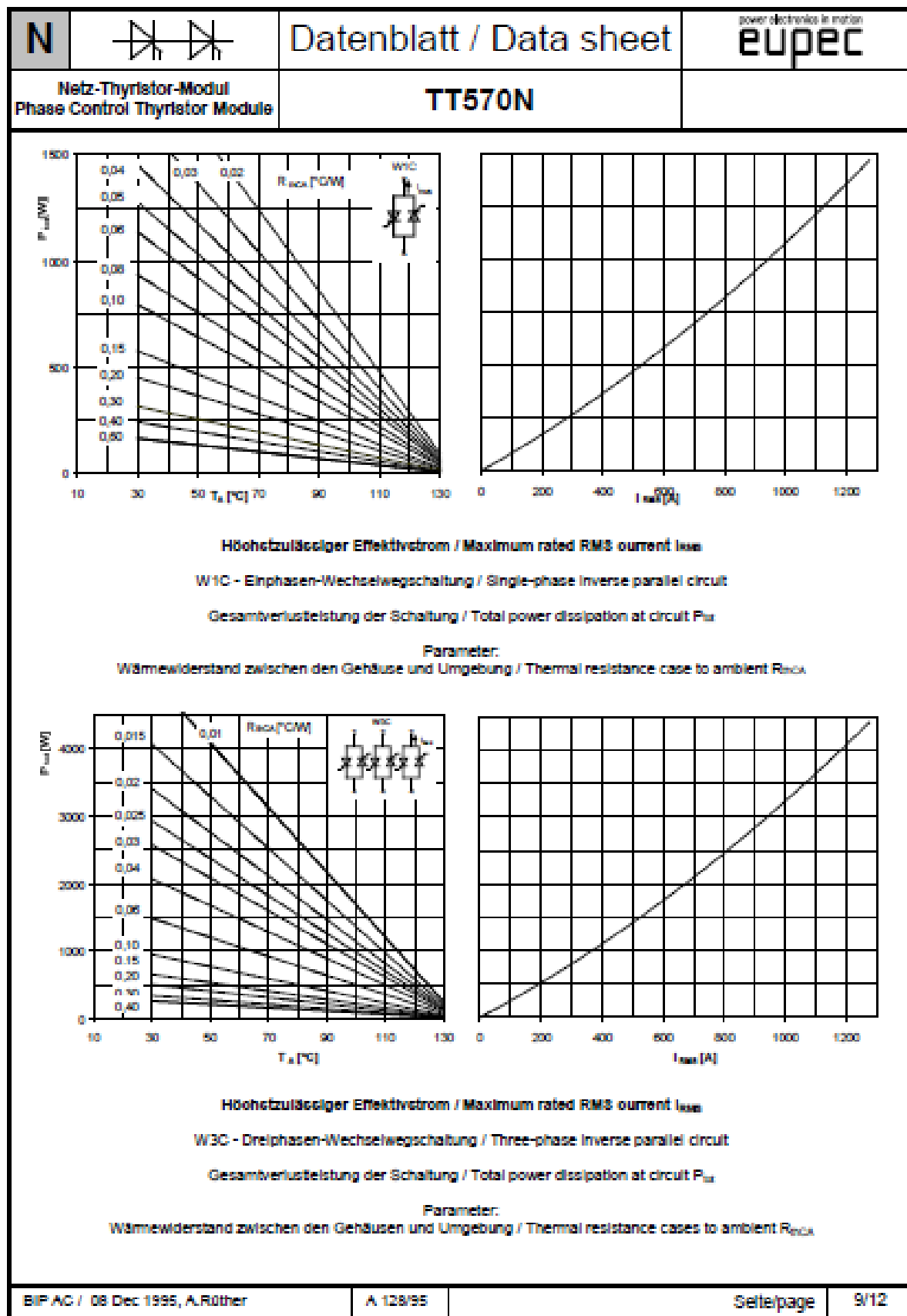
N		Datenblatt / Data sheet	power electronics in motion eupec																								
Netz-Thyristor-Modul Phase Control Thyristor Module		TT570N																									
Analytische Elemente des transienten Wärmewiderstandes Z_{thJC} für DC Analytical elements of transient thermal impedance Z_{thJC} for DC <table><tr><td>Pos. n</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr><tr><td>R_{thn} [°C/W]</td><td>0,00137</td><td>0,00486</td><td>0,0114</td><td>0,0223</td><td>0,0221</td><td></td><td></td></tr><tr><td>τ_n [s]</td><td>0,00076</td><td>0,0086</td><td>0,101</td><td>0,56</td><td>3,12</td><td></td><td></td></tr></table> Analytische Funktion / Analytical function:$Z_{thJC} = \sum_{n=1}^{n_{max}} R_{thn} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right)$				Pos. n	1	2	3	4	5	6	7	R_{thn} [°C/W]	0,00137	0,00486	0,0114	0,0223	0,0221			τ_n [s]	0,00076	0,0086	0,101	0,56	3,12		
Pos. n	1	2	3	4	5	6	7																				
R_{thn} [°C/W]	0,00137	0,00486	0,0114	0,0223	0,0221																						
τ_n [s]	0,00076	0,0086	0,101	0,56	3,12																						
Luftselbstkühlung / Natural cooling 1 Modul pro Kühlkörper / 1 module per heatsink Kühlkörper / Heatsink type: KM17 (120W) Analytische Elemente des transienten Wärmewiderstandes Z_{thCA} Analytical elements of transient thermal impedance Z_{thCA} <table><tr><td>Pos. n</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr><tr><td>R_{thn} [°C/W]</td><td>0,00944</td><td>0,0576</td><td>0,568</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>τ_n [s]</td><td>2,61</td><td>28,1</td><td>1300</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>				Pos. n	1	2	3	4	5	6	7	R_{thn} [°C/W]	0,00944	0,0576	0,568					τ_n [s]	2,61	28,1	1300				
Pos. n	1	2	3	4	5	6	7																				
R_{thn} [°C/W]	0,00944	0,0576	0,568																								
τ_n [s]	2,61	28,1	1300																								
Verstärkte Kühlung / Forced cooling 1 Modul pro Kühlkörper / 1 module per heatsink Kühlkörper / Heatsink type: KM17 (Papst 4650N) Analytische Elemente des transienten Wärmewiderstandes Z_{thCA} Analytical elements of transient thermal impedance Z_{thCA} <table><tr><td>Pos. n</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr><tr><td>R_{thn} [°C/W]</td><td>0,0064</td><td>0,0566</td><td>0,168</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>τ_n [s]</td><td>4,1</td><td>24,7</td><td>395</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table> Analytische Funktion / Analytical function:$Z_{thCA} = \sum_{n=1}^{n_{max}} R_{thn} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right)$				Pos. n	1	2	3	4	5	6	7	R_{thn} [°C/W]	0,0064	0,0566	0,168					τ_n [s]	4,1	24,7	395				
Pos. n	1	2	3	4	5	6	7																				
R_{thn} [°C/W]	0,0064	0,0566	0,168																								
τ_n [s]	4,1	24,7	395																								
BIP AC / 08 Dec 1995, A.Röther		A 128/95	Seite/page 4/12																								

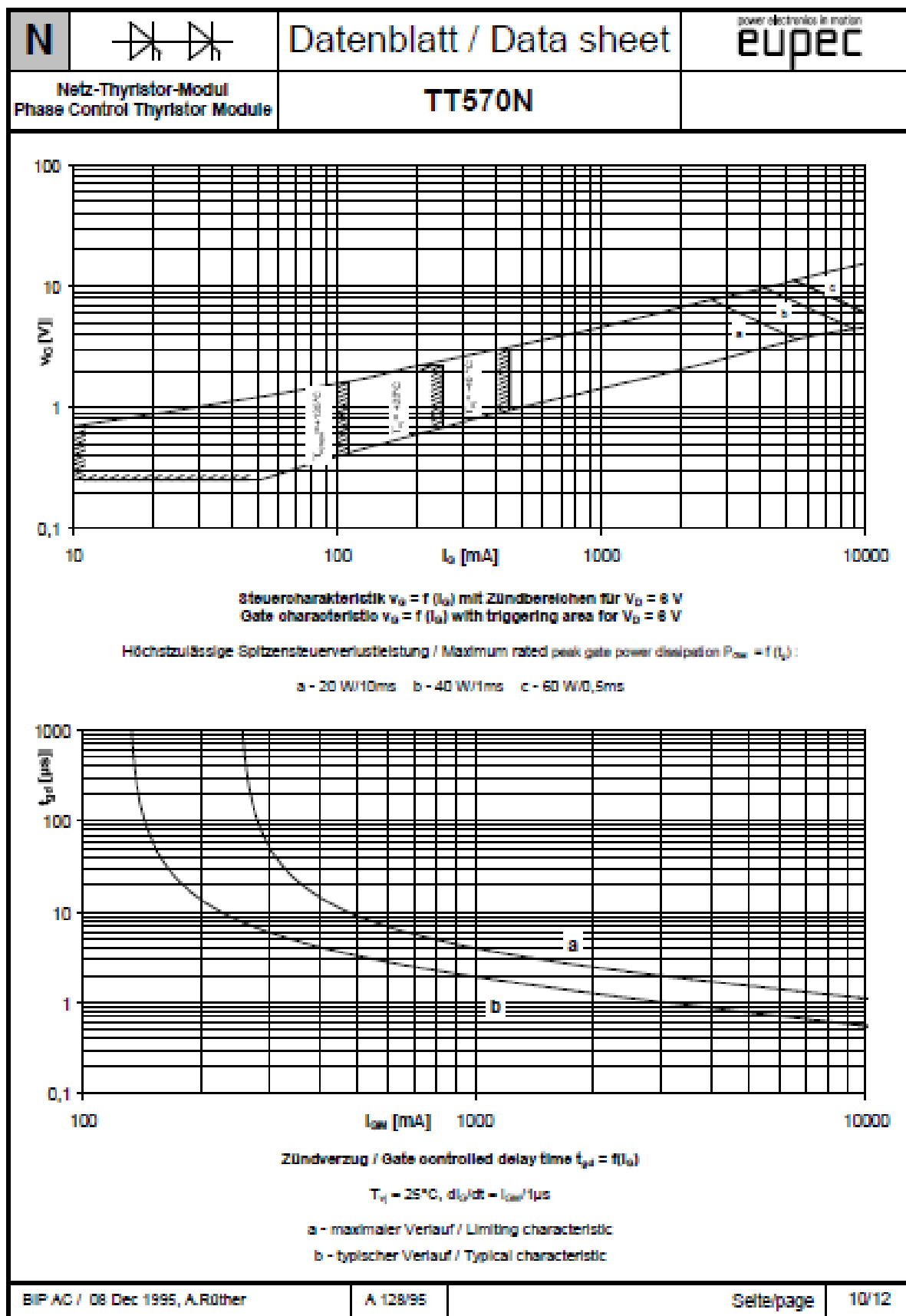


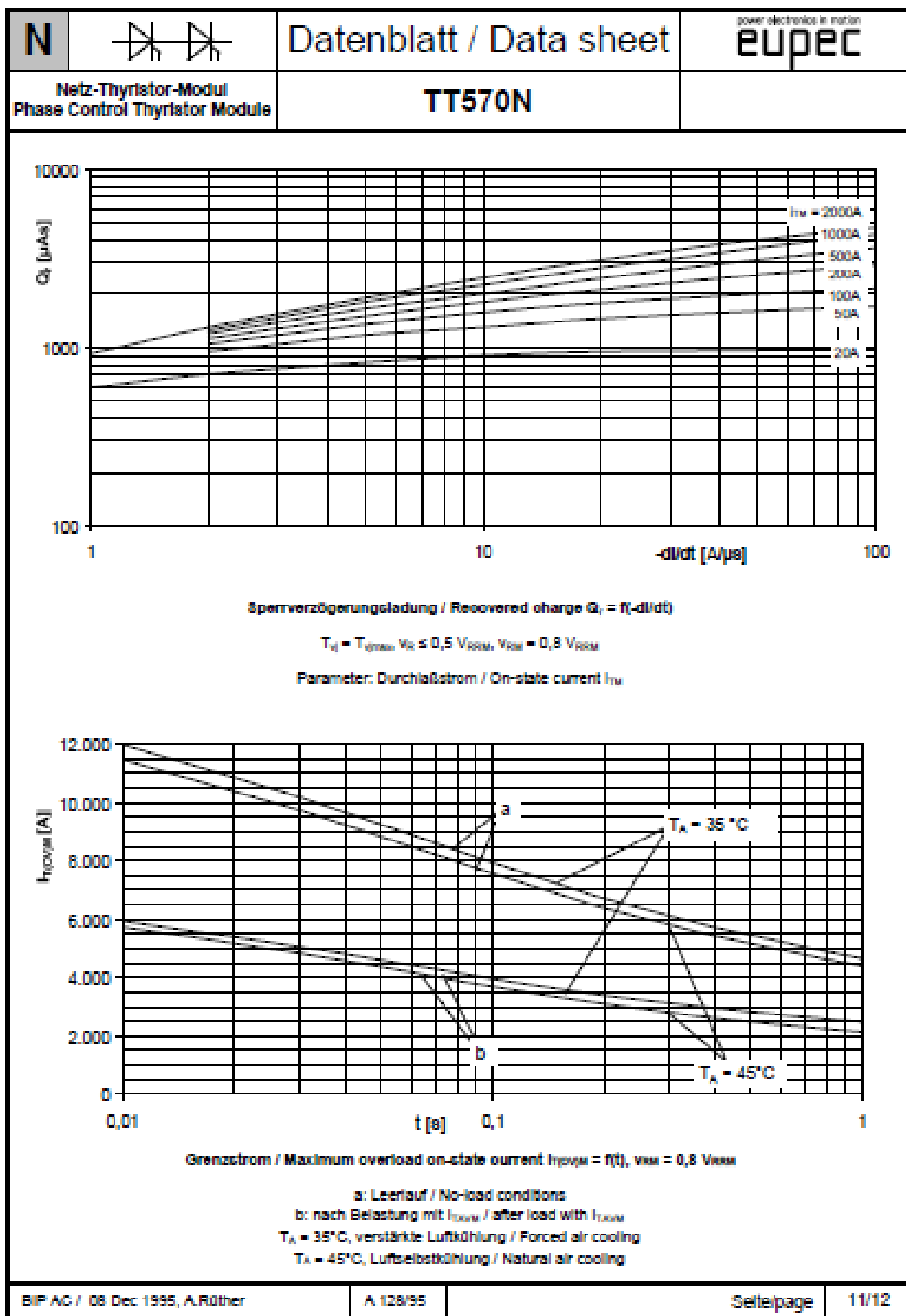


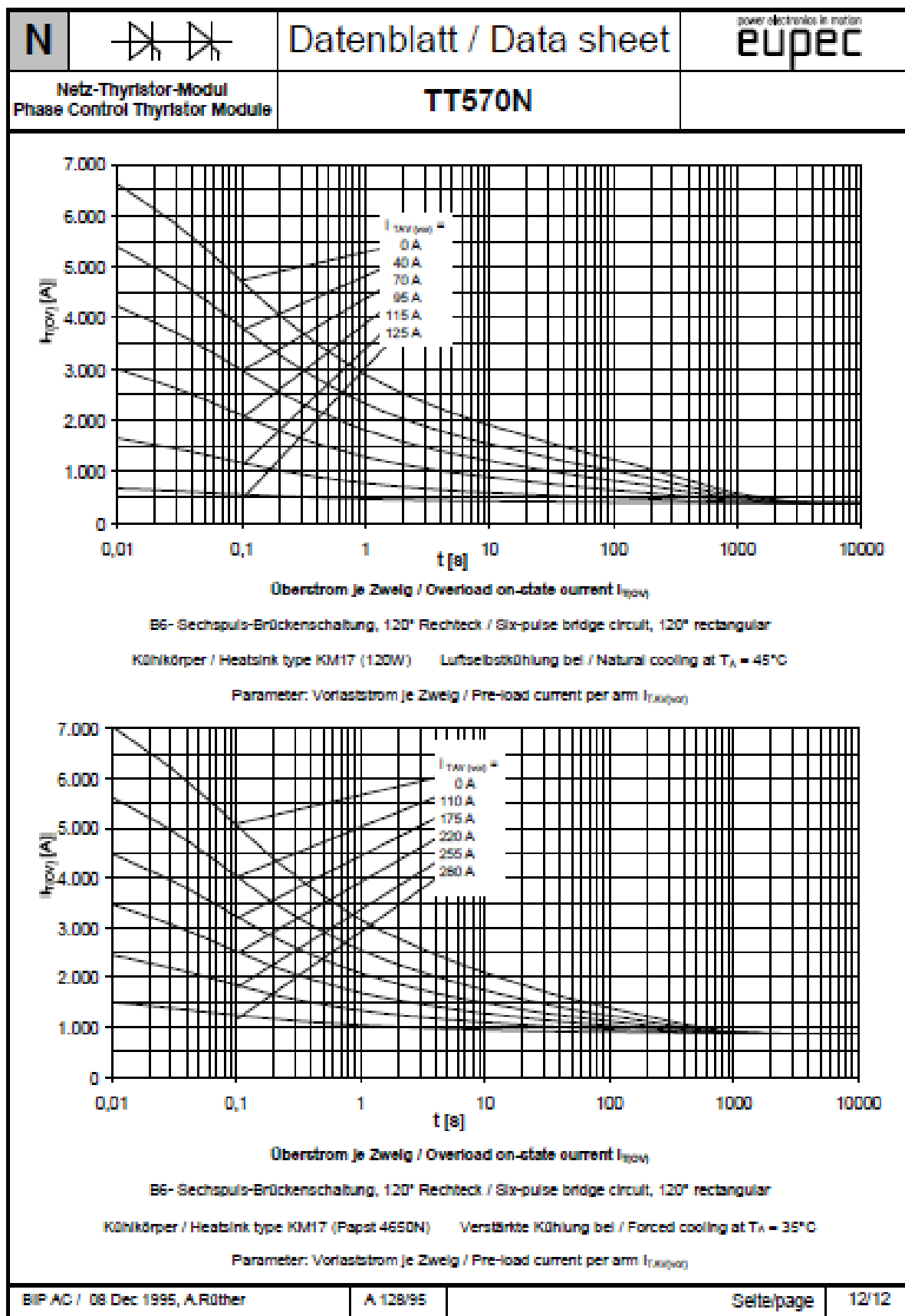




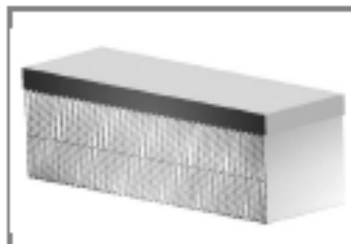








Px 308



Heatsink

For all isolated power modules

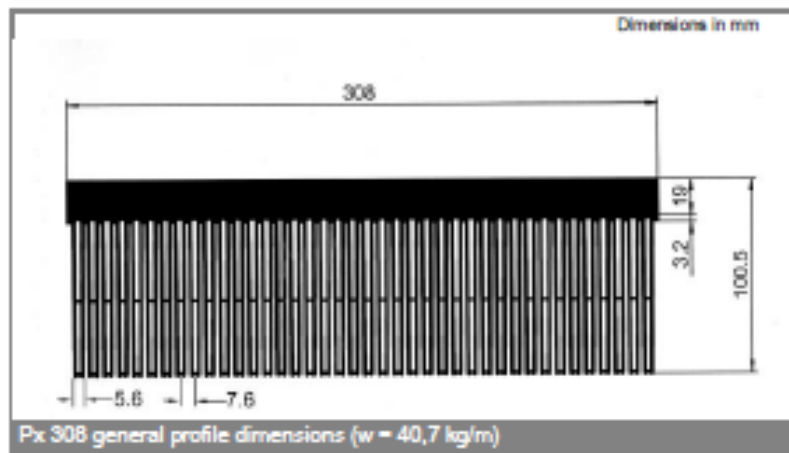
Px 308

Publish Data

Features

- Intended for all isolated power modules: SEMIPACK, SEMITRANS, SEMIPONT, SIGM, SEMIX, SKiP
- Excellent efficiency/volume ratio
- Available in various lengths

Standard lengths	n	b / d Ø mm	Thermal resistance R_{thja} K/W	Thermal resistance K/W	w kg
Px 308/300F with SEMITRANS 3	8		0,0284		12,2
+ Fan SKF 160	8		0,0219		



Radial Fans

Types	Ident No.		f Hz	V ₁ V	Max volume m³/h	P W	T _{amb} max °C	Weight kg	Noise dB
SKF 16 A-230-01	VE001030 ¹⁾		50 / 60	230	615 / 575	135 / 154	50 / 40	3,6	55 / 57
SKF 16 A-230-11	30756640		50 / 60	230	615 / 575	135 / 154	50 / 40	3,6	55 / 57
SKF 16 B-230-01	30119362		50 / 60	230	610 / 565	170 / 197	40	3,6	58 / 57
SKF 16 O-230-01	30119366		50	230	1000	300	40	4,4	

¹⁾ without air duct

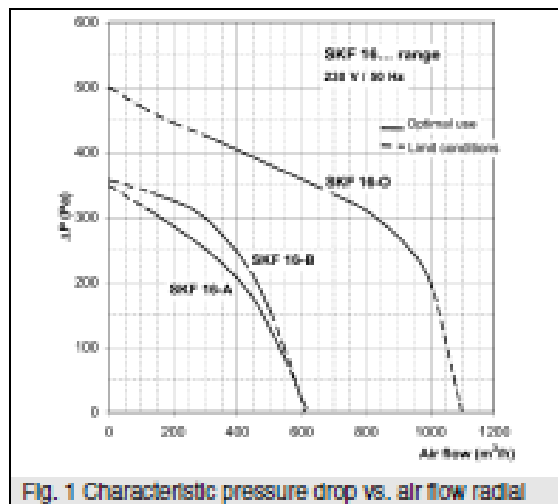
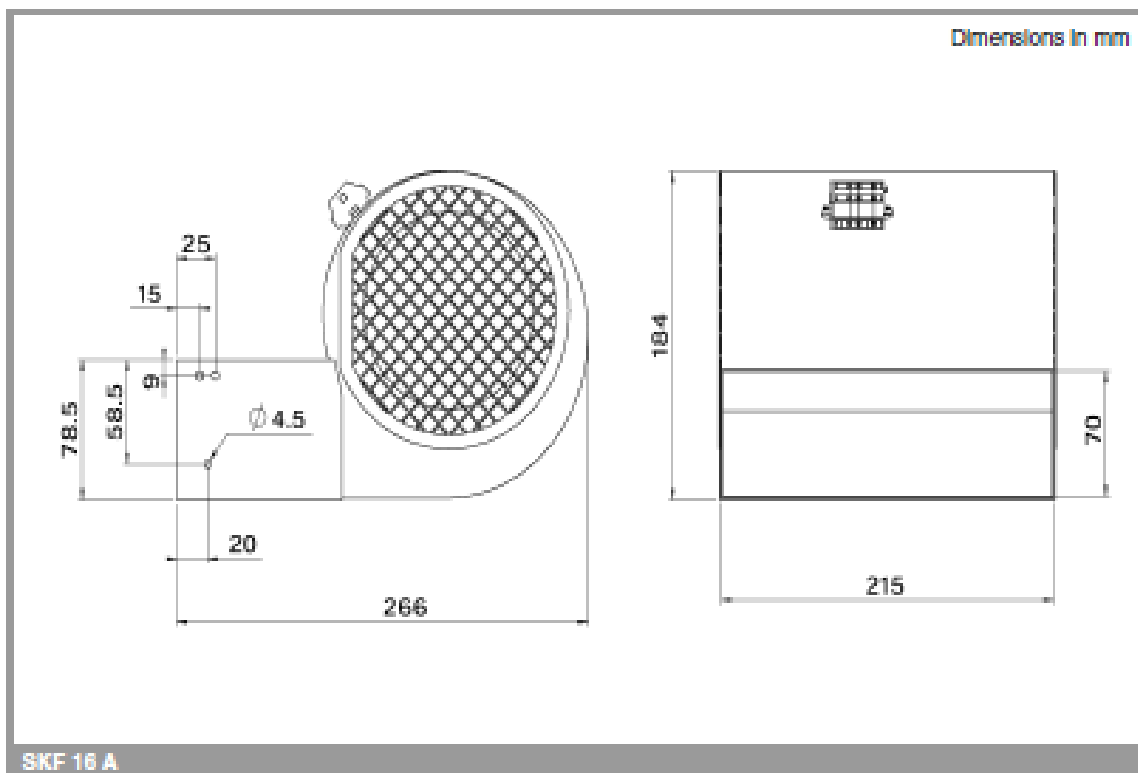


Fig. 1 Characteristic pressure drop vs. air flow radial

Features

- Low noise level
- Long-life, maintenance free ball bearings
- Blowing fan
- Integrated capacitor (when needed)



Radial Fans

