

# PROBLÉMY CHLADENIA SYNCHRÓNNYCH GENERÁTOROV TEPELNÝCH ELEKTRÁRNÍ

## (PROBLEMS OF COOLING SYSTEMS IN STEAM ELECTRO POWER STATIONS GENERATORS)

Marcel HEŠKO

Slovenské Elektrárne a.s., Elektrárne Vojany, závod Elektrárne Vojany, závod, 076 43 Vojany, Slovenská republika

### SUMMARY

*This article is writing about the problems of cooling systems for generators, which are used in Electro Power station in Vojany. We are designed new automatic temperature regulation by used a mathematic model. This automatic temperature regulation helps to improve a temperature conditions in generator and bring also economical benefit.*

**Keywords:** generator, cooling, automatic cooling system

### 1. ÚVOD

Rekonštrukcia a uvedenie bloku 5 a 6 Elektrárne Vojany 1 do prevádzky priniesla zo sebou veľké množstvo nových zariadení, technológií a automatizácie, no samozrejme aj problémov. Jedným z problémov je nedoriešený systém chladenia generátorov dodaných v rámci rekonštrukcie. Problémy spojené s chladením boli podobne aj u starých typov generátorov doposiaľ používaných v tepelných elektrárnach. Je známe že izolácia vinutia je z hľadiska spoľahlivosti a životnosti jednou z najcitlivejších častí elektrického stroja. Existuje celá rada faktorov, ktorá ovplyvňuje jej životnosť. Medzi najdôležitejšie z nich patrí teplota, preto je dôležité, aby chladiaci systém stroja bol správne navrhnutý, a aby jeho činnosť bola maximálne spoľahlivá. Článok popisuje konkrétny prípad úpravy chladenia generátora a jej prínos.

### 2. CHLADENIE GENERÁTORA

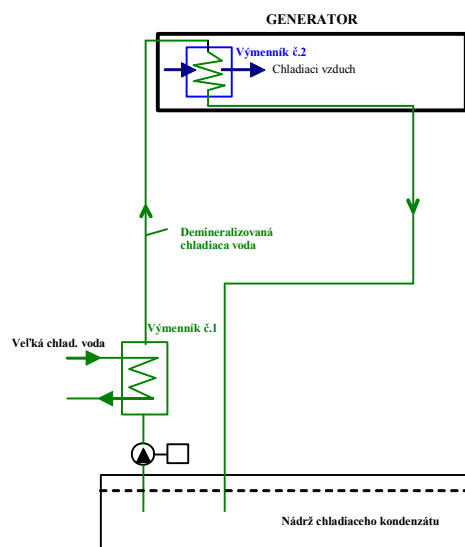
Generátor je synchronný trojfázový typu TFP-110-2/13 je určený na výrobu elektrickej energie pri priamom spojení s parnou turbínou.

Jeho základné technické parametre sú nasledovné:

Výkon celkový (kVA)	137500
Výkon činný (kW)	110000
Napätie (V)	13800
Prúd statora (A)	5753
Prúd rotora (vypočítaný), (A)	1486
Napätie rotora (vypočítané) (V)	188
Účinník	0,8
Koeficient účinnosti (%)	98,5

Generátor je chladený vzduchom, ktorý v ňom cirkuluje pôsobením dvoch axiálnych ventilátorov namontovaných na hriadeli rotora. Chladiaci vzduch sa ochladzuje v štyroch chladičoch umiestnených po bokoch telesa statora. Ochladený vzduch sa vracia späť k axiálnym ventilátorom. Chladičmi vzduchu prúdi voda, ktorá je tlačaná do uzavretého okruhu prostredníctvom jedného z čerpadiel, druhé čerpadlo

tvorí plnohodnotný zások. Chladiaca voda uzavretého okruhu (viď obr. 1) je chladená riečnou vodou prostredníctvom výmenníkov tepla. Ohriata voda sa po tepelnej výmene v telese generátora spätne vracia do nádrže demineralizovanej chladiacej vody. Regulácia teploty generátora bola obmedzená, len na ručnú manipuláciu s ventilmi jednotlivých chladičov.



**Obr. 1** Zjednodušená schéma chladenia  
**Fig. 1** Simplified diagram of generator cooling system

### 3. PROBLÉMY CHLADENIA

Tepelné skúšky generátora, ktoré boli vykonané v novembri roku 2000 po uvedení blokov do prevádzky, odhalili nasledovné nedostatky chladiaceho systému generátora:

1. Chladiče vzduchu nezabezpečujú výrobcom stanovenú hodnotu menovitej teploty chladiaceho vzduchu ( $T_n = 40^\circ\text{C}$ ). Teplota studeného vzduchu bola pri skúškach prekročená o  $11^\circ\text{C}$ .
2. Nebol dosiahnutý nominálny prietok  $450\text{ m}^3/\text{h}$ , ale len  $420\text{ m}^3/\text{h}$ .

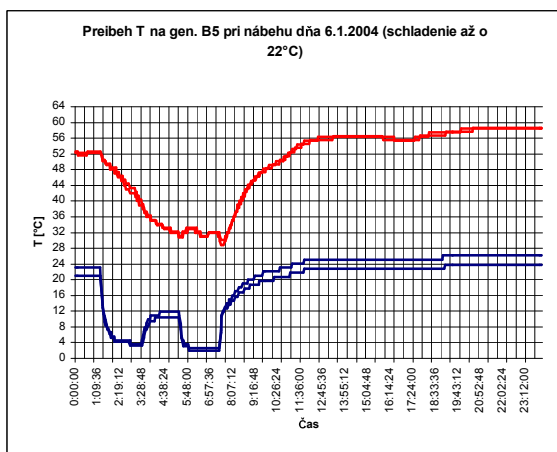
3. Teplota ohriateho vzduchu v generátore pri menovitej teplote chladiaceho vzduchu dosahuje hraničnú hodnotu 85°C.

4. Chladiče nespĺňajú požiadavku objednávateľa 30% rezervy.

Na základe meraní počas tepelných skúšok som zostavil tabuľku (viď Tab. 1) stredných teplôt chladiacich médií vody a vzduch pre tri najčastejšie vyskytujúce sa výkonové hladiny generátora (44, 80, 110MW). Výkonové hladiny som stanovil na základe denných diagramov zaťaženia blokov.

Ps [kWh]	1248	1417	1635
Výkon [MW]	44	80	110
T ohriaty vzduch $T_{vz,i}$ [°C]	66,7	72,5	82,4
T studený vzduch $T_{vz,e}$ [°C]	32,7	34,4	38,1
$\Delta T$ ohr. vzd. - stu. vzd. $\Delta T_{vz}$ [°C]	34	38,1	44,3
T ohriata voda $T_{dmv,e}$ [°C]	19,9	21,3	22,8
T studená voda $T_{dmv,i}$ [°C]	17	18	19
$\Delta T$ ohriata voda - studená voda $\Delta T_{dmv}$ [°C]	2,9	3,3	3,8
$\Delta T$ studený vzduch - studená voda $T_{vz,e} - dmv,i$ [°C]	15,7	16,4	19,1

Tab. 1 Tabuľka stredných hodnôt  
Tab. 1 Table of the averages values



Legenda: - T studeného vzduchu, - T vinutia

Obr. 2 Priebeh teplôt na gen. pri nábehu chladienia  
Fig. 2 Temperature development during switching on of the generator cooling system

Z prevádzky generátora vyplynuli ďalšie nedostatky: teplotné výkyvy pri zmenách výkonu počas prevádzky. Pri nabíjaní bloku dochádzalo po zapnutí čerpadla chladienia generátora k podchladeniu vinutia generátora studeným vzduchom, ktorý je

v chladičoch chladený plným prietokom chladiacej vody (viď obr. 2).

Naopak po odstavení generátora je buď chladenie maximálne (plný prietok chladiacej vody), respektíve po vypnutí čerpadla sa chladenie odstaví a dochádza k akumulácii tepelnej energie v telese generátora. Regulácia teploty generátora je dôležitá pri rôznych výkonoch bloku, čo vyplýva z jeho regulačného rozsahu, ktorý je v rozmedzí 44 MW až 110 MW.

Spomínané nedostatky nás prinútili k návrhu automatickej regulácie teploty generátora, založenej na prepadovej regulácii vody v chladiacom okruhu generátora. Blížší popis tejto regulácie je popísaný v článku Problémy chladenia generátorov tepelných elektrární, ktorý som odprednášal na konferencii ELEKTROENERGETIKA EE 2003.

#### 4. NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU

Matematický model by mal dať obraz o navrhovanej úprave automatickej regulácie teploty generátora. Pri návrhu som vychádzal zo zjednodušenej schémy chladenia. Tak ako ju môžeme vidieť na obr.č. 1.

Uvedené rovnice sú založené na zákonoch kvázirvnovážnych termodynamických procesov. Pri náhlych zmenách výkonu a tým aj stratového výkonu generátora by bolo nutné uvažovať o používaní matematického aparátu nerovnovážnej termodynamiky, čo je ale podstatne zložitejšie.

Chladiaci vzduch musí odvieť teplo ekvivalentné stratovému výkonu generátora,  ${}^2\dot{Q} = P_s$ . Toto teplo sa následne odvádza prúdom demineralizovanej vody prostredníctvom výmenníka č. 2., ktorého energetická bilancia sa dá vyjadriť na základe prvej vety termodynamiky rovnicou:

$$\dot{m}_{vz} \cdot c_{p,vz} \cdot (T_{vz,i} - T_{vz,e}) = \dot{m}_{dmv} \cdot c_{p,v} \cdot ({}^2T_{dmv,e} - {}^2T_{dmv,i}) = {}^2\dot{Q} \quad (1)$$

kde

$\dot{m}_{vz}$  - hmotnostný prietok vzduchu, kg/s

$\dot{m}_{dmv}$  - hmotnostný prietok demineralizovanej vody, kg/s

$c_{p,vz}$  - špecifická tepelná kapacita vzduchu, kJ/kg.K

$c_{p,v}$  - špecifická tepelná kapacita vody, kJ/kg.K

$T_{vz,i}, T_{vz,e}$  - teplota vzduchu na vstupe a výstupe výmenníka č. 2, °C

${}^2T_{dmv,i}, {}^2T_{dmv,e}$  - teplota demineralizovanej vody na vstupe a výstupe výmenníka č. 2, °C

Súčasne musí platiť na základe fyzikálnej podstaty prenosu tepla zo vzduchu do demineralizovanej vody:

$${}^2\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_s \quad (2)$$

kde

$k$  - súčiniteľ prechodu tepla vo výmenníku č. 2, kW/m<sup>2</sup>.K

$A$  - veľkosť výmennej plochy, m<sup>2</sup>

Stredný teplotný rozdiel vo výmenníku č. 2 sa dá vyjadriť vzťahom

$${}^2\Delta T_s = {}^2\varphi \cdot {}^2\Delta T_{s,\ln} = {}^2\varphi \cdot \frac{(T_{vz,i} - {}^2T_{dmv,e}) - (T_{vz,e} - {}^2T_{dmv,i})}{\ln \frac{T_{vz,i} - {}^2T_{dmv,e}}{T_{vz,e} - {}^2T_{dmv,i}}} \quad (3)$$

kde

${}^2\varphi$  - korekčný súčiniteľ zohľadňujúci odchýlky prenosových vlastností výmenníka č. 2 od čistého protiprúdového výmenníka

${}^2\Delta T_{s,\ln}$  - stredný logaritmický teplotný rozdiel platný pre čisté protiprúdové prevedenie výmenníka č. 2, K

Rovnicu (2) možno vyjadriť v tvare

$${}^2\dot{Q} = {}^2(k.A.\varphi) \cdot {}^2\Delta T_{s,\ln} \quad (4)$$

Výraz  ${}^2(k.A.\varphi)$  charakterizuje prenosovú schopnosť výmenníka č. 2. Vzhľadom na malý rozsah teplotných zmien možno považovať jeho hodnotu za konštantnú, ktorá sa dá zistiť meraním.

V stacionárnych prevádzkových režimoch a aj pri malých odchýlkach od nej sa dá zanedbať význam akumulácie tepla v jednotlivých konštrukčných častiach generátora a preto s prijateľnou presnosťou platí, že tok odpadového tepla odvedeného chladiacou vodou vo výmenníku č. 2 sa rovná stratovému výkonu  $P_s$  generátora

$${}^2\dot{Q} = P_s$$

Analogicky sa dá vyjadriť aj energetická bilancia pre výmenník č. 1. Tu musíme brať do úvahy, že časť tepla  ${}^2\dot{Q}$  prejde medzi výmenníkmi č. 2 a 1 do okolia. V energetickej bilancii výmenníka č. 1 sa to prejaví tým, že riečnou vodou bude odvedené len časť tohoto tepla

$${}^1\dot{Q} = \psi \cdot {}^2\dot{Q} \quad (5)$$

kde sa hodnota  $\psi$  dá odhadnúť, určiť približným výpočtom alebo experimentálne. Energetická bilancia výmenníka č. 1 potom sa dá vyjadriť rovnicou:

$$\dot{m}_{mv} \cdot c_{p,v} \cdot ({}^1T_{dmv,i} - {}^1T_{dmv,e}) = \dot{m}_{rv} \cdot c_{p,v} \cdot (T_{rv,e} - T_{rv,i}) = {}^1\dot{Q} \quad (6)$$

kde

$\dot{m}_{rv}$  - prietok riečnej vody, kg/s

$T_{rv,i}, T_{rv,e}$  - teplota riečnej vody na vstupe a výstupe výmenníka č. 1

Podobne ako v prípade výmenníka č. 2 musí súčasne platiť

$${}^1\dot{Q} = {}^1(k.A.\varphi) \cdot {}^1\Delta T_{s,\ln} \quad (7)$$

kde stredný logaritmický teplotný rozdiel pre čisté protiprúdové prevedenie výmenníka č. 1 by bol

$${}^1\Delta T_{s,\ln} = \frac{({}^1T_{dmv,i} - T_{rv,e}) - ({}^1T_{dmv,e} - T_{rv,i})}{\ln \frac{{}^1T_{dmv,i} - T_{rv,e}}{{}^1T_{dmv,e} - T_{rv,i}}} \quad (8)$$

Výraz  ${}^1(k.A.\varphi)$  charakterizuje prenosovú schopnosť výmenníka č. 1. Jeho hodnota sa tiež dá považovať za konštantnú, ktorú možno stanoviť experimentálne.

Na základe stratového výkonu a parametrov demineralizovanej vody je možné vypočítať prietok pre výmenník č.2:

$$m_{dmv} = \frac{P_s}{c_{p,dmv} \cdot ({}^2T_{dmv,e} - {}^2T_{dmv,i})} \quad (9)$$

## 5. RIEŠENIE MATEMATICKÉHO MODELU

Hodnoty získané z tepelných skúšok, ktoré sú uvedené v Tab.1, som považoval za smerodajné pri všetkých výpočtoch.

Celá filozofia nového systému chladenia generátora spočíva v regulácii prietoku chladiacej vody v uzavretom okruhu chladenia generátora použitím frekvenčného meniča pre napájanie motora čerpadla.

Chladiaci systém generátora bol koncipovaný tak, aby teplo zodpovedajúce maximálnemu stratovému výkonu aj pri najnepriaznivejších podmienkach prevádzkovania v letnom období mohlo byť spoľahlivo odvedené demineralizovanou chladiacou vodou konštantného prietoku 450 m<sup>3</sup>/h (nominálny prietok). V prevádzkových režimoch pri nižších výkonoch je stratový výkon a prirodzene aj zodpovedajúci tok odpadového tepla menší. Pri rovnakom ohriatí prúdu demineralizovanej vody môže byť jej prietok podľa výkonovej bilancie (1) menší. Okrem toho odvedenie rovnakého toku odpadového tepla je možné realizovať v jesennom, zimnom a jarnom období s menším prietokom chladiacej demineralizovanej vody než v lete, lebo jej teplota na vstupe výmenníka tepla č. 2 je nižšia a preto možno pripustiť ohriatie vo výmenníku č. 2 o väčší teplotný rozdiel.

Na základe dlhoročných meraní teplôt počas rôznych teplotných období som zostavil tabuľky pre jednotlivé obdobia. Pri zostavovaní tabuliek som vychádzal z charakteristík ohriatia chladiacich médií vo výmenníku č. 1 aj č. 2 zaznamenaných počas teplotných skúšok generátora a zo stredných teplôt získaných v predošlých rokoch.

Obdobia JAR a JESEŇ majú podobné teplotné podmienky, preto som zostavil pre nich spoločnú tabuľku. Celkové trvanie týchto teplotných podmienok v roku som stanovil na 100 dní. Obdobie ZIMA - celkové trvanie týchto teplotných podmienok som stanovil na 90 dní. Posledné obdobie je LETO, ktoré je celkovo tvorené 175 dňami. Rozdelenie roka na tieto jednotlivé obdobia je dôležité z hľadiska ekonomického hodnotenia navrhovaného riešenia, ale aj z dôvodu určenia

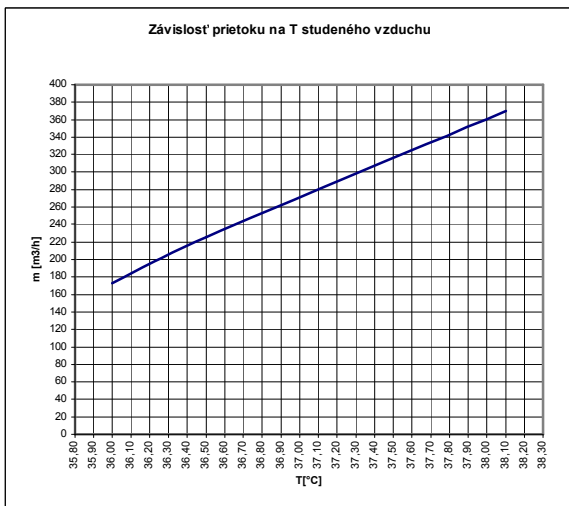
regulačnej charakteristiky prietoku demineralizovanej vody pre automat regulácie teploty generátora. Z dôvodu rozsiahlosti spomínaných tabuliek tieto nebudem uvádzať, uvediem len výsledky výpočtov hmotnostného prietoku demineralizovanej vody (výsledky sú uvedené v posledných riadkoch tabuliek) pre jednotlivé obdobia v tabuľkovej forme. Prietok demineralizovanej vody bol vypočítaný na základe vzťahu (9).

#### JAR – JESEŇ

Výkon [MW]	44	80	110
Tvz, imax [°C]	70	74,6	82,4
Tvz, emax	36,00	36,50	38,10
Tdmv, emax	23,20	23,40	22,80
$\Delta T_{dmv,max}$	6,20	5,40	3,80
	2,9*	3,3*	3,8*
mdmv	173,07	225,62	369,94

Tab. 2 Tabuľka vypočítaných prietokov (obdobie JAR - JESEŇ)

Tab. 2 Table of calculated water flow (Spring-Autumn period)



Obr. 3 Závislosť prietoku na T studeného vzduchu

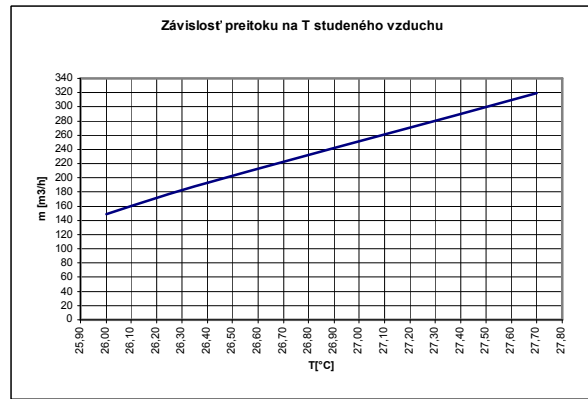
Fig. 3 Relation of water flow against cold air temperature

#### ZIMA

Výkon [MW]	44	80	110
Tvz, imax [°C]	60	64,5	72
Tvz, emax	26,00	26,40	27,70
Tdmv, emax	13,20	13,30	12,40
$\Delta T_{dmv,max}$	7,20	6,30	4,40
	2,9*	3,3*	3,8*
mdmv	149,03	193,39	319,50

Tab. 3 Tabuľka vypočítaných prietokov (obdobie Zima)

Tab. 3 Table of calculated water flow (Winter period)



Obr. 4 Závislosť prietoku na T studeného vzduchu

Fig. 4 Relation of water flow against cold air temperature

#### LETO

Výkon [MW]	44	80	110
Tvz, imax [°C]	78,24	83,97	93,79
Tvz, emax	44,24	45,87	49,49
Tdmv, emax	31,44	32,77	34,19
$\Delta T_{dmv,max}$	2,44	2,77	3,19
	2,9*	3,3*	3,8*
mdmv	439,77	439,83	440,68

\* - ohriatie demineralizovanej vody pri nominálnom prietoku

Tab. 4 Tabuľka vypočítaných prietokov (obdobie LETO)

Tab. 4 Table of calculated water flow (Summer period)

Riešením matematického modelu som určil stratové výkony pre jednotlivé výkonové hladiny (výsledné stratové výkony sú uvedené v prvom riadku tab. 1) a tiež aj prenosové schopnosti výmenníkov chladiaceho systému a prietoky pre jednotlivé výkonové hladiny v rôznych teplotných obdobiach.

V letnom období potrebujeme chlaďť generátor maximálne, čo sme zabezpečili tým, že FM beží na 52 Hz. Táto vyššia frekvencia nám zabezpečila zvýšenie prietoku o 40 m<sup>3</sup>/h v porovnaní s prietokom nominálnym. V prípade veľmi vysokých teplôt sme automatikou plánovali zabezpečiť prísok druhého čerpadla, čo nám umožnilo zvýšenie prietoku až o 70 m<sup>3</sup>/h oproti nominálnemu. Tieto údaje sú získane z overovacieho merania na čerpadle a motore chladiaceho okruhu generátora. Pred samotným zakúpením frekvenčného meniča sme v spolupráci s výrobcem FM vykonali overovacie meranie na chladiacom okruhu. Toto meranie nám malo dať obraz o navrhovanom systéme, určiť minimálnu a maximálnu frekvenciu. Na základe meraní sme zistili, že hydraulický odpor uzavretého okruhu sa pri nábehu podarí prekonať pri minimálnej frekvencii 28 Hz, naopak maximálne dovolenú frekvenciu sústroja motora s čerpadlom sme na základe merania vibrácií stanovili na hodnotu 52 Hz.

Výpočty poukázali, že prínos zvýšenia prietoku o 70 m<sup>3</sup>/h voči nominálnemu je veľmi zanedbateľný. Zvýšením nominálneho prietoku sa nám podarilo znížiť teplotu ohriateho vzduchu max o 0,61 °C, čo je z nášho pohľadu neefektívne.

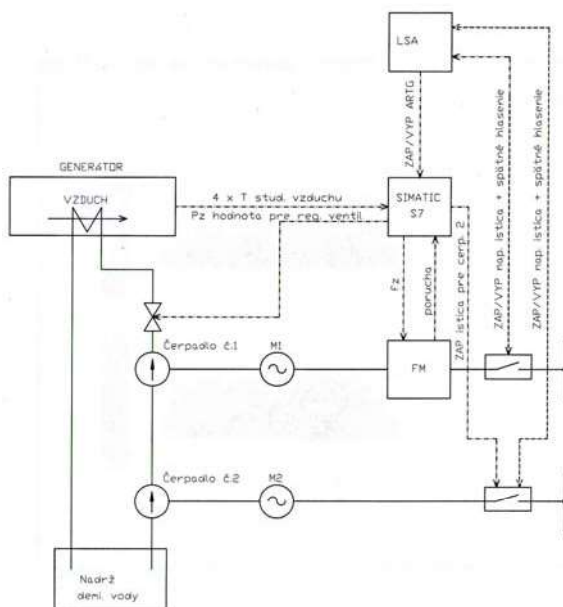
## 6. EKONOMICKÉ ZHODNOTENIE

Zníženie prietoku chladiacej vody pochopiteľne má za následok zníženie príkonu elektromotora čerpadla. V ročnej energetickej bilancii sa tento fakt odráža znížením vlastnej spotreby elektriny a v účtovnej bilancii zodpovedajúcim znížením vlastných nákladov. Z toho dôvodu regulácia prietoku demineralizovanej vody chladičom č. 2 nielen zlepšuje teplotné pomery v generátore, ale súčasne je aj významným energeticky úsporným opatrením. Prirodzenou požiadavkou je prijateľná ekonomická efektívnosť investovania do regulácie prietoku, ktorú možno posúdiť na základe konfrontácie investovaného kapitálu s ročnými úsporami vlastných nákladov.

Návratnosť investície som vyrátal na 1,97 roka. Pri hodnotení som vychádzal z vypočítaných prietokov pre rôzne výkonové hladiny a teplotné obdobia tak ako sú uvedené v tab. 2, 3, 4.

## 7. REALIZÁCIA RIADIACEHO SYSTÉMU

Na základe všetkých výpočtov sme pristúpili na realizáciu riadiaceho systému automatickej regulácie teploty generátora. Konfigurácia riadiaceho systému je znázornená na blokovej schéme (viď obr. 3).

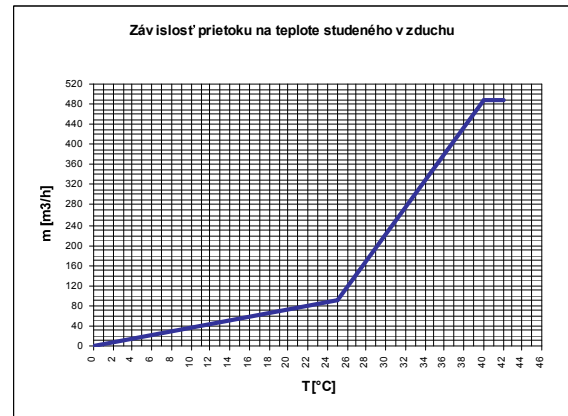


Obr. 5 Konfigurácia riadiaceho systému

Fig. 5 Configurations of control system

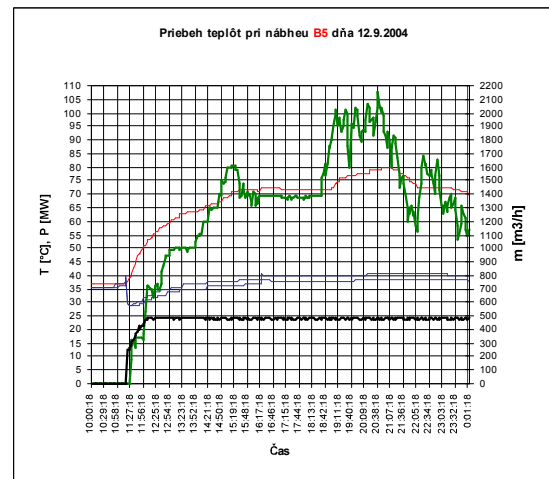
Prietok chladiacej vody bude regulovaný v závislosti na teplote studeného vzduchu. Závislosť prietoku od teploty som navrhol lineárnu (viď obr. 6), na základe výpočtov, ktorých výsledky sú

uvedené v tabuľkách 2 a 3, kde sa prietok mení lineárne v závislosti od teploty tak ako je to znázornené na obr. 3, 4. Preto som navrhol, že žiadaná frekvencia čerpadla č.1 sa bude meniť lineárne v závislosti od teploty studeného vzduchu  $T_g$  od  $f_{min}=28\text{Hz}$  až po  $f_{max}=52\text{Hz}$ , čo odpovedá teplotnému rozsahu  $T_{min}=25^\circ\text{C}$  až  $T_{max}=40^\circ\text{C}$ . Pri teplotách studeného vzduchu nižších ako  $25^\circ\text{C}$  plní funkciu regulácie prietoku regulačný ventil, ktorý zabezpečí zníženie prietoku pod minimálny, škrténím. Pod frekvenciu 28 Hz sme nešli z dôvodu dostatočného chladenia motora čerpadla.



Obr. 6 Závislosť prietoku na teplote studeného vzduchu

Fig. 6 Relation of water flow against cold air temperature



Legenda: - prietok, - výkon gen., - teplota stud. vzduchu, - teplota vnutia

Obr. 7 Priebeh teplôt na gen. pri nábehu chladienia  
Fig. 7 Temperature development during switching on of the generator cooling system

Automatická regulácia teploty generátora nám pomohla riešiť teplotné výkyvy pri nábehoch a odstávkach generátora čo môžeme vidieť aj na priebehu viď obr. 7. Nárast teploty je plynulý a pri nábehu generátora nedochádza už k tak výraznému

podchladeniu vinutia, ako to bolo s pôvodným systémom chladenia, ako to môžeme vidieť aj z priebehu na obr. 2.

Za posledný rok 2004 prevádzkovania automatickej regulácie teploty generátora som z nameraných veličín stanovil skutočnú ekonomickú návratnosť systému na 2 roky. V porovnaní s vypočítanou návratnosťou 1,97 roka som sa len veľmi málo odchyľil od skutočnej (2 roky), čo mohlo byť hlavne spôsobené nadpriemerne teplou zimou.

## 8. ZÁVER

Hlavný prínos regulácie teploty generátora sa prejavil v potlačení teplotných výkyvov pri nábehu chladenia generátora a v neposlednom rade v ekonomickej efektívnosti spomínaného riešenia. V budúcnosti by bolo potrebné zabezpečiť reguláciu teploty generátora v závislosti nie od studeného vzduchu, ale od teploty vinutia generátora čím by sa charakteristika nahrievania vinutia mohla ešte vylepšiť.

## LITERATÚRA

- [1] Sazima, M., Kmoníček, V., Schneller, J. a kol.: Teplo. SNTL, Praha 1989.
- [2] Gerát, P.: Termika a ventilácia elektrických strojov točivých, Vydala vysoká škola dopravná v Žiline v nakladateľstve ALFA, N. P., 1971 BRATISLAVA, 3021702, 63-753-71.
- [3] Petrov, G.N.: Elektrické stroje 2, Asynchronní stroje – synchronní stroje, izdatel'stvo „ENERGIJA“, Moskva 1963, preložil akademik Břetislav Benda, 509-21-857

## BIOGRAPHY

I was born on 23.4.1975. In 1998 I was graduated (Ing.) at the department of Electric Power Engineering of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics at Technical University in Košice. My PhD. study started in year of 2001 like external student and employ of Electro power station in Vojany. On my PhD. study I am focused on cooling problem of generators as you see in my article.