

KALIBRACE MODELU PRO OPTIMALIZACI SYSTÉMU VYTÁPĚNÍ A CHLAZENÍ S AKUMULACÍ ENERGIE DO SPODNÍ VODY

Robert Krainer¹, Karel Brož¹, Jan Hensen²

¹Ústav techniky prostředí, Fakulta strojní, ČVUT v Praze
e-mail: robert.krainer@fs.cvut.cz , e-mail: Karel.Broz@fs.cvut.cz

²Building Physics & Systems, Technische Universiteit Eindhoven
www.bwk.tue.nl/bps/hensen

ABSTRAKT

Článek popisuje část výzkumného úkolu, který se zabývá navrhováním různých konfigurací systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrty. Cílem výzkumu je optimalizace systémů z hlediska spotřeby energie na vytápění a chlazení budov.

Po detailnějším popisu rozsáhlého a komplexního zařízení na Technické univerzitě v Eindhovenu TU/e (Nizozemí) je v tomto článku popsán postup kalibrace modelu zaměřeného na jednu budovu. Systém obsahuje tepelné čerpadlo, tepelné výměníky, plynové kotle a další prvky soustavy. Model byl sestaven v simulačním programu TRNSYS. Kalibrace byla prováděna s využitím dat naměřených správou zařízení TU/e a několika dodatečnými měřicími zařízeními. V současné době probíhá shromažďování a analyzování dat. Z dosud vyhodnocených výsledků je zřejmé, jaká zjednodušení při měření a při modelování jsou přijatelná a jaká nikoli.

ÚVOD

Výzkumný úkol se zabývá navrhováním různých konfigurací systémů s tepelným čerpadlem a svislými zemními vrty. Tento článek popisuje poměrně komplikovaný systém, který slouží k chlazení a vytápění univerzitní budovy na Technické univerzitě v Eindhovenu TU/e (Nizozemí). Popisuje se zde možnost využití simulačního programu pro vyhodnocení stávajícího zařízení a provedení změn těch částí zařízení, které mají negativní vliv na optimální chod z hlediska energetické spotřeby.

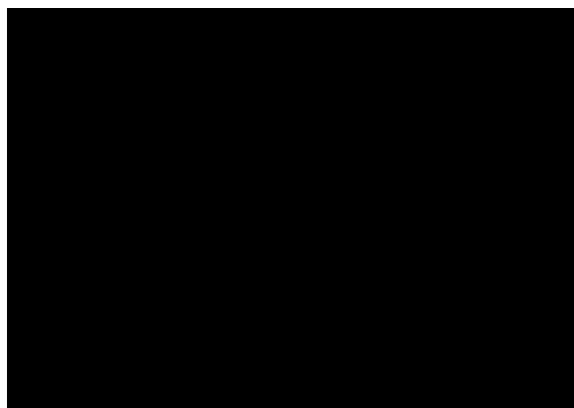
POPIS SYSTÉMU

Systém se skládá ze 14 budov rozmístěných v areálu Technické university Eindhoven a dále zásobníků využívajících akumulace do spodní vody. Tento systém zahrnuje 32 studní rozdělených do 3 zásobníků na teplou vodu a do 3 zásobníků na studenou vodu. Studny a budovy jsou propojeny potrubím přibližně 2 km dlouhým, které vytváří uzavřenou smyčku. Vzhledem k vyšší celoroční spotřebě energie na chlazení oproti vytápění, je tento systém doplněn dvěma chladicími věžemi. K přečerpávání tepla z nižší teplotní úrovně na vyšší slouží tepelné čerpadlo umístěné v každé budově, které pracuje v sérii s plynovými kotli. V současné době jsou

zásobníky na studenou vodu navrženy pro přímé využití klimatizačními jednotkami.

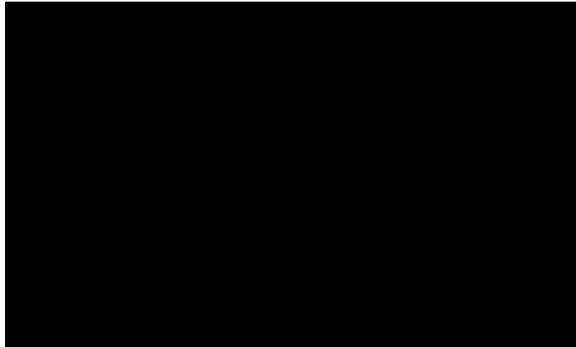
Vzhledem k propojení jednotlivých budov dochází k ovlivňování systému v závislosti na chování těchto objektů. Namodelovat celý systém včetně všech 14 budov, které jsou zapojeny do systému je příliš komplikované. Proto byla vybrána část zařízení jedné budovy, která je oddělena od zbývajících částí jasně vymezenými hranicemi.

Modelovaný systém se skládá z těchto hlavních částí: tepelné čerpadlo, 2x plynový kotel, 2x protiproudý výměník, 4x směšovací výměník, příslušná regulace. Zjednodušené schéma propojení těchto zařízení je patrné z obr. 1., jenž ukazuje 4 základní stavy ve kterých může systém pracovat, a sice chlazení (čerchovaná čára), vytápění (plná čára), chlazení kondenzátoru (tečkovaná čára) a extra chlazení (čárkovaná čára). Extra chlazením je míněno, dochlazování výparníkem tepelného čerpadla. Kromě základních stavů pracuje systém také v různých kombinacích (např. vytápění + extra chlazení).



Obr. 1 – Zjednodušeného schéma propojení základních zařízení systému.

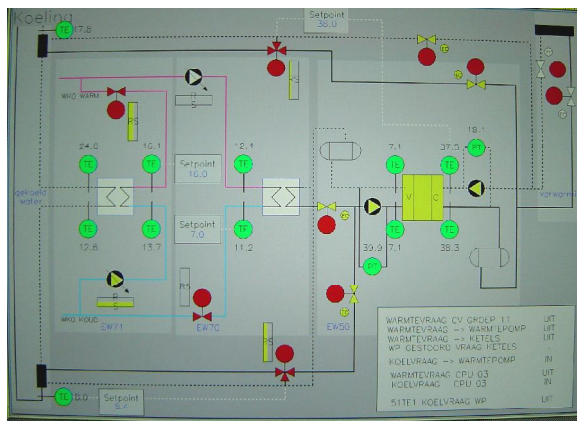
Připojení vybrané budovy do smyčky spojující všechny objekty a zásobníky je znázorněno na obr. 2. Na tomto schématu je vidět, jak pracuje systém při režimu vytápění, při režimu chlazení a také možnost využití zkratu, pokud pracuje vytápění a chlazení budovy zároveň. V případě, že je topný výkon stejný jako chladicí, nedochází k odběru tepla ani chladu ze smyčky teplé respektive chladné vody.



Obr. 2 – Zjednodušené schéma propojení budovy do potrubní smyčky chladné a teplé vody.

POPIS MĚŘENÍ

Popsaný systém se skládá z výměníků tepla, tepelného čerpadla, oběhových čerpadel s konstantním průtokem, oběhových čerpadel s proměnným průtokem, uzavíracích a regulačních ventilů aj. Pro měření většiny hodnot nutných pro analýzu a kalibraci systému byla využita stávající průmyslová čidla v systému, která slouží pro regulaci a vyhodnocování z centrálního pracoviště. Část vizualizace teplot čidel, stav ventilů v poloze otevřeno/zavřeno a také zpuštění/vypnutí oběhového čerpadla je na obr. 3.



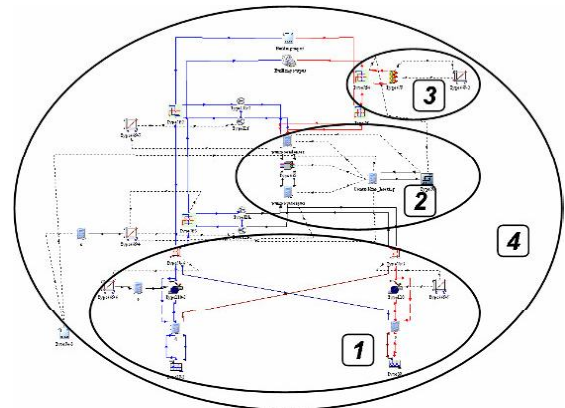
Obr. 3 – Vizualizace části systému

Pro změření některých veličin musela být dodatečně instalována další měřicí zařízení. Kromě doplnění několika čidel teploty se jednalo o měření průtoku jednotlivými větvemi systému. V systému bylo nutno sledovat 4 proměnné a 11 konstantních průtoků. Tepelný/chladicí výkon přiváděný z propojovací smyčky je měřen kalorimetry. Tyto

kalorimetry byly využity k měření 2 proměnných průtoků. Pro měření dalších průtoků byl zapůjčen ultrazvukový průtokoměr Fluxus ADM 6725, který umožňoval měřit 2 průtoky zároveň. Jelikož bylo zapůjčení měřícího zařízení značně finančně náročné, byly v průběhu samotného měření zaznamenávány pouze hodnoty proměnných průtoků a konstantní průtoky proměřeny předem. Pro kalibraci je použita střední hodnota těchto průtoků. Jak již bylo uvedeno, systém pracuje ve více režimech. Konstantní průtoky se v rámci nastaveného režimu nemění. Z tohoto důvodu byly proměřeny ve všech režimech připadajících v úvahu a v modelu jsou dosazovány v závislosti na poloze on/off ventilů (obr.1).

KALIBRACE

Kalibrace modelu vytvořeného v simulačním programu TRNSYS probíhá v několika krocích. Celý model má mnoho komponent, proto je kalibrace rozdělena nejméně do 3 podsystémů, jak zobrazuje obr. 4.



Obr. 4 – Rozdělení systému do jednotlivých podsystémů

Nejprve jsou kalibrovány jednotlivé hlavní komponenty (tepelný výměník, tepelné čerpadlo a plynové kotle) a poté jednotlivé podsystémy 1, 2 a 3, aby se prokázalo, že navržená zjednodušení při modelování umožňují popsat chování reálného zařízení. Podsystém 1 modeluje propojení budovy do potrubní smyčky chladné a teplé vody (obr. 2), v podsystému 2 je obsaženo tepelné čerpadlo a komponenta, která přisuzuje hodnoty průtoků v závislosti na poloze on/off ventilů a v posledním, 3. podsystému je model kotle, jenž nahrazuje reálné zapojení 2 paralelních kotlů. Ve všech třech podsystémech je obsažena regulace příslušných zařízení.

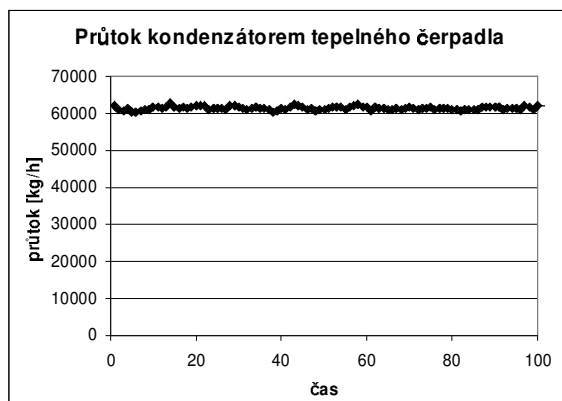
V závěrečné fázi bude kalibrován celý model, budou propojeny všechny součásti včetně poměrně komplikované regulace. V celkovém modelu již dochází k ovlivňování jednotlivých podsystémů, prověřit správnost modelu v tomto okamžiku je možno jen analyzováním několika zvolených veličin.

VSTUPNÍ DATA PRO KALIBRACI

V současné době probíhá shromažďování a analyzování dat potřebných pro kalibrování jednotlivých komponent a jednotlivých podsystémů.

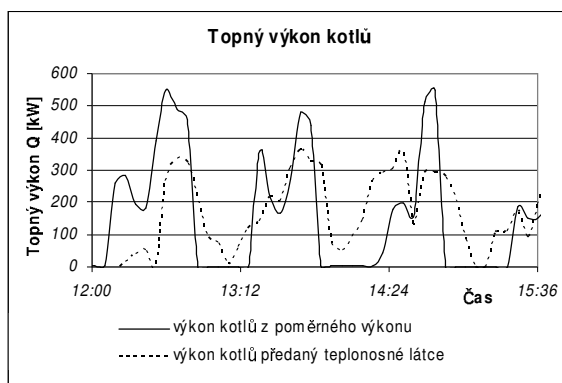
Je vyhodnocováno přes 70 různých hodnot po dobu 14 dnů s krokem 5 minut, což představuje přibližně 300 000 údajů.

Jak bylo popsáno výše, nebylo možné v jednom čase měřit všechny průtoky v systému, proto byly konstantní průtoky proměřeny před samotným měřením a pro výpočet a kalibraci bude uvažována jejich střední hodnota. Graf hodnot jednoho z naměřených průtoků je na obr. 5.



Obr. 5 – Naměřené hodnoty průtoku [kg/h] kondenzátorem tepelného čerpadla

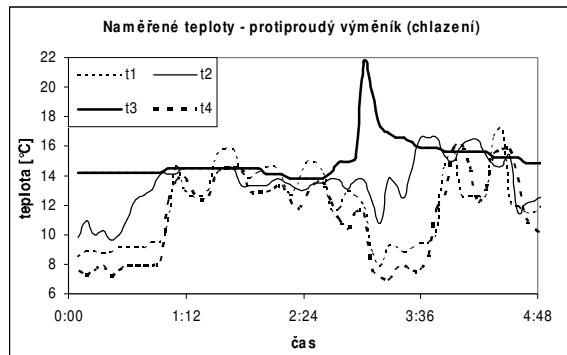
V grafu na obr. 6 je zobrazen průběh tepelného výkonu obou kotlů řazených paralelně. V prvním případě jsou hodnoty získány z měřeného poměrného výkonu kotle v rozmezí 55 – 550 kW a v druhém případě je zobrazen tepelný výkon získaný výpočtem z průtoku (uvažován konstantní) a z rozdílu teplot přírodní a zpětné vody.



Obr. 6 – Hodnoty topného výkonu kotlů z měřeného poměrného výkonu (plná čára) a vypočtené z průtoku kotlem a rozdílu přírodních a vratných teplot (čárkovaná čára).

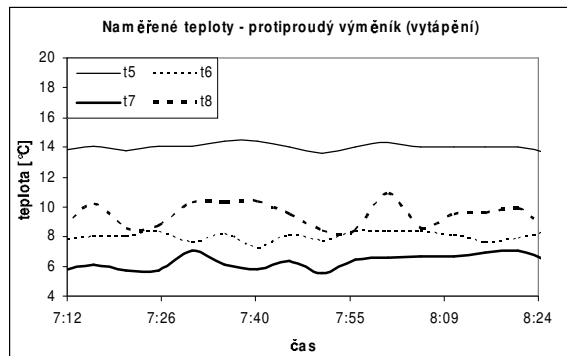
Dále byla vyhodnocena data měřená na tepelném výměníku na straně chlazení a na tepelném výměníku na straně vytápění. U protiproudého výměníku na straně chlazení (obr. 7) jsou měřeny teploty na primární straně t_1 (vstup), t_2 (výstup) a na sekundární

straně t_3 (vstup) a t_4 (výstup). Je zajímavé si povšimnout teploty t_4 , která je nižší než teplota t_1 .



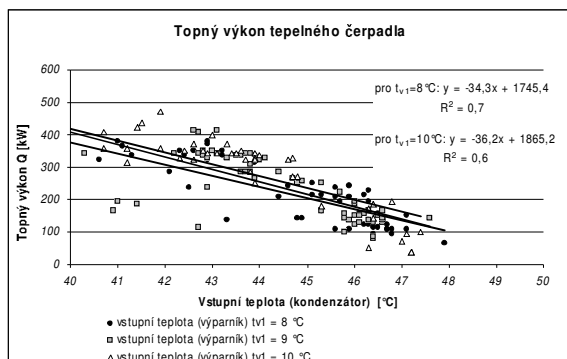
Obr. 7 – Naměřené hodnoty teplot na protiproudém výměníku na straně chlazení

U protiproudého výměníku na straně vytápění (obr. 8) jsou naměřené teploty na straně primární t_5 (vstup), t_6 (výstup) a na straně sekundární t_7 (vstup) a t_8 (výstup).



Obr. 8 – Naměřené hodnoty teplot na protiproudém výměníku na straně vytápění

Pro model tepelného čerpadla je třeba znát výkonové charakteristiky udané výrobcem. Na následujícím grafu (obr. 9) jsou vyneseny hodnoty topného výkonu v závislosti na vstupní teplotě do výparníku a vstupní teplotě do kondenzátoru.



Obr. 9 – Topný výkon tepelného čerpadla

DISKUSE

Z dosud analyzovaných dat určených pro kalibraci systému je patrné několik poznatků. Zaprvé, jak plyne z obr. 5, je možné pro stanovení tepelných výkonů použít střední hodnotu z naměřených průtoků.

Dalším důležitým zjištěním je nutnost kalibrovat výkony kotlů z výkonu předaného teplotosné látky (obr. 6), neboť jako většina komponentů v programu TRNSYS, ani komponenta kotle neumožňuje výpočet přechodových charakteristik.

Vyhodnocená data pro protiproudé tepelné výměníky jsou v případě výměníku na straně vytápění (obr. 8) použitelná, ovšem na straně chlazení (obr. 7) dosahuje výstupní teplota t_4 na straně sekundární nižších hodnot než vstupní teplota t_1 na straně primární, což je nemožné. Proto bude muset být provedeno dodatečné měření, které vysvětlí vzniklou chybu.

Poslední z dosud vyhodnocených veličin je topný výkon tepelného čerpadla. Metodou nejmenších čtverců byly aproximovány lineární závislosti pro vstupní teploty do výparníku tepelného čerpadla t_{v1} (obr. 9) s hodnotou spolehlivosti 0,7 (pro vstupní teplotu do výparníku $t_{v1} = 8 \text{ °C}$) a 0,6 ($t_{v1} = 10 \text{ °C}$).

ZÁVĚR

Při kalibraci rozsáhlejších systémů s komplikovanou regulací a větším počtem zařízení, je nutno tento systém rozdělit do několika podsystémů, které lze oddělit od zbývajících částí zařízení, a provést kalibraci nejprve těchto částí.

Pro měření výkonu z rozdílu teplot na přívodním a zpětném potrubí u velkých průtoků je vhodné kromě teplotních čidel použít také čidla teplotní difference, vzhledem k malým teplotním rozdílům a z toho plynoucí velké chybě při výpočtu tepelných výkonů.

PODĚKOVÁNÍ

Tato studie je součástí výzkumného záměru MSM 6840770011 Technika životního prostředí.

LITERATURA

- [1] Solar Energy Laboratory, 2006, "TRNSYS, A Transient Simulation Program," University of Wisconsin, Madison

PŘEHLED OZNAČENÍ

t teplota [$^{\circ}\text{C}$]

\dot{Q} výkon [kW]

τ čas [s]