

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-68749

**REGULÁCIA KOMPRESORA NA REKOMPRIMOVANIE ODPLYNOV
DIPLOMOVÁ PRÁCA**

2014

Bc. Jana Andoková

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ TECHNOLOGIE**

REGULÁCIA KOMPRESORA NA REKOMPRIMOVANIE ODPLYNOV

DIPLOMOVÁ PRÁCA

FCHPT-5414-68749

Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve

Číslo študijného odboru: 2621

Názov študijného odboru: 5.2.14 automatizácia

Školiace pracovisko: ÚIAM, FCHPT, STU, Bratislava

Vedúci záverečnej práce/školiteľ: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

BRATISLAVA 2014

Bc. Jana Andoková



ZADANIE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Evidenčné číslo: FCHPT-5414-68749
ID študenta: 68749
Autorka práce: Bc. Jana Andoková (68749)
Študijný program: automatizácia a informatizácia v chémii a potravinárstve
Študijný odbor: 5.2.14 automatizácia
Vedúci práce: doc. Ing. Michal Kvasnica, PhD.

Názov témy: **Regulácia kompresora na rekomprimovanie odplynov**

Rozsah práce: 50

Špecifikácia zadania:

Cieľom práce je návrh riadiaceho systému pre reguláciu kompresora na rekomprimovanie odplynov. Čiastkové úlohy práce sú formulované nasledovne:

1. Výber vhodného kompresora
2. Návrh PID regulátora a analýza jeho vlastností
3. Návrh začlenenia PID regulátora do existujúcej technológie
4. Vytvorenie hybridného matematického modelu kompresora
5. Návrh a analýza prediktívneho regulátora
6. Návrh regulácia pri súčasnom chode 4 kompresorov - optimalizácia chodu z hľadiska efektivity, spoľahlivosti, životnosti a atď.

Zoznam odbornej literatúry:

1. KVASNICA, M. *Real-Time Model Predictive Control via Multi-Parametric Programming: Theory and Tools : Theory and Tools*. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. 231 s. ISBN 978-3-639-20644-9.

Dátum zadania diplomovej práce: **17. 02. 2014**

Termín odovzdania diplomovej práce: **24. 05. 2014**

Bc. Jana Andoková
študentka

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
vedúci pracoviska

prof. Ing. Miroslav Fikar, DrSc.
garant študijného programu

Chcela by som sa poďakovať môjmu vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Michalovi Kvasnicovi, PhD. a konzultantovi Ing. Gabrielovi Csibovi za pripomienky, cenné rady, ochotu a spoluprácu pri vypracovávaní diplomovej práce a za všetok ich čas, ktorý venovali konzultáciám.

Abstrakt

Predkladaná práca sa vo všeobecnosti zaoberá riadením a optimalizáciou chodu modelu rekompresnej stanice, pričom námet, rozloženie komponentov a parametre rekompresnej stanice prislúchajú reálnej rekompresnej stanici situovanej na pôde spoločnosti Slovnaft a.s. V úvode práce je veľmi stručne charakterizovaná hlavná úloha rekompresnej stanice - stláčanie zvyškového plynu z technológií a následné využitie tohto plynu v teplárni, zhodnotenie využívaných kompresorov v reálnej prevádzke. Jadrom práce je návrh regulátora, ktorý by bol schopný uregulovať daný systém. Jednou z možností návrhu regulátora je PID regulátor metódou umiestnenia pólov. Hlavnú časť práce tvorí návrh prediktívneho regulátora, ktorý je schopný optimalizácie, berúci do úvahy ohraničenia vychádzajúce z riadenia reálnej prevádzky. Súčasťou práce je definovanie optimalizačného problému, jeho implementácia. V závere práce sú zhodnotené výsledky riadenia pomocou prediktívneho regulátora v rôznych modelových a reálnych situáciách.

Kľúčové slová: rekompresná stanica; kompresor; optimalizácia; prediktívne riadenie

Abstract

Presented work generally deals with the control and operation optimization of recompression station model, while the theme, components layout and parameters of recompression station belong to the real recompression station situated on the property of Slovnaft a.s. The main task of the recompression station is briefly characterized in the introduction – compression of residual gas from technology and further use of this gas in the heating plant and evaluation of used compressors in the real plant. Core of the work is a design of the controller, which would be able to regulate given system. One of the design possibilities is the PID controller pole placement control design. Major part of the work is created by the predictive controller, which is taking into account limits based on the real plant control and is able to optimize them. The definition of the optimization problem and his implementation are part of this work. The results of control using predictive controller in various models and real situations are at the end of the work assessed.

Key words: recompression station; compressor; optimization; model predictive control

.

Obsah

<i>Zoznam skratiek a značiek</i>	<i>8</i>
<i>Zoznam ilustrácií a tabuliek</i>	<i>9</i>
<i>Úvod</i>	<i>12</i>
1 Charakteristika rekompresnej stanice	13
1.1 Poľné horáky	13
1.1.1 Prevádzkovanie poľných horákov	14
1.2 Rekompresná stanica	15
1.3 Kompresory	16
1.3.1 Podrobné rozdelenie kompresorov	16
1.3.2 Základné technické údaje kompresorov	19
1.3.3 Výber kompresora	19
2 Úvod do spätnoväzbového riadenia	21
2.1 Popis schémy využívanej pri riadení	22
2.2 Návrh regulátora pre riadenie jedného skrutkového kompresora	23
2.2.1 Zostavenie diskrétného stavového opisu	23
2.2.2 Priebehy riadenia	25
2.2.3 Zhodnotenie výsledkov	27
3 Úvod do prediktívneho riadenia	29
3.1 História prediktívneho riadenia	29
3.2 PID verz. MPC	30
3.3 Prediktívny regulátor	32
3.4 Konvexná optimalizácia	34
3.5 Ako riešiť optimalizačný problém	34

3.6	Matematické modely používané v prediktívnom riadení	35
3.7	Matematická formulácia optimalizačného problému	37
3.7.1	Účelová funkcia	37
3.7.2	Ohraničenia	38
3.8	Výstavba optimalizačného problému	39
3.8.1	Vystupujúce optimalizované premenné pri riadení kompresorov	39
3.8.2	Výkonové charakteristiky kompresorov	40
3.8.3	Formulácia účelovej funkcie pre riadenie štyroch kompresorov	42
3.8.4	Formulácia ohraničení pre riadenie chodu štyroch kompresorov	46
4	<i>Implementácia prediktívneho riadenia pre riadenie kompresorov v prostredí MATLAB pre rôzne modelové scenáre</i>	<i>50</i>
4.1	Modelová situácia 1	50
4.2	Modelová situácia 2	57
4.3	Modelová situácia 3	60
4.4	Modelová situácia 4	63
4.5	Modelová situácia 5	65
4.6	Modelová situácia 6	70
4.7	Záver výsledkov	74
	<i>Záver</i>	<i>75</i>
	<i>Zoznam použitej literatúry</i>	<i>76</i>
	<i>Prílohy.....</i>	<i>77</i>

Zoznam skratiek a značiek

σ_c – tlakový pomer

DMC – dynamic matrix control

e – regulačná odchýlka

EPSAC - extended prediction self-adaptive control

GPC - generalized predictive control

GVM – generalized minimum variance

H_2S – sírovodík

LQR – lineárny kvadratický regulátor

MAC – model algorithmic control

MATLAB – matrix laboratory

MIMO – multiple-input multiple-output, viacrozmerový vstupno-výstupný systém

MPC – model predictive control

MPHC – model predictive heuristic control

N – horizont predikcie

O_2 – kyslík

PBSTC - predictor-based self tuning control

QDMC – quadratic dynamic matrix control

$Q_{s,u,x}$ – rôzne váhové matice

r – porucha

T_s – perióda vzorkovania

u – akčný zásah

URO – uzavretý regulačný obvod

w - žiadaná výstupná veličina

y – aktuálny výstup

Zoznam ilustrácii a tabuliek

Obr. 1 Schéma cyrkulácie plynu medzi jednotlivými prevádzkami	13
Obr. 2 Rozdelenie objemových kompresorov	18
Obr. 3 Časti skrutkového kompresora	20
Obr. 4 Schéma uzavretého regulačného obvodu.....	21
Obr. 5 Upravená schéma rekompresnej stanice využívaná pri návrhu riadenia	22
Obr. 6 Grafické znázornenie zmeny objemu v zásobníku, generovaný akčný zásah regulátorom, hodnota poruchy, ktorá vchádza do zásobníka	26
Obr. 7 Odchýlkový model :Grafické znázornenie odchýlky objemu v zásobníku od referencie, generovaný akčný zásah regulátorom na príkon na kompresor, hodnota poruchovej veličiny, ktoré už nie je konštantná	27
Obr. 8 Schéma riadiacej slučky	31
Obr. 9 Grafická interpretácia metódy pohyblivého horizontu	33
Obr. 10 Diskretizácia v grafickom prevedení	35
Obr. 11 Lineárna výkonová charakteristika kompresora pri hodnote $\alpha = 0.17$	40
Obr. 12 Hybridná výkonová charakteristika kompresora pri hodnote $\alpha = 0.17$ s nutnosťou chodu kompresora na 10%, aby sa začal prečerpávať plyn	41
Obr. 13 Hybridná výkonová charakteristika s posunom v oboch smeroch pri hodnote $\alpha = 1.5$, nutnosť chodu kompresora na 10% na prekonanie fyzikálnych síl s nenulovým prečerpaným objemom	42
Obr. 14 Vývoj poruchy vstupujúcej do zásobníka.....	51
Obr. 15 Sledovanie skutočného objemu v zásobníku, pričom požadovaná referencia je 1m^3 ...	52
Obr. 16 Objemový tok plynu spálený na flérach, pričom spaľovanie je vysoko penalizované (viac ako penalizácia na nedodržania referencie)	53
Obr. 17 Objemový tok prečerpaný jednotlivými kompresormi, pričom všetky 4 kompresory sú úplne totožné.....	53
Obr. 18 Príkon na jednotlivé kompresory.....	54
Obr. 19 Hodnota skutočného objemu v zásobníku, pričom penalizácia za nedodržanie referencie je vyššia, ako penalizácia spaľovania	55

Obr. 20	Objemový tok plynu na spaľovanie, pričom spaľovanie je menej penalizované ako nedodržanie referencie	55
Obr. 21	Objemový tok plynu kompresormi bez ohraničení na ne.....	56
Obr. 22	Príkony na jednotlivé kompresory bez ohraničení	56
Obr. 23	Sledovanie objemu plynu v zásobníku, pričom sa na začiatku v zásobníku nachádzalo 2m^3 plynu, pričom referencia bola nastavená na hodnotu 1m^3 . zmena referencie nastala v $T = 50$ min. z hodnoty 1m^3 na 500m^3	58
Obr. 24	Objemový tok plynu odchádzajúci na spálenie na fléry pri skokovej zmene referencie v $T = 50\text{min}$	58
Obr. 25	Objemové toky skomprimované jednotlivými kompresormi pri skokovej zmene referencie v $T = 50$ min.....	59
Obr. 26	Príkony jednotlivých kompresorov pri skokovej zmene referencie v $T = 50\text{min}$	59
Obr. 27	Sledovanie objemu v zásobníku so známym výhľadom na požadovanú referenciu, pričom v zásobníku sa na začiatku nachádzali 2m^3 plynu, pričom referencia bola nastavená na hodnotu 1m^3 . zmena referencie nastala v $T = 50$ min. z hodnoty 1m^3 na 500m^3	61
Obr. 28	Sledovanie objemového prietoku odkloneného na fléry so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu.....	61
Obr. 29	Objemový tok prečerpaný jednotlivými kompresormi so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu.....	62
Obr. 30	Príkon na jednotlivé kompresory so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu	62
Obr. 31	Sledovanie referencie v zásobníku plynu pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií	63
Obr. 32	Objemový tok plynu spálený na flérach pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií.	64
Obr. 33	Objem stlačený kompresormi pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií .	64
Obr. 34	Príkon nakompresory pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií	65
Obr. 35	Sledovanie referencie pri ohraničeniach na maximálny a minimálny výkon kompresorov	67
Obr. 36	Spaľovanie na flérach pri ohraničeniach na maximálny a minimálny výkon kompresorov	68

Obr. 37 Výkon kompresorov pri ohraničeniach na maximálny a minimálny výkon kompresorov	68
Obr. 38 Príkon na kompresory pri ohraničeniach na maximálny a minimálny výkon kompresorov	69
Obr. 39 Sledovanie referencie pri vyššej penalizácii spaľovania plynu na flérach	70
Obr. 40 Sledovanie referencie v zásobníku pri snahe udržať konštantný chod kompresorov	71
Obr. 41 Spaľovanie na flérach pri snahe udržať konštantný chod kompresorov.....	72
Obr. 42 Objemový prietok kompresorov pri snahe udržať konštantný chod kompresorov	72
Obr. 43 Príkon kompresorov pri snahe udržať konštantný chod kompresorov	73

Úvod

V súčasnej dobe sa kladie obrovský dôraz na zlepšovanie. Zlepšovanie z hľadiska efektivity, kvality, zlepšovanie z hľadiska úspory, zlepšovanie z hľadiska maximalizácie ziskov. Zlepšovanie je jedna z hlavných schopností ako sa udržať na trhu a byť úspešným. A to platí vo všetkých fabrikách či výrobných podnikoch. Ak existujú procesy, ktoré na základe pozorovaní a posudkov vykazujú neefektívnosť, je nutné dôkladne preskúmať dôvody neefektívnosti a následne zvoliť čo možno najvhodnejší postup alebo metódu, ako dosiahnuť optimálnosť. To vedie k znižovaniu nákladov, zvýšením kvality a pružnosti daného podniku.

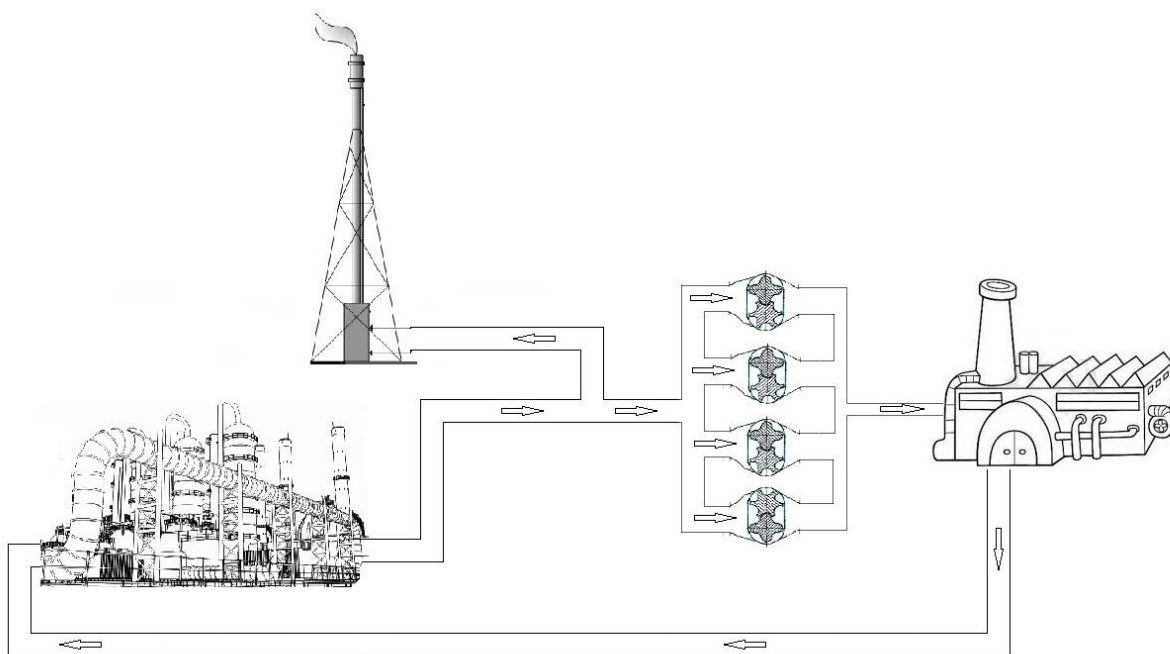
Táto práca je úvodom do problému riadenia a optimalizácie chodu rekompresnej stanice. Jedná sa o veľmi komplexnú výrobnú jednotku, ktorej cieľom je bezpečná likvidácia horľavých odpadových plynov z výrobných a expedičných jednotiek počas normálneho chodu výrobných jednotiek, pri nábehu, poruchách a v havarijných situáciách.

Najdôležitejšou súčasťou chodu rekompresnej stanice sú kompresory, ktoré zabezpečujú sťahovanie plynu a následne natlakovanie výtlačného potrubia tak, aby odpadové plyny mohli byť transportované do spaľovne a následne spálené. Teplo, ktoré vzniká pri spaľovaní je efektívne využívané v rafinérii.

V rafinérii sa nachádza niekoľko rekompresných staníc. V práci je rozobraná jedna z nich. Tvoria ju tri skrutkové kompresory, a k nim tento rok pribudol štvrtý, ktorý je charakteristický tým, že obsahuje frekvenčný menič. Cieľom práce je práve optimalizácia ich chodu z hľadiska efektivity, životnosti, pretože ekonomická náročnosť na ich prevádzku je vysoká. Akákoľvek úspora energie by bola teda veľmi vítaná.

1 Charakteristika rekompresnej stanice

Zjednodušená schéma rekompresnej stanice situovaná v spoločnosti Slovnaft a.s. je znázornená na nasledujúcom obrázku.



Obr. 1 Schéma cyrkulácie plynu medzi jednotlivými prevádzkami

Odpadové plyny prúdia potrubím z výrobných jednotiek rafinérie do rekompresnej stanice, kde sú následne stlačené kompresormi a transportované do teplárni, kde sa spaľujú. Toto teplo naspäť prúdi do rafinérie, kde je efektívne využívané. Plyny, ktoré nedokážu kompresory stlačiť, sú vedené do poľných horákov a následne spálené. Nasledovné kapitoly podrobne objasňujú fungovanie a princíp uvedenej schémy.

1.1 Poľné horáky

Funkciou poľných horákov je bezpečná likvidácia horľavých odpadových plynov z výrobných a expedičných jednotiek počas normálneho chodu výrobných jednotiek, pri nábehu, poruchách a pri havarijných situáciách.

Z pohľadu bilancovania sú všetky prúdy smerujúce na poľné horáky v plynnom ako aj v kvapalnom skupenstve charakterizované ako technologické straty.

Podľa obsahu sírovodíka v odplynch sú odplyny spaľované na poľných horákoch :

- uhl'ovodíkových (obsah sírovodíka do 0,5 mol %)
- sírnych (vysoký obsah sírovodíka)

Hlavné príčiny, ktoré nastávajú na výrobných a expedičných jednotkách a spôsobujú odpúšťanie rôznych uhl'ovodíkových zmesí do systému poľných horákov a rekompresných staníc :

- nestabilný technologický režim na výrobnej jednotke
- úprava, zmena technologického režimu
- havarijné odstavenie výrobnej jednotky, alebo jej častí z dôvodu poruchy na zariadení
- odstávka, príprava technologických zariadení do opráv a pre potrebu revíznej kontroly
- nábeh zariadení po opravách a revíziách, kompletný nábeh až do dosiahnutia požadovaných technologických parametrov výroby
- otvorenie poistných ventilov a iných zabezpečovacích systémov na zariadeniach výrobných jednotiek a potrubných rozvodov
- výpadok dodávky energií pre výrobné a expedičné jednotky

1.1.1 Prevádzkovanie poľných horákov

Odpadové plyny podľa obsahu sírovodíka z jednotlivých výrobných a expedičných jednotiek sú privádzané do odlučovača. V odlučovači sa všetká stuhnutá a vykondenzovaná kvapalina oddelí od prúdu plynu a čerpadlom sa vyčerpáva na opätovné spracovanie. Odpadové plyny vystupujúce z odlučovača prechádzajú cez nádobu vodného uzáveru na spálenie v poľných horákoch.

Nádoba vodného uzáveru každého poľného horáka je zabudovaná na spodku telesa poľného horáka a jej účelom je zabrániť prešľahnutiu plameňa z vrchu poľného horáka a tiež

zabrániť prieniku vzduchu pri náhlej zmene teploty systému poľného horáka a udržať v systéme poľného horáka mierny pretlak tak, aby do systému poľného horáka neprenikol vzduch. Výška hydrostatického stĺpca vo vodných uzáveroch býva 100 - 250 mm. Zvyčajne vodný uzáver je vybavený nepretržitým vstupom prúdu servisnej vody a rovnako odťahovaním uhl'ovodíkov z hladiny vody a hrdlom na prepád vody.

Pre udržanie mierneho pretlaku a pre zabránenie prieniku vzduchu do poľného horáka je do neho pridávaný zemný plyn, ktorý zaisťuje nepretržité prúdenie cez poľný horák. Pre zníženie množstva zemného plynu sú pod hlavicami poľných horákov zabudované rýchlostné výtokové uzávery. Každá hlavica uhl'ovodíkového poľného horáka býva vybavená štyrmi pilotnými horákmi. Pilotné horáky sa zapalujú pomocou zapal'ovacieho systému.

1.2 Rekompresná stanica

Funkciou rekompresných staníc je rekomprimovať odpadové plyny s nízkym obsahom sírovodíka (do 0,5 mol %) odpúšťané z výrobných a expedičných jednotiek v nehavarijných situáciách do odplynového systému poľných horákov. Zachytené plyny sa využívajú ako zložka paliva pre vykurovaciu sieť podniku.

Odpadové plyny prúdia do rekompresnej stanice cez existujúce zberné vedenia. V prepojovacom potrubí je zabudovaný oddeľovací ventil, ktorý je za normálnych okolností v otvorenej polohe. Ventil je uvádzaný do činnosti prepínačom vysokej teploty (nastaveným na 100 °C). Zavretie ventilu slúži na zabránenie prieniku horúcich plynov zo zariadení do rekompresnej stanice.

Zberné potrubie odpadového plynu do rekompresnej stanice je pripojené cez chladič rekompresie vstupného plynu. V chladiči dochádza k ochladeniu odpadových plynov z maximálnej teploty 100 °C na teplotu nižšiu ako 40 °C. Výstupný prúd z chladiča ide do odlučovača, kde sa oddelí vykondenzovaná kvapalina od plynu. Plyn prúdi do zberného potrubia sania jedného alebo niekoľkých identických kompresorov pracujúcich paralelne.

Požadovaný tlak na strane sania kompresorov je udržiavaný hydrostatickým stĺpcom vodných uzáverov systému poľných horákov. Na výstupe z kompresorov býva zabudovaný analyzátorový systém H_2S a O_2 , ktorý bude systém rafinárskeho vykurovacieho plynu chrániť pred náhodným znečistením H_2S a tiež kyslíkom.

1.3 Kompresory

Odbor venujúci sa stláčaniu plynov v modernom priemysle je veľmi dôležitý, pretože kompresory zasahujú takmer do všetkých odvetví ľudskej činnosti. Na pohon kompresorov sa v celosvetovom meradle vynakladá asi až 30 % celkovej spotreby elektrickej energie, s ktorou je nutné veľmi úsporne hospodáriť. Preto v poslednej dobe vznikajú nové typy strojov, stále je vylepšovaná ich konštrukcia, čo vedie k zlepšeniu energetických parametrov a zmysluplnému využívaniu privádzanej elektrickej energie.

Aj keď za prvý kompresor je uvádzaný ručne ovládaný mech z tretieho tisícročia pred našim letopočtom, prvý ležatý piestový kompresor s Hoerbigerovými ventilmi bol postavený až v roku 1894. O niekoľko rokov neskôr prišlo k priemyselnej výrobe turbokompresorov v Anglicku a Francúzsku, a tiež v roku 1907 v Škodových závodoch. Prvý prevádzky schopný skrutkový kompresor z roku 1934 bol postavený pričinením švédskeho inžiniera Alfréda Lysholma. Vývoj mazaných kompresorov začal až po roku 1959.

V súčasnosti je stlačený vzduch používaný na pohon pneumatických motorov a mechanizmov aj na priame použitie. V procesnom inžinierstve pripravujú kompresory plyny k chemickým reakciám a umožňujú ich dopravu na veľmi veľké vzdialenosti. Významné je využívanie kompresorov v chladiarenskej technike.

1.3.1 Podrobné rozdelenie kompresorov

Kompresory bývajú rôzneho prevedenia a usporiadania. Rozdeľujú sa najmä podľa:

- Stlačovaného média na kompresory vzduchové a plynové

- Počtu stupňov na stroje jednostupňové a viacstupňové
- Celkového tlakového pomeru σ_C na
 - dúchadlá $\sigma_C < 3$
 - nízkotlakové kompresory $\sigma_C = 3 \text{ až } 25$
 - strednotlakové kompresory $\sigma_C = 25 \text{ až } 100$
 - vysokotlakové kompresory $\sigma_C = 100 \text{ až } 300$
 - hyperkompresory $\sigma_C > 300$
- dosahovanej výkonnosti $\dot{V}_d [m^3 h^{-1}]$ na
 - malé kompresory $\dot{V}_d < 150$
 - stredné kompresory $\dot{V}_d = 150 \text{ až } 5000$
 - veľké kompresory $\dot{V}_d > 5000$

Kompresory môžeme ďalej rozdeliť na

- kompresory chladené vodou
- kompresory chladené vzduchom

Podľa spôsobu stláčania sa kompresory delia na

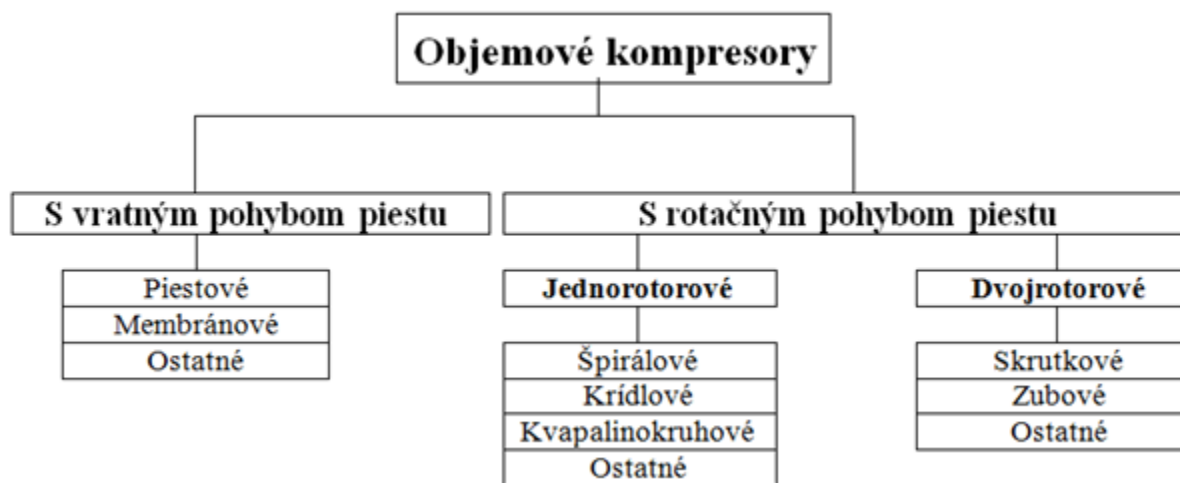
- objemové
- rýchlostné

V kompresoroch objemových s ventilovým rozvodom dochádza k zvýšeniu tlakovej energie zmenšením pracovného priestoru vo valci, v ktorom je plyn uzatvorený. Periodické zmeny objemu tohto priestoru sa dosahujú priamočiarym vratným pohybom piestov u kompresorov piestových, alebo preháňaním pružnej membrány u membránových kompresorov. Kompresory bez kľukového mechanizmu využívajúceho rotačný pohyb piestu sa nazývajú kompresory rotačné. Miesto ventilového rozvodu využívajú zjednodušené konštrukčné úpravy s pevne nastaveným konštantným, takzvaným "vstavaným" tlakovým pomerom. Vnútoraná kompresia je potom veľakrát sprevádzaná kompresiou vonkajšou, prebiehajúca až za výtlačným hrdlom kompresora.

U rýchlostných (dynamických) kompresorov (ktoré sa delia na lopatkové a prúdové) je pracovný priestor nemenný. Kinetická a z časti tlaková energia plynu sa zvyšuje v obežnom kolese. V statore za rotorom sa kinetická energia mení na tlakovú energiu. Podľa smeru pohybu plynu voči osi stroja sa rotačné lopatkové stroje delia na

- turbokompresory
 - radiálne
 - axiálne
 - diagonálne
- ejektory

Medzi základné časti prúdových kompresorov (ejektorov) patrí dýza, v ktorej dosahuje hnacia látka podkritickú či nadkritickú rýchlosť. Ďalej je to zmiešavacia komora, kde dochádza k miešaniu so stlačovaným plynom. Ako poslednú zo základných častí tvorí difúzor transformujúci kinetickú na tlakovú energiu.



Obr. 2 Rozdelenie objemových kompresorov

1.3.2 Základné technické údaje kompresorov

Technickými údajmi sú popísané vlastnosti a hlavné parametre strojov. Jedná sa o:

- celkový tlakový pomer
- výkonnosť piestového kompresora
- účinnosť kompresorov
- otáčky kompresora
- celkový príkon kompresora

S počtom stupňov úzko súvisia úmerne celkové prevádzkové náklady, ktoré sú samozrejme rozhodujúcim ekonomickým kritériom. Pre daný konečný tlak plynu za kompresorom je minimálny počet stupňov u objemových kompresoroch obmedzený prípustnými teplotami plynu vo valci. Investičné náklady takto navrhnutých kompresorov sú nižšie. Protikladom je drahší stroj s ekonomicky maximálnym prípustným počtom stupňov, pracujúci s najvyššou dosiahnuteľnou účinnosťou a menšou spotrebou energie. Pre optimálny počet stupňov s najmenšími celkovými prevádzkovými nákladmi sú u veľkých kompresorov s dlhodobou prevádzkou rozhodujúce náklady na energiu. Vývoj kompresorov, ako u všetkých strojov, smeruje k čo najvyšším otáčkam. Zvýšením otáčok možno pri rovnakej výkonnosti dosiahnuť ľahkú konštrukciu stroja, avšak životnosť strojných častí klesá. S ohľadom na zvyšujúce sa tepelné zaťaženie chladiacich plôch sa tiež znižuje účinnosť chladenia pracovného priestoru. Limitujúcim faktorom je aj nadmerný hluk. U piestových kompresorov vzrastajúce sily druhej mocninou otáčok, vyvolávajúce vibrácie sústavy stroj - pohon - základ. Platí to najmä pre veľké stroje. Dôsledky vysokých otáčok sa korigujú konštrukciou stroja.

1.3.3 Výber kompresora

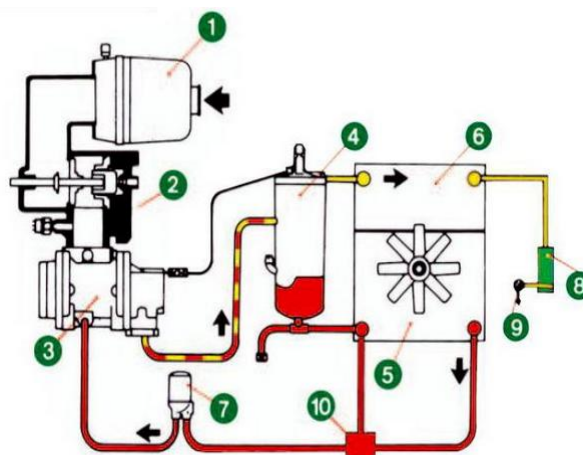
Moderné rotačné skrutkové kompresory vynikajú vysokou účinnosťou a dlhou životnosťou. Používajú sa v priemyslových prevádzkach. Ich veľkou výhodou oproti piestovým kompresorom je nízka hlučnosť.

Skrutkové kompresory mazané

sú jednoduchšie kompresory. Rotory mazaného skrutkového kompresora sa pri prevádzke navzájom odvaľujú a do sania je vstrekaný špeciálny olej. Ten má v priestore kompresorov tri funkcie. Zaisťuje priebežné mazanie skrutkových rotorov, aby pri ich odvaľovaní nedošlo k zadretiu. Ďalšou funkciou je vytesnenie minimálnej vôle medzi rotormi a tým podstatné zvýšenie objemovej účinnosti kompresora. Treťou funkciou je chladenie skrutkovej jednotky ale aj stlačeného vzduchu v pracovnom priestore kompresora, čím dochádza k zvýšeniu účinnosti. Na výstupe z kompresorovej jednotky je však zmes stlačeného vzduchu a značného množstva oleja. Preto je vždy na výtlaku umiestnený separátor oleja. Separátor oleja zvyčajne slúži ako olejová nádrž pre zásobu oleja. Pre vysoké pracovné teploty oleja a tiež pre obnovenie jeho chladiacej funkcie je vždy daný do systému stroja aj chladič oleja a dochladzovač stlačeného vzduchu. Pre zachytenie nečistôt v olejovej náplni je v kompresore umiestnený olejový filter. Na saní kompresora pred sacou klapkou je umiestnený vzduchový filter. Jeho úlohou je zabrániť nasatiu nečistôt do skrutkovej jednotky a zabrániť jej poškodeniu. Ventilátor slúži na zníženie teploty vo vnútri kompresora. Býva poháňaný z hlavného motora alebo má samostatný motor.

Princíp prevádzky skrutkového kompresora

1. Vstupný vzduchový filter
2. Vstupný ventil
3. Kompresorový blok - rotačný skrutkový
4. Separátor oleja / vzduchu
5. Chladič oleja
6. Dochladzovač vzduchu
7. Olejový filter
8. Odlučovač kondenzátu
9. Odvádzač kondenzátu
10. Teplotný ventil

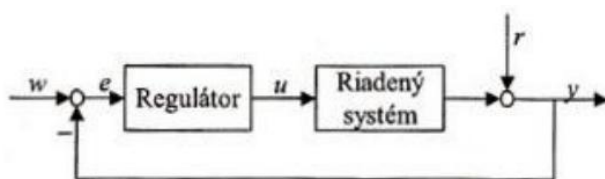


Obr. 3 Časti skrutkového kompresora

2 Úvod do spätnoväzbového riadenia

Spätnoväzbová regulácia je používaná v najrôznejších situáciách každodenného života, od jednoduchých domácich termostátov, ktoré udržuujú zadanú teplotu, až po zložité zariadenia, ktoré udržuujú pozíciu komunikačných satelitov. Spätnoväzbové riadenie sa tiež vyskytuje v prirodzených situáciách, napríklad pri regulácii hladiny krvného cukru v tele. Spätnoväzbové riadenie bolo dokonca použité pred viac ako 2000 rokmi Grékmi, ktorí vyrábali také systémy ako plavákový ventil, ktorý reguloval vodnú hladinu. Dnes sa rovnaká myšlienka používa pre kontrolu hladiny vody vo vodných nádržiach.

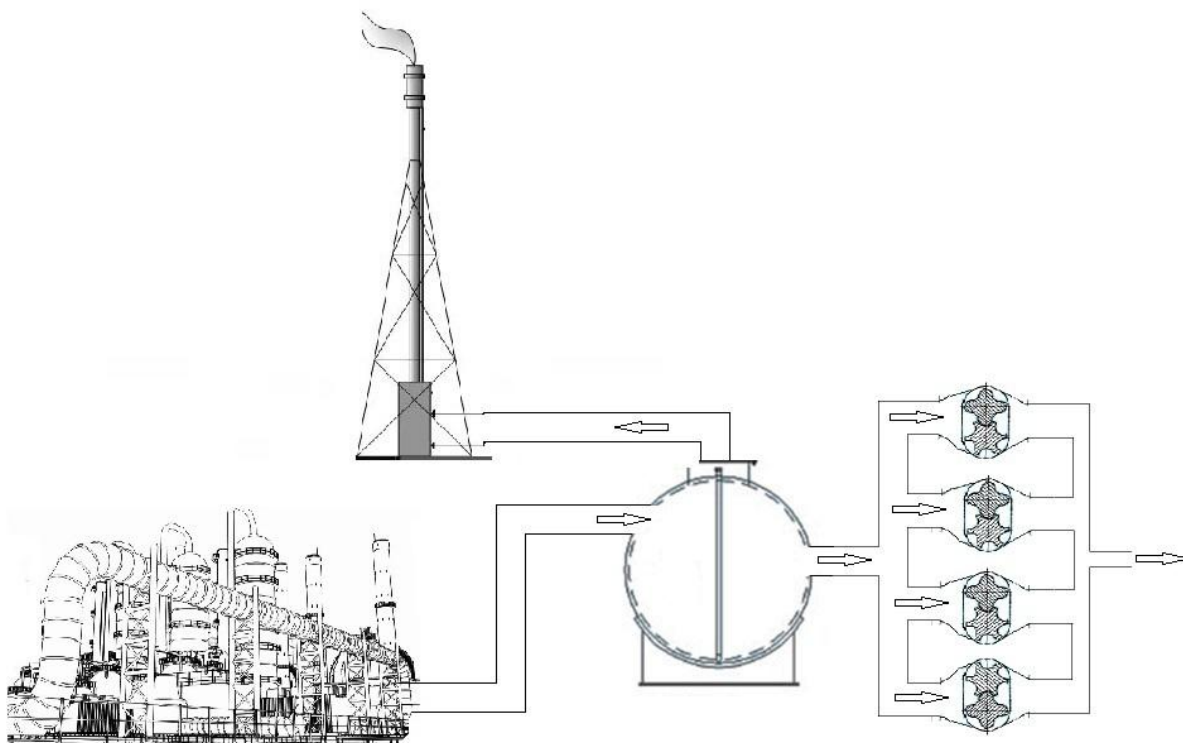
Vo väčšine prípadov, klasický prístup k riadeniu procesov je realizovaný pomocou PID regulácie. Fungovanie PID regulátora je založené na princípe porovnávania rozdielu medzi žiadanou výstupnou veličinou w a aktuálnym výstupom y . Výsledkom tohto rozdielu je regulačná odchýlka, označovaná ako e . Na základe regulačnej odchýlky je vypočítaný akčný zásah u . Akčný zásah vstupuje do riadeného systému. Jeho úlohou je priblížiť výstup z riadeného systému čo možno najbližšie k žiadanej veličine. Nakoľko sú riadené systémy zaťažené poruchami r , je nutné vziať ich do úvahy pri návrhu regulácie. Existujú metódy, pomocou ktorých vieme minimalizovať vplyv porúch na kvalitu riadenia. Takto popísaná riadiaca slučka sa v literatúre označuje pod pojmom uzavretý regulačný obvod (URO).



Obr. 4 Schéma uzavretého regulačného obvodu

2.1 Popis schémy využívanej pri riadení

Nasledujúca schéma síce úplne nezodpovedá reálnej rekompresnej stanici, ale je navrhnutá tak, aby sa optimalizačný problém stal ľahko pochopiteľným a tiež ľahko naformulovateľným. Pritom však nestrácame na reálnosti daného problému.



Obr. 5 Upravená schéma rekompresnej stanice využívaná pri návrhu riadenia

Už v úvode schémy sa nachádza zásobník, ktorý v reáli neexistuje. Tento fiktívny zásobník slúži len ako pomôcka na definovanie referencie.

Prúd plynu pritekajúci do zásobníka je zmesou rôznych druhov plynov, ktoré sú produktom, resp. nežiaducim, vedľajším produktom jednotlivých technológií pri spracovaní ropy. Ak by sme chceli sledovať entalpiu tohto toku plynu, bolo by to temer nemožné, pretože každou sekundou sa jeho zloženie, teplota, hustota veľmi menia. Z tohto dôvodu pri našom návrhu zanedbáme vnútornú charakteristiku tohto prúdu. Pre nás je len podstatnou informáciou to, že tento prúd vykazuje charakter poruchy. Jeho hodnoty sú neznáme a môžu dosahovať veľmi veľké výkyvy, nakoľko procesy, z ktorých plyny prichádzajú, môžu vykazovať v istých časových momentoch nepredvídateľné odchýlky oproti bežnému prevádzkovému chodu. Práve z

tohto dôvodu sme pred kompresory umiestnili fiktívny zásobník, do ktorého priteká prúd plynu. Budeme predpokladať, že chceme udržať konštantnú referenciu v zásobníku s tým, že objemový tok plynu vstupujúceho do zásobníka je poruchová veličina.

Ako bolo v úvode spomenuté, najdôležitejšou časťou rekompresnej stanice sú kompresory. Na danej prevádzke sa nachádzajú 4 objemové skrutkové kompresory, ktoré sú totožné z hľadiska množstva stlačeného plynu. Avšak jeden z nich je navrhnutý tak, aby mohol reagovať aj na malé zmeny v objeme prichádzajúceho plynu. Táto vlastnosť je zabezpečená pomocou frekvenčného meniča. Pri budovaní optimalizačného návrhu budú podrobne rozpísané výhody kompresora s frekvenčným meničom a to, prečo bolo potrebné zabudovanie práve tohto typu kompresora.

Pokiaľ nastane problém na prevádzke a daného plynu prichádzajúceho potrubím do rekompresnej stanice vzniká tak obrovské množstvo, že pri chode všetkých štyroch kompresorov nie je možné prichádzajúce množstvo plynu stlačiť, je nutné vyžívať fléry, resp. poľné horáky. Na poľných horákoch sa zvyškový prúd plynu jednoducho spáli. Nevýhodou je, že teplo takto spáleného plynu nie je možné využiť a tým môžeme hovoriť o stratách.

2.2 Návrh regulátora pre riadenie jedného skrutkového kompresora

V tejto časti bude navrhnutý regulátor pre riadenie jedného skrutkového kompresora pomocou metódy umiestnenie pólov. Už z názvu jednoznačne vyplýva, že bude nutné zvoliť vhodné póly zo stabilnej oblasti tak, aby nami navrhnutý regulátor dokázal splniť požiadavky a daný proces uregulovať. Riadenie reálnych zariadení prebieha v diskkrétnej časovej oblasti, preto celé riadenie bude navrhnuté diskkrétne.

2.2.1 Zostavenie diskkrétneho stavového opisu

Pri návrhu regulátora budeme uvažovať nasledujúci scenár. Cieľom riadenia je udržanie konštantnej hodnoty objemu plynu v zásobníku. Do zásobníka priteká prúd plynu, ktorého

hodnota nie je známa. Preto tento prúd plynu budeme považovať za nemerateľnú poruchu. Radiacou veličinou v tomto prípade bude jeden skrutkový kompresor resp. príkon naň.

Stavový opis v diskretnom tvare pre takto definovaný problém vyzerá nasledovne.

$$V^+ = V + q_{in} - f(e) \quad (2.1)$$

pričom

V - objem plynu v zásobníku v terajšom kroku [m^3]

V^+ - objem plynu v zásobníku v nasledujúcom kroku predikcie [m^3]

q_{in} - vstupný prietok plynu [m^3/min]

$f(e)$ - výkonová charakteristika kompresora

Pomocou známych označení pre stavy, akčné zásahy a poruchu vieme tento model prepísať nasledovne

$$x^+ = x - \alpha u + w \quad (2.2)$$

pričom

x - stav (objem plynu v zásobníku) v terajšom kroku predikcie

x^+ - stav v nasledujúcom kroku predikcie

α - konštanta lineárnej závislosti (uvažujeme lineárnu výkonovú charakteristiku kompresora)

u - akčný zásah na príkon kompresora

w - porucha- vstupný prietok

Prenosová funkcia pri zvolenej perióde vzorkovania 1minút a $\alpha = 0.5$ má tvar

$$Gz = \frac{b}{a} = \frac{-0.5 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (2.3)$$

Pri výpočte parametrov regulátora sa využíva skalárna lineárna polynomickeá rovnica - diofantická rovnica. Nakoľko sa v systéme nachádza porucha, je nutné navrhnuť regulátor s integračnou činnosťou. Diofantická rovnica preto nadobúda tvar:

$$aFp + bq = c \quad (2.4)$$

pričom

a - menovateľ prenosovej funkcie

b - čitateľ prenosovej funkcie

F - integrátor, zabezpečenie asymptotickej stability, jeho hodnota je $1 - z^{-1}$

c - je stabilný polynóm

q - čitateľ prenosu regulátora

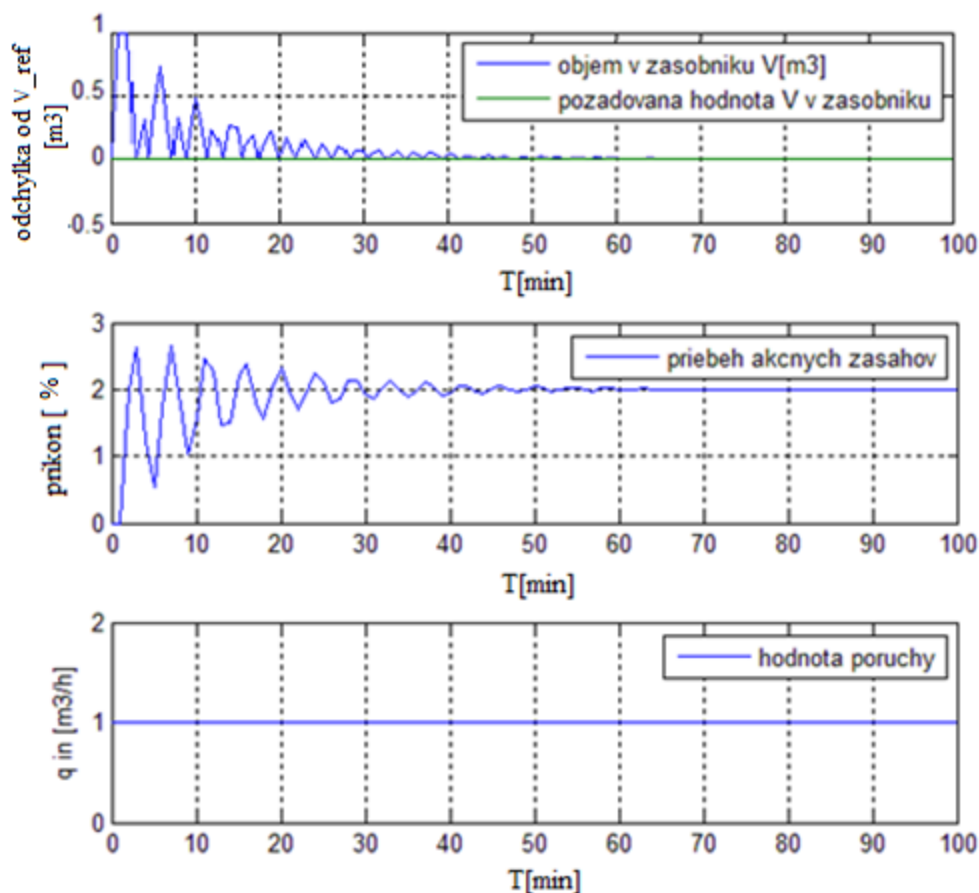
p - menovateľ prenosu regulátora

Riešením diofantickéj rovnice a zvolením pólov zo stabilnej oblasti získavame parametre prenosu regulátora v tvare

$$G_R = \frac{q}{pF} = \frac{-1.98 + 1.43z^{-1}}{(1 - 0.04z^{-1})(1 - z^{-1})} \quad (2.5)$$

2.2.2 Priebehy riadenia

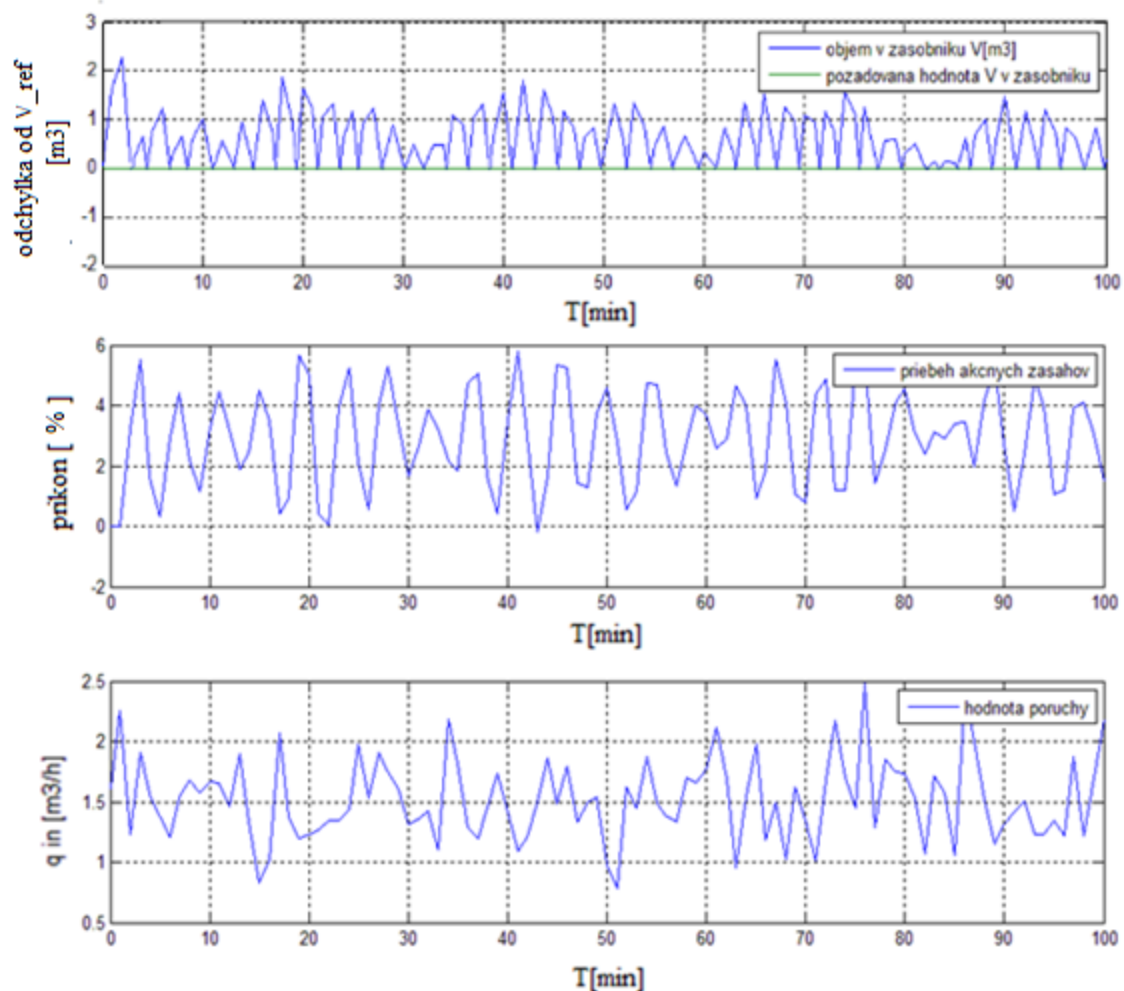
Navrhnutý regulátor z predchádzajúcej kapitoly implementujeme do spätnoväzbového riadenia.



Obr. 6 Grafické znázornenie zmeny objemu v zásobníku, generovaný akčný zásah regulátorom, hodnota poruchy, ktorá vchádza do zásobníka

Objem plynu v zásobníku chceme udržať na referenčnej hodnote 0. Z prvého z grafov je viditeľné, že objem plynu nadobudne požadovanú hodnotu v $T = 60$ min. Akčné zásahy sú veľmi agresívne a to nemá pozitívny vplyv na životnosť kompresorov. Toto všetko sa deje, ak predpokladáme, že porucha do systému je konštantná.

V reálnych situáciách je temer nemožné, aby porucha bola konštantná. A už vôbec nie, keď sa jedná o chemické technológie, pri ktorých aj veľmi malá zmena stavu môže výrazne zmeniť priebeh reakcii a tým výstupy z nej. Plyn prichádzajúci z technológií veľmi kolíše. Preto v nasledujúcej časti budeme predpokladať nekonštantnú poruchu.



Obr. 7 Odchýlkový model: Grafické znázornenie odchýlky objemu v zásobníku od referencie, generovaný akčný zásah regulátorom na príkon na kompresor, hodnota poruchovej veličiny, ktoré už nie je konštantná

Na prvom z uvedených grafov je jasne viditeľné, že pri výskyte nekonštantnej poruchy regulátor nedokáže svojimi vygenerovanými akčnými zásahmi dosiahnuť požadovanú hodnotu objemu v zásobníku. Akčné zásahy sú veľmi agresívne a pokiaľ by regulácia bola nastavená nasledovne, životnosť kompresora by bola veľmi nízka.

2.2.3 Zhodnotenie výsledkov

Z uvedených výsledkov môžeme konštatovať, že len s veľmi veľkým úsilím by sme možno dokázali navrhnúť také spätnoväzbové riadenie, ktoré by dokázalo daný proces uradiť.

Avšak bez akejkol'vek záruky, že sa nám niečo také vôbec podarí. Nakoľko sa však jedná o reálny proces, v ktorom figurujú technické parametre zariadení, ohraničenia na ne, nikdy by sme s pomocou PID nedosiahli riadenie implementovateľné v reálnej prevádzke. Cieľom tejto práce nie je silou mocou navrhnuť PID regulátor, nad ktorého návrhom by sme strávili desiatky hodín, ale navrhnuť riadenie, ktoré by nám dalo záruku toho, že na konci celej našej snahy dosiahneme požadované výsledky.

Existuje prístup k riadeniu, ktorý dokáže splniť akúkoľvek požiadavku, akékoľvek ohraničenia, a to všetko pri minimalizácii nákladov, maximalizácii ziskov. A to všetko za garancie toho, že dospejeme k cieľu tou najoptimálnejšou cestou. Reč nie je o ničom inom, ako prediktívnom riadení.

3 Úvod do prediktívneho riadenia

V súčasnosti je prediktívne riadenie najvyspelejším optimálnym spôsobom riadenia, pričom hlavný cieľ je rovnaký ako v klasickom riadení. Týmto spoločným cieľom je riadiť zariadenie, resp. riadiť nejaký systém. Tento systém chceme riadiť tak, aby jeho výstupy sledovali žiadanú hodnotu. Na to, aby výstup dosiahol žiadanú hodnotu, potrebujeme ovplyvňovať vstupy do tohto systému - akčné zásahy. A práve tieto akčné zásahy sú generované regulátorom, ktorý jednak berie do úvahy referenciu (žiadanú hodnotu stavu systému) a taktiež spätnoväzbovú informáciu, kde snímame parametre riadneho systému (stavy, výstupy).

3.1 História prediktívneho riadenia

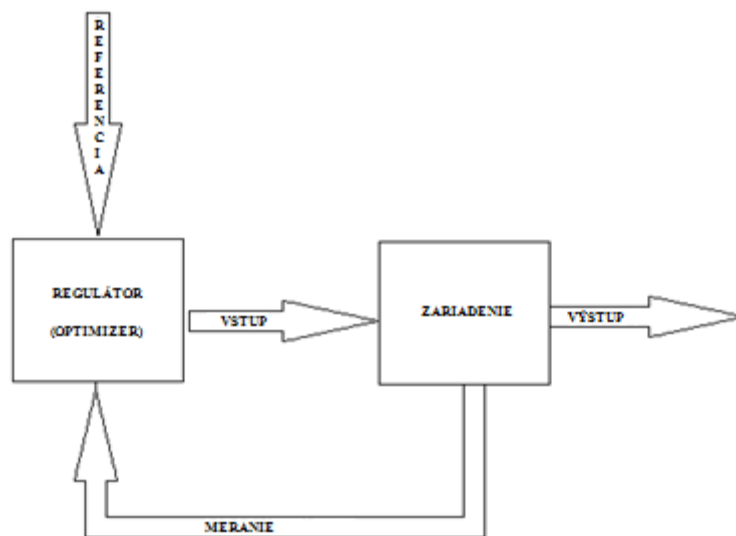
MPC malo za posledných 15 rokov enormný prínos pre procesný priemysel. Je to efektívny nástroj pre prácu s úlohami, ktoré obsahujú obmedzenia s viacerými premennými a správy z priemyselných aplikácií taktiež potvrdzujú jeho popularitu.

Vývoj MPC možno sledovať až do práce Kalmana v skorých 60-tych rokoch na lineárnom kvadratickom regulátore (LQR), ktorý navrhol na minimalizáciu neohraničenej kvadratickej účelovej funkcie stavov a vstupov. Nekonečný predikčný horizont odkazoval na LQR algoritmus so silnými stabilizujúcimi vlastnosťami. Avšak mal malý vplyv na vývoj technológie riadenia v procesnom priemysle. Dôvod na toto spočíva v absencii obmedzení vo formulácii, nelinearitách reálneho systému a predovšetkým celej kultúry komunity priemyselného procesného riadenia v období, v ktorom vývojári zariadení a procesní inžinieri buď nemali žiadne skúsenosti s konceptom optimálneho riadenia alebo ho považovali za nepraktický. Preto predkladatelia MPC pre procesné riadenie postupovali nezávisle a sústredili sa len na požiadavky priemyslu. Na konci 70-tych rokov niekoľko publikácií oznámilo úspešnú aplikáciu MPC v priemysle, hlavne tie od Richaleta (1978), ktoré predstavili MPHC (MAC) a tie od Cutlera a Ramakera (1980) predstavujúce DMC. Spoločnou témou týchto stratégií bola idea použitia dynamického modelu procesu (impulznej odozvy v predošlom a skoková v nasledujúcom) na predikciu účinku budúcich zásahov riadenia, ktoré boli odhadované

minimalizáciou predikčnej chyby vzhľadom na operačné obmedzenia. Optimalizácia sa opakovala v každej perióde vzorkovania s aktualizovanými informáciami o procese. Tieto formulácie boli algoritmické i heuristické a využívali výhody digitálnych zariadení tej doby. Stabilita sa nevenovali teoreticky a počiatočné verzie MPC neboli automaticky stabilizujúce, avšak sústredení sa na stabilné zariadenia a výberom dostatočne veľkého predikčného horizontu vzhľadom na čas ustálenia zariadenia sa dosiahla stabilita po nastavení váh pokutovej funkcie. Neskôr, druhá generácia MPC akou je QDMC (Garcia, Morshedi, 1986) využívala kvadratické programovanie na riešenie otvorených optimalizačných úloh s obmedzeniami, v ktorých je systém lineárny, pokutová funkcia kvadratická a riadiace a stavové obmedzenia sú definované lineárnymi nerovnosťami. Iný rad prác vyvstal nezávisle okolo adaptívneho riadenia vývojom stratégií potrebných pre procesy s jednou premennou formulované prenosovými modelmi (na ktoré je potrebné menej parametrov pre identifikáciu modelu) a diofantická rovnica sa použila na výpočet budúceho vstupu. Prvý podnet prišiel od Atrona (1970) s minimálnym odchýlkovým riadením, kde výkonnostný index musel byť minimalizovaný kvadratickou funkciou chyby medzi posledným výstupom a referenciou (ak predikčný horizont je = 1). Preto ak sme chceli pracovať s neminimálne fázovými zariadeniami, do cieľovej funkcie bol vložený penalizovaný vstup a toto sa stalo GVM riadením. Na prekonanie limitácií horizontu, Peterka (1984) vyvinul PBSTC. EPSAC od DeKeysera a kol. (1985) navrhlo konštantný riadiaci signál začínajúci v práve prebiehajúcej chvíli, pričom bude používať sub-optimálny pozorovač namiesto riešenia diofantickej rovnice. Neskôr bol vstup vymenený za inkrementáciu riadiaceho signálu na garanciu nulovej odchýlky v ustálenom stave. Na základe úvah z GVM, Clarke a kol. (1987) vyvinuli GPC, ktoré je dnes jednou z najpopulárnejších metód. Uzavretá forma pre GPC bola predstavená Soeterboekom. Vyvinuli sa takisto GPC verzie bez ohraničení.

3.2 PID verz. MPC

Všeobecné zapojenie slučky charakteristické pre riadenie je viditeľné na nasledovnom obrázku. Ide o klasický obvod so spätnou väzbou, kde regulátor môže byť navrhnutý rôznymi metódami (PID, MPC atď.)



Obr. 8 Schéma riadiacej slučky

Nato, aby sme mohli riadiť nejaký objekt, potrebujeme v prvom rade poznať riadený systém, to znamená, musíme vedieť ako vyzerá, ako sa správa, aké ma vlastnosti. (t.j. model systému). V bežných reálnych procesoch majú riadené systémy viacero vstupov a viacero výstupov (MIMO).

Druhou črtou takéhoto riadeného systému sú jeho nelinearity. Nelinearity sú súčasťou temer každého riadeného procesu. Štandardným spôsobom ako sa s týmito nelinearitami vysporiadať, je ich linearizácia. Nevýhodou, ktorá pri linearizácii vyniká, je platnosť linearizácie len v blízkom okolí linearizačného bodu, z čoho vyplýva strata presnosti aproximácie reálneho systému lineárnym modelom. Ak sa pohneme ďalej od linearizačného bodu, strácame presnosť modelu.

Na čo sa však kladie najmenší dôraz a často sa doslova zanedbáva sú ohraničenia. Ako príklad môžeme uviesť zásobník kvapaliny, ktorého prietok je regulovaný regulačným ventilom. Je jasné, že regulačný ventil môže byť otvorený minimálne na 0% a maximálne na 100%. Avšak regulátor to nevie, pokiaľ mu to nezadáme. Ohraničenia pre PID regulátor nevieme priamo zadávať. Preto sa často v praxi stáva, že zariadenie nie je schopné splniť a tak dosiahnuť požadovanú hodnotu. Táto situácia nastala v kapitole 2.

Ako vyplýva z predchádzajúceho textu, ohraničenia sú len veľmi ťažko aplikovaným aspektom v klasickej teórii riadenia. Preto najväčšou výhodou prediktívneho riadenia je schopnosť vysporiadať sa s ohraničeniami. Tým sa v najväčšej miere odlišuje od klasického riadenia.

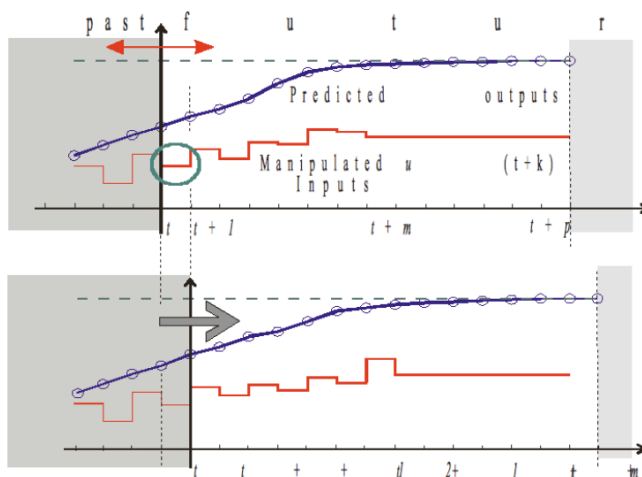
Vysporiadanie sa s ohraničeniami nie je jedinou výhodou oproti klasickému riadeniu. V prediktívnom riadení môžeme brať do úvahy aj nasledovné aspekty:

- vysporiadanie sa s viacerými vstupmi a viacerými výstupmi
- bezpečnosť, ktorá je úzko spätá s ohraničeniami
- optimálne riadenie - optimalizovať správanie sa riadeného systému, pozorovať vzťah medzi profilmi, cenami jednotlivých látok, priamo do návrhu riadenia vieme zaradiť minimalizáciu spotreby paliva, maximalizáciu zisku a pod - optimalizácia zisku
- ladenie za behu v zmysle, že nechceme mať regulátor, ktorý pri ladení musíme vypnúť, zobrať ho do laboratória, prerobiť a vrátiť ho späť. Toto všetko si žiada vypnutie určitého bloku prevádzky a tým sa zvyšujú náklady, resp. sa znižuje zisk. Preto chceme mať regulátor, ktorý by bol laditeľný za behu, to znamená minimalizáciu náročnosti na jeho ovládanie.
- implementácia v reálnej prevádzke - nakoľko výpočet je veľmi zložitý (ohraničenia, maximalizácia/minimalizácia), pri návrhu riadenia sa musia zohľadniť možnosti hardwera, aký máme k dispozícii (fyzikálne možnosti). Preto zložky, ktoré vplývajú na zložitosť, treba minimalizovať, resp. ich nahradiť jednoduchšími.

3.3 Prediktívny regulátor

Prediktívny regulátor je reprezentovaný blokom, ktorý rieši optimalizačný problém. Najdôležitejšou súčasťou je, že obsahuje v sebe predikciu. Vysvetlenie je veľmi jednoduché. Sme v súčasnosti, poznáme model systému a jeho parametre, taktiež poznáme stavy systému a na základe matematického modelu vieme spraviť predikciu vývoja toho systému do budúcnosti. Dôležitým parametrom je tu horizont predikcie – N , ktorý udáva počet krokov predikcie pre daný optimalizačný problém, t.j. udáva ako ďaleko do budúcnosti sa vykoná predikcia. V

každom kroku, definovanom pomocou periódy vzorkovania T_s (dĺžka kroku) riešime opakovane optimalizačný problém a predikujeme budúce stavy a akčné zásahy na danom horizonte predikcie N , avšak do systému vždy aplikujeme len prvý akčný zásah vygenerovaný prediktívnym regulátorom. Ostatné zahodíme a v ďalšom kroku riešime optimalizačný problém nanovo. Toto sa v literatúre označuje ako metóda pohyblivého horizontu.



Obr. 9 Grafická interpretácia metódy pohyblivého horizontu

Akčné zásahy, opísané optimalizačným problémom, potrebujeme opakovane riešiť v každej perióde vzorkovania. Avšak riešenie optimalizačného problému je zdĺhavé. V procesoch s pomalou dynamikou zdĺhavosť riešenia optimalizačného problému nezohráva dôležitú úlohu, nakoľko akčné zásahy sa vykonávajú na dlhých periódach. Inak povedané, časové konštanty týchto procesov sa rádovo pohybujú v hodinách. To znamená, že máme dostatok času na vygenerovanie optimálneho akčného zásahu. Problém nastáva pri riadení procesov s rýchlou dynamikou napr. v mechanických systémoch, kde časové konštanty týchto procesov sa pohybujú rádovo v milisekundách. Za každú milisekundu musíme vyriešiť optimalizačný problém. A tu nastáva problém. V takýchto prípadoch nie je možné použiť prediktívny regulátor v optimálnej forme, resp. kvôli časovému ohraničeniu sa stráca kvalita optimalizácie. A toto je najvýraznejšia nevýhoda prediktívneho riadenia. Čím je optimalizačný problém zložitejší, tým dlhšie sa uskutočňuje výpočet a dochádza k porušeniu časového ohraničenia, ktoré potrebujeme dodržať. Aj keď na prvý pohľad sa zdá táto nevýhoda veľmi závažnou a obmedzujúcou, na druhej strane

sú metódy, pomocou ktorých vieme optimalizačný problém pretransformovať na jednoduchší, a tým časovo menej náročný. Jedná sa o konvexnú optimalizáciu.

3.4 Konvexná optimalizácia

Jednou z možností ako naformulovať optimalizačný problém je formulácia v tvare konvexného optimalizačného problému. Ak sa dá niečo formulovať ako konvexný optimalizačný problém, znamená to, že je to ľahko riešiteľné. Ak to nie je možné, môžeme predpokladať, že snaha optimalizovať daný problém v perióde vzorkovania je len veľmi málo pravdepodobná. V praxi však existujú prístupy nekonvexnosti, ktoré sa dajú implementovať. Je to veľmi zriedkavý stav, implementovateľný len vo veľmi špeciálnych prípadoch.

Ak vieme problém formulovať ako konvexný, vyplývajúce výhody sú nasledovné:

- možnosť, ako riešiť konvexný problém je veľmi prebádaná teoretická oblasť. V tomto prípade možno s istotou povedať, že nájdeme globálne optimum a zároveň toto riešenie garantuje nájdenie najlepšieho bodu.
- máme teoretické metódy, a máme istotu, že iteráciou dosiahneme stav konverencie
- vznikajú prirodzene v inžinierskych problémoch
- máme k dispozícii veľké množstvo software, ktoré ich dokážu dobre riešiť - úlohy obrovských rozmerov, čas riešenia vzhľadom na veľkosť problému je priaznivé

3.5 Ako riešiť optimalizačný problém

Yalmip je software-ový nástroj, ktorý dovoľuje formulovať a následne riešiť optimalizačný problém pomocou externých solvrov. Optimalizačný problém pretransformuje na takú reprezentáciu, ktorá je potom akceptovaná pre solvre, ktoré daný optimalizačný problém riešia.

Pri teoretickom návrhu sa najčastejšie uvažujú tri typy predikčných modelov:

- lineárne modely (prenosová funkcia, stavový opis)

- nelineárne modely (stavový opis, modely reprezentované fuzzy alebo neurónovými sieťami)
- hybridné modely (kombinácia spojitej a diskkrétnej logiky)

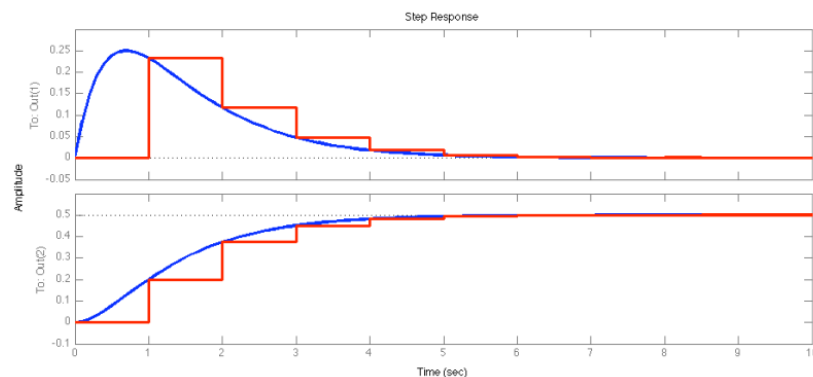
Medzi najčastejšie používané triedy predikčných modelov patria lineárne modely v diskrétnom čase vyjadrené pomocou stavovej reprezentácie. Lineárny systém nám zabezpečuje konvexný optimalizačný problém, vieme ho riešiť jednoducho so zárukou nájdenia globálneho optima.

3.6 Matematické modely používané v prediktívnom riadení

Aby sme mohli úspešne implementovať prediktívne riadenie, je nutné poznať čo najpresnejšie model reálneho systému. Pokiaľ by došlo k odchýlkam medzi modelom a reálnym systémom, spätná väzba využívaná v prediktívnom riadení dokáže tieto malé odchýlky eliminovať. Ako je už v predchádzajúcom texte uvedené, dôležité je pracovať s diskrétnym matematickým modelom, pretože implementácia prebieha v diskkrétnej časovej oblasti. Čím bude perióda vzorkovania menšia, tým presnejšie kopírujeme prechodovú funkciu.

Najvyužívanejším modelom na opis dynamiky je stavový lineárny vstupno-výstupný model samozrejme v diskrétnom stave.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad \rightarrow \quad x(t + \Delta t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t)$$



Obr. 10 Diskretizácia v grafickom prevedení

Jeho obrovskou výhodou oproti ostatným modelom je, že dokáže opísať systémy s viacerými vstupmi a výstupmi (MIMO systems). Aj keď priamo pomocou tohto modelu nevieme sledovať vývoj stavov, existujú metódy (návrh pozorovača stavov - Kalmanov filter), pomocou ktorých sme schopní docieľiť sledovanie požadovaných stavov.

Lineárny vstupno-výstupný model vieme formálne zapísať vo vektorom tvare nasledovne:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (3.1)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k \quad (3.2)$$

Rovnicu (3.1) nazývame rovnicou dynamiky. Zachytáva prepojenie stavových veličín medzi ich aktuálnymi a budúcimi hodnotami. Vektor stavových premenných v ďalšej perióde vzorkovania je označený symbolom x_{k+1} . Matica A predstavuje koeficienty stavových premenných x_k v terajšej (aktuálnej) perióde vzorkovania. Matica B udáva koeficienty vektora akčných zásahov - u_k .

Druhá z rovníc, nazývaná rovnicou výstupu, spája aktuálnu hodnotu vektora výstupných veličín y_k a terajšou hodnotou x_k (vektor stavových veličín) a u_k (vektor akčných zásahov).

V oboch rovniciach vystupuje konštanta k , ktorá hovorí o tom, v ktorom časovom okamihu nás zaujímajú hodnoty veličín. V literatúre sa označuje pod pojmom operátor diskrétného posunutia.

Rovnice (3.1 a 3.2) môžeme napísať v rozšírenom tvare:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+2) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix}}_{x_{k+1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdot & \cdot & \cdot & a_{n,n} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}}_{x_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & b_{1,m} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & b_{2,m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \cdot & \cdot & \cdot & b_{n,m} \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}}_{u_k} \quad (3.3)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \\ \vdots \\ y_l(k) \end{bmatrix}}_{y_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{1,n} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{l,1} & c_{l,2} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{l,n} \end{bmatrix}}_{\hat{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}}_{x_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{1,m} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{2,m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ d_{l,1} & d_{l,2} & \cdot & \cdot & \cdot & d_{l,m} \end{bmatrix}}_{\hat{D}} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}}_{u_k} \quad (3.4)$$

3.7 Matematická formulácia optimalizačného problému

Formálne sa skladá z dvoch základných častí:

- nákladová (účelová) funkcia, ktorú sa snažíme optimalizovať. Zároveň je reprezentantom toho, čo chceme optimalizovať. Ak chceme optimalizovať zisk, účelovú funkciu budeme maximalizovať. Ak chceme šetrenie vo forme napr. menších nákladov, nižšej spotreby, účelovú funkciu musíme minimalizovať.
- ohraničenia v tvare nerovnosti, alebo rovnosti

V nasledujúcom texte podrobne rozoberieme obe tieto časti.

3.7.1 Účelová funkcia

Účelovú funkciu môžeme formálne napísať v tvare:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} (\|Q_x x_{t+k}\|_p + \|Q_u u_{t+k}\|_p) \quad (3.5)$$

Významnou časťou vyššie uvedenej účelovej funkcie sú normy, ktoré môžu nadobúdať rôznu hodnotu. Spoločnou vlastnosťou noriem je, že určujú vzdialenosť. Ak spomenieme jednu normu, jedna norma v účelovej funkcii vyjadruje snahu dostať stavy na referenciu. Funkcia (3.4) na prvý pohľad nehovorí nič o referencií, no v skutočnosti však hovorí o dosiahnutí takej referencie, ktorej hodnota je nulová. Nulová referencia sa však v praxi vyskytuje len veľmi málo. Preto treba do účelovej funkcie zaradiť člen, ktorý by priamo súvisel s referenciou. Označíme ho r . Funkciu (3.4) môžeme preto pomocou r prepísať do nasledujúceho tvaru

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} (\|Q_x(x_{t+k} - r)\|_p + \|Q_u(u_{t+k} - r)\|_p) \quad (3.6)$$

Častejšie sa stretávame so situáciou, že chceme minimalizovať výstup od referencie, preto je vhodné účelovú funkciu prepísať do tvaru

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} (\|Q_x(y_{t+k} - r)\|_p + \|Q_u(u_{t+k} - r)\|_p) \quad (3.7)$$

Poslednými členmi vystupujúcimi vo funkcii sú váhové matice Q_x a Q_u . Práve pomocou týchto dvoch matíc vieme pridať váhu tomu, na čom nám viacej záleží. Ak nám ide o minimalizáciu akčných zásahov na úkor kvality riadenia, potom $Q_u > Q_x$. Pokiaľ by sme požadovali vysokú kvalitu riadenia, počet akčných zásahov by bol väčší. tým pádom by sme volili $Q_x > Q_u$. Samozrejme závisí od situácie, čo uprednostníme, ale v princípe sa snažíme nájsť kompromis. Treba si však dať pozor na to, že rozhoduje pomer váhových matíc, nie ich absolútna hodnota.

3.7.2 Ohraničenia

Možnosť implementácie ohraničení v riadení procesov je dôvodom, prečo je prediktívne riadenie lídrom medzi ostatnými návrhmi regulácie. Implementácia ohraničení spája poznatky o modeli riadeného procesu, počiatočných podmienkach a o možnostiach akčných zásahov a stavov, vzhľadom na to, že práve akčné zásahy a stavy sú optimalizovanými veličinami a musia byť dodržané ich ohraničujúce intervaly.

$$s. t \quad x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (3.8)$$

$$x_0 = x_t \quad (3.9)$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (3.10)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (3.11)$$

3.8 Výstavba optimalizačného problému

V predchádzajúcich kapitolách bola podrobne rozobratá všeobecná formulácia optimalizačného problému vzhľadom na účelovú funkciu a ohraničenia. Táto kapitola bude venovaná objasneniu, ako sa optimalizačný problém vystavia na základe požiadaviek a faktov, ktoré musia byť zohľadnené pri formulácii. Pritom budeme vychádzať zo schémy na obrázku 5.

Nevyhnutnou súčasťou implementácie je adekvátne softvérové vybavenie. Autor prácu vypracovával pomocou počítačového programu MATLAB, verzia R2013a. Ďalším balíkom potrebným pre implementáciu je programový balík YALMIP, voľne šíriteľný toolbox programu MATLAB. Slúži pre pokročilé modelovanie a riešenie problémov konvexnej aj nekonvexnej optimalizácie. Povoľuje formulovať optimalizačný problém veľmi intuitívne, čo má za následok rýchlosť a výrazné zjednodušenie práce.

3.8.1 Vystupujúce optimalizované premenné pri riadení kompresorov

Úlohou optimalizácie je vypočítať hodnoty optimalizovaných premenných na základe toho, ako naformulujeme optimalizačný problém a tiež toho, čo všetko chceme optimalizovať. Veľmi logicky a intuitívne vieme prísť na to, že najdôležitejšou optimalizovanou premenou v našom optimalizačnom probléme je príkon na kompresory. Na to je zameraná celá práca - optimalizácia chodu kompresorov na základe určitých predpokladov a možnosti vo forme ohraničení s cieľom minimalizovať náklady spojené so spotrebou elektrickej energie. Avšak to nie je jediná optimalizovaná premenná, ktorá vystupuje v našom probléme. Ďalšími sú objemový

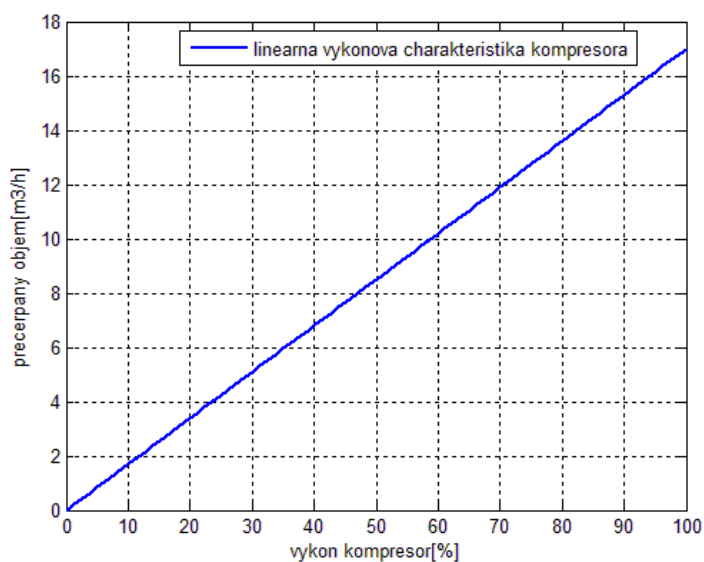
prietok plynu spálený na flérach, objem prečerpaný jednotlivými kompresormi, akčné zásahy v predchádzajúcom kroku optimalizácie - tým sa myslí schopnosť kompresorov reagovať na zmeny v ich výkone (ak napr. kompresor má svoj výkon zmeniť z 20 na 40%, dôležité je, či je túto zmenu schopný vykonať napr. za tri časové kroky, alebo za osem). Poslednou z optimalizovaných premenných je objem plynu v zásobníku. Aj keď tento objem chceme udržať na konštantnej hodnote, bude dochádzať k istým výkyvom od referenčnej hodnoty. V nasledujúcom texte bude objasnené to, ako pomocou váhových matíc môžeme docieľať temer konštantnú referenčnú hodnotu.

3.8.2 Výkonové charakteristiky kompresorov

V tejto časti bude podrobne rozobraté výkonové charakteristiky pre kompresory. Do úvahy sa bude brať len výkonová charakteristika kompresorov lineárna, a dve hybridné formulácie.

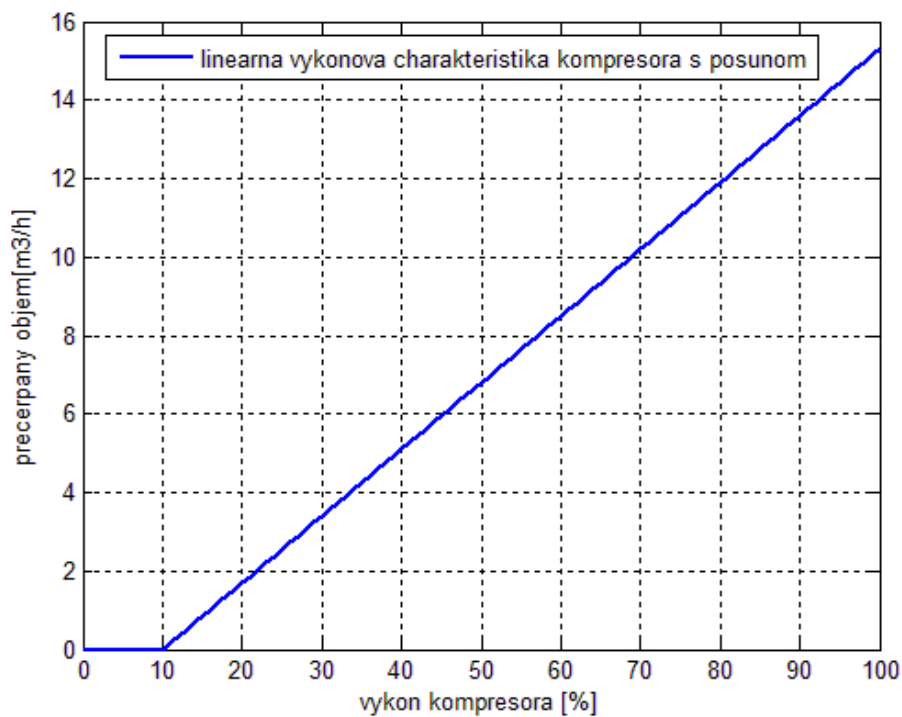
- výkonová charakteristika vykazujúca lineárny charakter začínajúca v počiatku

$$y = \alpha e \quad \text{kde } \alpha \in (0, \infty) \quad (3.12)$$



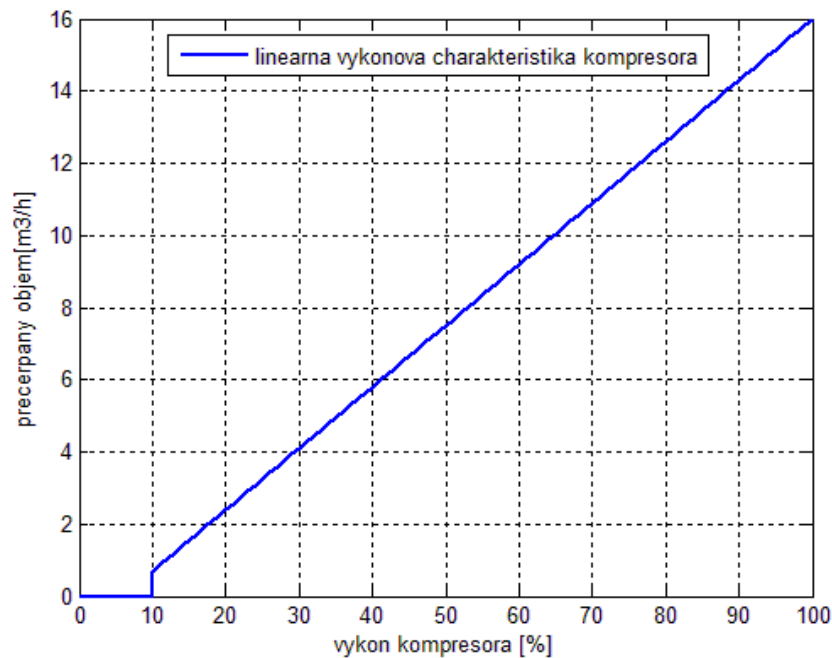
Obr. 11 Lineárna výkonová charakteristika kompresora pri hodnote $\alpha = 0.17$

- výkonová charakteristika vykazujúca lineárny charakter s kladným posunom od počiatku



Obr. 12 Hybridná výkonová charakteristika kompresora pri hodnote $\alpha = 0.17$ s nutnosťou chodu kompresora na 10%, aby sa začal prečerpávať plyn

- výkonová charakteristika vykazujúca lineárny charakter s kladným posunom od počiatku v oboch smeroch vzhľadom na osi súradníc



Obr. 13 Hybridná výkonová charakteristika s posunom v oboch smeroch pri hodnote $\alpha = 1.5$, nutnosť chodu kompresora na 10% na prekonanie fyzikálnych síl s nenulovým prečerpaným objemom

3.8.3 Formulácia účelovej funkcie pre riadenie štyroch kompresorov

Odpovede na otázky čo ideme riadiť a ako sú relatívne jasné z predchádzajúceho textu. Pre názornosť ich v tejto časti jasne definujeme a na ich základe naformulujeme účelovú funkciu.

Účelová funkcia je tá časť formulácie, v ktorej hovoríme o tom, čo sa snažíme optimalizovať, resp. na čo sa kladie dôraz pri riadení. Ak do úvahy vezmeme predchádzajúce, účelová funkcia musí obsahovať nasledovné:

- udržanie referencie v zásobníku - ak dokážeme udržať konštantný objem plynu v zásobníku (aj napriek tomu, že do zásobníka prichádza kontinuálne sa meniaci neznámy objem plynu), to znamená, že vieme skomprimovať všetok prichádzajúci prúd plynu - a to je cieľom rekompresnej stanice
- minimalizácia spotreby elektrickej energie dodávanej kompresorom - energetická náročnosť rekompresnej stanice je veľmi vysoká, takže akákoľvek úspora energie vedie k

úspore finančných prostriedkov na chod danej prevádzky. Preto budeme v účelovej funkcii minimalizovať príkony na kompresory.

- využívanie flér - akékoľvek použitie flér je pre prevádzku stratové, nakoľko teplo vznikajúce pri spaľovaní na flérach nie je využiteľné. Preto sa budeme snažiť v čo najväčšej miere minimalizovať nutnosť spaľovania na flérach.
- technické možnosti kompresorov - spomínané prvé tri kompresory nie sú technicky stavané tak, aby mohli reagovať na výkyvy prichádzajúceho prúdu plynu. Teoreticky je to možné, no v takom prípade výrazne klesá ich životnosť, je nutná oveľa častejšia údržba a tým odstavenie časti prevádzky. Toto všetko prináša obrovské straty (ak sa na určitý čas vyradí niektorý z kompresorov, stanica v danom momente nie schopná stláčať také množstvo plynu = veľká časť neskomprimovaného plynu odchádza na fléry, čo je brané ako strata). Preto je nutné, aby tieto tri kompresory pracovali čo najkonštantnejšie, to znamená, aby sa príkon na ne nemenil, prípadne menil len veľmi málo. Na vykrytie výkyvov bol implementovaný štvrtý kompresor s frekvenčným meničom, ktorý je konštruovaný práve tak, aby bez ohrozenia svojej životnosti dokázal kompenzovať už spomínané výkyvy v potrubí.
- dynamika kompresorov - je jasné, že tak veľké stroje, ako sú kompresory, nedokážu zmeniť svoju výkonnosť v nekonečne malom okamihu. Treba počítať s tým, že nábeh kompresora z počiatočnej hodnoty na požadovanú hodnotu trvá určitú dobu. Preto je vhodné zohľadniť aj tento aspekt pri návrhu účelovej funkcie. Práve zohľadnenie tohto aspektu je výrazným posunom k dosiahnutiu presnosti a reálnosti.

Výhodou definovania optimalizačného problému pomocou účelovej funkcie je to, že vieme každému z týchto bodov definovať jeho dôležitosť (váhu). Či nám viac záleží na tom, aby prvé tri kompresory pracovali naozaj rovnako z hľadiska dodávok príkonu na jednotlivý kompresor, alebo nám viac záleží na tom, aby sa na flérach spaľovalo čo najmenej. Preto v našej účelovej funkcii budeme využívať váhové matice a užívateľ si bude môcť jednoducho vybrať a následne zvoliť prioritu jednotlivých častí účelovej funkcie.

Všetko, čo bolo doteraz spomenuté nám teda definuje účelovú funkciu, ktorú môžeme matematicky zapísať nasledovne:

$$\min \sum_{k=0}^{N-1} \left[Q_{ref} (V_k - V_{ref,k})^2 + P_k' Q_e P_k + S_k' Q_s S_k + Q_1 (P_{1,k} - P_{1,k-1})^2 + Q_2 (P_{2,k} - P_{2,k-1})^2 + Q_3 (P_{3,k} - P_{3,k-1})^2 + d_u' Q_{delta} d_u \right] \quad (3.13)$$

pričom

N - predikčný horizont

k - krok predikčného horizontu

V_k - objem v zásobníku [m³] v k -tom kroku predikcie

$V_{ref,k}$ - hodnota referencie [m³] v k -tom kroku predikcie, v našom prípade na celok k bude konštantná

$(V_k - V_{ref,k})^2$ - kvadrát odchýlky objemu v k -tom kroku predikcie (zabezpečenie držania odchýlky na minime)

Q_{ref} - váhová matica pre minimalizáciu odchýlky medzi $V_k - V_{ref,k}$

P_k - príkon kompresorov [W] v k -tom kroku predikcie

Q_e - váhová matica na príkon kompresorov, resp. cena elektrickej energie pre jednotlivé kompresory

S_k - objemový prietok plynu, ktorý sa spáli na flérach [m³]

Q_s - váhová matica pre minimalizáciu spaľovania na flérach

$P_{1,k}$ - príkon prvého kompresora [W] v k -tom kroku predikcie

$P_{1,k-1}$ - príkon prvého kompresora [W] v $k-1$ -om kroku predikcie

$(P_{1,k} - P_{1,k-1})^2$ - kvadrát odchýlky v k (zabezpečenie chodu prvého kompresora na konštantnej hodnote výkonu = dodávky rovnakého príkonu na prvý kompresor)

- Q_1 - váhová matica pre dodržanie stáleho chodu prvého kompresora
- $P_{2,k}$ - príkon druhého kompresora [W] v k -tom kroku predikcie
- $P_{2,k-1}$ - príkon druhého kompresora [W] v $k-1$ -om kroku predikcie
- $(P_{2,k} - P_{2,k-1})^2$ - kvadrát odchýlky príkonov v k (zabezpečenie chodu druhého kompresora na konštantnej hodnote výkonu = dodávky rovnakého príkonu na druhý kompresor)
- Q_2 - váhová matica pre dodržanie stáleho chodu druhého kompresora
- $P_{3,k}$ - príkon tretieho kompresora [W] v k -tom kroku predikcie
- $P_{3,k-1}$ - príkon tretieho kompresora [W] v $k-1$ -om kroku predikcie
- $(P_{3,k} - P_{3,k-1})^2$ - kvadrát odchýlky v k -tom kroku predikcie (zabezpečenie chodu tretieho kompresora na konštantnej hodnote výkonu = dodávky rovnakého príkonu na tretí kompresor)
- Q_3 - váhová matica pre dodržanie stáleho chodu tretieho kompresora
- Q_{delta} - váhová matica pre dynamiku kompresora
- d_u - dynamika kompresora - časová kompenzácia na zmenu výkonu kompresora

Uvedené body teda jasne definujú všetko, čo má účelová funkcia obsahovať. Nie je však možné dosiahnuť to, aby všetky body boli splnené naraz. Ak by to tak bolo, hovorili by sme o najlepšom možnom riešení - nič by sme nemuseli spaľovať na flérach, kompresory by tým pádom dokázali všetko skomprimovať, nebola by potrebná optimalizácia. Avšak čo s kapacitou kompresorov, ich technickými možnosťami, ich dynamikou, atď.? Toto je dôvod, prečo nám nestačí navrhnúť PID regulátor, prečo ani návrh LQR regulátora, či regulátora robustného nestačí. Jasne musíme definovať, čo reálne dokážu kompresory skomprimovať na základe ich vopred daných parametrov, konštrukčných možností, atď. A tu zohrávajú významnú úlohu ohraničenia. Najdôležitejšia časť riadenia reálnych prevádzok nielen z hľadiska prevádzkovania, ale aj iných dôležitých aspektov, ako je napríklad bezpečnosť.

3.8.4 Formulácia ohraničení pre riadenie chodu štyroch kompresorov

Správna formulácia ohraničení je základom pre správnosť chodu nielen simulácii, ale aj reálnych zariadení či prevádzok. Každá technológia a komponenty v nej majú svoje ohraničenia, ktorých porušenie môže viesť k závažným komplikáciám a v najhorších prípadoch k masívnym haváriám s obrovskými škodami. Preto čas strávený pri naformulovaní ohraničení je veľmi dôležitý. Treba vziať do úvahy každý jeden detail a správne ho implementovať.

Ohraničenia v našom prípade sa budú týkať nasledovného:

- ohraničenia na kompresory
- ohraničenia na zásobník
- ohraničenia na prichádzajúci prúd plynu
- ohraničenia na spaľovanie na flérach

Ohraničenia na kompresory

Prvé ohraničenia na kompresory súvisia s dodávaním energie na rekompresiu plynu. Ako bolo v úvode kapitoly spomenuté, budeme predpokladať, že výkonová charakteristika kompresora má lineárny charakter. Táto lineárna závislosť začína v počiatku súradnicovej sústavy. Ďalej budeme predpokladať, že objem plynu prečerpáný kompresorom sa rovná príkonu na kompresor pre násobené konštantou kompresora pri lineárnej výkonovej charakteristike. Matematicky vieme nasledovnú rovnosť napísať:

$$q_{out,k} = C_k P_k \quad (3.14)$$

pričom

$q_{out,k}$ - objem plynu prečerpáný kompresorom v k -tom kroku predikcie

C_k - konštanta lineárnej závislosti

P_k - príkon na kompresor [W] v k -tom kroku predikcie

Nakoľko v systéme máme zapojené 4 kompresory, sú zapojené paralelne, to znamená, že pracujú nezávisle od seba, musíme nasledovnú rovnicu prepísať do tvaru

$$q_{out\ j,k} = C_{k,j} P_{j,k} \quad (3.15)$$

kde j nadobúda hodnoty 1-4, podľa toho, o ktorom kompresore hovoríme. Nakoľko kompresory 1-3 sú úplne totožné, ich výkonová charakteristika je rovnaká, takže aj konštanta C_k pre tieto tri kompresory bude rovnaká.

Ďalším dôležitým ohraničením na kompresory je fakt, že ich príkon musí nadobúdať kladné hodnoty (prípadne nulu, ak by nejaký z kompresorov nemusel pracovať). Pre nás používateľov je tento fakt braný ako samozrejmosť, ale pokiaľ to optimalizácii jasne nezadáme vo forme ohraničení, môže nastať veľmi zaujímavá a zároveň nereálna situácia. Optimalizácia by mohla vypočítať zápornú hodnotu príkonu na nejaké z kompresorov (nakoľko príkon vystupuje v účelovej funkcii, ktorú minimalizujeme) a to v reály samozrejme nemôže nastať. Aj toto je dôkazom toho, že ohraničenia sú veľmi dôležitým a nezanedbateľným faktom, na ktorý v žiadnom prípade netreba zabúdať. Matematicky toto ohraničenie môžeme zapísať nasledovne

$$P_{j,k} \geq 0 \quad (3.16)$$

Samozrejme toto ohraničenie musí byť splnené pre každé z kompresorov a v každom kroku chodu kompresorov.

Objem plynu stlačený daným kompresorom tiež nemôže nadobúdať záporné hodnoty. Ak by to tak bolo, raz by prúd plynu šiel jedným smerom, inokedy druhým smerom. A takáto situácia nemôže nastať. Existujú kompresory, ktoré sú technicky stavané tak, aby mohli stláčať plyn oboma smermi, ale na tejto danej prevádzke takto technicky vybavené kompresory nie sú. Čo je však oveľa dôležitejšie je to, aký maximálny objem plynu dokážu jednotlivé kompresory skomprimovať. Tento údaj je pevne daný výrobcom, nakoľko technické parametre kompresora sa meniť nedajú. Ak si označíme symbolicky maximálny možný stlačený objem plynu kompresorom ako $q_{out\ max}$, ohraničenia tohto charakteru môžeme zapísať nasledovne:

$$0 \leq q_{out\ j,k} \leq q_{out\ max} \quad (3.17)$$

Samozrejme toto ohraničenie musí platiť pre všetky kompresory, preto v rovnici opäť vystupuje symbol j . Nakoľko maximálny možný stlačený objem plynu jednotlivými kompresormi q_{out_max} je pre všetky kompresory rovnaký, q_{out_max} nadobúda hodnotu konštanty a nie je potrebná ďalšia symbolika charakterizujúca o ktorý kompresor sa jedná.

Posledným ohraničením braným do úvahy pri kompresoroch je ich možnosť reakcie na zmenu výkonu, resp. príkonu. Ináč povedané, kompresor potrebuje určitý čas na to, aby mohol zareagovať na zmenu požadovaného výkonu. Preto sa medzi ohraničeniami objavuje aj ohraničenie na najvyššiu a najnižšiu zmenu d_u (dynamika kompresora - časová kompenzácia na zmenu výkonu kompresora). Ak si symbolicky zadefinujeme maximálnu možnú zmenu za k ako P_{delta_max} a najnižšiu ako P_{delta_min} , toto ohraničenie môžeme zapísať ako

$$P_{d,min} \leq d_u \leq P_{d,max} \quad (3.18)$$

Ohraničenia na zásobník

Aj keď zásobník uvedený v schéme je len fiktívny a slúži nám ako pomôcka na definovanie referencie, je nutné, aby sme aj v takom prípade definovali prípustné hodnoty dosiahnutého objemu plynu v zásobníku, pretože ak sa prekročí objem zásobníka, je nutné aktivovať fléry. Dôležité je spodné ohraničenie, aby sme neodťahovali viac, ako sa v prevádzke skutočne vyprodukuje

$$V_{min} \leq V_k \leq V_{max} \quad (3.19)$$

Oveľa dôležitejšie pri akomkoľvek uvažovanom zásobníku je materiálová bilancia zásobníka vychádzajúca zo schémy. Vstupným prúdom do zásobníka je prúd označený symbolicky ako q_{in} . Tento prúd prichádza vo forme poruchy, pričom v prípade, ak by sme ho aspoň čiastočne poznali, vedeli by sme predpovedať vývoj tejto poruchy. To by sa odohrávalo v tzv. periódach vzorkovania označených symbolicky ako T_s . Výstupným prúdom zo zásobníka je objem skomprimovaný pomocou kompresorov $\sum_{j=1}^4 q_{out_j}$ a za výstup taktiež môžeme považovať objem plynu spálený na flérach. Nakoľko toto všetko uvažujeme v k -tom kroku, v $k+1$ kroku ohraničenie tohto typu vieme zapísať

$$V_{k+1} = V_k + Ts \, q_{in \, k} - \sum_{j=1}^4 (q_{out \, j, k}) - S_k \quad (3.20)$$

Slovne túto rovnicu (uvedené kvôli lepšiemu pochopeniu) vieme zreprodukovať nasledovne (ak si za k dosadíme 1): Objem plynu v zásobníku v kroku 2 sa rovná objemu plynu v kroku 1 (to čo tam zostalo) plus to, koľko plynu do zásobníka príde, mínus všetok stlačený objem plynu kompresormi a mínus objem plynu, ktorý sa spáli na flérach.

Ohraničenia na prichádzajúci prúd plynu

V tomto prípade je podmienka veľmi intuitívna, nakoľko vieme, že plyn do zásobníka len priteká. Matematicky tento fakt vieme zapísať v tvare nerovnosti ako

$$q_{in} \geq 0 \quad (3.21)$$

Opäť to musí platiť v každom kroku predikcie.

$$q_{in, k} \geq 0 \quad (3.22)$$

Ohraničenia na spaľovanie na flérach

Aj v tomto prípade hovoríme o nezápornosti na spaľovaní, čiže objem plynu spálený na flérach môže nadobúdať len kladné hodnoty v každom kroku predikcie:

$$S_k \geq 0 \quad (3.23)$$

4 Implementácia prediktívneho riadenia pre riadenie kompresorov v prostredí MATLAB pre rôzne modelové scenáre

Nasledujúca časť obsahuje výsledky implementácie prediktívneho riadenia do modelu rekompresnej stanice, pričom sa budú do úvahy brať rôzne situácie a predpoklady. Postupným pridávaním rôznych druhov ohraničení a optimalizovaných premenných v účelovej funkcii dospejeme k naformulovaniu takého optimalizačného problému, ktorý by mohol charakterizovať rekompresnú stanicu.

V tejto kapitole budú podrobne rozobrané predpoklady, ohraničenia a formulácia účelovej funkcie. Následne k týmto predpokladom budú pribúdať ďalšie položky dôležité pre optimalizáciu a riadenie, dokumentované následne v ďalších modelových situáciách.

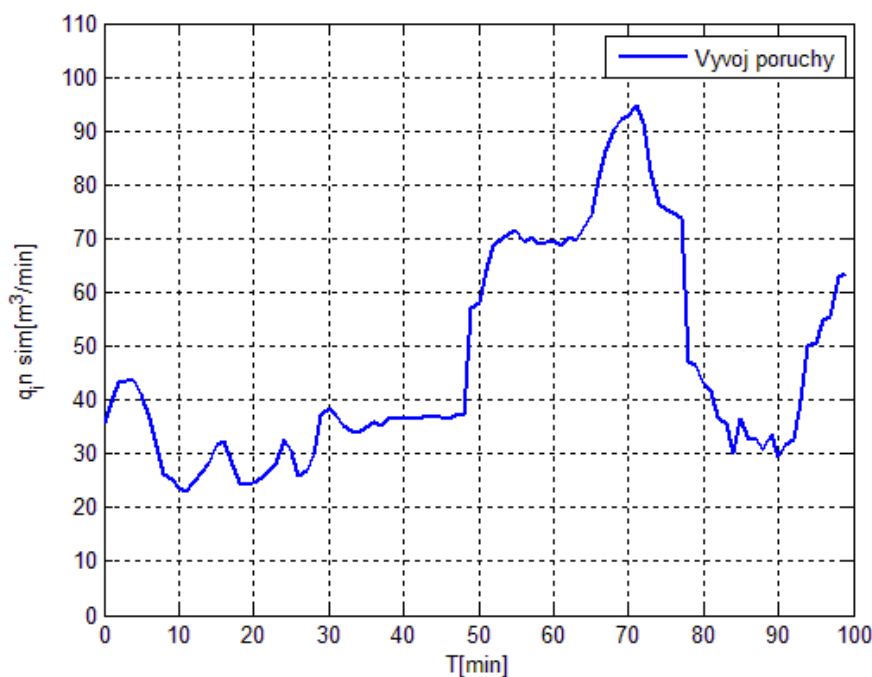
4.1 Modelová situácia 1

Predpoklady pre zásobník:

- počiatočný objem v zásobníku je 2 m^3
- požadovaná referencia v zásobníku je nastavená na 1 m^3
- konštantná referencia
- objem v zásobníku nesmie nadobudnúť zápornú hodnotu

Predpoklady pre vstupný prúd plynu:

- predpokladáme, že porucha (q_{in}) na predikčnom horizonte je konštantná a nezáporná
- graf vývoja poruchy je totožný s reálnym vývojom poruchy vstupujúci do rekompresnej stanice (Obr. 14)



Obr. 14 Vývoj poruchy vstupujúcej do zásobníka

Predpoklady na spaľovanie:

- spaľovanie je vysoko nežiaduce
- penalizácia spaľovania je vyššia ako penalizácia za porušenie referencie

Predpoklady pre kompresory:

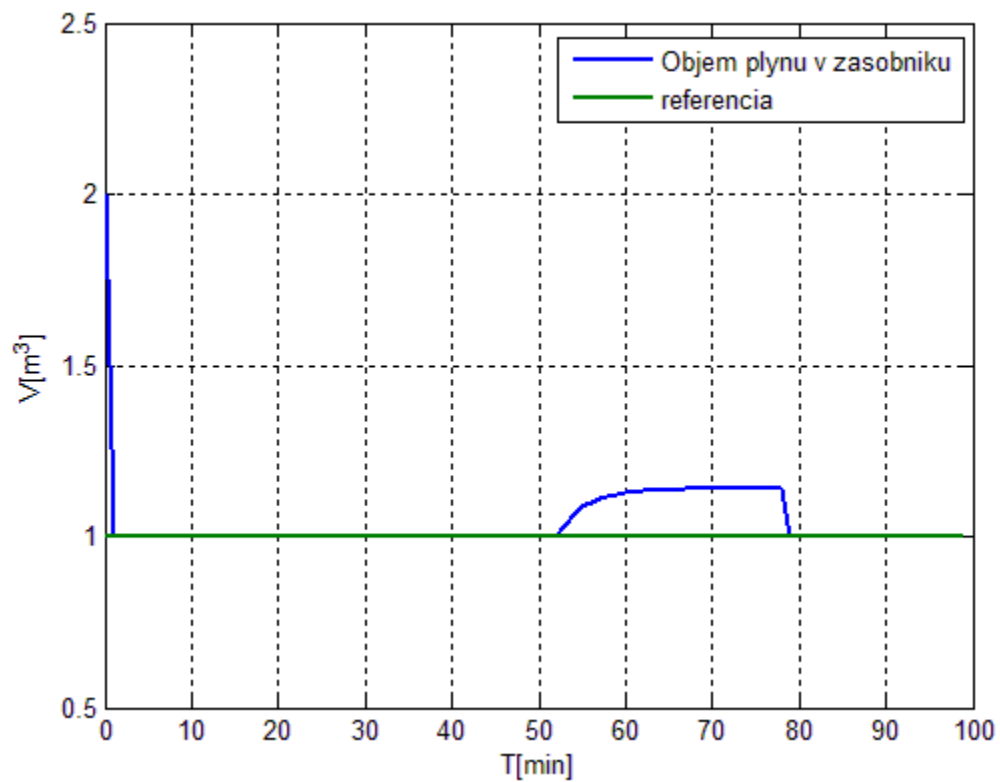
- všetky 4 kompresory pracujú rovnako (majú rovnakú lineárnu výkonovú charakteristiku (Obr. 11))
- spotreba elektrickej energie všetkých kompresorov je rovnaká
- cena elektrickej energie je nastavená ako jednotková pre všetky kompresory
- jediným ohraničením na kompresory je ich nezáporný príkon a ich maximálny prečerpaný objem ($17\text{m}^3/\text{min}$)

Účelová funkcia je formulovaná tak, aby sa:

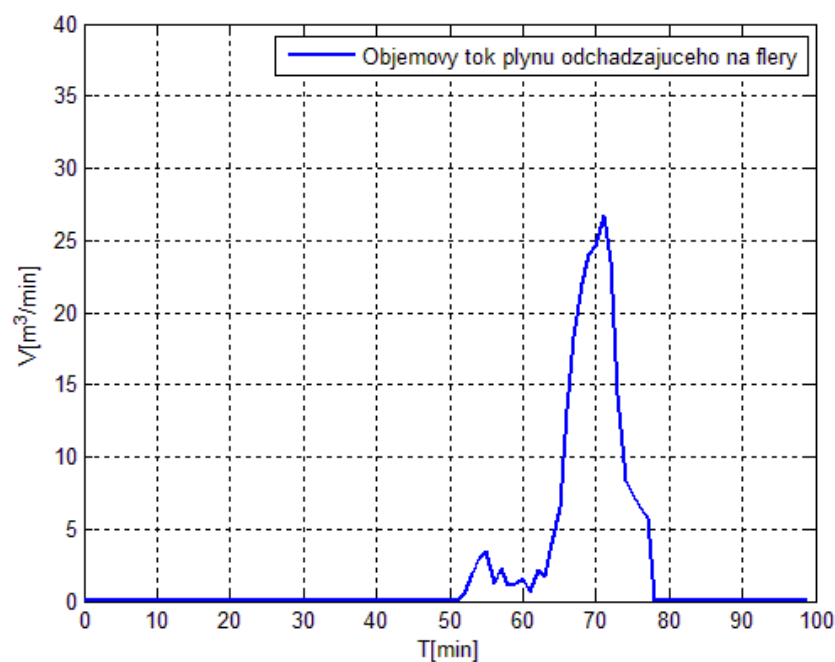
- sledovala požadovaná referencia v zásobníku
- minimalizovala spotreba elektrickej energie (minimalizácia príkonu na kompresory)

- minimalizovalo, v čo možno najvyššej miere, spaľovanie na flérach

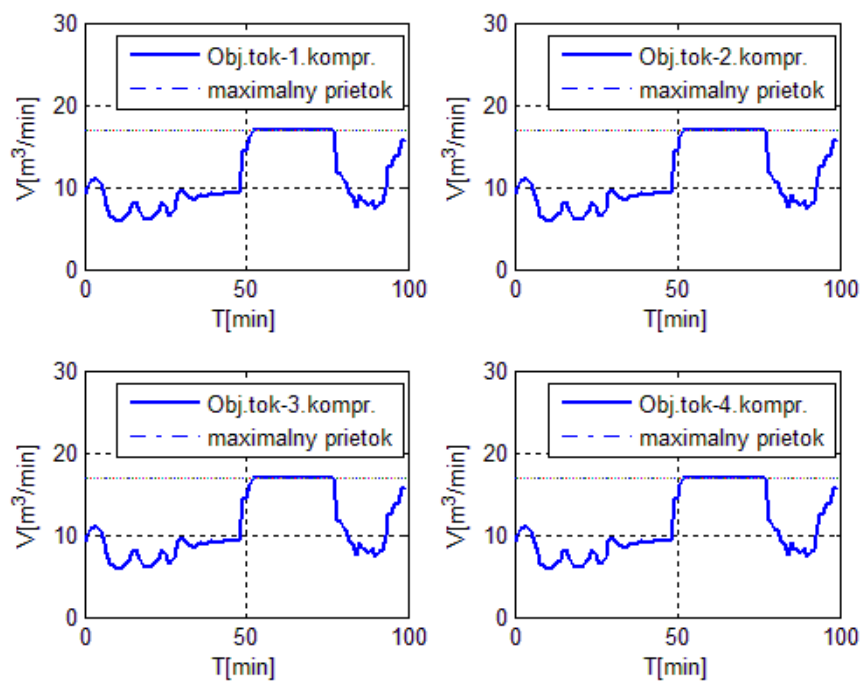
Grafické výsledky riadenia pre nasledujúce predpoklady



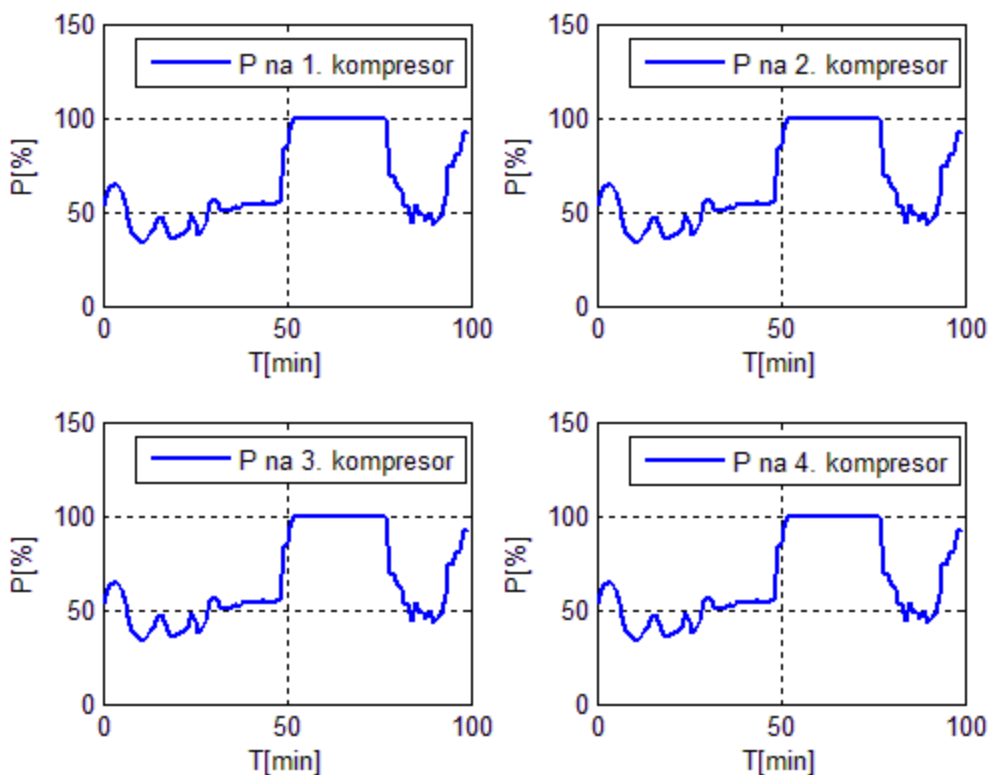
Obr. 15 Sledovanie skutočného objemu v zásobníku, pričom požadovaná referencia je 1m^3



Obr. 16 Objemový tok plynu spálený na flérach, pričom spaľovanie je vysoko penalizované (viac ako penalizácia na nedodržania referencie)



Obr. 17 Objemový tok prečerpávaný jednotlivými kompresormi, pričom všetky 4 kompresory sú úplne totožné

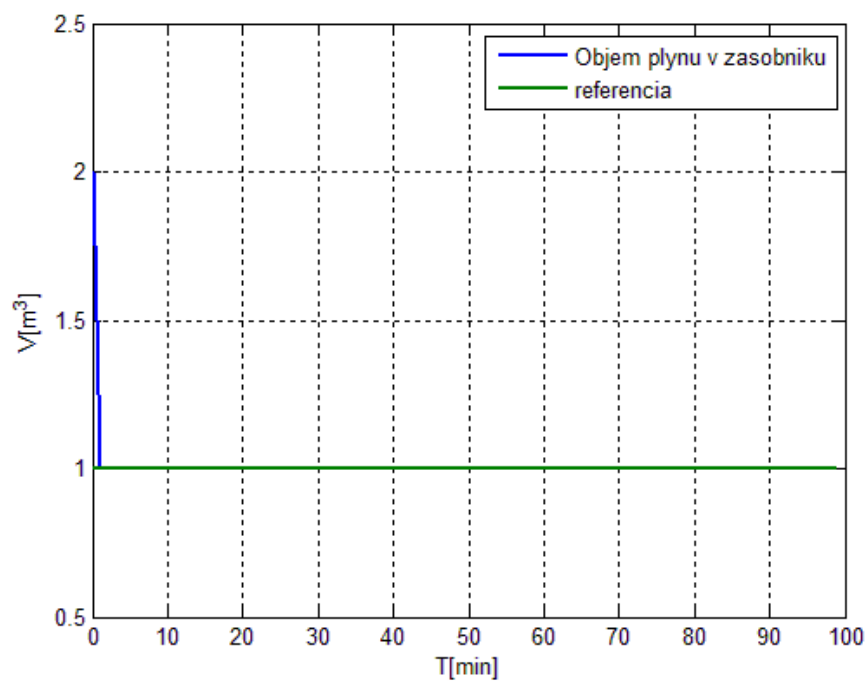


Obr. 18 Príkion na jednotlivé kompresory

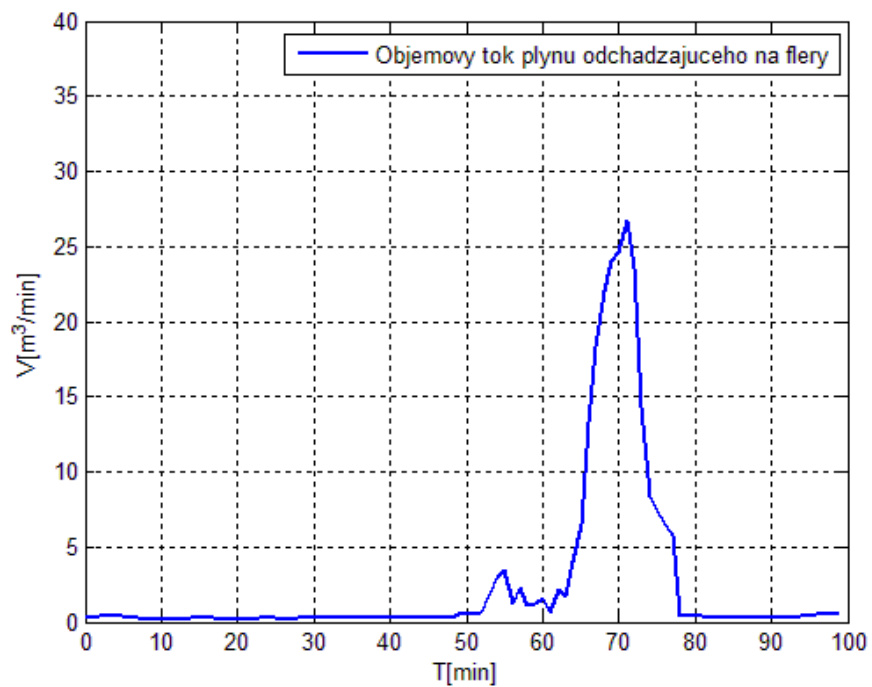
Vyhodnotenie výsledkov

Množstvo spáleného plynu na flérach je 228,9 m³.

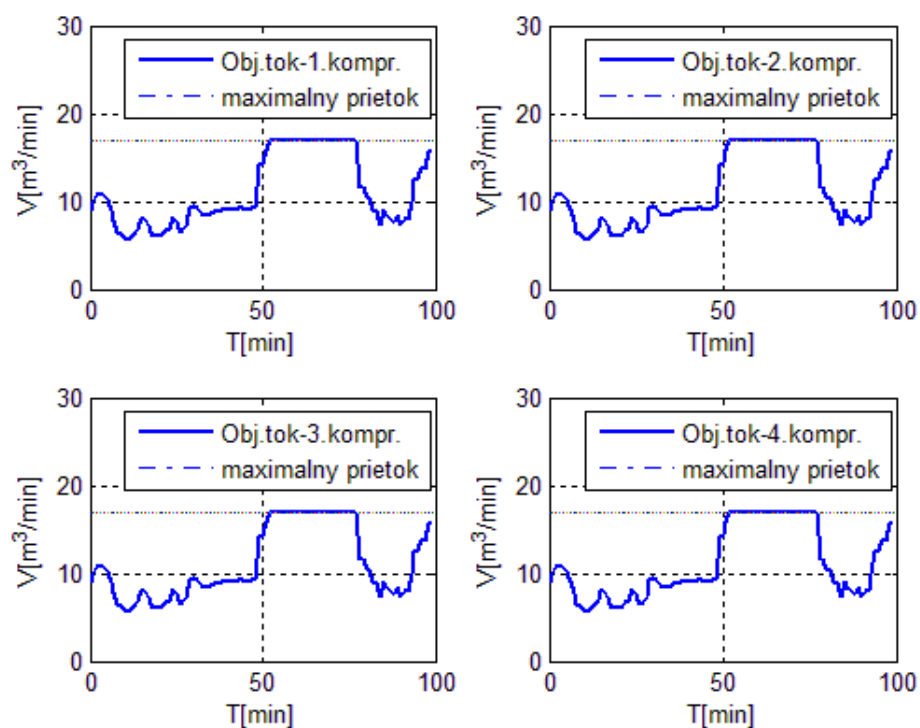
Na obr. 15 je viditeľné nedodržanie požadovanej referencie. Je to spôsobené tým, že porucha od času $T = 50$ min. výrazne vzrastala. Aj napriek tomu, že kompresory od $T = 50$ min. šli na svoj maximálny výkon (Obr. 18), nebolo možné všetok plyn skomprimovať. Preto bolo nutné spaľovanie (Obr. 16). Nedodržanie referencie bolo spôsobené nižšou hodnotou váhovej matice na penalizáciu nedodržania referencie ako penalizácia na spaľovanie. V prípade, ak by sme nasledovné vymenili, t.j. penalizácia spaľovania by bola nižšia ako penalizácia nedodržania referencie, vyzeralo by to nasledovne



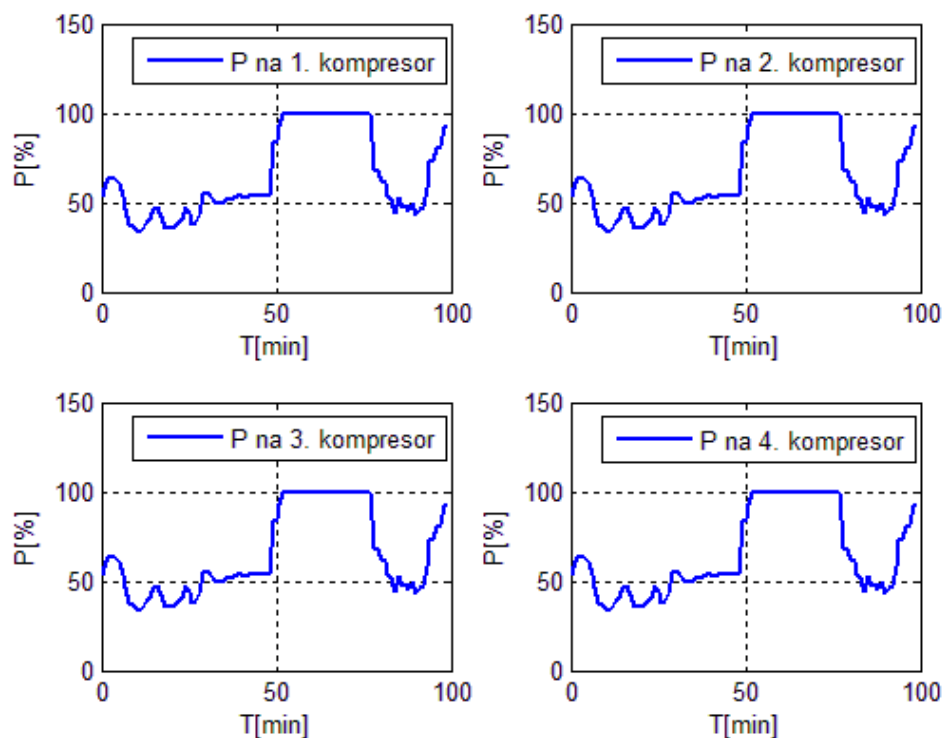
Obr. 19 Hodnota skutočného objemu v zásobníku, pričom penalizácia za nedodržanie referencie je vyššia, ako penalizácia spaľovania



Obr. 20 Objemový tok plynu na spaľovanie, pričom spaľovanie je menej penalizované ako nedodržanie referencie



Obr. 21 Objemový tok plynu kompresormi bez ohraňování na ne



Obr. 22 Příkony na jednotlivé kompresory bez ohraňování

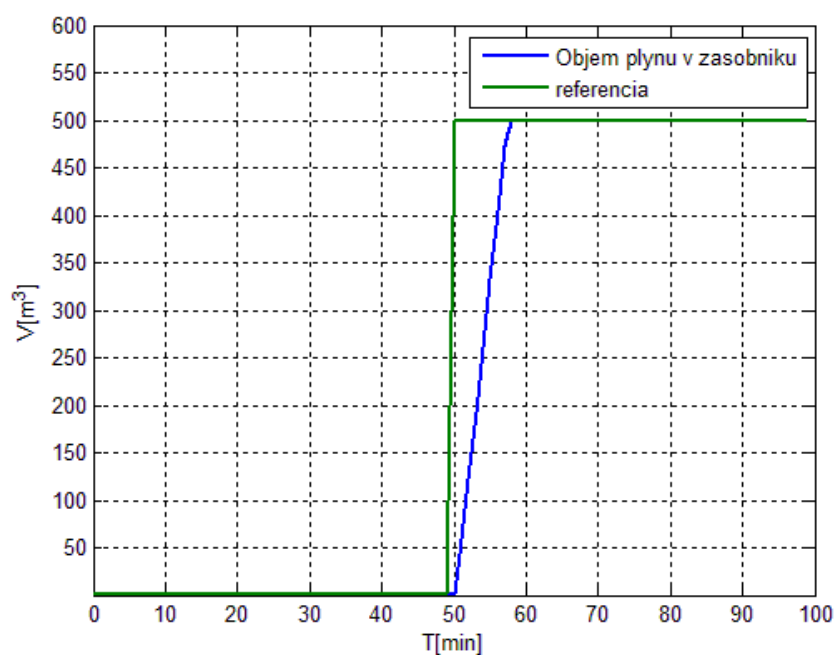
Množstvo spáleného plynu na flérach je $249,96 \text{ m}^3$.

Z nasledujúceho vyplýva, že zmenou váhovej matice pre spaľovanie ľahko vieme dodržať požadovanú referenciu. Zníženie penalizácie na spaľovanie malo za dôsledok to, že v čase od $T = 0$ do $T=50$ min. dochádza k spaľovaniu. Môže to byť spôsobené aj tým, že spaľovanie je ekonomicky výhodnejšie ako zvýšiť príkon na čerpadlá. Takže je len na používateľovi, či mu viac záleží na objeme plynu spálenom na flérach alebo či mu postačuje len približné sledovanie referencie. Príkon na kompresory (Obr. 22) je rovnaký pre všetky kompresory, pretože predpokladáme ich úplnú totožnosť. Nakoľko taktiež predpokladáme rovnaké výkonové charakteristiky pre všetky kompresory s rovnakou smernicou, objemový tok prečerpávaný kompresormi je rovnaký (Obr. 22).

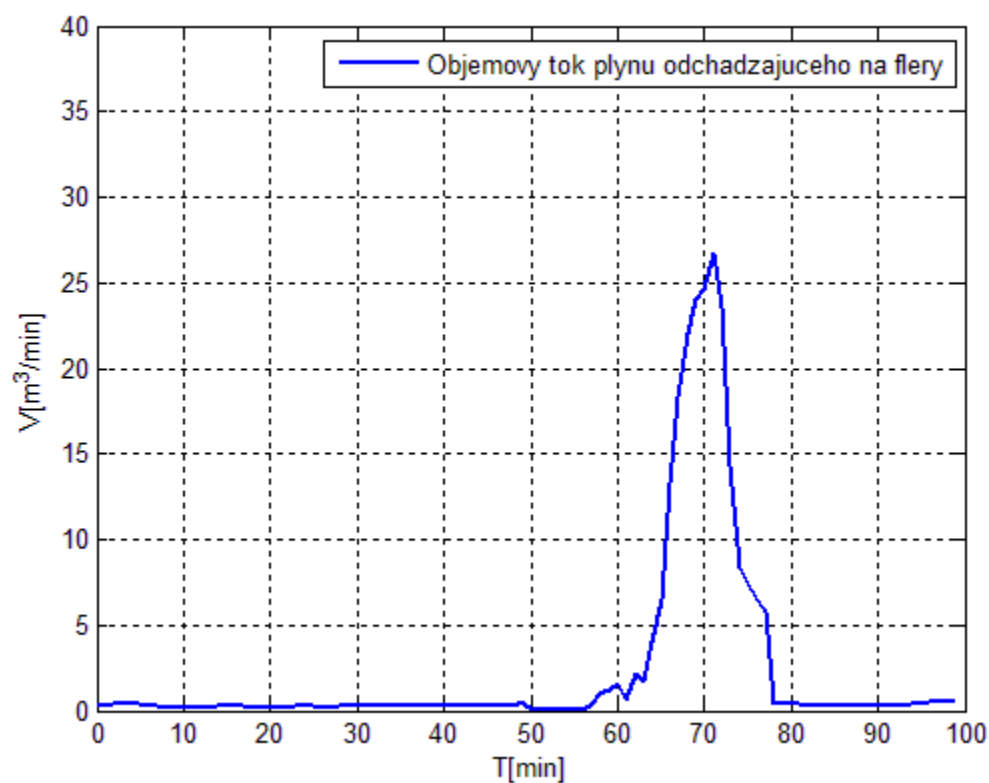
Množstvo spáleného plynu na flérach v druhom prípade vzrástol, pretože sa zmenil pomer váhových matíc.

4.2 Modelová situácia 2

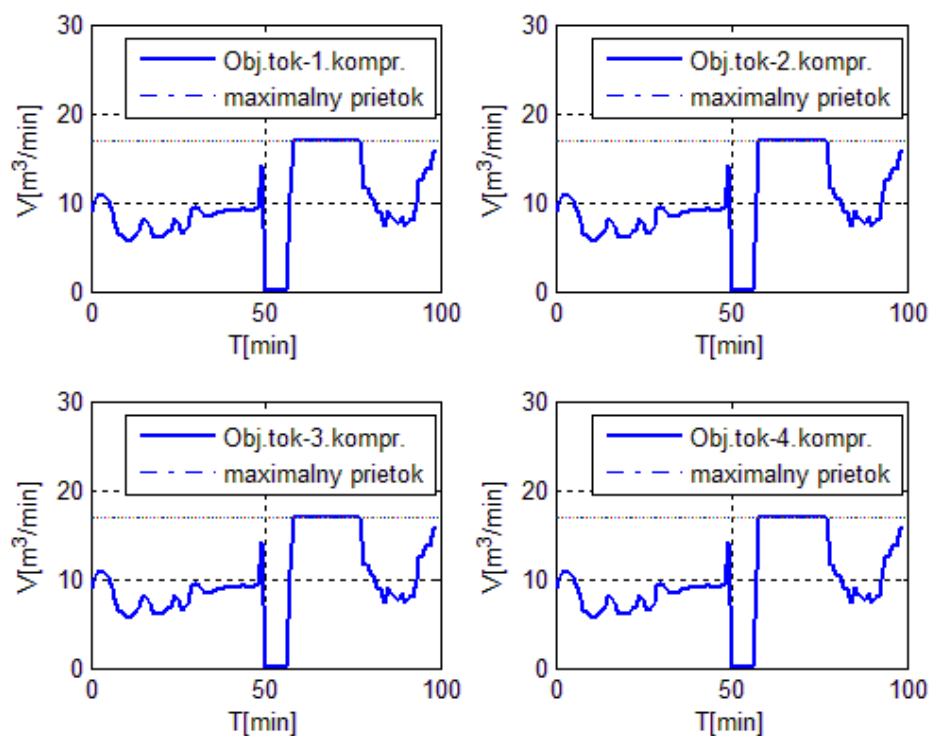
V tomto prípade budeme predpokladať presne to isté, ako v modelovej situácii 1. Predpokladáme zmenu referencie v čase $T = 50$ min. z objemu 1 m^3 na 500 m^3 . Nakoľko lepšie výsledky sme dosiahli s vyššou hodnotu váhovej matice na penalizácii odchýlky od referencie, budeme predpokladať tento scenár.



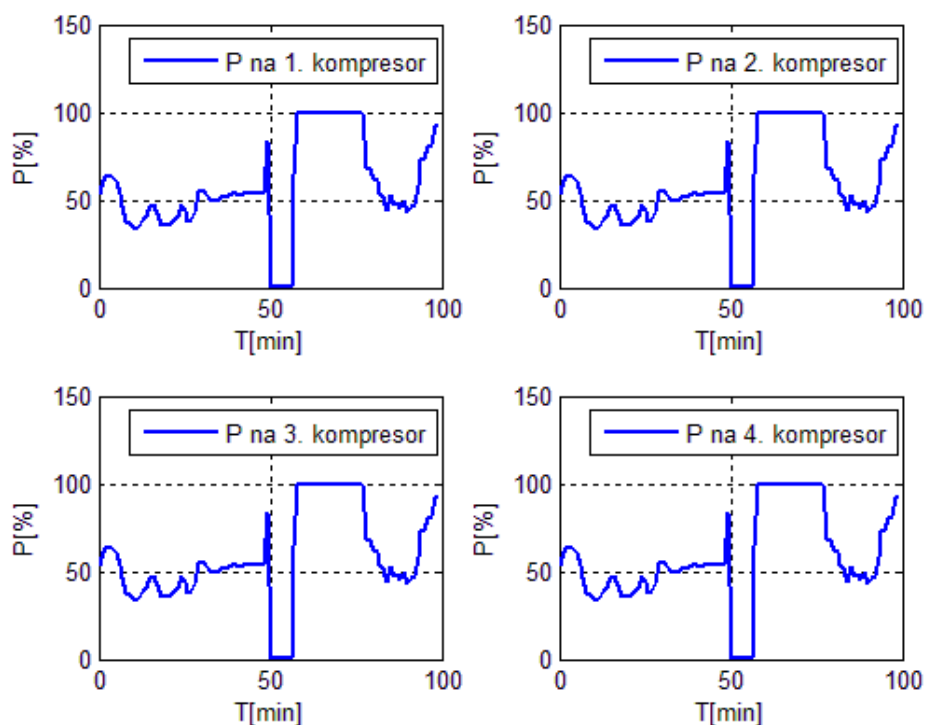
Obr. 23 Sledovanie objemu plynu v zásobníku, pričom sa na začiatku v zásobníku nachádzalo 2 m^3 plynu, pričom referencia bola nastavená na hodnotu 1 m^3 . zmena referencie nastala v $T = 50$ min. z hodnoty 1 m^3 na 500 m^3



Obr. 24 Objemový tok plynu odchádzajúci na spálenie na fléry pri skokovej zmene referencie v $T = 50$ min.



Obr. 25 Objemové toky skomprimované jednotlivými kompresormi pri skokovej zmene referencie v $T = 50$ min.



Obr. 26 Príkony jednotlivých kompresorov pri skokovej zmene referencie v $T = 50$ min.

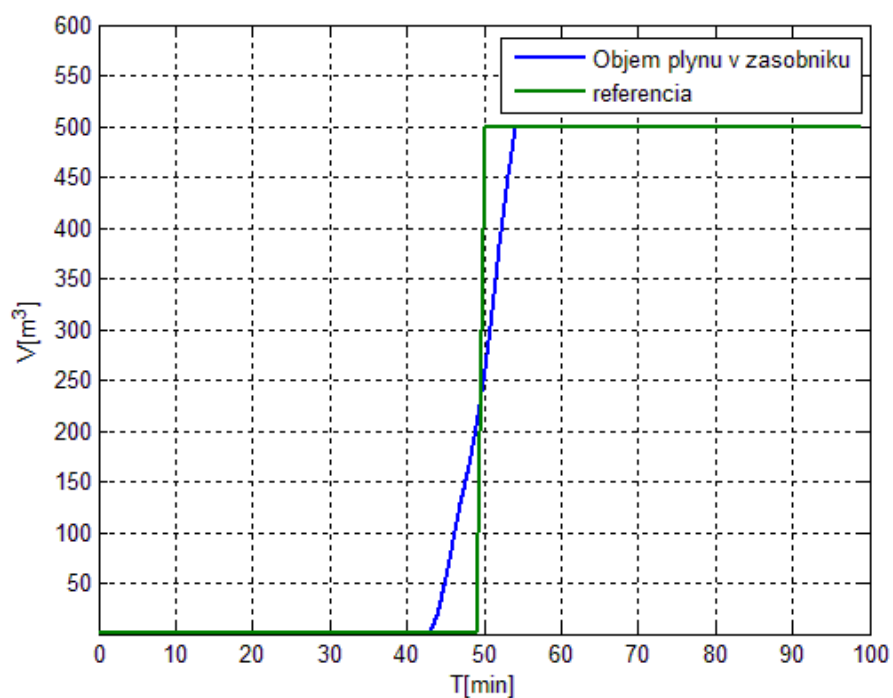
Vyhodnotenie výsledkov

Celkove množstvo spálené na flérach: 246.55m^3

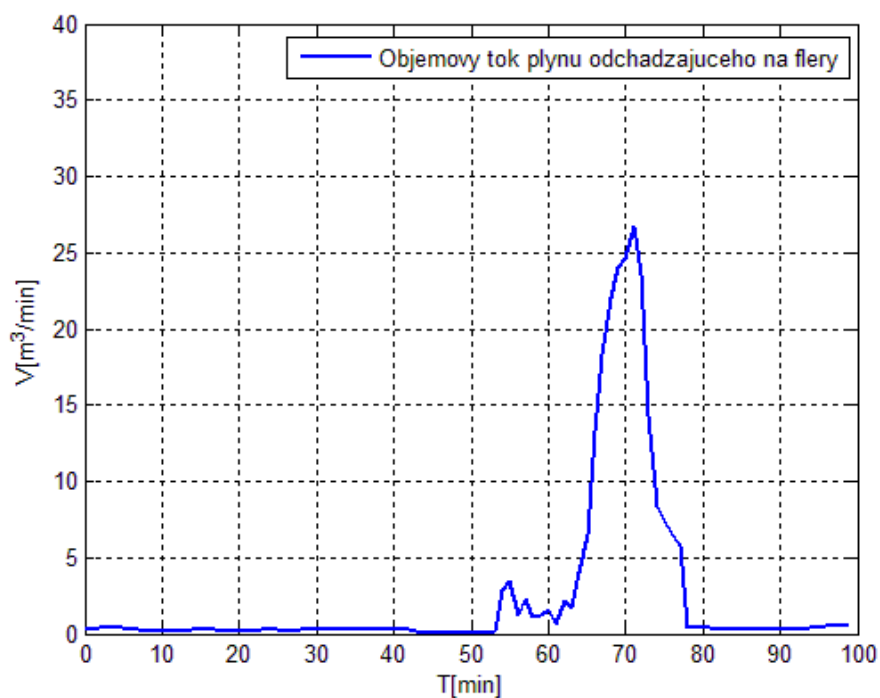
Skoková zmena spôsobila odklonenie od referencie na dobu asi 7 minút. 7 minút trvalo doplnenie zásobníka prichádzajúcim prúdom plynu. V čase, keď skutočný objem plynu v zásobníku dosahoval požadovanú referenciu, časť z plynu bola odklonená na spaľovanie, pretože v prípade, ak by sa časť prúdu neodklonila na fléry, objem v zásobníku by prekročil požadovanú hodnotu. Je jasné, že v čase $T = 50$ min. prestali úplne pracovať kompresory (Obr. 25, 26), pretože sa čakalo, pokým sa zásobník nenaplní.

4.3 Modelová situácia 3

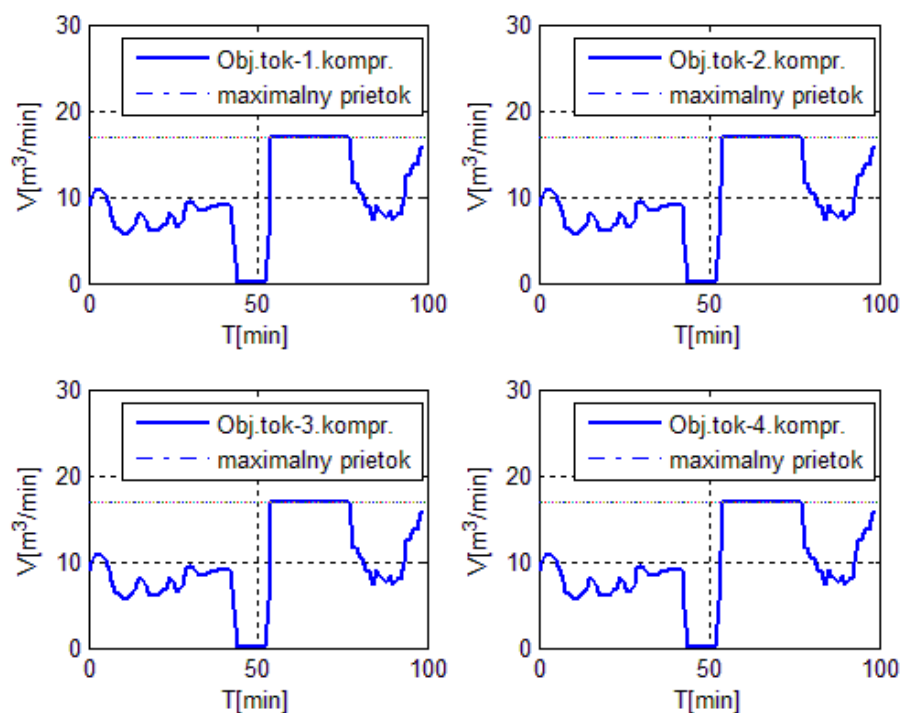
V predchádzajúcom prípade sme na veľmi dlhú dobu stratili sledovanie referencie v zásobníku. Bolo to spôsobené malou hodnotou vstupného prietoku. Len čo v prípade, ak v čase $T = 50$ min. by sme potrebovali naplniť zásobník na požadovaný objem. V tomto prípade by nám veľmi pomohlo, pokiaľ by sme dopredu vedeli, že v čase $T = 50$ min. dôjde ku skokovej zmene. Pokiaľ by sme dopredu vedeli o zmene referencie, akčný zásah by mohol zastaviť príkon na kompresory už skôr a tým by sme skôr dosiahli požadovanú referenciu. Predchádzajúcu úvahu dokumentujú nasledovné grafy.



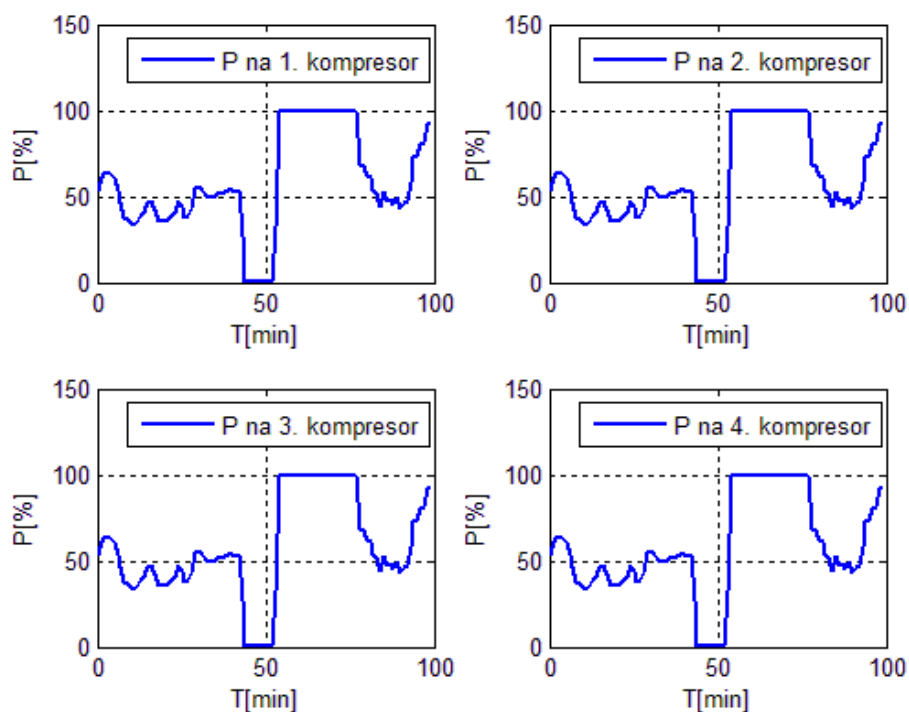
Obr. 27 Sledovanie objemu v zásobníku so známym výhľadom na požadovanú referenciu, pričom v zásobníku sa na začiatku nachádzali 2m^3 plynu, pričom referencia bola nastavená na hodnotu 1m^3 . zmena reference nastala v $T = 50$ min. z hodnoty 1m^3 na 500m^3



Obr. 28 Sledovanie objemového prietoku odkloneného na fléry so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu



Obr. 29 Objemový tok prečerpaný jednotlivými kompresormi so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu



Obr. 30 Príkon na jednotlivé kompresory so známym výhľadom na požadovanú referenciu v zásobníku plynu

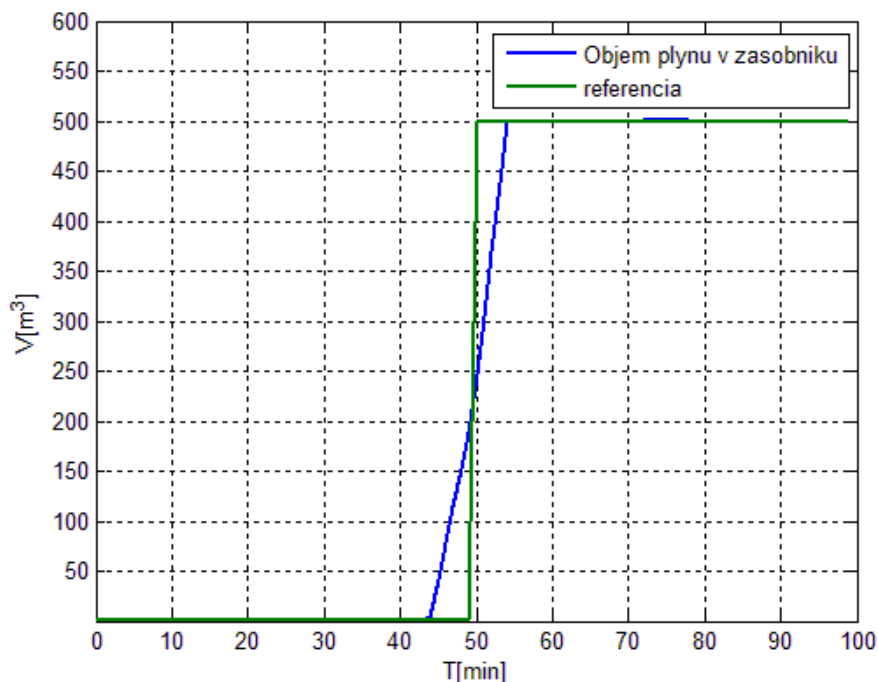
Celkove množstvo spálené na flerach: 244.20 m³

Vyhodnotenie výsledkov

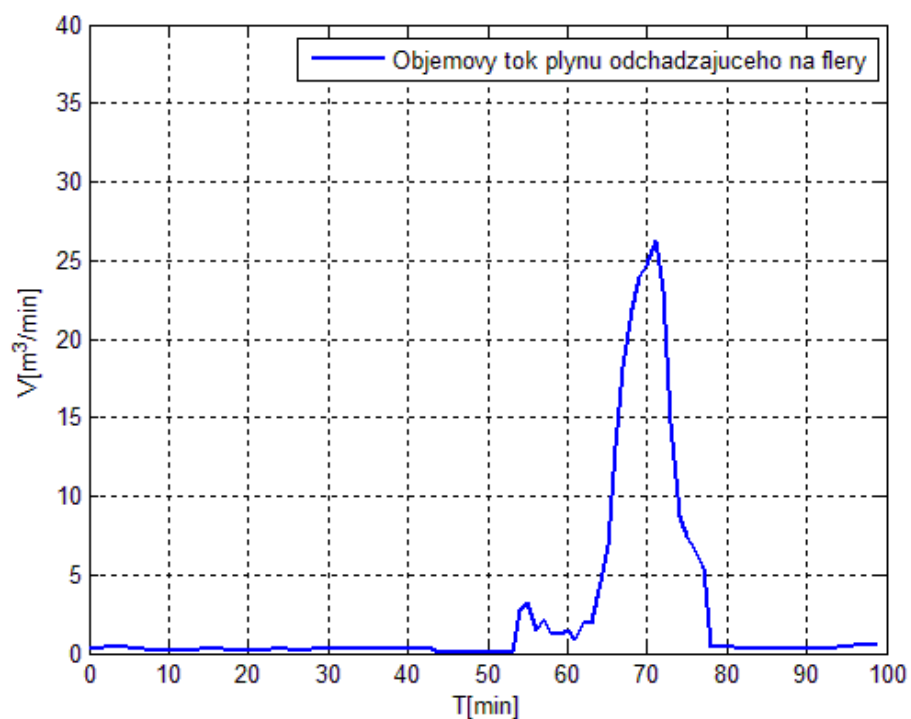
Nakoľko optimalizácia vedela dopredu o zmene referencie v $T = 50$ min., vedela upraviť svoje akčné zásahy na kompresory tak, že v čase $T = 45$ min. sa zastavil príkon na kompresory. To malo za následok napĺňanie zásobníka plynom ešte pred požiadavkou na skokovú zmenu. Referencia bola dosiahnutá v čase $T = 55$ min..

4.4 Modelová situácia 4

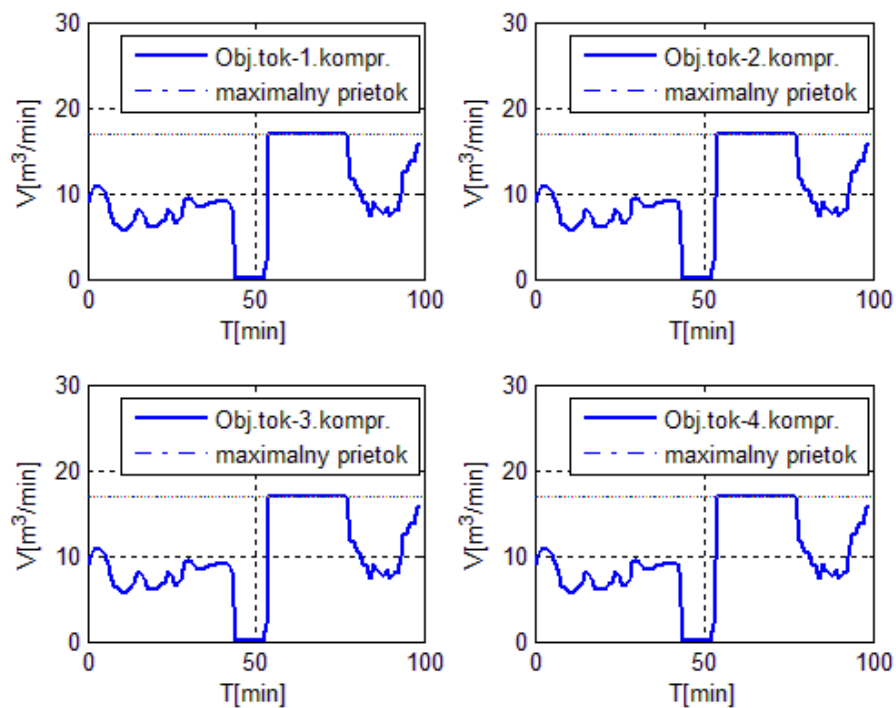
Nakoľko v predchádzajúcom scenári sme dosiahli lepšie výsledky s predpokladom, že sme poznali zmenu referencie dopredu, otázkou v tomto prípade je, či vedomosť o poruche by nám pomohla opäť znížiť aspoň časť nákladov. Preto budeme predpokladať, že aj výhľad poruchy do budúcnosti je známy.



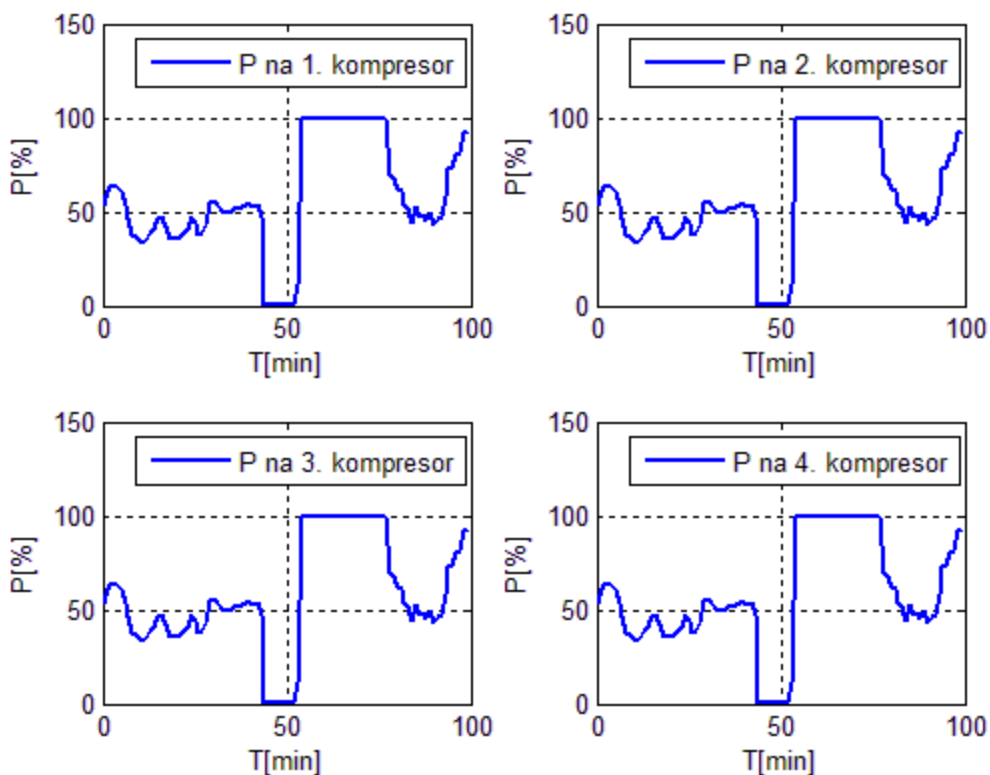
Obr. 31 Sledovanie referencie v zásobníku plynu pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií



Obr. 32 Objemový tok plynu spálený na flérach pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií.



Obr. 33 Objem stlačený kompresormi pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií



Obr. 34 Príkion nakompresory pri známom vývoji porúch a požadovaných referencií

Celkové množstvo spálené na flérach: 243.62m^3 . Táto hodnota je z pomedzi doterajších získaných hodnôt najnižšia (situácie 2,3,4). Sledovanie poruchy a referencie má svoj význam a to dokazuje najnižšia hodnota objemu plynu, ktorá musí ísť na fléry, a tým sa prichádza o vykurovací plyn.

4.5 Modelová situácia 5

V tejto kapitole rozšírime doterajšie uvažovanie o ďalšie ohraničenia a optimalizované premenné. Týmto krokom sa veľkou mierou priblížime k reálnemu systému, jeho optimalizáciou a riadeniu.

V úvode boli spomenuté niektoré predpoklady, ktoré teraz rozšírime o ďalšie:

Predpoklady pre zásobník:

- počiatočný objem v zásobníku je 1 m^3 plynu - dôvodom takejto referencie je snaha udržať čo najkonštantnejší objem plynu v zásobníku. Nakoľko reálna rekompresná stanica nemá žiadny zásobník, v ktorom by sa odpadový plyn z technológii mohol zachytávať, je nutné v danom momente odčerpať všetok prichádzajúci plyn. Váha na dodržanie referencie bude veľmi vysoká.
- z predchádzajúceho bodu vyplýva, že nie je nutné predpokladať zmenu referencie, pretože žiadna zmena nenastane
- objem v zásobníku nesmie nadobudnúť zápornú hodnotu
- maximálny objem zásobníka v tomto bode optimalizácie nie je potrebný definovať

Predpoklady pre vstupný prúd plynu:

- predpokladáme, že porucha (q_{in}) sa vyvíja náhodne (nič o nej nevieme)
- graf vývoja poruchy vstupujúci do rekompresnej stanice je na obr. 14

Predpoklady na spaľovanie:

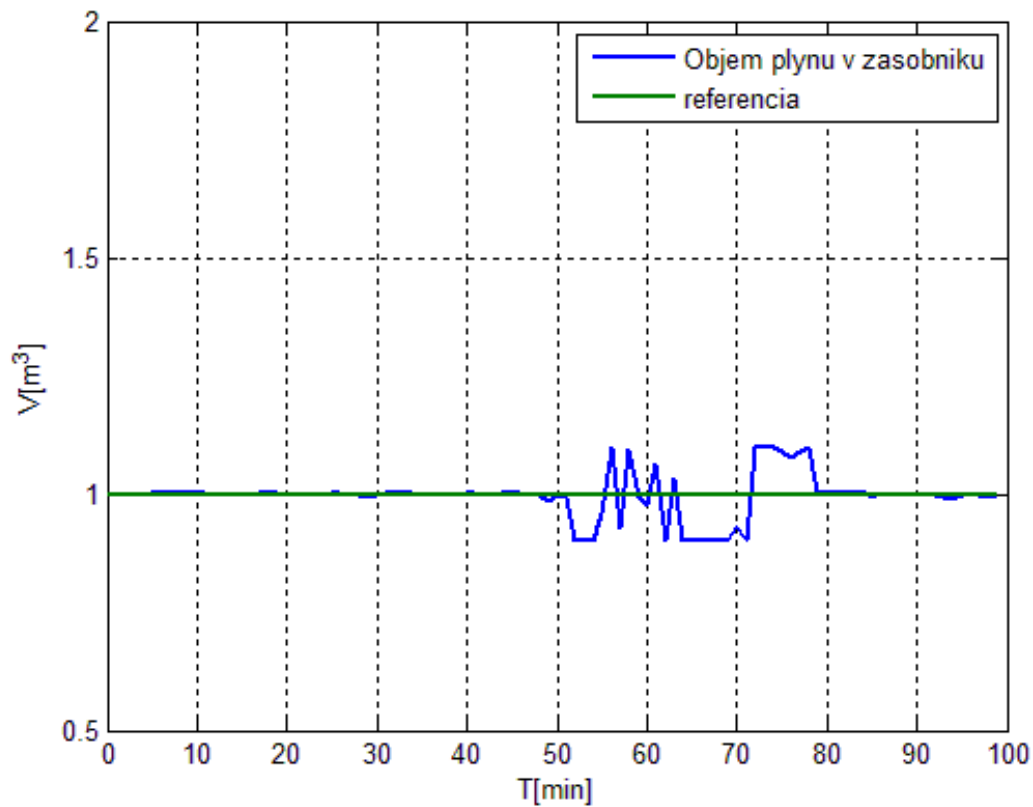
- v tomto bode optimalizácie budeme spaľovanie považovať za menej nákladné ako zvýšenie príkonu na kompresory. Ináč povedané, radšej plyn spálime, ako by sme mali výrazne a veľmi dynamicky meniť príkon na kompresory, aby sme udržali referenciu.

Predpoklady pre kompresory:

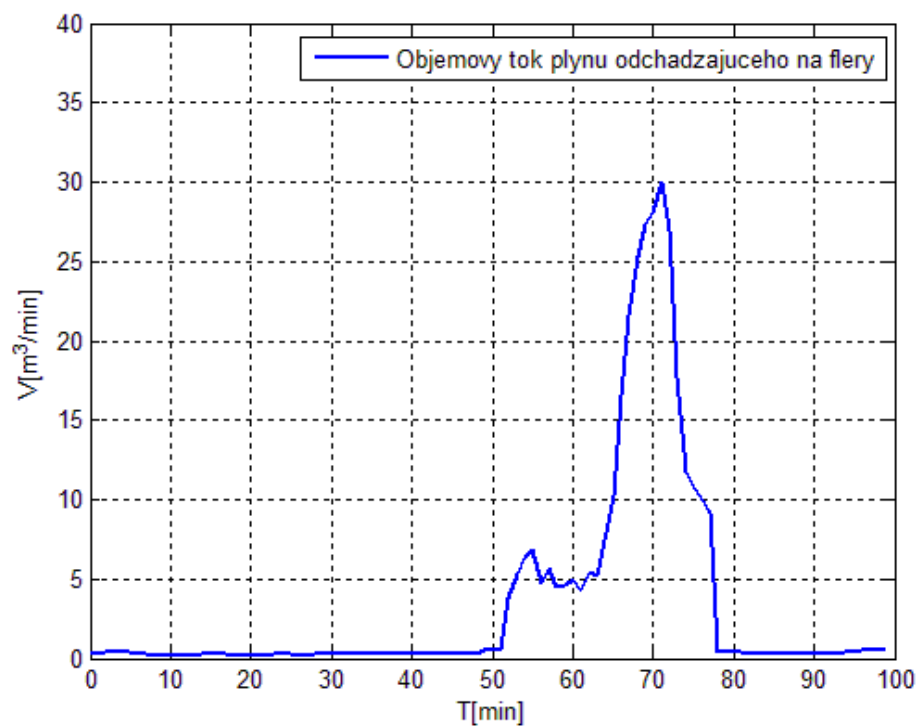
- všetky 4 kompresory budú pracovať podľa rovnakej výkonovej charakteristiky. zobrazenej v obr. 11.
- spotreba elektrickej energie všetkých kompresorov je rovnaká
- ohraničení na kompresory z hľadiska ich príkonu bude viac. Maximálny prečerpaný objem kompresormi je síce $17 \text{ m}^3/\text{min}$, ale pri reálnych zariadeniach je veľmi nežiaduce, aby stroje pracovali na svoje maximum, resp. minimum. Preto definujeme nové ohraničenia, ktoré budú hovoriť o minimálnom, resp. maximálnom príkone. Maximálny výkon kompresora je 95% výkonnosti kompresorov, minimálny na 20% výkonnosti kompresorov. Výnimku tvorí kompresor s frekvenčným meničom (4. kompresor), kde je nutné, aby pracoval minimálne na 25%.

Účelová funkcia je formulovaná tak, aby sa:

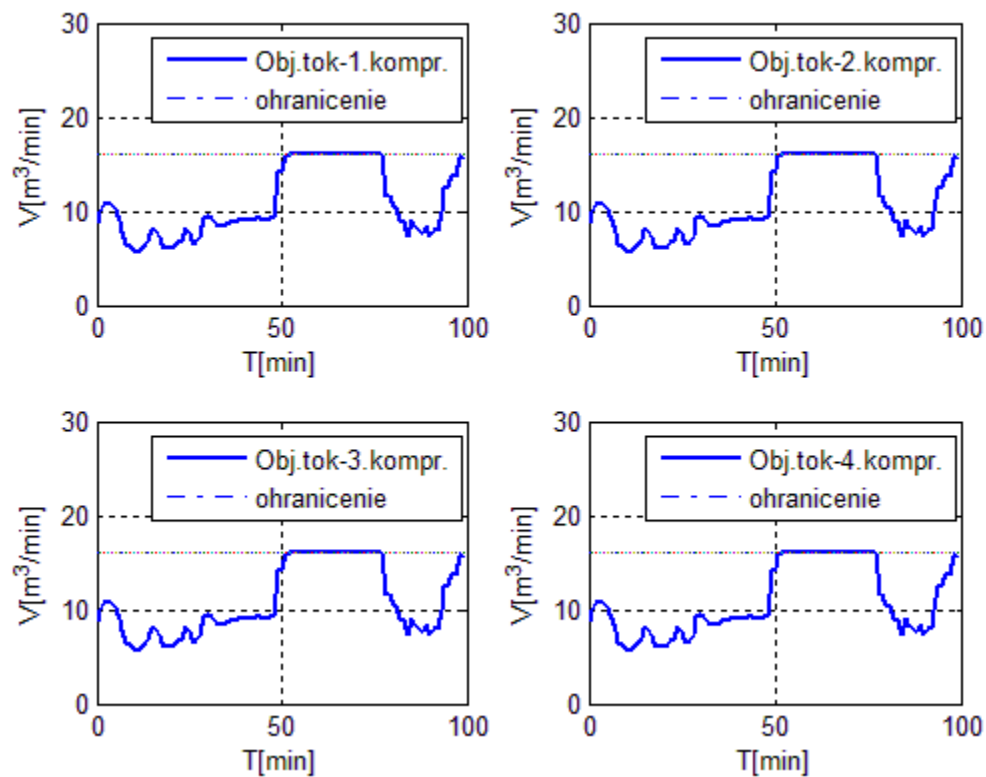
- sledovala požadovaná referencia v zásobníku
- minimalizovala spotreba elektrickej energie (minimalizácia príkonu na kompresory)
- minimalizácia spaľovania na flérach



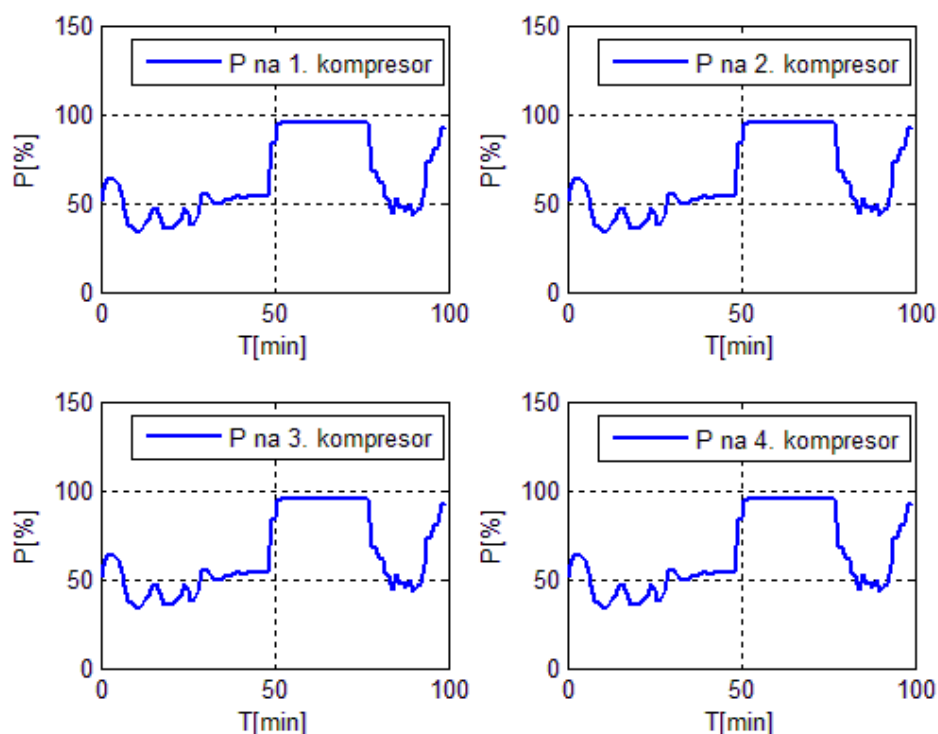
Obr. 35 Sledovanie referencie pri ohraničeníach na maximálny a minimálny výkon kompresorov



Obr. 36 Spaľovanie na flérach pri ohraničeníach na maximálny a minimálny výkon kompresorov



Obr. 37 Výkon kompresorov pri ohraničeníach na maximálny a minimálny výkon kompresorov

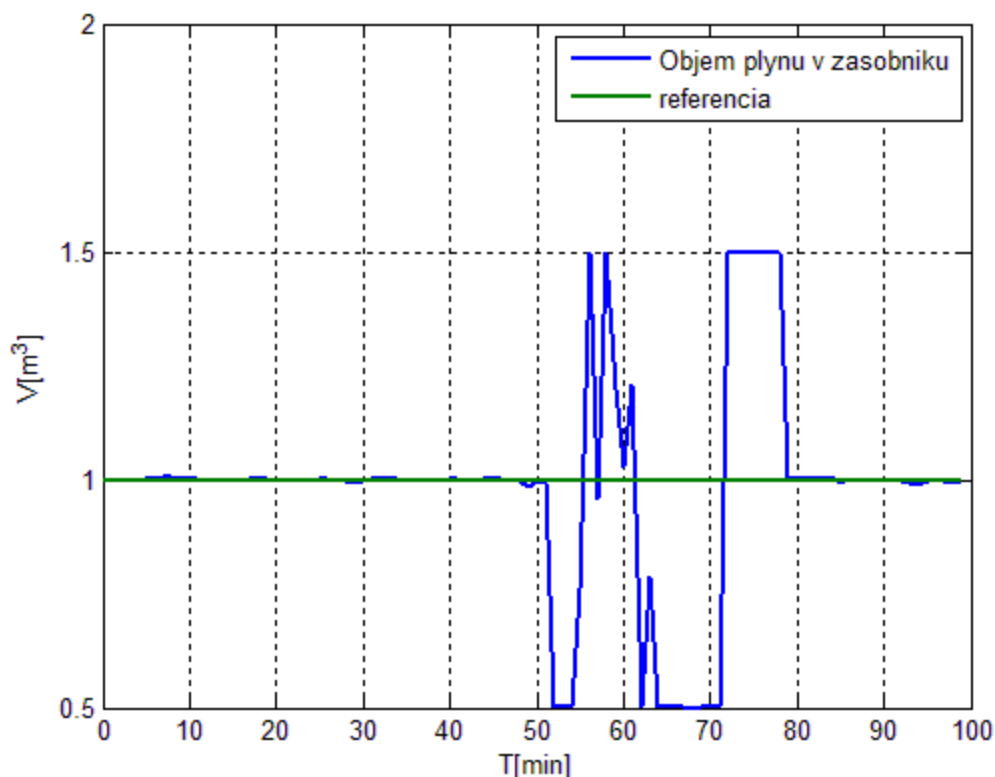


Obr. 38 Príkonná na kompresory pri ohraničeníach na maximálny a minimálny výkon kompresorov

Vyhodnotenie výsledkov

Celkové množstvo spálené na flérach: 338.00 m³

Nakoľko boli pridané dve ohraničenia, jedno z nich sa stalo neaktívnym a to minimálny príkon na kompresory. Už z predchádzajúcich grafov bolo viditeľné splnenie tejto podmienky, keď nebola definovaná. Ohraničenie na kompresory z hora je dané ako 95% z príkonu kompresora. Ani v jednej perióde vzorkovania nedošlo k výraznému porušeniu toho najdôležitejšieho - dodržať referenciu. Trošku sa však zmenila hodnota spáleného plynu na flérach. Preto v ďalšom kroku zvýšime penalizáciu na fléry a budeme sledovať ako sa zmení spálené množstvo plynu a dodržanie referencie.



Obr. 39 Sledovanie referencie pri vyššej penalizácii spaľovania plynu na flérach

Celkové množstvo spálené na flérach: 314.12 m^3 .

Dosiahli sme zmenšenie objemu plynu spáleného na flérach, ale za cenu toho, že referencia v zásobníku nesleduje referenciu. A to všetko za výhľadu referencie aj poruchy. V prípade veľkého kladení dorazu a penalizácie na spaľovanie, lepší výsledok asi nedosiahneme.

4.6 Modelová siituácia 6

V predošlých prípadoch sme ukázali, že sledovanie referencie a poruchy je užitočné, nakoľko dosahujeme lepšie výsledky. Preto toto budeme predpokladať stále, nakoľko sa snažíme získať najlepšie riadenie.

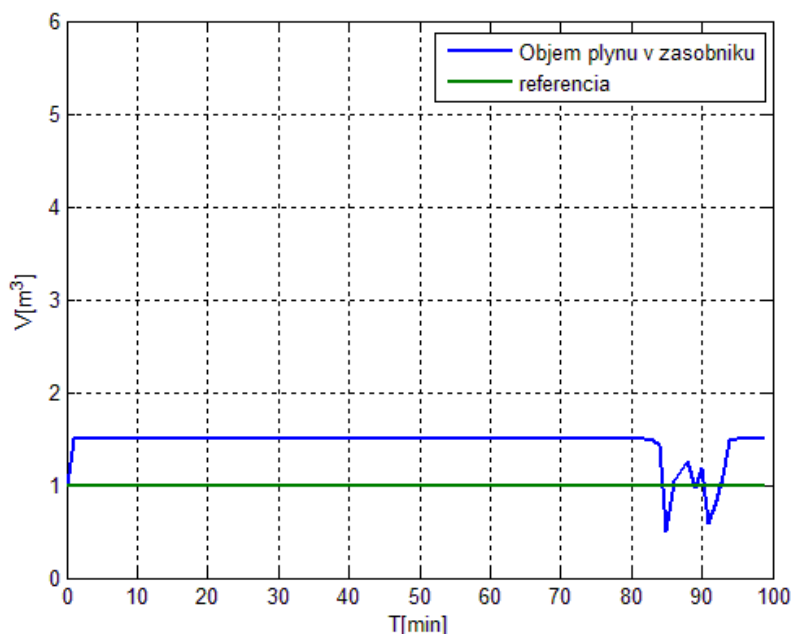
V tejto časti budeme predpokladať ohraničenia na kompresory v tom zmysle, že s pohľadu životnosti nie je vhodné, aby príkon na ne kolísal. Budeme preto chcieť, aby príkon na ne bol konštantný. Tomuto scenáru zodpovedajú tri kompresory, frekvenčný kompresor je

implementovaný práve na to, aby dokázal výkyvy sám vykryť. Na to, aby sme toto mohli dosiahnuť je nutné zavedenie delta u formulácie, ktorá nám povoľuje definovať maximálne resp. minimálne akčné zásahy (kap. 3).

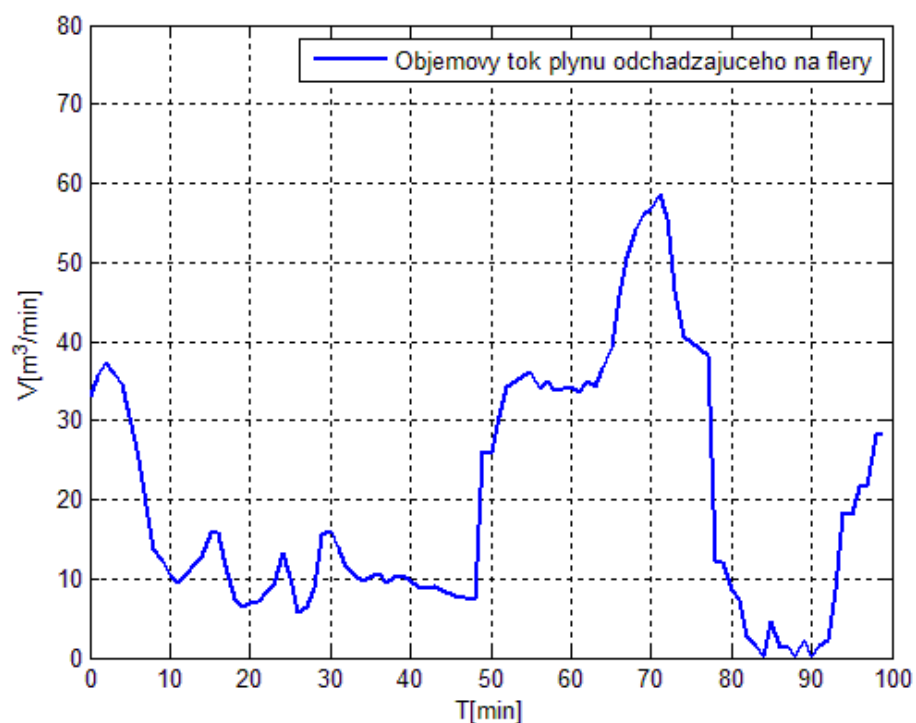
Po zavedení delta u formulácie a teda ohraničení akčných zásahov môžeme pozorovať, či naozaj prvé tri kompresory dokázali splniť podmienku rovnakého chodu počas celej periódy vzorkovania.

Pozorovanie s takto definovanými podmienkami nebolo možné, nakoľko takto definovaný a naformulovaný problém je neriešiteľný. Preto sme skúšali všelijaké možné kombinácie, menili sme váhové matice podľa preferencií i intuitívne a problém bol riešiteľný len v takomto prípade:

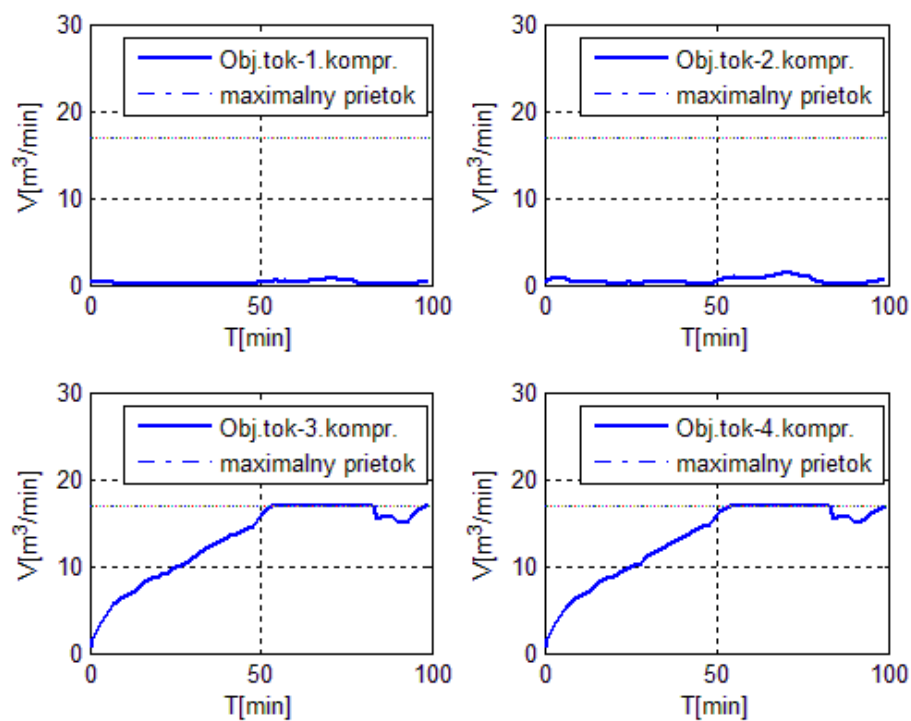
- muselo dôjsť úplnému odstráneniu ohraničení na výkon kompresorov
- požadovaná referencia 1 musela mať dovolené odchýlky od $+0.5$ až do -0.5 m^3
- podarilo sa zachovať aspoň v malej medze požiadavku na to, aby príkon kompresorov bol približne rovnaký



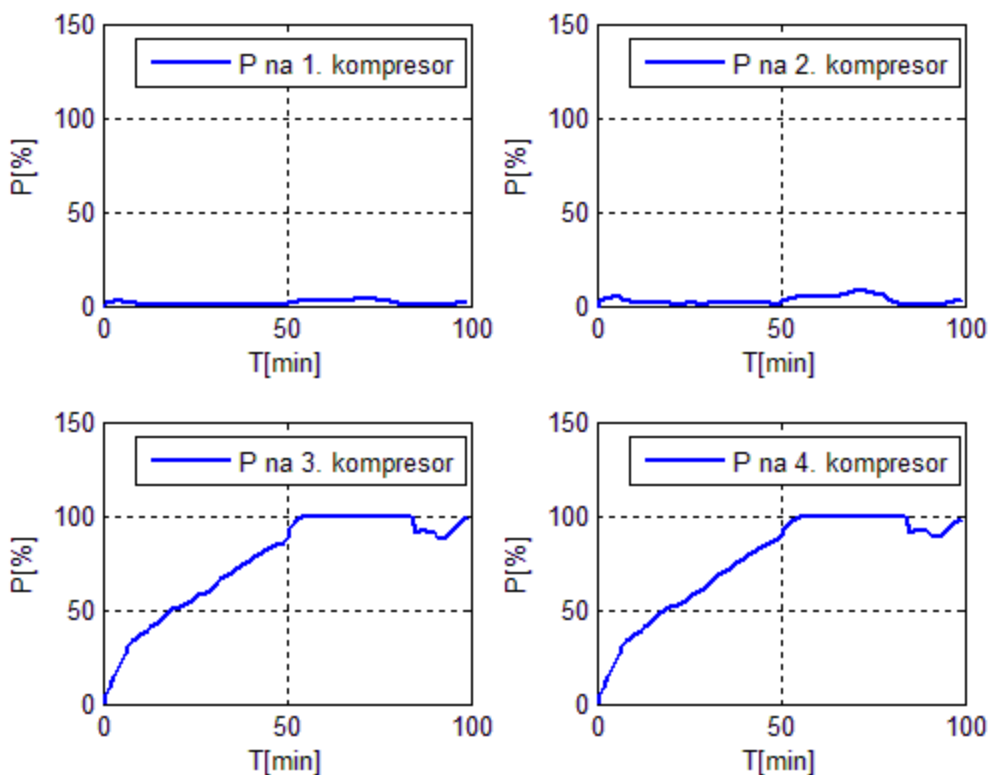
Obr. 40 Sledovanie referencie v zásobníku pri snahe udržať konštantný chod kompresorov



Obr. 41 Spaľovanie na flérach pri snahe udržať konštantný chod kompresorov



Obr. 42 Objemový prietok kompresorov pri snahe udržať konštantný chod kompresorov



Obr. 43 Príkony kompresorov pri snahe udržať konštantný chod kompresorov

Vyhodnotenie výsledkov

Bohužiaľ v tomto prípade, ako už bolo spomenuté, nebolo možné dodržať všetky ohraničenia, aj napriek tomu, že bolo snahou nájsť takú kombináciu s čo možno najväčšou úspešnosťou dosiahnutia optimálnosti. V tomto prípade o optimálnosti hovoriť nemôžeme, pretože dochádza k obrovskému spaľovaniu na flérach, nie sú dodržané podmienky pre minimálny a maximálny možný prietok. Jedinou pozitívnou stránkou je fakt, že sa nám podarilo dosiahnuť veľmi konštantné príkony na prvý a druhý kompresor, od polovice času simulácie aj na tretí kompresor, aj keď v prvom a druhom prípade sú veľmi nízke.

4.7 Záver výsledkov

Môžeme povedať, že riadenie modelov, od ktorých chceme, aby sa čo najviac podobali reálnemu systému je veľmi komplikované a človek, ktorý sa do niečoho takého pustí, musí mať už skúsenosti s obrovským množstvom vyriešených teoretických optimalizačných úloh. Taktiež je nutné disponovať s rozsiahlymi vedomosťami z oblasti prediktívneho riadenia, pretože aj veľmi jednoduchá formulácia problému môže neskúsenému optimalizérovi a tvorcovi MPC narobiť obrovské starosti. Avšak môžeme povedať, že sme aspoň z časti naplnili scenár tejto práce, nakoľko formulácie jednoduchšieho charakteru sa nám podarilo implementovať.

Záver

Cieľom práce bolo hlbšie pochopiť princípy a metódy využívané v optimalizácií a v prediktívnom riadení. Ako model bol použitý model rekompresnej stanice, ktorý sa nachádza v areáli spoločnosti Slovnaft a.s.. Podstatnou časťou práce bolo aj pochopenie princípu fungovania spoločnosti, naučiť sa pracovať s technologickými reglementami a hľadať v nich podstatné informácie.

Po porozumení princípu fungovania rekompresnej stanice, práci kompresorov a funkcii poľných horákov bolo možné prejsť k návrhu jednoduchého regulátora, navrhnutého pomocou metódy umiestenia pólov. Takto navrhnutý regulátor bol označený za nevhodný pre riadenie takéhoto modelu prevádzky, nakoľko pomocou neho nie je triviálne možné ohraničiť tie veličiny, ktoré ohraničiť bolo nutné.

Jadrom práce bola práca s optimalizáciou a návrhom prediktívneho regulátora, ktorého základné dve časti - účelová funkcia a ohraničenia, nám dovolili naformulovať optimalizačný problém.

Následne sme predpovedali scenár, ktorý bol vyhodnotený pomocou spätnoväzbovej simulácie a vygenerovaných grafov. Pridávaním ohraničení, penalizácií sme sa však dostali do situácie, keď nebolo možné dosiahnuť požadované stavy a výstupy. Dosiahli sme ich len čiastkovo aj to za porušenia ohraničení.

V závere práce je zakomponované teoretické riešenie toho, ako zakomponovať výkonové charakteristiky kompresorov v čo v najreálnejšom tvare.

Táto práca mi pomohla v prvom rade pochopiť princíp fungovania MPC a optimalizácie dokopy, získala som nové poznatky, ktoré po vypracovaní tejto práce už budem vedieť aplikovať.

Aj napriek tomu, že výsledky práce v závere nie sú úplne správne, som veľmi rada, že som na tejto práci mohla pracovať, pretože mi dala veľmi veľa a myslím, že to je základom všetkých záverečných prác - niečo človeka naučiť a posunúť ho ďalej.

Zoznam použitej literatúry

- BAKOŠ, J. 2008. *Technologický reglement trvalej prevádzky pre výrobnú jednotku poľné horáky a rekompresná stanica*. Bratislava: Slovnaft a.s.
- BAKOŠOVÁ, M., FIKAR, M. 2008. *Riadenie procesov*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave.
- BEREŽNÝ, Š., KRAVECOVÁ, D. 2012. *Lineárne programovanie - vysokoškolská učebnica*. Košice: Technická univerzita v Košiciach.
- BISHOP, H. R. 2004. *Model-based Predictive Control*. New York: CRC Press.
- BOYD, S., VANDENBERGHE, L. 2009. *Convex optimization*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KAMINSKÝ, J., KOLARČÍK, K. *Kompresory*. Ostrava: VŠB – TU.
- KVASNICA, M. 2013. *Úvod do prediktívneho riadenia*.
- MIKLEŠ, J., FIKAR, M. 1999. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 1*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave.
- MIKLEŠ, J., FIKAR, M. 2004. *Modelovanie, identifikácia a riadenie procesov 2*. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislave.
- NUNES, G. C. 2001. *Design and analysis of multivariable predictive control applied to an oil-water-gas separator: a polynomial approach*. Florida: University of Florida.
- PAČESA, J. 2013. *Statická a dynamická optimalizácia sieťových systémov*: diplomová práca. Bratislava: FCHPT STU.

Prílohy

Príloha 1 - CD