

Ing. Luděk KLAZAR
PZP HEATING, a.s.

Matematický model reálného chladičového kompresoru

Mathematical Model of Real Refrigerant Compressor

Recenzent
prof. Ing. Jiří Petrák, CSc.

Článek sleduje problematiku matematického modelování parametrů reálných chladičových kompresorů a to jak standardních tak s regulací výkonu změnou otáček. Matematický popis vychází z charakteristik reálných kompresorů, které bývají vesměs dány tabelární formou. Naznačeny jsou různé možnosti matematického vyjádření charakteristik v závislosti na základních argumentech a následného výpočtu parametrů, které charakteristiky neobsahují. Zdůrazněna je skutečnost, že u kompresorů s regulací výkonu, změna otáček nevede jen ke změně parametrů a energetické efektivity, ale i ke změně pracovní oblasti kompresoru. To musí být zohledněno v řídicích systémech chladičových okruhů, které pracují s těmito kompresory.

Klíčová slova: Matematické modelování, reálný chladičový kompresor, regulace výkonu, chladičový okruh.

The author follows up the problem of parameters concerning the mathematical modeling as to the real refrigerant compressors both standard and the output control by means of the revolution change, in his article. The mathematical descriptions come out of characteristics of real compressors that are altogether specified with a tabular form. There are indicated different possibilities of mathematical formulation for characteristics dependent on fundamental arguments and subsequent calculations of parameters which do not include characteristics. The emphasized fact is that the change of revolutions at compressors with the output control does not lead to the change of parameters and the energy effectiveness only, but to the change of the compressor working area, too. It must be taken into account in control systems of cooling circuits working with such compressors.

Key words: Mathematical modeling, real refrigerant compressor, output control, cooling circuit.

ÚVOD

Základní principy matematického modelování chladičových okruhů s reálnými kompresory (RK) byly popsány v článku [1]. Přestože citovaný článek byl zaměřen především na využití modelu v technice měření, je použitelnost modelu mnohem širší, např. pro analytické řešení řady úloh, pro řízení a diagnostikování chladičových okruhů apod. Popsaný model byl dále rozvíjen, zejména se zaměřením na kompresory s výkonem regulovaným změnou otáček (bez ohledu na princip řízení změny otáček). Modelování, tj. matematické vyjádření parametrů takto regulovaných kompresorů umožňuje získat objektivní představu o jejich reálných možnostech. Základní energetické parametry těchto kompresorů (výkon chladičů a příkon) se totiž nemění shodně a úměrně s otáčkami a proto dochází k tomu, že regulace ovlivňuje nejen výkon kompresoru, ale i energetickou efektivity. Další skutečnosti způsobují, že regulace ovlivňuje i pracovní oblast kompresoru. Tento článek chce

blíže shrnout obecné možnosti, které se při modelování reálných kompresorů mohou použít a následně na modelu regulovaných kompresorů naznačit, jak regulace výkonu ovlivňuje nejen základní parametry RK, ale i energetickou efektivity a pracovní oblast. Většinu možností, které jsou popisovány, používá autor v modelu, který je nadále značen jako „Model RK“.

MOŽNOSTI MATEMATICKÉHO VYJÁDŘENÍ PARAMETRŮ STANDARDNÍCH RK

Za standardní RK se v tomto pojednání považují kompresory pístové, spirálové (Scroll), rotační – správně s rotujícím pístem (Rotary) a zdvojené rotační (Twin Rotary), které v evropské elektrorozvodné síti (50 Hz) pracují se jmenovitými otáčkami 3000 1/min, resp. s reálnými otáčkami ~2900 1/min.

Tab. 1 Tabelární vyjádření charakteristiky RK, včetně potřebných identifikačních údajů

Typ K	ZH09K1P-TFM	
Chladivo	R410A	
Δt_{eJ}	5,0	K
Δt_{aJ}	0,0	K
Zdvih O.	6,9	m ³ /h
Frekvence	50	Hz

t_c	t_o	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	7	10	12,5	15	20	25
23		3,93	4,89	6,01	7,34	8,88								
25		3,84	4,78	5,89	7,19	8,71	10,45							
30		3,59	4,51	5,58	6,83	8,28	9,96	11,9	12,75	14,1				
35		3,35	4,23	5,25	6,44	7,82	9,42	11,25	12,05	13,35	14,5	15,75	18,45	
40		3,11	3,94	4,91	6,04	7,34	8,85	10,6	11,35	12,55	13,65	14,85	17,4	20,3
45	43,2	2,86	3,65	4,56	5,62	6,84	8,25	9,87	10,6	11,75	12,75	13,85	16,3	19
50			3,34	4,19	5,17	6,3	7,61	9,12	9,79	10,85	11,8	12,85	15,1	17,65
55				3,8	4,69	5,73	6,94	8,33	8,94	9,93	10,8	11,75	13,85	16,25
60					4,18	5,12	6,21	7,48	8,04	8,94	9,75	10,6	12,55	14,75
65						4,46	5,42	6,55	7,05	7,86	8,59	9,37		
67							5,08	6,14	6,62	7,39				

Parametry RK jsou v obecném slova smyslu dány charakteristikami, které výrobci kompresorů dávají vesměs volně k dispozici. Zdůrazněme, že charakteristiky neudávají jen parametry, ale vymezují i pracovní oblast či rozsah, ve kterém může kompresor spolehlivě pracovat [2]. Chceme-li při použití výpočetní techniky aktivně s charakteristikami kompresorů pracovat, nestačí mít je v elektronické podobě, v jaké je poskytují výrobci. 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 charakteristiky, tj. parametry kompresoru vyjádřeny jako volně přístupné funkce pracovních (okrajových) podmínek. Pracovní podmínky jsou dány vypařovací (t_o) a kondenzační (t_k) teplotou, resp. jim odpovídajícím vypařovacím ($p_o = fce(t_o)$) a kondenzačním ($p_k = fce(t_k)$) tlakem a dále přehřátím par v sání kompresoru (Δt_s) a podchlazením (dochlazením) kapalného chladiva (Δt_d) za kondenzátorem. Pro určení všech parametrů RK stačí mít k dispozici funkce dvou základních energetických parametrů, tj. chladicího výkonu (Q_o) a příkonu kompresoru (N_{ko}) při definovaných (jmenovitých) hodnotách $\Delta t_{s,j}$ a $\Delta t_{d,j}$. Takto určené základní parametry se pak mohou snadno přepočítat na jiné hodnoty Δt_s a Δt_d a následně se z nich mohou vypočítat všechny další parametry energetické i stavové, popisující detailně parametry kompresoru. Ty se pak mohou použít při následném modelování chladicích okruhů (CHO).

Obecně tedy potřebujeme pro dva základní energetické parametry znát funkce:

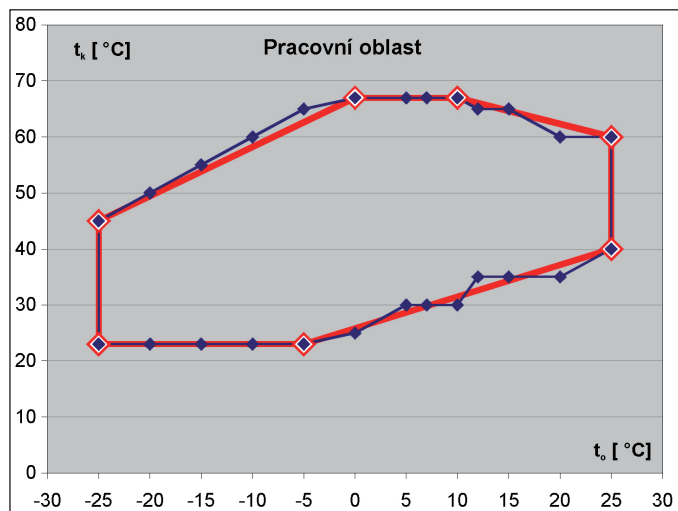
$$Q_o, N_{ko} = fce(t_o, t_k, \Delta t_{s,j}, \Delta t_{d,j}) \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Protože výrobci neposkytují prostředek, který by on-line, takové funkce nabízel, musíme si funkce základních parametrů Q_o, N_{ko} vytvořit sami. V dalším textu ukážeme některé možnosti pro jejich sestavení.

MATEMATICKÉ VYJÁDRĚNÍ FUNKCE DEFINUJÍCÍ CHARAKTERISTIKU KOMPRESORU

Funkce „čtení tabulky RK“

Charakteristiky kompresoru jsou většinou uváděny tabelární formou, pro určitý kompresor a jeden základní parametr je taková tabulka znázorněna v tab. 1. Tabulka obsahuje i další údaje, potřebné pro jednoznačnou identifikaci charakteristiky. Pracovní oblast definovaná charakteristikou je znázorněna na obr. 1. Pracovní oblast vymezuje rozsah t_o , ve kterém může kompresor pracovat a každému t_o přiřazuje jednoznačně důležitou



Obr. 1 Pracovní oblast RK odvozená z tabelární charakteristiky v tab. 1

maximální t_k (ale i minimální t_k), se kterou může kompresor pracovat. V pracovní oblasti je zároveň zajištěno, že ani výtlačná teplota kompresoru t_o , která je jedním z limitujících faktorů, nepřekročí přípustnou hodnotu [2]. Vně pracovní oblasti nesmí kompresor pracovat, musí být odstaven z provozu.

Pro „čtení tabulky“ je v Modelu RK sestavena funkce, jejíž princip je znázorněn v tab. 1. Pro zadané dva argumenty t_o, t_k funkce nejprve ověří, zda argumenty leží v tabulkou definovaných rozsazích. Pokud ano, pak v případě označeném jako A, vyhledá pro zadaný argument t_o v řádce se stupnicí teploty t_o (zvýrazněn modře) dva sloupce s teplotou „nejblíže nižší“ a „nejblíže vyšší“. Podobně pro zadaný argument t_k vyhledá ve sloupci se stupnicí teploty t_k (zvýrazněn červeně) dva řádky s teplotou „nejblíže nižší“ a „nejblíže vyšší“. Tím vymezí v tabulce pole se čtyřmi hodnotami, z nichž interpolací určí hodnotu odpovídající zadaným argumentům t_o, t_k . Interpolace se zjednoduší, pokud jeden, nebo oba argumenty nabývají hodnoty přímo uvedené ve stupnicích tabulky.

V případě označeném jako B, kdy ve vyhledaném poli jsou jen tři hodnoty, určí výslednou hodnotu interpolací a extrapolací. V případě označeném jako C, kdy ve vyhledaném poli jsou pouze dvě hodnoty, oznámí vybočení z pracovní oblasti.

Výrobci používaná funkce RK

Někteří výrobci (např. Tecumseh Europe a Bitzer) uvádějí pro charakteristiky kompresoru následující vztah:

$$P_n = C_0 + C_1 t_o + C_2 t_k + C_3 t_o^2 + C_4 t_o t_k + C_5 t_k^2 + C_6 t_o^3 + C_7 t_o t_k^2 + C_8 t_o^2 t_k + C_9 t_k^3 \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

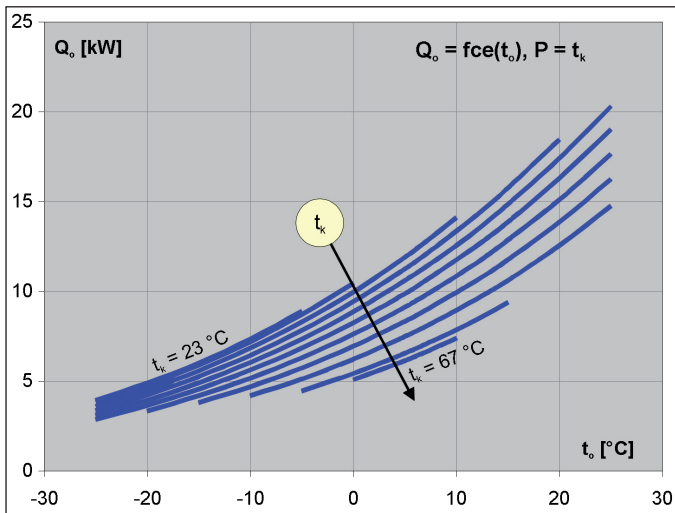
kde P_n vyjadřuje obecně definovaný parametr, např. Q_o, N_{ko} případně další. Aby se mohl tento vztah použít, musí být k dispozici pro každý kompresor a definovaný parametr P_n 10 konstant. Pro výpočet těchto desíti konstant se vychází z tabelárně definované charakteristiky (např. podle obr. 1). Principiálně se pro 10 zvolených dvojic argumentů t_o, t_k určí funkční hodnoty P_n až P_{n10} . Každá trojice hodnot P_n, t_o, t_k se postupně dosadí do vztahu (2). Tím se definuje soustava desíti rovnic o desíti neznámých, která se řeší standardním matematickým postupem. Prakticky se pro výpočet mohou použít profesionální matematické SW, které deset konstant určí ze všech rovnic, které jsou dány všemi disponibilními hodnotami trojic hodnot P_n, t_o, t_k , metodou nejmenších čtverců. Rovnice je pak mnohem přesnější, protože nezohledňuje jen deset náhodně vybraných bodů, ale všechny body charakteristiky, kterých bývá řádově kolem stovky (viz obr. 1).

„Náhradní“ funkce RK

Pro Model RK autor našel jednoduchou a dostatečně přesnou funkci, která rovněž zohledňuje všechny body, jimiž je charakteristika definována. Princip funkce je popsán v následujícím.

Charakteristika je obecně určena vztahem (1), který můžeme pokládat za funkci dvou argumentů t_o, t_k pro definované $\Delta t_{s,j}$ a $\Delta t_{d,j}$. Funkce se standardně graficky znázorňuje parametrickou soustavou křivek $Q_o(t_o), N_{ko}(t_k) = fce(t_o)$, tj. pro každý parametr t_k samostatnou závislostí na argumentu t_o (viz obr. 2). Právě tak dobře se ale může graficky znázornit parametrickou soustavou křivek $Q_o(t_o), N_{ko}(t_o) = fce(t_k)$, tj. pro každý parametr t_o samostatnou závislostí na argumentu t_k (viz obr. 3).

Obě tyto soustavy samostatných závislostí velice přesně popisují polynomy druhého stupně. To vedlo k myšlence vyjádřit základní parametry Q_o, N_{ko} polynomy druhého stupně jednoho argumentu, v němž jsou konstanty vyjádřeny polynomy druhého stupně druhého argumentu. Tato „náhradní“ funkce se ukázala jako velice přesná. Přesnost se dále zvýšila, když se argument t_k korigoval specificky určenou hodnotu t_{kR} .



Obr. 2 Charakteristika RK jako parametrická soustava závislosti $Q_o = fce(t_o, P = t_k)$ s parametrem t_k

„Náhradní“ funkce je vyjádřena vztahem:

$$P_n = K_0(t_o) + K_1(t_o) \cdot (t_k - t_{KR}) + K_2(t_o) \cdot (t_k - t_{KR})^2 \quad [\text{kW}] \quad (3)$$

kde konstanty $K_n(t_o)$ pro $n = 0$ až 2 jsou dány vztahem:

$$K_n(t_o) = K_{n0} + K_{n1}t_o + K_{n2}t_o^2 \quad [-] \quad (4)$$

Charakteristiku každého kompresoru pak určuje 9 konstant pro každou z obou základních funkcí Q_o a N_{ko} a společná konstanta t_{KR} potřebná pro zmíněnou korekci argumentu t_k , tedy pro oba základní parametry celkem 19 konstant.

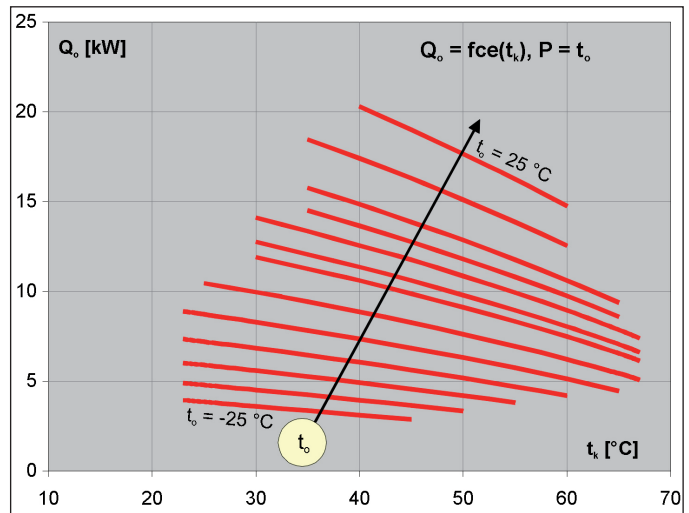
Součástí Modelu RK je procedura, která pro každou tabelárně určenou charakteristiku vypočítá potřebných 19 konstant pro oba základní parametry a zapiše je do databáze RK. Po vypočtení konstant určí v celé pracovní oblasti absolutní odchylky hodnot „náhradní“ funkce od hodnot daných charakteristikou a zaznamená je do tabulky korespondující s výchozí tabulkou charakteristiky. Souběžně pro celou pracovní oblast určí maximální a průměrnou absolutní odchylku. Takové vyčíslení odchylek prokazuje, že tato jednoduchá funkce nahrazuje tabelárně určené charakteristiky s dostatečnou přesností a jak se ukázalo, dá se použít pro všechny kompresory, včetně kompresorů s regulací výkonu změnou otáček.

Výhodnou „náhradní“ funkce je, že poskytuje technicky logické údaje i „blízko“ vně pracovní oblasti [2]. To je v některých případech výhodné, protože vně oblasti se pracuje např. při odtávání výparníků reverzační cyklu. Pokud se při měření porovnávají výsledky s parametry charakteristiky, pak se může postupovat tak, že v pracovní oblasti se parametry určují „čtením tabulky“ a vně oblasti se „nahrazují“ (odtud její pojmenování) hodnotami této funkce.

Poznámka: Přesto, že funkce podle vztahu (2) je přesnější než podle vztahu (3), je přesnost „náhradní“ funkce pro technické výpočty dostatečná. Pokud by se měla zachovat komplexnost Modelu RK a jeho nezávislost na dalších (přímo nekomunikujících) SW, musela by se pro výpočet konstant pro vztah (2) sestavit analogická procedura jako pro výpočet konstant „náhradní“ funkce, která by disponovala i dalšími popsanými schopnostmi této procedury. Pro ověřenou dostatečnou přesnost „náhradní“ funkce k tomu zatím nebyl shledán důvod.

Rozšíření možností funkcí z předchozích kapitol

Aby popsané funkce splňovaly v úvodu specifikované požadavky na



Obr. 3 Charakteristika RK jako parametrická soustava závislosti $Q_o = fce(t_k, P = t_o)$ s parametrem t_o

volně přístupné funkce a mohly provést přepočítání základních energetických parametrů na jiné než jmenovité pracovní podmínky a určit další energetické i stavové parametry, musí být k dispozici i volně přístupné funkce definující termodynamické a termokinetické vlastnosti chladiv. Výchozí tabelárně definovaná charakteristika pak musí obsahovat další informace a to označení chladiva (R), se kterým RK pracuje a jeho zdvihový objem (ZO) – viz obr. 1. Pak se mohou provést další termodynamické výpočty v Mollierově diagramu $\log(p)$ - h a všechny parametry vnitřního děje se mohou určit do nejmenších podrobností [3].

Volně přístupné funkce v Modelu RK vyjadřující charakteristiku RK pak můžeme obecně popsat následujícím vztahem:

$$P_n = fce(\text{Typ}K, R, ZO, t_o, t_k, \Delta t_{s,p}, \Delta t_{d,p}, \Delta t_{s,r}, \Delta t_{d,r}, IS, IP) \quad [\text{kW}] \quad (5)$$

Funkce provede pro zadané argumenty t_o , t_k a jmenovité hodnoty $\Delta t_{s,p}$, $\Delta t_{d,p}$ kompletní výpočet chladicího okruhu pracujícího s chladivem R se sledovaným kompresorem $\text{Typ}K$, se zdvihovým objemem ZO a určí desítky podrobných parametrů. Následně provede přepočítání těchto parametrů na zadané odlišné hodnoty Δt_s a Δt_d . Argumenty IS a IP budou vysvětleny v dalším.

Každá funkce je formálně definována jako procedura vracející pro zadané argumenty jedinou hodnotu. Popisovaná funkce (5) je ale řešena tak, že může vrátit libovolný počet hodnot, tj. kterýkoliv z vypočtených parametrů a to jak pro výchozí stav ($\Delta t_{s,p}$, $\Delta t_{d,p}$), tak pro změněný stav (Δt_s , Δt_d). To je provedeno tak, že ve funkci se postupně provádí výpočet všech parametrů vnitřního děje a vypočtené parametry pro výchozí stav se zapisují do 1. sloupce matice a následně vypočtené parametry pro změněný stav do 2. sloupce matice, kde počet řádků matice se rovná počtu počítaných parametrů. Funkce pak vrátí hodnotu danou argumenty IS a IP , tj. hodnotu prvku matice ležícím ve sloupci IS a řádku IP .

Je-li matice definována jako globální proměnná, pak po výpočtu jednoho (libovolného) parametru jsou pro další výpočty k dispozici všechny parametry zaznamenané v této matici.

Procedury využívající rozšířené funkce z předchozích kapitol

Rozšířené funkce se mohou následně využít v řadě procedur. V Modelu RK jsou zpracovány procedury umožňující sestavování závislosti některých parametrů na volitelných argumentech, např. topného faktoru (TF), dopravního součinitele (ε_d - dříve označovaného jako dopravní účinnost), izoentropické účinnosti (η_{iz}) atd. na argumentech např. $p_k - p_o$, p_k/p_o , $t_k - t_o$ apod. V procedurách se s výhodou využívají vlastnosti rozšířených funkcí, popsané v předchozím odstavci.

Další procedura v Modelu RK sestaví diagram pracovní oblasti RK [2] (viz obr. 1).

„Sekundární“ funkce RK

Pojmenování funkce je zestručněním názvu „Funkce pracující se sekundárními parametry charakteristiky RK“. Pod pojmem sekundární parametry zde nejsou míněny parametry druhořadé, ale z hlediska podstaty věci se dá říci, že naopak parametry prvořadé. Za sekundární jsou označeny jen proto, že výrobci je přímo v charakteristikách neuvádějí a musí se až sekundárně vypočítat z obou základních parametrů primárních Q_o a N_{ko} ve smyslu předchozích odstavců. Těmito sekundárními parametry jsou zejména dopravní součinitel (ε_d) a izentopická účinnost (η_{iz}). Je proto zřejmé, že práce se „sekundární“ funkcí je možná až poté, co se uvedené závislosti určí jako funkce argumentů charakterizujících vnitřní děj způsobem popsáným v předchozích odstavcích.

„Sekundární“ funkce popisující charakteristiku se dá principiálně popsat takto. Pro zadané argumenty $t_o, t_k, \Delta t_s$ a Δt_d určuje zdvihový objem (ZO) spolu s dopravním součinitelem (ε_d) objemové a následně i hmotnostní oběhové množství. Z oběhového množství se určí izentropický příkon (M) a z izentropické účinnosti (η_{iz}) se určí příkon reálný (N_{ko}). Určení závislosti pro dopravní součinitel je relativně jednoduché, protože je obecně známo, že je funkcí kompresního poměru, tj. platí $\varepsilon_d = fce(p_k/p_o)$. U izentropické účinnosti je to poněkud složitější. Z [3] vyplývá, že ta může být s dostatečnou předností vyjádřena jako funkce teplotního rozdílu $\Delta t = t_k - t_o$, tj. vztahem $\eta_{iz} = fce(\Delta t)$. Hledají se ale i jiné určující parametry pro přesnější popsání obou závislosti.

Vzhledem k tomu, že jak dopravní součinitel, tak izentropická účinnost jsou prakticky nezávislé na hodnotách Δt_s a Δt_d , „sekundární“ funkce určí oba základní parametry Q_o a N_{ko} přímo pro zadané Δt_s a Δt_d , nezávisle na hodnotách, se kterými byla určena výchozí charakteristika.

„Sekundární“ funkci lze popsat obecným vztahem:

$$P_n = fce(TypK, R, ZO, t_o, t_k, \Delta t_s, \Delta t_d, \varepsilon_d, \eta_{iz}, IP) \quad [kW] \quad (6)$$

Kde ε_d, η_{iz} jsou přímými nebo nepřímými funkcemi argumentů t_o a t_k . Argument IP rozhoduje, který z parametrů (Q_o, N_{ko}) bude funkce vracet.

„Sekundární“ funkce energetické efektivity RK

Energetickou efektivitu RK popisují sekundární energetické parametry odvozené ze základních. Jsou to chladicí faktor ($ChF = Q_o/N_{ko}$) a topný faktor ($TF = Q_k/N_{ko}$). Oba faktory jsou provázány vztahem $TF = ChF + K$, kde K je součinitel, vyjadřující, jaká část příkonu kompresoru RK se převede do okruhu jako teplo (zpravidla $K = 0,95$).

V některých úlohách stačí pracovat právě jen se „sekundární“ funkcí energetické efektivity. Jak bylo prokázáno [3] TF (a analogicky ChF) se může vyjádřit jednoduchým vztahem

$$TF = fce(\Delta t) = fce(t_k - t_o) \quad [-] \quad (7)$$

Sestavení této závislosti provádí v Modelu RK procedury zmíněné v odstavci „Náhradní funkce RK“. Jak bylo ale prokázáno [3], pro RK se nemusí závislost (7) sestavovat takto přímo z charakteristiky kompresoru, ale může se použít zobecněný vztah:

$$TF(RK) = (TF(R, RO) - 1)\eta_{iz} + K = fce(\Delta t) \quad [-] \quad (8)$$

kde $TF(R, RO) = fce(\Delta t)$ je závislost popsána vztahem (7) zpracovaná pro Rankinův oběh pracující s chladivem R a $\eta_{iz} = fce(\Delta t)$ je závislost odvozená pro sledovaný kompresor. V Modelu RK jsou pro určení obou těchto závislostí k dispozici potřebné procedury. Až funkce (8) definuje v pravém slova smyslu „sekundární“ funkci energetické efektivity RK.

Obě „sekundární funkce (6) a (8) mají tu výhodu, že se s nimi dají řešit i prognostické úlohy např. typu „Jak by se zlepšily energetické parametry a efektivita RK, kdyby se izentropická účinnost kompresoru zvýšila o 10 %“ apod.

MOŽNOSTI MATEMATICKÉHO VYJÁDŘENÍ PARAMETRŮ RK S REGULACÍ VÝKONU

„Náhradní“ funkce RK s regulací výkonu

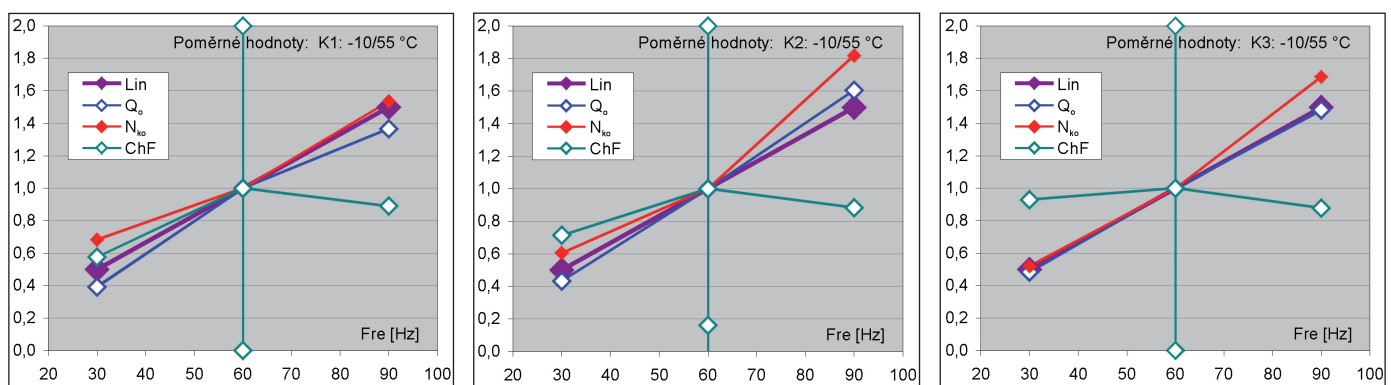
Zde budeme sledovat pouze kompresory, u nichž je regulace výkonu zajišťována změnou otáček. Změna otáček se může principiálně zajišťovat dvěma způsoby:

- u kompresorů se standardními asynchronními elektromotory změnou frekvence, tj. frekvenčními měniči,
- u tzv. invertorových kompresorů se stejnosměrnými elektromotory s elektronickou komutací (zkratka BLDC) změnou frekvence budícího stejnosměrného napětí řízenou elektronickým regulátorem, které se přivádí na jednotlivá vinutí statoru.

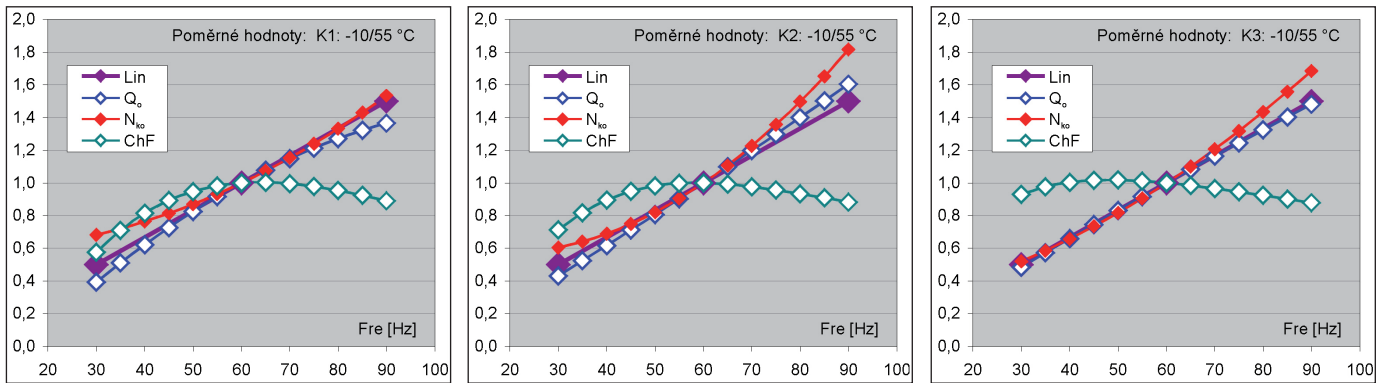
Kompresory s regulací výkonu (oběma způsoby) – stručně jen regulované RK – jsou vesměs mimoevropské provenience (Japonsko, USA), které v naší elektrorozvodné síti (zpravidla 60 Hz) pracují se jmenovitými otáčkami 3600 1/min, respektive s reálnými otáčkami ~3480 1/min.

V souvislosti s tím výrobci zpravidla uvádějí charakteristiky regulovaných RK při třech otáčkách, vyjádřených ekvivalentní frekvencí 30, 60 a 90 Hz, tedy v rozsahu regulace 50 až 100 až 150 % otáček jmenovitých s tím, že někteří výrobci tento rozsah oběma směry dále rozšiřují. Pro každou z těchto frekvencí můžeme pro vyjádření parametrů obecně použít kteroukoliv z funkcí popsaných pro standardní kompresory. V Modelu RK se používají jednoduché „náhradní“ funkce podle odstavce „Náhradní funkce RK“.

Podotknout je třeba, že opatřit si tabelární charakteristiky těchto kompresorů není zdaleka tak jednoduché jako u standardních kompresorů (pro analýzu sledovanou v tomto odstavci byly k dispozici pouze tři kom-



Obr. 4a až 4c Poměrné hodnoty Q_o, N_{ko} a ChF při 30, 60 a 90 Hz pro kompresory K1, K2 a K3 vztahené na jmenovité hodnoty při 60 Hz při $t_o = -10$ °C a $t_k = 55$ °C



Obr. 5a až 5c Poměrné hodnoty Q_o , N_{ko} a ChF při spojitě změně otáček (frekvence) pro kompresory K1, K2 a K3 vztažené na jmenovité hodnoty při 60 Hz při $t_o = -10\text{ °C}$ a $t_k = 55\text{ °C}$

presory – z tohoto důvodu nelze ani provést širší zobecnění zjištěných skutečností). Autor se domnívá, že jedním z důvodů může být skutečnost, že výrobci nemají zájem, aby se tyto kompresory používaly běžně v široké síti výrobců, protože požadavky na zajištění jejich spolehlivého a bezporuchového provozu jsou mnohem složitější a náročnější – jak vyplývá z dalšího – než u kompresorů standardních (a tedy možnost poruch při nedodržení požadavků mnohem vyšší). Na tyto kompresory se v žádném případě není možno dívat jako na kompresory standardní, jejichž výhodou je regulace výkonu!

Nyní si položíme otázku, jak stanovit parametry při otáčkách rozdílných od tří definovaných. V Modelu RK je to provedeno pomocí poměrných hodnot obou základních parametrů Q_o a N_{ko} . Poměrné hodnoty jsou vztaženy na jmenovité parametry, za něž se považují parametry při frekvenci 60 Hz. Pro každou dvojici argumentů t_o a t_k v pracovní oblasti kompresoru tak získáme pro tři definované frekvence 6 hodnot, které pro oba parametry při 60 Hz jsou rovny 1. Pro tři sledované kompresory, pracující shodně s chladivem R410A a teploty $t_o = -10\text{ °C}$ a $t_k = 55\text{ °C}$ jsou poměrné hodnoty v závislosti na frekvenci graficky znázorněny na obr. 4a až 4c. Hodnota ChF uvedená v grafech je dopočítána z obou základních parametrů ($ChF = Q_o/N_{ko}$). Pro úplnost uvedeme, že kompresory podle obr. 4a (K1) a 4b (K2) jsou v provedení spirálovém (Scroll), podle obr. 4c (K3) v provedení zdvojený rotační (Twin Rotary).

Vyjádření energetických parametrů poměrnými hodnotami přináší tu výhodu, že průběhy poměrných hodnot Q_o a N_{ko} na obr. 4a až 4c mají „pevný bod“ – hodnotu 1 pro 60 Hz, kolem kterého se při jakékoliv změně pracovních podmínek závislosti charakterizující oba parametry v obou rozsazích otáček vně jmenovitých natáčejí. Jednoduše se může sledovat i skutečnost, jak se změna obou parametrů liší od teoreticky lineární závislosti na otáčkách.

Diagramy na obr. 4a až 4c jsou sestaveny právě jen z hodnot odpovídajících třem uvedeným frekvencím. Stanovit parametry při otáčkách spojitě se měnících od jmenovitých není možné „pákovým“ pravidlem z definovaných tří frekvencí. To by vedlo k znázorněnému nelogickému zalomení závislosti (nejlépe viditelnému na parametru ChF) při 60 Hz. Plynulost při změnách otáček v obou směrech od jmenovitých je proto řešena polynomičnou závislostí, a to „speciálním“ polynomm druhého stupně, samostatně pro Q_o i N_{ko} . „Speciální“ polynom je parabola, procházející body grafu, určenými poměrnými hodnotami vypočtenými pro 30 a 90 Hz, jejíž vrchol tvoří bod v grafu, daný hodnotou 1, který odpovídá jmenovité poměrné hodnotě definované pro 60 Hz.

Funkce pro oba základní parametry má pak obecný tvar:

$$Q_o, N_{ko} = fce(TypK, t_o, t_k, \Delta t_{sJ}, \Delta t_{dJ}, \Delta t_s, \Delta t_d, Fre, IP) \quad [kW] \quad (9)$$

kde argument $TypK$ určuje typ kompresoru v databázi, Fre značí aktuální frekvenci a argument IP rozhoduje, zda funkce vrátí hodnotu Q_o

nebo N_{ko} . Funkce pracuje principiálně tak, že pro zadané argumenty t_o , t_k definuje popsáním způsobem obě paraboly určující poměrné hodnoty, pro zadaný argument Fre zjistí funkční hodnotu té které paraboly a tu násobí jmenovitou hodnotou Q_o , respektive N_{ko} . Tímto způsobem se určují základní parametry Q_o , N_{ko} , všechny odvozené parametry, např. znázorňovaný ChF , se již počítají z obou základních.

Závislosti poměrných parametrů Q_o , N_{ko} a ChF na otáčkách, respektive ekvivalentní frekvenci Fre určené s využitím funkce (9) pro případy sledované na obr. 4a až 4c jsou znázorněny na obr. 5a až 5c. Je zřejmé, že průběhy mají technickou logiku a lze proto očekávat jejich korektnost.

Obrázky názorně popisují, jak se mění oba základní energetické parametry s otáčkami. Je zřejmé, že:

- v obou směrech od jmenovitých otáček je poměrný příkon N_{ko} u kompresorů spirálových vyšší než poměrný chladicí výkon Q_o , což se projeví snížením chladicího faktoru (ChF) a tedy zhoršením energetické efektivity,
- průběh obou poměrných parametrů se u jednotlivých kompresorů liší, zejména při nižších otáčkách,
- významné je zejména snižování energetického efektu při snižování otáček ze jmenovitých u obou spirálových kompresorů; naproti tomu jen malá změna energetického efektu u zdvojeného rotačního kompresoru,
- maximální energetická efektivity je dosahována v okolí jmenovitých otáček.

Zdůrazněme, že „náhradní“ funkce byly odvozeny z tabelárně definovaných charakteristik pro 30, 60 a 90 Hz a závislosti na obr. 4a až 4c a 5a až 5c byly určeny z těchto „náhradních“ funkcí. Širší zobecnění těchto skutečností by bylo možné jen na základě analýzy většího počtu kompresorů.

Vliv regulace výkonu na pracovní rozsah RK s regulací výkonu

Přestože všechny tři sledované kompresory mají pracovní oblasti definované charakteristikami pro tři různé frekvence shodnou, ve skutečnosti tomu tak není a výrobci až dalšími podmínkami pracovní oblast vymezují, či omezují. Stanovit obecnou funkci pro vymezení pracovní oblasti v závislosti na změně otáček bude obtížné, protože různí výrobci (a pro různé typy kompresorů) definují toto vymezení různým způsobem a navíc ne zcela jednoznačně. Omezení se týká především maximálního výtlačného tlaku kompresoru p_{kmax} a jemu odpovídající maximální kondenzační teploty t_{kmax} v závislosti na otáčkách, respektive ekvivalentní frekvenci Fre a vypařovací teplotě t_o . Omezení je logické a je dáno dvěma skutečnostmi:

- parametry elektromotoru se s otáčkami mění, a při změnách otáček nemusí elektromotor vždy dávat výkon odpovídající potřebnému příkonu kompresoru při daných podmínkách vnitřního děje (t_o a t_k);

- změna otáček z jmenovitých vede ke změně energetické efektivity, vesměs k jejímu zhoršení, zhoršení efektivity je provázáno zvyšováním výtlačné teploty kompresoru. Výtlačná teplota je jedním z limitujících faktorů, limitní hodnota nesmí být překročena.

Z definovaných vymežujících podmínek je možné pro každý kompresor (rozlišený argumentem $TypK$) sestavit funkci, jejíž obecný tvar je:

$$t_{kmax} = fce(TypK, t_o, Fre) [^{\circ}C] \quad (10)$$

Funkce jsou zpracovány tak, že nejprve se kontroluje, zda argument t_o leží v definovaném rozsahu

- pokud ano, pak funkce vrací hodnotu t_{kmax} , která se v jednotlivých pásmech pracovního rozsahu vymezených hraničními rozsahy Fre mění lineárně v závislosti na Fre ,
- pokud ne, pak funkce vrací hodnotu, signalizující vybočení z pracovního rozsahu (např. 0).

Za rozsah t_o se přitom považuje rozsah vymezený tabelárně definovanou charakteristikou (PO CH) (viz obr. 6a až 6c), protože v něm jsou určeny jednoznačně oba základní parametry Q_o a N_{ko} a následně „náhradní“ funkce.

Funkce (10) umožňuje znázornit graficky horní hranice pracovní oblasti dvěma způsoby. První způsob odpovídá znázornění pracovní oblasti standardního kompresoru (obr. 1), tj. t_{kmax} je vynesena jako parametrická soustava křivek v závislosti na t_o s parametrem Fre , kde uvedené hodnoty Fre vymezují jednotlivá pásma pracovní oblasti. To je pro tři sledované kompresory znázorněno na obr. 6a až 6c. Do těchto obrázků jsou vyneseny i pracovní oblasti definované tabelárně určenými charakteristikami. Je zřejmé, že tabelárně určené parametry nejsou vesměs určeny v celé vymezené oblasti.

Při druhém způsobu je naopak t_{kmax} vynesena jako parametrická soustava křivek v závislosti na Fre s parametrem t_o . To je pro sledované kompresory znázorněno na obr. 7a až 7c.

Je zřejmé, že pracovní oblasti jednotlivých kompresorů (i když stejného

provedení) se výrazně liší, a to nejen z hlediska definovaného rozsahu t_o ale i z hlediska:

- odpovídajícího rozsahu t_{kmax} ,
- hraničních Fre , vymežujících pásma pracovní oblasti,
- průběhu $t_{kmax} = fce(Fre)$.

Podobně jako u standardního RK i pro regulované RK platí, že v pracovní oblasti je zajištěn důležitý požadavek a to, že výtlačná teplota kompresoru, jakožto jeden z limitujících faktorů nepřekročí přípustnou mez.

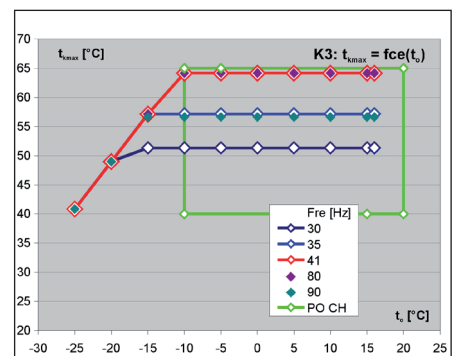
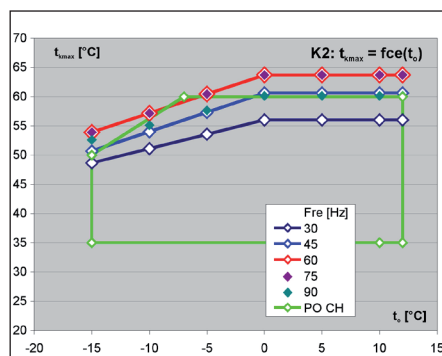
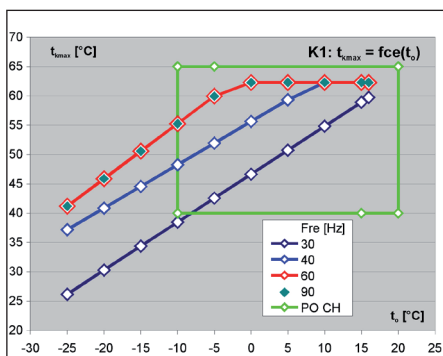
Nesoulad mezi pracovní oblastí odvozenou z podmínek určených výrobcem (PO PV) a pracovní oblastí danou tabelárně určenou charakteristikou (PO CH) – viz obr. 6a až 6c, je při určování parametrů vztahem (9) odvozeného z PO CH při malém přesahu PO PV oproti PO CH do jisté míry řešen tím, že je použita „náhradní“ funkce (viz „Náhradní“ funkce RK), která – jak bylo již řečeno – dává věrohodné výsledky i v blízké vzdálenosti od PO CH.

Porovnejme nyní závislosti na obr. 5a až 5c se závislostmi na obr. 6a až 6c. Podrobněji toto porovnání popíšeme pro kompresor K1. Je zřejmé, že pro argument $t_o = -10^{\circ}C$ a pro $Fre = 30$ Hz je $t_{kmax} = \sim 39^{\circ}C$, pro $Fre = 40$ Hz je $t_{kmax} = \sim 48^{\circ}C$ a $t_{kmax} = 55^{\circ}C$ se dosáhne až pro $Fre = 60$ Hz a vyšší. Jinými slovy: pro dvojici argumentů $t_o = -10^{\circ}C$ a $t_k = 55^{\circ}C$ nemůže K1 pracovat při $Fre < 60$ Hz, kdy pracovní podmínky leží vně pracovní oblasti.

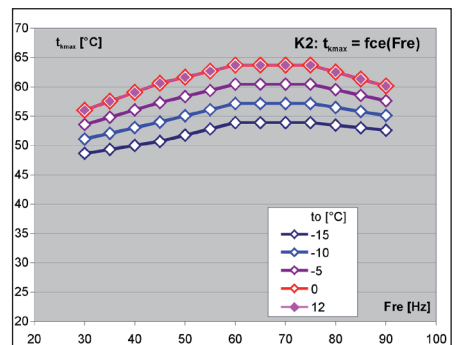
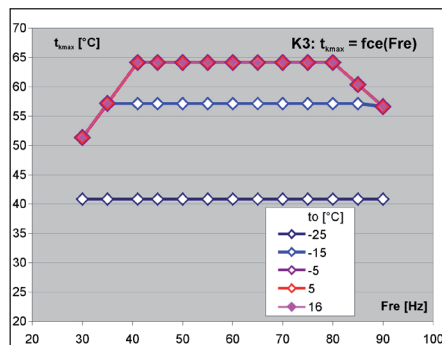
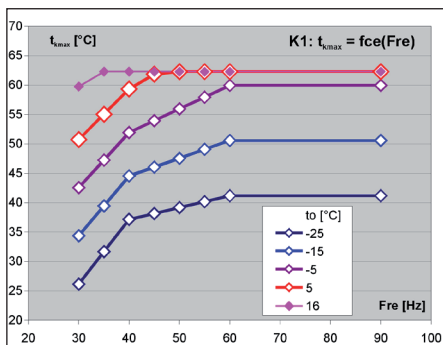
Aktivace „náhradní“ funkce RK s regulací výkonu

Ze skutečností uvedených v závěru předchozího odstavce vyplývá, že při určování parametrů regulovaného RK určeného argumentem $TypK$, pro pracovní podmínky určené argumenty t_o , t_k a Fre se musí nejprve vztahem (10) ověřit, zda pracovní podmínky leží v pracovní oblasti a je splněna podmínka, že $t_k \leq t_{kmax}$. Jen v tomto případě se může aktivovat (využít) vztah (9) a mohou se určit parametry RK.

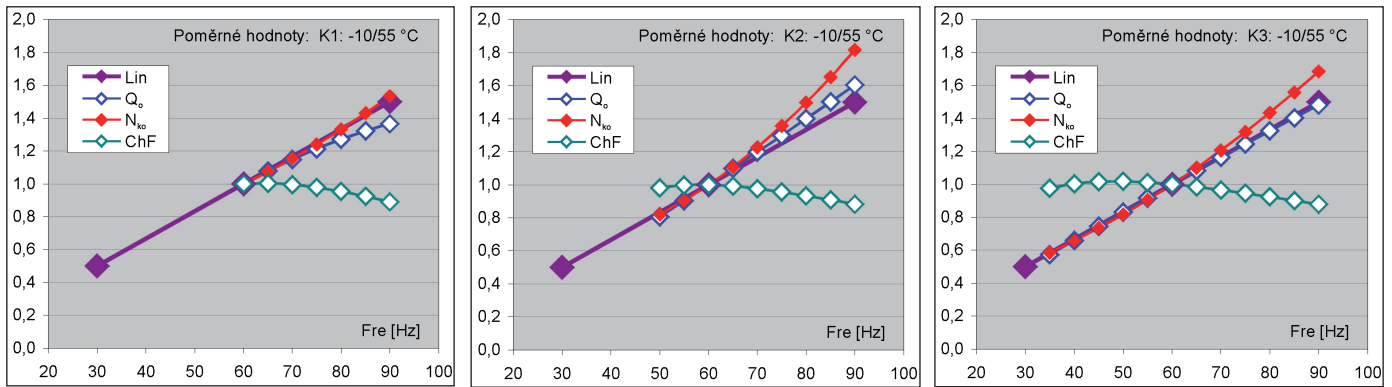
S přihlédnutím k tomu musíme nyní znovu posoudit závislosti zobrazené na obr. 5a až 5c. Ty byly totiž určeny „jen“ z funkce (9), která nezohledňuje reálnou pracovní oblast kompresoru. Můžeme je proto pokládat za



Obr. 6a až 6c Ohraničení pracovní oblasti kompresorů K1, K2 a K3 křivkami $t_{kmax} = fce(t_o)$ s parametrem Fre . Zobrazeny jsou i pracovní oblasti definované tabelárně určenými charakteristikami (PO CH).



Obr. 7a až 7c Ohraničení pracovní oblasti kompresorů K1, K2 a K3 křivkami $t_{kmax} = fce(Fre)$ s parametrem t_o .



Obr. 8a až 8c Poměrné hodnoty Q_o , N_{ko} a ChF při spojité změně otáček (frekvence) s respektováním pracovní oblasti závislé na otáčkách (Fre) pro kompresory K1, K2 a K3 vztažené na jmenovité hodnoty při 60 Hz při $t_o = -10\text{ °C}$ a $t_k = 55\text{ °C}$

„ideální“. Tyto závislosti nejsou proto objektivní a musíme je zpracovat znovu se zohledněním pracovní oblasti. Poměrné hodnoty parametrů určených s využitím funkce (9) budeme proto vyhodnocovat a zaznamenávat až po kontrole zadaných argumentů t_o , t_k a Fre funkcí (10), tj. po ověření, že tyto argumenty leží v pracovní oblasti kompresoru. Tak získáme „reálné“ závislosti. Ty jsou znázorněny na obr. 8a až 8c. Rozdíl mezi oběma skupinami obrázků je zřejmý.

Obecně se dá říci, že použitelný rozsah regulace výkonu má svá omezení, které jsou závislá na reálných pracovních podmínkách, jinými slovy: celý použitelný rozsah regulace výkonu se nedá využívat při všech pracovních podmínkách.

Zásadní rozdíl mezi pracovní oblastí standardního kompresoru a kompresoru s regulací výkonu změnou otáček je patrný z porovnání pracovních oblastí (obr. 1 a obr. 6a až 6c). Je zřejmé, že v definovaném rozsahu t_o platí:

- pro standardní kompresor $t_{kmax} = fce(t_o)$,
pro určité t_o platí: $t_{kmax} = konst$,
- pro regulovaný kompresor $t_{kmax} = fce(t_o, Fre)$,
pro určité t_o platí: $t_{kmax} = fce(Fre)$.

Rozdíl mezi RK standardním a s regulací výkonu

Z předchozích dvou odstavců je zřejmé, že pracovní oblast regulovaného RK není stálá jako u standardního RK, ale více či méně se mění s otáčkami. Celý použitelný rozsah regulace výkonu se nedá využívat při všech pracovních podmínkách. Aby bylo v reálu zajištěno, že funkce kompresoru bude povolena, jen když pracovní podmínky kompresoru budou ležet v pracovní oblasti kompresoru, musí se u RK s regulací výkonu sledovat větší počet omezujících parametrů. Řídicí systém regulovaného RK (respektive CHO) musí proto splňovat vyšší nároky než pro standardní RK, aby mohl větší počet omezujících parametrů nejen sledovat, ale byl schopen i vyhodnocovat jejich souvislosti. Navíc musí samozřejmě podle určitého algoritmu zajišťovat i vlastní regulaci výkonu. Algoritmus regulace by měl předcházet situacím, kdy regulace převede sledované omezující parametry mimo pracovní oblast.

SOUVISLOST MATEMATICKÉHO MODELU RK A MODELU CHLADICÍHO KRUHU

Tento článek popisuje matematický model reálného kompresoru. Argumentem všech funkcí uvedených v předchozím, které určují parametry RK, jsou parametry tzv. vnitřního děje [3], tj. t_o , t_k , Δt_s a Δt_d (případně Fre). V každém reálném chladicím okruhu (CHO) jsou ale energetické parametry primárně určeny parametry vnějšího děje [3]. Relaci mezi parametry vnějšího a vnitřního děje určují svými specifickými vlastnostmi oba výměníky tepla v okruhu, tj. výparník a kondenzá-

tor. Parametry vnějšího děje např. v okruhu klimatizačního zařízení pro úpravu vzduchu jsou na straně výparníku vstupní teplota vzduchu t_a , jeho relativní vlhkost φ_a a průtok vzduchu V_a a na straně kondenzátoru je to vstupní teplota média t_w odvádějícího teplo z kondenzátoru a jeho průtočné množství V_w .

Aby matematický model mohl určit energetické parametry CHO, respektive RK v závislosti na parametrech vnějšího děje, nestačí již jen model RK. Musí se navrhnout matematický model CHO, který s matematickým modelem RK bude spolupracovat. Model CHO musí disponovat funkcemi nebo procedurami, které zajistí provázanost parametrů vnějšího a vnitřního děje. K tomu je třeba říci následující:

Výkony obou výměníků se mohou popsat vztahy:

$$\text{Výparník: } Q_v = fce(K_v, t_o, t_a, \varphi_a, V_a) \quad [\text{kW}] \quad (11)$$

$$\text{Kondenzátor: } Q_k = fce(K_k, t_k, t_w, V_w) \quad [\text{kW}] \quad (12)$$

kde součinitelé K_v a K_k charakterizují obecně vlastnosti výměníků, tj. zejména jejich plochu a součinitele prostupu tepla. Nejsou to konstanty ale funkce parametrů děje vnějšího i vnitřního. Základní úlohou modelu CHO je pak odvození závislosti součinitelů K_k a K_v na parametrech vnějšího a vnitřního děje.

Za ustáleného stavu pracuje CHO v rovnovážném stavu, při kterém je chladicí výkon kompresoru roven výkonu výparníku a topný výkon kompresoru roven výkonu kondenzátoru. Rovnovážný stav je definován rovností výkonu na obou stranách obou výměníků, tj.:

$$\text{Výparník: } Q_v = Q_o \Rightarrow fce(K_v, t_o, t_a, \varphi_a, V_a) = fce(t_o, t_k, \Delta t_s, \Delta t_d) \quad [\text{kW}] \quad (13)$$

$$\text{Kondenzátor: } Q_k = Q_k \Rightarrow fce(K_k, t_k, t_w, V_w) = fce(t_o, t_k, \Delta t_s, \Delta t_d) \quad [\text{kW}] \quad (14)$$

Chladicí okruhy disponují tzv. autoregulací, což je schopnost při změně parametrů vnějšího děje přizpůsobit parametry vnitřního děje tak, že je nastolen nový rovnovážný stav. Matematicky se autoregulace modeluje iteračními postupy, které při změně jakéhokoliv parametru vnějšího děje vhodnými iteračními kroky mění hodnoty t_o a t_k (při čemž se předpokládá, že hodnoty Δt_s a Δt_d se nemění), až do dosažení rovnosti obou vztahů.

Tento odstavec chce zdůraznit rozdíl mezi popisovaným jednodušším modelem reálného kompresoru (model RK) a složitějším modelem chladicího okruhu s reálným kompresorem (model CHO), jehož popis přesahuje možnosti a rozsah tohoto článku. Již jen z tohoto krátkého popisu je však zřejmé, že pro model CHO je model RK základním předpokladem a podmínkou nutnou (ne však postačující).

Při řešení konkrétních úloh je třeba vždy rozhodnout, zda se má použít model RK nebo model CHO.

ZÁVĚR

Účelem článku bylo:

- ❑ shrnout obecné možnosti, které se mohou použít při matematickém modelování reálných chladivových kompresorů včetně kompresorů s regulací výkonu změnou otáček a uvést konkrétní možnosti pro sestavování funkcí jejich charakteristik,
- ❑ poukázat na souvislosti a doložit, že regulaci výkonu kompresorů změnou otáček nelze posuzovat zjednodušeně, musí se vždy posuzovat objektivní analýzou, pro níž je matematický model základním předpokladem,
- ❑ zdůraznit, že na regulované kompresory se není možno dívat jako na kompresory standardní, jejichž výhodou je regulace výkonu;
- ❑ zdůraznit, že použitelný rozsah regulace výkonu se nedá využívat při všech pracovních podmínkách,
- ❑ poukázat na rozdíl mezi matematickým modelem reálného kompresoru a modelem chladicího okruhu a naznačit princip jeho sestavení.

Účelem článku nebylo:

- ❑ posoudit obecně vhodnost kompresorů s regulací výkonu změnou otáček (a jmenovitě tří sledovaných) pro určitý účel, např. klimatizační zařízení, či tepelné čerpadlo a v rámci daného účelu ana-

lyzovat jaké jsou při určitých pracovních podmínkách předpoklady regulace a v kterém směru,

- ❑ porovnat energetický efekt RK standardního a s regulací výkonu pracujících pro stejný účel a při stejných okrajových podmínkách např. při použití tepelného čerpadla „vzduch-voda“ pro vytápění a přípravu TV.

Analýza obou zmíněných bodů by musela vycházet z modelu CHO a přesáhla by rámec i rozsah tohoto článku.

Kontakt na autora: klazar@lit.cz

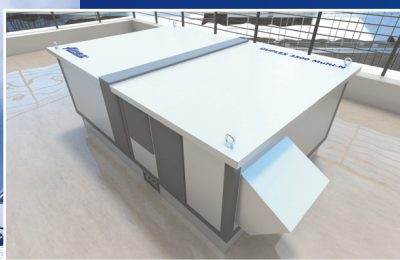
Použité zdroje:

- [1] Klazar, L. Význam matematického modelování chladicích okruhů pro techniku měření. *Vytápění větrání instalace*. 2008, roč. 17, č. 5, s. 226–229. ISSN 1210-1389
- [2] Klazar, L. Co nám (ne)říkají charakteristiky chladivových kompresorů. *Vytápění větrání instalace*. 2011, roč. 20, č. 4, s. 150–164. ISSN 1210-1389
- [3] Klazar, L. Teoretické maximum a reálné možnosti topného faktoru. Matematický model topného faktoru tepelného čerpadla. *Vytápění větrání instalace*. 2013, roč. 22, č. 4, s. 170–176. ISSN 1210-1389. ■

novinka

NOVÁ GENERACE NÁSTŘEŠNÍCH JEDNOTEK S REKUPERACÍ TEPLA

DUPLEX Multi-N > špičková technika a elegantní design



- Účinnost rekuperace až 93 %
– špičkový protiproudý rekuperátor
- Velmi ploché a kompaktní provedení
- Možnost integrovaného ohřevu, předehřevu a chlazení
- BMS kompatibilita
- 100 % by-pass
- Možnost integrovaného ohřevu a chlazení
- Internetové rozhraní ve standardu (RD4)
- Významné snížení servisních nákladů
- Plášť jednotky s vynikajícími tepelnými vlastnostmi
- EC ventilátory – nejvyšší německá kvalita
- Aplikace pro chytré telefony
- LCC – analýza nákladů životního cyklu výrobků
- Cirkulační režim
- Řízení na konstatní průtok a tlak
- Příprava pro transport jeřábem

VĚTRACÍ JEDNOTKY
obč. a průmyslové STAVBY

VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE
(velko) KUCHYNĚ

SYSTÉMY VĚTRÁNÍ
(+ bazény) RD A BYTY

tepelná ČERPADLA
a ZÁSOBNÍKY tepla

ATREA s.r.o. · Jablonec nad Nisou · e-mail: atrea@atrea.cz · www.atrea.cz