Laboratorní tepelné čerpadlo – stanovení a optimalizace topného faktoru

Ivo Kusák, Miroslav Luňák

Úvod

Hlavním konstrukčním záměrem tohoto čerpadla je, aby studenti a zájemci správně pochopili funkci tepelného čerpadla, jeho ekonomické a tepelně výkonové parametry, které stanovuje topný faktor. Dále se seznámili s možnostmi aplikace těchto čerpadel jako velmi dobré možnosti pro vyhřívání např. rodinného domu případně jen možnosti pro vyhřívaní podlahy.

Okamžitými hodnotami, které jsou digitálně zobrazovány na LCD displeji (Obr. 3) se získává konkrétní přehled o změně teplot a tlaků v různých částech tepelného čerpadla včetně jeho dílčích funkcí (výparník, kondenzátor, hydrofiltr, vstřikovací tryska apod.). Následnými grafickými průběhy pochopí význam veličin jako je příkon kompresoru, tepelný výkon atd.

Teorie a vyobrazení tepelného čerpadla

Tepelné čerpadlo využívá energii okolního prostředí a přeměňuje ji na teplo. Používá se na vytápění budov a ohřev vody. Na stejném principu jako tepelná čerpadla pracují kompresorové chladničky, které využívají tzv. studený okruh. Tepelné čerpadlo naopak využívá okruh teplý tzn., že motorkompresor stlačí pracovní médium – chladivo, které tak získá teplo, které ve výměníku kondenzátoru předá vodě (nebo vzduchu) pro vytápění a ohřev užitkové vody. Poté redukční ventil podstatně sníží tlak pracovního média, tím se zároveň prudce sníží teplota. K jejímu opětovnému zvýšení se v dalším výměníku – výparníku využije energie okolního prostředí (vzduch, voda, země) a tento cyklus se opakuje.

O topném faktoru můžeme hovořit jako o ukazateli efektu tepelného čerpadla.

Ekonomicky **efektivní** může být takové **opatření zvyšující topný faktor, kde zvýšené investiční náklady budou uhrazeny zvětšenou úsporou energie** a především úsporou nákladů při únosné návratnosti (Obr. 1).

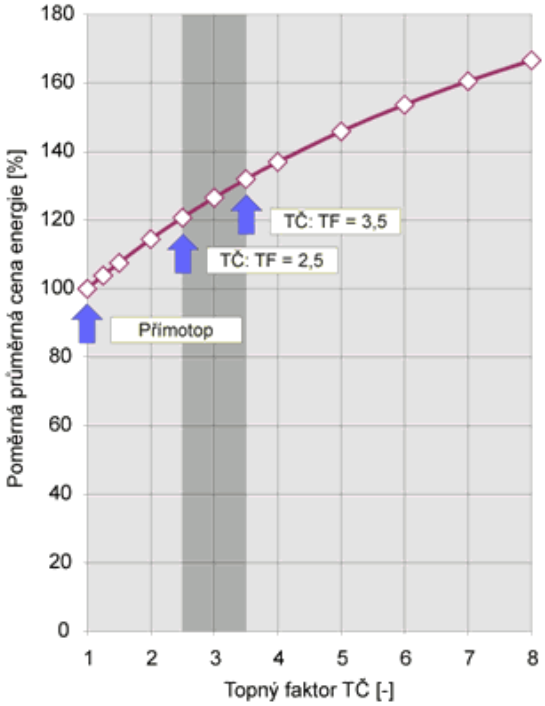
Vytápění je energeticky náročné a nákladné. Přitom by stačilo tepelnou energii odebírat přímo z okolí a předávat ji do vytápěného domu. Nijak by to neodporovalo zákonu zachování energie. Bohužel, tak snadno to nejde vzhledem k druhému zákonu termodynamiky.

Podle druhého zákona termodynamiky proudí teplo samovolně vždy z teplejšího tělesa na chladnější. Nicméně stroj, nazvaný tepelné čerpadlo, umožňuje obrácený tok tepla – z chladnějšího tělesa na teplejší. Takový tok ale není samovolný. Aby tepelné čerpadlo pracovalo, musíme mu dodávat elektrickou energii (příkon P_0.)

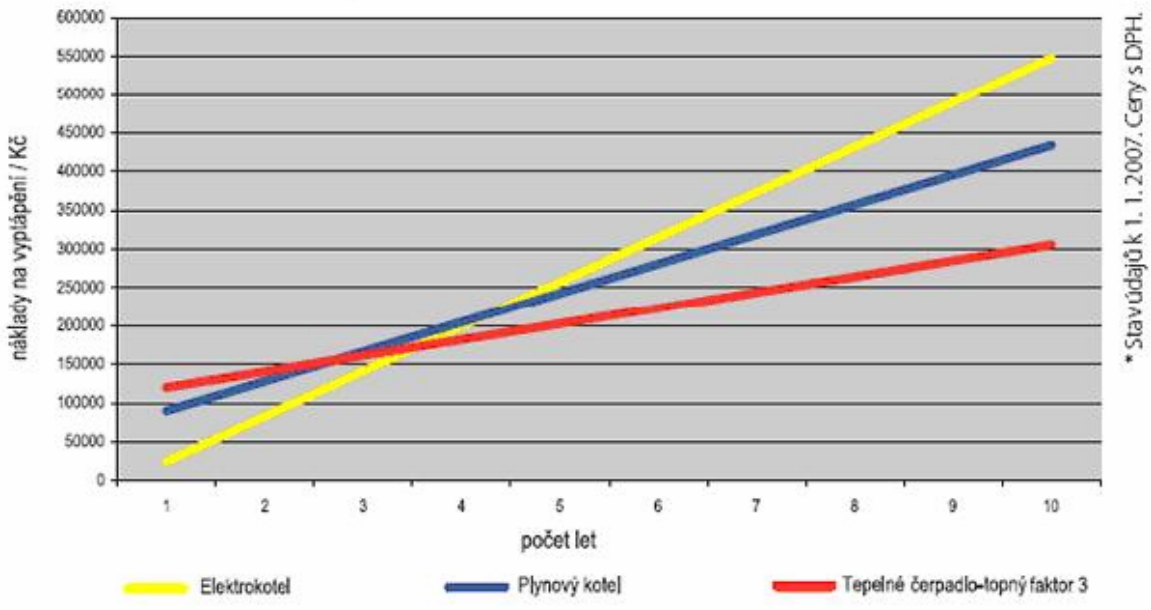
Technicky je možné v zimě vytápět tak, že necháme teplo proudit z okolí do budovy. Tím se okolí ještě více ochladí a budova více ohřeje. Ukazuje se, že vytápění tímto způsobem má vyšší

tepelný výkon (označme ho P) než pohon samotného tepelného čerpadla. Je proto výhodnější příkonem P_0 raději pohánět tepelné čerpadlo, než vytápět přímo touto energií, například elektrickým topením. Poměr, který ukazuje, kolikanásobně je tepelné čerpadlo výhodnější než přímé vytápění, se nazývá topný faktor $\varepsilon = P/P_0$.

Topný faktor bývá v rozmezí 2 až 7. Na druhou stranu, elektrická energie je přibližně pětkrát dražší než energie získaná spalováním zemního plynu, který se k vytápění používá zcela běžně. Použití tepelného čerpadla je proto vždy nutno dobře zvážit.



Obr. 1: Graf optimalizace topného faktoru v závislosti na průměrné ceně energie.



Obr. 2: Graf návratnosti investice u vytápění středního domu (spotřeba 3000 kWh, ohřev 200 TUV/den, dvoukanálová topná soustava). Graf je pouze orientační.

TUV – teplá užitková voda

Obr. 3: Ovládací panel pro zapnutí kompresoru a čerpadla (pro rovnoměrné rozložení teploty v nádobě s vodou kondenzátoru). Zobrazené teploty příslušejí různým částem tepelného čerpadla.

Obr. 4: Vyobrazení tepelného čerpadla. Kondenzátor a výparník jsou vyrobené z tepelně odolného nerezového potrubí. V tepelném okruhu cirkuluje chladivo Tetrafluorethan s obchodním názvem R134a (bezčpavkové ekologicky šetrné chladivo).

Obr. 5: Detail kondenzátoru a výparníku tepelného čerpadla.

Výhody tepelného čerpadla:

1. Provoz tepelného čerpadla je energeticky nenáročný, může ušetřit až 80 % nákladů za energii na vytápění a ohřev teplé vody.

2. Náklady na pořízení tepelného čerpadla se vrátí i bez dotací již do 3 – 8 let.

3. Pořízením tepelného čerpadla se vás bude méně dotýkat další zdražování energií.

4. Provoz tepelného čerpadla je krokem k ekologii, protože malá spotřeba elektrické energie sama o sobě šetří životní prostředí.

5. Oproti tradičnímu vytápění klasickými tuhými palivy s přikládáním do kotle je provoz tepelného čerpadla čistý, pohodlný a bezobslužný. Tepelné čerpadlo se dá ovládat i dálkově pomocí internetu nebo mobilního telefonu.

Výpočty a navržený postup měření

1. Výpočty

2.1. Tepelný výkon (užitné teplo) kondenzátoru:

$$P = M \cdot c_v \, (\Delta T_{V2}/120),$$

P - tepelný výkon kondenzátoru (užitné teplo) [J/s = W],

M - hmotnost ohřívané kapaliny,

c_v - měrná tepelná kapacita vody = 4180 [J/K.kg],

ΔT_{V2} - rozdíl dvou blízkých teplot u kondenzátoru [°C].

2.2. Topný faktor:

$$\varepsilon = P / P_0,$$

ε - topný faktor [-],

P - tepelný výkon (užitné teplo) kondenzátoru [J/s=W],

P_0 - příkon kompresoru [W].

2. Úkol:

Stanovte topný faktor tepelného čerpadla, čímž je poměr tepelného výkonu kondenzátoru ku příkonu kompresoru. Stanovte také závislosti příkonu kompresoru, tepelného výkonu kondenzátoru a topného faktoru na čase. Pouze slovy popište změny tlaku v kondenzátoru a výparníku v čase. Jak drahý byl provoz tohoto zařízení po dobu Vašeho měření?

3. Pomůcky:

1. Tepelné čerpadlo – nastaveno na maximální přetlak 18 barů (s tlakovou pojistkou)

2. Stopky, wattmetr, nádoby na vodu

4. Postup měření:

a) Zapněte tepelné čerpadlo (zastrčením zásuvky do wattmetru) a opište si aktuální cenu spotřeby (tlačítko cena na wattmetru) – tlačítko čerpadlo a kompresor zatím nezapínat. Seznamte se s jednotlivými částmi čerpadla a zjistěte které tepelné čidlo je napojeno na který displej (který displej zobrazuje teplotu dané části tepelného čerpadla).

b) Naplňte obě nádoby vodou a postavte je na stolečky a opatrně ponořte kondenzátor i výparník (vždy ve spolupráci minimálně dvou studentů).

c) Opište si dílčí parametry (viz. tab.) v čase 0. Zapněte kompresor a průběžně po 2 minutách zaznamenávejte tyto parametry po dobu 40 minut. Současně orientačně sledujte změny teplot v různých částech čerpadla.

d) Pokud se teplota v kondenzátoru dostane pod 4 °C (display $\boldsymbol{T_{v1}}$), tak zapněte čerpadlo (tlačítko „čerpadlo" na základním panelu) – míchání vody v kondenzátoru (voda pod 4 °C přestává cirkulovat) – zapnutím míchání se ovšem vnáší do měření chyba.

e) Ukončete měření – zapište si opět aktuální cenu na wattmetru a diskutujte cenu po dobu měřených 40ti minut. Případně si dále opište kolik by stál stálý provoz tohoto čerpadla za den/měsíc/rok (opět tlačítko cena). Vypněte zařízení vytažením zástrčky ze zásuvky. Vodu z nádob nevylévejte – případně je jen prohoďte – opět ve spolupráci (kondenzátor/výparník).

5. Naměřené a vypočtené hodnoty: 1 kWh ~ 5 Kč, 1 bar = 0,1 MPa

T_{v1} - teplota vody studené [°C]	T_{pk} - teplota páry v kompresoru [°C]	T_{chs} - teplota chladiva při sání [°C]
T_{v2} - teplota vody ohřívané [°C]	T_{zch} - teplota zkapalněného chladiva [°C]	T_{chn} - teplota chladiva při nástřiku [°C]

p_v - tlak ve výparníku [Pa]	p_k - tlak v kondenzátoru [Pa]

P - tepelný výkon (užitné teplo) kondenzátoru [J/s=W], $P = M \cdot c_v (\Delta T_{V2}/120)$
P_0 - příkon kompresoru [W]
M - hmotnost ohřívané kapaliny (resp. také studené) = 9,92 [kg]
m - průtokové množství kompresoru (výtlak) = 0,005 [kg/s]
c_v - měrná tepelná kapacita vody = 4180 [J/K.kg]
ε - topný faktor, $\varepsilon = P / P_0$ [-]
ΔT_V – rozdíl teplot kondenzátor výparník (pro každý mezičas) [°C]
ΔT_{V2} – rozdíl dvou blízkých teplot u kondenzátoru (ΔT_{V2} po 2 minutách) [°C]

Délka měření 0-40 min.

Čas /min	T_{v1} /°C	T_{v2} /°C	T_{pk} /°C	T_{zch} /°C	T_{chs} /°C	T_{chn} /°C	p_v /bar	p_k /bar	P_0 /W	P /J.s^{-1}	ε /-
0										-	-
2											
4											
6											
8											
10											
12											
14											
16											
18											
20											
22											
24											
26											
28											
30											
32											
34											
36											
38											
40											

Funkční vzorek – Laboratorní tepelné čerpadlo 2013

Čas /min	ΔT_v /°C		ΔT_{v2} /°C	
0	-	-	-	-
2		$T_{v2(2)} - T_{v1(2)}$		$T_{v2(2)} - T_{v2(0)}$
4		$T_{v2(4)} - T_{v1(4)}$		$T_{v2(4)} - T_{v2(2)}$
6		$T_{v2(6)} - T_{v1(6)}$		$T_{v2(6)} - T_{v2(4)}$
8		$T_{v2(8)} - T_{v1(8)}$		$T_{v2(8)} - T_{v2(6)}$
10		$T_{v2(10)} - T_{v1(10)}$		$T_{v2(10)} - T_{v2(8)}$
12		$T_{v2(12)} - T_{v1(12)}$		$T_{v2(12)} - T_{v2(10)}$
14		$T_{v2(14)} - T_{v1(14)}$		$T_{v2(14)} - T_{v2(12)}$
16		$T_{v2(16)} - T_{v1(16)}$		$T_{v2(16)} - T_{v2(14)}$
18		$T_{v2(18)} - T_{v1(18)}$		$T_{v2(18)} - T_{v2(16)}$
20		$T_{v2(20)} - T_{v1(20)}$		$T_{v2(20)} - T_{v2(18)}$
22		$T_{v2(22)} - T_{v1(22)}$		$T_{v2(22)} - T_{v2(20)}$
24		$T_{v2(24)} - T_{v1(24)}$		$T_{v2(24)} - T_{v2(22)}$
26		$T_{v2(26)} - T_{v1(26)}$		$T_{v2(26)} - T_{v2(24)}$
28		$T_{v2(28)} - T_{v1(28)}$		$T_{v2(28)} - T_{v2(26)}$
30		$T_{v2(30)} - T_{v1(30)}$		$T_{v2(30)} - T_{v2(28)}$
32		$T_{v2(32)} - T_{v1(32)}$		$T_{v2(32)} - T_{v2(30)}$
34		$T_{v2(34)} - T_{v1(34)}$		$T_{v2(34)} - T_{v2(32)}$
36		$T_{v2(36)} - T_{v1(36)}$		$T_{v2(36)} - T_{v2(34)}$
38		$T_{v2(38)} - T_{v1(38)}$		$T_{v2(38)} - T_{v2(36)}$
40		$T_{v2(40)} - T_{v1(40)}$		$T_{v2(40)} - T_{v2(38)}$

5. Zpracování naměřených údajů:

a) Dopočítejte topný faktor ε, tepelný výkon P, rozdíl teplot ΔT_v a ΔT_{v2}. Diskutujte optimální hodnotu topného faktoru.

b) Na milimetrový papír nebo v počítači vykreslete grafy $\varepsilon(\Delta T_v)$, $P(\Delta T_v)$ a $\varepsilon(t)$. Vynechávejte hodnoty času $t = 0$ - jsou pouze srovnávací. Pokud pracujete s počítačem, potom vykreslete bodové grafy, kterými následně proložíte spojnici trendu. Jednotlivé křivky popište a u vykreslené křivky zobrazte hodnotu spolehlivosti R^2, která charakterizuje čtverec odchylek bodů od vykreslené křivky (čím jsme blíže k jedničce, tím je součet čtverců odchylek menší – bod(y) který má velkou odchylku od proložené křivky zanedbejte). V případě vykreslování jednotlivých grafů na milimetrový papír stanovte R (také nazývané korelačním koeficientem) pomocí kalkulátoru.

c) Pouze slovy popište změny tlaku v kondenzátoru a výparníku v čase.

d) Pokud bylo v průběhu měření zapnuto pomocné („míchací“) čerpadlo, potom se to v jednotlivých charakteristikách projeví skokově. Důvodem je zapnutí dalšího elektrického zařízení napojený na stejný elektrický vývod jako TČ. Pro matematický popis poté vyberte pouze jednu z vykreslených křivek.

e) Na jaké hodnotě topného faktoru čerpadlo pracovalo po 40ti minutách měření (popište a diskutujte srovnáním s doporučeným rozsahem)

f) Popište jednotlivé závislosti (exponenciální, polynomická, lineární…). Maxima, minima, ustálení, okamžik zapnutí („míchacího“) čerpadla…

g) Návrhy na zlepšení + možnosti které mohly zapříčinit vnesení chyb.

6. Vyhodnocení grafických závislostí a závěr

Následuje příloha o technických parametrech použitého kompresoru tepelného čerpadla:

Model: GL90TB

General data

Refrigerant:	R134a
Discharge element:	C-V
Cooling:	F
Maximum ambient temperature [°C]:	43

Compressor's data

Cylinder capacity [cm³]:	8,9
Displacement [m³/h]:	1,5
Weight [kg]:	10,8
Oil charge [cm³]:	300
Oil type:	ISO VG 22 ESTER

Engine's data

Engine type:	CSIR
Power [KM]:	1/4
Starting element:	HST
Power supply:	220V 50Hz
Voltage range:	187-264
Locked rotor current [A]:	12
Running winding resistance (25°C) [Ω]:	7,49
Starting winding resistance (25°C) [Ω]:	32,83

Electrical data

Relays:	9660 A 138, MTRP 43
Shielding element:	MRP56AMK, T0057, AE39FHY
Starting capacitor volume [μF]:	

Connections

	milimeters	inches
Suction/service tube:	6,5	
Service/suction tube:	6,5	
Discharge tube:	4,9	

ACC COMPRESSORS

Model / Modelo Modell / Modèle	Power / Potencia Leistung / Puissance hp	Cpr cooling / Enfriamiento Kühlung / Refroidissement	Displacement / Cilindrada Hubraum / Cylindrée cm³	Refrigerating capacity Capacidad frigorífica Kälteleistung Production frigorifique COP in W/W 1 W = 0,864 kcal/h = 3,415 BTU/h Evaporating temp. / Temp de evaporación Verdampfungstemp. / Temp. d'évaporation °C	Expansion / Expansión Einspritzung / Détante	Oil / Aceite Oel / Huile cm³	Weight / Peso Gewicht / Poids kg	Motor / Motor Motor / Moteur	Starting / Arranque Anlauf / Démarrage

HMBP

R134a 50 Hz				CECOMAF (W) -25	-15	5 W	5 COP	10	ASHRAE 7.2 kcal/h	ASHRAE 7.2 COP	R134a 50 Hz				
220-240V 50Hz ~1															
GD30MBa	1/10	S	3.00	48	88	233	1.52	281	240	1.74	C	200	5.8	RSIR	P
GD30MBb	1/10	F	3.00	48	88	233	1.52	281	240	1.74	C	200	5.8	RSIR	P
GD30MBc	1/10	S	3.00	48	88	233	1.52	281	240	1.74	C-V	200	5.8	CSIR	R
GD30MBd	1/10	F	3.00	48	88	233	1.52	281	240	1.74	C-V	200	5.8	CSIR	R
GD36MBa	1/10	S	3.62	52	95	261	1.52	318	270	1.74	C	240	6.7	RSIR	P
GD36MBb	1/10	F	3.62	52	95	261	1.52	318	270	1.74	C	240	6.7	RSIR	P
GD36MBc	1/10	S	3.62	52	95	261	1.52	318	270	1.74	C-V	240	6.7	CSIR	R
GD36MBd	1/10	F	3.62	52	95	261	1.52	318	270	1.74	C-V	240	6.7	CSIR	R
GL40PB	1/8	F	4.04	63	118	302	1.65	362	310	1.90	C	300	8.4	RSIR	R
GL40TB	1/8	F	4.04	63	118	302	1.65	362	310	1.90	C-V	300	8.4	CSIR	R
GD40MBa	1/8	S	4.05	63	117	301	1.56	363	310	1.80	C	200	6.7	RSIR	P
GD40MBb	1/8	F	4.05	63	117	301	1.56	363	310	1.80	C	200	6.7	RSIR	P
GD40MBc	1/8	S	4.05	63	117	301	1.56	363	310	1.80	C-V	200	6.7	CSIR	R
GD40MBd	1/8	F	4.05	63	117	301	1.56	363	310	1.80	C-V	200	6.7	CSIR	R
GL45PB	1/6	F	4.50	76	134	342	1.62	412	352	1.86	C	300	8.4	RSIR	R
GL45TB	1/6	F	4.50	76	134	342	1.62	412	352	1.86	C-V	300	8.4	CSIR	R
GL60PB	1/5	F	5.67	95	170	437	1.82	527	450	2.09	C	300	9.5	RSIR	R
GL60TB	1/5	F	5.67	95	170	437	1.82	527	450	2.09	C-V	300	9.5	CSIR	R
GL80PB	1/5	F	7.57	111	212	554	1.83	667	570	2.10	C	300	9.5	RSIR	R
GL80TB	1/5	F	7.57	111	212	554	1.83	667	570	2.10	C-V	300	9.5	CSIR	R
GL90PB	1/4	F	8.85	142	259	661	1.91	796	680	2.20	C	300	10.8	RSIR	R
GL90TB	1/4	F	8.85	142	259	661	1.91	796	680	2.20	C-V	300	10.8	CSIR	R
GP10PB	1/3	F	10.18	158	300	786	1.90	949	810	2.19	C	400	11.5	RSIR	R
GP10TB	1/3	F	10.18	158	300	786	1.90	949	810	2.19	C-V	400	11.5	CSIR	R
GP12PB	3/8	F	12.00	169	338	893	1.80	1077	920	2.06	C	350	11.2	RSIR	R
GP12TB	3/8	F	12.05	169	338	893	1.80	1077	920	2.06	C-V	350	11.2	CSIR	R
GP14PB	3/8	F	14.00	190	373	999	1.77	1208	1030	2.03	C	400	11.5	RSIR	R
GP14TB	3/8	F	14.00	190	373	999	1.77	1208	1030	2.03	C-V	400	11.5	CSIR	R
GX18TB	1/2	F	18.40	285	539	1390	1.91	1673	1430	2.20	C-V	500	16.0	CSIR	R
GX21TB	5/8	F	20.72	322	603	1550	1.90	1866	1595	2.18	C-V	500	17.0	CSIR	R
GX23TB	5/8	F	23.20	368	677	1730	1.89	2083	1780	2.18	C-V	500	17.0	CSIR	R
GS26TB	3/4	F	25.93	264	703	2071	2.09	2514	2140	2.42	C-V	887	22.7	CSIR	R
GS30TB	7/8	F	29.95	317	785	2452	2.33	3020	2550	2.70	C-V	887	22.7	CSR	R
GS34TB	1	F	34.42	476	1068	2852	2.28	3421	2931	2.62	C-V	887	22.7	CSR	R
200-240/220-230V 50/60Hz ~1															
GL35TG	1/9	F	3.68	57	106	272	1.68	327	280	1.95	C-V	300	8.4	CSIR	R
GL40TG	1/8	F	4.04	63	118	302	1.75	362	310	2.03	C-V	300	8.4	CSIR	R
GL45TG	1/6	F	4.50	76	134	342	1.68	412	352	1.95	C-V	300	8.8	CSIR	R
GL60TG	1/5	F	5.67	95	170	437	1.82	527	450	2.09	C-V	300	9.9	CSIR	R
200-220/220-230V 50/60Hz ~1															
GL60RG	1/5	F	5.67	95	170	437	2.03	527	450	2.33	C-V	300	9.9	CSR	R
GL80TG	1/5	F	7.57	111	212	554	1.83	667	570	2.10	C-V	300	10.1	CSIR	R
GL90RG	1/4	F	8.85	142	259	661	2.02	796	680	2.33	C-V	300	10.9	CSR	R

This table continues in the following page