

Ing. Jan SEDLÁŘ
ČVUT v Praze
Univerzitní centrum energeticky
efektivních budov

Měření a optimalizace chladivových zařízení v provozu

Measurement and Optimization of Refrigerant Systems in Operation

Recenzent
doc. Ing. Mojmir Vrtek, Ph.D.

Příspěvek popisuje základní možnosti a vybavení měřicího přístroje ClimaCheck, který byl použit pro optimalizaci množství chladiva ve starším tepelném čerpadle země-voda. V úvodní části je popsána měřicí metoda a její princip pro měření tepelných čerpadel a chladicích zařízení. Další část je věnována samotnému měření tepelného čerpadla s chladivem R407C. Optimalizace provozního množství chladiva proběhla na základě měření teploty po kompresi, podchlazení kapalného chladiva za kondenzátorem a topného faktoru. V poslední části jsou pak naznačeny některé další možnosti vyhodnocování provozu chladicích zařízení a tepelných čerpadel.

Klíčová slova: diagnostika, chladivová zařízení, tepelné čerpadlo, topný faktor

The contribution describes basic capabilities and equipment of the measuring device ClimaCheck, which was used to optimize the amount of refrigerant in an old ground-water heat pump. In the introduction part is described the measuring method and its principle for measurement of heat pumps and refrigerant systems. The following part deals with the measurement of the heat pump which uses R407C refrigerant. The optimization of the operating amount of refrigerant was based on the measurement of temperature after compression, liquid refrigerant sub-cooling after condenser and coefficient of performance. The last section indicates some other possibilities how to evaluate operation of refrigerant systems and heat pumps.

Klíčová slova: diagnostics, cooling devices, heat pump, coefficient of performance

ÚVOD

Kompresorové zdroje tepla a chladu jsou zařízení, jejichž diagnostika vyžaduje komplexní a nákladné měřicí zařízení. Měření je možné ve specializovaných laboratořích s přesnou měřicí technikou. Samotné zařízení bývá osazeno teplotními a tlakovými čidly pro servisní zásahy a havarijní diagnostiku. Nicméně, pro uživatele je důležitá také provozní efektivita zařízení při podmínkách v místě provozu a životnost zařízení. Vyhodnocení efektivnosti ale není možné bez osazení množstvím drahých čidel na zařízení provozovatelem nebo výrobcem, proto se neprovádí.

Mobilní měřicí zařízení ClimaCheck umožňuje diagnostiku chladicích zařízení a tepelných čerpadel. K tomuto účelu bylo speciálně navrženo a uzpůsobeno. Instalace na chladivový okruh je snadná a neovlivní jakkoli chod měřeného zařízení. Měřené výstupy jsou zobrazovány v reálném čase na přehledném schématu a zároveň probíhá i jejich okamžité vyhodnocení. Následně je možné odhalit slabá místa zařízení.



Obr. 1 Přenosná měřicí ústředna zařízení ClimaCheck

MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ CLIMACHECK

Mobilní zařízení ClimaCheck sestává z přenosné měřicí ústředny (viz obr. 1), teplotních a tlakových čidel a vyhodnocujícího softwaru. K vyhodnocení provozních parametrů chladicích zařízení a tepelných čerpadel je potřeba měřit základní termodynamické stavy na okruhu chladiva v nejdůležitějších bodech. Pro nejčastěji používané jednostupňové oběhy chladiva se měří:

- ☐ teplota a tlak na výstupu z výparníku,
- ☐ teplota a tlak chladiva za kompresorem,
- ☐ teplota na výstupu z kondenzátoru,
- ☐ příkon kompresoru.

Pro orientační zhodnocení účinnosti kondenzátoru a výparníku se měří i teploty na vstupu a výstupu teplotnosné látky ohřívané kondenzátorem a teplotnosné látky ochlazované výparníkem.

Pro komplexní diagnostiku umožňuje měřicí ústředna současné měření teplot, tlaků a příkonu daného zařízení. Jednotlivé vstupy jsou přehledně označeny na ústředně. Pro měření teploty přímo na potrubí jsou použity příložené odporové teploměry Pt1000. Přesné měření teplot je zajištěno:

- ☐ speciální geometrií příložené části teploměru (se žlábkem),
- ☐ dosažením vysokého součinitele přestupu tepla mezi sondou a povrchem potrubí nanesením teplovodivé pasty a pevným upnutím hliníkovou samolepící páskou,
- ☐ tepelnou izolací čidla v místě měření.

Tlaky se měří tlakovými čidly s převodníky. Pro dosažení vysoké citlivosti je měřicí rozsah čidel jiný pro nízkotlakou stranu a pro vysokotlakou stranu. Pracovní rozsah tlakových čidel musí odpovídat použitým chladivům, proto se používají speciální čidla pro vysokotlaká chladiva jako např. R744 (CO₂) a R410A. Čidla tlaku se napojí na okruh chladiva přes standardní servisní ventily.

Přesné měření příkonu kompresoru je nejproblematictější a nejuniverzálnější. Při neodborném napojení může dojít k poškození jak měřicí

ústředny, tak i měřeného zařízení. Navíc hrozí úraz elektrickým proudem. ClimaCheck disponuje třemi klešťovými ampérmetry a voltmetry pro měření proudu a napětí na všech fázích. Přesnému vyhodnocení měření je pak věnována speciální část ústředny, která umožňuje měřit soustavy:

- ☐ nesouměrné třífázové s nulovým vodičem,
- ☐ nesouměrné třífázové bez nulového vodiče,
- ☐ souměrné třífázové,
- ☐ dvofázové,
- ☐ jednofázové.

Samotná měřicí ústředna funguje i jako úložiště měřených dat. Vyhodnocování měření se provádí na počítači připojeném přes ethernetový kabel. Software nainstalovaný na počítači pak ovládá samotné měření a nastavení zpracování výpočtů (nastavení schématu měření, typu chladiva, periodu měření, výstupy, atd.). Vyhodnocovací software pracuje s přesnou a obsáhlou knihovnou chladiv založenou na softwaru REFPROP (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database) [1].

PRINCIP METODY CLIMACHECK

Standardní měření chladicího nebo tepelného výkonu probíhá na straně teplosnosné látky (voda, nemrznoucí směs, vzduch) změřením jejího průtoku a rozdílu teplot na vstupu a výstupu. Pro vyhodnocení efektivity v podobě chladicího nebo topného faktoru se vypočítaný užitečný výkon dělí elektrickým příkonem dodaným do zařízení. Na celé metodě je problematické přesné změření průtoku teplosnosné látky. Pro měření průtoku kapaliny v potrubí lze použít přesných průtokoměrů zabudovaných do potrubní sítě (na většině instalací je nutný zásah do potrubní sítě) nebo příložených ultrazvukových průtokoměrů (drahé čidlo, nejistota měření vlivem nutného nastavování nejistých tloušťek potrubí, vlastností teplosnosné látky, apod.). Přesné měření okamžitého průtoku vzduchu je v provozu komplikované.

ClimaCheck je univerzální a jednotlivé výkony (tepelný i chladicí) určuje ze znalosti termodynamických vlastností chladiva. Měřicí metoda je založena na určení průtoku chladiva zařízením v ustálených provozních stavech. Měření průtoku na straně chladiva by bylo možné pouze hmotnostním průtokoměrem po zásahu do oběhu chladiva, proto software ClimaChecku určuje hmotnostní průtok chladiva na základě energetické bilance kompresoru

$$\dot{m}_{ch} = \frac{P_k - \dot{Q}_z}{h_1 - h_2} \quad (1)$$

kde je

- $\dot{m}_{ch}$ hmotnostní průtok chladiva [kg.s⁻¹],
- P_k příkon kompresoru [W],
- $\dot{Q}_z$ ztrátový tepelný tok kompresoru [W],
- h_1 entalpie na vstupu do kompresoru [kJ.kg⁻¹],
- h_2 entalpie na výstupu z kompresoru [kJ.kg⁻¹].

Entalpie na sání a výtlačku kompresoru jsou určeny druhem chladiva, teplotou a tlakem. Ztrátový tepelný tok kompresoru je u každého zařízení jiný (záleží na tepelné izolaci kompresoru, omývání proudem vzduchu, okolní teplotě apod.). Výrobci chladivových kompresorů jej odhadují ve svém softwaru na 5 % příkonu kompresoru, u tepelných čerpadel s izolací na kompresorech je zanedbatelný. Přesnost jeho určení do značné míry určuje přesnost metody. Ze znalosti teplot, tlaků a hmotnostního průtoku chladiva již lze dostatečně přesně určit hlavní výkony a chladicí, resp. topný faktor (viz rovnice 2 až 5).

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{ch} \cdot (h_2 - h_3) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_{ch} \cdot (h_1 - h_4) \quad (3)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_t}{P_k} \quad (4)$$

$$EER = \frac{\dot{Q}_{ch}}{P_k} \quad (5)$$

kde je

- $\dot{Q}_t$ topný výkon kondenzátoru [W],
- $\dot{Q}_{ch}$ chladicí výkon výparníku [W],
- h_3 entalpie chladiva na výstupu z kondenzátoru [kJ.kg⁻¹],
- h_4 entalpie chladiva na vstupu do výparníku [kJ.kg⁻¹],
- COP tepelný faktor [-],
- EER chladicí faktor [-].

Poznámka: entalpie h_4 se neměří, ale je dopočítaná z předpokladu izoentaltického škrcení (nesdílí se teplo), který platí pro všechny zařízení s expanzním ventilem u vstupu do výparníku ($h_3 = h_4$).

OPRAVA A MĚŘENÍ TEPELNÉHO ČERPADLA

ClimaCheck byl použit pro opravu tepelného čerpadla země-voda s chladivem R407C na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Tepelné čerpadlo se používá pro vytápění halových laboratoří Ústavu techniky prostředí. Rok výroby tepelného čerpadla je 2001. Pro jeho konstrukci byly použity komponenty:

- ☐ kompresor Copeland ZR40 K3E
- ☐ výparník Alfa Laval CB51-20HX
- ☐ kondenzátor Alfa Laval CB52-20H

Při kontrole jeho vnitřního chladivového oběhu bylo zjištěno, že část chladiva uchází přes vlnovec za kompresorem. Nejprve bylo měřeno tepelné čerpadlo před jeho opravou a následně bylo odsátím zbytku chladiva naměřeno 1,6 kg zbytkového chladiva. Při úniku chladiva, které je směsí freonů, dochází ke změně složení, což ovlivňuje provozní vlastnosti. Nelze proto již tvrdit, že se jedná přesně o chladivo R407C.

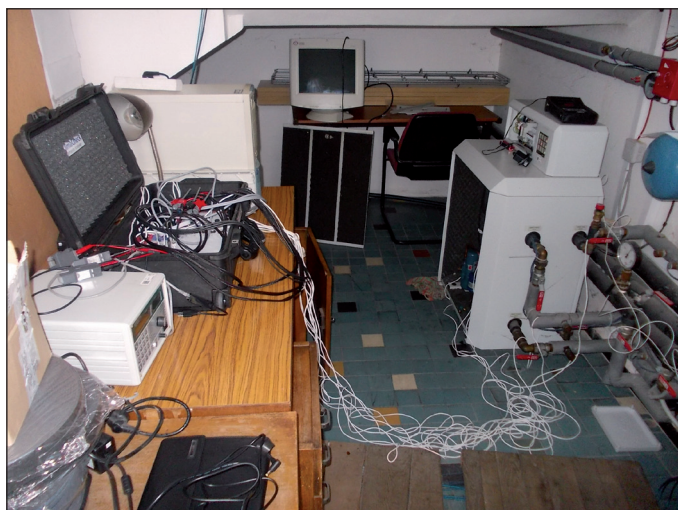
Oprava tepelného čerpadla

Před nutnou opravou se zařízení osadilo sondami přístroje ClimaCheck a zjišťovaly se provozní stavy v původním provozu s nedostatkem chladiva. Před opravou bylo nejdříve odsáto zbytkové chladivo z okruhu (naměřeno 1,6 kg zbytkového chladiva), vadný vlnovec byl nahrazen pevným potrubním spojem, tepelné čerpadlo bylo naplněno dusíkem, vyvacuováno a znovu naplněno (tzv. „na průhledítko“) 1,9 kg nového chladiva R407C. Poté byla provedena opakovaná měření a společně s optimalizací množství náplně chladiva.

Byly proměřeny čtyři nové provozní stavy s náplní 1,9 kg, 1,8 kg, 1,75 kg, a 1,7 kg chladiva. U každého z nich se sledovalo podchlazení chladiva za kondenzátorem, teplota na výtlačku kompresoru a topný faktor.

OPTIMALIZACE MNOŽSTVÍ CHLADIVA

Kompresor chladicích zařízení je vystaven nejrůznějším provozním stavům. Měřené tepelné čerpadlo ohřívá vodu v akumulární nádobě otopné soustavy. Nastavená teplota vody pro vypnutí tepelného čerpadla je



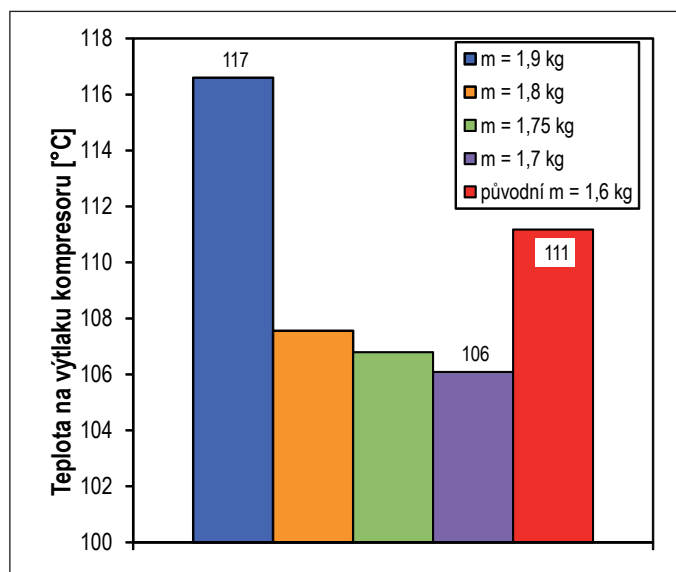
Obr. 2 Připojení čidel ClimaChecku na tepelné čerpadlo

50 °C. Kondenzátor pracuje s průtokem 1302 l/h. Průměrná teplota na vstupu nemrznoucí směsi ze zemního vrtu do výparníku se během roku pohybuje od 0 do 5 °C. Kvůli relativně vysoké teplotě otopné vody, kterou je natápěna akumulární nádoba, se v provozu nastaví vysoká kondenzační teplota a kompresor musí překonávat velký tlakový poměr a zvyšuje se výtlačná teplota a příkon kompresoru, což vede ke snížení topného faktoru.

Tepelné čerpadlo bylo měřeno v širším spektru provozních stavů, jejich vzájemné porovnání je při teplotě nemrznoucí směsi z vrtu na vstupu do výparníku 4,3 °C a teplotě vody na výstupu z kondenzátoru 50 °C. Průtoky na primární a sekundární straně se po celou dobu měření neměnily. Zapojení čidel ústředny ClimaChecku na tepelné čerpadlo je zobrazeno na obr. 2.

Teplota chladiva za kompresorem

Příliš vysoká teplota chladiva na výtlaku kompresoru snižuje jeho životnost a dochází i k rychlejšímu opotřebování oleje. Horké páry chladiva pokračují z kompresoru do kondenzátoru tepelně izolovaným potrubím. Vlivem dlouhodobého provozu s vysokými teplotami došlo u měřeného tepelného čerpadla k degradaci (rozpadnutí) exponovaných částí izolace. Naměřené průměrné teploty na výtlaku kompresoru v provozu znázorňuje obr. 3.



Obr. 3 Teplova chladiva na výtlaku kompresoru

Z obr. 3 je patrné, že nejnižší teplotu na výtlaku vykazovalo zařízení s 1,7 kg chladiva. Teplota mírně rostla s rostoucí náplní a pro 1,9 kg došlo k jejímu skokovému zvýšení. Nárůst je spojen s přeplněním zařízení chladivem. Pro vyšší náplň již zkonzenzované chladivo zaplnilo část deskového kondenzátoru, což se projevilo zvýšením podchlazení na výstupu z kondenzátoru (viz dále) a zvýšením kondenzačního tlaku. Kompresor tak při stejných podmínkách na sání musí překonat vyšší tlakový poměr a zhoršuje se u něj izoentropická účinnost komprese a dopravní součinitel.

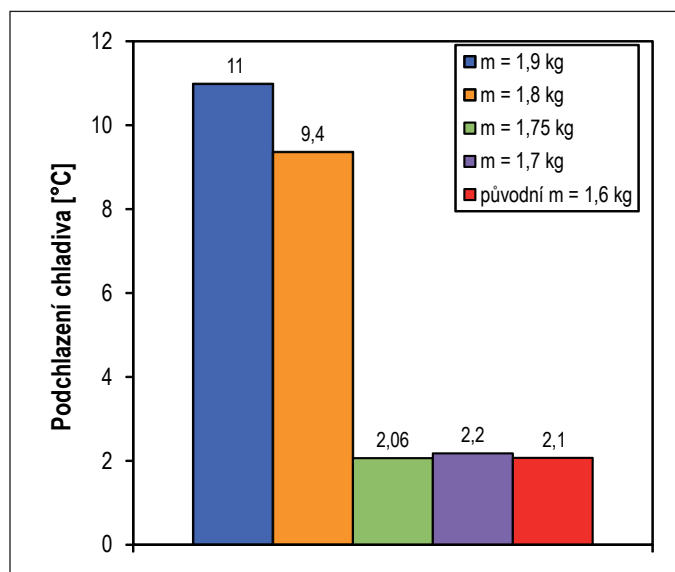
Podchlazení kapalného chladiva za kondenzátorem

Na výstupu z kondenzátoru je u dobře naplněného zařízení mírně podchlazené kapalně chladivo. Velikost podchlazení závisí na množství chladiva v okruhu. Pokud dojde k úniku chladiva, klesne imaginární hladina (ve skutečnosti v kondenzátoru neexistuje jednoznačné rozhraní mezi kapalinou a mokrou parou) kapalného chladiva v kondenzátoru a na výstupu se začnou objevovat bubliny. V některých případech (při větším úniku) projdou bubliny plynné fáze dále k expanznímu ventilu a způsobí jeho špatnou funkci a po delší době dokonce zničení.

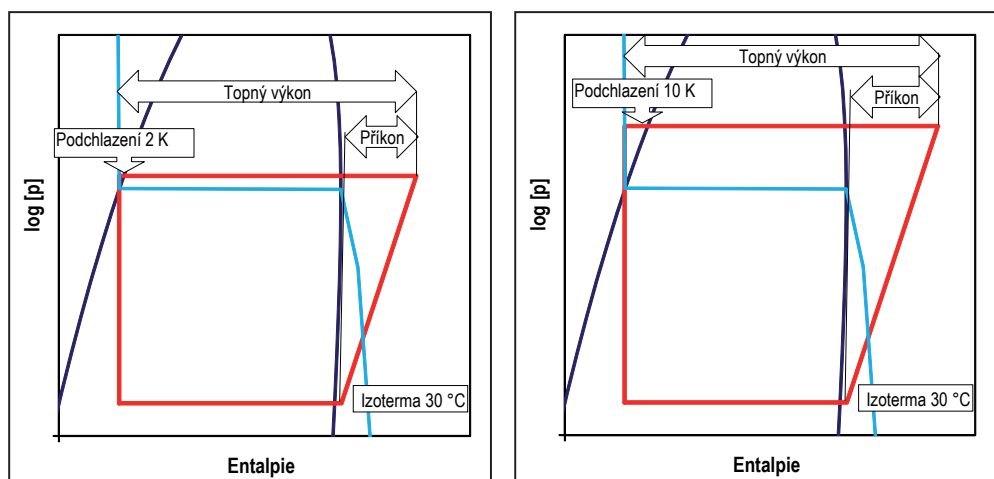
Měřené tepelné čerpadlo má v okruhu za kondenzátorem zapojený sběrač chladiva, který slouží jako zásobník kapalného chladiva, přesto se před opravou objevovaly v ustáleném režimu bubliny plynu na průhledítku před expanzním ventilem. První naplnění chladiva do tepelného čerpadla bylo provedeno právě s ohledem na bubliny na průhledítku. Samotné plnění přivodí v systému značnou nestabilitu a po naplnění je pro posouzení provozního stavu nutno počkat na ustálení. Při změně obsahu chladiva v okruhu se v měřeném provozním stavu měnilo i naměřené podchlazení kapalného chladiva v kondenzátoru (viz obr. 4).

Pro náplň 1,9 kg bylo naměřeno podchlazení kapalného chladiva 11 K, při náplni 1,8 kg pak 9,4 K. Další odebrání chladiva mělo za následek skokové snížení podchlazení na 2,1 K a zlepšení funkce kondenzátoru – snížení kondenzačního tlaku (hladina kapaliny klesla na spodní část kondenzátoru a nezabírala významnou část teplosměnné plochy) při zachování čisté kapalně fáze na výstupu.

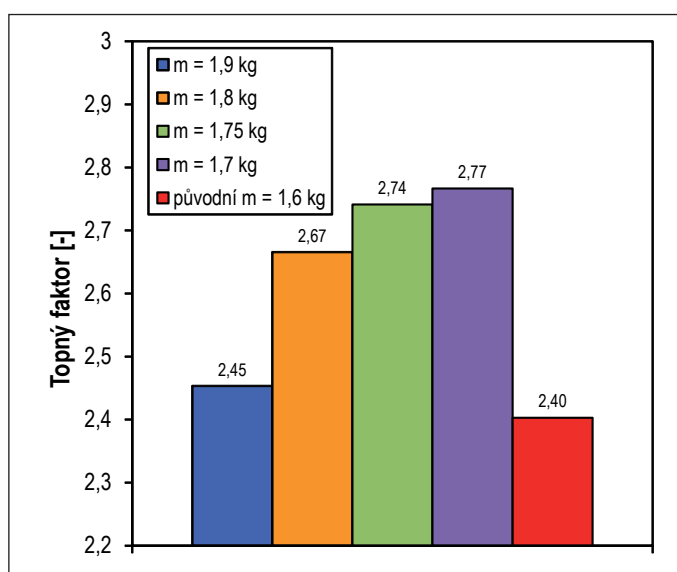
Nízké podchlazení chladiva za kondenzátorem je výhodné kvůli jeho vlivu na topný faktor a teplotu za kompresorem. Za předpokladu stejné výstupní teploty chladiva za kondenzátorem má tepelné čerpadlo s nižším podchlazením menší příkon i menší topný výkon, a to o stejnou hodnotu, a tudíž vyšší topný faktor (viz obr. 5.)



Obr. 4 Podchlazení kapalného chladiva na výstupu z kondenzátoru



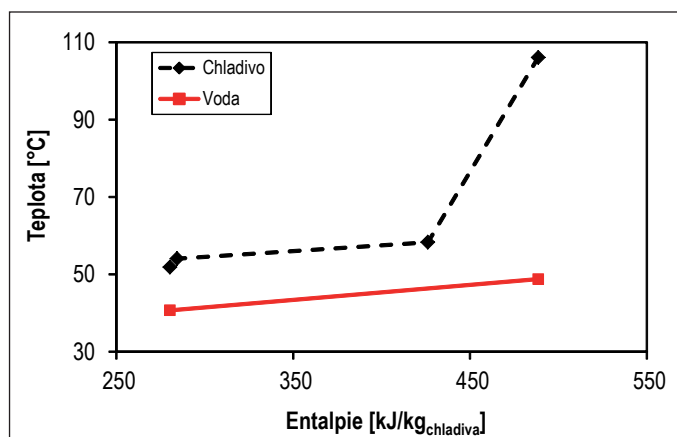
Obr. 5 Vliv podchlazení chladiva na příkon a topný výkon tepelného čerpadla



Obr. 6 Topný faktor tepelného čerpadla při změně množství chladiva

Topný faktor tepelného čerpadla

Předchozí efekty změny množství chladiva vedou i ke změně topného faktoru při stejných podmínkách (viz obr. 6). Při úvodním měření před opravou byl naměřen topný faktor 2,4. Následnou opravou a optimalizací se podařilo topný faktor při jinak shodných provozních podmínkách zvýšit až na 2,77 (to je o 15 %) díky vytvoření lepších podmínek pro kompresor.



Obr. 7 Diagram t-h průběhu teplot na kondenzátoru (vlevo) a výparníku (vpravo)

je umožněno dostatečným dimenzováním teplosměnné plochy a malým podchlazením chladiva na výstupu z kondenzátoru. Velmi teplé chladivo za kompresorem dokáže ohřát v protiproudém kondenzátoru teplonosnou látku (otopnou vodu) na teplotu vyšší, než je teplota kondenzační. Situace na kondenzátoru měřeného tepelného čerpadla je na obr. 7 vlevo.

Rozdíl teplot mezi teplotou chladiva na počátku kondenzace (chladivo R407C má teplotní skluz) a ohřátou vodou na výstupu je 9,5 K. Kondenzátor tedy pracuje špatně. Může to být způsobeno zanesením teplosměnné plochy nebo jeho poddimenzováním.

Průběh teplot na výparníku je na obr. 7 vpravo. Mezi teplotou chladiva na výstupu z výparníku a vstupní teplotou nemrznoucí směsi je pouze nepatrný rozdíl (asi 0,4 K). Přehřátí chladiva udržované expanzním ventilem je 6,4 K, což je běžně používané přehřátí i v dnešních chladivových systémech.

Hodnocení kompresoru

Jedním z výstupů ze softwaru ClimaChecku je zjištěná izentropická účinnost komprese (vypočtená ze znalosti chladiva, entalpie na sání a výtlačku a kondenzačního tlaku). Kompresor lze přibližně porovnat s dnes vyráběnými kompresory a při stejných podmínkách v návrhovém softwaru jednotlivých výrobců. Z vyhodnocení měření kompresoru je účinnost izentropické komprese v podmínkách naměřených na zařízení (teplota vypařovací -1 °C, teplota kondenzační 58,3 °C a přehřátí na sání 6,4 K) asi 53 %. Pro nové spirálové (scroll) kompresory je to 52 % (zjišťováno pro kompresory podobné velikosti ze softwaru [2]). Kompresor tedy funguje dobře.

DALŠÍ VÝSTUPY Z MĚŘENÍ

Měření na ClimaChecku nabízí velice široké spektrum výstupů, důležitá je jejich správná interpretace a možnosti jejich posouzení, případně praktického přínosu. V případě měřeného tepelného čerpadla se přímo nabízí posouzení funkčnosti výměníků (výparníku a kondenzátoru) a kompresoru.

Průběh teplot na kondenzátoru a výparníku

Dnes navrhovaná tepelná čerpadla a chladicí zařízení by měly mít teplotu ohřívání teplonosné látky na výstupu z kondenzátoru stejnou nebo o málo vyšší, než je teplota kondenzační. To

ZÁVĚR

Měřicí zařízení ClimaCheck je nástrojem k měření a diagnostice tepelných čerpadel a chladicích zařízení. Bylo použito pro diagnostiku a optimalizaci množství náplně chladiva pro starší tepelné čerpadlo pracující v reálném provozu. Výsledkem optimalizace náplně oproti stávajícímu stavu je snížení výtlačné teploty kompresoru o 10,5 K a zvýšení topného faktoru z 2,40 na 2,77. Dále byla ověřena správná funkce kompresoru na základě porovnání jeho izoentropické účinnosti se současnými kompresory a na příkladu ukázáno odhalení poddimenzování (nebo zanesení) kondenzátoru.

Zařízení ClimaCheck bez trvalých zásahů do chladivového okruhu umožňuje komplexní analýzu chladicích zařízení, kterou, v krátkém časovém intervalu, provádíme (všechna měření po opravě tepelného čerpadla byla provedena v rámci jednoho dne) a v podmínkách, ve kterých chladivové zařízení skutečně pracuje.

Měřicí zařízení bylo použito pro měření nejjednoduššího chladivového cyklu, ale po rozšíření ho lze využít i pro měření složitějších zařízení, jako jsou pokročilá jednostupňová zařízení (s vnitřní výměnou tepla, s dochlazovačem, chladičem par, s EVI kompresorem, apod.), různé varianty dvoustupňových oběhů, okruhy s CO₂ a další.

Kontakt na autora: jan.sedlar@uceeb.cvut.cz

Tento příspěvek vznikl za podpory Evropské unie, projektu OP VaVpI č. CZ.1.05/2.1.00/03.0091 – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov.



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



Použité zdroje:

- [1] HUBER M., LEMMON E., MCLINDEN M. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties – REFPROP [online]. Aktualizováno 30. 5. 2014. Dostupné z: <http://www.nist.gov/srd/nist23.cfm>
- [2] EMERSON CLIMATE TECHNOLOGIES. SELECT – Copeland selection software, verze 7.7 [software]. [05/13].

V německé domácnosti jde 70 % energie na vytápění

Podle Spolkového statistického úřadu (SBA) za rok 2012 vydala německá domácnost za energii v průměru 70,3 % na vytápění, 12,7 % na přípravu teplé vody, 8,9 % na spotřebu domácích přístrojů, 6,2 % na vaření, sušení a žehlení a 1,9 % na osvětlení.

Roční výdaje německých domácností za energii mezi roky 2011 a 2012 stouply o 2,3 % na 16 304 kWh, přičemž z toho jen výdaje za vytápění a přípravu teplé vody stouply o 15,2 % na 1025 Euro.

Pramen: Baulinks 2014

(AB)

HallTec – nový veletrh technického zařízení budov

Ve dnech 8. až 10. dubna 2014 se poprvé otevřely brány výstaviště Messe Karlsruhe pro nový veletrh technického zařízení budov pro průmysl a řemesla. Veletrh se zaměřuje na systémová řešení zásobování teplem a chladem včetně zpětného využívání energie. Cílí na projektanty, architekty, investory a rozhodující činitele v soukromé, komunální a státní výstavbě. Souběžně proběhly i dva další odborné veletrhy – WTT Expo pro průmyslovou procesní techniku tepla a chladu a PaintExpo pro barevné povrchové úpravy. Poprvé veletrh působil ve spolupráci s odborným svazem Verband Deutscher Kälte-Klima Fachbetriebe (VDKF).

Pramen: CCI 13/2013

(AB)



Čerpadla s vysokou účinností pro každou aplikaci.

...byli jsme první
a stále máme náskok

ErP
READY
2015

APPLIES TO
EUROPEAN
DIRECTIVE
FOR ENERGY
RELATED
PRODUCTS

....od chaty po mrakodrap,
od garáže po továrnu



Pioneering for You

wilo