



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# MATEMATICKÉ MODELY PRO MONITOROVÁNÍ HLAVNÍCH ZAŘÍZENÍ TEPELNÉ ELEKTRÁRNY

MATHEMATICAL MODELS FOR MONITORING THE MAIN EQUIPMENT OF A THERMAL POWER PLANT

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Eliška Kopecká**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Pavel Milčák**

**BRNO 2023**



## Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	<b>Bc. Eliška Kopecká</b>
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Pavel Milčák</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Matematické modely pro monitorování hlavních zařízení tepelné elektrárny**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Tepelná účinnost provozované tepelné elektrárny závisí na stavu (zdraví) jednotlivých zařízení tepelného cyklu a regulaci tepelného cyklu. Jedním z cílů provozu tepelné elektrárny je, pro dané okrajové podmínky, provozovat elektrárnu blízko jejího optima, tj. s maximální tepelnou účinností nebo maximální dodávkou výkonu (elektrické energie a tepla). Pro zajištění tohoto požadavku slouží úlohy diagnostiky a optimalizace.

#### **Cíle diplomové práce:**

- popis tepelného cyklu a vliv vybraných zařízení na účinnost tepelného cyklu,
- popis jednotlivých typů matematických modelů,
- důležitost monitorování stavu (zdraví) kondenzátoru,
- empirický model kondenzátoru,
- příkladová studie využití empirického modelu kondenzátoru.

#### **Seznam doporučené literatury:**

KRBEK, Jaroslav, Jan FIEDLER a Bohumil POLESNÝ. Strojní zařízení tepelných centrál: návrh a výpočet. Brno: PC-DIR, 1999, 217 s. ISBN 80-214-1334-4.

MAROŠ, Bohumil. Empirické modely I: analýza inženýrského procesu. Brno: CERM, 2001, 112 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-214-1984-9.

KADRNOŽKA, Jaroslav. Tepelné elektrárny a teplárny. Praha: SNTL, 1984, 607 s.

H.E.I. Standards for Steam Surface Condensers. 12th edition. Cleveland, Ohio: Heat Exchange Institute, 1995.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vytvořením empirického modelu kondenzátoru tepelné elektrárny. V první kapitole jsou blíže specifikována jednotlivá zařízení tepelné elektrárny, která výrazně ovlivňují její účinnost a je zde také popsán kondenzátor v Rankine-Clausiově cyklu. Druhá kapitola je zaměřena na jednotlivé kroky, které vedou k vytvoření empirického modelu. V této kapitole je představena metoda nejmenších čtverců, která je hlavní metodou vícerozměrné lineární regresní analýzy. Ve třetí kapitole jsou popsány fyzikální děje v kondenzátoru a možné závady, které mohou omezit jeho účinnost i účinnost celé elektrárny. Čtvrtá kapitola je aplikování druhé kapitoly na konkrétní případ. Zabývá se konkrétním návrhem empirického modelu kondenzátoru pro konkrétní tepelnou elektrárnu. V poslední kapitole je popsáno využití empirického modelu kondenzátoru v praxi pro detekci změn stavu v kondenzátoru. V závěru jsou zhodnoceny výsledky práce.

### Klíčová slova

Kondenzátor, empirický model, regresní analýza, diagnostika dat

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the creation of an empirical model of a thermal power plant condenser. The individual devices of the thermal power plant are specified in the first chapter in more detail, which significantly affect its efficiency. The condenser in the Rankine-Clausius cycle is also described here. The second chapter is focused on the individual steps that lead to the creation of an empirical model. This chapter introduces the method of least squares, which is the main method of multivariate linear regression analysis. In the third chapter are described physical events in the condenser and possible defects that can limit its efficiency. The fourth chapter is the application of the second chapter to a specific case. It deals with the specific design of empirical condenser model for a specific thermal power plant. The last chapter describes the use of the empirical condenser model in practice for the detection of state changes in the condenser. At the end, the results of the work are evaluated.

### Key words

Condenser, empirical model, regression analysis, data diagnostics

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOPECKÁ, Eliška. *Matematické modely pro monitorování hlavních zařízení tepelné elektrárny* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/148593>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Matematické modely pro monitorování hlavních zařízení tepelné elektrárny vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Eliška Kopecká

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Pavlu Milčákovi a kolegům z I&C Energo za vstřícnost, ochotu, cenné připomínky a rady, které mi poskytli při vypracování závěrečné práce. Také děkuji mojí rodině za podporu.



## OBSAH

ÚVOD.....	7
1 Popis tepelného cyklus a dílčích zařízení.....	8
1.1 Carnotův cyklus.....	8
1.2 Rankine-Clausiiův cyklus.....	9
1.2.1 Carnotizace.....	12
1.3 Zařízení ovlivňující účinnost elektrárny.....	15
1.3.1 Turbína.....	15
1.3.2 Chladicí věže.....	15
1.3.3 Kondenzátor.....	16
2 Modelování.....	19
2.1 Matematické modely.....	19
2.1.1 Empirické modely.....	20
2.2 Regresní analýza.....	20
2.3 Lineární regresní analýza.....	20
2.3.1 Metoda nejmenších čtverců.....	21
2.4 Empirický model.....	23
2.4.1 Návrh regresního (empirického) modelu.....	23
2.4.2 Volba vstupních proměnných.....	23
2.4.3 Odhad regresních koeficientů a regresorů.....	24
2.4.4 Regresní diagnostika – Diagnostické grafy a statistiky.....	24
3 Monitorování stavu kondenzátoru.....	29
3.1 Fyzikální principy v kondenzátoru.....	29
3.2 Popis závad.....	30
3.2.1 Přisávání okolního vzduchu netěsností.....	30
3.2.2 Zhoršená funkčnost vývěv.....	31
3.2.3 Zanášení vnitřního povrchu trubek kondenzátoru.....	31
3.2.4 Souhrn.....	32
4 Empirický model kondenzátoru.....	33
4.1 Zpracování dat.....	35
4.2 Postup výstavby lineárního regresního modelu.....	36
4.3 Model – predikce tlaku.....	38
4.3.1 Validace modelu.....	43
4.4 Model – predikce teploty.....	44
4.4.1 Validace modelu.....	49
4.5 Shrnutí – výběr modelu.....	50
4.5.1 Přepočet z modelu teploty na tlak.....	50
4.5.2 Validace.....	52
5 Využití empirického modelu v praxi.....	53

5.1 Princip diagnostiky – hledání závady .....	53
ZÁVĚR .....	56
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	57
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	59
SEZNAM PŘÍLOH .....	60
PŘÍLOHY .....	61

## ÚVOD

Dnešní moderní společnost považuje stálý přístup k elektrické energii za standard. Každý z nás očekává, že když se setmí, může si rozsvítit, když se chce umýt, poteče teplá voda a také předpokládá, že el. energii bude moci používat pro spoustu dalších pro nás samozřejmých věcí.

Tyto „samozřejmosti“ zajišťují převážně elektrárny, které jsou však pouhá zařízení, která se mohou kdykoli porouchat. Poruchy často vychází z malých závad, které při včasném odhalení mohou být vyřešeny i za provozu a nemusí dojít k nepříjemnostem způsobených drobnou závadou. Abychom včas odstraňovali poruchy a udržovali elektrárny v provozu schopném stavu, ideálně kolem optima, je vhodné, kromě dodržování všech pravidel vycházejících z provozních předpisů a systémů řízení údržby, mít kontrolní systémy. Tyto systémy přispívají k zefektivnění provozu a předcházení katastrof (př. včasná výměna komponenty zařízení) a tím i ekonomickým ztrátám (př. neplánovaná odstávka elektrárny).

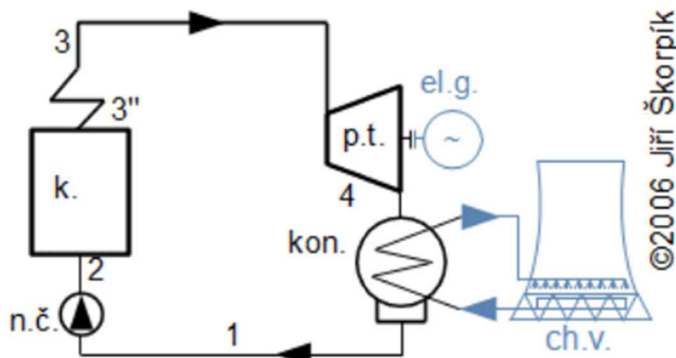
Kontrolní systémy mohou mít různé podoby, diplomová práce se zaměřuje na diagnostiku zařízení pomocí empirických modelů, konkrétně na modelování lineární regresní analýzou. Regresní analýza pouze na základě vstupních parametrů popíše průběh výstupních dat, zobrazí predikci aktuálního průběhu chování zařízení. Model dokáže reagovat i na změnu vstupních parametrů z důvodu změny provozních podmínek v reálném provozu.

Kontrolní systém do tepelné (uhelné) elektrárny je implementován s cílem zvýšení efektivity elektrárny, zlepšení monitoringu a optimalizace jednotlivých zařízení na tepelné elektrárně. Empirický model by měl také pomoci zajistit nezávislou kontrolu jednotlivých zařízení. K těmto účelům je třeba vytvořit model „zdravého“ zařízení, díky kterému bude možné sledovat aktuální změny stavu zařízení.

Cílem této diplomové práce je vytvoření empirického modelu kondenzátoru. První část je zaměřena na úlohu kondenzátoru v R.-C. cyklu a jak lze ovlivnit jeho účinnost a tím i účinnost celé elektrárny. Ve 2. kapitole je popsán postup sestavování vhodného empirického modelu kondenzátoru lineární regresní analýzou, který je následně navržen ve 4. kapitole. Ve 3. kapitole je věnována pozornost popisu funkce kondenzátoru a fyzikálním principům uvnitř, včetně popisu závad, které by v případě vzniku negativně ovlivnily účinnost kondenzátoru. V kapitole 4 jsou uvedeny možné návrhy empirického modelu kondenzátoru, které popisují dění v kondenzátoru. Empirický model je vytvářen za základě získaných dat z uhelné elektrárny. Podmínkou pro vytvoření správného modelu je bezzávadový stav kondenzátoru. Výstupní hodnoty z empirického modelu jsou pro lepší názornost vyneseny do grafů. Kontrola navržených modelů se provádí validací modelu, tzn. vytvořený model je aplikován na data z jiného časového úseku k ověření správnosti modelu. Závěrem je provedena ukázka jeho využití na elektrárně.

## 1 Popis tepelného cyklus a dílčích zařízení

Všechny tepelné elektrárny jsou charakterizovány tepelným oběhem. [1] Tato práce se bude zabývat kondenzační elektrárnou. Kondenzační elektrárna může být jak jaderná, tak i klasická (uhelná). Na Obr. 1 je zakresleno schéma uhelné elektrárny. Schéma jaderné elektrárny by se lišilo v absenci kotle, ten by byl nahrazen systémem chlazení aktivní zóny reaktoru. Oblast přehřáté páry (mezi body 3 a 3') by u jaderné elektrárny rovněž chyběla, protože PWR reaktor pracuje pouze se sytou parou.



Obr. 1 Schéma tepelné elektrárny [2]

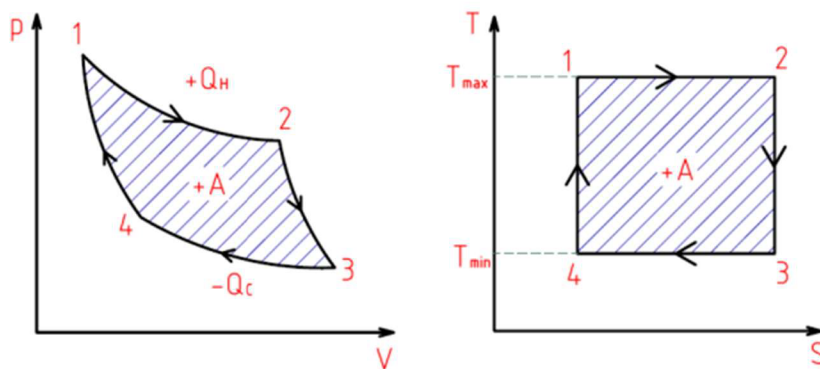
**k.** parní kotel (parogenerátor v případě jaderných elektráren); **p.t.** parní turbína popřípadě i jiný typ parního motoru; **el.g.** elektrický točivý generátor; **kon.** kondenzátor; **ch.v.** chladič věž pro chlazení vody zvyšováním relativní vlhkosti vzduchu; **n.č.** napájecí čerpadlo (zvyšuje tlak proudící vody do kotle).

### 1.1 Carnotův cyklus

Základním oběhem popisující tepelné jevy je Carnotův cyklus (Obr. 2), tento tepelný cyklus je nejjednodušší a nejdokonalejší. Cyklus slouží k transformaci tepelné energie na práci. Jeho účinnost je možné po úpravě vyjádřit následujícím vztahem (1.1).

$$\eta = \frac{a}{q_{in}} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}, \quad (1.1)$$

kde  $T_{min}$  a  $T_{max}$  udávají teplotní rozsah, mezi kterým operuje pracovní médium, viz Obr. 2. [1]



Obr. 2 Carnotův cyklus v  $p$ - $V$  a  $T$ - $s$  diagramu [3]

Pro parostrojní zařízení však Carnotův cyklus nelze využít, protože při neúplné kondenzaci mokré páry je nutno komprimovat mokrou páru o velkém měrném objemu. Tento fakt se projeví na kompresní práci a také na velikosti kompresního zařízení. [1]

Značně dokonaleji popisuje kondenzační elektrárny Rankine-Clausiiův cyklus. Mnohem přesněji popisuje tepelný oběh, avšak jen v ideálním stavu. Více bude cyklus rozebrán v následující kapitole 1.2.

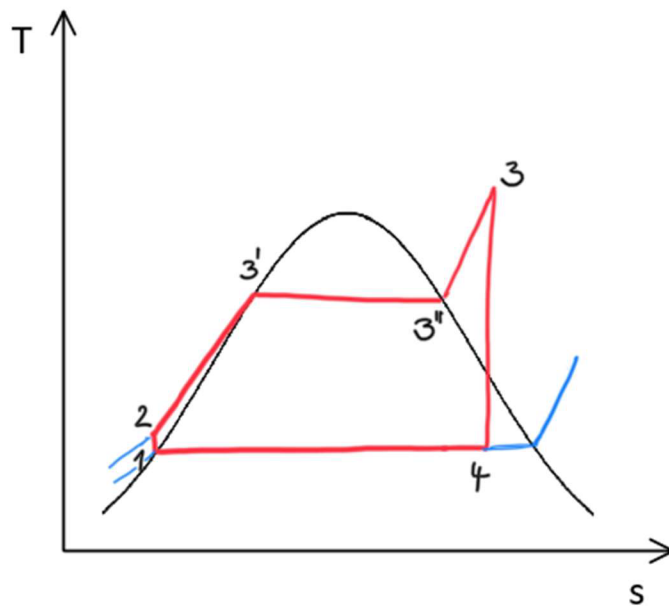
## 1.2 Rankine-Clausiiův cyklus

Rankine-Clausiiův cyklus je nejrozšířenější tepelný oběh v energetice. Efektivně přeměňuje teplo pracovní látky na mechanickou energii. Nejběžnější pracovní látkou je voda/pára. Pokud je pracovní látkou jiné médium, tento cyklus je označován jako ORC, tzn. Organic Rankine cycle. S ohledem na dostupnost a cenu je však ve většině případů využívána voda. [2]

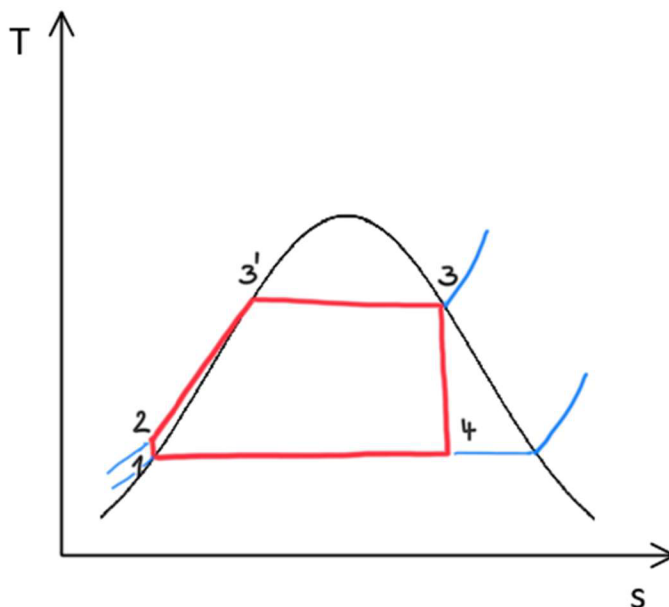
Na Obr. 1 a Obr. 3 je vidět přenesení schématu elektrárny do T-s diagramu. V první kroku přeměny dochází mezi body 1 a 2 ke zvýšení měrné energie, a tedy i tlaku v oběhu prací čerpadla ( $a_{\text{č}}$ ) z tlaku  $p_1$  na  $p_2$ . [2]

Předání tepla ze zdroje do teplonosného média probíhá mezi body 2 a 3'. [2] V případě uhelných elektráren je použit kotel, který obsahuje teplené výměníky (výparník, šotový ohřívák, přihřívák, EKO atd.), ve kterých dochází ke vzniku syté páry. Ke zvýšení účinnosti je ve většině případů využíváno přehřívání páry přehřívákem – oblast mezi body 3' až 3. V případě jaderných elektráren je jako zdroj tepla použit jaderný reaktor, ve kterém vzniká tepelná energie jaderným štěpením. Pro přenos vzniklé tepelné energie je zde použit parogenerátor, který předává energii vzniklou štěpením do teplonosného média. V tomto případě se nevyužívá přehřívání (viz Obr. 4). V této části (2 až 3) dochází k izobarickému přívodu tepla médiu –  $q_{\text{in}}$ . [2]

Další částí, společnou pro oba typy elektráren, je parní turbína. Za ideálního stavu by zde probíhala izoentropická expanze (úsek 3 až 4). Následujícím zařízením je kondenzátor, ve kterém vodní pára kondenzuje na vodu a shromažďuje se v sběrači kondenzátu, aby byla opět využita v oběhu. Kondenzaci výpočtově popisujeme jako izobarické ochlazování pracovního média –  $q_{\text{out}}$ . Chladící vodu do kondenzátoru lze dále ochlazovat v chladicích věžích nebo jinými způsoby. [2] V této práci bude dále rozebírán pouze cyklus pro uhelné elektrárny.



Obr. 3 Ideální oběh v T-s diagramu s přehříváním



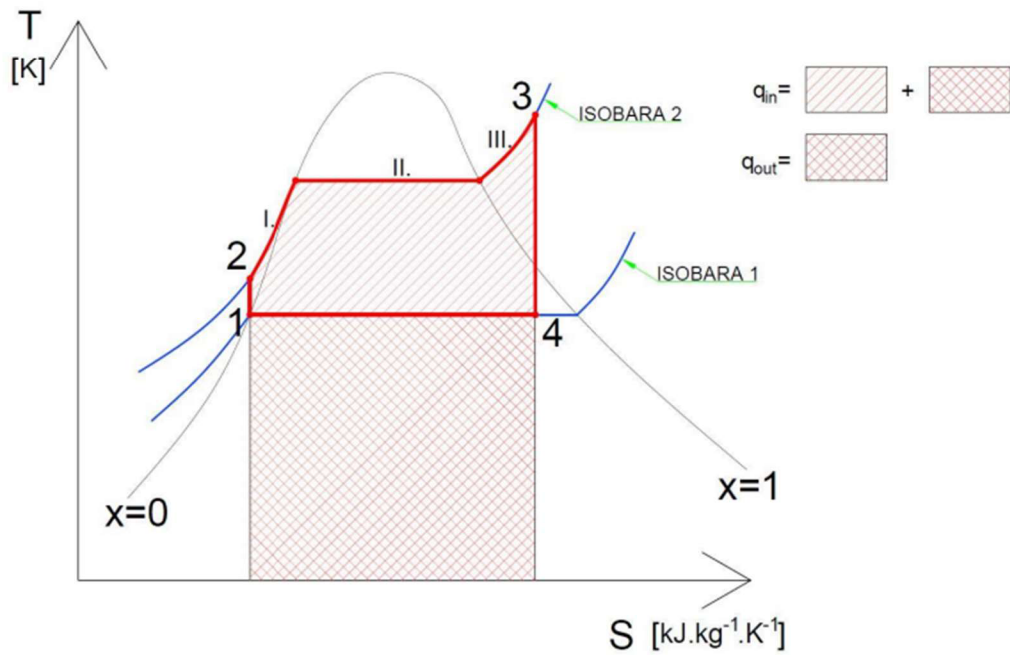
Obr. 4 Ideální oběh v T-s diagramu se sytou parou

Celkovou tepelnou účinnost Rankine-Clausiova cyklu lze vyjádřit následujícím vztahem

$$\eta_{termická} = \frac{q_{přivedené} - q_{odvedené}}{q_{přivedené}} \quad (1.2)$$

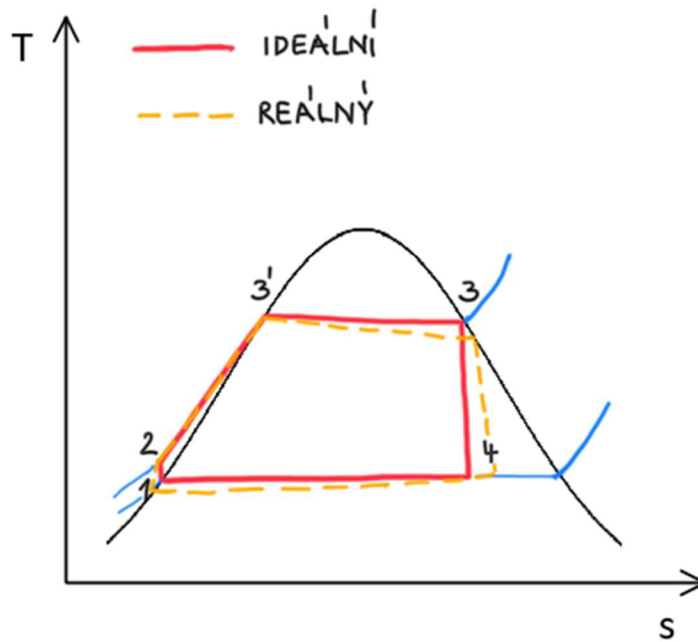
$$\eta = \frac{a}{q_{in}} = \frac{q_{in} - q_{out}}{q_{in}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_1)}{h_3 - h_2} = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}}, \quad (1.3)$$

kde  $q_{in}$  je teplo přivedené do cyklu,  $q_{out}$  je teplo odvedené z cyklu a  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  a  $h_4$  jsou entalpie v daných bodech. Graficky je to znázorněno na Obr. 5. [4]



Obr. 5 T-s diagram zobrazení tepla vstupujícího a vystupujícího z R.-C. cyklu [5]

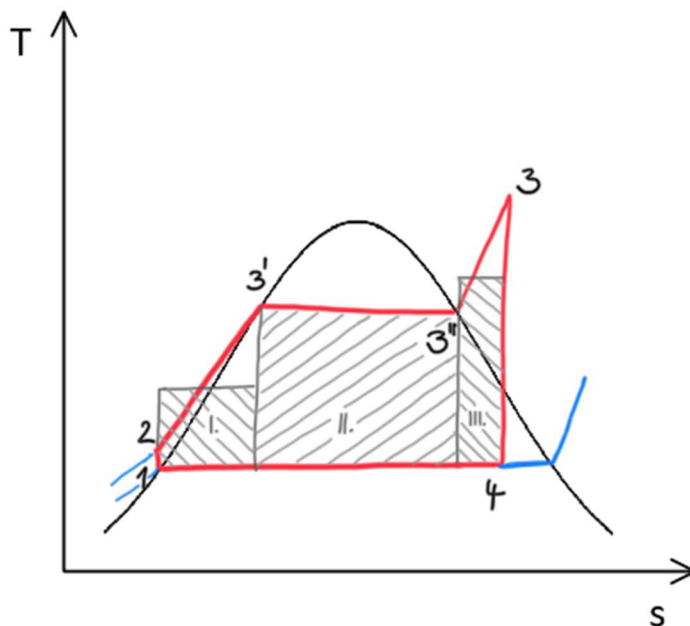
V předchozím odstavci bylo popsáno základní ideální schéma R.-C. cyklu. V reálném provozu je snaha se mu co nejvíce přiblížit. Další kapitola bude zaměřena na optimalizaci reálného R.-C. cyklu (Obr. 6), na tzv. carnotizaci. Tou lze dosáhnout celkového zvýšení účinnosti. Nejčastěji pomocí regenerace tepla pro ohřev napájecí vody (nízkotlaké a vysokotlaké ohříváky – NTO a VTO) a přehříváním páry. [2]



Obr. 6 Schéma reálného R.-C. cyklu

### 1.2.1 Carnotizace

Carnotův cyklus, který popisuje děj v ideálním tepelném stroji, má nejvyšší účinnost, proto je snaha se k němu přiblížit tzv. Carnotizací cyklu. Účinnost je tím vyšší, čím má poměr  $T_{min}$  ku  $T_{max}$  nižší hodnotu (viz vzorec (1.1)). Dílčí účinnost – oblast I na Obr. 7 je nejnižší, proto je snaha ji potlačit regeneračním ohřevem a tím zvýšit teplotu  $T_2$  (v bodě 2), aby se co nejvíce eliminovalo snižování účinnosti celého cyklu. Naopak nejvyšší dílčí účinnost je na Obr. 7 účinnost označená jako oblast III, proto se carnotizace zaměří převážně na ni, a proto je snaha ji zopakovat (přihřívání). [1] [4]



Obr. 7 Schéma carnotizace

Účinnost elektrárny se dá zvýšit mnoha způsoby, některé budou v následující části podrobněji rozebrány. Jedná se o:

- Přehřátí páry před turbínou
- Zvýšení tlaku páry před turbínou
- Přihřívání páry
- Snižování teploty kondenzace
- Regenerační ohřev napájecí vody

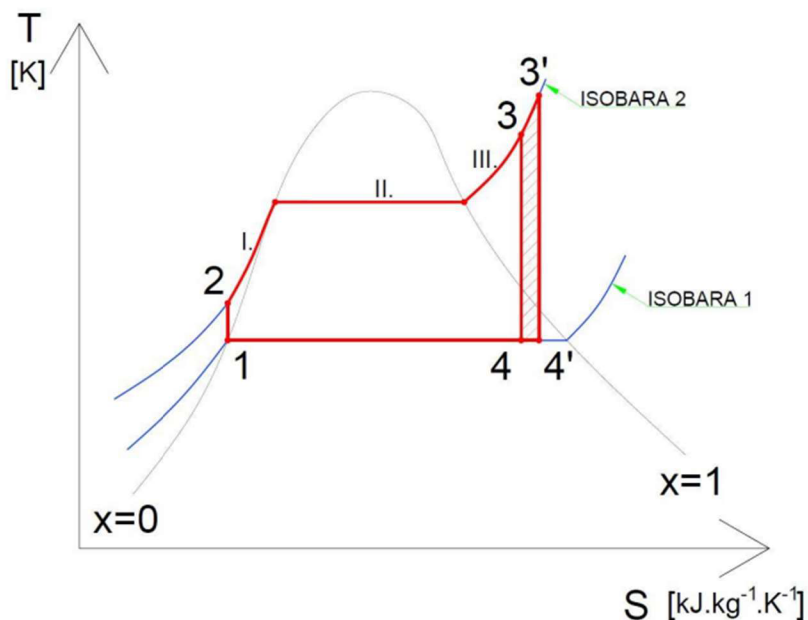
Tyto úpravy cyklu mají vliv i na tlak páry (resp. teplotu). Tlak páry v kondenzátoru má vliv na hodnoty tlaku páry na výstupu z turbíny. Sledování tlaku indikuje, v jakém stavu je aktuálně kondenzátor. Při jakékoli poruše či změně provozního stavu se tlak v kondenzátoru zvyšuje, a to má vliv i na růst teploty a tím se snižuje účinnost celého cyklu, viz vzorec (1.1).

#### Přehřívání

Prvním vlivem, který bude rozebrán, je vliv vstupních parametrů páry, především teploty. Zvyšování teploty páry před turbínou vede k růstu vykonané práce během expanze. Současně snižuje množství kapalné fáze na konci expanze v turbíně a tím se snižuje eroze.



Nejjednodušší je zvýšení teploty páry přehříváním v kotli. Vidno na schématu (Obr. 8) T-s diagramu, kde bod 3 je posunut až do bodu 3'. Jedná se o izobarický přívod tepla, díky kterému se expanzní křivka přiblíží ke křivce suchosti. Přehřívání přináší výhodu ve snížení vlhkosti páry na konci expanze v turbíně. Zobrazeno v T-s diagramu bodem 4'. Vysoká teplota si klade nároky na materiál přehříváku v kotli i na materiál prvního stupně lopatkování turbíny. [6] [4]



Obr. 8 T-s diagram s přehříváním páry před turbínou [5]

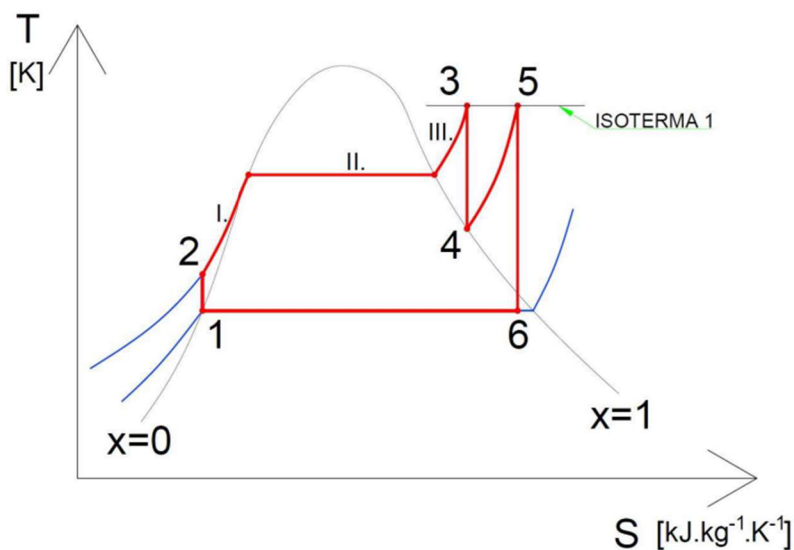
### Přehřívání

Další možností zvýšení účinnosti je přehřívání páry. Významnost tohoto efektu je značná. Přehřívání se navrhuje na základě výpočtu teplotního schématu (vlastním omezením je hodnota vlhkosti/suchosti páry na výstupu z turbíny) a jeho optimalizace. Pokud je přehřívání vhodné, využívá se těchto dat, jako vstupních dat, při návrhu turbíny (hlavně u víceetapové turbíny). Nejběžněji se přehřívá před nízkotlakým dílem (tzn. mezi VT a NT dílem nebo mezi ST a NT dílem). [7]

Je nutná optimalizace procesu přehřívání a nalezení optimálního rozdělení expanze, pro dosažení co nejlepší možné účinnosti. Jedná se především o optimalizaci tlaku. Díky přehřívání se zvyšuje teplota páry na podobnou hodnotu (při nižším tlaku) jako na počátku (při vstupu do VT dílu turbíny). Tím dojde k prodloužení expanze a zvýší se účinnost. Za nevýhodu tohoto postupu zvyšování účinnosti lze považovat komplikovanější rozvody páry i konstrukci a regulaci kotle. [6] [4]

Přehřívání mezi jednotlivými stupni přináší velkou výhodu, a to zamezení vzniku vysoké vlhkosti v ST a NT díle. Při expanzi v jednodílné turbíně odchází pára velmi vlhká a kapičky vody poškozují lopatky turbíny. Na lopatkách dochází k erozi a snížení jejich životnosti. Proto je vhodné rozdělit turbínu do více částí, aby probíhalo přehřívání a pára byla po celou dobu expanze co nejsušší. Po expanzi ve VT dílu odchází z turbíny vlhká pára při tlaku v bodě 4 (Obr. 9). Ta je v kotli za konstantního tlaku opět ohřáta (proto se jev nazývá přehřívání)

na teplotu  $T_5$  (může být i vyšší než  $T_3$ ), čímž se zvýší entropie a konec expanze se posune do oblasti méně mokré páry. [6] [4]



Obr. 9 T-s diagram s přehříváním páry [5]

### Výstupní tlak páry z turbíny

Významným parametrem, který ovlivňuje účinnost turbíny je tlak (popř. teplota) na výstupu. Čím nižšího tlaku (teploty) se dosáhne, tím bude mít turbína vyšší hodnotu výkonu. Pozor však na hranici vlhkosti páry. Tyto úpravy mohou mít negativní vliv i na kondenzátor (více viz kapitola 1.3.3). [4]

### Vstupní tlak páry do turbíny

Dalším způsobem zvýšení účinnosti je zvýšení vstupního tlaku páry do turbíny. Se zvýšením vstupního tlaku se ale zvyšuje vlhkost páry na konci expanze v turbíně, a to je důvod, proč se obvykle se zvyšováním tlaku zvyšuje také teplota vstupní páry. Teplotu nelze neustále zvedat, je omezena vlastnostmi materiálu turbíny. [4] U tepelných elektráren se teploty páry nachází v rozmezí 550 až 580 °C. Pokud se jedná o elektrárnu s nadkritickými parametry páry v Ledvicích, teplota dosahuje cca 660 °C a tlaku 28 MPa. [8]

### Shrnutí

Změna tlaku nebo teploty má opačný vliv na suchost páry. Zvýšení tlaku na vstupu i snížení tlaku na výstupu z turbíny zvyšuje vlhkost a přehřívání i přehřívání naopak vlhkost snižují. Tím se mění střední teplota cyklu. Obě veličiny se taktéž vzájemně ovlivňují, proto se optimalizace provádí současně a hledá se neoptimalnější řešení dané situace. Hlavním požadavkem je parametr suchosti páry na výstupu z jednotlivých dílů turbíny, který ovlivňuje návrh carnotizace cyklu. Vhodná optimalizace probíhá současně optimalizací tlaku a teploty. Omezujícím parametrem jsou vlastnosti materiálů.

## 1.3 Zařízení ovlivňující účinnost elektrárny

Elektrárna je velké a komplexní zařízení. Provozní podmínky mají vliv na dílčí zařízení, jejichž účinnost se významně promítá do celkové účinnosti, se kterou bude elektrárna pracovat. Nevhodné provozní podmínky mají vliv i na životnost zařízení, četnost oprav a odstávek. Některé komponenty ovlivňují účinnost celé elektrárny podstatně více. Jedná se o turbínu, chladicí věž a kondenzátor. V této kapitole budou tato zařízení detailněji popsána.

### 1.3.1 Turbína

Parní turbína je velmi rozšířený tepelný stroj vyráběný a provozovaný v širokém rozpětí výkonů. Parní turbíny se vyrábí prakticky ve všech zemích s rozvinutým strojírenstvím. Nejvíce výrobců se pohybuje v oblasti výkonu parních turbín do 100 MW, přičemž parní turbínu s výkonem 1 000 a více MW je schopno v současné době dodat jen pár společností. [9]

Existují různé druhy parních turbín:

- Kondenzační turbíny a turbíny s potlačenou kondenzací
- Protitlakové turbíny
- Turbíny s odběrem páry a další. [9]

Turbína je konstrukčně složité zařízení. Předpokladem pro lepší účinnost je vhodný konstrukční a tepelný návrh (tvar lopatek, počet lopatek, počet stupňů turbíny, ...). Za předpokladu, že je návrh turbíny v pořádku, ovlivňují účinnost turbíny mimo jiné i parametry páry (teplota, tlak a průtok). [9] Významný vliv na účinnost turbíny mají také regulované a neregulované odběry páry. [1] V současnosti je velmi rozšířená unifikace turbín. Snižuje se tím účinnost turbíny pro daný účel, ale časová a cenová zátěž návrhu a výroby je mnohem nižší. [9]

Účinnost turbíny významně ovlivňuje celkovou tepelnou účinnost cyklu, jedná se o tzv. termodynamickou účinnost. Vyjadřuje samotnou účinnost jednotlivého zařízení – turbíny. [1]

### 1.3.2 Chladicí věže

Chladicí věž slouží k odvodu tepla z chladicího média do atmosféry. Mohou být různých typů: otevřené nebo uzavřené. Jiné dělení je rozděluje na mokré, suché chlazené vzduchem (s přirozeným tahem nebo s ventilátorem) či hybridní. Nejběžnějším chladicím médiem je voda. V diplomové práci bude uvažována mokrá chladicí věž s přirozeným tahem.

Vliv chladicích věží na účinnost tepelného cyklu je z velké části určen parametry chladicí vody (teplotou chladicí vody). Chladicí věž využívá schopnosti vzduchu absorbovat jisté množství vodní páry. Vše závisí na relativní vlhkosti vzduchu. Nejběžněji se chladicí věže staví ve vnitrozemí, kde není k dispozici dostatečná kapacita přítoku a odtoku vody jako je např. moře nebo mohutná řeka. [4] [10]

Vliv na teplotu chladicí vody mají geografické podmínky – lokální klima, ve kterém se elektrárna nachází. Rozdíl suchého a mokrého teploměru definuje rozmezí klimatických podmínek, kdy dochází k odpařování a následnému poklesu teploty chladicí vody. Účinnost chladicí věže lze vypočítat z teploty chladicí vody před vstupem do chladicí věže, teploty chladicí vody za výstupem z chladicí věže a teploty mokrého teploměru. [10]

Část chladicí vody se odpařuje, odkaluje nebo se ztrácí netěsnostmi a dochází tak ke ztrátám chladicí vody, kterou je nutné doplňovat. Množství doplněné vody se pohybuje v řádu jednotek procent (2 až 3 % v závislosti na počasí). Kompenzace chladicí vody je nutná ve stejné kvalitě. Voda se před přivedením do chladicí věže vždy upravuje. Podrobněji je problém kvality vody rozebrán v kapitole 1.3.3. Při odpařování je nutné dbát i na environmentální účinky, aby společně s párou neodcházely do ovzduší látky, které jsou přidávány do chladicí vody. [10]

Ztrátami odparem vody z chladících věží mají podstatný vliv na účinnost tepelného cyklu, proto je snaha dosáhnout co nejnižšího úletu. Snížení úletu se dosahuje eliminátory, které zachycují kapičky unášené proudem vzduchu a srážením je zpět. [10] Jsou vize, jak teplo ztracené úletem dále využívat, zatím však nejsou konkrétní plány.

### 1.3.3 Kondenzátor

Kondenzátor je tepelný výměník, jehož funkcí je odebrání nízkopotenciálního tepla vlhké páry přicházející z koncových dílů turbíny. Toto teplo vzniká jako důsledek změny skupenství pracovní látky. Výměník pracuje za konstantního tlaku a teploty. Vzniklé kondenzační teplo je odváděno chladicím médiem mimo kondenzátor. Z kondenzátoru je kondenzát dále odváděn k napájecí nádrži a opět se zapojuje do cyklu. [11]

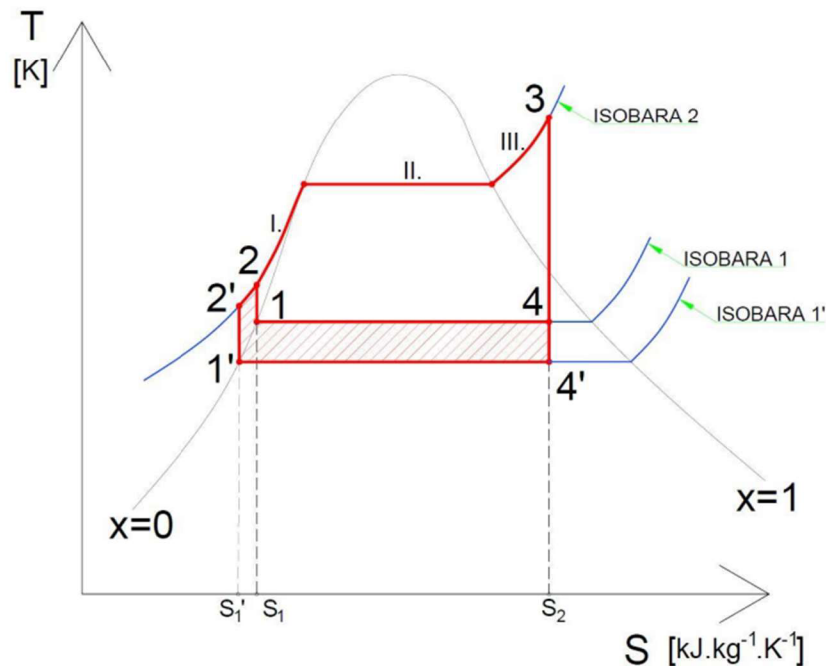
Existují dva typy chlazení pracovní látky ve výměníku. Buďto dochází k přímému kontaktu pracovní látky (chlazené) s chladicím médiem, jedná se o směšovací výměníky, nebo prostřednictvím teplosměnné plochy u povrchových kondenzátorů. V současnosti se v elektrárnách používá především systém povrchové kondenzace, a to z důvodu zajištění potřebné kvality kondenzátu (demineralizované vody). V této práci tomu nebude jinak. [12]

#### Zvýšení účinnosti

Cílem zvýšení účinnosti celého tepelného cyklu je dosažení co nejnižšího možného tlaku (blízkého vakuu) v kondenzátoru. Pára v turbíně expanduje a tím se snižuje její tlak, snižuje se i výstupní teplota z turbíny a tím se snižuje velikost odváděného tepla v kondenzátoru. [13] Tento proces je třeba optimalizovat a eliminovat negativní vlivy některých dalších procesů.

Zvýšení užitečné práce je znázorněno šrafováním na Obr. 10. Při snížení tlaku v kondenzátoru expanduje pára až na izobaru 1'. Cyklus je tedy nyní tvořen body 1' – 2' – 3 – 4' – 1'. Plochy  $q_{in}$  a  $q_{out}$  (Obr. 5 a vzorec 1.3) se změnilo ve vhodném poměru, tudíž vzroste tepelná účinnost.

Tento způsob však může mít i nevýhodu. Snižováním koncového tlaku na turbíně se zvýší účinnost turbíny, ale je důležité dát pozor, aby hranice vlhkosti páry nepřekročila při poměru kapalné k plynné fázi hodnotu 10 %. Jinak dojde k snížení účinnosti turbíny a erozi lopatek kapkami vody. [4]



Obr. 10 T-s diagram snížení tlaku v kondenzátoru [5]

Účinnost kondenzátoru závisí na provozních podmínkách, konstrukci, vlastnostech parní směsi a kvalitě vody v chladicím okruhu. Důležitou roli hraje optimalizace procesu a kontrola stavu kondenzátoru, případná eliminace závad. [1] [14]

#### Vlivy na účinnost

Z parní strany má vliv na účinnost kondenzátoru nadměrné množství vzduchu, přesněji nekondenzujících plynů, které se přisávají v netěsnostech (v NT dílu, v kondenzátoru, v potrubí, v armaturách apod.), více viz kapitola 3.2.1, nebo kapitola 3.2.2. Přítomnost těchto plynů vede ke snížení součinitele přestupu tepla z důvodu hromadění vzduchu kolem teplosměnných trubek. Řešením je odsávání plynů pomocí vývěv. Nelze však odsávat plyny z jakéhokoli místa kondenzátu, proto vznikají podchlazené části kondenzátoru, kde se ze sběračů nekondenzující plyny odsávají. [1] [15]

Vliv ze strany chladicí vody je dán vlastnostmi vody, ty jsou rozdílné dle původu vody. Kvalita povrchové vody se mění v závislosti na ročním období. Účinnost chlazení je velmi ovlivněna zanášením biologickým a fyzickým znečištěním. Oproti tomu nevýhodou podzemní vody může být větší obsah rozpuštěných minerálů. [14]

Zanášení může mít buď biologické či chemické příčiny. Je nutné udržovat vhodnou kvalitu vody (viz kapitola 3.2.3). [14] Předejde se případné korozi nebo ucpání trubek.

V případě chlazení kondenzátoru pomocí chladicích věží účinnost kondenzátoru závisí i na okolní teplotě vzduchu. Účinnost chlazení (i kondenzátoru) je za konstantního průtoku chladicí vody vyšší, pokud jsou venkovní teploty nižší. Více viz kapitola 1.3.2.

Parametry v kondenzátoru se mění s provozními podmínkami turbíny. Je důležité na základě předem vytvořeného modelu umět predikovat chování kondenzátoru za daných podmínek.

A následně kontrolovat hodnoty měření, jestli odpovídají predikovaným hodnotám (modelové situaci).

### Konstrukce

Nezanedbatelný vliv na účinnost má konstrukce kondenzátoru. Vodou chlazené kondenzátory energetických bloků jsou trubkové konstrukce. Jsou tvořené svazkem přímých teplosměnných trubek upevněných na obou koncích do trubkových stěn (tzv. trubkovnic). Proti vibracím a nadměrnému průhybu jsou trubky podepřeny několika podpěrnými stěnami. Rozvod chladicí vody do jednotlivých trubek zajišťují vodní komory. V této kapitole budou vypichnuty jen nejdůležitější vlastnosti (části), na kterých záleží.

- Typ a geometrie trubek
- Materiál trubek
- Rozložení trubek
- Počet trubek
- Geometrie pláště
- Geometrie přepážek
- Počet tahů

Správný návrh výše vypsanych bodů přispěje ke zlepšení funkce kondenzátoru. Jedná se o vhodný průtok chlazené látky i chladícího media, minimalizaci netěsností nebo optimální přestup tepla. Tato práce se konstrukční částí zabývá minimálně, i když má nemalý vliv na správnou funkci kondenzátoru, proto zde, o výše uvedených bodech, nebude více detailů.

[16]

## 2 Modelování

Modelování technologických procesů je nedílnou součástí energetického průmyslu. Lze jej využít pro všechny prvky tohoto průmyslu, kterými jsou tepelné (jaderné, uhelné), vodní, větrné a solární elektrárny, přenosová a distribuční soustava. Využívají se ke zpracování a ověřování projektů, optimalizaci provozu a procesů energetických soustav, zajištění hospodárnosti a spolehlivosti soustav, návrhu bezpečnostních opatření a zpracování bezpečnostních analýz. Například elektrárny na fosilní paliva se zaměřují na dosažení optimální účinnosti provozu při udržení emisních limitů. [17]

### Model

Slovo model má mnoho významů, které závisí hlavně na oblasti použití. Obecně model znázorňuje jistou napodobeninu skutečnosti na základě pravděpodobnosti nebo popisu pomocí vymezených fyzikálních veličin a vztahů mezi nimi. Tato práce bude zaměřena na matematické modely.

Jako matematické modely se mohou používat počítačové (digitální) modely reálného automatizovaného zařízení tzv. digitální dvojče. Lze na nich simulovat fungování zařízení a komunikaci mezi jeho složkami. Může také čerpat z jiných zdrojů a adaptovat se na měnící se podmínky. Taková virtuální replika reálných zařízení pomáhá odhalit různé chyby a nesrovnalosti i během provozu, nikoli až při odstávce. Také umí předpovědět problémové stavy ještě před uvedením do provozu. Využívají se také k optimalizaci a zefektivnění pracovního procesu. [18]

### 2.1 Matematické modely

Matematický model je abstraktní model vybrané části reálného světa (objektu, procesu) vytvořený metodou exaktní vědy. Je tvořený skupinou vhodně zvolených veličin a matematickými vztahy mezi nimi, reprezentujícími rozpoznané přírodní zákonitosti. Jednou z možností inženýrského pohledu je dělení matematických modelů podle úrovně teoretického zdůvodnění (předpokladů, odvození vztahů mezi proměnnými) na:

#### Fyzikální (exaktní, mechanistické) modely (White box)

Pokouší se vysvětlit procesy na jedné hierarchické úrovni pomocí procesů z nižší úrovně. Obvykle se jedná o velmi komplexní modely obsahující mnoho proměnných a využívající obsáhlé teoretické znalosti o systému.

Exaktní modely vznikají nejprve důslednou analýzou popisovaného systému až na úroveň známých poznatků a následným sloučením, při které se tyto známé poznatky sestavují a zjišťuje se interakce mezi částmi a ději. Výsledný model je pak tedy složen z modelů částí. Obecnou výhodou exaktního modelu je jeho široká použitelnost, ale i mimořádná složitost popisovaných systémů. [19] [20]

#### Empirické modely (Black box)

Zanedbávají mechanismy vzniku dějů, pracují s pozorovaným chováním systému bez snahy o jeho detailní vysvětlení. Tento model nahlíží na popisovaný systém jako na černou skříňku (Black box). Zde je sledován jen vztah mezi vstupními a výstupními parametry. Tento model se nezajímá o procesy, které uvnitř skříňky probíhají. [19] [20]

### 2.1.1 Empirické modely

Jak už bylo zmíněno výše, čistě empirický model nahlíží na popisovaný systém jako na černou skříňku, u které je pouze sledována závislost mezi vstupními a výstupními údaji. V rámci tohoto typu popisu se vůbec nezajímáme o mechanismy dějů, které v černé skříňce probíhají. Vlastní model se získává tak, že v potřebném rozsahu podmínek je experimentálně zjištěn vztah mezi vstupem a výstupem a výsledek je popsán vhodným matematickým (empirickým) vztahem. Při tomto popisu jsou často používány statistické metody vyhodnocení. Výhodou empirického modelu je možnost aplikace i na velmi složité systémy bez nutnosti jejich předchozího podrobného studia. Zásadní nevýhodou potom ovšem je minimální možnost zobecnění – model nelze přenést na jiný systém. [20] Empirické modely mohou vznikat pomocí regresní analýzy.

## 2.2 Regresní analýza

Využívá naměřených hodnot z provozu, mezi kterými je snaha najít závislosti, které se využijí k tvorbě a následně ke zpřesnění empirického modelu. Hlavním důvodem tvorby empirického modelu je predikce chování modelovaného zařízení, např. při změně vstupních parametrů.

Podle počtu nezávisle proměnných se regresní analýza dělí na jednorozměrnou nebo vícerozměrnou regresi. Pokud je vysvětlována proměnná závislá jen na jedné vysvětlující proměnné jedná se o jednorozměrnou (jednoduchou) regresi. V opačném případě, tedy při výskytu dvou a více vysvětlujících proměnných, se jedná o vícerozměrnou (vícenásobnou) regresi. Podle typu regresní funkce lze modely rozlišovat na lineární (viz kapitola 2.1.1) a nelineární. [21] Tato práce bude zaměřena na lineární vícerozměrnou regresní analýzu.

## 2.3 Lineární regresní analýza

Jedná se o metodu využívanou v případech, kdy výsledná proměnná  $y$  je závislá na jedné nebo kombinaci více vstupních proměnných (regresorů). Předpokladem u klasické regresní analýzy je, že vstupní proměnné jsou vysvětlující, nezávislé proměnné, které jsou nenáhodné (pevně určené experimentem – přesné), a výstupní proměnné jsou vysvětlované, závislé proměnné, které jsou náhodné. Výstupní proměnná se v provozu měří a díky tomu lze data porovnávat. [21]

Výsledkem experimentu je  $n$  naměřených (výstupních) hodnot  $y$  při různých kombinacích vstupních veličin  $x_1, \dots, x_m$ . Vícerozměrná regrese má více než jednu proměnnou  $x$ . Jedná se o  $n$ -tici bodů  $[y_i, x_{ij}]$ , kde  $i = 1, \dots, n$  a  $j = 1, \dots, m$  zapsaných v matici. Matici lze zkráceně zapsat jako  $\{y, X\}$ , kde vektor  $y$  má rozměr  $n \times 1$  a matice  $X$   $n \times m$ . Cílem regresní analýzy je vyjádření vztahu mezi vstupními proměnnými  $X_i$  a výstupní proměnnou  $y$ . Tento typ závislosti lze vyjádřit vztahem (2.1)

$$y = f(x_i, \beta_i) + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

kde  $i$ -tá hodnota proměnné  $y$  je vysvětlovaná proměnná,  $x_i$  jsou vysvětlující proměnné,  $\beta_i$  jsou parametry (koeficienty) regresní analýzy a  $\varepsilon_i$  jsou náhodné veličiny zahrnující chyby měření i chyby modelu.



Pro jednorozměrnou regresi platí, že grafickým vyjádřením lineární regrese mohou být kromě přímky i jiné křivky např. parabola nebo hyperbola. Pro vícerozměrnou analýzu je vyjádření složitější. [22]

Do rovnice (2.1) lze za proměnné  $x_i$  dosadit jejich libovolné funkce, které nesmí obsahovat parametr  $\beta$  (popř.  $b$ ). Také parametr regrese  $\beta$  je běžně nahrazován odhadem parametru označovaném  $b$ , [22] protože k využití parametru  $\beta$  by v případě této práce bylo potřeba mít sesbíraná data v celém (nejlépe nekonečně dlouhém) časovém úseku. Data použita v této práci, však byla sesbírána za určité časové období, proto parametr  $\beta$  bude nahrazen odhadem  $b$ . Pokud se u dat projeví optimální vlastnosti, lze je vztáhnout na celý soubor (časový úsek). [23]

Linearitou regrese se myslí linearita vzhledem k regresním parametrům, ne k proměnným. Níže vidno pár příkladů z modelů, které se využívají běžně v praxi:

- Zcela lineární model: Tento model má lineární nejen regresní parametry, ale i proměnné.
- Racionální celistvé a lomené funkce: Modely v této skupině jsou nejpoužívanější. Jedná se o modely regrese paraboly nebo hyperboly s-tého stupně, popřípadě jejich kombinace
- Model lineární v parametrech: Jedná se o zobecnění předchozích tvarů. Za  $x$  lze dosadit libovolnou funkci  $f(x)$ , která neobsahuje žádné další proměnné.

Příkladem lineární regrese je:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_4 \cdot x_3 + \beta_5 \cdot x_1^2 + \varepsilon_i, \quad (2.2)$$

kde  $y$  je náhodný výstup,  $x_i$  jsou nenáhodné vstupní veličiny – regresory,  $\beta_0$  je tzv. absolutní člen,  $\beta_i$  jsou parametry regrese – regresní koeficienty a  $\varepsilon_i$  je náhodná složka chyby. [24] [25]

Parametr lineární regrese lze nejlépe odhadnout metodou maximální věrohodnosti, nejčastěji metodou nejmenších čtverců, ta je v praxi nejpoužívanější.

### 2.3.1 Metoda nejmenších čtverců

Metoda nejmenších čtverců (MNČ) je speciálním případem metody maximální věrohodnosti, pro její užití je nutné splnit podmínky, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.4.4). [22]

- I. Regresní parametry (koeficienty) mohou nabývat libovolných hodnot.
- II. Regresní model je lineární v parametrech a platí aditivní model měření
- III. Žádné 2 sloupce matice  $\mathbf{X}$  nesmí být kolineární
- IV. Náhodné chyby mají nulovou střední hodnotu
- V. Náhodné chyby mají konstantní a konečný rozptyl
- VI. Náhodné chyby jsou vzájemně nekorelované
- VII. Chyby mají normální rozdělení [22]

Předpokladem pro zahájení výpočtu MNČ je platnost vztahu (2.3)

$$\sum_{i=1}^n e_i = 0, \quad (2.3)$$

kde  $e_i$  jsou rezidua, pro která platí vztah (2.4):

$$e_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (2.4)$$

kde  $y_i$  je měřené hodnoty a  $\hat{y}_i$  jsou vyrovnané (predikované) hodnoty  $y_i$  modelem. Nemá-li regresní model větší nedostatky, je možné rezidua  $e_i$  brát za odhady náhodné chyby  $\varepsilon_i$ .

Tento předpoklad však k nalezení vhodného tvaru regresní funkce nestačí, proto je nutné vhodné minimalizační kritérium.

MNČ je založena na minimalizaci součtu čtverců odchylek (reziduí) zapsané vztahem (2.5). [22]

$$\min Q(e) = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.5)$$

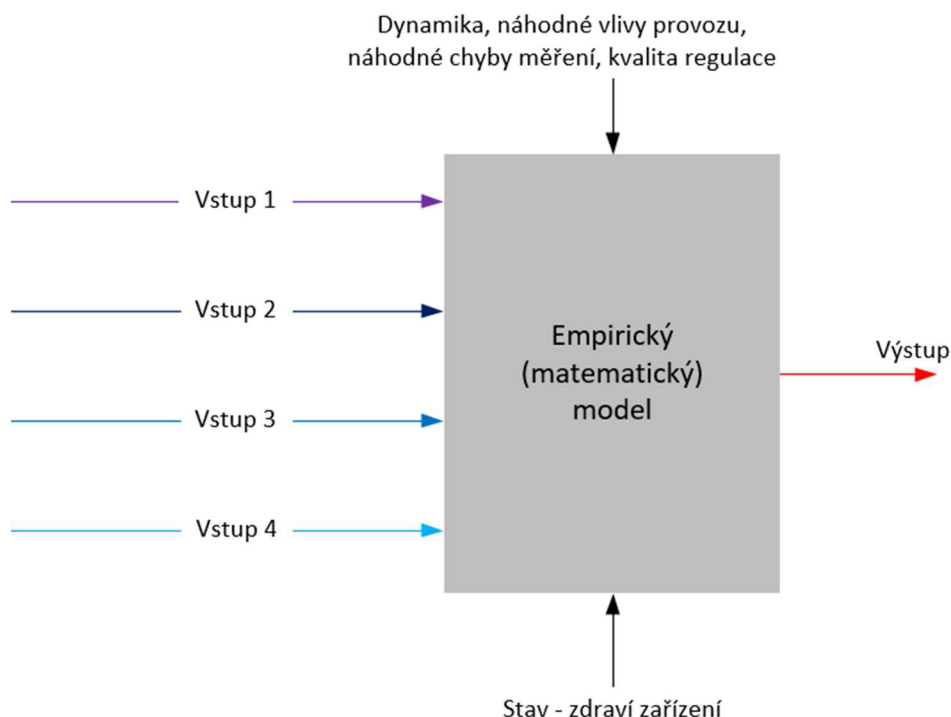
Odhad koeficientů regresní funkce je získáván ze vztahu (2.6) tzv. normálních rovnic

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}, \quad (2.6)$$

kde matice  $\mathbf{X} = \begin{pmatrix} 1 & f_1(x_1) & \cdots & f_i(x_1) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & f_1(x_n) & \cdots & f_i(x_n) \end{pmatrix}$  a vektor  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ . [21]

## 2.4 Empirický model

Pomocí regresní analýzy, lze vytvořit empirický (matematický) model (Obr. 11), který bude určovat výslednou závislost – empirický vztah.



Obr. 11 Schéma návrhu empirického modelu

### 2.4.1 Návrh regresního (empirického) modelu

Při tvorbě regresního modelu se postupuje na základě několika obecných bodů (volba vstupních veličin, volba regresorů, odstranění odlehlých hodnot, ...). Aby byl model dostatečně smysluplný a použitelný, je na začátku potřeba zvolit jeho vhodný tvar. Toho se dosáhne fyzikálním zanalyzováním problému a porozumění mu. Na základě toho lze říci o různých vstupních veličinách, které spolu korelují, zda jsou v kauzalitě nebo nikoliv. Samotná statistika to neodhalí, a proto záleží jen na lidském faktoru, který již v tomto bodě rozhoduje o správnosti výsledku analýzy. [26]

### 2.4.2 Volba vstupních proměnných

U vícerozměrné regrese existuje velká část proměnných, které mají vliv na výslednou proměnnou, proto je třeba vybrat vhodné vstupní (vysvětlované) proměnné, po nichž jsou požadované jisté vlastnosti, které zaručují kvalitu vypočítaných testů a odhadů. Vybírají se na základě, buďto známé souvislosti dané problematiky nebo výhradně dle statistických ukazatelů.

Algoritmus výběru vysvětlujících proměnných probíhá následovně:

Prvně se vybere proměnná  $x_i$ , která má největší hodnotu korelačního koeficientu s  $y$ . V dalším kroku je přibrána taková proměnná  $x_j$ , která má největší parciální koeficient s  $y$ . Do modelu se přidávají jen takové proměnné, které dostatečně zvýší kvalitu modelu. Přibírání proměnných

skončí, jakmile žádná další proměnná významně nezlepšuje kvalitu modelu. Tento postup určí významné proměnné, jež budou hlavními pilíři regresní funkce. [7]

### 2.4.3 Odhad regresních koeficientů a regresorů

K určení regresorů a jejich regresních koeficientů se používá několik metod v závislosti na splněných předpokladech. Nejčastější, tudíž nejpoužívanější metodou je MNČ, popsána v kapitole 2.3.1. Alternativou MNČ jsou např. váhové funkce. [26]

Regresor – jedná se o vstup do regresní analýzy, který nutně nemusí být získaná hodnota z měření. Lze jí vypočítat pomocí vzorců či vytvářením polynomických funkcí. [7]

Do modelu se vyberou právě ty regresory, které jsou pro model významné. Jednou z možností, jak postupovat, je testování každého přidaného vstupu (regresoru) do analýzy a následné posouzení, zda je regresor významný či nevýznamný. Pokud se právě přidaný regresor prokáže jako nevýznamný, nemusí to vždy znamenat jeho nevýznamnost v celkovém modelu. Regresor může být ovlivněn ještě jiným regresorem a při jeho odstranění se z nevýznamného regresoru stává významný. Opačný způsob vede k vytvoření modelu s co nejvíce možnými vstupními regresory a postupným odebráním jednotlivých regresorů také dojde k vytvoření statisticky významného modelu. Znakem vlivnosti jednotlivých regresorů je i hodnota MEP (Střední kvadratické odchylky reziduí), která určuje přesnost modelu. [26] Významnost jednotlivých vstupů i modelu, je jedním z bodů, které se kontrolují regresní diagnostikou.

### 2.4.4 Regresní diagnostika – Diagnostické grafy a statistiky

Jedná se o postup k posouzení kvality dat, modelu a splnění předpokladů pro metodu nejmenších čtverců. Zabraňuje vzniku modelů bez fyzikálního významu. U regresní diagnostiky není třeba přesně formulovat alternativní hypotézu, a přesto jsou typy odchylek od ideálního regresního tripletu odhaleny. Model je navrhován ve vzájemné spolupráci mezi navrhovatelem a programem na PC. [22]

V regresní diagnostice se využívá tzv. Regresní triplet, který se skládá z těchto 3 částí:

- a) kritiky dat
- b) kritiky modelu
- c) kritiky metody. [22]

#### KRITIKA DAT

Jedná se o metodu posouzení kvality dat. Metoda posuzuje rozmezí dat, jejich variabilitu a detekuje vlivné body (extrémy a odlehlá data). Velmi důležité je vyloučení odlehlých dat z datového souboru. Tím se předchází zvýšení rozptylu, zkreslení odhadu a dalším nepřesnostem ve vytváření modelu. Pokud by se tato data nevykloučila, model by se mohl stát nepoužitelným. [7] [22]

Odlehlé (vybočující) body – hrubé chyby měření, body vyvolané nestandardním stavem technologie, př. vlivem dynamiky systému nebo vlivem provozu odlišného od standardního (obvyklého) provozu. Odlehlé body se před dalším zpracováním musí odstranit.

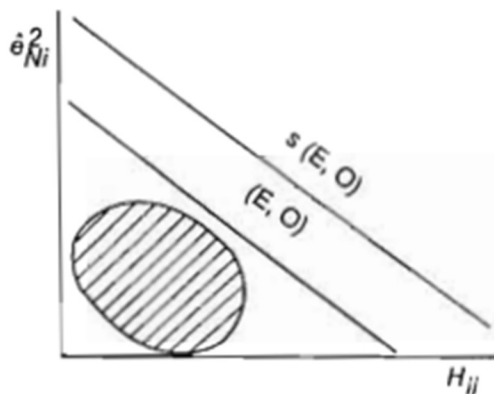
Extrémy – body s velkým vlivem, které mohou výrazně zpřesnit regresní model, odlišují se v hodnotě jedné (či více) nezávisle proměnné. Extrémy je nutné ponechat. [22]

Pro vyloučení vlivných bodů platí pravidlo tří, tzn. pro zařazení daného bodu mezi odlehlé a jeho vyloučení je třeba, aby jej alespoň 3 grafy (metody) označily jako odlehlý (popř. vlivný) bod. Při větším počtu měření (př. 261 bodů [26]) lze případně odstranit i větší počet odlehlých bodů bez obav ze zkreslení výsledné regrese. Některé metody pouze označí, zda bod je vlivný či nikoli, jiné metody však dokáží rozeznat extrémy a odlehlé body. K identifikaci vybočujících bodů se využívá především normalizovaných reziduí a k detekci extrémů pak diagonálních prvků projekční matice  $H$ . Vlivné body lze detekovat pomocí grafů např. Pregibonova grafu (Obr. 12). Body podezřelé z odlehlosti pomocí Williamsova grafu (Obr. 13) a grafu predikovaných reziduí (Obr. 14). L-R graf lze využít k identifikaci extrémních i odlehlých dat. [26]

Protože některé metody neumí odlišit odlehlý bod od extrému a označují pouze vlivné či podezřelé body, je nutné označené body zkontrolovat dle Williamsova grafu, zda se nejedná o extrém a tyto body pak nezařazovat k vyloučení. [26]

#### Pregibonův graf

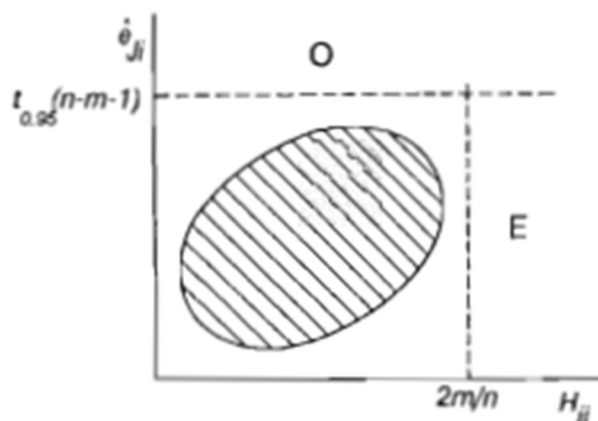
Vlivné body jsou umístěny spíše mezi šikmými přímkami v grafu (Obr. 12), značené (E, O). Extrémy leží spíše v pravé dolní části, ale nejsou přesně ohraničené. V horní části nad šikmou čarou jsou silně vlivné body, označené s(E, O). [22]



Obr. 12 Pregibonův graf [22]

#### Williamsův graf

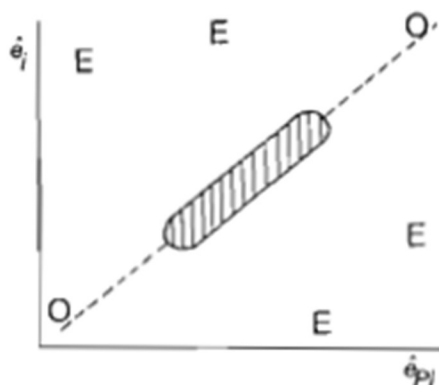
Dokáže rozpoznat odlehlé body od extrémů. Je rozdělen na 4 kvadranty (Obr. 13). Nad vodorovnou osou vlevo nahoře (v I. kvadrantu) se nachází odlehlé body (označené O) a vpravo nahoře (ve IV. kvadrantu) jsou odlehlé body, které jsou současně extrémy. V kvadrantu napravo dole (ve III. kvadrantu) se nachází pouze extrémy (E) a ve II. kvadrantu jsou správná data. [22]



Obr. 13 Williamsův graf [22]

### Graf predikovaných reziduí

V tomto grafu jsou extrémní body snadno identifikovatelné, protože leží mimo přímku  $y = x$  a odlehlé body leží sice na přímce, ale dostatečně vzdáleny od ostatních bodů (Obr. 14). [22]



Obr. 14 Graf predikovaných reziduí [22]

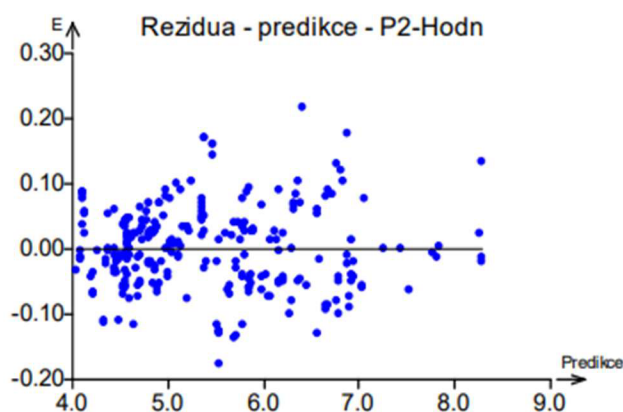
Grafické metody analýzy reziduí a prvků projekční matice jsou velmi jednoduché a ilustrativní – velmi snadná identifikace skupiny vlivných bodů. I přes nejasný vliv na zobrazení výsledků regrese, jsou tyto grafy běžně využívány. [22]

### KRITIKA MODELU

Kritika modelu nám hodnotí kvalitu modelu pro daná data. V případě jedné vysvětlující (výstupní) proměnné lze kvalitu posoudit přímo z rozptylového grafu závislosti  $y$  na  $x$ . V případě více vysvětlujících proměnných mohou tyto grafy zkruslovat, proto je kontrola prováděna pomocí parciálních regresních grafů, parciálních grafů reziduí a znaménkového testu. Naměřená data by měla mít lineární charakter a každý parametr analýzy by měl být významný (viz kapitola Kritika metody), a tudíž by směrnice přímky měla být nenulová. Jinak je nutné model opravit. [26] [22]

### Parciální reziduální grafy

Jedná se o závislost parciálních reziduí přímo na proměnné  $x$ . Lineární závislost, pak ukazuje vhodnost navržené proměnné  $x$  v modelu. Jsou vhodné k rozlišení různých typů nelinearity. Na Obr. 15 je vidět vhodné rozdělení reziduí bez trendu.



Obr. 15 Parciální reziduální graf [26]

### KRITIKA METODY

Jedná se o zhodnocení použité metody, nejčastěji kvůli kontrole použitelnosti MNČ, na konkrétním modelu, a to pomocí několika kritérií. V kapitole 2.3.1 bylo uvedeno 7 kritérií k dosažení nestranných lineárních odhadů. V praxi však některé bývají porušeny.

#### Významnost modelu

Sleduje významnosti jednotlivých vstupních veličin v regresním modelu. Pokud se všechny prokáží jako významné i celkový model je významný. V opačném případě se musí nahradit jinou vstupní veličinou nebo odstranit určitou veličinu tak, aby byl model významný.

- Př. Fisher-Snedecorův test [26]

#### Multikolinearita

Pokud model vykazuje multikolinearitu, znamená to, že vstupní data jsou na sobě závislá (závislost mezi proměnnými). Většinou se tak děje u polynomů. Pro eliminaci multikolinearity se používá místo MNČ metoda korekce hodnosti. [22]

- Př. Scottovo kritérium [26]

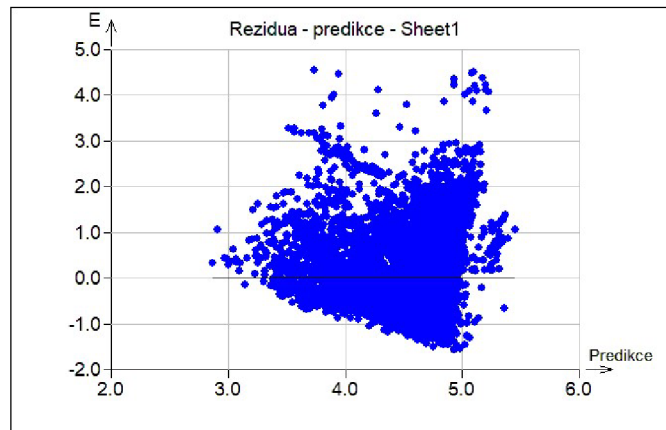
#### Konstantnost rozptylu reziduí (Homoskedasticita, Heteroskedasticita)

Homoskedasticita – konstantnost rozptylu

Heteroskedasticita – nekonstantnost rozptylu

Nejlépe je to pozorovatelné z grafu (Obr. 16), kde je vidno, jak nám body vytváří určitý obrazec. Podle toho lze rozpoznat konstantnost rozptylu. Z grafů se záznamem heteroskedasticity lze také zjistit, zda není způsobena přítomností vlivných bodů. [22]

- Př. Cook-Weisbergův test [26]



*Obr. 16 Heteroskedasticita dat*

### Autokorelace

Znázorňuje detekovanou závislost dat. Korelace vzniká při identifikaci časových řad, kde rezidua již nejsou nezávislá, ale vzájemně korelovaná. [22] V našem případě je autokorelace nevyhnutelná. Autokorelace se neeliminuje, z toho vyplývá, že se zanechá metoda MNČ.

- Př. Waldův test [26]

### Normalita reziduí

Dobře viditelná na Q-Q grafech. Probíhá kontrola existence trendu v reziduích. V našem případě máme dostatečně velký soubor dat na to, aby odstranění bodů nemělo kritický dopad na model. Tudíž se ponechá standardní MNČ.

- Př. Jarque-Berrův test [26]



### 3 Monitorování stavu kondenzátoru

Monitorování stavu jednotlivých zařízení tepelné elektrárny je důležité k předcházení komplikacím při provozu celého zařízení. Monitorování zajišťuje včasné odhalení závad a tím i předcházení ztrátám na výkonu nebo zásadnější poruše, pokud by zařízení pracovalo dál se závadou. Konkrétně stav kondenzátoru lze dobře pozorovat na změně tlaku v kondenzátoru. Při zvýšení tlaku oproti predikci je detekován problém. V kapitole 3.2 jsou popsány tři hlavní závady, které mohou vzniknout. Závady snižují výkon kondenzátoru a celkovou účinnost cyklu. Pro lepší pochopení fungování kondenzátoru jsou v kapitole 3.1 představeny funkce kondenzátoru a základní fyzikální principy v kondenzátoru.

#### 3.1 Fyzikální principy v kondenzátoru

Kondenzátor je jedním z důležitých zařízení v elektrárně. Jedná se o výměník tepla, který musí splňovat tyto úkoly:

- Odvádět teplo z páry do chladicí vody a tím zajistit kondenzaci páry z turbíny.
- Zajistit co nejnižší tlak páry na výstupu turbíny. Čím vyšší je tlakový (a také teplotní) spád na turbíně, tím vyšší je účinnost tepelného cyklu.
- Odvádět nekondenzující plyny. Tento úkol plní spíše vývěvy. [26]

Nejdůležitější sledovanou veličinou je tlak páry v kondenzátoru, jehož hodnota přímo ovlivňuje účinnost tepelného cyklu. Výše hodnoty tlaku páry v kondenzátoru obecně závisí na:

- Teplotě chladicí vody
- Průtoku chladicí vody
- Množství tepla, předaného z páry do chladicí vody
- Práci vývěv, které odsávají nekondenzující plyny a pomáhají udržovat v kondenzátoru co nejnižší možný tlak. [26] Práce vývěv nebude v modelu uvažována jako vstup, neboť není žádné měření, které by charakterizovalo její technický stav. Při odhalení závady, však může být jednou z příčin.

Kondenzátor v tepelných elektrárnách umožňuje prodloužit expanzi páry v turbíně až do relativně hlubokého vakua, což vede ke zvýšení tepelné účinnosti parního cyklu. V kondenzátoru probíhá skupenská přeměna – kondenzace. Plynné skupenství (parní směs) se transformuje na kapalinu (vodu) za konstantního tlaku a teploty. Při přeměně se náhle mění makroskopické vlastnosti látky. V kondenzátorech kondenzuje vodní pára na trubkách, kterými proudí chladicí voda. Při kontaktu páry s trubkami dochází ke změně skupenství z plynného na kapalné a uvolňuje se skupenské teplo kondenzační (nízkopotenciální teplo)  $Q_k$  [J]. Vyjádřené vztahem (3.1). Toto teplo je odváděno chladicí vodou do chladících věží, kde není dále využíváno.

$$Q_k = m_p \cdot l_p, \quad (3.1)$$

kde  $m_p$  je hmotnost vodní páry a  $l_p$  je měrné skupenské teplo kondenzační. [11]

Objem kapalné fáze je mnohem menší, a to vede ke vzniku vakua v kondenzátoru.

Toto teplo  $Q_k$  závisí na látce, která mění skupenství a na teplotě. Když při stejné teplotě odebereme látku v plynném skupenství její skupenské teplo kondenzační, změní se kompletně

na kapalinu. Až po zkvalnění (při stejné teplotě) se dalším odebráním tepla snižuje teplota kapaliny. Množství tepla při ochlazování (popř. ohřívání) vody  $Q_v$  [J] lze vyjádřit vztahem

$$Q_v = m_v \cdot c_v \cdot \Delta t_v, \quad (3.2)$$

kde  $m_v$  je hmotnost vody,  $c_v$  je měrná tepelná kapacita vody a  $\Delta t_v$  je rozdíl teplot.

Z molekulárního hlediska je kondenzace spojováním volně se pohybujících molekul vody do řad nebo shluků, přičemž vzniká určitá vazba mezi atomem kyslíku jedné molekuly a atomem vodíku jiné molekuly. Spojením většího množství molekul vzniká vodní kapka. V momentě spojení dvou molekul je do okolí uvolněno určité množství latentního tepla, které tvoří již zmiňované skupenské teplo kondenzační. [11]

## 3.2 Popis závad

### 3.2.1 Přisávání okolního vzduchu netěsností

I přes snahu konstruktéra potrubí spojující kondenzátor s turbínou není dokonale těsné, vlivem značné tlakové diference dochází k průsaku atmosférického vzduchu do prostoru kondenzátoru. Tento jev je velmi nežádoucí. [1] Zhoršuje se účinnost kondenzátoru z důvodu sníženého přestupu tepla a zvýšení celkového tlaku směsi a nekondenzujících plynů.

Pára ze směsi (přísátý vzduch a pára z turbíny) na trubce rychle zkondenzuje. Zbylý vzduch obalí trubku a zabraňuje další páře přístup k trubce. Molekuly páry tak mohou pronikat skrz takovou vrstvu pouze difúzí. Zde dochází k poklesu parciálního tlaku páry. A tím zaniká teplotní rozdíl mezi přitékající parou a teplotou teplosměnné plochy. V tomto prostoru kondenzátoru nedochází k další kondenzaci a tato část je nadále vyřazena z provozu, proto je nutné veškeré inertní plyny z prostoru kondenzátoru odsávat. V opačném případě by postupně docházelo k vyřazování z provozu čím dál větší teplosměnné plochy, a tím k nárůstu tlaku v kondenzátoru. [1] [12] [15]

Nekondenzující plyn není možné odsávat kdekoli, proto se pro tento účel v kondenzátoru přizpůsobuje určitá část, tzv. podchlazovací prostor. V této části kondenzátoru jsou umístěny trubky s navrtanými otvory, které slouží pro odsávání parovzdušné směsi z prostoru kondenzátoru. V tomto prostoru je žádoucí dosáhnout největšího podchlazení, aby parciální tlak páry ve směsi byl co nejmenší a nedocházelo ke zbytečným ztrátám pracovní látky vlivem odsávání. [12] Další informace o odsávání plynů budou zmíněny v další kapitole 3.2.2.

Na usazování nekondenzujících plynů v kondenzátoru má vliv uspořádání trubek. Je vhodné zabránit vzniku tzv. vzdušných pytlů, ve kterých by se plyny shromažďovaly. Předjet se tomu dá prouděním páry přes přiměřený počet trubkových řad s malými změnami směru při proudění do trubkového svazku. [1] [15]

Doposud bylo zmíněno pouze konstantní prisávání vzduchu, kterému ve většině případů nelze zabránit a zařízení je na něj koncipováno (použitím vývív k odsávání nekondenzujících plynů). Může však vzniknout i prasklina, která snižuje výkon kondenzátoru. Prasklina může být přímo na kondenzátoru nebo kdekoli v potrubí mezi turbínou a kondenzátorem. Zejména v místech,

kde je tlak páry nižší než atmosférický. Taková i velmi malá prasklina má velký vliv na účinnost kondenzátoru, proto je žádoucí, aby byla brzy odstraněna. Této praskliny by si obsluha běžnou kontrolou kondenzátoru nemusela všimnout, proto je velmi důležité alespoň identifikovat problém – závadu přisávání vzduchu.

### 3.2.2 Zhoršená funkčnost vývěv

Vývěva je zařízení, které se používá k odsávání nekondenzujících plynů, za účelem udržení vakua a kvality prostředí v kondenzátoru. [27] Existují různé druhy vývěv. Dělíme je podle konstrukční technologie. Vývěvy mohou být paroproudé, vodoproudé nebo vodokružné. V některých případech je možné použít i kombinaci těchto systémů. [28]

Pokud se zhorší funkčnost vývěv, pak není udrženo vakuum, tedy potřebná kvalita prostředí v kondenzátoru, a snižuje se jeho účinnost. V kondenzátoru se hromadí nekondenzující plyny, a to má za důsledek stejný efekt, jaký byl zmíněn v předchozí kapitole. Důsledkem je snížení součinitele přestupu tepla a zvýšení tlaku v kondenzátoru.

### 3.2.3 Zanášení vnitřního povrchu trubek kondenzátoru

Pára kondenzuje díky trubkám ochlazovaným vodou z chladicích věží, řeky či jiné zásobárny vody. Přitékající voda do kondenzátoru musí být určité kvality, jinak se zanášejí nebo poškozují trubky a zvyšuje rychlost proudění chladicí vody, kvůli sníženému průtoku. Vlastnosti vody a tím i její kvalita se liší původem vody. S povrchovou vodou se do kondenzátoru nejčastěji dostává biologické a fyzické znečištění např. sinicemi, bahnem, mikroorganismy. Podzemní voda naopak může obsahovat větší obsah rozpuštěných minerálů, které mohou způsobovat taktéž zanášení nebo korozi. [14]

Zanášením trubek se snižuje součinitel přestupu tepla, který má významný vliv na účinnost kondenzace, která už byla popsána v kapitole 3.1. Proto bude tato podkapitola zaměřena se na kvalitu vody, aby byla zajištěna funkčnost kondenzátoru.

Pro předcházení problému se musí kontrolovat vhodnost vody, dle následující vlastnosti (podmínek):

- Hodnota pH by se měla pohybovat v rozmezí 6,5 až 9. V příliš kyselém prostředí dochází ke korozi a v příliš zásaditém zase k usazování.
- Tvrdost vody, tím se rozumí sledování množství rozpuštěného vápníku a hořčíku ve vodě. Rozpustnost těchto prvků klesá se zvyšující se teplotou a vzniká nebezpečí jejich vylučování a v případě vysoké tvrdosti vody usazování a zanášení kondenzátoru i celého chladicího okruhu za ním.
- Vznik a růst mikroorganismů a řas. Důvodem je stálá teplota vody v okruhu a vlhké a teplé prostředí v chladicí věži. Řasy rostou na různých místech okruhu a mohou bránit oběhu vody. [14]

Ze sledovaných vlastností vody vyplývá, že zanášení kondenzátoru je častým jevem. Z toho důvodu je nutné udržovat vhodnou kvalitu vody. [14] Uvádí se, že vrstva vodního kamene silná 1 mm, způsobí to, že účinnost přenosu tepla klesne až o 50 %. [29]

Dalším doporučením je kontrola rychlosti proudění vody, která by měla být vždy vyšší než 1 m/s. Při nízké rychlosti dochází taktéž k zanášení trubek. Při užití znečištěné vody se může rychlost vody pohybovat kolem 2 m/s, nesmí však překročit hranici 2,5 m/s – nebezpečí vzniku rázové koroze. [30]

Zanášení kondenzátoru se eliminuje také použitím čistících kuliček, které jsou z pórovitého materiálu a jsou vyrobeny ve větším průměru, než je vnitřní průměr trubek kondenzátoru. Podle definovaného plánu se nechávají procházet kondenzátorem a tím zbavují vnitřní povrch trubek kondenzátoru nežádoucích nánosů. [7]

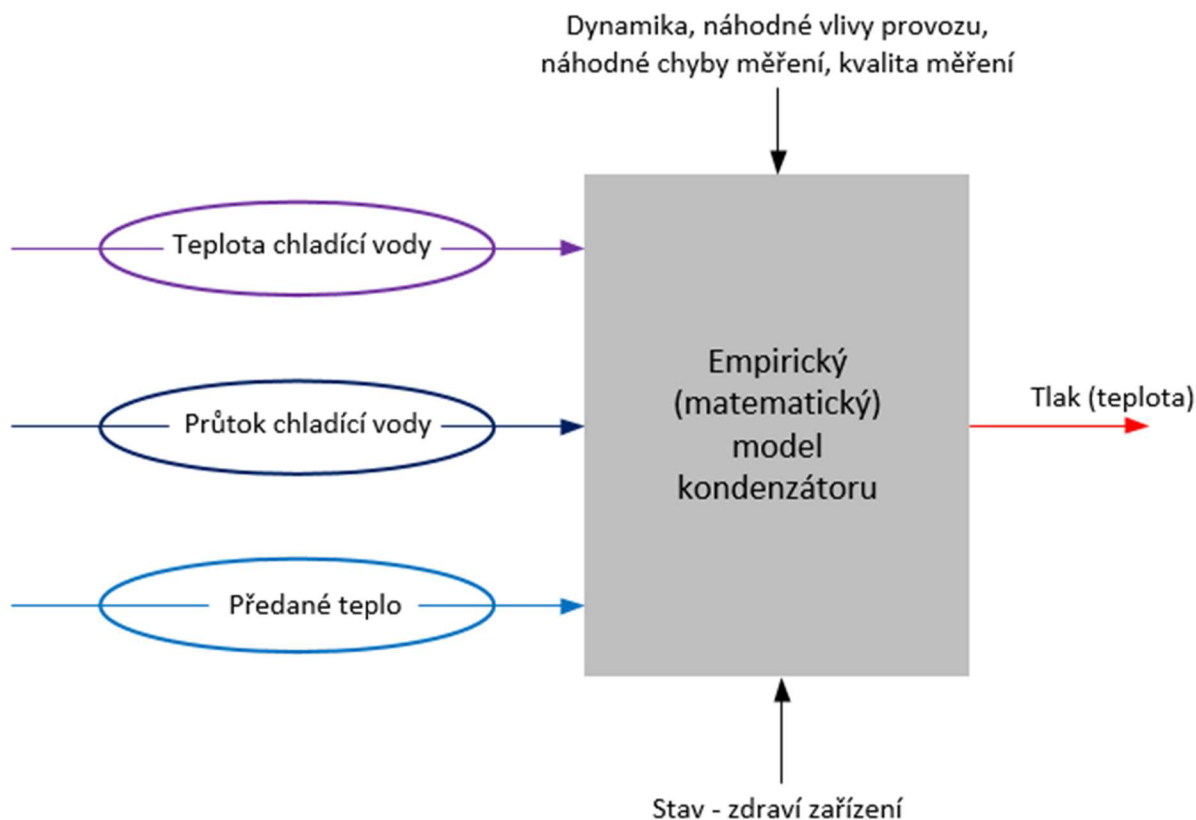
### 3.2.4 Souhrn

V běžném provozu jsou nekondenzující plyny z parní strany kondenzátoru trvale odsávány vývěvou a vnitřní povrch trubek je z důvodu zanášení periodicky nebo kontinuálně čištěn. Správnou funkci kondenzátoru je potřeba sledovat a včas diagnostikovat špatnou či zhoršenou funkci. Probíhají také pravidelné odstávky, avšak všem problémům nelze předejít ani je předpovědět, proto je třeba získat co nejvíce informací o chování a přenést je do modelu, který zobrazuje aktuální stav kondenzátoru, tzn. „zdraví“ kondenzátoru.

Závadu lze rychle a jednoduše zjistit (odhalit) při kontrole grafů vyplývajících z empirických modelů, přesněji z průběhu křivek tlaků měřeného a predikovaného. Pokud se křivky od sebe liší – rozdíl se projeví na trendu křivky reziduí, který se dostane mimo doporučený (ideální) interval. Touto kontrolou aktuálního stavu lze předejít situacím od zhoršené účinnosti až k havarijní (akutní, neplánované) odstávce z důvodu poruchy na kondenzátoru. Díky modelu je možné problém vyřešit hned po vzniku závady. Často jsou opravy možné i za provozu. Z modelu lze také identifikovat, jakého je závada rázu.

## 4 Empirický model kondenzátoru

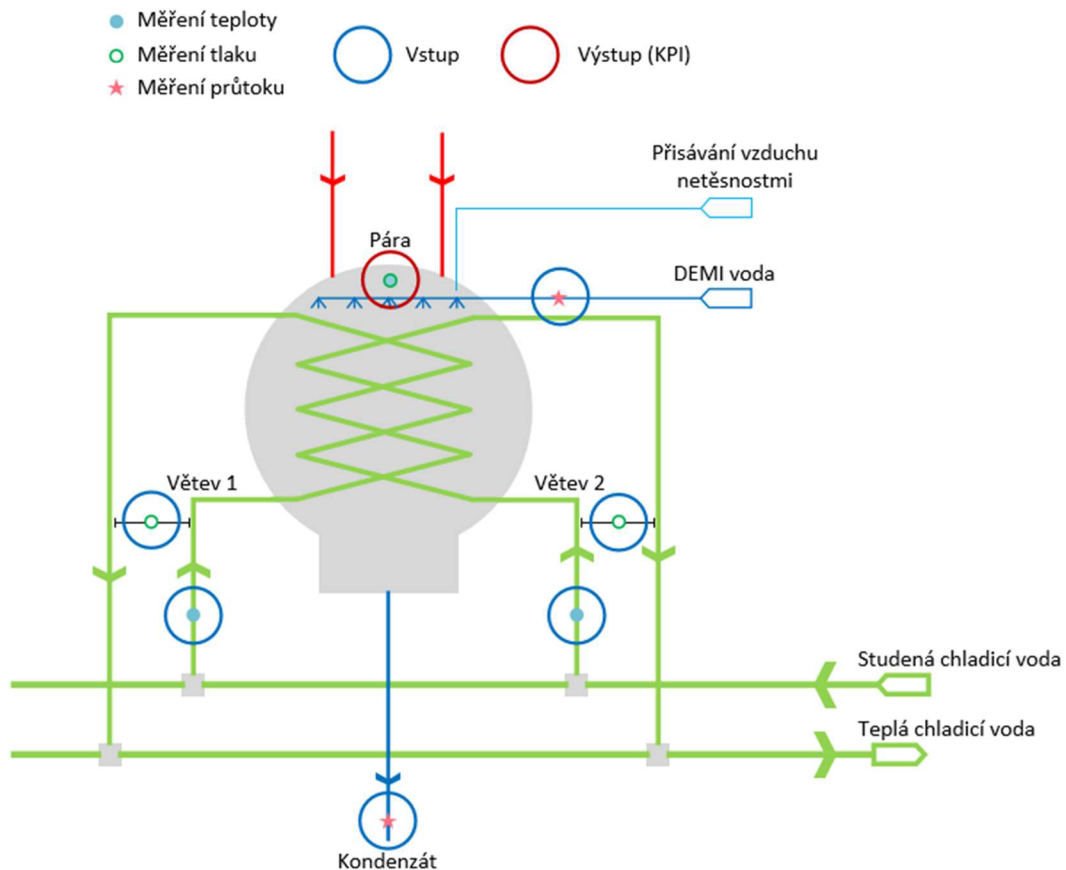
Základem empirického modelu je fyzikální analýza zařízení. Jedná se velmi složitou a důležitou část, ke správnému výsledku jsou potřeba zkušenosti získaných prací v oboru a trpělivosti při posuzování vhodnosti parametrů. V prvotní fázi se vybírají základní parametry (veličiny), které významně ovlivňují účinnost kondenzátoru. Ve firmě I&C Energo mi byly předány podpůrné podklady, viz Obr. 17.



Obr. 17 Konceptní model kondenzátoru

Schéma na Obr. 17 zobrazuje 3 základní vstupní parametry, které ovlivňují výsledný model kondenzátoru. Jedná se o teplotu chladící vody na vstupu do kondenzátoru, průtok chladící vody na vstupu do kondenzátoru a předané teplo v kondenzátoru. Data k těmto veličinám však nejsou vždy k dispozici (často se daná data vůbec neměří). V případě kondenzátoru řešeném v této práci byla k dispozici pouze teplota chladící vody, ostatní parametry bylo třeba dopočítat (namodelovat) z jiných veličin, které jsou měřené, sbírané a dostupné.

V podkladech předaných z elektrárny byl k dispozici soubor měřených dat, který obsahoval v časové posloupnosti sbírané hodnoty statusu, výkonu turbíny, teploty chladící vody na vstupu do kondenzátoru, tlakový spád ve větví 1 i 2 v kondenzátoru, průtok kondenzátu, průtok DEMI vody a hodnoty tlaku a teploty páry, se kterými se bude porovnávat predikovaný tlak (teplota) k ověření správnosti modelu a nalezení případné závady. Názorná identifikace měřicích bodů, ze kterých jsou poskytnuta data, je zakreslena na schématu kondenzátoru na Obr. 18.



Obr. 18 Kondenzátor – měřicí body

Z Obr. 19 je patrné možné nahrazení vstupních parametrů z předchozího schématu (Obr. 17) a jejich vzájemné ovlivňování, tyto poznatky je vhodné využít při vytváření modelu.

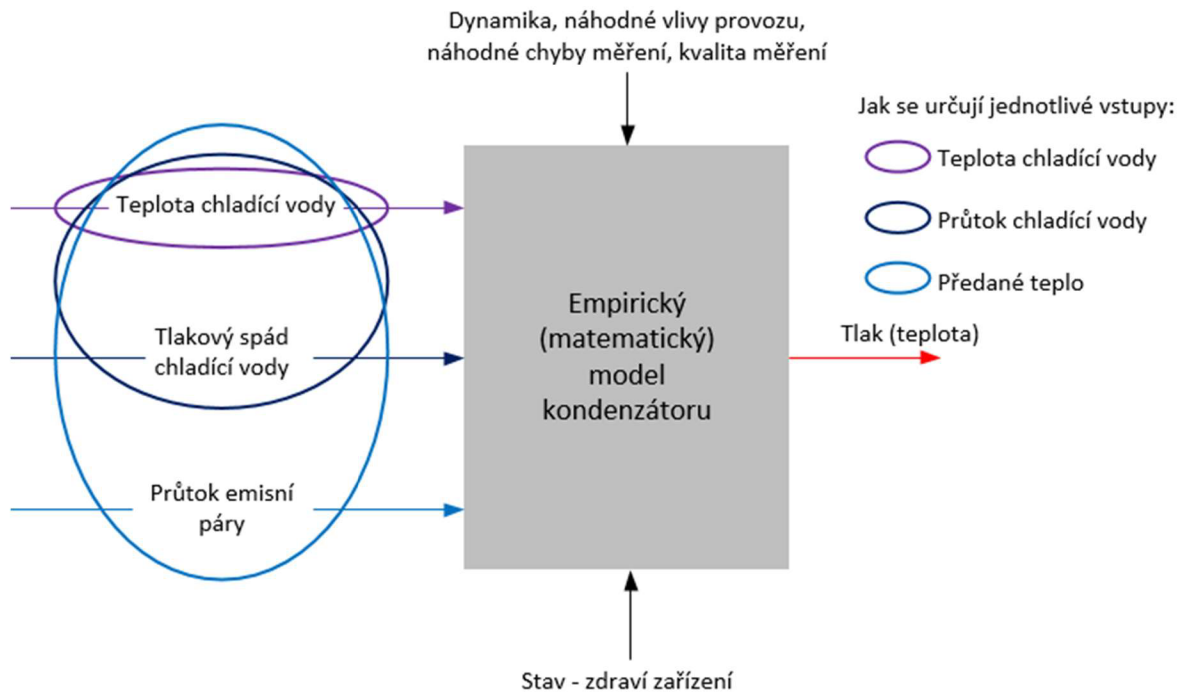
- Průtok chladicí vody je možné nahradit tlakovým rozdílem chladicí vody mezi vstupem a výstupem na jednotlivých větvích potrubí kondenzátoru. Z odmocniny průměrů těchto hodnot je vypočítán průtok chladicí vody [31]:

$$F_{chv} = k \cdot \sqrt{dp_{chv}}. \quad (4.1)$$

V tomto vzorci se projeví vliv tlakových spádů, proto tyto hodnoty nebudou dále uvažovány jako regresory.

- Předané teplo lze nahradit průtokem emisní páry, který lze dopočítat jako průtok kondenzátu, od kterého se odečte průtok DEMI vody. Tyto veličiny proto nebudou dále uvažovány jako regresory.

$$F_{páry} = F_{kondenzát} - F_{DEMI\ vody}. \quad (4.2)$$



Obr. 19 Schéma modelu tepelné elektrárny – nahrazení parametrů

Do výsledného vzorce lineární regrese je vhodné použít i kvadratické, popř. další mocninné regresory, také je přínosné přidat složené regresory ze vstupních parametrů. Např. teplota má na výstup jiný vliv, při vyšším a při nižším průtoku chladicí vody. Tyto složené a mocninné členy je nutné otestovat, jestli jsou přínosné pro zlepšení empirického (regresního) modelu.

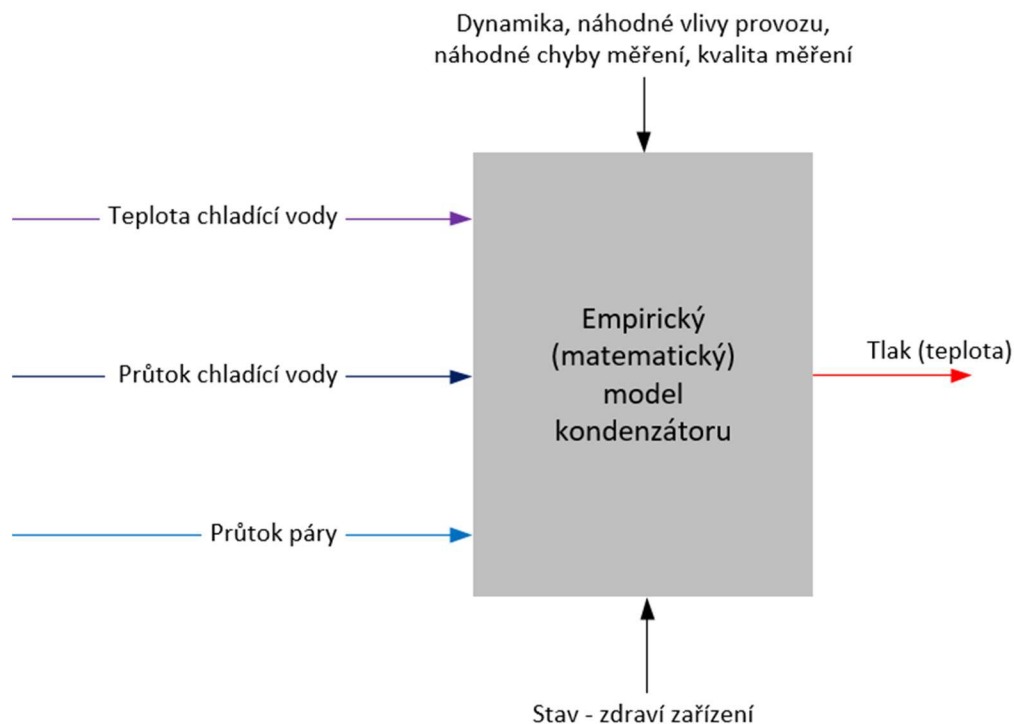
## 4.1 Zpracování dat

Nejdříve je potřeba ze získaných dat v programu Excel vytvořit vstupní veličiny (Obr. 20), tedy teploty chladicí vody, průtok chladicí vody a průtok páry (viz předchozí kapitola). A poté další regresory, které jsou využity v modelu.

Pro výběr vstupních dat byly stanoveny následující podmínky eliminace:

- Výkon turbíny byl omezen od 150 do 200 MW (jmenovitý výkon turbíny), pokud se hodnoty pohybují mimo tento interval, jedná se o mimořádné stavy. Výkon turbíny má vliv na množství páry přivedené do kondenzátoru. Omezením výkonu se dosáhne i omezení hodnoty průtoku páry a tím se výsledný model zpřesní.
- Status byl omezen hodnotou 0,8. Vyšší status může značit nestacionaritu zařízení. Modely, které jsou vytvářeny, jsou kvazistacionární, proto je snaha eliminovat hodnoty naměřené při dynamických změnách, tedy přechodném stavu.

Do modelu byla zahrnuta data za období od 1. 2. 2018 do 31. 5. 2018. Po eliminaci dat dle statusu a výkonu turbíny, bylo z datového souboru vybráno 9878 časových vzorků.



Obr. 20 Konkrétní schéma modelu tepelné elektrárny

## 4.2 Postup výstavby lineárního regresního modelu

K vypracování výsledného empirického modelu bylo potřeba programu QC Expert a jeho funkcí. K aktuálně navrhnutému modelu (volbou určitých regresorů) se po provedení výpočtu zobrazí protokol, tj. dokument, ve kterém jsou vypsány všechny důležité parametry a jejich hodnoty k následnému vyhodnocení důležitosti konkrétních regresorů, a další zobrazené okno je s vybranými grafy.

Nyní bude popsán postup volby regresorů. Jako primární metoda byla zvolena metoda postupného přidávání regresorů. Prvně proběhla analýza vstupních veličin a poté budou postupně do modelu přidány a rozebrány jednotlivé potenciální regresory. Bude testována jejich významnost vzhledem ke zvýšení přesnosti modelu. Tyto jednotlivé kroky budou značeny číslováním modelů (první model, druhý model, ...). Důležitým hodnotícím kritériem pro přesnost modelu zobrazeným v protokolu je Střední kvadratická chyba predikce (MEP), pro kterou platí, že ve výsledném modelu je snaha odmocninu z MEP dostat pod hodnotu 0,1. Tato hodnota je zvolena na základě zkušeností. Změna tlaku o více jak 0,1 kPa se významněji projeví na zhoršení účinnosti kondenzátoru, a to má výrazný vliv na ekonomii provozu. Proto je při překročení této hodnoty adekvátní se zabývat důvodem vzniku výkyvu tlaku. Např. ztráta turbíny při výkonu 200 MWe a při zvýšení tlaku v kondenzátoru o 0,3 kPa je 0,5 MWe. [7] Při zpřesňování modelu je důležité najít hranici mezi počtem regresorů a zpřesňováním modelu, a tak vytvořit finální empirický model, který je nastíněn níže.

- Příklad:

$$\text{Tlak/Teplota} = \beta_1 \cdot T_{chv} + \beta_2 \cdot F_{chv} + \beta_3 \cdot F_{páry} + \dots \quad (4.3)$$



V prvním modelu bude predikován tlak (kapitola 4.3) a ve druhém teplota (kapitola 4.4). Hodnoty těchto parametrů jsou na sobě vzájemně závislé, proto se predikuje jen jeden z těchto výstupů. Nyní budou postupně rozebrány vstupní veličiny.

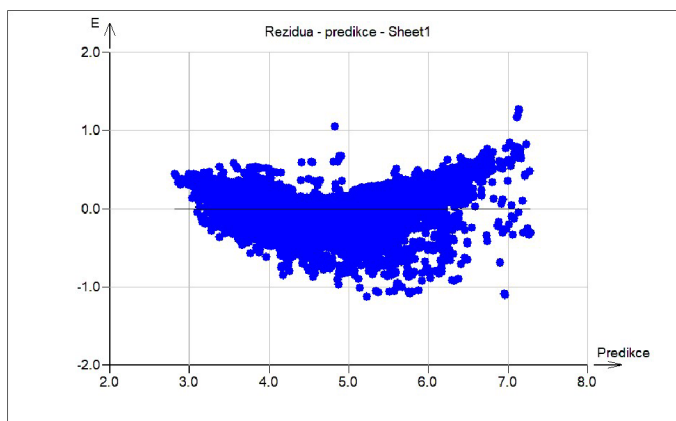
Vysvětlení zkratk k následujícímu textu:

$T_{chv}$	Teplota chladicí vody
$F_{chv}$	Průtok chladicí vody
$F_{páry}$	Průtok páry

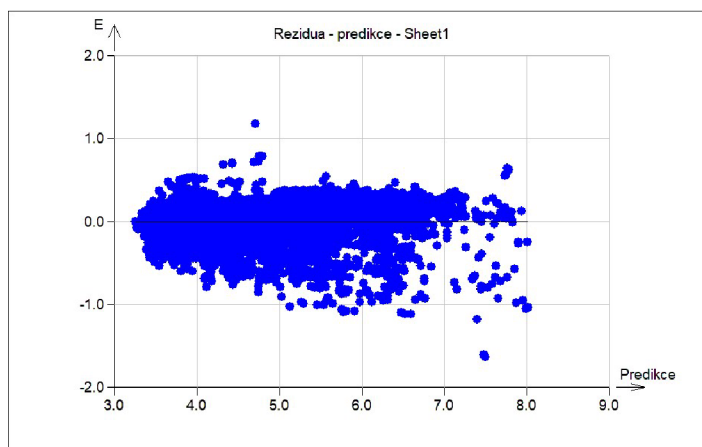
Prvními vstupy přidanými do modelu budou 3 základní regresory, u kterých bude testován jejich vliv na výstupní parametr. Postupuje se výběrem konkrétního vstupu a výstupu. V této části je důležitý především graf reziduí, na kterém je vidět, jestli mezi jednotlivými rezidui existuje trend, kterého je nutné se vyvarovat. Řešením nelinearity může být například přidání kvadratického členu. V této části se řeší především významnost mocninných členů jednotlivých vstupů pro zpřesnění modelu.

#### Teplota chladicí vody (predikce výstupního tlaku)

Prvním otestovaným vstupem byla teplota chladicí vody. Rezidua jsou prohnutá do tvaru půl měsíce (Obr. 21), což naznačuje kvadratickou (nelineární) závislost, zde je vhodné vytvořit polynom. Při doplnění o kvadratický člen se přesnost se zlepšila a zmizela nelinearita (Obr. 22). Byl přidán také člen se třetí mocninou, ten už nepřinesl žádné výrazné zlepšení, proto tento regresor nebude využit.



Obr. 21 Rezidua – teplota chladicí vody (nelinearita)



Obr. 22 Rezidua – teplota chladicí vody

#### Průtok chladicí vody (predikce výstupního tlaku)

Druhým testovaným vstupem byl průtok chladicí vody. Rezidua mají neurčitou strukturu. Po přidání kvadratického členu se přesnost modelu lehce zhoršila, stejný efekt však nemusí mít v celkovém modelu, jak už bylo zmíněno výše.

#### Průtok páry (predikce výstupního tlaku)

Dalším testovaným vstupem je průtok páry. V grafech rezidui je vidět výrazná heteroskedasticita dat. Přidáním kvadratického členu nastane malé zlepšení. Tento regresor také ještě ověříme v celkových modelech.

Analýza vstupních parametrů (regresorů) byla stejná jak pro model s predikcí tlaku, tak i pro model s predikcí teploty, proto jsou poznatky analýzy souhrnně uvedeny v jedné kapitole. Při dalším přidávání regresorů už je nutné popis modelů rozdělit do dvou kapitol 4.3 a 4.4.

### 4.3 Model – predikce tlaku

Při vytváření modelu o různých vstupech je důležité dbát na znaménkovou kontrolu, která vyplývá z fyzikálních principů. I když regresní analýza nebere v úvahu fyzikální zákonitosti, tedy míru vlivu regresoru na výstup, alespoň znaménka u regresních koeficientů napovídají o směru tohoto vlivu. Ovlivňování tlaku vstupy je zapsáno v Tab. 1. Při zvýšení průtoku páry tlak v kondenzátoru roste, naopak při zvýšení průtoku chladicí vody tlak klesá a při nárůstu teploty chladicí vody, tlak opět roste. Toto signalizují opačná znaménka u koeficientů regresorů v protokolu.

↑ F páry	↑ p
↑ F chv	↓ p
↑ T chv	↑ p

Tab. 1 Závislost tlaku na vstupních parametrech

V kapitole 4.2 bylo zmíněno, že přesnost modelu je dána hodnotou odmocniny ze střední kvadratické chyby predikce (MEP), kde pro predikci tlaku platí, že  $\sqrt{MEP} < 0,1$ .

V další části začíná výstavba modelu, kdy jednotlivé kroky (přibírání nebo odebírání regresorů) budou značeny číslováním dílčích modelů (první model, druhý model, ...). V každém z dílčích modelů jsou vypsány regresory, významnost členů a  $\sqrt{MEP}$ .

Významnost členů – určuje správnost volby regresorů. Člen (regresor) je významný, pokud interval spolehlivosti neobsahuje nulu. Tento výstup je zobrazen v protokolu. Tabulka s konkrétními hodnotami bude uvedena u posledního (výsledného) modelu.

#### První model

Regresory	$T_{chv}, F_{chv}, F_{páry}$
Významnost členů	Všechny člen jsou významné

Fyzikální podstata, dle znamének u odhadů regresorů je v pořádku. S přidáním kvadratických členů už nelze provádět znaménkovou kontrolu.

#### Druhý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2793

#### Třetí model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{páry}^2$
Významnost členů	F páry nevýznamný
$\sqrt{MEP}$	0,2793

Tento regresor nijak nezlepšuje model a jeho přidáním se F páry stává nevýznamným, proto s ním nebudeme uvažovat.

#### Čtvrtý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv}^2$
Významnost členů	F chv <sup>2</sup> je nevýznamný
$\sqrt{MEP}$	0,2678

Tento regresor je v modelu nevýznamný a výrazně nezlepšuje model, proto jej nebudeme uvažovat.

Následně jsou do pátého modelu přidávány složené členy, které mohou pojmout vzájemné ovlivňování dvou veličin mezi sebou.

#### Pátý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv} \cdot T_{chv}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2661

#### Šestý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv} \cdot F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2432

#### Sedmý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, T_{chv} \cdot F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2396

#### Osmý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv}^2, F_{páry}^2, T_{chv} \cdot F_{páry}, F_{chv} \cdot F_{páry}, F_{chv} \cdot T_{chv}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2231

I přes nejnižší hodnotu  $\sqrt{MEP}$  u osmého modelu byl zvolen po zhodnocení dílčích modelů jako podklad pro výsledný empirický model sedmý model, který má nejnižší hodnotu  $\sqrt{MEP}$  s ohledem na množství regresorů, proto v něm budeme dále eliminovat odlehlá data (viz kapitola 2.4.4). Osmý model může obsahovat regresory, které by mohly regresi zesložitovat,

#### Devátý model

- Kritika dat

V tomto kroku probíhá odstranění odlehlých hodnot, tedy hodnot, které jsou něčím “kontaminované“. Pro správný model a je nutné tyto hodnoty vyloučit z dalšího zpracování. Data se eliminují dle Williamsova grafu a grafu reziduí (viz kapitola 2.4.4).

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, T_{chv} \cdot F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	$0,0813 < 0,1 \text{ kPa}$

Důležité hodnoty z protokolu pro empirický model kondenzátoru jsou zapsány v Tab. 2. V této tabulce jsou v prvním sloupci vypsány jednotlivé regresory použité v modelu, ve druhém hodnoty regresních koeficientů, ve třetím je již zmíněná významnost členů, ve čtvrtém je uvedena směrodatná odchylka koeficientu a posledních dvou sloupcích je horní a spodní mez intervalu spolehlivosti.

Proměnná (regresor)	Odhad reg. koeficientu	Závěr	Směrodatná odchylka	Spodní mez	Horní mez
Abs	4,4185	Významný	0,0713159	4,278737	4,55832
$T_{chv}$	-0,1611	Významný	0,00455430	-0,169993	-0,1521
$T_{chv}^2$	0,007908	Významný	8,3546E-005	0,0077416	0,00806
$F_{chv}$	-0,3919	Významný	0,00274062	-0,397283	-0,38653
$F_{páry}$	0,001337	Významný	0,00018771	0,0009685	0,001704
$F_{páry} \cdot T_{chv}$	0,0003197	Významný	1,0575E-005	0,0002989	0,000340

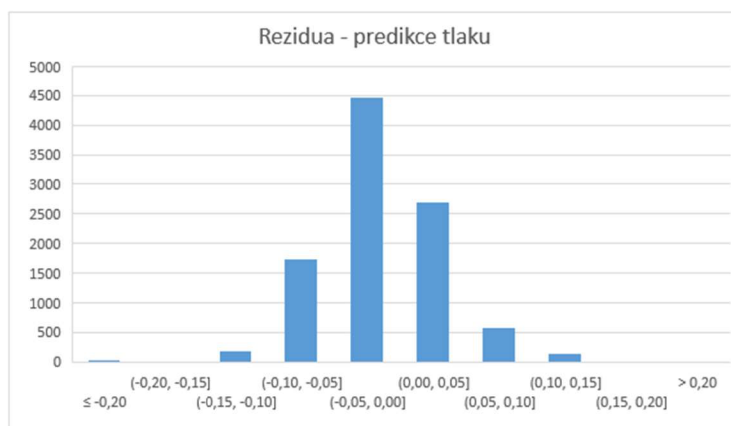
Tab. 2 Přehledová tabulka – predikce tlaku

Ze vzorce 4.3 a Tab. 2 vychází výsledný empirický model pro predikci tlaku, tedy vztah 4.4. Výstupní data (Příloha 1) ze vzorce jsou graficky znázorněny v grafu (Obr. 24) křivkou predikovaného tlaku (oranžová křivka). Graf je v plném rozsahu přiložen v Příloha 6. V grafu je taky modře vyneseno reálný tlak a rozdíl těchto tlaků (reziduum) je zobrazen šedou křivkou. Modře zakreslená oblast v grafu ukazuje interval, ve kterém by se trend křivky reziduí (tmavě modrá křivka) měl pohybovat v případě bezzávadového stavu kondenzátoru. Zobrazení v grafu je názornější a uživatelsky přívětivější než výpis hodnot reziduí, ve kterých by nebylo snadné nalézt vybočující hodnoty. Rezidua jsou také zobrazena v histogramu (Obr. 23 Histogram reziduí – predikce tlaku Obr. 23). Rezidua vytváří Gaussovo rozdělení, které je žádoucí. V přílohách jsou v plném rozsahu výsledné grafy (Příloha 2) a protokol (Příloha 3) z programu QC Expert.

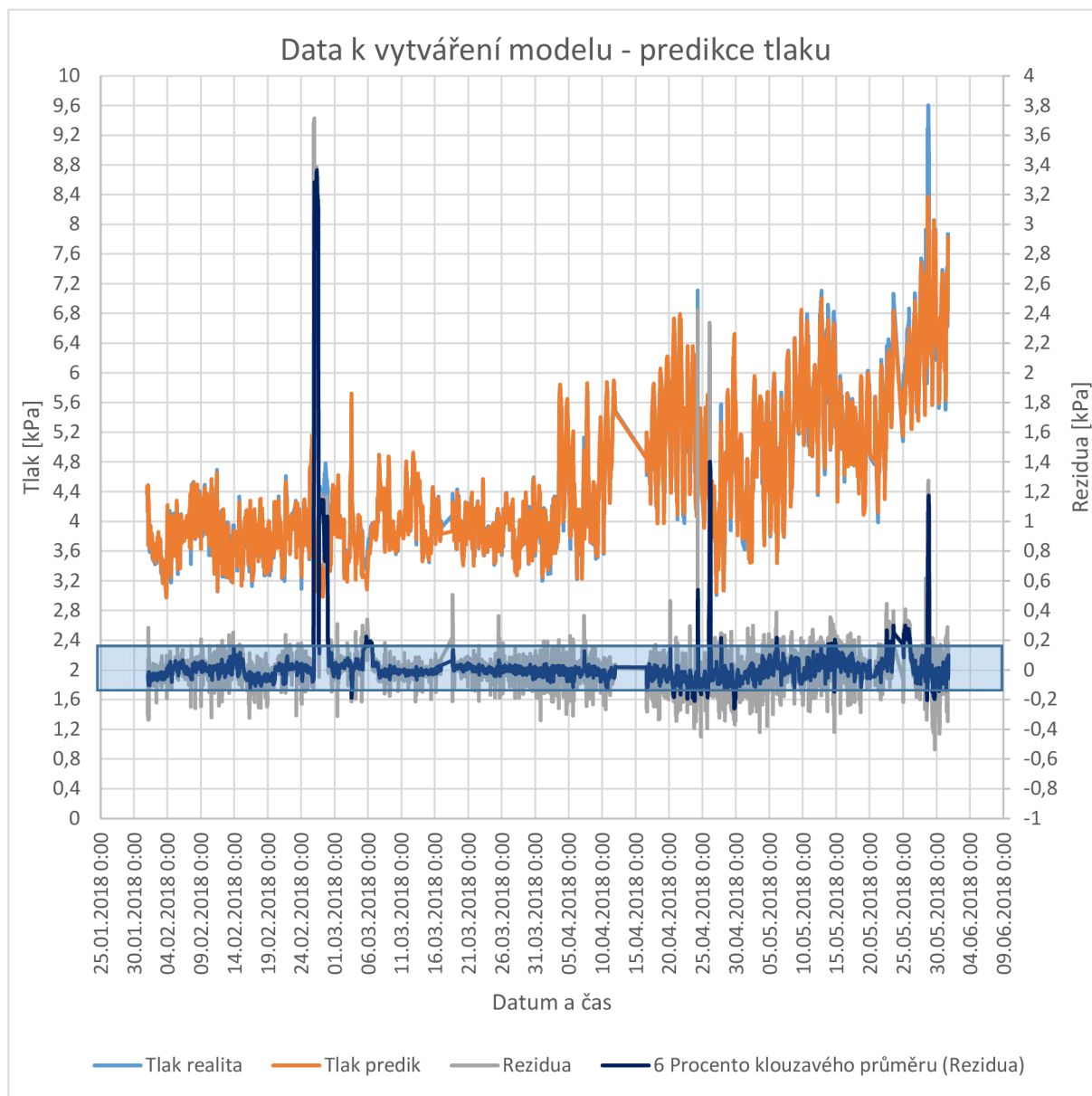
$$p_{predik} = 4,4185 - 0,1611 \cdot T_{chv} + 0,007908 \cdot T_{chv}^2 - 0,3919 \cdot F_{chv} + 0,001337 \cdot F_{pára} + 0,0003197 \cdot F_{chv} \cdot T_{chv} \quad (4.4)$$

- Kritika modelu

Každý parametr regresní analýzy je významný. Směrnice přímků parciálního grafu je nenulová.



Obr. 23 Histogram reziduí – predikce tlaku



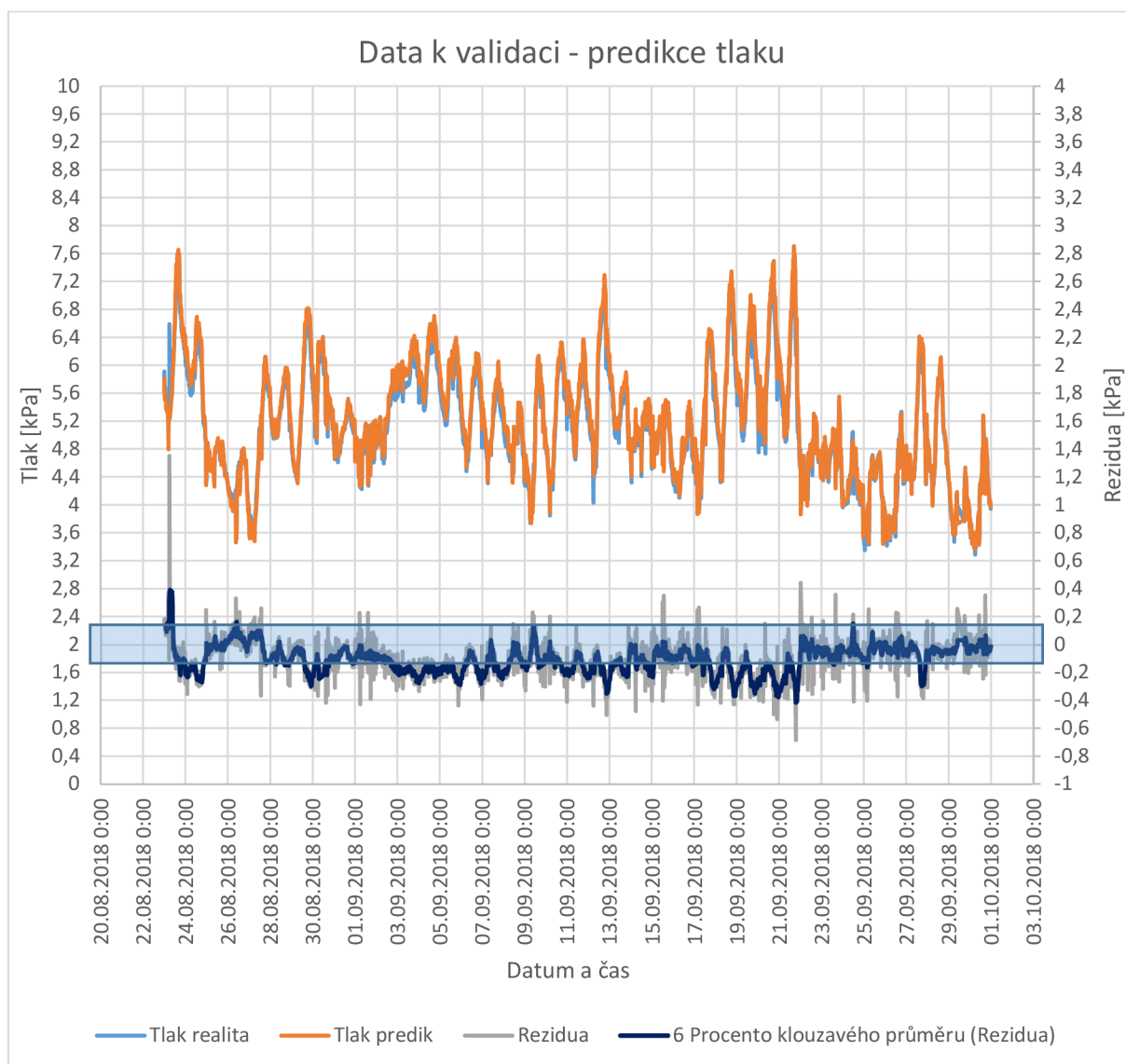
Obr. 24 Graf průběhu hodnot pro modelová data (predikce tlaku)

- Kritika metody

Kritika metody v tomto případě spočívá v kontrole vlastností v protokolu (Příloha 3). Jedná se o snahu dosažení nestranných lineárních odhadů. V protokolu probíhá kontrola vlastností modelu (významnosti modelu, multikolinearity, konstantnosti rozptylu reziduí, autokorelace, normality reziduí). Kvůli časové závislosti však všechny hodnoty nevychází. V praxi jsou některé podmínky porušeny. Závěrem lze stanovit, že MNČ je vhodná.

#### 4.3.1 Validace modelu

Validace je kontrola správnosti modelu, tzn. aplikování výsledného empirického modelu (vztah 4.4) na testovací sadu dat (tj. data z jiného období, než ze kterého byl vytvářen model). Pokud je model kvalitní trend reziduí by se měl pohybovat ve vymezeném intervalu. Jak lze vidět na Obr. 25, i když je vybrán nejlepší možný model pro predikci tlaku, tak trend křivky reziduí se často vychyluje z vymezeného intervalu.



Obr. 25 Validace modelu – predikce tlaku

## 4.4 Model – predikce teploty

Výstavba tohoto modelu bude velmi podobná výstavbě modelu pro predikci tlaku, proto zde nebude každý krok detailně popsán, jako tomu bylo v předchozí kapitole 4.3. Nejprve bude provedena kontrola znamének stejně jako při predikci tlaku. Ovlivňování teploty vstupy je zapsáno v Tab. 3.

↑ F páry	↑ T
↑ F chv	↓ T
↑ T chv	↑ T

Tab. 3 Závislost teploty na vstupních parametrech

Výše bylo zmíněno, že přesnost modelu je dána hodnotou odmocniny ze střední kvadratické chyby predikce (MEP). Pro predikci teploty platí  $\sqrt{MEP} < 0,3$ .

V další části začíná výstavba modelu, kdy jednotlivé kroky budou značeny číslováním dílčích modelů (první model, druhý model, ...). U každém z dílčích modelů jsou vypsány regresory, významnost členů a  $\sqrt{MEP}$ .

### První model

Regresory	$T_{chv}, F_{chv}, F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné

Fyzikální podstata, dle znamének u odhadů regresorů jsou v pořádku. S přidáním kvadratických členů už nelze provádět znaménkovou kontrolu

### Druhý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,9745

### Třetí model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{páry}^2$
Významnost členů	F páry <sup>2</sup> nevýznamný
$\sqrt{MEP}$	0,9744



Čtvrtý model

Regresory	$T_{\text{chv}}, T_{\text{chv}}^2, F_{\text{chv}}, F_{\text{páry}}, F_{\text{chv}}^2$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,9497

Pátý model

Regresory	$T_{\text{chv}}, T_{\text{chv}}^2, F_{\text{chv}}, F_{\text{páry}}, F_{\text{chv}}^2, F_{\text{páry}}^2$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,9496

Následně jsou do pátého modelu přidávány složené členy, které mohou pojmout vliv vzájemného ovlivňování dvou veličin mezi sebou.

Šestý model

Regresory	$T_{\text{chv}}, T_{\text{chv}}^2, F_{\text{chv}}, F_{\text{páry}}, F_{\text{chv}}^2, F_{\text{páry}}^2, F_{\text{chv}} \cdot T_{\text{chv}}$
Významnost členů	$F_{\text{páry}}^2$ je nevýznamný
$\sqrt{MEP}$	0,9414

Sedmý model

Regresory	$T_{\text{chv}}, T_{\text{chv}}^2, F_{\text{chv}}, F_{\text{páry}}, F_{\text{chv}}^2, F_{\text{páry}}^2, F_{\text{chv}} \cdot F_{\text{páry}}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,9458

Osmý model

Regresory	$T_{\text{chv}}, T_{\text{chv}}^2, F_{\text{chv}}, F_{\text{páry}}, F_{\text{chv}}^2, F_{\text{páry}}^2, T_{\text{chv}} \cdot F_{\text{páry}}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,8118

### Devátý model

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv}^2, F_{páry}^2, T_{chv} \cdot F_{páry}, F_{chv} \cdot F_{páry}, F_{chv} \cdot T_{chv}$
Významnost členů	Všechny členy jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,8116

Po zhodnocení modelů má osmý model nejnižší hodnotu  $\sqrt{MEP}$  s ohledem na počet parametrů, proto v něm budeme dále eliminovat data, která by mohly regresy zesložitovat.

### Desátý model

- Kritika dat

V tomto kroku probíhá odstranění odlehlých hodnot, tedy hodnot, které jsou něčím “kontaminované”. Pro správný model je nutné tyto hodnoty vyloučit z dalšího zpracování. Data se eliminují dle Williamsova grafu a grafu reziduí (viz kapitola 2.4.4), aby vznikl výsledný empirický vztah.

Regresory	$T_{chv}, T_{chv}^2, F_{chv}, F_{páry}, F_{chv}^2, F_{páry}^2, T_{chv} \cdot F_{páry}$
Významnost členů	Všechny člen jsou významné
$\sqrt{MEP}$	0,2907 < 0,3°C

Výsledné hodnoty pro empirický model jsou z protokolu přepsány do Tab. 4. V této tabulce jsou v prvním sloupci vypsány jednotlivé regresory použité v modelu, ve druhém hodnoty regresních koeficientů, ve třetím je již zmíněná významnost členů, ve čtvrtém je uvedena směrodatná odchylka koeficientu a posledních dvou sloupcích je horní a spodní mez intervalu spolehlivosti.

Proměnná (regresor)	Odhad reg. koeficientu	Závěr	Směrodatná odchylka	Spodní mez	Horní mez
Abs	20,4154	Významný	0,737691	18,96933	21,861398
$T_{chv}$	0,6994	Významný	0,0164146	0,6672649	0,731617
$T_{chv}^2$	0,0057	Významný	0,0002843	0,00518512	0,0062999
$F_{chv}$	-4,9387	Významný	0,184304	-5,300019	-4,577469
$F_{chv}^2$	0,2675	Významný	0,01487704	0,2383644	0,2966887
$F_{páry}$	0,05403	Významný	0,0027122	0,04871504	0,05934786
$F_{páry}^2$	-3,769*10 <sup>-5</sup>	Významný	3,7498E-006	-4,505E-005	-3,0347E-005
$F_{páry} \cdot T_{chv}$	0,00011	Významný	3,7015E-005	3,6149E-005	0,00018126

Tab. 4 Přehledová tabulka – predikce teploty

Výsledný empirický model 4.5 a Tab. 4 vychází ze vzorce 4.3 a jako regresní koeficienty jsou doplněny hodnoty z druhého sloupce Tab. 4. Výsledné predikované hodnoty z empirického modelu pro predikovanou teplotu (Příloha 1) jsou graficky znázorněny v grafu (Obr. 26)

křivkou predikované teploty (oranžová křivka). Graf je v plném rozsahu přiložen v Příloha 6. V grafu je taky modře vynesena reálná teplota a jejich rozdíl (reziduum) je zobrazen šedou křivkou. Modře zakreslená oblast v grafu ukazuje interval, ve kterém by se trend křivky reziduí měl pohybovat. Trend křivky reziduí méně vybočuje mimo interval oproti trendu u křivky reziduí při predikci tlaku. Rezidua jsou dále zobrazena v histogramu (Obr. 27), ve kterém vytváří Gaussovo rozdělení, které je žádoucí.

V přílohách jsou v plném rozsahu výsledné grafy (Příloha 4) a protokol (Příloha 5) z programu QC Expert.

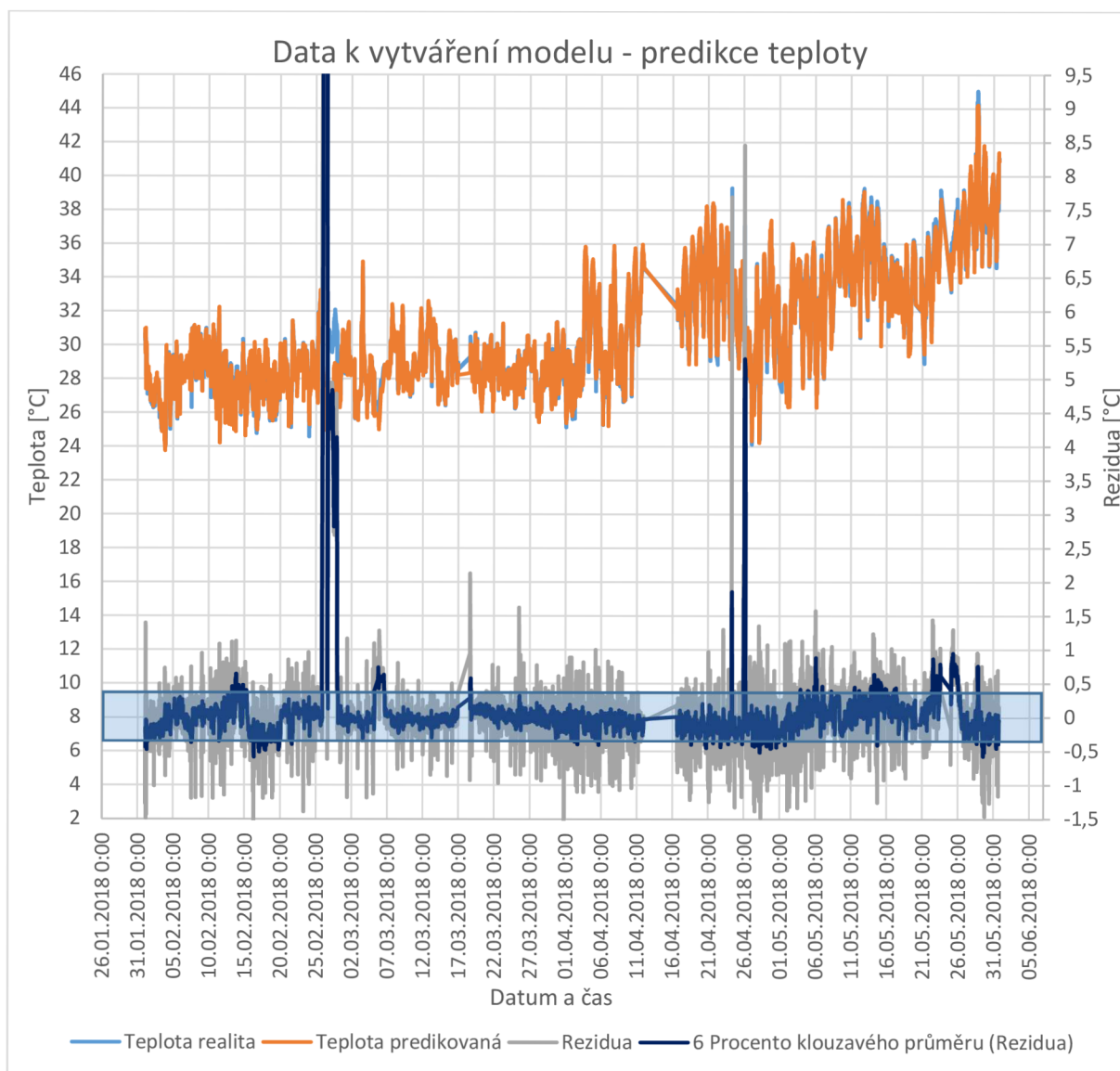
$$\begin{aligned} T_{predik} = & 20,4154 + 0,6994 \cdot T_{chv} + 0,0057 \cdot T_{chv}^2 - 4,9387 \cdot F_{chv} \\ & + 0,2675 \cdot F_{chv}^2 + 0,05403 \cdot F_{pára} - 0,000037 \cdot F_{pára}^2 \\ & + 0,00011 \cdot F_{chv} \cdot T_{chv} \end{aligned} \quad (4.5)$$

- Kritika modelu

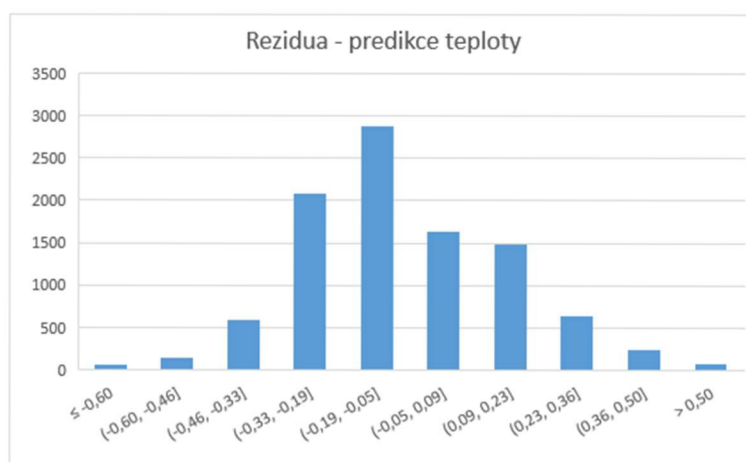
Každý parametr regresní analýzy je významný. Směrnice přímky parciálního grafu je nenulová.

- Kritika metody

Kritika metody spočívá v kontrole vlastností v protokolu (Příloha 5). Jedná se o snahu dosažení nestranných lineárních odhadů. V protokolu probíhá kontrola významnosti modelu, multikolinearity, konstantnosti rozptylu reziduí, autokorelace, normality reziduí. Kvůli časové závislosti však všechny hodnoty nevychází. V praxi jsou některé podmínky porušeny. Závěrem lze stanovit, že MNČ je vhodná.



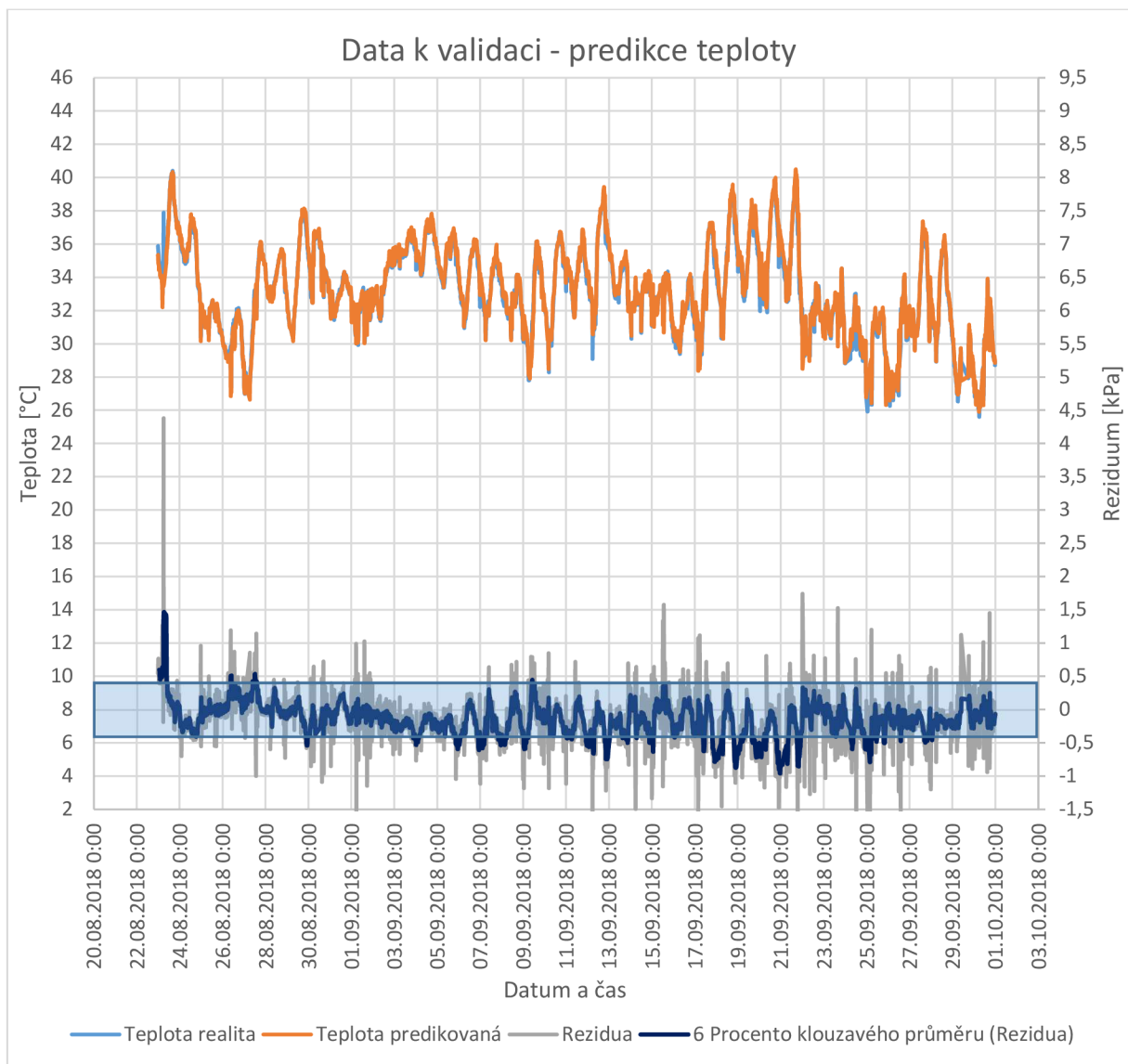
Obr. 26 Graf průběhu hodnot pro modelová data (predikce teploty)



Obr. 27 Histogram reziduí – predikce teploty

#### 4.4.1 Validace modelu

Jedná se o aplikování výsledného empirického modelu (vztah 4.5) na testovací sadu dat (tj. data z jiného období, než ze kterého byl vytvářen model). Na Obr. 28 lze vidět, že reálná data věrně kopírují predikci a trend reziduí povětšinou setrvává ve vymezeném intervalu, což značí kvalitu vytvořeného empirického modelu, z tohoto důvodu je vztah (4.5) brán jako výsledný empirický vzorec pro predikování chování kondenzátoru.



Obr. 28 Graf validace modelu – predikce teploty

## 4.5 Shrnutí – výběr modelu

V předchozích kapitolách 4.3 a 4.4 byl vytvořen model s predikcí tlaku a s predikcí teploty. Oba modely jsou uspokojivé. Relativně věrně predikují výstupní tlak nebo teplotu, ale na grafech z validace modelu je zřejmá lepší predikce teploty. V praxi se však mnohem více pracuje s tlakem. Proto je pro praxi výhodnější predikovat tlak. Jelikož model pro predikci teploty vychází lépe než model pro predikci tlaku, bude využit ten a predikovaná teplota, vypočtená vztahem (4.5), bude přepočítána na tlak.

### 4.5.1 Přepočet z modelu teploty na tlak

Tlak je v praxi využíván častěji než teplota, proto bude predikovaná teplota přepočítána na tlak, dle vzorce pro přepočet, který vyplývá ze zdroje [32] strana 18.

Na intervalu teplot 0 °C až 80 °C lze pro výpočet tlaku syté páry použít vztah:

$$\ln p_p'' = \frac{C_8}{T_{predik}} + C_9 + C_{10} \cdot T_{predik} + C_{11} \cdot T_{predik}^2 + C_{12} \cdot T_{predik}^3 + C_{13} \cdot \ln T_{predik} \quad (4.6)$$

kde  $p_p''$  [kPa] je tlak syté páry,  $T$  [K] je termodynamická teplota a  $C_8$  až  $C_{13}$  jsou konstanty o hodnot

$$C_8 = -5,8002206 \cdot 10^3$$

$$C_9 = 1,3914993$$

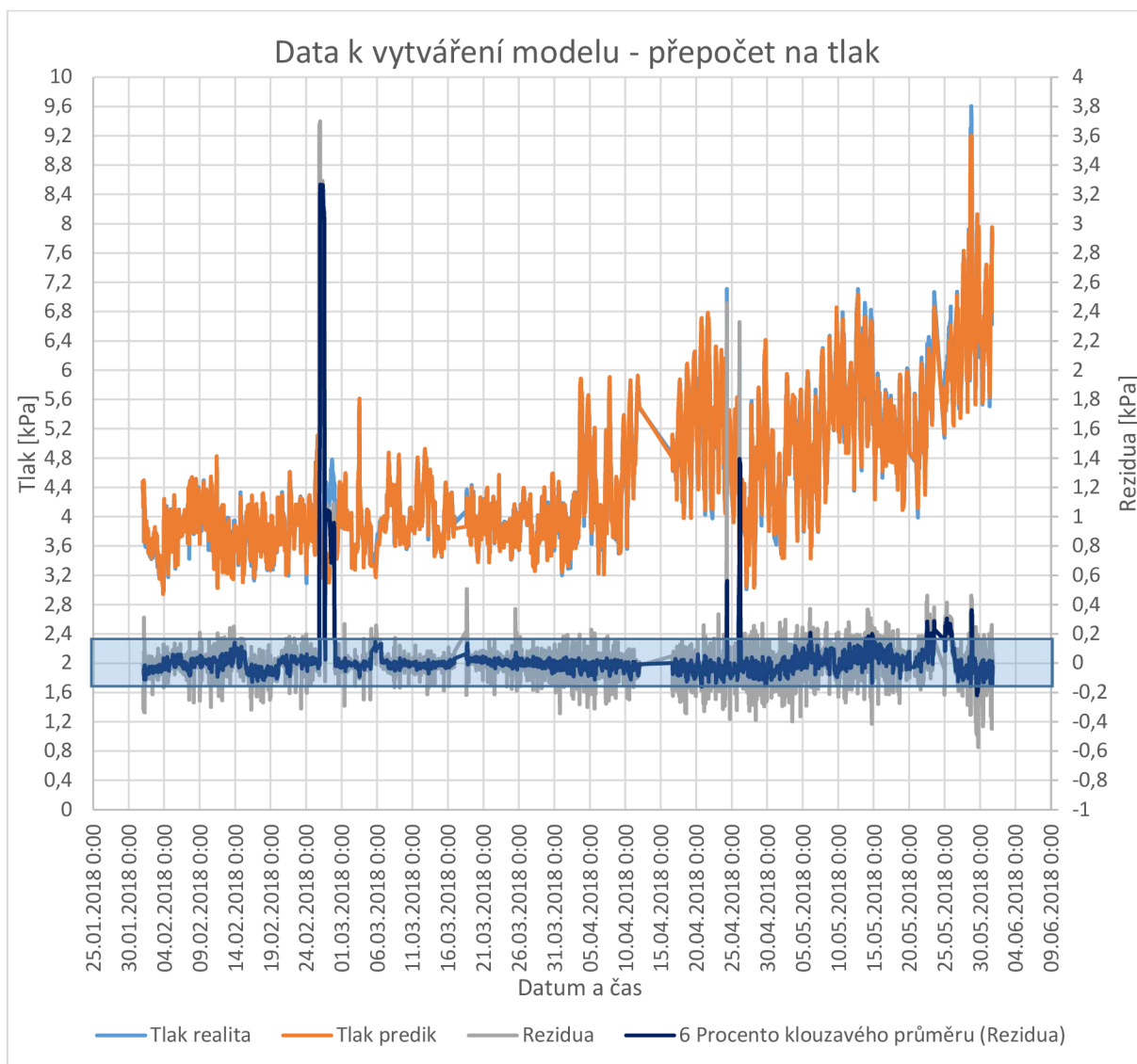
$$C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-2}$$

$$C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-5}$$

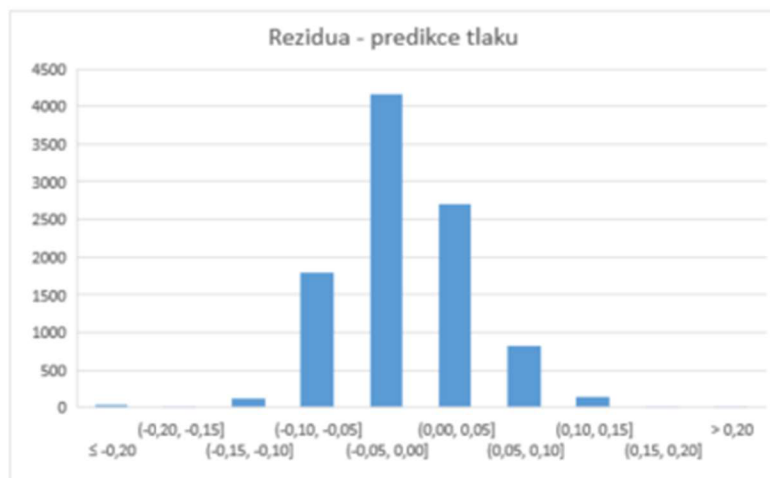
$$C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-8}$$

$$C_{13} = 6,5459673.$$

Přirozený logaritmus  $\ln p_p''$  bude odlogaritmován a výsledné hodnoty predikovaného tlaku jsou zapsány v Příloha 1 a tyto hodnoty jsou vyneseny oranžovou křivkou do grafu (Obr. 29). Přesnost tohoto modelu je nejlépe vidět na trendu křivky reziduí, zdali se trend křivky nachází v požadovaném intervalu či nikoli, kvalita vytvořeného modelu, bude zkontrolována validací v kapitole 4.5.2. V grafu je vidno, že křivka reziduí téměř nevybočuje mimo vymezený interval. Histogram reziduí (Obr. 30) vytváří Gaussovo rozdělení.



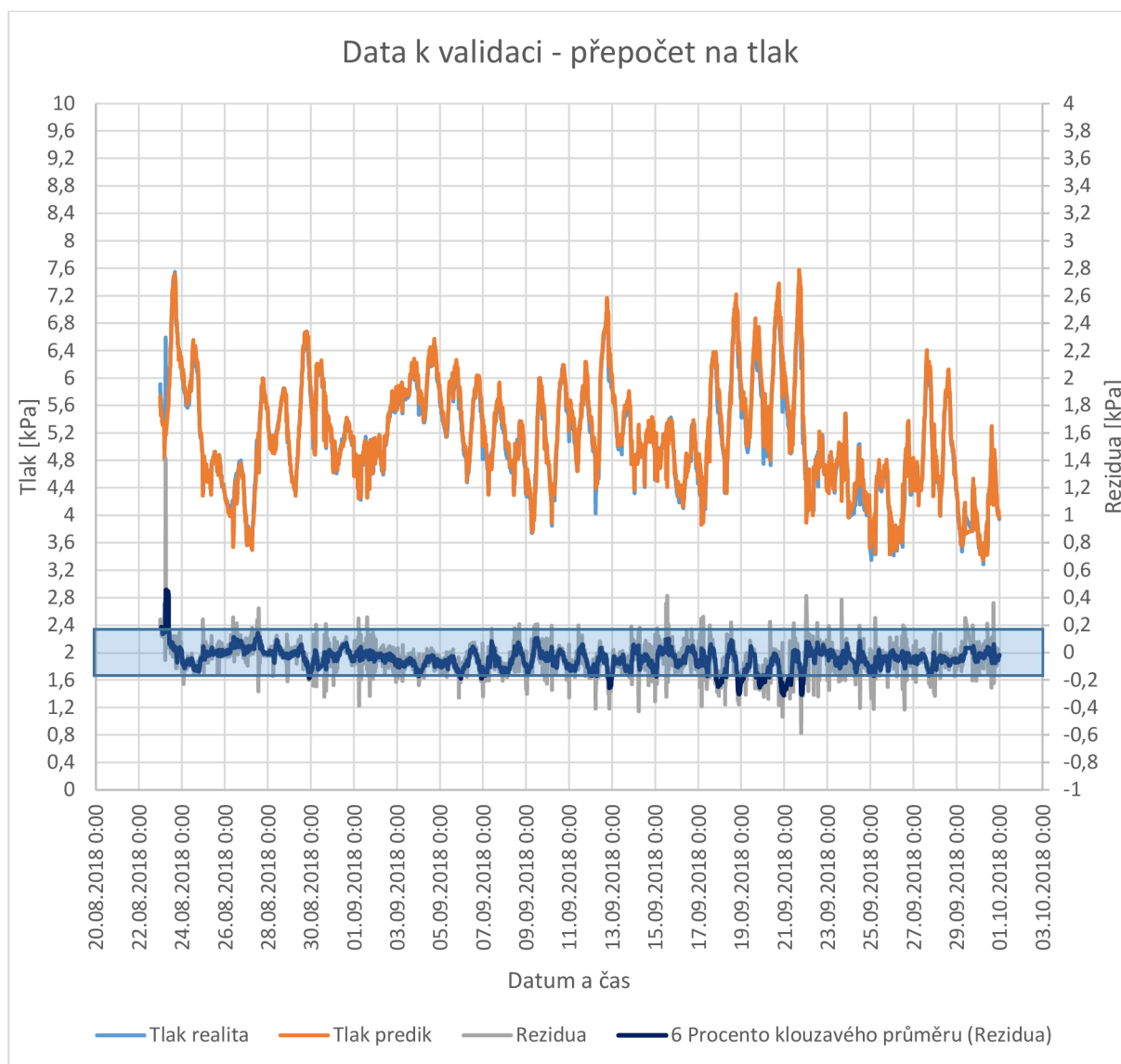
Obr. 29 Graf průběhu hodnot pro modelová data (přepočtená teploty na tlak)



Obr. 30 Histogram reziduí

#### 4.5.2 Validace

Validace spočívá v aplikování empirického modelu teploty (vztah 4.5), který byl přepočítán na tlak (vztahem 4.6) na testovací sadu dat. Na Obr. 31 lze vidět, jak reálná data věrně kopírují predikci tlaku. Kvalitu ukazuje trend reziduí, který po většinu časového úseku setrvává ve vymezeném intervalu, proto tímto přepočtem modelu bude v další kapitole kontrolován průběh „zdraví“ kondenzátoru v dostupném časovém období.



Obr. 31 Validace modelu



## 5 Využití empirického modelu v praxi

Empirické modely jsou vytvořeny v rámci zlepšení monitoringu a optimalizace systému na tepelné elektrárně. Tento kontrolní systém je aplikován na tepelných elektrárnách pro zvýšení efektivity elektrárenských zařízení, snížení emisí a vytvoření nezávislého kontrolního místa. Modely jsou schopné odhalit i drobné závady, které mají vliv na výkon konkrétního zařízení, tak i celé elektrárny. Využitím empirických modelů na elektrárnách lze předejít zvětšení závady (problému) a následně nutnosti provést neplánovanou odstávku nebo snížení výkonu, a tím ovlivnit poruchovost a ekonomii provozu.

Při vytváření empirického modelu záleží na tom, jaké parametry a s jakou přesností jsou na elektrárnách měřeny a jaká je jejich dostupnost. V případě této diplomové práce nebyly k dispozici všechny požadované vstupní parametry. Vstupy bylo nutné dopočítat z dostupných dodaných dat (viz kapitola 4) a v rámci empirického modelu vytvářet regresory.

Jako výsledný empirický model byl zvolen model pro predikci teploty, kde výstupní (predikovaná) teplota byla přepočítána na tlak. Tento přepočet byl proveden z důvodu, že v praxi je častější používání tlaku oproti teplotě. Tento případ bude dále využit pro praktickou ukázkou nálezu závady.

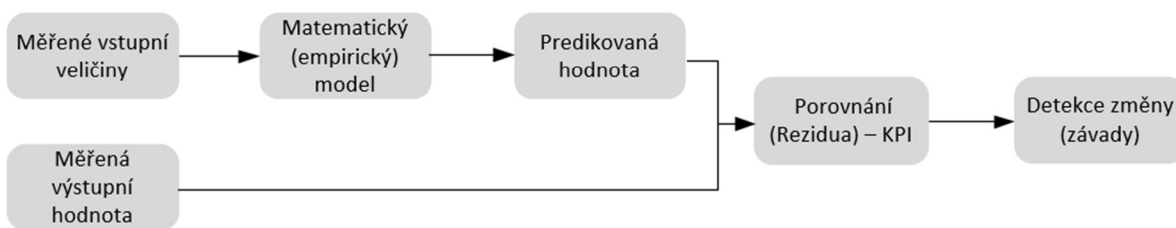
### 5.1 Princip diagnostiky – hledání závady

Diagnostika stavu kondenzátoru spočívá ve vhodné volbě KPI (key performance identifikátor). Klíčový parametr výkonosti je volen pro identifikaci stavu zařízení. V tomto případě je zvoleno za KPI reziduum.

Diagnostika stavu kondenzátoru probíhá pomocí empirického modelu, který predikuje zvolený výstup (veličinu) a porovnává tyto hodnoty s měřenými hodnotami stejné veličiny. Viz schéma na Obr. 32. V některých případech probíhá validace měřených dat. Validované hodnoty jsou naměřené hodnoty, které jsou zpracované tak, že lze tímto procesem získat přesnější a spolehlivější data (s minimálními náhodnými chybami a bez hrubých chyb měření).

Využívání modelu v praxi spočívá v porovnání predikovaných hodnot a měřených hodnot. Toto porovnání se děje i v „reálném“ čase, kdy se sbírají data z elektrárny, která se agregují (průměrují) po určitém intervalu. V tomto případě se jedná o interval 15 minut. Výsledné porovnání daného úseku lze zobrazit po 30 minutách od začátku měřeného intervalu. Po uplynutí sledovaného intervalu má model 15 min na sesbírání dat, provedení výpočtů a uložení dat do databáze. Data jsou následně porovnávána s predikovanou hodnotou z empirického (matematického) modelu. Tento rozdíl (reziduum) je zvolen jako identifikátor správnosti provozu. Reziduum má daný interval, ve kterém je žádoucí, aby se hodnota pohybovala. V případě, že sledovaná hodnota vybočí ze stanoveného intervalu ve třech po sobě následujících 15minutových časových úsecích, je odeslána notifikace definované skupině uživatelů a následně je identifikován druh modelem detekované závady. Schéma principu diagnostiky je vidno na Obr. 32.

Všechny tyto hodnoty jsou shromažďovány v databázi a pro lepší přehlednost jsou zobrazeny v grafu. Díky převedení hodnot do grafu je uživatelsky příjemnější práce s empirickým modelem.

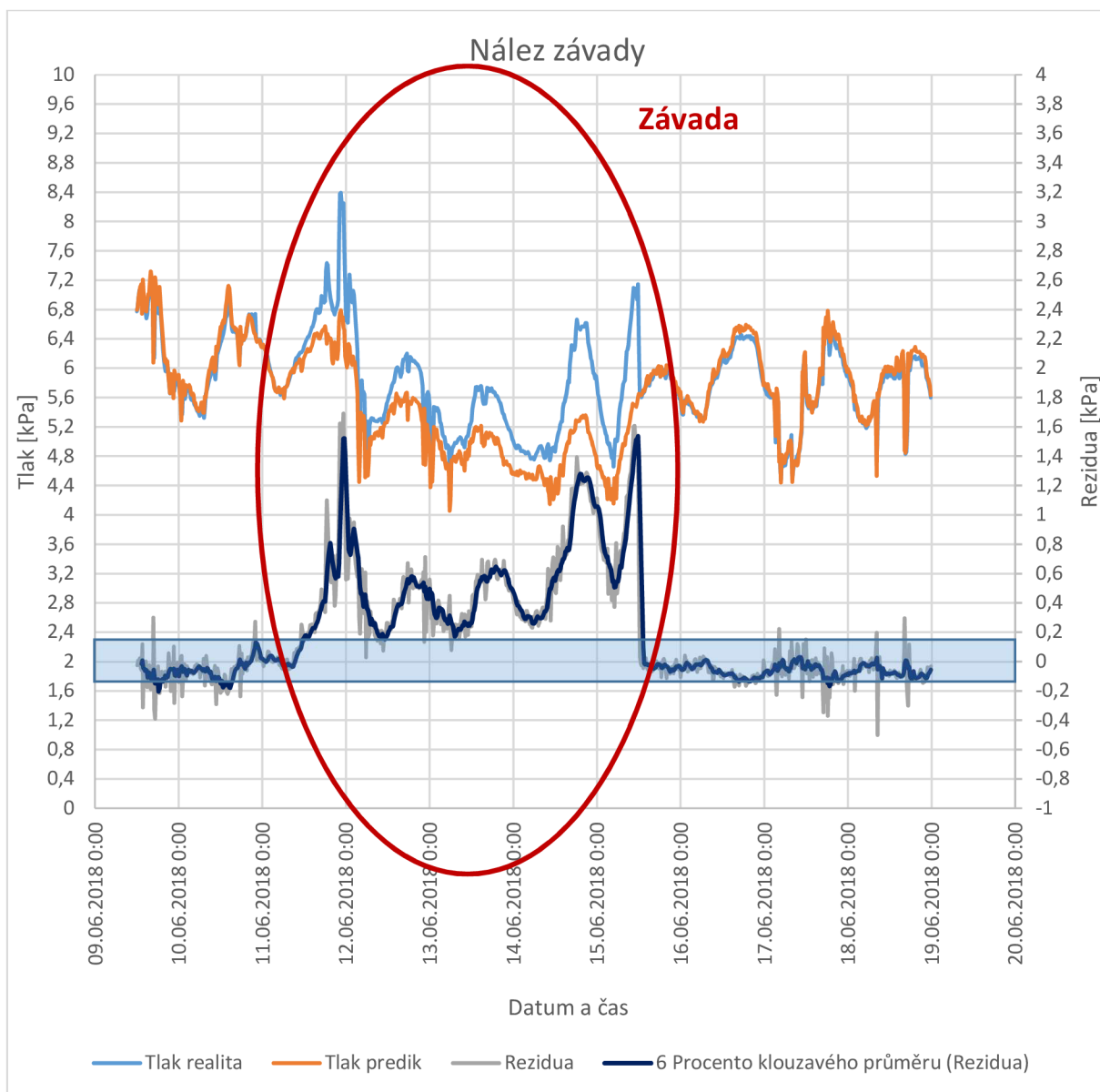


Obr. 32 Princip diagnostiky

V rámci diplomové práce byl výsledek aplikován na všechna dostupná data. Tím byla zjištěna kvalita a funkčnost modelu. V grafu (Příloha 6) je vidět průběh tlaků a křivky reziduí po celé délce získaného období.

Identifikace závady: Když je  $p_{reálný} > p_{predikovaný}$ , tak je odchylka reziduí kladná → křivka reziduí se vychýlí z ideálního intervalu.

Závada byla detekována (odhalena) v dostupné sadě dat dne 11. 6. 2018, názorně je průběh závady vidět v grafu na Obr. 33, jedná se o výřez z grafu, který je v plném rozsahu přiložen v Příloha 6. Dle průběhu křivky reziduí, lze identifikovat, že se jednalo o náhlou změnu. V úvahu tedy připadá problém na funkčnosti vývěv nebo vznik netěsnosti. Při kontrole provozních informací, bylo zjištěno, že v tomto čase (přibližně) byla opravdu objevena netěsnost, která byla odstraněna. V případě, že by nedošlo k náhodnému záchytu závady, mohlo by dojít ke zvětšení netěsnosti a tím k poruchovému odstavení celého technologického celku. V případě aplikování diagnostiky prostřednictvím empirického modelu, dojde bezpečně k detekci závady už v počátku vzniku závady. Tím je umožněno včasné odstranění za vzniku jen minimálních ztrát.



Obr. 33 Část grafu s detekcí závady

## ZÁVĚR

První kapitola diplomové práce byla zaměřena na stěžejní zařízení elektrárny, která ovlivňují celkovou účinnost a také je zde podrobněji rozebrán kondenzátor TG v R.-C. cyklu. Ve třetí kapitole byla popsána jeho funkce, základní principy v kondenzátoru a vznik možných závad, kterými jsou přisávání okolního vzduchu netěsností, zhoršená funkčnost vývěv a zanášení vnitřního povrchu trubek kondenzátoru. Dále byla sepsána teorie a postup k vypracování empirického modelu pomocí vícerozměrné lineární regresní analýzy a možnosti kontroly správnosti empirického modelu tzv. regresní triplet. Tento postup byl poté aplikován na vytvoření vlastního návrhu empirického modelu kondenzátoru pro uhelnou elektrárnu.

Ve čtvrté kapitole bylo popsáno zpracování dat pro následnou tvorbu modelu. Model byl vytvářen postupným přidáváním (odebíráním) jednotlivých regresorů podle jejich vlivu na přesnost modelu. Důležitým krokem bylo odstranění hodnot, které jsou odlehlé a mohou zkreslovat výsledný model. Proběhla též kritika modelu i zvolené MNČ. Vytvořený model následně prošel validací modelu, tzn. kontrolou přesnosti modelu. V průběhu práce bylo vytvořeno mnoho empirických modelů pro predikci stavu kondenzátoru a ty nejvhodnější jsou uvedeny ve 4. kapitole této práce. Jedná se o model s predikcí tlaku a model s predikcí teploty.

Jako výsledný empirický model kondenzátoru byl vybrán model s predikcí teploty. Tento model věrněji zobrazoval dění v kondenzátoru než model pro predikci tlaku. V praxi je však častěji používanou veličinou tlak, hodnoty predikované teploty proto byly přepočteny dle empirického vzorce na hodnoty tlaku. Tyto hodnoty tlaku byly společně s měřenými hodnotami tlaku vyneseny do grafu, stejně jako rozdíl těchto hodnot, který indikuje aktuální stav kondenzátoru. Model pomocí predikované hodnoty reprezentuje děje v kondenzátoru v daném čase. Empirické modely jsou relativně jednoduché prostředky, kterými lze odhalit závady, které by jinak odhaleny nebyly a které by snižovaly výkon elektrárny. Praktickou ukázkou je identifikace závady pomocí empirického modelu, tzv. diagnostikou, která je popsána v páté kapitole. Diagnostikou zařízení lze sledovat stav kondenzátoru v aktuálním čase, kdy po určitém časovém úseku (v tomto případě 15 min) jsou měřená data agregována a dále zpracovávána, aby byla následně zobrazená v grafu k porovnání s predikovanými hodnotami. V této diplomové práci byl model zpětně aplikován na data ze získaného časového období. Na grafu z těchto hodnot je zřejmá oblast, kdy mají rezidua v období od 11. června do 15. června kladnou odchylku, která značí závadu na zařízení. Při kontrole informací od provozovatele vyšlo najevo, že se závada v daném časovém intervalu skutečně vyskytla a byla odstraněna. Tímto způsobem byla ověřena správnost modelu pro další použití.

Metody využívané pro empirický model, tedy regresní analýza, resp. MNČ, jsou velmi spolehlivé pro konkrétní užití. Tyto metody tedy mohou být využívány k diagnostice dalších zařízení elektrárny a spojením jednotlivých modelů i k celkové diagnostice elektrárny. Další využití tyto metody nacházejí v optimalizaci výrobních procesů (např. na výrobní lince), kdy pomocí vstupních parametrů lze zjistit, jaký parametr má vliv na výsledný produkt (výstup z výrobního stroje) a který nikoli.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné elektrárny a teplárny*. První. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [2] *Tepelné oběhy a jejich realizace, : Transformační technologie* [online]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, 2020 [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/06.html>
- [3] MARUŠÁK, Ondřej. *Ideální oběhy spalovacích motorů*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
- [4] Parní turbína v technologickém celku: Transformační technologie. *Brno: Jiří Škorpík* [online]. 2011-04 [cit. 2023-01-04]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/25.html#tepelna-ucinnost-bloku-s-parni-turbinou>
- [5] BOHUSLAV, Bc. Rudolf. *Termodynamická optimalizace Rankinova cyklu*. Plzeň, 2019. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr ERET, Ph.D.
- [6] PROSUN, Roy. ANALYSIS OF RANKINE CYCLE AND ITS UTILITY IN THERMAL POWER PLANT - A THEORETICAL APPROACH. In: *International Journal of Mechanical And Production Engineering*. 11 vyd. India, 2015, s. 53-59. ISSN 2320-2092.
- [7] *Konzultace v I&C Energo*. Brno, 2023.
- [8] Energetika zblízka - kotel. In: *Svět energie* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/kotel/vyklad>
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné turbíny a turbokompresory: Transformační technologie. *Jiří Škorpík* [online]. Brno, 2011-02 [cit. 2023-01-04]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/23.html#uvod-do-parnich-turbin>
- [10] MIKYŠKA, Ladislav a Jaroslav ŠEBEK. *Chladicí věže. Provoz a údržba*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 188 s.
- [11] Energetika zblízka - Kondenzátor. In: *Svět energie* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/kondenzator/vyklad>
- [12] BASELIDES, Bc. Daniel. *PROUDOVÁ VÝVĚVA V SYSTÉMU TURBÍNY K220-44*. Ostrava, 2013. Diplomová. VYSOKÁ ŠKOLA BAŇSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Kolarčík Kamil, CSc.
- [13] PUTMAN, Richard E. *Steam surface condensers: Basic principles, performance monitoring, and maintenance*. První. New York, 2001. ISBN 0-7918-0151-9.
- [14] *FEDERAL ENERGY MANAGEMENT PROGRAM: Cooling Towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency* [online]. 2011 [cit. 2023-01-04]. Dostupné z: [https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/32820/1/DP\\_IvaninA\\_2018.pdf](https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/32820/1/DP_IvaninA_2018.pdf)
- [15] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbíny*. První. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968.
- [16] BALÁŠ, Marek. *Přednášky z předmětu LVT*. Brno, 2022.

- [17] OVČÁČÍK, Bc. Radek. Možnosti modelování ve vybraných oblastech lidské činnosti. *Ochrana & Bezpečnost – 2014-2015*. 2015, (2, 1-3. ISSN 1805-5656.
- [18] *Digi-Key Electronics: The Digital Twin Concept and How It Works* [online]. North America, 2022 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/the-digital-twin-concept-and-how-it-works>
- [19] J. HŘEBÍČEK a J. KALINA. *Klasifikace modelů: Úvod do matematického modelování* [online]. Brno, 2017 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2017/Bi3101/um/02\\_klasifikace\\_modelu.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2017/Bi3101/um/02_klasifikace_modelu.pdf). Vytvořil Institut biostatistiky a analýz, Masarykova univerzita.
- [20] DEKONTAMINAČNÍ TECHNOLOGIE. In: *VŠCHT v Praze* [online]. Praha [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/uchop/CDmartin/6-cheming/1.html>
- [21] KUPKA, Karel. *Vicerozměrná analýza a prediktivní metody: Pracovní sešit k interaktivnímu semináři*. Druhé. Pardubice, 2022.
- [22] M. MELOUN a J. MILITKÝ. *Statistické zpracování experimentálních dat*. Praha: Edice Plus, 1994.
- [23] *Finance v praxi* [online]. 2017 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.financevpraxi.cz/statistika-linearni-regrese>
- [24] MAROŠ, Bohumil. *Empirické modely I: Analýza inženýrského procesu*. Druhé. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2001. ISBN 80-214-1984-9.
- [25] HENDL, Jan. *Přehled statistických metod zpracování dat: analýza a metaanalýza dat*. 1. vydání. Praha: Portál, 2004. ISBN 80-717-8820-1.
- [26] MACHÁT, RNDr. Zdeněk. *Tvorba lineárních regresních modelů při analýze dat*. Třebíč, 2013. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, Katedra analytické chemie.
- [27] *Průmyslové vakuum: Co jsou vývěvy?* [online]. 2019 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://www.prumyslove-vakuum.cz/co-jsou-vyvevy/>
- [28] *Vakuum Bohemia: Olejové a bezolejové průmyslové vývěvy* [online]. 2019 [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: <https://vakuum-bohemia.cz/vyvevy>
- [29] Nejčastější problémy při úpravě chladicí vody. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/23315-nejcastejsi-problemy-pri-uprave-chladici-vody>
- [30] KRBEK, CSc., CSc., POLESNÝ a Dr. FIEDLER. *Strojní zařízení tepelných centrál: Návrh a výpočet*. První. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1999. ISBN 80 - 214 - 1334 - 4.
- [31] *YOKOGAWA: Principle of operation - Volumetric Flow Rate* [online]. [cit. 2023-05-15]. Dostupné z: [https://www.yokogawa.com/us/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/dp-flow/#Details\\_\\_Principle-of-Operation](https://www.yokogawa.com/us/solutions/products-and-services/measurement/field-instruments-products/flow-meters/dp-flow/#Details__Principle-of-Operation)
- [32] KOUDELKA, Jiří. *Sestavení výpočetního programu pro výpočet základních izobarických změn stavu ve vlhkém vzduchu*. Liberec, 2017. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$\eta$	Termická účinnost	- (%)
$T_{min}, T_{max}$	Teplota odváděného a přiváděného tepla v Carnotově cyklu	K
$a$	Práce	J
$q_{in}$	Přivedené teplo	J
$q_{out}$	Odvedené teplo	J
$h_i$	Entalpie	J
$T_i$	Teplota	K
$x_i$	Vstupní veličina lin. regrese	-
$X_i$	Matice výstupních veličin	-
$y$	Výstupní veličina lin. regrese	-
$\mathbf{y}$	Vektor výstupních veličin	-
$\beta_i$	Koeficienty regresní analýzy	-
$\varepsilon_i$	Chyby měření	-
$b$	Odhad koeficientu regresní analýzy	-
$e_i$	Reziduum – odhad náhodné chyby	-
$\hat{y}_i$	Vyrovnané (predikované) hodnoty	-
$Q_k$	Skupenské teplo kondenzační (nízkopotenciální teplo)	J
$m_p$	Hmotnost vodní páry	kg
$l_p$	Měrné skupenské teplo kondenzační	J
$Q_v$	Teplo při ochlazování (popř. ohřívání) vody	J
$m_v$	Hmotnost vody	kg
$c_v$	Měrná tepelná kapacita vody	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$\Delta t_v$	Rozdíl teplot	-
$F_{chv}$	Průtok chladicí vody	$t \cdot h^{-1}$
$dp_{chv}$	Tlakový spád na větvích v kondenzátoru	-
$F_{páry}$	Průtok páry	$t \cdot h^{-1}$
$F_{kondenzát}$	Průtok kondenzátu	$t \cdot h^{-1}$
$F_{DEMI \text{ vody}}$	Průtok DEMI vody	$t \cdot h^{-1}$
$T_{chv}$	Teplota chladicí vody	$^{\circ}C$
$p$	tlak	kPa

Zkratka	Význam
VTO	Vysokotlaký ohřívák vody
NTO	Nízkotlaký ohřívák vody
VT	Vysokotlaký díl turbíny

ST	Středotlaký díl turbíny
NT	Nízkotlaký díl turbíny
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
MEP	Střední kvadratická chyba predikce
E	Extrémy
O	Odlehlé body
KPI	Key performance identifikátor
DEMI voda	Demineralizovaná voda
TG	Turbogenerátor



## PŘÍLOHY

### Příloha 1



Výsledné hodnoty z  
empirických modelů

### Příloha 2



grafy\_predikce  
tlaku.JPG

### Příloha 3



protokol\_predikce  
tlaku.txt

### Příloha 4



grafy\_predikce  
teploty.JPG

### Příloha 5



protokol\_predikce  
teploty.txt

### Příloha 6



Grafy.xlsx