

Ing. Gabriel BÖSZÖRMÉNYI, Ph.D.,
Doc. Ing. Ladislav BÖSZÖRMÉNYI, Ph.D.
Technická univerzita v Košiciach,
Ústav budov a prostredia

Matematické modelování tepelného čerpadla sloužícího k centralizovanému zásobování teplem

Mathematical modeling of heat pumps intended for district heating

Recenzent
Ing. Bořivoj Šourek, Ph.D.

Autoři popisují potenciál využití tepelných čerpadel v centralizovaném zásobování teplem a úskalí, která mohou nastat při kombinaci tepelných čerpadel a standardního topárenského provozu. Dále je uveden matematický popis energetických bilancí takové soustavy tepelných čerpadel zapojených v sérii jako úvod k popisu možnosti optimalizačního a vyhodnocovacího softwaru. Program umožňuje jak energetickou tak ekonomickou analýzu řešení problematiky.

Klíčová slova: tepelné čerpadlo, matematický model, ekonomické vyhodnocení, centralizované zásobování teplem

Author describes the potential of heat pump application in the system of district heating and the problems that might occur when combining the operation of a heating plant and a heat pump system. Further, balance equations of a system comprising several heat pumps operating in series are provided as a basis for creating a calculation software tool. The tool allows for carrying out both efficiency and economic effectiveness analyses.

Key words: heat pump, mathematical model, economic evaluation, district heating

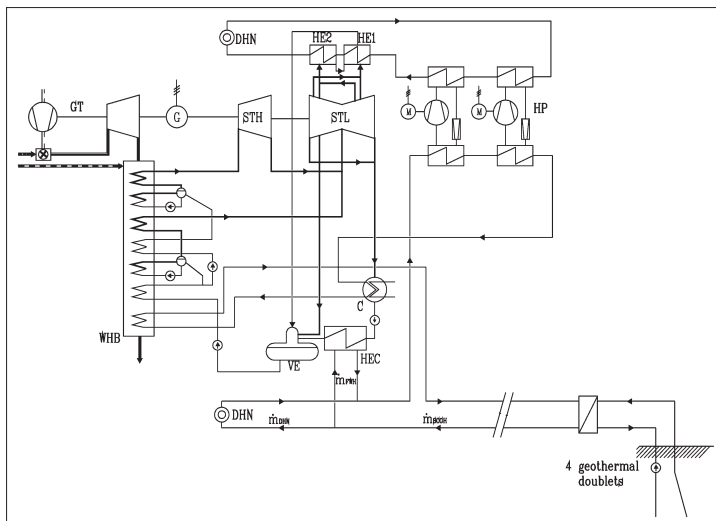
ÚVOD

Aplikace tepelných čerpadel získává čím dál důležitější roli v decentralizovaném zásobování teplem. Přesto je známo jejich použití také v centrálním zásobování. Vybudování takového systému je opodstatněné, pokud se v jeho blízkosti nachází vydatný zdroj nízkoteplotního tepla (technologické odpadní teplo, geotermální teplo atp.). Takové aplikace jsou spojeny s několika méně známými společnostmi, např. švýcarský FrioTherm AG (bývalý Sulzer) má několik pozoruhodných systémů zejména v Evopě [1]. Vzhledem k tomu, že trvale udržitelný rozvoj je globálním zájmem, účinné využití nízkoteplotního tepla by se mělo stát jedním ze základních pilířů evropské energetické politiky. Postkomunistické země v budování tohoto obrazu výrazně zaoštvávají, ačkoliv využití dostupných možností by mohlo výrazně snížit energetickou náročnost hospodářství.

Možnost aplikace tepelného čerpadla velkého výkonu v Košické Kotelně

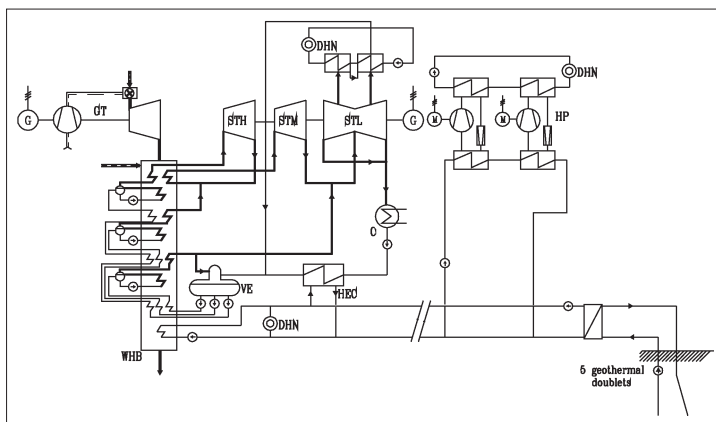
Plánovaná rekonstrukce Košické SCZT vyvolala značný ohlas odborné veřejnosti, a to zejména v souvislosti se snahou o využití vydatného geotermálního zdroje Košické Kotelny [2], [3]. Přibližně polovina roční potřeby města by mohla být pokryta z geotermálního zdroje. Vzhledem k tomu, že v důsledku úsporných opatření se potřeba tepla postupně snižuje, znovuoobnovení výroby tepla v kogeneraci s elektrinou pouze z důvodu zásobování teplem by nebylo opodstatněné. Bez toho by ale místní teplárna přišla o významný zdroj zisků, a navíc by nebyly zohledněny cíle národního hospodářství, a prohloubily by se problémy se zásobování elektrickou energií. Z toho důvodu, i přes výše zmíněné nevýhody prosazuje teplárna vybudování kogenerační paroplynové elektrárny. Vedle konvenčních řešení se uvažovalo také o hybridní tepelné elektrárně [4], [5], [6]. Ta by umožnila použití tepla ze spalování zemního plynu a geotermálního tepla na výrobu elektrické energie. Ke zintenzivnění využití geotermální energie by sloužilo tepelné čerpadlo HP s topným výkonem cca. 40 MW, které by generovalo dodatečný topný výkon ochlazením sekundárního nositele geotermální energie vystupujícího z výměníku HEC (obr. 1).

Navíc by se chladicí výkon tepelného čerpadla mohl využít pro částečné chlazení kondenzátoru parního cyklu. Dostupný geotermální zdroj by tak bylo možné využít v několika stupních, a tepelné čerpadlo by představovalo teplotně nejnižší stupeň. Protože topný výkon te-



Obr. 1. Tepelné čerpadlo integrované do struktury tepelné elektrárny

DHN – centrální soustava zásobování teplem, HE1, HE2 – výměníky sloužící k dohřevu topné vody, STH – vysokotlaký stupeň parní turbíny, STL – nízkotlaký stupeň parní turbíny, GT – okruh plynové turbíny, G – generátor, M – Motor, HP – tepelné čerpadlo, WHB – spalínový kotel, VE – odplyňovač, C – kondenzátor parního okruhu, HEC – výměník sloužící k předehřevu napájecí vody



Obr. 2. Systém tepelného čerpadla fungující mimo strukturu elektrárny

Legenda identická s obr. 1, STM – Středotlaký stupeň parní turbíny

pevného čerpadla dle obr. 1 lze snadno nahradit topným výkonem získaným v kogeneraci, hospodárnost jeho použití je výrazně závislá na míře využití jeho chladicího výkonu, které je ale docela omezené. Proto se jako smysluplné řešení jeví použití tepelné čerpadlo velkého výkonu mimo tepelnou elektrárnu, kde by mohlo nahradit topné systémy s nízkou účinností, založené zejména na spalování zemního plynu, (obr. 2). Kvantitativní účinnost těchto systémů sice obvykle převyšuje 90 %, ale kvalitativní (exergetická) účinnost je výrazně nižší, v ročním průměru cca 5 % [8]. Nevýhoda tohoto řešení je to, že v současnosti neexistuje soustředěná potřeba tepla. To se ale v budoucnosti může změnit.

Výše uvedená fakta přinutila autora k tomu, aby vypracoval matematický model sloužící k hodnocení ukazatelů energetické a ekonomické efektivity systémů tepelných čerpadel velkých výkonů.

Vzhledem k tomu, že teplota sekundárního nositele geotermální energie na vstupu do tepelného čerpadla HP na obr. 1 a 2 by se mohla pohybovat kolem 40 °C a cílem je jeho ochlazení o cca. 30 K, v zájmu větší spolehlivosti a účinnosti je opodstatněné rozdělit systém na více tepelných čerpadel zapojených v sérii. Jedním z hlavních cílů matematického modelu je určení optimálního počtu stupňů tepelného čerpadla, přestože ten může být ovlivněn řadou dalších, matematicky nepopsatelných parametrů (např. měrné náklady na jednotlivé komponenty závisí od konkrétní varianty, mohou být výrazně nižší v případě typizovaných zařízení).

V tepelných čerpadlech velkých výkonů se téměř výhradně používají radiální turbokompresory, v nichž dochází ke kompresi chladiva v několika stupních. Vzhledem k jejich principu musí mít chladivo co možná největší molární hmotnost. Chladivo R 134a splňuje tento požadavek, a proto je nejčastěji používaným chladivem těchto zařízení. Vzhledem k tomu že Evropská Komise již přijala opatření směřující k omezení použití chladiv s vysokým GWP (Global Warming Potential), je nutné se zaměřit i na jiná chladiva, např. uhlovodíky (propan, propylen, izobutan atd.), jejichž molární hmotnost je sice ve srovnání s R 134a výrazně menší, na druhou stranu mají výrazně nižší GWP. Použití uhlovodíků z důvodu jejich hořlavosti ale vyžaduje splnění zprísňených bezpečnostních předpisů. Použití oxidu uhličitého i přes jeho nízké GWP je těžko realizovatelné, vzhledem k jeho nízké molární hmotnosti. Současný vývoj vhodných chladiv nové generace umožní, že chladiva s GWP < 150 budou zanedlouho k dispozici na trhu.

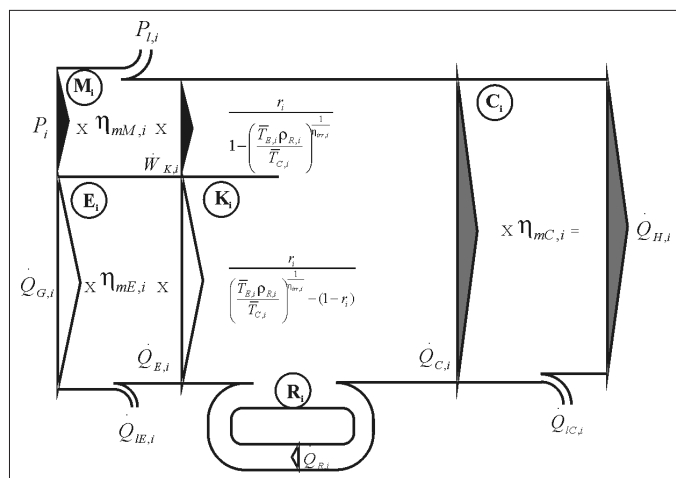
Poznámka: GWP chladiva vztahujeme ke GWP oxidu uhličitého, jehož hodnota je pro 100 letou životnost v atmosféře GWP = 1.

Vstupní údaje matematického modelu MAMUHEP

Matematický model, nesoucí název MAMUHEP, byl napsán v jazyce Java. Model slouží k posouzení ustálených stavů systému tepelného čerpadla, dále po rozdělení intervalu teplot okolí na podintervaly a definice jejich trvání pak k výpočtu roční energetické bilance.

Vstupní údaje matematického modelu jsou následující:

- počet stupňů tepelného čerpadla $i = 1 \div n$,
- chladivo použité v i -tém stupni tepelného čerpadla (R 134a, R 290 – propan, R 1270 – propylen, R 600a – izobutan, Fluid H, R 245fa),
- změna teploty sekundárního nositele geotermální energie v závislosti na teplotě okolí dle rovnice $t_{g,in} = C_1 \cdot t_o + C_2 \cdot t_o^2 + C_3 \cdot t_o^3 + C_4$,
- změna teploty topné vody na vstupu do tepelného čerpadla v závislosti na teplotě okolí dle rovnice $t_{h,in} = C_5 \cdot t_o + C_6 \cdot t_o^2 + C_7 \cdot t_o^3 + C_8$,
- míra ochlazení sekundárního nositele geotermální energie v i -tém stupni tepelného čerpadla,
- žádaná hodnota topné vody na výstupu z tepelného čerpadla,
- minimální teplotní rozdíl a hustota tepelného toku v kondenzátoru a výparníku i -tého stupně tepelného čerpadla,
- míra podchlazení v kondenzátoru i -tého stupně tepelného čerpadla,
- dolní a horní mezní hodnota j -tého podintervalu teplot okolí,



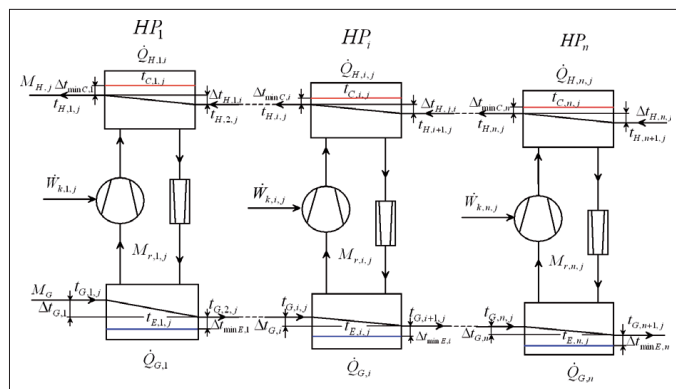
Obr. 3. Výkonová bilance stupně tepelného čerpadla v ustáleném stavu podle [7]

HP_i – i -tý stupeň TČ, t_h – teplota topné vody, t_g – teplota geotermální vody, t_e – teplota vypařování, t_c – teplota kondenzace, Δt_h – změna teploty topné vody, Δt_g – změna teploty geotermální vody, Δt_{minC} – minimální teplotní rozdíl mezi chladivem a topnou vodou, Δt_{minE} – minimální teplotní rozdíl mezi chladivem a geotermální vodou, M_t – hmotnostní průtok chladiva, M_g – hmotnostní průtok geotermální vody, \dot{Q}_G – chladicí výkon, \dot{Q}_H – topný výkon, W_K – mechanický příkon kompresoru

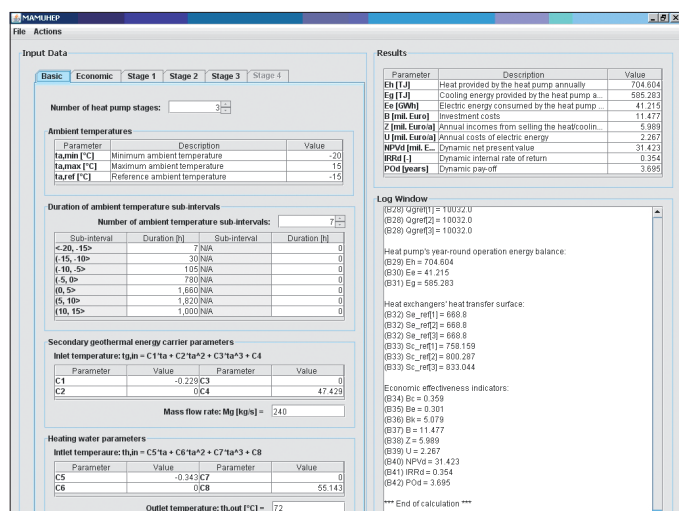
- počet podintervalů teplot okolí $j = 1 \div m$,
- délka trvání jednotlivých podintervalů teplot okolí,
- kvantitativní účinnost jednotlivých podsystémů i -tého stupně tepelného čerpadla,
- měrné náklady jednotlivých komponent, prodejní cena tepla a kupní cena elektrické energie, roční úroková míra a míra zvýšení cen elektrické energie a tepla,
- změna izentropické účinnosti komprese v závislosti na nasátém objemovém průtoku chladiva dle rovnice $\eta_{irr} = C_9 \cdot \dot{V}_s + C_{10} \cdot \dot{V}_s^2 + C_{11} \cdot \dot{V}_s^3 + C_{12}$

K vypracování matematického modelu byla použita metoda teplotně-entropická, která v sobě sjednocuje výhody metody entalpické a exergetické, tzn. odhaluje kvantitativní i kvalitativní ztráty v jednotlivých komponentech, ale ve výkonových bilancích počítá s topným výkonem. Detailní popis procesních a bilančních rovnic je obsažen v [7], rovnice a potřebné koeficienty pro výpočet vlastností chladiv jsou obsaženy v [8]. S použitím těchto rovnic matematický model MAMUHEP stanoví výkonovou bilanci všech $i = 1 \div n$ stupňů tepelného čerpadla ve všech $j = 1 \div m$ podintervalech teplot okolí (obr. 3), dále pak spočítá změnu teploty ochlazovaného sekundárního nositele geotermální energie a topné vody (obr. 4).

Po stanovení výkonových bilancí jednotlivých stupňů tepelného čerpadla model na základě zadaného trvání podintervalů teploty okolí vypočte vyprodukovanou tepelnou energii dle



Obr. 4. Změna teploty topné vody a ochlazeného sekundárního nositele geotermální energie v systému tepelného čerpadla



Obr. 5. Grafické uživatelské rozhraní MAMUHEP

$$Q_H = \sum_{j=1}^m \tau_j \dot{Q}_{H,j} = \sum_{j=1}^m \tau_j \left(\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{H,i} \right),$$

vyprodukovaný chlad dle

$$Q_G = \sum_{j=1}^m \tau_j \dot{Q}_{G,j} = \sum_{j=1}^m \tau_j \left(\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{G,i} \right),$$

a spotřebovanou elektrickou energií dle

$$E = \sum_{j=1}^m \tau_j P_j = \sum_{j=1}^m \tau_j \left(\sum_{i=1}^n P_i \right),$$

kde

\dot{Q}_H je topný výkon,

\dot{Q}_G je chladičový výkon, P_j je příkon a τ_j je roční trvání j -tého podintervalu teplot okolí.

Poznámka: Model nepočítá s tlakovými ztrátami na straně chladiva, k nimž dochází v kondenzátorech, ty ale výkonovou bilanci významně neovlivní (pokud jsou ovšem správně dimenzované) a mají rovněž zanedbatelný vliv na COP (Coefficient of Performance – topný faktor).

Matematický model MAMUHEP slouží kromě výpočtu energetické bilance také k hodnocení ekonomických ukazatelů, pokud jsou k dispozici vstupní údaje, zejména měrné náklady jednotlivých komponent dle typu a koeficient zohledňující celkové náklady na realizaci projektu. Odhad těchto údajů může být pro nezainteresované problematické, ale dle realizovaných zakázek lze míru rizika výrazně snížit.

MAMUHEP umožňuje výpočet následujících ekonomických ukazatelů:

Čistá současná hodnota (Net Present Value – NPV)

NPV je často používaným ukazatelem při hodnocení hospodárnosti projektu. Jeho hodnota je rovna rozdílu mezi ročním diskontovaným ziskem a investovaného kapitálu.

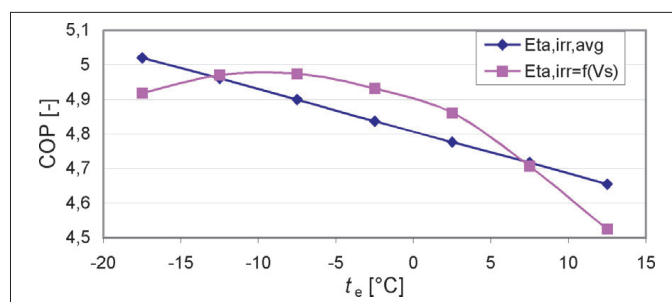
Vitřní výnosnost (Internal Rate of Return – IRR)

K hodnocení hospodárnosti projektu slouží také ukazatel IRR, zejména v případě kdy je diskutabilní hodnota úrokové sazby. IRR je úroková míra, při které je roční diskontovaný zisk projektu roven investovanému kapitálu.

Dynamická doba návratnosti (Dynamic Pay-Off – PO_d)

PO_d zohledňuje roční úrokovou míru, případně také roční zvýšení cen energií. PO_d je vlastně čas, po kterém je roční diskontovaný zisk roven investovanému kapitálu, tzn. $NPV = 0$.

Vstupní údaje posuzovaného systému mohou být zadány v grafickém uživatelském rozhraní, (obr. 5) a poté archivovány v souboru XML.



Obr. 6. Změna COP tepelného čerpadla v závislosti na teplotě okolí

Grafické uživatelské rozhraní programu MAMUHEP se skládá ze tří hlavních částí. V levé části rozhraní se nachází okno **Input Data (Vstupní údaje)**, ve kterém probíhá zadávání údajů definovaných v odstavci Vstupní údaje matematického modelu MAMUHEP. V dolní pravé straně se nachází okno **Log Window (Okno záznamů)**, jenž obsahuje veškeré částečné výsledky výpočtů a jejichž obsah lze archivovat v souboru LOG. V horní části napravo se nachází okno **Results (Výsledky)**, jenž obsahuje nejdůležitější výsledky matematického modelu – roční energetickou bilanci a ekonomické ukazatele.

Výsledky matematického modelování se mohou vhodně graficky zpracovat některým tabulkovým procesorem, např. průběh COP v závislosti na teplotě okolí (obr. 6). Modře je znázorněna změna COP v případě uvažované průměrné a konstantní izoentropické účinnosti komprese, fialově pak změna COP v případě definování změny izoentropické účinnosti komprese v závislosti na nasátem objemovém průtoku chladiva. Vyšší hodnoty COP při nižších teplotách okolí jsou částečně způsobeny tím, že teplota vratné vody v soustavě CZT je vyšší a částečně změnou izoentropické účinnosti komprese.

ZÁVĚR

V článku popsaný matematický model MAMUHEP slouží k posouzení ustálených režimů, ekonomických ukazatelů a účinnosti tepelných čerpadel velkých výkonů. Model pracuje s množstvím takových vstupních údajů (např. minimální teplotní rozdíl ve výměnících a jejich hustota tepelného toku), jejichž hodnoty lze dostupnými programy vyvinutými výrobcí s dobrou přesností stanovit. I přesto lze matematický model MAMUHEP v budoucnosti dále vyvíjet a sice tak, aby byl schopen s již zmíněnými programy spolupracovat.

Kontakt na autora: boszormenyig@gmail.com

Použité zdroje:

- [1] Domovská stránka Fritherm AG: www.fritherm.com
- [2] DANCEE, Geothermal Energy for Kosice District Heating, Business Plan, Danish Ministry of the Environment – Danish Environmental Protection Agency, 2002.
- [3] Geotermálna energia pre centrálnu zásobovanie teplom v meste Košice, GEOTERM Košice,
- [4] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Hybrid energy technologies for an efficient geothermal heat utilization, Proceedings of European Geothermal Conference 2003, Szeged,
- [5] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: Hybrid Technologies of Power Production with efficient Use of Geothermal Energy and Biomass. VDI-Berichte 1746, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [6] Böszörményi, L.; Böszörményi, G.: The perspectives of geothermal energy utilization in district heating system of Košice city, Proceedings of World Renewable Energy Congress VII, Köln.
- [7] Büki, G.: Energetika, Muegyetemi Kiadó, Budapest, 1997
- [8] Böszörményi, G.: Nagyteljesítményű hőszivattyú matematikai modellezése, Doktorati értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 2007. ■