

# VYHODNOCOVÁNÍ ÚČINNOSTI VÝROBY STLAČENÉHO VZDUCHU

O. Sládek  
J. Šípál

**Článek představuje návrh diagnostického systému synergicky pracujících strojů a princip jeho funkce. Tento diagnostický systém je aplikován na provoz kompresorové stanice. Jeho hlavním cílem je rozpoznat vznik mimooptimálních provozních stavů, upozornit na ně provozovatele a předcházet tak poruchám strojů.**

## 1. Úvod

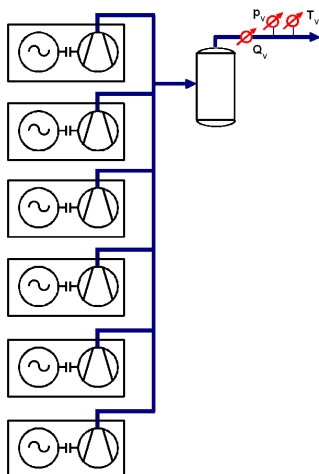
V současné době, kterou ovládá fenomén úsporu energie, jsme nuceni neustále zvyšovat efektivitu a snižovat energetickou náročnost veškeré výroby. Pro různé druhy výrobních technologií je zapotřebí zajistit dodávku stlačeného vzduchu, která patří mezi důležité podpůrné technologie. Ve většině případů se jedná o větší množství stlačeného vzduchu, které jsou vyráběny kompresorovou stanicí. Snahou provozovatele takové stanice je maximalizovat účinnost provozu a minimalizovat náklady na její provoz. To lze dosáhnout optimalizací sledování technického stavu pomocí moderních metod technické diagnostiky strojů.

Provoz každého stroje je charakterizován měřitelnými parametry, jako jsou teploty, vibrace, hluk, měrné spotřeby energie, výkonové i časové využívání stroje a jiné veličiny. Technická diagnostika využívá těchto naměřených hodnot, při sledování za určité období je schopna vyhodnotit stav daného stroje a o tomto stavu informovat provozovatele.

Popisovaný projekt ukazuje možnosti použití technické diagnostiky s presimulací v prostředí MATLAB-Simulink při provozu kompresorové stanice za pomoci některých naměřených veličin a sofistikovaných výpočtových algoritmů. Pro diagnostiku jednotlivých strojů kompresorové stanice je nutné kontinuálně měřit pro jednotlivé stroje proud, teplotu a tlak vzduchu vystupující z každého stroje i teplotu, tlak a průtok výstupního vzduchu z kompresorové stanice, měřit a zaznamenávat čas jednotlivých událostí. Všechny jmenované veličiny, které jsou obvykle k dispozici, jsou minimálním požadavkem pro navrhovaný diagnostický systém. Bude-li spektrum zaznamenávaných hodnot širší, funkce diagnostiky bude lepší.

Z naměřených veličin uspořádaných v časové řadě je pomocí algoritmů možné vyčíslit výkonové a časové využití jednotlivých kompresorů, měrné spotřeby energie, charakteristiky chodu naprázdno. Tyto veličiny, a především jejich trendová složka, popisují technický stav stroje. Tyto informace je pak možno předávat provozovateli pro optimalizaci preventivní údržby jednotlivých strojů. Vyhodnocující algoritmy jsou nasimulovány pomocí programového prostředí MATLAB - Simulink tak, aby změnou parametrů funkčních bloků byly aplikovatelné pro konkrétní kompresorovou stanici a bylo možno je implementovat do řídicího systému.

## 2. Konstrukce kompresorové stanice



Obr 1: Kompresorová stanice

Kompresorovou stanicí rozumíme veškeré zařízení pro výrobu stlačeného vzduchu. Obvykle se jedná o samostatný technologický soubor různých zařízení. Základními složkami jsou: sací díl, kompresory, sušící zařízení stlačeného vzduchu, vzdušníky, chladicí okruh, měření množství vyrobeného vzduchu rozvody elektro a MaR.

Sací díl zajišťuje čištění nasávaného vzduchu a zároveň izoluje vnější prostředí před nežádoucím hlukem z kompresorové stanice. Jedná se o zařízení bez nároků na vnější zdroj energie.

Chladicí zařízení se skládá s tepelných výměníků, okruhu chladicí kapaliny a čerpadel. Jeho úkolem je chladit části strojního zařízení a zároveň chlazením vzduchu během několika stupňového stlačování se přiblížíme k izotermické kompresi a tím se zvyšuje účinnost kompresoru. Soubor chladicího zařízení vyžaduje určitý podíl energie spotřebované při provozu kompresorové stanice. Množství dodané práce je závislé na množství vyrobeného vzduchu a především na vnější teplotě.

Stlačený vzduch je skladován v tlakových nádobách zvaných vzdušníky nebo větrníky. V těchto nádobách dochází k odvodnění vzduchu

a zároveň je zajištěna kapacita, která vyrovnává drobné výchylky v diagramu odběru. Toto zařízení nevyžaduje vnější zdroj energie. Výstup vzdušníků je připojen na centrální rozvod stlačeného vzduchu. V tomto výstupním dílu je měřicí zařízení, které měří množství vzduchu dodaného do rozvodu.

Měřicí zařízení je soubor jednotlivých dílčích měřidel a vyhodnocovacího členu. Pro vyhodnocování dodávky stlačeného plynu je nutné měřit průtok, teplotu a tlak dodávaného plynu. Ve vyhodnocovacím členu je potom prováděn přepočít na normované množství plynu pomocí stavové rovnice plynu. Vyhodnocovací člen bývá vybaven archivním a komunikačním modulem. Z hlediska spotřeby energie je potřeba pro tento člen počítat s určitou konstantní složkou spotřeby, která je však minoritní vůči ostatním zařízením. Nejpodstatnějším přínosem je možnost využívání naměřených dat pro další vyhodnocování.

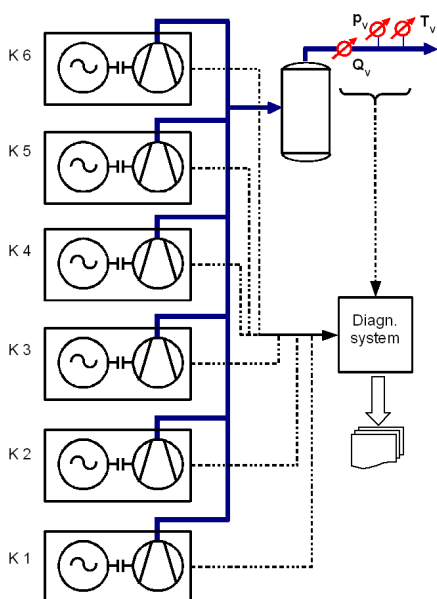
Základním technologickým zařízením jsou kompresory. Jedná se o pracovní stroje poháněné elektromotorem, provádějící stlačení nasávaného vzduchu na požadovanou úroveň. Pro náš případ není důležité o jaký typ kompresorů se konkrétně jedná. Z energetického hlediska kompresory spotřebovávají největší část energie potřebné pro provoz stanice. Podle důležitosti technologie a množství spotřebovávaného vzduchu je kompresorová stanice osazena potřebným počtem kompresorů. Vzhledem k rychlému opotřebování těsnících elementů je nutno provádět často pravidelnou údržbu. Pro zajištění zálohy i po dobu opravy je potřeba minimálně tří strojů. Větší stanice mívají 5, 7 i více strojů. Pravidelnou údržbu lze zajistit jedině v pravidelně se opakujících cyklech nebo po určitém počtu provozních hodin jednotlivých strojů.

Na schématickém obrázku č. 1 je nakreslena kompresorová stanice osazená šesti kompresory. V průběhu provozu jsou jednotlivé kompresory střídavě buď v provozu nebo odstaveny. Zátěž, odběr stlačeného vzduchu, se mezi jednotlivé stroje rozděluje tak, že provozované kompresory jsou střídavě zatěžovány. Během provozovaného období mohou nastat různé provozní stavy. Jedná se o provoz, odstávku zařízení a teplou zálohu, to znamená stroj je v provozu naprázdno a střídavým zatěžováním pokrývá špičky v odběrovém diagramu. Krátkodobě se mohou vyskytnout i speciální provozní stavy, jakými jsou zkoušení samotného elektromotoru, kdy pracovní stroj je odpojen a zkoušení silových vypínačů a ochran. Jedná se sice o ojedinělé případy, ale je nutné s nimi počítat.

### 3. Diagnostický systém

V průběhu provozu se různé provozní stavy střídají. V důsledku tohoto střídání provozovatel není schopen přesně určit, jak v daném období byly jednotlivé stroje zatěžovány, a tím jaké je jejich opotřebení. Z tohoto důvodu je navrhována instalace nového diagnostického systému pro kompresorovou stanici, který bude všechny provozní stavy přesně identifikovat a zaznamenávat do souboru archivních hodnot.

Funkce diagnostického systému spočívá ve sběru naměřených fyzikálních veličin. Naměřená data jsou přiřazena k časové ose a po aplikaci výpočtových algoritmů jsou k dispozici parametry charakterizující technický stav stroje.



Obr 2: Diagnostický systém

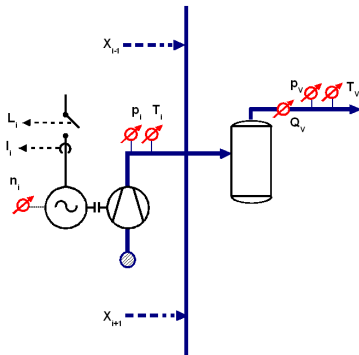
Schématický náčrt funkce diagnostického systému je na obrázku č. 2. Čím více informací je možno do diagnostického systému postoupit, tím lepší informaci o stavu zařízení získáme. Tento článek se zaměřuje na to, jakým způsobem zpracovávat minimální množství informací, které jsou snadno dostupné v každé stanici.

Tento diagnostický systém bude v maximální míře využívat stávající, případně doplněné hodnoty naměřených veličin.

Výstupem diagnostického systému budou tabelárně i graficky zpracované trendy jednotlivých diagnostikovaných veličin. K těmto datům bude mít provozovatel online přístup. Pokud dojde k překročení nastavených mezních hodnot bude provozovatel na tuto skutečnost upozorněn varovnou hláškou.

Cílem je přesně zdokumentovat chod jednotlivých strojů, o tomto chodu dát provozovateli kdykoliv informaci a zároveň při překročení limitních hodnot na tuto skutečnost provozovatele upozornit. Provozní údržba strojů se tak stane cílenou podle skutečných potřeb a zároveň bude využívání strojů posunuto k maximální hranici. Konečným důsledkem bude úspora nákladů. V budoucnosti by bylo možné tyto výpočtové algoritmy přímo implementovat do řídicích systémů kompresorových stanic.

## 4. Vstupy do navrhovaného diagnostického systému



Obr 3: Měřené veličiny

Důležitou podmínkou funkce diagnostického je měření stlačeného vzduchu na výstupu z kompresorové stanice. Pokud toto měření není z jakýchkoliv předchozích důvodů instalováno, bude nutné ho doplnit. Doplnění může spočívat v instalaci jednotlivých snímačů, průtoku, teploty a tlaku. Vyhodnocovací člen v tomto případě může být nahrazen implementací výpočtů do diagnostického systému.

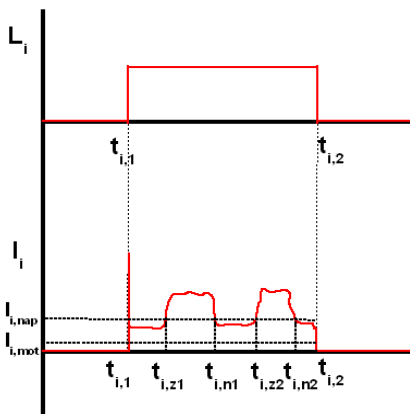
Dalšími položkami jsou měření na výstupech jednotlivých strojů a měření elektrického proudu elektromotoru. Z pomocných kontaktů silového vypínače je získána logická hodnota popisující stav tohoto vypínače.

Schématické znázornění měřených veličin na výstupu ze stanice a jednoho stroje je na obrázku č. 3, kde  $Q_v$ ,  $p_v$ ,  $T_v$  jsou naměřené hodnoty průtoku, tlaku a teploty výstupního vzduchu,  $T_i$ ,  $p_i$ ,  $I_i$  jsou naměřené hodnoty  $i$ -tého stroje, teplota, tlak stlačeného vzduchu na výstupu kompresoru a proud elektromotoru. Hodnota  $L_i$  je hodnota logické proměnné  $i$ -tého stroje, která informuje o stavu silového vypínače.

Všechny naměřené hodnoty se vztahují k časové ose.

## 5. Princip funkce diagnostického systému

U každého pracovního stroje, a kompresor není výjimkou, lze určit různé provozní stavy, jak bylo popsáno výše. Je potřeba, aby diagnostický systém rozlišil všechny provozní stavy, protože naměřené hodnoty v různých provozních stavech charakterizují různé parametry stavu stroje.



Obr 4: Průběh proudu elektromotoru

Všechny naměřené a získané hodnoty budou mít společnou časovou osu, která bude definičním oborem každé funkce. Odstavený stroj je charakterizován nulovým napájecím proudem elektromotoru a rozepnutým vypínačem. Sepnutím spínače dochází k rozběhu pohonu a nárůstu proudu. Sepnutí spínače bude signalizováno sepnutím pomocných kontaktů a jedná se o logickou hodnotu „ano“. Ke změně této logické hodnoty vždy v určitém časovém okamžiku dochází k pravidelnému střídání. Druhou kontrolní hodnotou je měření proudu hnacího elektromotoru. Proud elektromotorem nejprve prudce vzroste a potom začne klesat, když se otáčky motoru přibližují jmenovitým otáčkám. V případě přepínání zapojení hvězda-trojúhelník při rozběhu soustrojí vykazuje rozběhová charakteristika druhý nárůst proudu. Velikost naměřeného proudu je určující pro to, zda je stroj provozován naprázdno nebo při zatížení. Může nastat ještě jeden případ a to, že je zkoušen samostatný elektromotor bez pracovního stroje – kompresoru. Tento stav je charakterizován rychlým rozběhem,

velmi krátkým časovým úsekem k dosažení jmenovitých otáček, které jsou vyšší než otáčky soustrojí.

Na obrázku č. 4 je znázornění zjednodušených průběhů základních veličin. Po zapnutí v čase  $t_{i,1}$ , je tento čas indikován logickou proměnnou  $L_i$ , která dosáhne veličinu 1. Stroj se začne rozbíhat po určitém časovém okamžiku, skončí přechodový děj a proud elektromotorem se ustálí. Časová závislost proudu v grafu je rozdělena do tří pásem pomocí hodnot proudů  $I_{i,mot}$  a  $I_{i,nap}$ . První pásmo, kdy proud  $I_i$  je větší než 0 a menší než  $I_{i,mot}$  a současně hodnota  $L_i = 1$ , je oblast zkoušení samotného elektromotoru. Druhé pásmo, kdy  $I_i$  je větší než  $I_{i,mot}$  a menší než  $I_{i,nap}$ , je oblast chodu elektromotoru a pracovního stroje bez zatížení. Jedná se o pracovní režim, kdy je kompresor odlehčen. A třetí pásmo je pásmo zatížení kdy stroj dodává stlačený vzduch do systému. Přehledně jsou provozní stavy  $i$ -tého stroje znázorněny v následující tabulce

$L_i$	$I_i$	Provozní stav
0	$I_i = 0$	Stroj odstaven
1	$I_i = 0$	Zkouška vypínače
1	$I_i < I_{i,mot}$	Zkouška motoru
1	$I_i \in (I_{i,mot}; I_{i,nap})$	Provoz naprázdno
1	$I_i > I_{i,nap}$	Provoz se zátěží

Do vyhodnocovacího systému je zapotřebí zadat pro každý stroj následující konstanty:

$I_{i,mot}$  jmenovitý proud samotného motoru  
 $I_{i,nap}$  jmenovitý proud soustrojí naprázdno  
 $I_{i,zat}$  jmenovitý proud soustrojí při jmenovitém zatížení

Z naměřených hodnot jsou získány následující parametry pro každý stroj. Jako první lze získat v periodách týdenních nebo měsíčních uzávěrek hodnoty charakterizující dobu provozu. Jedná se o celkovou dobu provozu, dobu provozu naprázdno a při zatížení. V těchto periodických intervalech je možné vypočítávat časové využití kompresoru.

Běžný provoz kompresorové stanice je charakterizován tak, že jeden nebo několik kompresorů pracuje při zatížení. To ale nemusí znamenat, že jejich zatížení je na jmenovitý výkon. Další fungují jako záloha a zbytek je odstaven. Záloha představuje kompresory, které jsou v provozu a podle potřeby jsou automaticky zatěžovány tak, aby pokrývaly špičková zatížení odběrového diagramu. Stroje se během provozu cyklicky střídají.

Naměřený proud elektromotorem je průběžně rozdělován na složku proudu naprázdno a při zatížení. Proud naprázdno, který se nachází mezi časovými okamžiky  $t_{i,1}$  a  $t_{i,z1}$ ;  $t_{i,n1}$  a  $t_{i,z2}$  až  $t_{i,zj}$  až  $t_{i,n(j+1)}$ , je zaznamenáván také jako samostatná časová řada.

Pro časové intervaly, kdy je stroj zatížen, je na jednotlivých strojích průběžně počítán proudový rozdíl. Tento časový rozdíl bude sloužit jako rozdělovací parametr vyrobeného vzduchu.

$$\Delta I_i = I_i - I_{i,nap} \quad (1)$$

kde:  $I_i$  okamžitý proud  $i$  – tým elektromotorem  
 $I_{i,nap}$  nastavená konstanta – proud naprázdno  $i$ - tého elektromotoru  
 $\Delta I_i$  proudový rozdíl  $i$  – tého elektromotoru

Celkový vyrobený vzduch o objemu  $Q_v$  je kontinuálně měřen. Tato výroba stlačeného vzduchu je složena z příspěvků jednotlivých provozovaných kompresorů.

$$Q_v = \sum \Delta Q_v \quad (2)$$

Vyrobený stlačený vzduch je nutné rozdělit mezi jednotlivé stroje tak, aby platil vztah (2). Pro rozdělení lze použít poměrovou metodu. Stlačený vzduch vyrobený jedním strojem je potom vypočten podle následujícího vztahu.

$$Q_{vi} = \frac{Q_v \cdot \frac{p_v T_i \cdot K}{p_i T_v}}{\sum \Delta I_i} \cdot \Delta I_i \quad (3)$$

kde:  
 $Q_{vi}$  průtok výstupního vzduchu  $i$  – tého kompresoru  
 $Q_v$  průtok výstupního vzduchu  
 $p_v$  tlak výstupního vzduchu  
 $T_v$  teplota výstupního vzduchu  
 $p_i$  tlak výstupního vzduchu  $i$  – tého kompresoru  
 $T_i$  teplota výstupního vzduchu  $i$  – tého kompresoru  
 $K$  kompresní poměr

Takto získanou hodnotu použijeme pro výpočet celkové výroby na daném stroji. Z celkové výroby v určitém časovém intervalu můžeme vypočítat průměrný výkon a tento výkon porovnat se jmenovitým výkonem stroje. Výsledkem je výkonové využívání stroje. Dalším parametrem je vypočítaná měrná spotřeba elektrické energie na jeden vyrobený normometr krychlový. Archivováním časů spuštění, odstavení stroje a překračování v obou směrech nastavené konstantní hodnoty proudu naprázdno, lze určit časová období celkového chodu stroje, chodu při zatížení a vypočítat časové využití soustrojí.

Všechny výše uvedené hodnoty jsou průběžně počítány pro všechny stroje a zároveň ukládány jako časové řady.

## **6. Výstupy diagnostického systému**

Přímo měřené i vypočtené veličiny uložené ve formě datových řad jsou průběžně přepočítávány do hodinových, denních, měsíčních a ročních průměrů. Takto zpracované hodnoty jsou zobrazovány graficky i tabelárně a jsou použity pro výpočty trendů. Z těchto trendových veličin je možné diagnostikovat mimooptimální stavy strojů.

Například zvyšující se měrná spotřeba nám může ukazovat na sníženou těsnost těsnících elementů v jednotlivých strojích. Zvyšující se proud naprázdno zase signalizuje zvýšené tření strojních součástí, růst výstupní teploty zanášení chladících ploch atd.

Nastavením limitních hodnot různých veličin je možné formou varování uskutečnit upozorňování na nežádoucí provozní stavy v kompresorové stanici.

Další významnou hodnotou získanou ze systému bude vypovídající statistika o provozu a zatížení jednotlivých kompresorů.

## **7. Závěr**

Na provozní údržbu kompresorů je potřeba plánovat určitou kapacitu, případně prostoje a celá operace vyžaduje finanční náklady. Je nutné konstatovat, že údržbové cykly jsou obvykle stanoveny empiricky nebo na základě měření na zkušebně výrobce. Provozní podmínky se mohou lišit, dále nebývá zohledněna kvalita těsnících elementů a jiných součástí, které je nutno během opravy vyměnit. Tak mohou nastat dvě různé extrémní situace. Stroj je odstaven do opravy dříve než je potřeba a dochází k výměně dílů, jejichž kvalita je ještě vyhovující. Nebo naopak plánovaný údržbový interval je delší a dojde k poruše a následnému odstavení stroje. Předmětem projektu je optimalizační a diagnostický systém, který bude sledovat, vyhodnocovat, dokumentovat výrobu stlačeného vzduchu na jednotlivých strojích. Systém bude vyhodnocovat naměřená data, provádět jejich rozdělování na jednotlivé stroje a sledovat jejich postupné změny.

Příspěvek představuje model diagnostického systému vytvořeného v prostředí Simulink. Tento model umožnil vývoj výše popsaných algoritmů s možností zadávání určujících parametrů. Výhodou realizace modelu v prostředí Simulink, oproti vývoji na reálném zařízení je zejména to, že umožňuje rychlé odladění algoritmů a jejich parametrů pro různé provozní stavy bez toho, aby při odladování vznikaly nadbytečné náklady pro provozovatele kompresorové stanice. V další části pak článek představuje nejúspěšnější algoritmy pro vyhodnocování účinnosti výroby.

### **Poděkování**

Tento výzkum byl podpořen z prostředků na řešení programového projektu číslo FT-TA3/155 v programu „Tandem“ vyhlášeným Ministerstvem průmyslu a obchodu České republiky.