

Význam matematického modelování chladicích okruhů pro techniku měření

Relevance of Cooling Circuits Mathematical Modelling for Measurement Technique

Recenzent
prof. Ing. Jiří Petrák, CSc.

Změřené energetické parametry chladicího zařízení samy o sobě neřeknou, zda zařízení pracuje v úrovni možnosti komponentů, z nichž je sestaveno (zejména kompresoru). Takovou informaci získáme jedině tehdy, když tyto parametry porovnáme s parametry odečtenými z charakteristik použitého kompresoru, přepracovaných na okrajové podmínky daného měření. Použití výpočetní techniky umožňuje integrovat matematický model chladicího okruhu s reálnými kompresory přímo do systému měření a již v průběhu měření je průběžně porovnávat a tak získat důležité informace nejen o parametrech ale i o stavu („kondici“) měřeného zařízení.

Klíčová slova: kompresor, chladicí okruh, tepelné čerpadlo, matematický model

Measured energetic parameters of cooling equipment do not themselves reflect whether the equipment works within the limitation level of components, from which it is built (mainly the compressor). Such information we can obtain only by comparing these parameters with parameters read from the employed compressor characteristics, worked out for the boundary conditions of the particular measurement. Application of computer technology enables an integration of a mathematical model of a cooling circuit with real compressors directly into a measurement system and continuously compare them already during a measurement process and thus obtain important information not only about the parameters but also about the state („condition“) of the measured equipment.

Key words: compressor, refrigeration circuit, heat pump, mathematical model

ÚVOD

Posoudit stav a parametry zařízení porovnáním hodnot „měřených“ s hodnotami „čtenými“ z charakteristik použitého kompresoru je sice jednotlivě možné pomocí SW, který dává výrobcí kompresorů k dispozici, při větším počtu měření, nebo při měření přímo v terénu není takové porovnávání řešením ideálním a dostatečně operativním. Přitom jen takové porovnání může dát objektivní informaci o stavu měřeného zařízení. Pokud bychom chtěli porovnávat „měřené“ a „čtené“ parametry spojitě a za situace, kdy okrajové podmínky a tím i parametry zařízení se mění průběžně v čase, pak SW výrobců tento požadavek není schopen naplnit. Nejen pro tyto účely byl sestaven (matematický počítačový) „Model chladicího okruhu s reálnými kompresory“.

ZÁKLADNÍ CÍLE „MODELU CHLADICÍHO OKRUHU“

Chceme-li počítačem řešit jakoukoliv úlohu, musíme nejprve tuto úlohu algoritmovat a pak algoritmus převést do „řeči počítače“. Každá úloha má určitý záměr, respektive cíl, kterého se má řešením dosáhnout. Přesto, že rámcový cíl úlohy může vyplývat přímo z jejího názvu, **je před zpracováním algoritmu vždy žádoucí konkrétní cíl (nebo cíle) podrobně a přesně deklarovat.** Vlastní algoritmus pak specifikuje (konečnou) posloupnost kroků (operací) vedoucí k řešení daného problému, tj. k dosažení zadaného cíle. Algoritmizace se většinou zpracovává v několika úrovních. V nejvyšší úrovni se definují technické prostředky, které pro řešení musíme mít k dispozici, v dalších (nižších) úrovních se specifikují dílčí operace (procedury), které se v rámci daného prostředku musí vykonávat.

Pro „Model chladicího okruhu s reálnými kompresory“ byly deklarovány čtyři cíle. Dva základní a dva doplňkové (ne však méně důležité):

- A) Pro zvolený (reálný) kompresor pracující s daným chladivem **určit pro jakékoliv zadané nebo změřené vnitřní okrajové pracovní podmínky** (tzv. podmínky vnitřního děje, tj. t_o/p_o , t_k/p_k , Dts , Dtd), zda kompresor pracuje v přípustném pracovním rozsahu a pokud ano, pak určit všechny základní (standardní) energetické **parametry kompresoru**, ale i další důležité (zpravidla nestandardní) parametry, kte-

ré výrobci vůbec neuvádějí, ale které jsou pro některé úlohy zcela nezbytné.

- B) Pro navržený chladicí okruh pracující se zvoleným kompresorem a daným chladivem **určit pro jakékoliv zadané nebo změřené vnější okrajové podmínky** (tzv. podmínky vnějšího děje, tj. zejména t_m1V , t_m1K) všechny důležité energetické i další **parametry chladicího okruhu**.
- C) Pro názornost **zobrazit** všechny vstupní (zadané nebo změřené) i výstupní (určené respektive vypočtené) **parametry** vhodným způsobem graficky, zejména **v pracovních diagramech**.
- D) Procedury **řešící předchozí úlohy** navrhnout tak, aby se mohly **využívat** nejen „uvnitř“ popisovaného „Modelu“, ale i „vně“ **v rámci jiných modelů nebo systémů**.

Dá se říci, že algoritmem zajišťujícím plnění cílů ad A) řešíme „statickou“ část úlohy a algoritmem zajišťujícím plnění cílů ad B) řešíme „dynamicou“ část úlohy. Přitom technický prostředek, který umožní realizovat záměry ad A) je podmínkou pro realizaci záměrů ad B). S ohledem na možný rozsah článku se zaměříme jen na „statickou“ část úlohy.

ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA ALGORITMUS „PARAMETRY KOMPRESORŮ“

Parametry kompresorů jsou v obecném slova smyslu dány charakteristikami, které výrobci kompresorů dávají vesměs volně k dispozici. Chceme-li ale při použití výpočetní techniky aktivně s charakteristikami kompresorů pracovat, nestačí mít je v elektronické podobě, v jaké je výrobci poskytují (označme ji jako „SW výrobce“). Ta většinou umožňuje jen komunikaci systémem „uživatel (klávesnice) – SW výrobce“ a ne komunikaci „uživatelský SW – SW výrobce“ jak bychom potřebovali.

Pro aktivní práci musíme mít k dispozici **parametry kompresoru vyjádřeny jako volně přístupné funkce** okrajových podmínek, respektive určujících termodynamických parametrů – stavů (tlaků a teplot) – v chladicím okruhu. To platí jak pro tři základní energetické parametry, tj. příkon kompresoru (N_{ko}), chladicí výkon (Q_o) a kondenzační výkon (Q_k), tak pro další „doplňující“ energetické parametry, tj. výkon přehřívací (Q_s), výkon

podchlazovací (Q_d), a výkon v přehřátých parách chladiva (Q_{pp}), ale i parametry další.

Obecně tedy potřebujeme pro jakýkoliv energetický parametr (P) znát vztah:

$$P = fce(po / to, pk / tk, Dts, Dtd) \quad (1)$$

Tento obecný vztah musíme pro jednotlivé energetické parametry zpřesnit. Ne pro každý energetický parametr jsou totiž všechny termodynamické stavy určující a potřebné, nebo naopak dostatečné.

Tři základní energetické parametry jsou určeny následujícími zpřesněnými vztahy:

$$Q_o = fce(po / to, pk / tk, Dts, Dtd) \quad (2)$$

$$Nko = fce(po / to, pk / tk) \quad (3)$$

$$Qk = fce(po / to, pk / tk, Dts, Dtd, kNko) \quad (4)$$

Přitom platí:

$$Qk = Q_o + kNko \cdot Nko \quad (5)$$

S přihlédnutím k poslednímu vztahu je zřejmé, že pro aktivní práci nám stačí pouze dva vztahy a to pro Nko a Q_o , protože součinitel $kNko$ je pro určitý typ kompresoru konstantní. Poznamenejme, že v rozsahu Dts , Dtd , které v praxi obvykle přicházejí v úvahu je Nko na těchto hodnotách nezávislý.

Takové vztahy výrobci kompresorů nedávají k dispozici, proto si je musíme vytvořit, tj. „uživatelsky definovat“ sami. Charakteristiky kompresorů které poskytují výrobci jsou vesměs vyjádřeny tabelární formou jako závislost jmenovitých Nko_j , Qo_j a Qkj na to a tk , při určitých (jmenovitých – i když volitelných) hodnotách Dts_j a Dtd_j .

Chceme-li pracovat s různými kompresory (řadami) různých výrobců, musíme si pak sami vytvořit jednotnou databázi (DTB), s jednoznačně definovaným zápisovým protokolem. Do té pak musíme údaje jednotlivých kompresorů (řad) různých výrobců převést. Zápisový protokol charakteristik kompresorů jednotlivých výrobců není totiž shodný. Bohužel se ale často liší i u jediného výrobce, buď u různých typů (řad) nebo zejména u různých verzí SW – výrobci asi neočekávají, že by někdo s jejich podklady „tvůrčím“ způsobem pracoval, nebo to možná ani nechtějí? Vytvoření jednotné databáze je proto pracné. Pracnost zvyšuje i nutná aktualizace takové databáze, neboť parametry (charakteristiky) nově vyvíjených kompresorů se v nových verzích postupně zpřesňují (viz ZÁVĚR).

Vytvoření jednotné databáze kompresorů je „podmínkou nutnou, ne však postačující“ pro aktivní práci s charakteristikami. Chceme-li údaje z charakteristik zpracovávat pro jmenovité okrajové podmínky přepočítat na aktuální okrajové podmínky, musíme k tomu použít termodynamický výpočet, pro který potřebujeme mít k dispozici rovnice termodynamických vlastností chladiv (jako funkce stavových veličin – tlaku a teploty) v elektronické podobě. Rovnice termodynamických vlastností všech chladiv, se kterými kompresory pracují, jsou proto druhou „podmínkou nutnou“ (opět však „ne postačující“).

ZÁKLADNÍ KROKY ALGORITMU „PARAMETRY KOMPRESORŮ“

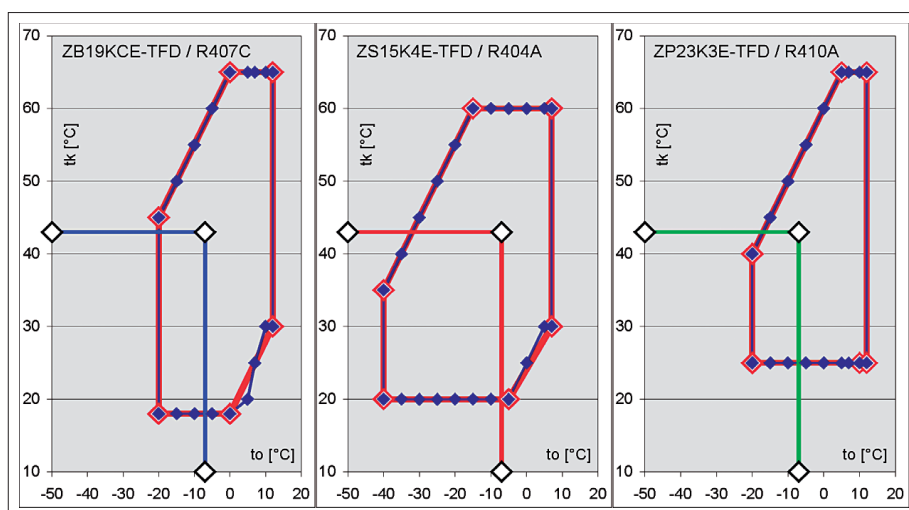
Algoritmus umožňující aktivní práci s charakteristikami sestává z několika základních kroků:

1. Systém pro **vyhledání kompresoru** v DTB podle zadaných kritérií např. typu kompresoru, použitého chladiva, pracovního rozsahu, parametrů apod.
2. **Aktivace charakteristik vybraného kompresoru** a současně „aktivace chladiva“ použitého v daném kompresoru.
3. **Čtení hodnot jmenovitých** Qo_j a Nko_j z tabulky zvoleného kompresoru pro zadané nebo změřené to a tk při jmenovitých Dts_j a Dtd_j .
4. **Výpočet hodnot aktuálních** Q_o , Qk ($Nko = Nko_j$) z načtených Qo_j a Nko_j pro aktuální zadané nebo změřené Dts a Dtd a zadanou hodnotu $kNko$.
5. **Zobrazení okruhu** při aktuálních parametrech v **Mollierově diagramu** $\log(p) - h$.
6. Grafické zobrazení dalších souvislostí v okruhu.

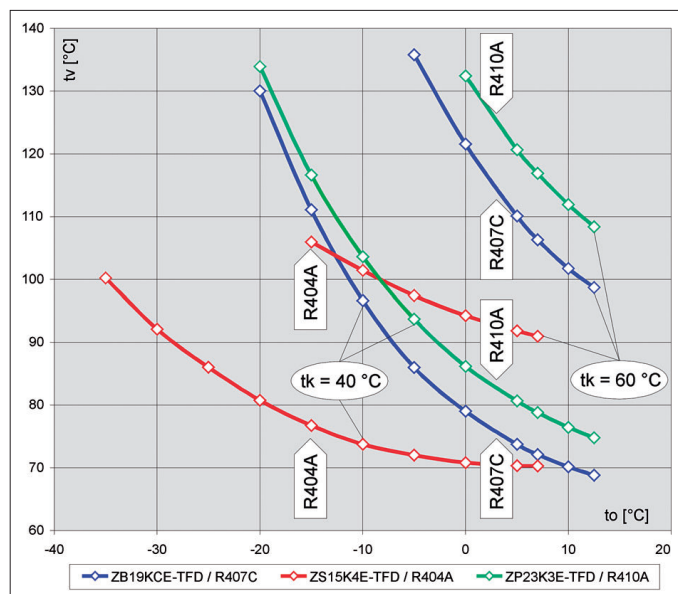
Pro realizaci jednotlivých kroků musíme zpracovat potřebné „uživatelské funkce“, respektive „uživatelské procedury“. Zatím co těžiště prací na prvních třech krocích je v úrovni „programátorské“, těžiště prací na čtvrtém kroku (a dalších) je především v úrovni „chlaďařské“. A až čtvrtý krok zajišťuje konečný efekt kroků předchozích. Přitom každý, kdo s termodynamickými výpočty chladicích okruhů pracuje, si uvědomuje, že „jednoduše“ definovaný 4. krok představuje „složitý“ výpočet, respektive přepočet celého chladicího okruhu

V popisovaném „Modelu“ celý tento **výpočet zajišťuje jediná** „vhodnou technologii“ definovaná „uživatelská funkce“. Parametry nezbytně potřebné pro provedení tohoto přepočtu můžeme využít i pro jiné účely. Funkce pomocí nich určí další hodnoty „nad rámec“ požadovaného přepočtu. Např. výtlačnou teplotu (což je parametr velice důležitý, který ale výrobci standardně v charakteristikách neuvádějí) a známe-li zvihový objem kompresoru i objemovou (dopravní) účinnost (což je velice zajímavý parametr, zejména při porovnávání různých druhů kompresorů). Funkce vypočte i další parametry, které sice pro požadovaný přepočet nejsou potřebné, ale slouží pro určení dalších důležitých hodnot. Např. objemového množství obíhajícího chladiva v důležitých částech okruhu (výtlak, sání, kapalina). Vyčíslení se samozřejmě i všechny doplňující energetické parametry (Q_s , Q_d , Q_{pp})

Zde je třeba připomenout, že **výpočty** prováděné takovou „komplexní“ funkcí **musíme podpořit dalšími „uživatelsky definovanými funkcemi“**. Jejich potřeba je dána tím, že termodynamické vlastnosti chladiv jsou vesměs definovány vztahem $P = fce(R, p, t)$, tj. jednotlivé parametry (P např. h – entalpie, s – entropie, v – měrný objem) jsou definovány jako funkce chladiva



Obr. 1 Pracovní rozsah tří porovnávaných spirálových kompresorů



Obr. 2 Výtlačné teploty tří porovnávaných spirálových kompresorů
Pro kompresory ZB a ZP dosahují „na mezi rozsahu“ hodnotu cca 135 °C!

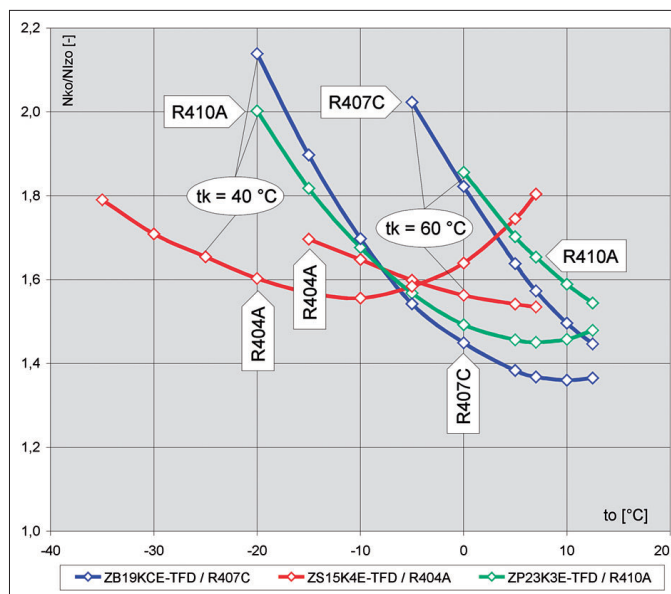
(R), tlaku (p) a teploty (t). Tyto funkce ale pro některé úlohy nestačí. Např. pro určení výtlačné teploty potřebujeme znát vztah $t = fce(R, h, p)$, pro výpočet izentropického příkonu vztah $t = fce(R, s, p)$. Takové „uživatelsky definované funkce“ pracují vesměs na iterčním principu.

Dále je třeba zdůraznit, že **charakteristiky kompresorů** neurčují jen parametry kompresoru, ale **vymezují i přípustnou pracovní oblast**, tj. rozsah okrajových podmínek (t_o a t_k , případně Dts), ve kterých by měl kompresor pracovat. Na tuto skutečnost se často zapomíná a kompresor se mnohdy nechává „trápit“ i vně této pracovní oblasti. Přitom je známo, že četnost poruch kompresorů při jeho práci vně přípustného pracovního rozsahu je mnohem větší než uvnitř tohoto rozsahu. Přípustná pracovní oblast je ovlivněna zejména typem (provedením) kompresoru, ale i chladivem, se kterým kompresor pracuje.

Pro tři různé spirálové kompresory přibližně stejného chladicího výkonu pracující s různými chladivami jsou pracovní rozsahy určené charakteristikami znázorněny (pro snadnou orientaci ve shodném měřítku) na obr. 1. V popisovaném „Modelu“ (SW) se zobrazený pracovní bod může posouvat a pro dané teploty (t_o a t_k) jsou volené parametry všech tří kompresorů uváděny číselně a porovnávány graficky. („Model“ umožňuje výběr a porovnávání rozsahů a všech charakteristik „základních“ i „rozšířených“ tří kompresorů).

Důvody, které k vymezení pracovní oblasti vedou, z charakteristik deklarovaných výrobcem bezprostředně nevyplývají. Vyplynají až z „rozšířených“ charakteristik, zpracovaných pro další „ne-standardní“ parametry pomocí popisovaného „Modelu“. Zjištění, jakých výtlačných teplot se dosahuje na mezi pracovní oblasti je velice poučné (není zde blíže komentováno) a názorně dokumentuje oprávněnost vymezení pracovní oblasti (viz obr. 2).

„Rozšířené“ charakteristiky dokumentují řadu dalších důležitých skutečností. Vedle již zmíněné objemové (dopravní) účinnosti je třeba uvést velice důležitý poměr „reálného“ a „izentropického“ příkonu kompresoru (viz obr. 3). Tento poměr není konstantní a je výrazně větší než 1 (obvykle se pohybuje v rozmezí 1,4 až 2). Při „ryze teoretickém“ řešení energetických bilancí chladicích okruhů se většinou počítá právě s izentropickým příkonem a je zřejmé, že dochází k značnému „zvýhodňujícímu“ zkreslení! Všechny zobrazované charakteristiky jsou pro přehlednost zpracovány jen pro dvě teploty kondenzační (t_k), a to 40 a 60 °C.

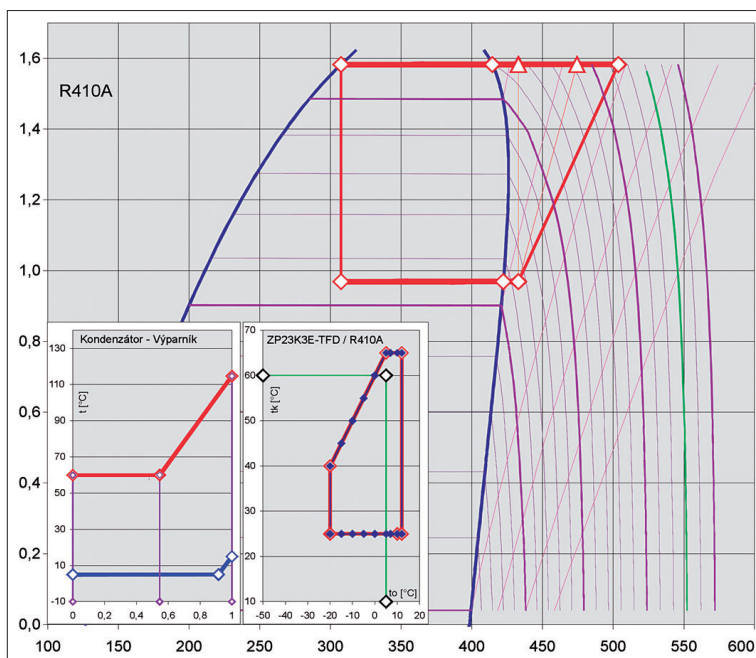


Obr. 3 Poměr reálného a izentropického příkonu tří porovnávaných kompresorů

ZOBRAZENÍ STAVŮ OKRUHU V PRACOVNÍCH DIAGRAMECH

Zobrazení chladicího okruhu v diagramu $\log(p) - h$ předkládá každému „chlaďaři“ jeden ze základních grafických prostředků pro posouzení daného chladicího okruhu. Takové znázornění je v souladu s v úvodu deklarovaným cílem ad C). Pro nakreslení Mollierova diagramu $\log(p) - h$ je zpracován „vnější“ programový segment. Pro chladivo zadané z „Modelu“ vyčíslí všech potřebná data a ta předá zpět do „Modelu“, který z nich vykreslí diagram $\log(p)-h$. Do něj se pak zakreslují sledované (měřené) stavy. Pro „vnější“ programový segment je definován jednoznačný komunikační protokol mezi ním a základním „Modelem“. Takový protokol pak umožňuje využít tento segment i pro jiné modely a systémy, ve smyslu deklarovaného cíle ad D). (Pro chlazení vzduchu je zpracován analogický „vnější“ segment pro přípravu Mollierova diagramu $h - x$ vlhkého vzduchu.)

Základní pracovní diagram může být doplněn diagramy dalšími, vyjadřujícími i jiné důležité souvislosti (viz např. obr 4).



Obr. 4 Zobrazení chladicího okruhu s jedním z porovnávaných kompresorů (ZP) v diagramu $\log(p) - h$

Další diagramy zobrazují pracovní rozsah kompresoru a závislost průběhu teplot v obou výměnících. Za povšimnutí stojí podíl výkonu Q_k v přehřátých parách.

Popisovaný „Model“ umožňuje řešit řadu nejen zajímavých, ale především pro praxi velice důležitých a potřebných úloh.

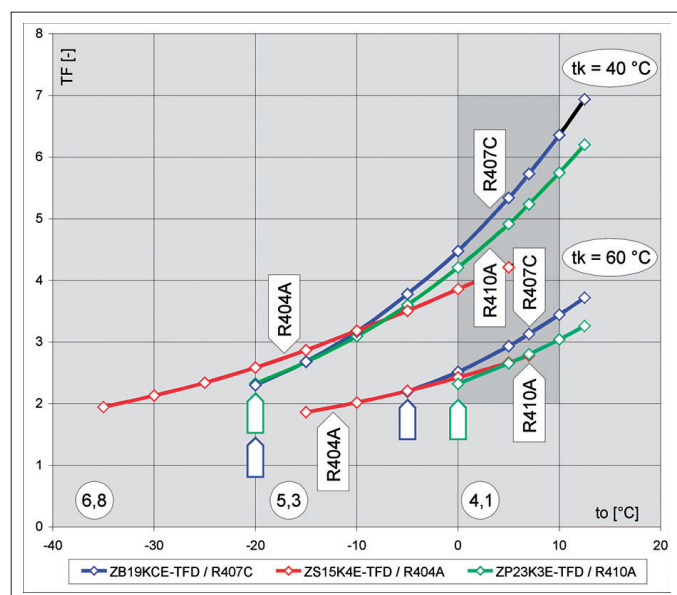
TYPICKÁ ÚLOHA ŘEŠITELNÁ „MODELEM“ (CHARAKTERISTIK)

Naznačme nyní typickou úlohu, kterou můžeme použitím „charakteristik“ řešit:

Každé zadání na chladicí zařízení (CHZ) nebo tepelné čerpadlo (TČ) je vedle výkonových požadavků vždy vymezeno i určitými okrajovými pracovními podmínkami, respektive jejich rozsahem. Máme-li pro jakékoliv, ale zejména nestandardní zadání vybrat vhodný kompresor, měli bychom z ryze technického pohledu brát v úvahu tři základní skutečnosti:

1. Zajistit musíme požadovaný chladicí (u CHZ), respektive topný (u TČ) výkon a to především při kritických okrajových podmínkách.
2. Dosáhnout bychom měli co největší energetický efekt, tj. co nejvyšší chladicí, respektive topný faktor.
3. V celém požadovaném rozsahu okrajových podmínek by měla být zajištěna práce kompresoru ve vymezené přípustné pracovní oblasti.

Specifikované tři požadavky zajistíme porovnáním více kompresorů (např. tří sledovaných), které mohou pracovat i s různými chladivami a optimalizačním výběrem jednoho z nich podle kritéria ad 2. Optimum můžeme hledat pro určité a jediné okrajové podmínky (tj. „staticky“), nebo pro časově proměnné okrajové podmínky (tj. „dynamicky“), kde musíme zohlednit četnost změn. „Statický“ výběr podle kritéria ad 2) ze tří sledovaných kompresorů zajistíme porovnáním charakteristik topného (nebo chladicího) faktoru. Ty jsou znázorněny na obr. 5. Je zřejmé, že např. pro klimatizační zařízení (pracující ve zvýrazněné oblasti) nebudeme volit kompresor ZS. Naopak tento kompresor budeme volit pro chladicí zařízení např. pro okruh mrazírenských boxů (jak z hlediska pracovního rozsahu, tak energetického). Není bez zajímavosti, že ve zvýrazněné „klimatizační“ oblasti je z porovnávaných kompresorů kompresor ZB s dnes již standardním chladivem R407C energeticky výhodnější než kompresor ZP s „módním“ chladivem R410A. Pro dokreslení souvislosti (a bez dalšího komentáře) jsou u jednotlivých kompresorů doplněny jejich zdvihové objemy.



Obr. 5 Topné faktory tří porovnávaných kompresorů

Zvýrazněny jsou levé meze pracovní oblasti kompresorů ZB a ZP. V „kolečku“ uvedeny zdvihové objemy [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$].

„MODEL“ A TECHNIKA MĚŘENÍ

Předchozí skutečnosti popisovaly především „technickou filozofii“ nejen sledovaného „Modelu“, ale počítačového modelování technických úloh (především z „chladařiny“) obecně a jen naznačovaly možnosti využití tohoto „Modelu“. Na závěr je třeba uvést možnost, která se ukazuje jako jedna z nejdůležitějších.

Jak bylo základními cíli deklarováno, **všechny procedury**, zpracované „uživatelské funkce“ a „vnější programové segmenty“ **se mohou použít i vně tohoto „Modelu“**. Mohou tak být využívány např. v systému měření CHZ a TČ. Při měření jsou pak průběžně prezentovány (a porovnávány) nejen hodnoty měření (i několika metodami), ale i „čtené z charakteristik“. Současně jsou oba porovnávané stavy okruhu („měřený“ a „čtený“) průběžně znázorňovány v Mollierově diagramu $\log(p)$ - h . To je zvláště důležité pro diagnostikování provozu měřeného zařízení a usnadňuje to hledání případných poruch a určování jejich příčin.

ZÁVĚR

Zatímco „statická“ (a popisovaná) část „Modelu“ vychází z exaktních údajů, „dynamická“ (a zde nesledovaná) část, která je těžištěm vlastního „Modelu“, vychází z určitých předpokladů a teoreticky odvozených závislostí (charakteristik výměníků). Některé předpoklady – tak jako u většiny modelů – jsou „zjednodušující“. Je však záměrem všechna zjednodušení postupně zpřesňovat a model dále rozvíjet.

Porovnávání parametrů „měřených“ a „odečtených“ v technice měření je postaveno „jen“ na statické části „Modelu“, tj. na exaktních, přesněji řečeno experimentálně zjištěných údajích. Je tedy ovlivněno jednak přesností a „seriózností“ výchozích charakteristik, jednak přesností vlastního měření. Zkušenosti ukazují, že u „zavedených“ kompresorů vyráběných delší dobu (jejichž charakteristiky byly postupně zpřesňovány) porovnání vykazuje u okruhů v dobré „kondici“ minimální odchylky (do 5 % a méně a nezávislé na okrajových podmínkách). U nově „zaváděných“ kompresorů jsou zpravidla tyto odchylky podstatně větší a často závislé na okrajových podmínkách.

Seznam označení

Q_o, Q_k, N_{ko}	výkon chladicí, kondenzační a příkon kompresoru	[kW]
Q_s, Q_d, Q_{pp}	výkon přehřívací, podchlazovací a v přehřátých parách	[kW]
p_o, p_k	tlak vypařovací a kondenzační	[bar]
t_o, t_k	teplota vypařovací a kondenzační	[°C]
Dts, Dtd	přehřátí v sání a podchlazení kapaliny	[K]
kN_{ko}	poměrný podíl příkonu (N_{ko}) vnášený do okruhu jako teplo	[–]
$tm1V$	teplota ochlazeného média na vstupu do výparníku	[°C]
$tm1K$	teplota ohřívání média na vstupu do kondenzátoru	[°C]
j	jako poslední písmeno – jmenovitá hodnota	

Tento článek byl zpracován v rámci řešení „Programu výzkumu a vývoje IMPULS, ev. č. FI-IM4/0269“ za finanční podpory z prostředků státního rozpočtu prostřednictvím MPO.

U příležitosti konference Klimatizace a větrání 2008 byl materiál uveřejněn ve sborníku.

Kontakt na autora: klazar@lit.cz

Použité zdroje:

- [1] Ondráček, E., Janíček, P. Výpočtové modely v technické praxi, SNTL Praha 1990
- [2] Klazar, L. Modelování chladicích okruhů s reálnými kompresory, Konference „Chlazení a klimatizace 2007“, Orava – Slovensko