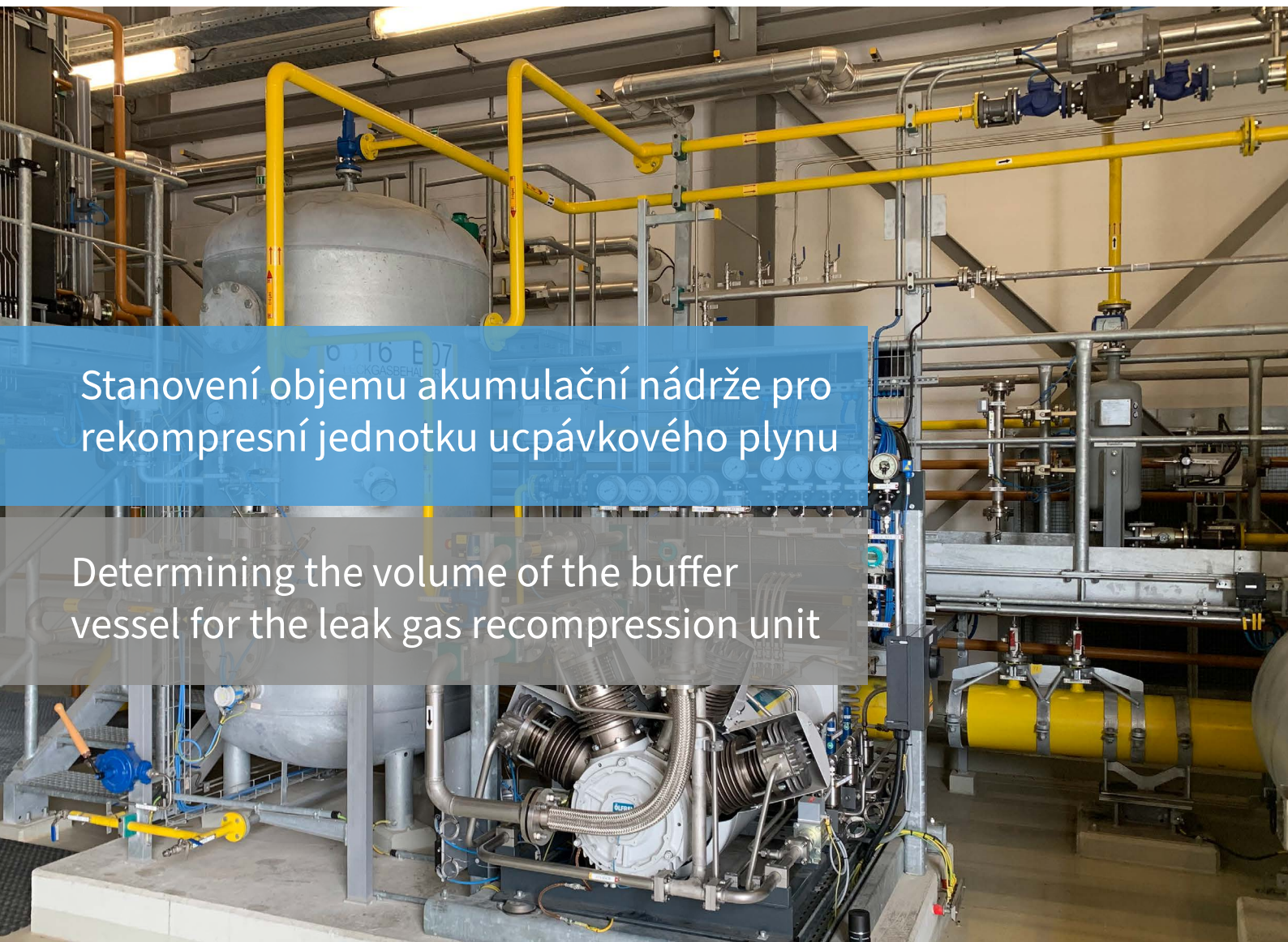




Stanovení objemu akumulční nádrže pro rekompresní jednotku ucpávkového plynu

Determining the volume of the buffer vessel for the leak gas recompression unit

Autoři: František Čapla, Dr. Ing. Libor Čapla

UK Matematicko-fyzikální fakulta, Gas Storage CZ, a.s.

Souhrn:

Objem akumulční nádrže byl vypočten pomocí vztahů odvozených prostřednictvím matematické analýzy parametrů kompresorové jednotky pro kompresi ucpávkového plynu, její charakteristiky – závislosti průtoku plynu na tlaku na sání a doporučeného omezení pro dosažení garantované životnosti kompresoru, vycházejícího z maximálního počtu sepnutí kompresoru za hodinu.

Klíčová slova

komprese plynu, ucpávkový plyn, matematická analýza, technologie

Summary:

The volume of the buffer vessel was calculated using relations derived through a mathematical analysis of the parameters of the compressor unit for compressing the leaking gas, its characteristics – the dependence of the gas flow on the suction pressure and the recommended limitation for achieving the guaranteed life of the compressor based on the maximum number of compressor switches per hour.

Key Words

gas compression, leak gas, mathematical analyses, technology

1. Úvod

Nařízení EU 2024/1787 zakazuje provozovatelům plynárenské infrastruktury vypouštět metan do ovzduší a ukládá plyn zpracovat a využít, nebo v případě, kdy využití není možné, tak jej pálit. Mezi do ovzduší doposud běžně vypouštěné emise metanu, respektive zemního plynu je řazen plyn unikající z ucpávek plynových kompresorů, které jsou používány ke zvyšování tlaku plynu pro účely přepravy nebo vtláčení do zásobníků plynu, popřípadě těžby plynu z nich. Během provozu v tomto případě uvažovaného plynového kompresoru dochází k únikům komprimovaného plynu přes ucpávky na čtyřech pístnicích jednoho reciprokého pístového kompresoru (BK) v rozsahu 2–40 m³/h (normální vztažné podmínky (N),

Nařízení EU 2024/1787 zakazuje provozovatelům plynárenské infrastruktury vypouštět metan do ovzduší a ukládá plyn zpracovat a využít, nebo v případě, kdy využití není možné, tak jej pálit

teplota 0 °C, tlak 101,325 kPa). Tento plyn je prostřednictvím impulsního potrubí přes měření průtoku odváděn do odfuků na střeše kompresorovny. Na obrázku 1 je fotografie pístnice s přírubou ucpávek a potrubím (hladké impulsní trubky) pro odvod ucpávkového plynu. Ke snížení těchto emisí a využití ucpávkového plynu je možné využít kompresorové jednotky (ERU – emission recovery unit) stlačující plyn na tlak v plynovodní síti, v níž je unikající průtok plynu možné uplatnit. V případě provozů PZP se vzhledem k letnímu provozu BK, kdy není dostatečná spotřeba plynu pro technologické ohřevy, ohřev topné a teplé užitkové vody, jako optimální jeví možnost komprimace ucpávkového plynu do potrubí na sání BK. Těsnicí prvky válců a ucpávek BK jsou řešeny jako bezmazné, z čehož vyplynul požadavek na bezmazné řešení válců ERU, aby byla vyloučena kontaminace plynu na výstupu ERU olejem.

ERU bude koncipována tak, aby pokryla úniky plynu ze dvou současně provozovaných BK, tedy pro pracovní rozsah průtoku ucpávkového plynu 4–80 m³/h (N).

2. Regulace průtoku

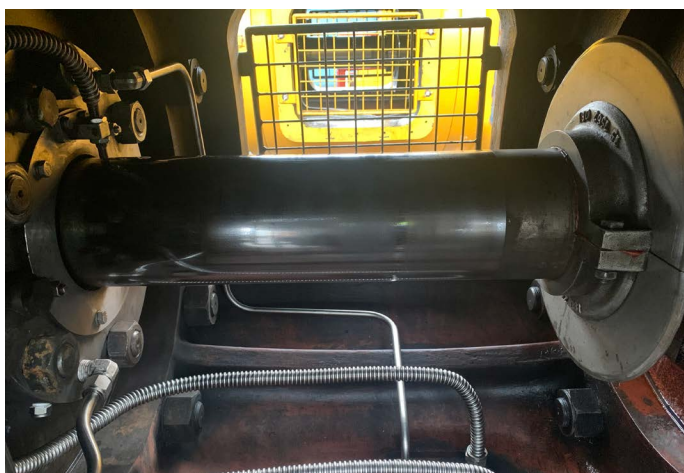
Průtok ucpávkového plynu z BK je proměnlivý a tomu je nutné přizpůsobit koncepci ERU. Možnosti řešení regulace ERU s ohledem na kolísavý průtok na sání mohou být^{1,2)}:

1. Přepouštění plynu z výtlačku do sání ERU přes regulační ventil – nevýhodou jsou vyšší provozní náklady související s mařením energie.
2. Regulace výkonnosti kompresoru ERU frekvenčním měničem prostřednictvím regulace otáček elektromotoru pohánějícího kompresor – nevýhodou jsou vyšší investiční náklady a omezené rozšíření rozsahu.
3. Zařazením akumulární nádrže před ERU. Spínání ERU při spodním limitním tlaku a vypínání při horním limitním tlaku.

Jejich vzájemná kombinace je možná. Každé z uvedených řešení má své limity, které je třeba vzít do úvahy v rámci návrhové části projektu, v níž je třeba se věnovat a porovnávat investiční a provozní náklady. Zde se budeme věnovat třetímu bodu, konkrétně pak výpočtu objemu akumulární nádrže pro optimální návrh jednotky pro rekompresi plynu z hlediska výrobcem limitovaného maximálního počtu startů ERU za hodinu.

3. Podklady

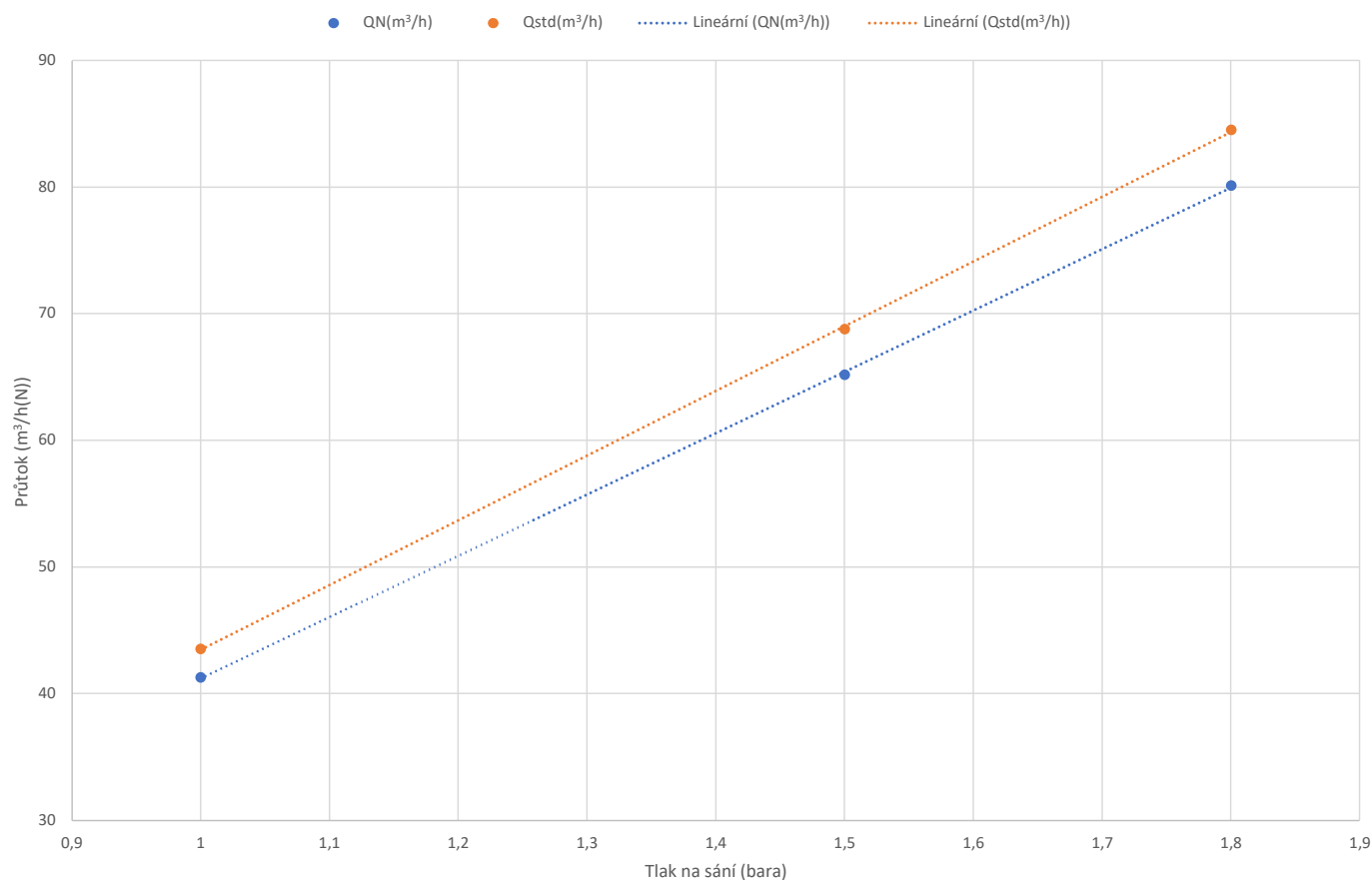
Referenci s parametry bezmazného pístového kompresoru firmy HAUG Compressoren jsme získali z podkladů uveřejněných ve sborníku z EFRC konference.⁴⁾ Pro aplikaci ERU pro rekompresi ucpávkového plynu z BK instalovaných na provozech PZP Gas Storage CZ byla poptána firma YNNA spol. s r. o., výhradní zástupce firmy HAUG Compressoren v České republice, z jejíž nabídky³⁾ budeme vycházet v následujícím textu. Její součástí byl čtyřstupňový pístový kompresor HAUG typ 44G 140-75-50-35 LM-L z výkonové řady Sirius s elektropohonem



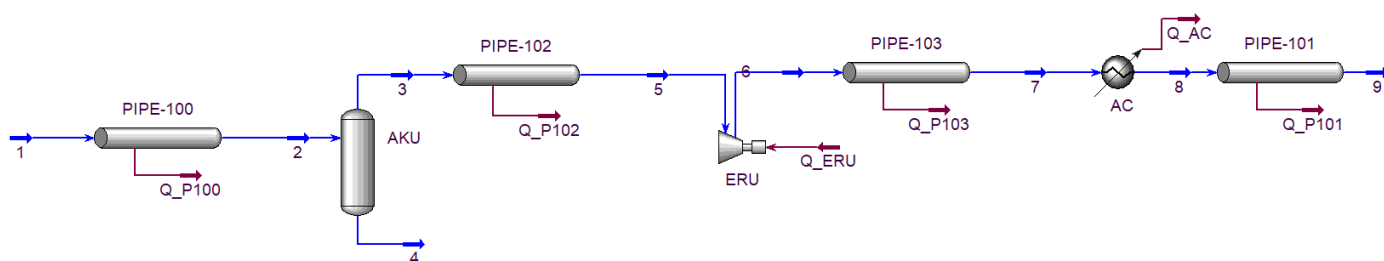
Obrázek 1 – Fotografie pístnice BK s přírubou ucpávek a potrubím pro odvod ucpávkového plynu



Obrázek 2 – Fotografie ERU s akumulární nádrží



Obrázek 3 – Charakteristika $Q = f(P_1)$ kompresoru HAUG



Obrázek 4 – Schéma zapojení AKU a ERU

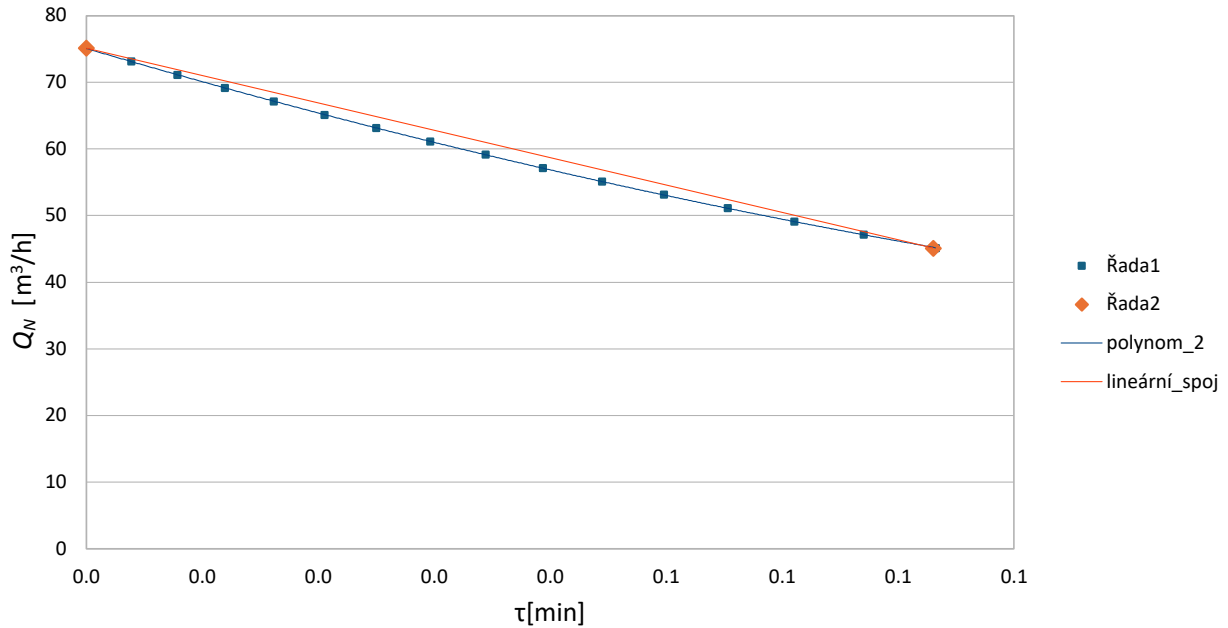
(příkon 30 kW). Kompressor pracuje s rozsahem tlaků na sání 1,0 až 1,8 bar(a) a s maximálním výstupním tlakem 63 bar(a). Fotografie s instalací ERU s akumulací nádrží je uvedena na obrázku 2. Charakteristika kompresoru ERU, reprezentovaná závislostí průtoku plynu za vztažných podmínek na tlaku na sání, je uvedena na obrázku 3. Maximální počet sepnutí je stanoven na deset za hodinu. Průtok plynu na sání je uveden pro pracovní teplotu 20 °C. Odchylna teploty plynu na vstupu do ERU o každé 3 °C zvýší odchylku průtoku o 1 %.

V dokumentaci jsou objemové jednotky vztaženy k referenční teplotě 0 °C, zde označené písmenem N (Q_N). Ty byly přepočteny na standardní referenční podmínky se vztažnou teplotou 15 °C, ty jsou označené písmeny std

(Q_{std}). Vztažný tlak je v obou případech 101,325 kPa(a).

Rozsah pracovního tlaku pro akumulací nádrž byl zvolen 1,1 až 1,8 bar(a).

Na obrázku 4 je uvedeno schéma zapojení AKU a ERU. Proud 1 je ucpávkový plyn přicházející od pístnic BK potrubím PIPE-100. AKU představuje akumulací nádrž. Z AKU odchází plyn jako proud 3 potrubím PIPE-102 na sání kompresoru ERU. Proud 4 představuje kapalnou fázi oddělenou v AKU. Z ERU je komprimovaný plyn veden do vzduchového chladiče AC (air cooler). Ve skutečnosti má kompressor HAUG 4 kompresní stupně, po každém následuje vzduchové chlazení. Potrubím PIPE-101 je proud plynu 9 veden zpět do sání BK.


 Obrázek 5 – Graf závislosti průtoku ideálního plynu z nádrže o objemu V_{prac} na čas

Pro stanovení objemu akumulací nádoby byla provedena matematická analýza, jejímž výsledkem bylo odvození výpočetních vztahů.

4. Matematická analýza

V rámci výpočtu označujeme objem akumulací nádoby klasickým symbolem V_{prac} . Dále uvažujeme stálý přítok ucpávkového plynu, který označíme Q_{up} . V modelu pracujeme s akumulací nádrží o pracovním objemu V_{prac} a s kompresní jednotkou, která se spouští při tlaku v nádrži 1,8 bar(a) a vypíná při tlaku 1,1 bar(a). Průtok kompresní jednotkou je závislý na tlaku v nádrži. Pro zadané hodnoty a pro teplotu plynu na sání 20 °C a pro složení plynu dle tabulky 2 se pohybuje mezi 46,06 a 80,1 m³/h (N), respektive 48,6 a 84,5 m³/h (STD → pro standardní vztahné podmínky (teplota 15 °C, tlak 101,325 kPa)), což bylo určeno na základě korelace lineárních funkcí.

Pro výpočet počtu sepnutí v závislosti na Q_{up} potřebujeme určit, jak rychle se sníží tlak z hodnoty 1,8 na 1,1 bar(a). Abychom zjistili dobu tohoto procesu, vypočítáme střední hodnotu průtoku kompresorem. Předpokládáme, že změna tlaku v rozmezí hodnot 1,1 a 1,8 bar(a) je přibližně lineární funkcí. Tento předpoklad odůvodníme výpočtem aplikovaným pro ideální plyn.

Vytvořili jsme tabulku pro diferenciální výpočet. Průtok látky Q_{mol} lze vyjádřit jako úbytek látkového množství za čas:

$$Q_{mol} = \frac{dn}{d\tau} \quad [1]$$

kde Q_{mol} lze dále vyjádřit pomocí stavové rovnice $pV_{prac} = nRT$ pro konstantní pracovní objem V_{prac} a absolutní teplotu T jako:

$$Q_{mol} = \frac{dp}{d\tau} \cdot \frac{V_{prac}}{RT} \quad [2]$$

Pro počáteční tlak $p = 1,8$ bar(a) jsme zvolili hodnotu pracovního objemu $V_{prac} = 1$ m³ a vypočítali za tlaku $p = 100$ kPa, počáteční množství látky $n = 75,13$ mol. Následovně jsme prováděli výpočet po krocích s úbytkem $\Delta n = 2$ mol. Pro každou hodnotu jsme určili tlak, průtok po změně a dobu trvání úbytku jako:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta n}{\frac{Q_1 + Q_2}{2}}, \quad [3]$$

kde Q_1 a Q_2 jsou průtoky před a po změně. Proces byl ukončen při dosažení tlaku nižšího než 1,1 bar(a). Průměrná hodnota průtoku byla vypočtena dvěma způsoby, a to nejprve pomocí diferenciálního přístupu, počítáno jako průměr se změnou po malých krocích, podle rovnice [2] s výsledkem 60,1 mol/h. A následovně průměrem průtoku za čas spojením krajních bodů s výsledkem 58,9 mol/h.

Rozdíl mezi metodami je přibližně 2 %. Data jsme zpracovali i do grafické podoby – viz obrázek 5, aby byl vidět rozdíl mezi přibližným průběhem a průběhem lineárním.

Budeme tedy dále uvažovat lineární pokles i u reálného plynu. Díky předpokladu lineárního poklesu v čase lze vypočítat průměrnou hodnotu průtoku pro náš případ jako

střední hodnotu krajních hodnot z charakteristiky $Q = f(P_1)$ kompresoru HAUG, kde mezi tlaky 1,1 a 1,8 bar(a) je lineární závislost s výsledkem 63,01 m³/h.

Pro další výpočty uvažujeme chybu přibližně 3 %, způsobenou dvěma zanedbáními: tlak jako lineární funkce průtoku (asi 1 %) a lineární pokles průtoku v čase (asi 2 %). Pro odhad jsme chyby pouze sečetli.

5. Výpočty

Vyjádřeme si základní vztahy:

Doba napouštění AKU:

$$\tau_{nap} = \frac{V_{prac}}{Q_{up}}, \quad [4]$$

kde V_{prac} je pracovní objem akumulární nádrže (tedy objem plynu, který nateče) a Q_{up} střední hodnota průtoku ucpávkového plynu. Vše počítáme při normálových stavových podmínkách.

Doba odsávání AKU:

$$\tau_{ods} = \frac{V_{prac}}{\langle Q_N \rangle - Q_{up}}, \quad [5]$$

kde t_{ods} je průměrná rychlost odsávání a $Q - Q_{up}$ vyjadřuje změnu v rámci nádrže, do které neustále přitéká Q_{up} a zároveň z ní vytéká Q , což je plyn odčerpávaný ERU. Vztažné stavové podmínky Q i Q_{up} jsou teplota 0 °C, tlak 101,325 kPa a symbol $\langle Q_N \rangle$ je střední hodnota průtoku ERU.

Celkový čas napuštění a vypuštění:

$$\tau = \tau_{nap} + \tau_{ods}, \quad [6]$$

z čehož plyne počet sepnutí:

$$S = \frac{1}{t} = \frac{1}{\tau_{nap} + \tau_{ods}} = \frac{1}{\frac{V_{prac}}{\langle Q_N \rangle - Q_{up}} + \frac{V_{prac}}{Q_{up}}} = \frac{Q_{up} \cdot (\langle Q_N \rangle - Q_{up})}{V_{prac} \cdot \langle Q_N \rangle} \quad [7]$$

Protože V_{prac} a Q_{up} jsou v modelu nezávislé, můžeme dále provádět výpočet zvlášť pro proměnnou Q_{up} a V_{aku} , přičemž výsledné hodnoty spojíme.

Pro funkci S v závislosti na Q_{up} platí:

Nulové body $S = 0$ vyplývají z rovnice $Q_{up} = 0$ nebo $\langle Q_N \rangle$.

První derivace podle Q_{up} :

$$\frac{\delta S}{\delta Q_{up}} = S' = \frac{\langle Q_N \rangle - 2Q_{up}}{V_{prac} \langle Q_N \rangle}. \quad [8]$$

Z derivace plyne, že funkce roste až do $Q_{up} = \frac{1}{2} \langle Q_N \rangle$, z čehož tedy plyne, že pro $Q_{up} = \frac{1}{2} \langle Q_N \rangle$ bude nabývat hodnota sepnutí maxima. Druhou derivací zjistíme konvexnost funkce:

$$S'' = -\frac{2}{V_{prac} \langle Q_N \rangle}. \quad [9]$$

Z čehož vyplývá, že funkce $S = f(Q_{up})$ je na celém intervalu konkávní.

V reálném případě omezíme funkční obor na $Df(Q_{up}) = (0; 46,06)$ odpovídající interval tlaku od 1,1 do 1,8 bar(a).

Nás nyní zajímá výpočet objemu akumulární nádoby s tím, že pro zadaný kompresor je maximální počet sepnutí $S = 10$ sepnutí/hodinu. Pro výpočet pracovního objemu použijeme vzorec:

$$V_{prac} = \frac{Q_{up} \cdot (\langle Q_N \rangle - Q_{up})}{S \cdot \langle Q_N \rangle} \quad [10]$$

Dále vyjdeme z toho, že bude průtok ucpávkového plynu $Q_{up} = \frac{1}{2} \langle Q_N \rangle$, tedy počet sepnutí bude na maximu. Díky tomu můžeme upravit rovnici [10] na:

$$V_{prac} = \frac{\langle Q_N \rangle}{4S} \quad [11]$$

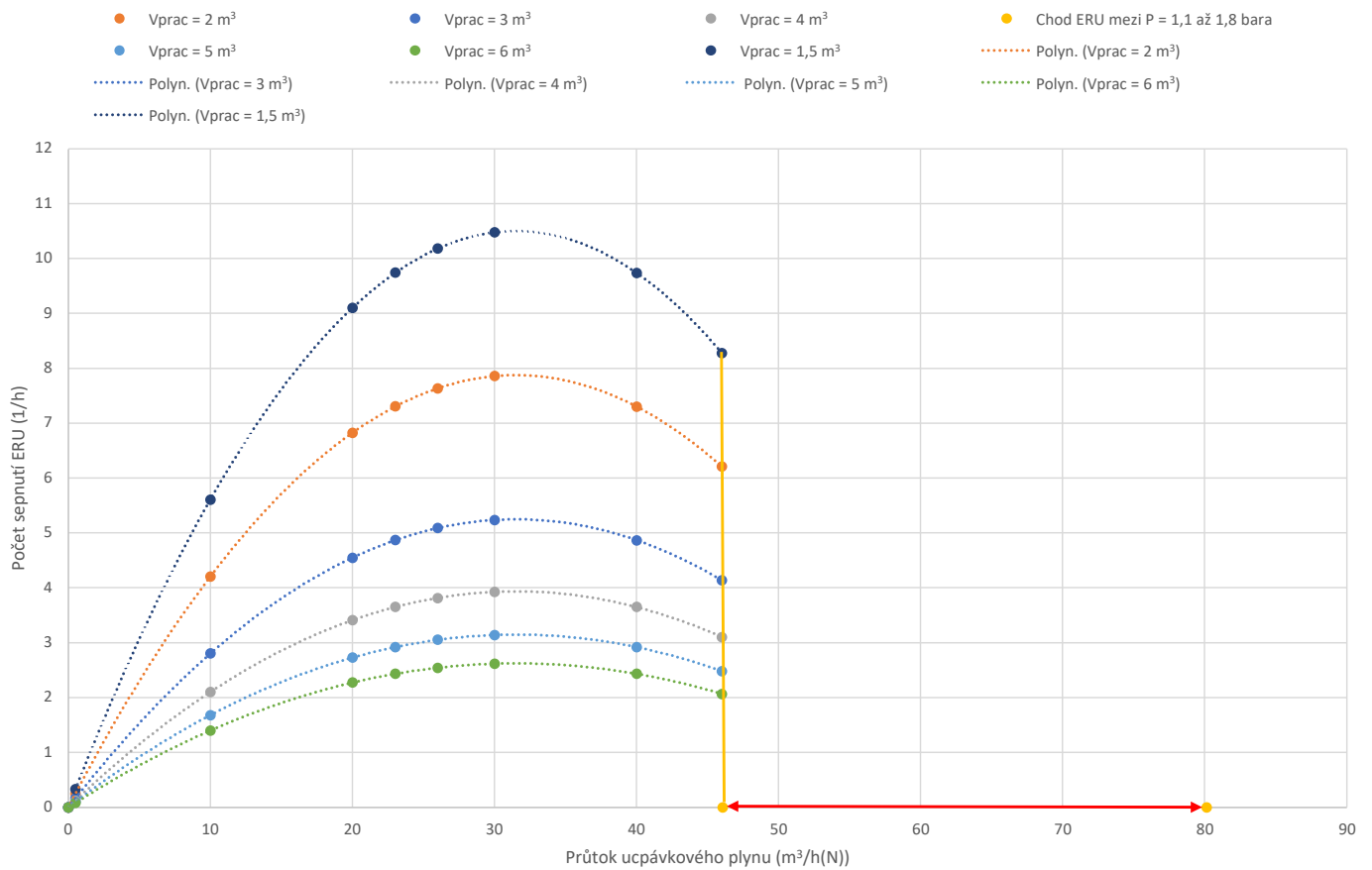
6. Výsledky

Pro stanovení objemu akumulární nádoby byl na základě vztahů uvedených v předchozí kapitole vytvořen individuální výpočetní algoritmus, vycházející z charakteristiky kompresoru HAUG uvedené v kapitole 2.

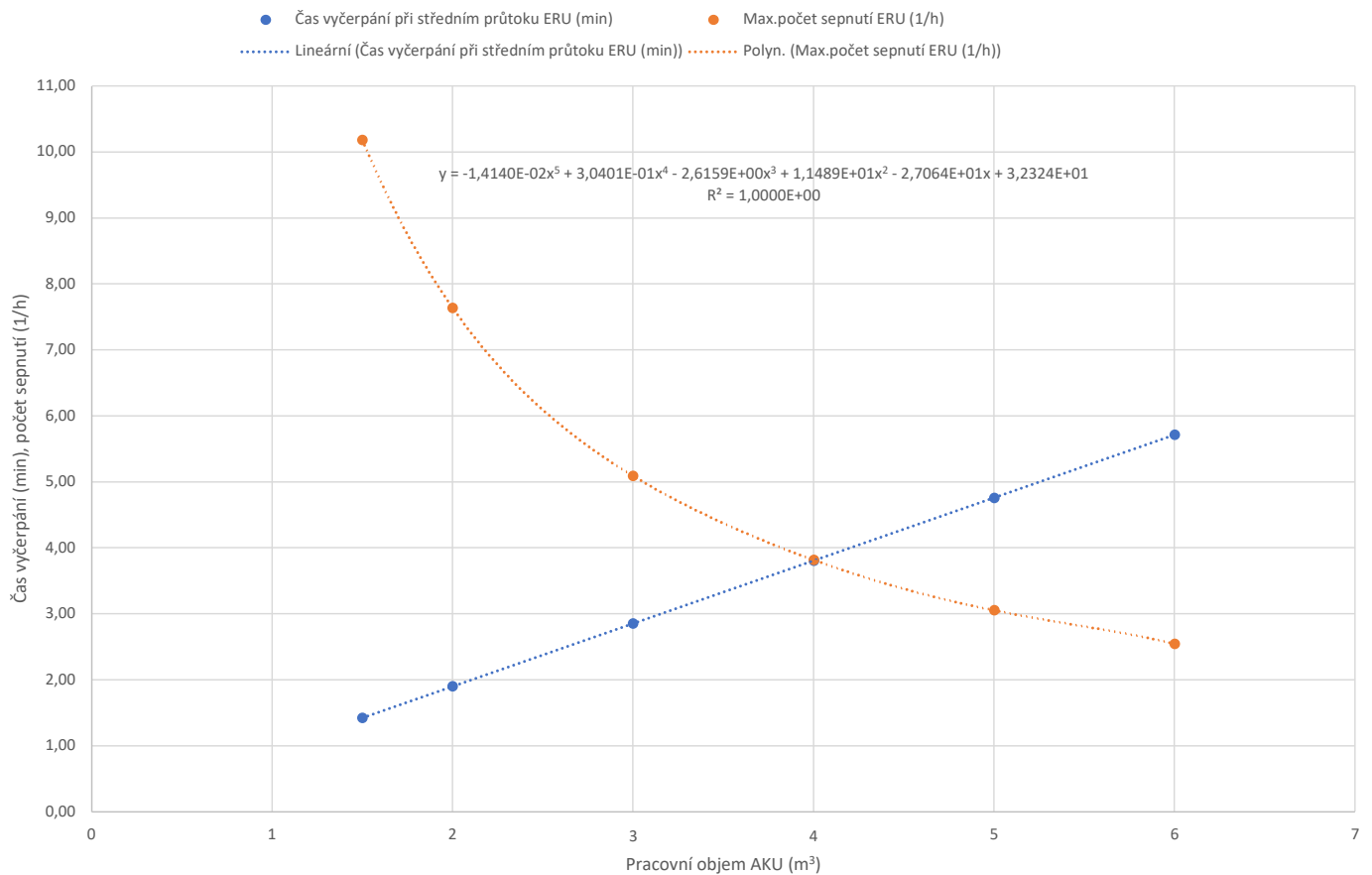
Mezi tlaky 1,1 a 1,8 bar(a) bude ERU při teplotě plynu na sání 20 °C a složení plynu dle tabulky 2 pracovat s průtoky 48,6 až 84,5 m³/h (STD), respektive 46,1 až 80,1 m³/h (N). Pod minimálním tlakem 1,1 bar(a) a průtokem $Q_N = 46,1$ m³/h bude jednotka (ERU) spínat v závislosti na průměrné hodnotě průtoku ucpávkového plynu a velikosti akumulární nádrže. K vypnutí jednotky by mělo dojít při dosažení tlaku v akumulární nádrži 1,1 bar(a), k jejímu sepnutí při 1,8 bar(a). Výsledná závislost počtu sepnutí na průtoku ucpávkového plynu je pro různé pracovní objemy akumulární nádoby uvedena na obrázku 6.

Na něm je rozmezí pracovních průtoků ERU naznačeno červenou šipkou a platí pro normální vztažné stavové podmínky. V této části charakteristiky nedochází ke spínání, ERU je v chodu. Nalevo od spodního limitu pracovní oblasti, která je ohraničena žlutou svislicí, je oblast, ve které bude v závislosti na průtoku ucpávkového plynu ERU spínat a počet sepnutí je závislý na průtoku ucpávkového plynu. Maximální hodnoty dosahuje počet sepnutí při polovině střední hodnoty průtoku ERU.

V tabulce 1 jsou pro pracovní objemy akumulární nádrže v rozsahu 1,5 až 6 m³ uvedeny výsledky maximálního počtu sepnutí kompresoru ERU a času potřebného na vyčerpání akumulární nádrže na spodní limit tlaku (1,1 bar(a)) při střední hodnotě průtoku ucpávkového plynu.



Obrázek 6 – Výpočet počtu sepnutí ERU v závislosti na průtoku ucpávkového plynu a pracovním objemu akumulční nádrže



Obrázek 7 – Závislost počtu sepnutí ERU na pracovním objemu AKU

Tabulka 1 – Čas vyčerpání a maximální počet sepnutí ERU v závislosti na objemu akumulární nádoby

Prac. objem AKU (m ³)	Čas vyčerpání při střední hodnotě průtoku ERU (min)	Max. počet sepnutí ERU (1/h)
1,5	1,43	10,18
2	1,90	7,64
3	2,86	5,09
4	3,81	3,82
5	4,76	3,05
6	5,71	2,55

Závislost počtu sepnutí ERU na pracovním objemu akumulární nádrže je uvedena na obrázku 7.

Vodní, respektive prostý, na stavových podmínkách plynu nezávislý objem akumulární nádrže (V_{aku}) je možné vypočítat pomocí vztahu pro ideální plyn:

$$(V_{aku})_{id} = \frac{V_{prac} \cdot T_P}{(dP \cdot T_N)}, \quad [12]$$

Kde dP je tlaková difference obou limitních tlaků v rámci pracovního rozsahu akumulární nádoby (bar), T_N je vztázná absolutní teplota (273,15 K), T_P je maximální pracovní absolutní teplota (308,15 K).

Zpřesnění je možné provést započtením kompresibilit při obou limitních tlacích,

$$(V_{aku})_{real} = \frac{V_{prac} \cdot T_P}{T_n \left(\frac{P_2}{Z_2} - \frac{P_1}{Z_1} \right)} \quad [13]$$

kde P_2 je horní limitní pracovní tlak AKU (bara), Z_2 je kompresibilitní faktor plynu při P_2 , T_P (teplota plynu), P_1 je spodní limitní pracovní tlak AKU (bara), Z_1 je kompresibilitní faktor plynu při P_1 , T_P .

Výpočet pro případ rozsahu pracovních tlaků 1,1 ÷ 1,8 bar(a):

Kompresibilitní faktory byly prostřednictvím stavové rovnice AGA8-DC92, respektive ISO 12213-25) vypočtené pro složení plynu uvedené v tabulce 2.

Tabulka 2 – Složení zemního plynu, x_i = molární zlomek složky i (mol. %)

Složka	x_i (mol.%)
metan	90,5984
etan	5,2641
propan	1,1209
iso-butan	0,1893
n-butan	0,1822
iso-pentan	0,0448
n-pentan	0,0309
C ₆₊	0,0572
N ₂	1,3374
CO ₂	1,1748

Výsledky výpočtu:

$$Z_1(P_1 = 1,1 \text{ bara}, t_1 = 35 \text{ °C}) = 0,99797$$

$$Z_2(P_2 = 1,8 \text{ bara}, t_2 = 35 \text{ °C}) = 0,99668$$

Výsledky výpočtu objemu akumulární nádrže jsou pro stav ideálního i reálného plynu uvedeny v tabulce 3.

Rozdíly mezi výsledky pro výpočty s ideálním a reálným plynem jsou minimální (0,6 %).

Vzhledem k možným odchylkám způsobeným:

1. nahrazením závislosti skutečného průběhu tlaku na průtoku lineární funkcí (asi 1 %)
2. nahrazením poklesu průtoku v čase lineární funkcí (asi 2 %)

Tabulka 3 – Výsledky výpočtu objemu akumulární nádrže (AKU)

Počet sepnutí	$S \leq 5$	$S \leq 10$
Pracovní objem AKU pro jednu ERU při 0 °C (m ³)	3,06	1,53
Vodní objem AKU pro jednu ERU, ideální plyn, 35 °C (m ³)	4,93	2,46
Vodní objem AKU pro jednu ERU, reálný plyn, 35 °C (m ³)	4,90	2,45
Pracovní objem AKU pro dvě ERU při 0 °C (m ³)	6,11	3,06
Vodní objem AKU pro dvě ERU, ideální plyn, 35 °C (m ³)	9,85	4,93
Vodní objem AKU pro dvě ERU, reálný plyn, 35 °C (m ³)	9,80	4,90

3. možnou odchylkou v pracovní teplotě ucpávkového plynu až o 15 °C (asi 4 %), doporučujeme vypočtené objemy akumulární nádrže navýšit minimálně o 7 %. Pro případ maximálního počtu sepnutí ERU 10/h by měla mít akumulární nádrž minimální objem 2,62 m³. Pro alternativní případ maximálního počtu sepnutí 5/h pak objem dvojnásobný, tedy 5,24 m³.

ERU – emission recovery unit = kompresorová jednotka na kompresi ucpávkového plynu z BK
N – normální vztažné stavové podmínky (teplota 0 °C, tlak 101,325 kPa)
PZP – podzemní zásobník plynu
STD – standardní vztažné stavové podmínky (teplota 15 °C, tlak 101,325 kPa)

7. Závěr

Aby bylo možné zpracovat úniky ucpávkového plynu ze dvou reciprokých pístových kompresorů v rozsahu 4 ÷ 80 m³/h (N), byl proveden výpočet objemu akumulární nádrže pomocí vztahů odvozených prostřednictvím matematické analýzy parametrů ERU pro kompresi ucpávkového plynu.

Pro jednu ERU s pístovým čtyřstupňovým kompresorem HAUG typ 44G 140-75-50-35 LM-L řady Sirius je pro pracovní rozsah tlaku v akumulární nádrži 1,1 až 1,8 bar(a) na základě výše uvedené analýzy pro maximální počet sepnutí možné doporučit instalaci jedné akumulární nádoby s minimálním („vodním“) objemem 2,62 m³.

Seznam použitých zkratk:

AC – vzduchový chladič
AKU – akumulární nádoba
BK – reciproký pístový kompresor pro kompresi skladovaného plynu

Odborná literatura:

1. Campbell J.M. – *Gas Conditioning and Processing, Vol.2: The Equipment Modules, 7th Ed.*, Campbell Publications 1992.
2. Manning F.S., Thompson R.E. – *Oilfield processing of petroleum, Volume one: natural gas*, PennWell Books 1991.
3. *Technická dokumentace ke kompresoru od firmy Haug Compressoren*, zaslaná p. P. Musilem z firmy YNNA, spol. s r. o. z února 2025.
4. Heumesser T. – *New Design of a completely oil-free high pressure compressor series with a power up to 110 kW and a maximum pressure of 450 barg*, 11th EFRC Conference Proceedings, 13-14th September 2018, Madrid.
5. ČSN EN ISO 12213-2 Zemní plyn – Výpočet kompresibilitního faktoru – Část 2: Výpočet z analýzy molárního složení, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 1. 2. 2010.



František Čapla (*2000)

Student třetího ročníku bakalářského studia na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy, kde se věnuje oborům fyzika a matematika se zaměřením na vzdělávání. Jeho studium směřuje k budoucí profesi učitele přírodovědných a matematických předmětů na střední škole.



Dr. Ing. Libor Čapla (*1969)

Vystudoval obor chemické a energetické zpracování paliv na VŠCHT Praha, kde do roku 2005 působil jako odborný asistent. Od roku 2006 pracoval ve firmách RWE Gas Storage, innogy Gas Storage, nyní Gas Storage CZ, a.s., kde se věnuje návrhům technických parametrů nadzemních technologií v rámci rozvojových projektů podzemních zásobníků plynu.