



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

STANOVENÍ VÝKONNOSTI CHLADICÍHO OKRUHU - CHLADÍCÍ VĚŽ

DETERMINATION OF THE PERFORMANCE OF THE COOLING CIRCUIT - COOLING
TOWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ALEŠ VELEŠÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MAREK BALÁŠ, PH.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Aleš Velešík

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

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:

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

v anglickém jazyce:

Determination of the performance of the cooling circuit - cooling tower

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chladicí věž obecně plní 2 úlohy:

1. Odvod nízkopotenciálního tepla z tepelného cyklu parní turbíny
2. Vytvoření co nejnižší teploty chladicí vody

Cílem diplomové práce je vytvoření empirického modelu chladicí věže zvoleného energetického zdroje pomocí statistického zpracování velkého souboru experimentálních dat a jeho ověření na provozních datech.

Cíle diplomové práce:

- Popis chladicí okruhu
- Návrh struktury empirického modelu chladicí věže
- Identifikace parametrů empirického modelu chladicí věže
- Ověření platnosti empirického modelu chladicí věže na provozním měření
- Návrh na využití empirického modelu chladicí věže pro úlohu dlouhodobé diagnostiky chladicí věže

Seznam odborné literatury:

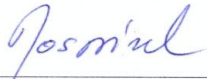
Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Baláš, Ph.D.

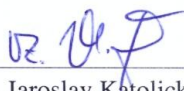
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 19.11.2014





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



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

Abstrakt

Cílem této práce je stanovení výkonnosti chladicího okruhu a jeho popis. K tomu je zapotřebí sestavení struktury empirického modelu chladicí věže, jež jsem sestavil za pomoci lineární regrese. Data jsem zpracovával pomocí softwaru QC expert, který při užití správných parametrů, mi pomáhal s identifikací správného modelu u konkrétní věže. Vytvořené modely budou sloužit k diagnostice chladicího okruhu a porovnání s dalšími modely stejných chladících věží v průběhu let. Výstupem práce jsou tedy polynomy, které charakterizují modely chladících věží v tomto technologickém celku.

Klíčová slova

Chladicí věž, lineární regrese, Rankine-Clausiusův cyklus, regresní triplet, části chladicí věže, matematické modelování

Abstract

The aim of this work is to determine the performance and description of the cooling circle in the cooling tower. In order to do that there was applied the linear regression approach in order to create structural empirical model of the cooling tower. The data obtained was analysed through QC expert software, which, if correct data applied, identifies suitable model for specific tower. The models created will be used for diagnostics of the cooling circles and as a comparison tool with other cooling towers in the future. Thus, the findings of this thesis are polynoms, which in thic technological setup characterise the models of the cooling towers.

Key words

Cooling tower, linear regression, Clausius-Rankine cycle, regression triplet, parts of cooling tower, mathematical modeling

Bibliografická citace

VELEŠÍK, A. *Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Marka Baláše, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 19. května 2015

.....
Bc. Aleš Velešík

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Markovi Balášovi, Ph. D. za vedení mé diplomové práce. Zejména pak RNDr. Zdeňku Machátovi a Ing. Jiřímu Pliskovi z firmy OT Energy Services a.s., za velice přínosné konzultace, odborné rady a informace k vytvoření diplomové práce.

Obsah

1.	Úvod	15
2.	Výroba energie v elektrárně	16
2.1.	Rankine – Clausiův cyklus	16
3.	Chladicí věž v tepelném cyklu	17
3.1.	Obecné rozdělení chladících soustav	18
3.2.	Mokré chladicí věže s přirozeným tahem	19
3.3.	Mokré chladicí věže s nuceným tahem	19
3.4.	Výplň chladicí věže	20
3.4.1.	Rozvod vody	20
3.4.2.	Eliminátory	21
3.4.3.	Chladicí systémy	21
3.4.4.	Bazén	22
3.4.5.	Ventilátorové jednotky	22
3.5.	Kvalita a chemická úprava přivedené chladicí vody	23
3.6.	Měření sledovaných veličin chladicího okruhu	24
3.6.1.	Měření stavu vzduchu	25
3.6.2.	Měření teplot chladicí vody	25
3.6.3.	Měření průtoku vzduchu	26
3.1.	Hmotnostní bilance chladicí věže	26
4.	Diagnostika systému	28
5.	Úvod do inferenční statistiky	29
5.1.	Regresní model	29
5.2.	Tvorba regresní analýzy (modelu)	30
5.2.1.	Návrh tvaru modelu	30
5.2.2.	Určení regresních parametrů a statistické významnosti	30
5.2.3.	Vysvětlení predikovaných hodnot	31
5.3.	Regresní triplet	31
5.3.1.	Kritika dat	31
5.3.2.	Kritika modelu	33
5.3.3.	Kritika metody	35
6.	Praktická část	37
6.1.	Úvod	37
6.2.	Zadání úlohy a výběr dat	37
6.2.1.	Data	38
6.3.	Chladicí věž 1A	38
6.3.1.	Analýza vlivných bodů	40
6.3.2.	Zpřesněný model	41
6.4.	Chladicí věž 1B	42
6.4.1.	Analýza vlivných bodů	43
6.4.2.	Zpřesněný model	44
6.5.	Chladicí věž 2A	46
6.5.1.	Analýza vlivných bodů	48
6.5.2.	Zpřesněný model	49
6.6.	Chladicí věž 2B	50
6.6.1.	Analýza vlivných bodů	52
6.6.2.	Zpřesněný model	53
6.7.	Porovnání modelů	55

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Závěr	59
Použité informační zdroje	61
Seznam obrázků	62
Seznam tabulek	62
Seznam grafů	63

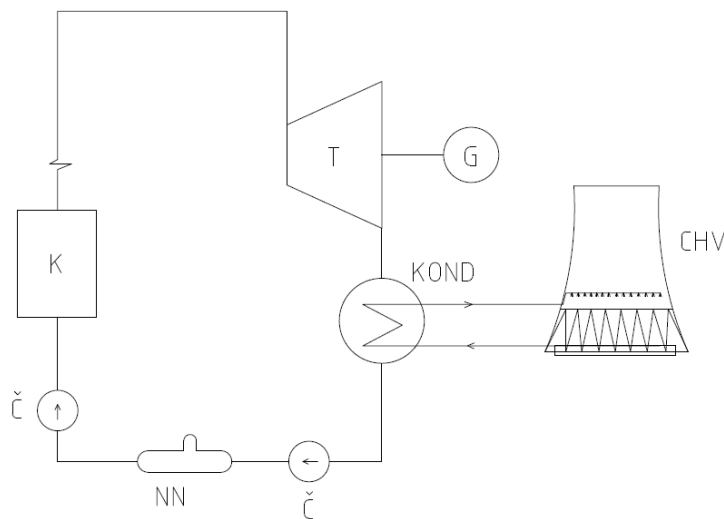
1. Úvod

Výroba energie je realizována v elektrárnách a teplárnách, kde dochází k přeměně energie vázané ve zdroji (uhlí, jaderné palivo, vítr, voda, ...) na energii tepelnou a mechanickou. Takto získaná energie se potom v závislosti na typu energetické výroby dále zpracovává. V případě primárního zisku elektrické energie je pomocí generátoru měněna na elektrickou energii a distribuována do sítě. U tepláren je však hlavním cílem distribuce tepla do průmyslových zón, městských částí, sídlišť apod.. Většina elektráren využívá k realizaci tepelného oběhu tzv. Rankine – Clausiův cyklus. Jedná se o nejrozšířenější tepelný oběh v energetice. Avšak i zde nám během cyklu vzniká nevyužitá energie, kterou nazýváme odpadní teplo. Toto teplo se odvádí chladicí vodou do věží, kde dojde k ochlazení vody formou odparu a přenosu tepla do atmosféry. Teplota ochlazené chladicí vody na výstupu z věží je závislá na stavu atmosféry, hydraulickém a tepelném zatížení chladících věží a její konstrukci, danou technologickými předpoklady provozovaného energetického zařízení. Teplota ochlazené chladicí vody se nejčastěji pohybuje v rozmezí 15 – 30 °C, měla by však vždy odpovídat technickým parametrům dané energetické výroby. V případě nesprávné činnosti chladicí věže by docházelo k nedochlazení chladicího média a následnému snížení účinnosti, což by v konečném důsledku mělo i značné ztráty v ekonomičnosti elektrárny. Proto je optimalizace chladicího zařízení důležitou částí chladicího okruhu.

2. Výroba energie v elektrárně

2.1. Rankine – Clausiův cyklus

Jedná se o základní parní oběh, kde pracovní látka (voda) koluje v uzavřeném systému několika vzájemně propojených zařízení a pomocí přiváděného a odváděného tepla ze soustavy se mění i její stav. Zjednodušené technologické schéma RC oběhu je na obr. 1.



Obrázek 1: Rankine - Clausiův cyklus obecné schéma

Zařízení realizující RC cyklus:

- Zdroj tepla
- Turbínové soustrojí
- Kondenzátor
- Napájecí nádrž
- Čerpadla

Napájecí voda je přiváděna do kotle, kde se ohřeje na požadovanou teplotu a změní svůj stav na sytou páru. V některých energetických výrobnách se ještě sytá pára dále ohřívá a mění na přehřátou. Takto vzniklá přehřátá pára putuje potrubím na vstup do turbíny. Tam probíhá v ideálním případě izoentropická expanze a energie obsažená v páře se mění na mechanickou práci turbíny a dále pak je transformována na elektrickou energii pomocí generátoru. Po expanzi v parní turbíně probíhá kondenzace páry v kondenzátoru. Kondenzátor je výměník chlazený vodou, ve kterém se přivedená pára z turbíny o nízkém tlaku mění na vodu. Teplo odvedené z kondenzace je odváděno chladicí vodou, která je chlazená nejčastěji atmosférou v chladicích věžích. Vzniklý kondenzát je dopravován napájecími čerpadly do napájecí nádrže a dále pak zpátky do kotle.[3]

Vyrobené množství energie na svorkách generátoru se nerovná energii dodané do sítě. Musíme počítat i s tzv. vnitřní spotřebou, z níž podstatná část tvoří práce čerpadel

chladicí vody. Kvůli zvyšování termodynamické účinnosti celého cyklu a např. u tepláren se přistupuje k regulovaným či neregulovaným odběrům páry na turbíně. Dále pak využíváním nízkotlakých a vysokotlakých dílů turbíny na přehřívání páry nebo regenerační ohřev napájecí vody.

3. Chladicí věž v tepelném cyklu

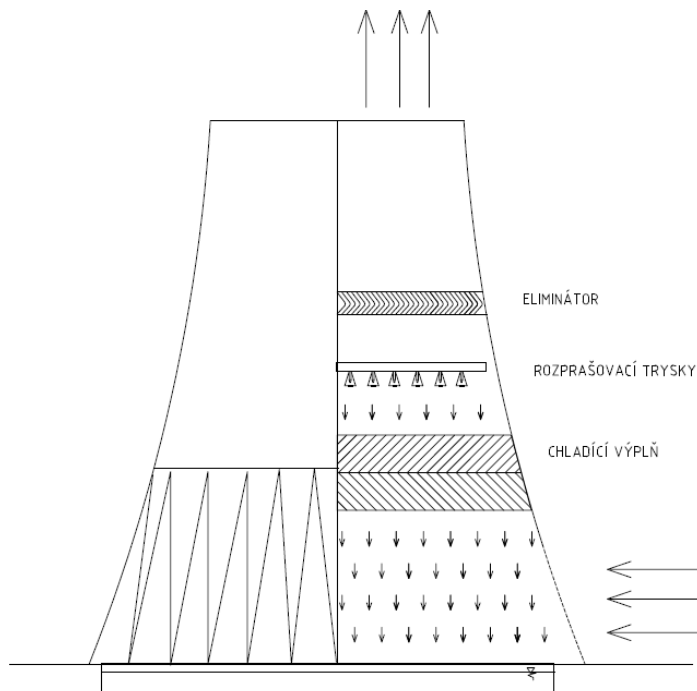
Při přeměně energie nám vzniká i určitý podíl tepelné energie, kterou je nutno pro udržení výkonnosti celého cyklu účinně odvádět. Jedná se o nízkopotenciální teplo, které se již nedá efektivně využít. V takovém případě musíme zvolit speciální zařízení pro jeho odvod. K tomuto účelu slouží právě chladicí věž.

V chladicí věži je voda rozváděna přes výplň chladicí věže. Tam je voda rozprostřena a vytváří drobné kapičky nebo vodní film. Probíhá zde tepelná výměna mezi vodou a vzduchem. Elementy vody jsou pak zachycovány a shromažďovány ve sběrných nádržích odkud se čerpá voda zpátky do chlazení kondenzátorů. Proudění vzduchu ve věžích je udržováno jak přirozeným tahem tak i nuceným. Nucený tah zajišťuje ventilátor nebo soustava ventilátorů, které protlačují nebo nasávají vzduch.

Velký vliv na konečnou teplotu chladicího média má i poloha, to znamená lokální klima, kde se elektrárna nachází. Rozdíly teplot suchého a vlhkého teploměru, při kterých dochází k odpařování a následnému poklesu teploty chlazené vody. Zvýšení teploty chladicí vody o 1°C se rovná zvýšené spotřebě paliva o 0,4 - 0,6%. Při odpařování je nutno dbát i na environmentální účinky, kdy neodchází do ovzduší jen teplo, ale i látky, které jsou přidávány do chladicí kapaliny za účelem zkvalitnění chladiva. Také dochází ke ztrátám chladicí vody právě odpařením, odkalováním, netěsnostmi nebo unášením z chladicí věže. Takto vzniklé ztráty se musí kompenzovat a to doplněním chladicí vody o stejné chladicí kapacitě.

Tento typ chladicí soustavy se používá zejména u průmyslových zařízení, která mají výkon od 1MWt až po 100MWt. Tento rozsah však není limitní a setkáváme se s případy, kde je výkon elektrárny i několik set MWt. Obvykle se staví ve vnitrozemí, kde není velká zásoba vody jako například moře nebo rozsáhlá řeka.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž



Obrázek 2: Řez chladicí věží

3.1. Obecné rozdělení chladících soustav

Různé typy chladících soustav jsou klasifikovány podle různých kritérií a použitých prvků.

- **Suché chlazené vzduchem nebo odpařovací s mokrým chlazením** – podle termodynamického principu, předáváním tepla sdílením nebo využitím výparného tepla vody. V případě odpařování s mokrým chlazením se využívají oba již zmiňované principy. U suchého chlazení jen sdílení tepla.
- **Otevřené nebo uzavřené** – v otevřené chladicí soustavě je ochlazované médium v kontaktu s životním prostředím, kdežto v uzavřené soustavě cirkuluje kapalina uvnitř trubek bez kontaktu s okolním prostředím
- **Přímé nebo nepřímé** – u přímé soustavy je použit jen jeden výměník a výměna tepla mezi chladivem a ochlazovanou látkou se uskutečňuje ihned. Nepřímá chladicí soustava se používá v případech, kdy je ochlazovaná látka znečištěná a mohlo by dojít k nebezpečnému úniku do životního prostředí. Je realizovaná pomocí dvou výměníků, kde je chladicí kapalina ochlazovaná přes další výměník.

3.2. Mokrý chladicí věže s přirozeným tahem

Z konstrukčního hlediska jsou chladicí věže s přirozeným tahem budovány jako železobetonové konstrukce. Tato konstrukce zajišťuje dobré termodynamické i statické vlastnosti a to i díky svému tvaru, který je většinou symetrický rotační hyperboloid. Rozměry věže jsou závislé na výkonu elektrárny, obvykle se pohybují řádově v desítkách metrů jak výšky (60 až 200 m), tak průměru. Náklady na výstavbu jsou vysoké, avšak je to vynahrazeno následnými provozními náklady, které jsou poměrně nízké. Právě proto, že neobsahují žádné další komponenty jako je například ventilátor. Ochlazování vody je tedy realizováno přirozeným tahem, v důsledku rozdílu hustoty vzduchu a tvaru věže, vzduchu vstupujícího ze spodní části a vystupujícího z horní části věže.

Co se týče distribuce vody do chladicí věže, tak rovnoměrná dodávka vody zvyšuje výměnu tepla. Dále pak jsou zde možnosti snižování chladicího výkonu anebo režimy zimního provozu. Zde se počítá s předehříváním chladicího vzduchu.

Výplň chladicí věže je důležitou částí chladicí věže. Nejpoužívanější typy jsou výplň rozprašovacího typu nebo foliová výplň. Rozstříkovací výplň má menší účinnost jako foliová. Kapičky vody jsou rozstříkované a dopadají do sběrné nádrže. Používá se zejména tam, kde je voda kontaminovaná nebo je její kvalita špatná. Takto používaná výplň může být vyrobena z různých materiálů a s různým uspořádáním. Druhým příkladem je foliová výplň, která funguje na principu vytváření vodního filmu stékající vody po desce. Ty bývají tvořeny vertikálními ocelovými plechy nebo deskami z organických materiálů, seřazené těsně vedle sebe.

Při takovém to chlazení se stává, že kapičky vody jsou unášeny přirozeným tahem vzduchu. Aby se co nejvíce zabránilo úniku kapalné fáze do prostředí, jsou ve věžích instalovány tzv. eliminátory unášení. Ty jsou však navrhovány tak, aby způsobovaly co nejmenší tlakovou ztrátu a proto jsou vyráběny z materiálů, jako jsou plasty nebo cementová vlákna.

Hlavní komponenty chladicí věže s přirozeným tahem:

- Nosný skelet
- Eliminátory
- Rozvody vody
- Chladicí výplň
- Sběrný bazén

3.3. Mokrý chladicí věže s nuceným tahem

Tento typ věží se z konstrukčního hlediska liší tím, že pro proudění vzduchu ve věži se používá ventilátor. To vede i k tomu, že věže jsou rozměrově menší. Větší konstrukce jsou tvořeny také ze železobetonu. Avšak u menších věží se používají ke konstrukci ocelové plechy, konstrukce z monolitického betonu nebo prefabrikovaného betonu. Dokonce pro relativně malé výkony se ještě stále využívá stavební dřevo. Stavba je levná, a není závislá na ročním období.

Tento systém chladicí věže nám umožňuje i využití modulové soustavy. Jedná se o několik paralelně zařazených chladicích věží v jedné betonové buňce. Výhodou tohoto řazení je ekonomičnost provozu, kdy elektrárna pracuje na jiný výkon

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

v každé roční období. Tomu se mohou věže přizpůsobit regulováním výkonu tak, že se zvolí počet částí, které budou v provozu.

Volba typu ventilátoru se liší od počátečních požadavků a to jak na energii tak například i na hluk. Jedná se zde o axiální ventilátory nebo radiální ventilátory, které se liší tvarem lopatek a jejich počtem, velikostí lopatek a v neposlední řadě i volbou typu pohonu. Typ pohonu nám zajišťuje další možnosti regulace výkonu chladicí věže. Podle umístění ventilátoru v chladicí věži rozdělujeme na:

- **Protlačování vzduchu věží** – ventilátor je umístěn ve spodní části věže a protlačuje proud vzduchu skrz ni. Bývají obvykle navrhovány jako protiproudové provedení. Mají velký rozsah zpracování odpadního tepla.
- **Sací ventilátor** – ventilátor je v horní části věže, kde přisává vzduch ze spodní části. Vyznačuje se jednoduchou konstrukcí. V provedení s protiproudem nebo křížoproudým prouděním. Nízké investiční náklady oproti věžím s přirozeným tahem. Stejně jako u protlačování vzduchu mají vysoký rozsah výkonového použití.

Hlavní komponenty chladicí věže s nuceným tahem:

- Nosný skelet
- Chladicí výplň
- Eliminátory
- Ventilátor
- Difuzor
- Rozvody vody včetně trysek
- Opláštění
- Sběrný bazén

3.4. Výplň chladicí věže

3.4.1. Rozvod vody

Distribuce vody do chladicí části věže je zajišťováno rozvodovým řádem. Hlavní napájecí řád bývá z ocelových trubek nebo betonových kanálů, na něž navazuje rozvodné potrubí většinou z plastových trubek osazené rozstříkovacími tryskami. Tato celá soustava je napájena přívodním stoupacím potrubím s regulačními armaturami, na které jsou napojeny hlavní řády. Soustavy mohou být zapojovány v ortogonálním nebo radiálním uspořádání potrubí.

Rozstříkovací trysky jsou důležitým elementem rozvodu vody a mají zajistit rovnoměrné rozložení chladicí vody po půdorysu chladicí věže. Největší hrozbou u trysek je jejich zanášení. To závisí zejména na kvalitě vody, kde se menší částice nečistot mohou shlukovat a zabraňovat tak průtoku vody v místě zúžení trysky. Tento jev může být částečně potlačen čistotou vody a konstrukčním řešením trysek. Zejména u menších chladicích věží jsou trysky s menším výtokovým profilem náchylnější na zanášení. Trysky z PVC na obr. 3. Mají relativně široký průměr výtokové dýzy, tudíž k zanášení nedochází často. Literatura udává, že velikost částice by musela být 2/3 velikosti výtokové dýzy, aby došlo k zanesení trysky.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž



Obrázek 3: Rozstříkovací trysky - Myplast s.r.o [4]

3.4.2. Eliminátory

Základní funkcí eliminátorů je zabránění únosu kapiček vody, které jsou zachyceny v proudu vzduchu. Tento jev je nežádoucí jak z hlediska ztráty chladicí kapaliny z oběhu, tak i spadu vody na přilehlé okolí chladicí věže. V dnešní době se používají eliminátory zhotovené z PVC. Jejich účinnost je relativně vysoká a přesahuje 95% zachycené vody. Eliminátor je složen z jednotlivých plastových lišt, které jsou spojeny do bloků pomocí spon. Lišty jsou definovány profilem, délkou a materiálem s různou tepelnou odolností.

Z důvodů zachování správné funkce existuje několik obecných zásad instalace mříže. Eliminátory se neumísťují do míst zúžení chladicí věže, kde je rychlost proudu vzduchu zvýšená. Stejně tak osazení v těsné blízkosti rozstříku zhoršuje jejich účinnost. Je nutno dbát i na pokrytí celého průtočného profilu, jinak by vznikl lokální nepokrytím proudil vzduch společně s vodními kapkami.



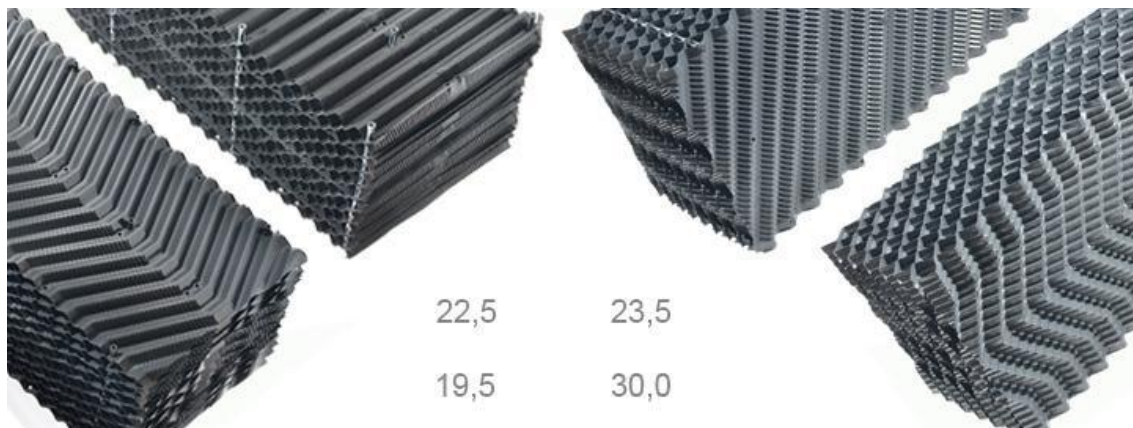
Obrázek 4: Eliminátory - Myplast s.r.o [4]

3.4.3. Chladicí systémy

Chladicí systémy do protiproudých chladicích věží s přirozeným a nuceným tahem, jsou řešeny převážně jako blánové. Jednotlivé profilované fólie jsou k sobě montovány tak, aby tvořily průvzdušné kanálky. Jsou vyrobeny z PVC a tloušťka těchto tenkých desek se pohybuje od 0,4 do 0,6 mm. Takto vytvořené bloky jsou pak usazovány na nosný rošt. Standardní blok je kompletován obvykle do rozměru 2400 x 500 x 400 mm. Počet vrstev bloků je závislý na celkovém chladicím

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

výkonu, distribuci vody, kvalitě vody, velikosti a typu věže. Tepelná odolnost chladicích soustav je 60°C a v oblasti extrémně nízkých teplot až do -50°C. Výhodou těchto bloků je jejich chemická odolnost, ale i snadná a rychlá montáž.



Obrázek 5: Chladicí výplně - Myplast s.r.o [4]

3.4.4. Bazén

Jedná se o nádrž zachytávající ochlazované kapky vody z chladicího systému s hranou okraje v úrovni přilehlého terénu. Rozměry bazénu jsou závislé od velikosti chladicího výkonu tak, aby byl chladicí okruh kontinuálně zásobován ochlazenou vodou. Mimo to by se mělo počítat i s rezervou pro potřebu technologického využití vody. Nádrž je vybudována z monolitického železobetonu a údržba bazénu spočívá zejména v nátěrech, které odolávají chemické agresivitě vody. Životnost bazénu se pohybuje okolo 50 let.

3.4.5. Ventilátorové jednotky

Ventilátorové jednotky jsou speciální ventilátory, které zajišťují optimální proudění vzduchu v chladicí věži. Jsou instalovány v horní části nebo spodní části chladicí věže. Samostatnou jednotku tvoří ventilátor, elektromotor s převodovkou a případně i difuzor. Ventilátor je vyroben stlačováním hliníkových slitin a jsou staticky vyváženy, aby nedocházelo k vibracím soustavy. Jednotlivé profily lopatek jsou zpevněny ocelovou výztuží. Délky lopatek jsou standardizovány a jejich rozsah je od 600 mm do 10 000 mm. Elektromotor je dodáván jako jedno nebo dvou otáčkový, ale také s frekvenčním měničem.



Obrázek 6: Ventilátor - LENTUS AGILIS, SPOL. S R.O. [5]

3.5. Kvalita a chemická úprava přivedené chladicí vody

Voda přivedená do chladicího okruhu je nezbytná pro pokrytí ztát vzniklé odpařování vody při jejím chlazení. Elektrárny vodu odebírají zejména z přilehlých řek nebo vodních nádrží. Jedná se o surovou vodu, která není zatím nějak upravená. To zajišťuje soustava filtrů, kde za pomoci různých vlivů je zbavena mechanických nečistot. Po mechanické části nastává chemická úprava přídavné vody, protože obsahuje organické i anorganické části, které se musí eliminovat. Ta je pod dohledem specializovaných chemiků. Jen oni mohou posoudit přípustnost přidávání různých inhibitorů, stabilizátorů tvrdosti a jiných přípravků do chladicí vody.

Aby oběžná chladicí voda nezpůsobovala nežádoucí zanášení nebo korozi kovových a betonových částí chladicího okruhu, stanovuje ČSN 75 7171 maximální přípustné hodnoty některých chemických veličin. Chemické laboratoře tyto veličiny průběžně kontrolují, aby nedocházelo k překračování jejich limitů. Pokud by došlo k překročení, vedlo by to k zhoršení prostupu tepla a zhoršení účinnosti v důsledku nánosů na teplosměnných plochách. Chemický režim zabezpečuje spolehlivost a delší životnost technologického zařízení. Sledované veličiny jsou znázorněny v tab 1. [6]

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 1: Norma ČSN 75 7171 pro otevřené systémy s odparem

Veličina	jednotka	I. Chladiče z uhlíkaté oceli	II Chladiče z měděných slitin	III Chladiče z korozivzdorné oceli a z titanu
pH		7,5-9,5	6,5-8,5	Min. 6,0
KNK _{4,5}	mmol.l ⁻¹	0,8-2,3 ¹⁾	0,6-2,1 ¹⁾	0,6-2,3 ¹⁾
Ryznarův index		5,5-7,0	max. 3,0 ²⁾	max. 3,0 ²⁾
CO ₂ agr.	mg.l ⁻¹	max.5,0	5,0-7,0 ²⁾	5,0-7,5 ²⁾
vodivost	μS.cm ⁻¹	max.1200	max.7,0	max.7,0
Cl ⁻	mmol.l ⁻¹	max.200	max.200	max.350
SO ₄ ²⁻	mg.l ⁻¹	max.500	max.5000	max.6000
S ²⁻	mg.l ⁻¹	max.1000 ³⁾	max.500	max.500
NH ₄ ⁺	mg.l ⁻¹	max.1,0	max.1000 ³⁾	max.1000 ³⁾
Fe+Mn	mg.l ⁻¹	-	max.2,0	max.2,0
O ₂	mg.l ⁻¹	max.3,0	max.3,0	max.8,0
CHSK _{Mn}	mg.l ⁻¹	max.3,0	max.1,0 ⁴⁾	max.5,0
Nerozpuštěné látky	mg.l ⁻¹	max.3,0	max.3,0	-
		max.50	max.50	max.50
		max.15 ⁵⁾	max.20 ⁶⁾	max.50 ⁷⁾
			max.50 ⁷⁾	
Cl ₂	mg.l ⁻¹	max.0,4	max.0,4	max.0,4

1) Pro vody s kompletačními účinky možno zvýšit na základě provedení zajišťovací zkoušky
2) Při trvalém procesu mechanického čištění
3) Při použití cementu odolávajícímu síranové korozi
4) Fe a Mn pouze v iontové formě
5) Viz ČSN 83 0615
6) Při rychlosti proudění chladičem do 1,5 m.s⁻¹
7) Při rychlosti proudění chladičem nad 1,5 m.s⁻¹

Látky, které vyvolávají tvrdost vody vyskytující se ve větším množství, vedou k tvorbě usazenin a podporují vznik alkalického prostředí. Následkem toho vzniká porušování struktur materiálů např. mosazných kondenzátorových trubek. Další nežádoucí látky v chladicí vodě jsou sírany, které nepříznivě působí na betonové části. Odparem vody z chladicího okruhu dochází k zahušťování a narůstá koncentrace solí. A to v případě pokud není zajištěn odluh nebo doplňování vody.

3.6. Měření sledovaných veličin chladicího okruhu

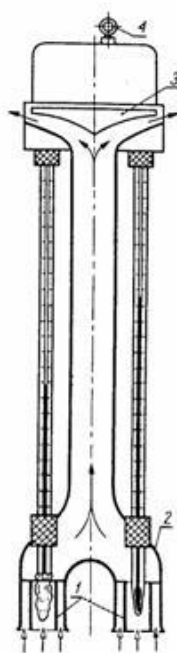
Chladicí účinek věže závisí zejména na kontrole teploty oteplené a ochlazené vody. Tyto parametry jsou ovlivňovány dalšími veličinami, které ovlivňují chladicí účinek. Jedná se o průtok chladicí vody, rychlost větru ve věži a teplotu okolního prostředí.

3.6.1. Měření stavu vzduchu

K měření stavu vzduchu se používá Asmanův aspirační psychrometr, jenž využívá nuceného proudění vzduchu kolem teploměrných čidel. Zajímá nás nejen teplota okolního vzduchu, ale také teplota vlhkého teploměru, která dopomáhá k ochlazení vody odpařováním.

Psychrometr je sestaven ze dvou hlavních částí a těmi jsou suchý a vlhký teploměr. Suchý teploměr slouží k určení teploty okolního vzduchu a je chráněn krytem proti sálání. Jeho princip je založen na roztažnosti látky uvnitř teploměru při změně teploty. Vlhký teploměr má na konci obal z porézní tkaniny, která je neustále vlhčena z nádoby k ní přilehlé. V nádobce je použita destilovaná voda, aby nedocházelo k usazování solemi. Odpařováním vody dochází k snižování teploty vlhkého teploměru. Z rozdílu těchto teplot (suchého a vlhkého teploměru) pak určíme relativní vlhkost vzduchu odečtením hodnot z tabulek. K měření se používají i digitální psychrometry, které nám ihned určí relativní vlhkost ve věži. Princip je podobný, akorát s tím rozdílem že se využívají termočlánky a odporové teploměry.

Proměřují se teploty venkovního vzduchu, ve věži nad chladicím systémem nebo u ventilátorových věží na výstupu z difuzoru. Měření stavu vzduchu ve věži je nezbytné pro sestavení tepelné bilance.



Obrázek 7: Aspirační psychrometr

3.6.2. Měření teplot chladicí vody

Měří se teplota oteplené a ochlazené vody. Obvykle se měření provádí na výstupu z kondenzátoru a v nátokovém kanálu ve věži, pomocí odporového teploměru. Změny stavu teploměru jsou následně převáděny do digitální podoby. V závislosti

na typu měřiče a zobrazovacího zařízení literatura udává směrodatnou odchylku měření až 0,2 °C. Měření probíhá v bodě, kde má voda právě takovou teplotu, která by měla odpovídat hodnotě v celém průřezu potrubí. [1]

3.6.3. Měření průtoku vzduchu

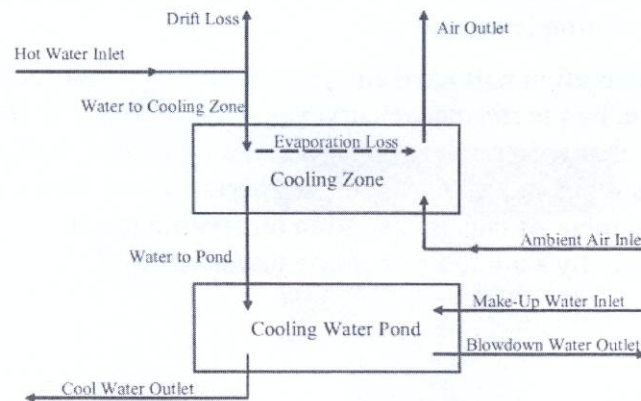
V literatuře je uvedeno, že měření se neprovádí u chladících věží s přirozeným tahem. Důvodem je přílišná rozlehlost věže, tudíž velké množství proměřovaných průřezů. Budeme se tedy zabývat proměřováním rychlostních profilů u ventilátorových elektráren. Měření se provádí za pomoci anemometrů v provedení jako lopatkové nebo miskové. Liší se od sebe nátokem proudu vzduchu na rotor a citlivostí. [1]

Měření objemového průtoku vzduchu u ventilátorových chladičů se provádí v místě nejmenších deformací proudnic a to v závislosti na typu ventilátorové věže. U sacích ventilátorů je to na výstupu z difuzoru, naopak u tlačných na vstupu. Velkým faktorem ovlivňující tato data je vítr. Nejen jeho směr ale i rychlost mají za následek změnu rychlostního pole chladicí věže. [1]

3.1. Hmotnostní bilance chladicí věže

Hmotnostní průtok vody, který jde z kondenzátoru, resp. vstupuje do věže, musí být ekvivalentní hmotnostnímu průtoku vody vystupující z věže resp. vstupující do kondenzátoru. Mezi tyto dvě veličiny však musíme zavést i další faktory ovlivňující tepelnou bilanci. Jako první na vstupu do chladicí věže se nám projevuje ztráta chladicí kapaliny tzv. úletem vody. Při rozprašování kapiček vody strhává proud vzduchu s sebou některé z nich a odnáší je mimo chladicí věž do atmosféry. To je jednou z několika ztrát při chlazení. Další ztráta je závislá na teplotě vlhkého teploměru a je to odpařování kapaliny. Při procesu chlazení je tedy zřejmé, že v záchytném bazénu nebude veškerá voda, která byla na vstupu do věže. Proto se musí zavést další faktor a tím je doplnění kapaliny do nádrže. Doplnění vody je nezbytná součást procesu. Pokrývá ztráty při samotném chlazení, ale i ztráty na odluhu, který je důležitý pro kvalitu vody v systému.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž



Obrázek 8: Bilance chladicí věže

hmotnostní průtok vody vstup = hmotnostní průtok vody výstup

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ch.vodaIN} + \dot{m}_{dopl} + \lambda_{H2OIN} \frac{M_{H2O}}{M_{vzduchIN}} \dot{m}_{vduchIN} \\ = \dot{m}_{ch.vodaOUT} + \dot{m}_{odluh} + \dot{m}_{úlet} + \lambda_{H2OOUT} \frac{M_{H2O}}{M_{vzduchOUT}} \dot{m}_{vduchOUT} \end{aligned}$$

Kde

$\dot{m}_{ch.vodaIN}$... hmotnostní průtok vody na vstupu

$\dot{m}_{ch.vodaOUT}$... hmotnostní průtok vody na výstupu

$\dot{m}_{úlet}$... hmotnostní průtok úletu vody

\dot{m}_{dopl} ... hmotnostní průtok vody přidávané do nádrže

\dot{m}_{odluh} ... hmotnostní průtok odluhu vody

Ztráta vypařováním

$$\dot{m}_{vypar} = \lambda_{H2OOUT} \frac{M_{H2O}}{M_{vzduchOUT}} \dot{m}_{vduchOUT} - \lambda_{H2OIN} \frac{M_{H2O}}{M_{vzduchIN}} \dot{m}_{vduchIN}$$

Zjednodušená bilance vody v chladicí věži

$$\dot{m}_{dopl} = \dot{m}_{vypar} + \dot{m}_{odluh} + \dot{m}_{úlet}$$

Ztráta úletem vody:

$$\dot{m}_{úlet} = X \cdot \dot{m}_{ch.vodaIN}$$

Kde

X ... předpokládaná ztráta vody úletem

Množství odluhu vody:

$$CYKLUS = \frac{\dot{m}_{dopl}}{\dot{m}_{odluh} + \dot{m}_{úlet}}$$

kde

$CYKLUS$... počet cyklů vody v nádrži

4. Diagnostika systému

Cílem diagnostiky je pomocí vhodných metod a prostředků zjistit pokud možno okamžitý stav systému. K tomu se využívá několik metod jako například vizuální posouzení, sledování vybraných signálů, různá speciální měření nebo porovnání vybraných měření s výstupy matematického modelu, což je právě náš případ. Pro potřeby diagnostiky je vhodné vytvořit regresní model daného zařízení a analyzovat jeho chování za účelem určení takových vstupních hodnot, které nám za daných podmínek zajistí nejvyšší účinnost zřízení. V našem případě se jedná o regresní model teploty chladicí vody na výstupu z věže v závislosti na vstupních hodnotách. Model nám reprezentuje soubor dat získaných za určitý časový interval a jeho výstupem je tedy křivka, která je funkcí závislou na vstupních parametrech. Vyjadřuje nám, jak se chladicí věž v tomto období chovala. Srovnáváním jednotlivých modelů nám pak vzniká přesnější přehled o tom, jak se zařízení chová a také jak by se mohlo chovat za několik let.

Takto vzniklý empirický model je sestaven na základě reálného objektu. Musíme se však vyvarovat různých anomálií v datech, které by nepříznivě ovlivnily přesnost modelu. Mezi ně patří například nestacionární stavy, odlehle hodnoty v měřeních nebo stav počasí v daném období. Tento proces je tedy velice časově náročný.

Postup řešení k vytvoření modelu se skládá z několika základních bodů. Jedná se o dvě fáze, modelování a simulace.

Modelování:

- Provedení experimentu nad reálným objektem
- Definice systému nad reálným objektem
- Vytvoření matematického modelu
- Realizace matematického modelu na počítači

Simulace:

- Počítačové pokusy
- Aplikace výsledků [10]

Provedení experimentu nad reálným objektem

Smyslem provedení experimentu nad reálným objektem je získání dat při řízené změně vstupních parametrů. Vyvoláním změn jeho stavů pak získáme informace o vlastnostech zařízení. Vznikne nám rozšíření dat i v případech, kdy zařízení není nastaveno jen na své jmenovité parametry. Změnu můžeme provést například regulací průtoku chladicí vody do věže. Experiment musí být navržen tak, aby vstupy a výstupy pokryly, z hlediska provozu a cíle optimalizace, celý předpokládaný rozsah změn. [10]

Definice systému nad reálným objektem

Definicí systému se myslí zejména účel systému. V důsledku toho jsou jednotlivé složky zvažovány či jde o důležité části nebo naopak se mohou ignorovat. Dochází tak k zjednodušení modelu. Podmínkou pro stanovení hranic systému je podmínka

separability. Systém je separabilní právě tehdy, když jeho výstupy zpětně vlivem okolí neovlivňují podstatně vstupy systému. Jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících chladicí okruh je změna stavu atmosféry v závislosti na teplotě vlhkého teploměru. [10]

Vytvoření matematického modelu

Vytvoření modelu je klíčovým krokem pro optimalizaci systému. Jde o to zajistit, aby se model choval právě jako doposud reálný objekt. To znamená určitý stupeň platnosti modelu.

Postup vytvoření matematického modelu:

- Kontrola a ošetření dat – vstupy a výstupy rovnoměrně pokryly požadovaný rozsah jejich předpokládaných změn, vyloučení sad měření, kdy působily vlivy, jejichž účinek nelze eliminovat, vyloučení sad měření obsahujících hrubou chybu, nalezení a vyloučení odlehlých bodů, kontrola rozložení vlivů, jejichž působení je eliminováno tzv. znáhodněním
- Korekce dat – provedení korekce výstupu na vstupy, u kterých je známo jejich působení na výstup, tímto se zmenšuje dimenze pro další krok
- Návrh struktury modelu – volba analytického tvaru regresní funkce
- Provedení regrese
- Vizuální kontrola získané funkce, ověření platnosti modelu[10]

5. Úvod do inferenční statistiky

Inferenční statistika je jednou z oborů statistiky. Provádí závěry na základě dat a ověřování předpokladů. Zároveň udává, s jakou přesností jsou spolehlivé. K tomu využívá pravděpodobnostní metody.

5.1. Regresní model

Metodu využíváme v úlohách, kde nás zajímá závislost proměnné na jedné nebo více proměnných. Předem je určeno, která proměnná je závislá a která nezávislá. Předpokladem regresního modelu je, že nezávislá proměnná či proměnné jsou nenáhodné (pevně určeny experimentátorem) a závislá proměnná je náhodná (měřená). Pokud tento předpoklad není splněn, pak mluvíme o tzv. korelačním modelu. Pomocí vhodně zvoleného matematického modelu pak určíme výslednou závislost. Podle počtu nezávisle proměnných určujeme, zda se jedná o model jednoduché nebo vícenásobné regrese. Pokud je vysvětlovaná proměnná závislá jen na jedné vysvětlující proměnné jedná se o jednoduchou regresi. V opačném případě, tedy při výskytu dvou a více vysvětlujících proměnných, hovoříme o vícenásobné regresi. Následně podle typu regresní funkce rozlišujeme modely na lineární a nelineární. Grafickým vyjádřením lineární regrese nemusí být pouze přímka, ale i jiné křivky např. parabola nebo hyperbola. Modely by měli sloužit k zobrazení zjednodušené reality.

Příklad lineárního regresního modelu:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j$$

kde β_j ... regresní koeficienty

Příklad nelineárního regresního modelu:

$$y = \beta_0 + \beta_1 e^{\beta_2 x}$$

Vysvětlovanou proměnnou lze rozdělit na dvě složky. První z nich je deterministická složka, jež popisuje závislost mezi hlavními proměnnými a je možné ji vyjádřit matematickou funkcí. Druhá složka popisuje závislost vysvětlované proměnné na neznámých nebo nepozorovaných proměnných a zahrnuje i vliv náhody. Literatura ji označuje jako náhodnou složku a je vyjádřena pravděpodobnostní funkcí.

$$y_i = f(x_i) + e_i$$

,kde $f(x_i)$... deterministická složka

e_i ... náhodná složka

5.2. Tvorba regresní analýzy (modelu)

5.2.1. Návrh tvaru modelu

Při výstavbě regresního modelu se postupuje na základě několika obecných bodů. Aby byl model dostatečně smysluplný a použitelný, musíme zvolit jeho vhodný tvar. Toho dosáhneme tak, že problém fyzikálně zanalyzujeme a porozumíme mu. Na základě toho můžeme říci o různých veličinách, které spolu korelují, zda jsou v kauzalitě nebo nikoliv. Samotná statistika to neodhalí, a proto je to jen na lidském faktoru. A již v tomto bodě se taky rozhoduje o správnosti výsledku analýzy. O tvaru modelu rozhodují také další vlastnosti, již popsane v předchozí kapitole.

5.2.2. Určení regresních parametrů a statistické významnosti

K určení regresních parametrů se používá několik metod v závislosti na splněných předpokladech. Nejčastější, tudíž nejpoužívanější metodou je metoda nejmenších čtverců (MNC). Při nesplnění podmínek pro použití MNC se nahrazuje např. váhovými funkcemi.

Na základě vstupních dat se vyberou právě ta, která jsou pro model významná. Můžeme postupovat tak, že budeme testovat každý přidaný parametr do analýzy a zjišťovat zda je významný či nevýznamný. Opačný způsob nás vede k tomu, abychom si vytvořili co nejvíce možných proměnných a postupným odebráním jednotlivých veličin došli ke statisticky významnému modelu. Pokud se nám právě

přidaný parametr prokáže jako nevýznamný, nemusí to vždy znamenat jeho nevýznamnost. Může být ovlivněn ještě jiným parametrem a při jeho odstranění se z nevýznamného parametru stává významný.

5.2.3. Vysvětlení predikovaných hodnot

Vzhledem k zadání se přistupuje ke kontrole fyzikální významnosti hodnot. Pokud nejsou v souladu, musí se přistoupit k úpravě modelu. Dále se detekují proměnné, které nemají vliv na výslednou hodnotu. Jestliže nějaké nalezneme, jsme nuceni opět měnit model.

5.3. Regresní triplet

Jedná se o postup k posouzení kvality dat, modelu a splnění předpokladů pro metodu nejmenších čtverců. Zabraňuje vzniku modelů bez fyzikálního významu.

- KRITIKA DAT
- KRITIKA MODELU
- KRITIKA METODY [9]

5.3.1. Kritika dat

Je metoda zkoumání kvality dat. Metoda posuzuje rozmezí dat, jejich variabilitu, detekuje vlivné body. Nejdůležitější část kritiky dat: detekce vlivných bodů (mohou zkreslit odhady, zvýšit rozptyl, způsobit až nepoužitelnost modelu).

Vlivné body:

- odlehlé (vybočující) body (tzv. outliers) – hrubé chyby měření, body vyvolané nestandardním stavem technologie (vliv dynamiky systému). Odlehlé body se před dalším zpracováním musí odstranit.
- extrém – body s velkým vlivem, které mohou výrazně zpřesnit regresní model, odlišují se v hodnotě jedné (či více) nezávislé proměnné. Extrémy je nutné ponechat.

Identifikace vlivných bodů: analýzou různých druhů reziduí a diagonálních prvků projekční matice H (čím větší je i -tý diagonální prvek matice H , tím je větší vliv i -tého bodu na regresi). Některé metody pouze označí, zda bod je vlivný, jiné metody dokážou rozeznat extrém a odlehlé body.

Metody identifikace vlivných bodů:

- textové – vyhledání nejvyšších čísel v určitém seznamu hodnot (QC.Expert: vlivné body ve výpisu jsou odlišeny barevně)
- grafické – poloha bodů v grafu nad určitou hranicí (QC.Expert: zobrazuje hranice vlivných bodů v grafech)

. Pro vyloučení odlehlých bodů platí pravidlo „3 z 5“, které je založeno na 5 nezávislých metodách. Pokud je bod detekován jako podezřelý minimálně ve 3 metodách, lze jej odstranit. Nemusí být striktně jen 5 použitých metod, ale i více. Některé metody nedokáží rozlišovat mezi extrém a odlehlými body. Jestliže metoda, která umí rozpoznat extrém určí bod jako extrém, nelze se již bavit o

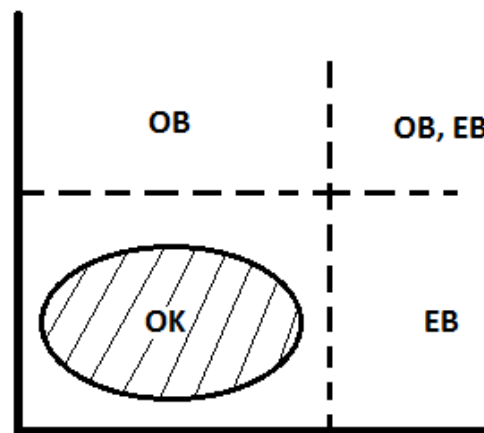
Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

odlehlejší bodu, tudíž ho ponechávám v regresi. Spolu s odlehlými body se odstraňují hrubé chyby, protože mají také negativní vliv na regresi.

Ukázky několika používaných grafů:

Williamsův graf

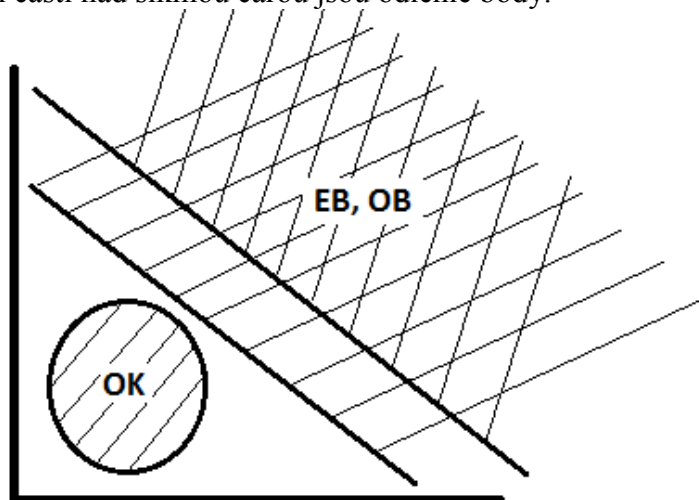
Dokáže rozpoznat odlehlé body od extrémů. Je rozdělen na 4 kvadranty. Nad vodorovnou osou vlevo nahoře se nachází odlehlé body a vpravo nahoře jsou odlehlé body, které jsou současně extrémní. V kvadrantu napravo dole se nachází pouze extrémní.



Obrázek 9: Williamsův graf, obecný

Pregibonův graf

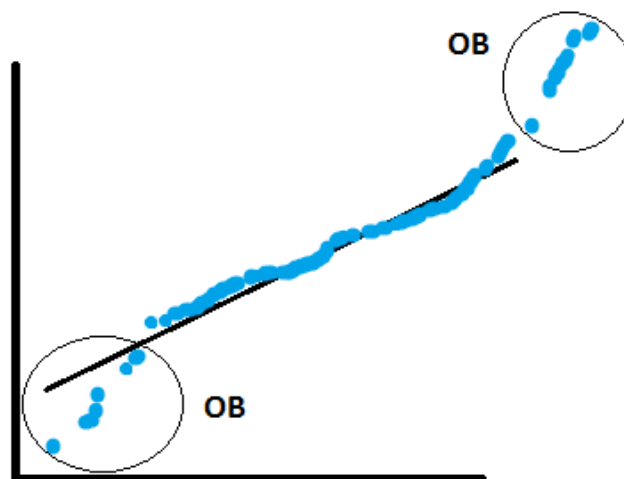
Extrémy jsou umístěny spíše v pravé dolní části grafu, nejsou přesně ohraničené. Ve střední a horní části nad šikmou čarou jsou odlehlé body.



Obrázek 10: Pregibonův graf, obecný

Rankitový graf

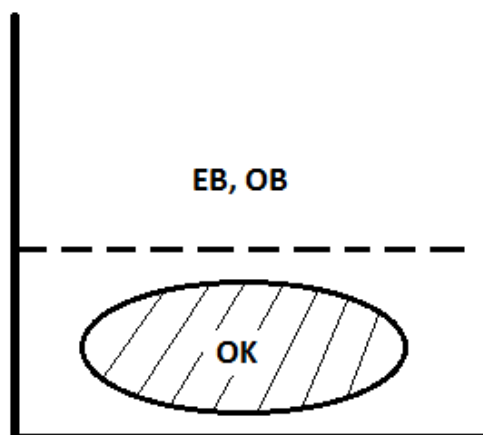
Vlivné body jsou na okrajích křivky. Lze je rozeznat tak, že body jsou od sebe více vzdáleny a řady bodů se někdy rozpojují ve shlucích.



Obrázek 11: Rankitový graf, obecný

Projekční matice – H

Všechny body ležící nad vodorovnou osou se považují za vlivné body.



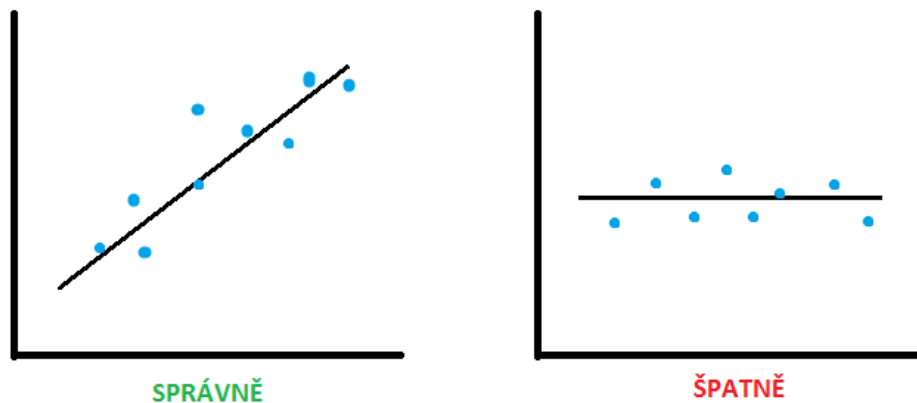
Obrázek 12: Projekční matice - H graf, obecný

5.3.2. Kritika modelu

Kritika modelu nám hodnotí kvalitu modelu pro daná data. K tomu nám slouží parciální regresní grafy, které nám zobrazují strmost závislostí. U každého vstupního parametru platí, že by měl být významný a v takovém případě by

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladící věž

směrnice přímky neměla být nulová. V opačném případě se snažíme model upravit.[9]



Obrázek 13: Parciální regresní grafy, obecné

Kritéria kvality regresních modelů

Několik parametrů, které posuzují kvalitu modelů. Jedním z nich je koeficient determinace R^2 , jenž se nachází například i v softwaru MS Excel. Tento koeficient nám vyjadřuje, jakou část celkové variability závislé proměnné objasňuje model. V případě existence multikolinearity je tento koeficient nespolehlivý. Vztah k dosažení jeho hodnoty:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} ; 0 \leq R^2 \leq 1$$

, kde \hat{y}_i ... hodnota modelu pro x_i

\bar{y} ... průměrná hodnota ze všech y_i

Poměrová kritéria kvality

Pomocí těchto kritérií lze posoudit, který z modelů je nejpřesnější. Pokud si zjistíme velikosti MEP a AIC pouze u jednoho modelu, tak nám tyto hodnoty mnoho neprozradí. Tato kritéria fungují v případě, že porovnáváme modely vytvořené jinými metodami. Porovnáváním jednotlivých hodnot MEP a AIC u několika modelů pak dojdeme k závěru, který model je nejpřesnější. Kritéria musí mít co nejmenší velikosti (tím je model přesnější), kde větší váhu má MEP.

Střední kvadratická chyba predikce MEP:

$$MEP = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(1 - H_{ii})^2}$$

, kde H_{ii} ... i-tý diagonální prvek projekční matice $H = X(X^T X)^{-1} X^T$

n ... počet dat

Akaikeho informační kritérium AIC:

$$AIC = n \cdot \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right) + 2m$$

,kde $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$... součet reziduí

n ... počet dat

m ... počet nezávisle proměnných

5.3.3. Kritika metody

Poslední bod regresního tripletu. Jedná se o zhodnocení použité metody na konkrétním modelu a to pomocí několika kritérií.

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.[9]

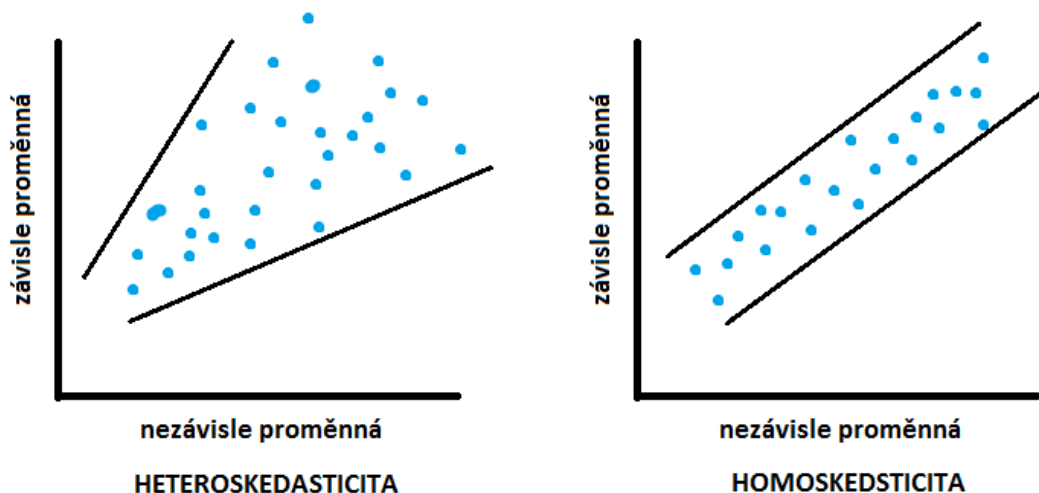
Multikolinearita

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 hodnoty.[9]

Konstantnost rozptylu reziduí (Homoskedasticita, Heteroskedasticita)

Homoskedasticita – konstantnost rozptylu

Heteroskedasticita – nekonstantnost rozptylu [9]



Obrázek 14: Konstantnost rozptylu

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Nejlépe je to pozorovatelné z grafu, kde vidíme, jak nám body vytváří určitý obrazec. Podle toho můžeme rozpoznat konstantnost rozptylu.

Autokorelace

Detekuje se závislost dat. Vzniká nám při použití časových řad. V našem případě nevyhnutelné. Autokorelace se neeliminuje, zanechá se metoda MNČ.[9]

Normalita reziduí

Dobře viditelná na grafech Q-Q. Kontroluje se, zda je trend v reziduích. V našem případě máme dostatečně velký soubor dat na to, aby to nemělo kritický dopad na model. Tudíž se neeliminuje a ponechá se standardní MNČ.[9]

6. Praktická část

6.1. Úvod

Úloha se zabývá tvorbou regresního modelu chladicí věže. Jak bylo popsáno v teoretické části, snažíme se pomocí chladících věží odvést co nejvíce nízkopotenciálního tepla z chladicí vody do atmosféry. Teplota chladicí vody závisí nejvíce na stavu atmosféry, především na teplotě a vlhkosti vzduchu. Tyto dvě veličiny slučujeme do jedné veličiny – teploty vlhkého teploměru. Závislost teploty chladicí vody na teplotě vlhkého teploměru u chladících věží je často popsána v literatuře. Dále je teplota vody na výstupu z chladicí věže závislá na hydraulickém zatížení – lze reprezentovat hmotnostním průtokem chladicí vody v okruhu – a na tepelném zatížení – lze reprezentovat množstvím tepla, které je třeba odvést z chladicí vody.

Průtok a množství předaného tepla jsou počítány z hmotnostní a energetické bilance.

6.2. Zadání úlohy a výběr dat

Cílem úlohy bylo stanovit závislost teploty odcházející z chladicí věže na vstupních datech. Těmi jsou:

- Teplota vlhkého teploměru (T_{vt}) [$^{\circ}\text{C}$]
- Tepelné zatížení (Q) [MW]
- Hydraulické zatížení (F_{chv}) [t/h]



Obrázek 15: Schéma vstupních a výstupních parametrů

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Na začátku byly použity 4 regresní modely, z nichž se vycházelo:

- $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_1^2 + \beta_3 \cdot x_2 + \beta_4 \cdot x_2^2 + \beta_5 \cdot x_3 + \beta_6 \cdot x_3^2$
- $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_1^2 + \beta_3 \cdot x_2 + \beta_4 \cdot x_2^2 + \beta_5 \cdot x_3$
- $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_1^2 + \beta_3 \cdot x_2 + \beta_5 \cdot x_3 + \beta_6 \cdot x_3^2$
- $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_1^2 + \beta_3 \cdot x_2 + \beta_5 \cdot x_3$

,kde

- x_1 ... teplota vlhkého teploměru (Tvt)
- x_1^2 ... teplota vlhkého teploměru v druhé mocnině (Tvt²)
- x_2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok (Fchv)
- x_2^2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok v druhé mocnině (Fchv²)
- x_3 ... tepelné zatížení, předané teplo (Q)
- x_3^2 ... tepelné zatížení, předané teplo v druhé mocnině (Q²)
- y ... teplota chladicí vody (T-out)

6.2.1. Data

Data byla poskytnuta z fungující elektrárny, která si nepřeje být jmenována. Rozsah dat se pohybuje okolo 3000 vzorků z časového intervalu od 1. 4. 2014 do 30. 9. 2014 a vzorkovány po hodině. Počet vzorků se může měnit v závislosti na věži. A to v důsledku předběžné korekce dat (odstávka věže apod.). Jedná se o 4 věže, z nichž každé 2 jsou zapojeny do jednoho tepelného schématu. Jejich označení je 1A, 1B a 2A, 2B.

Ke zpracování dat byl použit software QCexpert 3.3 od firmy TriloByte. Existuje několik metod jak stanovit výkonnost chladicí věže. Pro tvorbu modelů jsem využil lineární regresní analýzu.

6.3. Chladicí věž 1A

Kombinací vstupních parametrů, které jsem zahrnul do lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců, jsem vytvořil 4 modely.

- chv1_a
- chv1_b
- chv1_c
- chv1_d

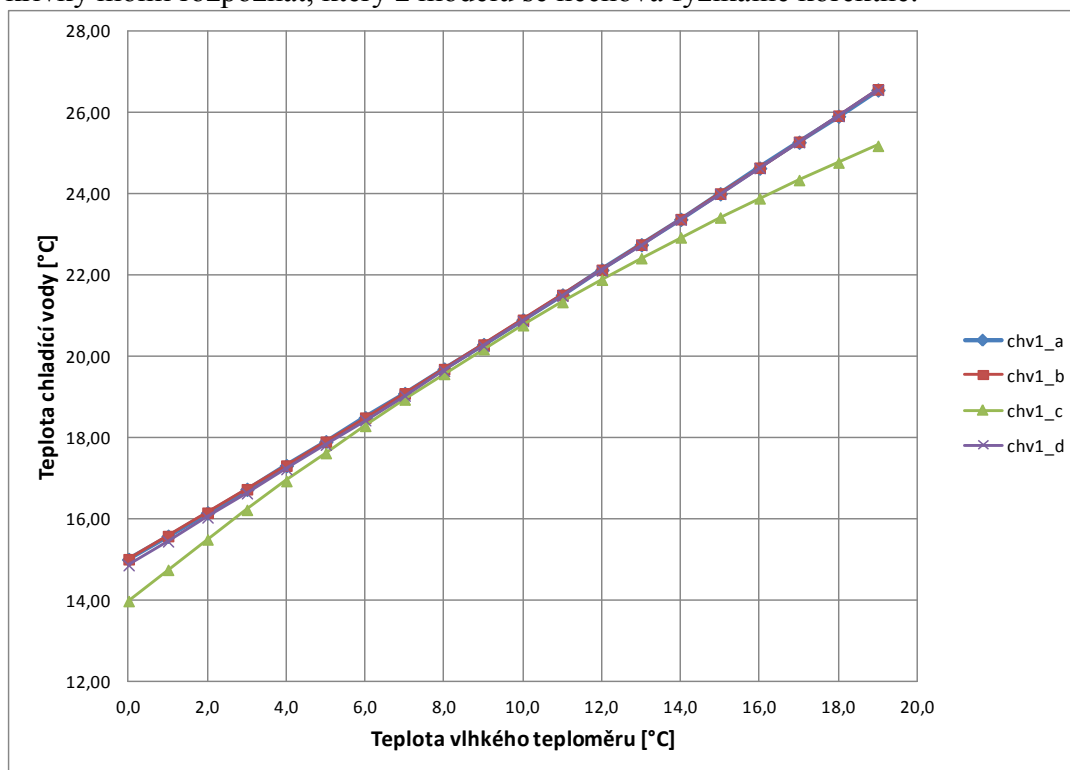
Všechny tyto modely vykazují heteroskedasticitu a multikolinearitu, jež se dala očekávat, jelikož vstupní parametry obsahují druhé mocniny. Takto vytvořené modely nám ukázaly, že až na model chv1_a, byly všechny statisticky významné. Odhady parametrů β_0 až β_7 jsou uvedeny v tab. 2.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 2: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 1A

model	chv1_a	chv1_b	chv1_c	chv1_d
Abs	-248,4986601	-278,8924518	3903,593275	-56,41919204
Tvt	0,56982517	0,568371895	0,778890263	0,58571663
Tvt ²	0,002053303	0,002156316	-0,009922214	0,001616061
Fchv1	0,006833958	0,006800443	0,000105018	0,000136898
Fchv1 ²	-5,04E-08	-5,01E-08		
Q1	-2,64E-06	0,066561306	-8,270865347	0,065366325
Q1 ²	3,52E-05		0,004388545	
	nevýznamný	významný	významný	významný

Tyto odhady parametrů nám dopomohly k vytvoření rovnice pro srovnání modelů tak, že jsme měnili hydraulické a tepelné zatížení. Z grafu 1 můžeme pozorovat různé průběhy křivek. Dle literatury a zkušeností odborníků, jsme podle tvaru křivky mohli rozpoznat, který z modelů se nechová fyzikálně korektně.



Graf 1: Vykreslení modelů pro parametry Fchv=67000t/h a Q=950MW věž 1A

Shrnutím výsledků se ukázalo, že model chv1_a je statisticky nevýznamný, chv1_c je fyzikálně nekorektní a při srovnání ostatních dvou modelů se zjistilo, že model chv1_b je pro nižší hodnoty Q silně nelineární vzhledem k průtoku chladicí vody. Pro další práci se tedy využívá model chv1_d.

Všechny parametry modelu byly určeny jako statisticky významné a jsou uvedeny v tab 3.

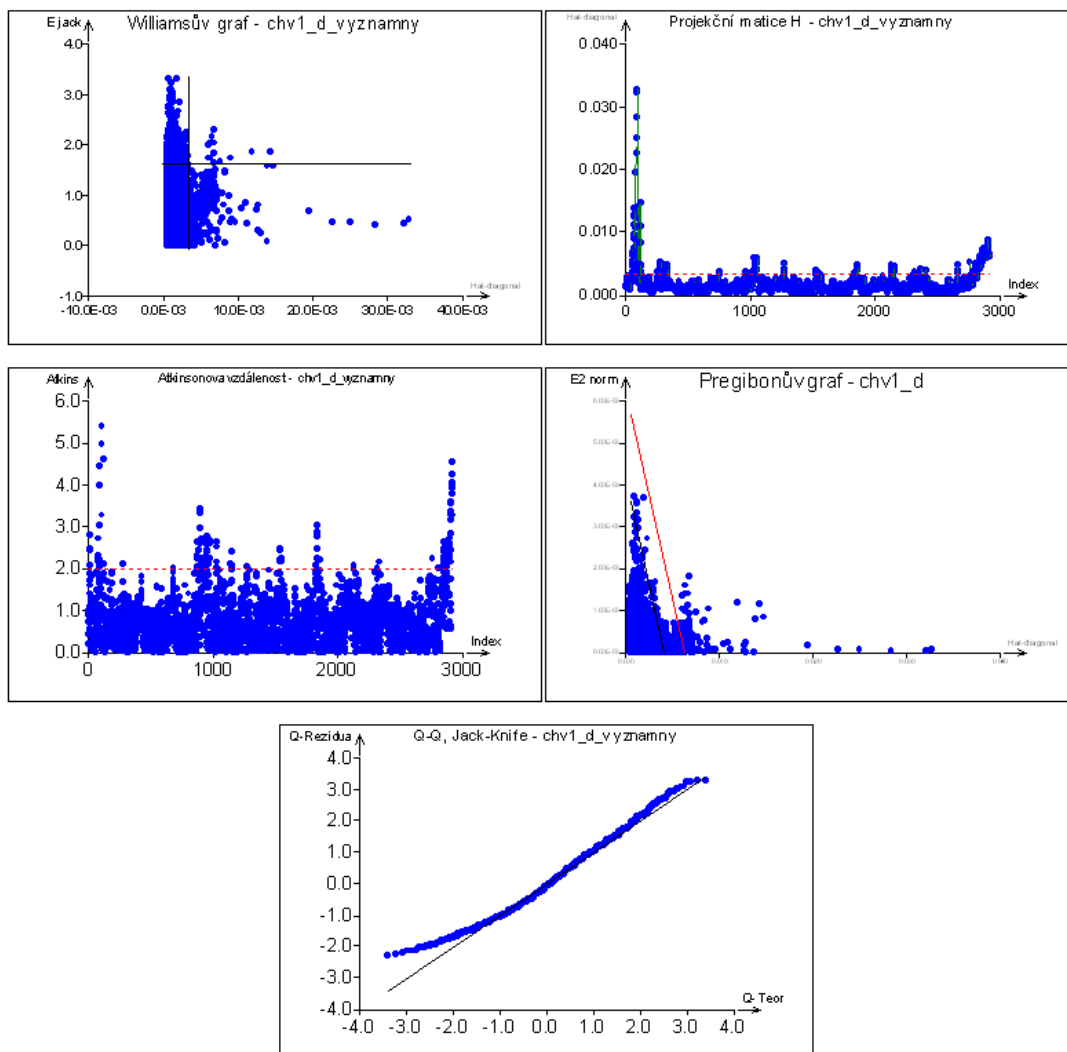
Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 3: Odhady parametrů pro model chv1_d

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-56,41919204	2,494993638	Významný	0	-61,3113217	-51,5270624
Tvt	0,58571663	0,018991787	Významný	0	0,548477944	0,622955316
Tvt^2	0,001616061	0,000789347	Významný	0,040714366	6,83E-05	0,003163795
Fchv1	0,000136898	1,92E-05	Významný	1,21E-12	9,93E-05	0,000174515
Q1	0,065366325	0,002527085	Významný	0	0,06041127	0,070321379

6.3.1. Analýza vlivných bodů

Všechny grafy k analýze vlivných bodů jsou na obr. 16. Pomocí nich se určí extrém a odlehlé body. Extrémy zůstávají, ale odlehlé body se musí vyloučit.



Obrázek 16: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv1_d

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Celkem bylo nalezeno 302 vlivných bodů. Z toho 61 odlehlých bodů, které byly vyloučeny a poté byly znovu určeny regresní parametry.

6.3.2. Zpřesněný model

Zpřesněný model vytvořený po odstranění vlivných bodů metodou nejmenších čtverců vykazoval multikolinearitu a heteroskedasticitu, proto jsem musel vytvořit další modely metodou korekce hodnoty za použití váhových funkcí. Takto jsem obdržel 4 regresní modely, z nichž první tři byly statisticky nevýznamné. Čtvrtý model chv1_d_1Y_KH vytvořený pomocí korekce hodnoty s váhovou funkcí 1/Y splnil všechny požadavky, a proto jsem ho zvolil jako regresní model pro věž 1A. Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese jsou uvedeny v tab. 4.

Tabulka 4: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 1A

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-55,52550498	2,40992896	Významný	0	-60,2508836	-50,8001263
Tvt	0,584034445	0,014989694	Významný	0	0,554642716	0,613426174
Tvt ²	0,001784217	0,000666854	Významný	0,007502827	0,000476651	0,003091782
Fchv1	0,000155582	1,78E-05	Významný	0	0,00012061	0,000190555
Q1	0,063056786	0,002440165	Významný	0	0,058272121	0,067841451

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,971269327
Koeficient determinace R ² :	0,943364106
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,886525434
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,44405355
Akaikeho informační kritérium :	-2400,027914

Tvar modelu věže 1A je popsán závislostí:

$$y = -55,5255 + 0,58403 \cdot x_1 + 0,00178 \cdot x_1^2 + 0,0001556 \cdot x_2 + 0,06306 \cdot x_3$$

, kde

- x_1 ... teplota vlhkého teploměru (Tvt)
- x_1^2 ... teplota vlhkého teploměru v druhé mocnině (Tvt²)
- x_2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok (Fchv)
- x_3 ... tepelné zatížení, předané teplo (Q)
- y ... teplota chladicí vody (T-out)

6.4. Chladicí věž 1B

Kombinací vstupních parametrů, které jsem zahrnul do lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců, jsem vytvořil 4 modely.

- chv2_a
- chv2_b
- chv2_c
- chv2_d

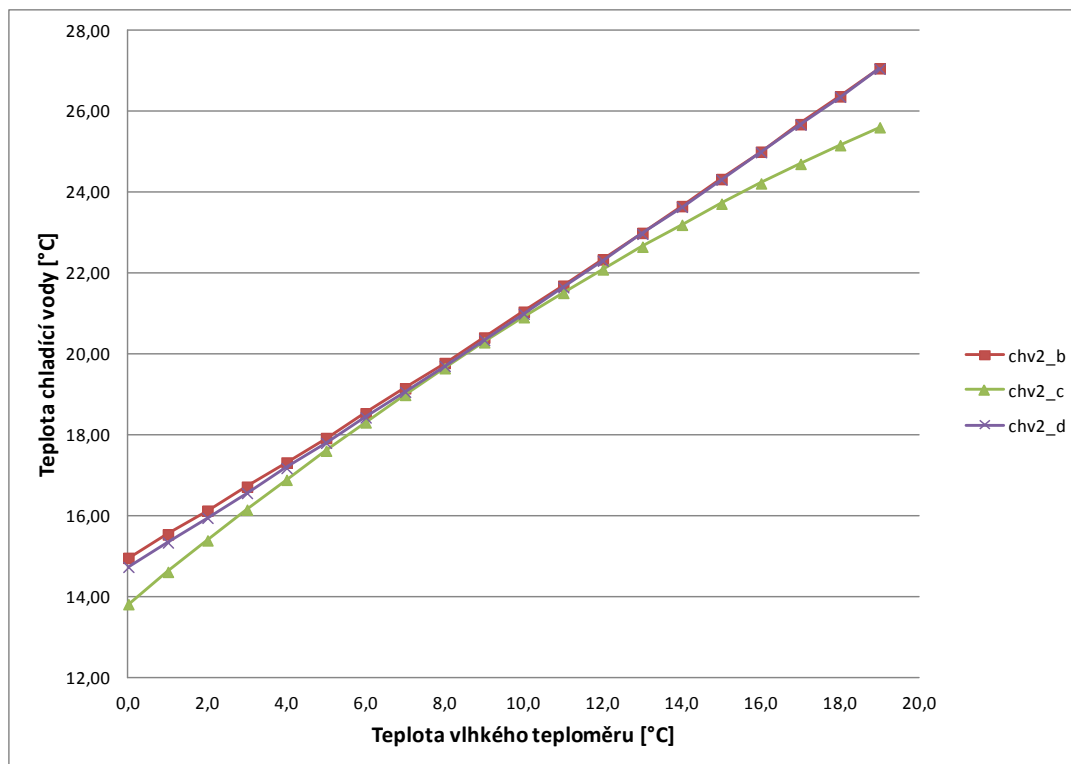
Při pokusu o vytvoření prvního modelu chv2_a byl zjištěn singulární charakter matice, model nebylo možné vůbec vytvořit. Ostatní modely vykazovaly multikolinearitu a heteroskedasticitu. Výjimkou byl model chv2_c, kde byla zaznamenána homoskedasticita. Jako statisticky nevýznamný byl určen pouze model chv2_d. Odhady parametrů β_0 až β_6 jsou uvedeny v tab. 5 .

Tabulka 5: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 1B

model	chv2_a	chv2_b	chv2_c	chv2_d
Abs	0	-302,1478586	4226,427257	-40,25285441
Tvt	0	0,577425406	0,809057228	0,601969561
Tvt^2	0	0,003178923	-0,00988502	0,002469891
Fchv1	0	0,00769084	-5,36E-05	-2,26E-05
Fchv1^2	0	-5,72E-08		
Q1	0	0,061608882	-8,92211147	0,059468248
Q1^2	0		0,004727953	
	singularni	významný	významný	nevýznamný

Tyto odhady parametrů nám dopomohly k vytvoření rovnice pro srovnání modelů. Změnou hydraulického a tepelného zatížení se měnila poloha křivek. Z grafu 2 můžeme pozorovat různé průběhy křivek. Dle literatury a zkušeností odborníků, jsme podle tvaru křivky mohli rozpoznat, který z modelů se nechová fyzikálně korektně.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Graf 2: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 1B

Shrnutím výsledků se ukázalo, že model $chv2_a$ měl singulární char. matice, $chv2_c$ byl fyzikálně nekorektní a model $chv2_d$ byl statisticky nevýznamný. Pro další práci se tedy využívalo modelu $chv2_b$.

Všechny parametry modelu $chv2_b$ byly určeny jako statisticky významné a jsou uvedeny v tab. 6.

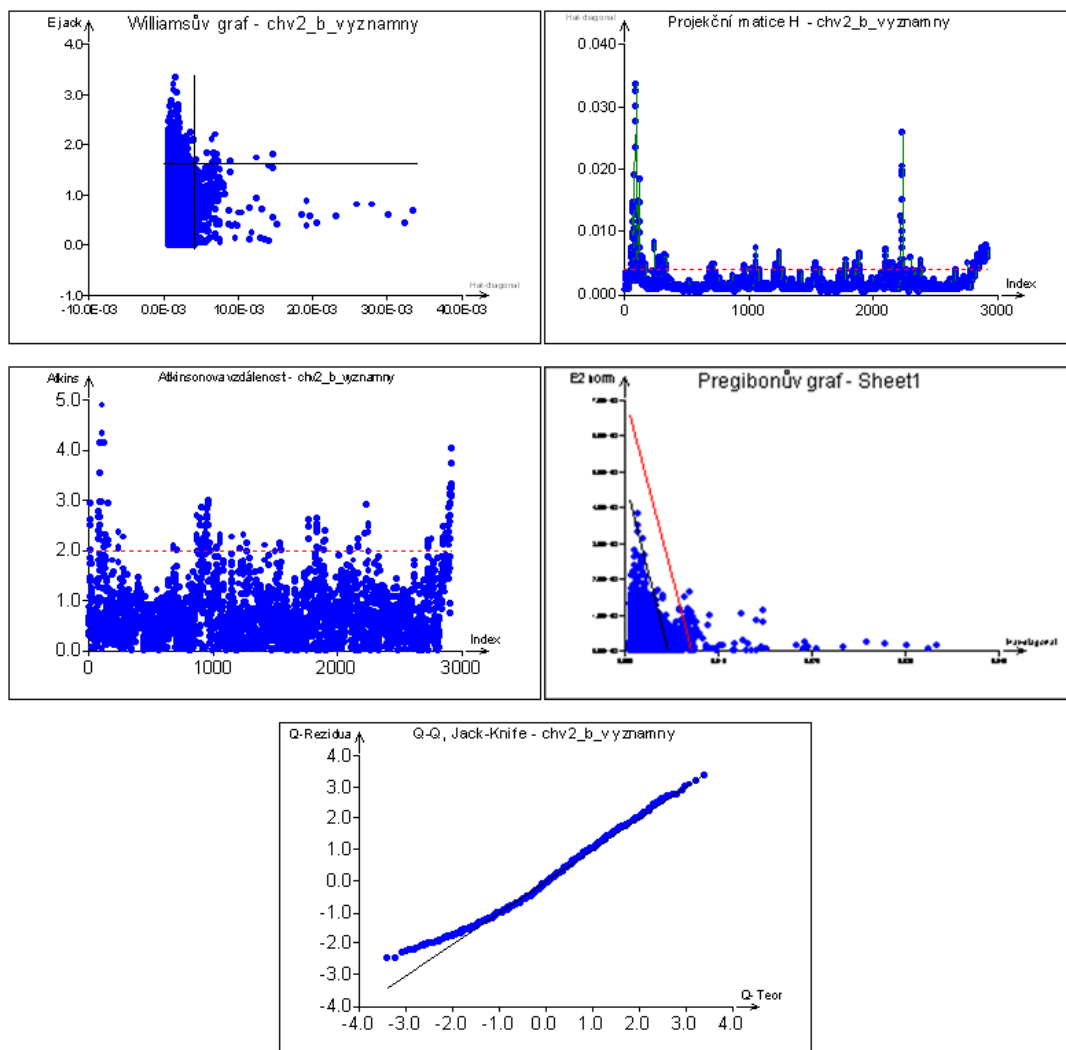
Tabulka 6: Odhady parametrů pro model $chv2_b$

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-302,1478586	49,24210889	Významný	9,61E-10	-398,70074	-205,59498
Tvt	0,577425406	0,018792283	Významný	0	0,5405779	0,6142729
Tvt ²	0,003178923	0,000772685	Významný	3,99E-05	0,00166386	0,004694
Fchv2	0,00769084	0,001448559	Významný	1,18E-07	0,00485054	0,0105311
Fchv2 ²	-5,72E-08	1,07E-08	Významný	1,08E-07	-7,82E-08	-3,61E-08
Q2	0,061608882	0,002436984	Významný	0	0,0568305	0,0663873

6.4.1. Analýza vlivných bodů

Všechny grafy k analýze vlivných bodů jsou na obr. 17. Pomocí nich se určily extrémní a odlehlé body.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

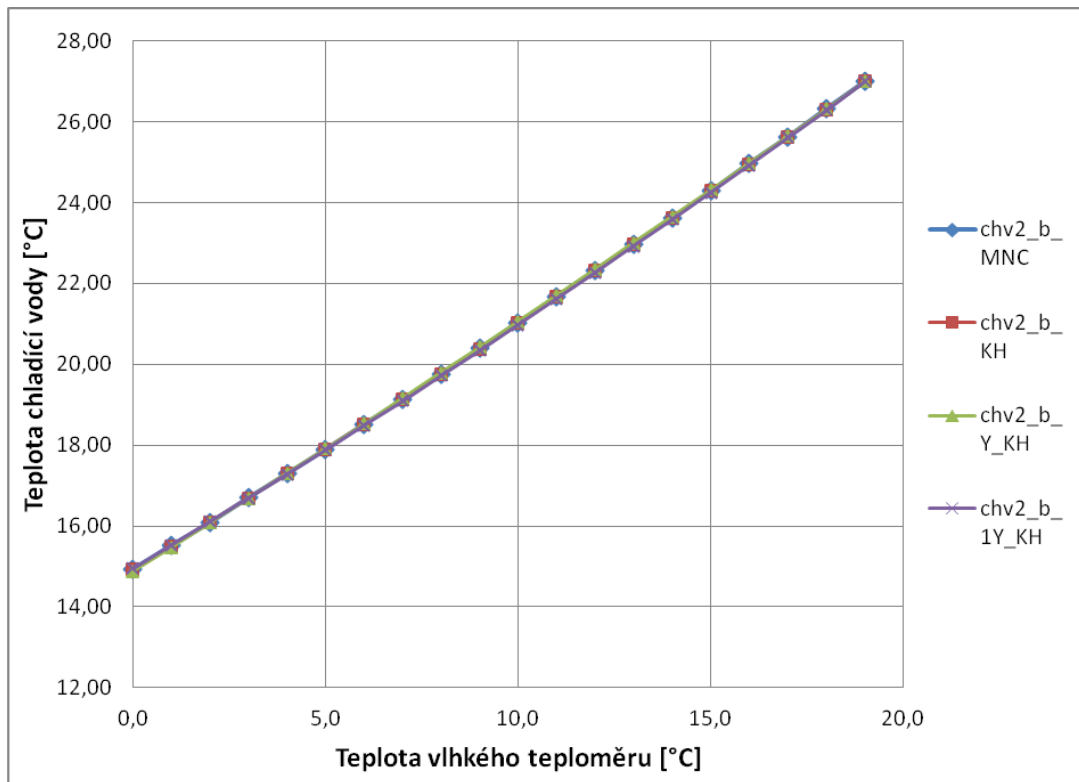
Obrázek 17: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu `chv2_b`

Celkem bylo nalezeno 317 vlivných bodů. Z toho 58 odlehlých bodů, které byly vyloučeny a poté byly znovu určeny regresní parametry.

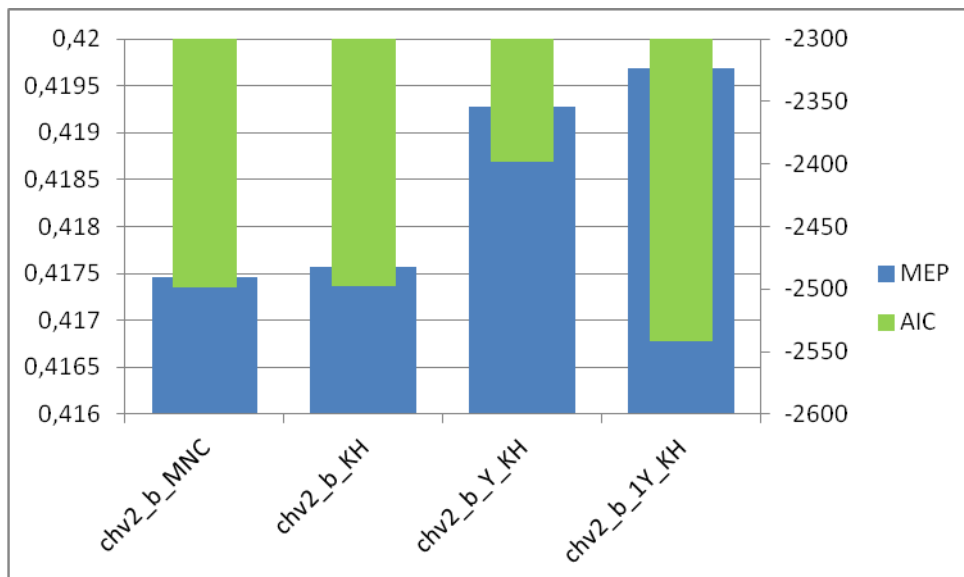
6.4.2. Zpřesněný model

Použitím metody nejmenších čtverců, korekcí hodnotí a váhových funkcí jsem obdržel 4 regresní modely, z nichž byly statisticky významné všechny. Žádný z nich nevykazoval podivné chování, jak je patrné z grafu 3.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Graf 3: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 1B

S ohledem na význam parametrů MEP a AIC volíme ten model, který má tyto parametry nejnižší, což je právě $chv2_b_MNC$ a proto jsem ho zvolil jako regresní model pro věž 1B.



Graf 4: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 1B

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese jsou uvedeny v tab. 7.

Tabulka 7: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 1B

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpodobnost	Spodní mez	Horní mez
Abs	-281,2540422	47,44988525	Významný	3,45E-09	-374,29355	-188,21453
Tvt	0,582101136	0,018208862	Významný	0	0,54639729	0,617805
Tvt ²	0,002820906	0,000751703	Významný	0,00017843	0,00134697	0,0042948
Fchv2	0,007059717	0,001395436	Významný	4,48E-07	0,00432355	0,0097959
Fchv2 ²	-5,24E-08	1,03E-08	Významný	4,29E-07	-7,27E-08	-3,21E-08
Q2	0,061596043	0,00240358	Významný	0	0,05688311	0,066309

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,972352613
Koeficient determinace R ² :	0,945469603
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,89351576
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,417461786
Akaikeho informační kritérium :	-2498,257208

Tvar modelu věže 1B je popsán závislostí:

$$y = -281,2540 + 0,5821 \cdot x_1 + 0,0028 \cdot x_1^2 + 0,00706 \cdot x_2 - 5,2426E-008 \cdot x_2^2 + 0,0616 \cdot x_3$$

Kde

- x_1 ... teplota vlhkého teploměru (Tvt)
- x_1^2 ... teplota vlhkého teploměru v druhé mocnině (Tvt²)
- x_2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok (Fchv)
- x_2^2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok v druhé mocnině (Fchv²)
- x_3 ... tepelné zatížení, předané teplo (Q)
- y ... teplota chladicí vody (T-out)

6.5. Chladicí věž 2A

Kombinací vstupních parametrů, které jsem zahrnul do lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců, jsem vytvořil 4 modely.

- chv3_a
- chv3_b
- chv3_c
- chv3_d

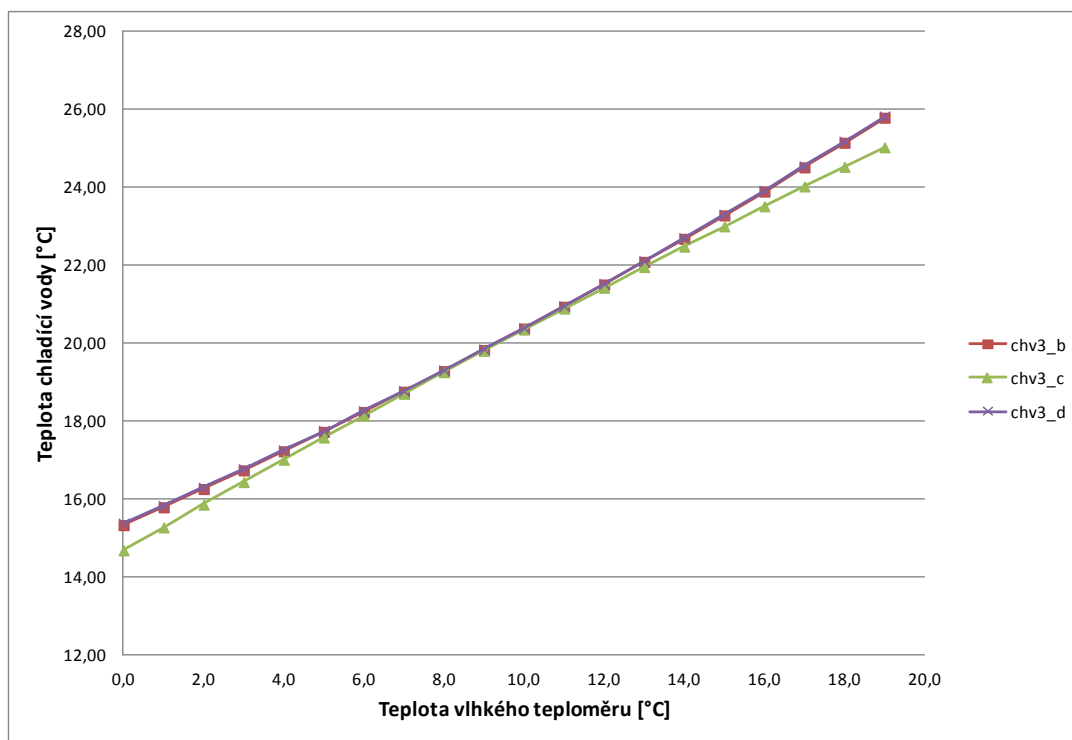
Již u prvního modelu chv3_a byl zjištěn singulární charakter matice, model nebylo možné vytvořit. U všech modelů byla zaznamenána multikolinearita. Lineární regrese pak vyhodnotila chv3_b jako statisticky nevýznamný. Ostatní dva modely byly statisticky významné a navíc u modelu chv3_d byla detekována homoskedasticita. Odhady parametrů β_0 až β_6 jsou uvedeny v tab. 8.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 8: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 2A

model	chv3_a	chv3_b	chv3_c	chv3_d
Abs	0	42,1385186	4953,957142	-105,8504446
Tvt	0	0,453866254	0,592015798	0,449092215
Tvt ²	0	0,005113394	-0,002471269	0,005338665
Fchv1	0	-0,004154515	0,000247179	0,000253148
Fchv1 ²	0	3,28E-08		
Q1	0	0,109617674	-10,53231948	0,109740714
Q1 ²	0		0,005595412	
	singulár.	nevýznamný	významný	významný

Tyto odhady parametrů nám dopomohly k vytvoření rovnice pro srovnání modelů. Změnou hydraulického a tepelného zatížení se měnila poloha křivek. Z grafu 5 můžeme pozorovat různé průběhy křivek. Dle literatury a zkušeností odborníků, jsme podle tvaru křivky mohli rozpoznat, který z modelů se nechová fyzikálně korektně.

Graf 5: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000t/h$ a $Q=950MW$ věž 2A

Shrnutím výsledků se ukázalo, že model chv3_a měl singulární char. matice, chv3_c byl fyzikálně nekorektní a model chv3_b byl statisticky nevýznamný. Pro další práci se tedy využívá model chv3_d.

Všechny parametry modelu chv3_d byly určeny jako statisticky významné a jsou uvedeny v tab. 9.

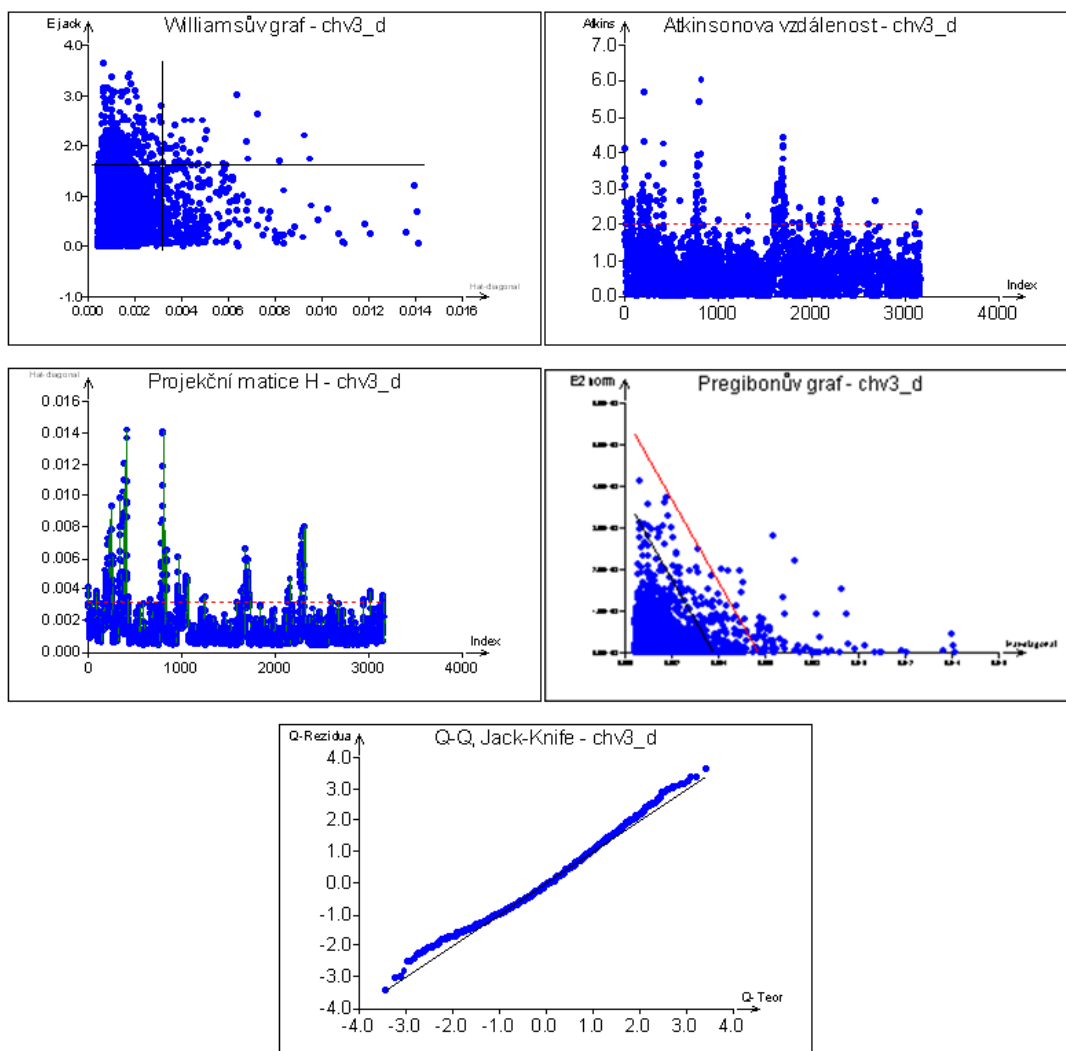
Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladící věž

Tabulka 9: Odhady parametrů pro model chv3_d

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-105,85044	4,68099087	Významný	0	-115,02853	-96,672361
Tvt	0,44909221	0,01380714	Významný	0	0,42202036	0,47616407
Tvt^2	0,00533867	0,00061372	Významný	0	0,00413534	0,00654199
Fchv3	0,00025315	1,79E-05	Významný	0	0,00021797	0,00028832
Q3	0,10974071	0,00499812	Významný	0	0,09994083	0,1195406

6.5.1. Analýza vlivných bodů

Všechny grafy k analýze vlivných bodů jsou na obr. 1918. Pomocí nich se vyhledaly extrémní a odlehlé body.

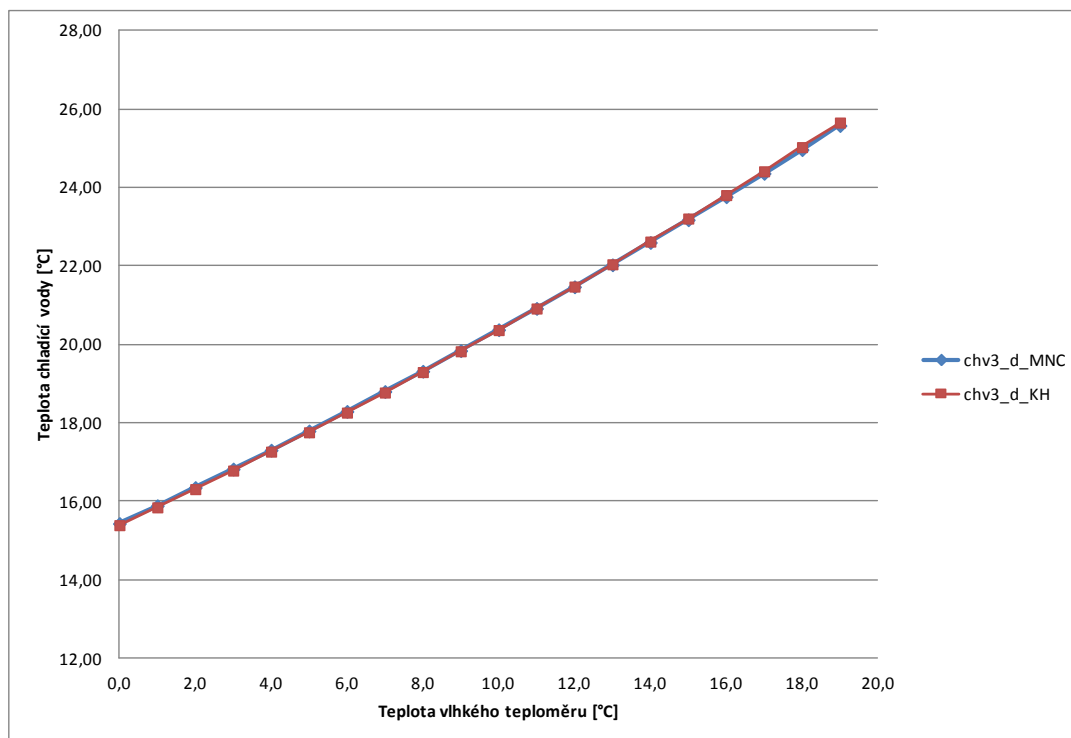


Obrázek 19: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv3_d

Celkem bylo nalezeno 359 vlivných bodů. Z toho 91 odlehlých bodů, které byly vyloučeny a poté byly znovu určeny regresní parametry.

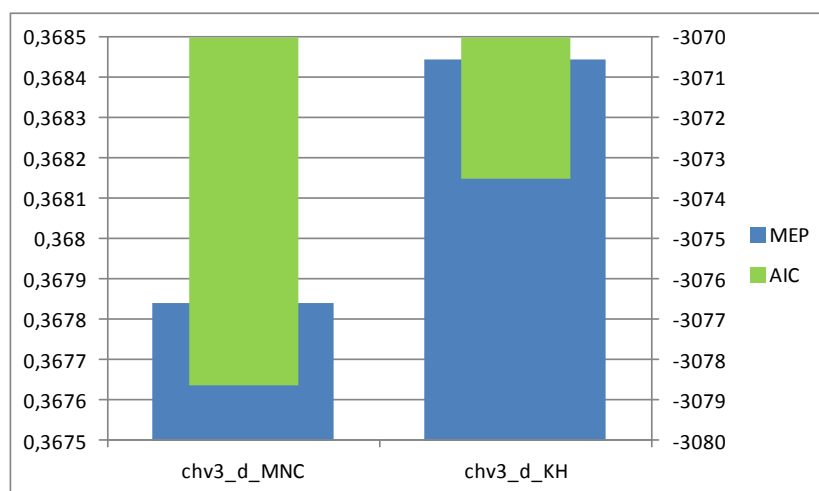
6.5.2. Zpřesněný model

Použitím metody nejmenších čtverců a korekcí hodnoty vznikly 2 regresní modely, které byly statisticky významné a fyzikálně korektní, jak je patrné z grafu 6.



Graf 6: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000t/h$ a $Q=950MW$ věž 2A

U každého z modelů byla detekována homoskedasticita, takže vytvoření modelů podle váhových funkcí nebylo zapotřebí. Oba modely jsou si velice podobné, proto je posuzují na základě koeficientů MEP a AIC. Podle očekávání vyšel lépe model vytvořený metodou nejmenších čtverců $chv3_d_MNC$, který měl nejnižší hodnoty koeficientů, jak lze vidět na grafu 7.



Graf 7: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 2A

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Proto jsem volil model chv3_d_MNC jako regresní model věže 2A. Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese jsou uvedeny v tab. 10.

Tabulka 10: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 2A

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-112,11025	4,47467151	Významný	0	-120,8839	-103,3366
Tvt	0,45003319	0,01327524	Významný	0	0,42400395	0,47606243
Tvt ²	0,00443317	0,00058491	Významný	4,57E-14	0,00328632	0,00558003
Fchv3	0,00025814	1,68E-05	Významný	0	0,0002252	0,00029108
Q3	0,11604493	0,00477001	Významný	0	0,1066922	0,12539765

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,975430213
Koeficient determinace R ² :	0,9514641
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,90500481
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,367839671
Akaikeho informační kritérium :	-3078,624665

Tvar modelu věže 2A je popsán závislostí:

$$y = -112,1103 + 0,45003 \cdot x_1 + 0,0044 \cdot x_1^2 + 0,00026 \cdot x_2 + 0,1160 \cdot x_3$$

Kde

- x_1 ... teplota vlhkého teploměru (Tvt)
- x_1^2 ... teplota vlhkého teploměru v druhé mocnině (Tvt²)
- x_2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok (Fchv)
- x_3 ... tepelné zatížení, předané teplo (Q)
- y ... teplota chladicí vody (T-out)

6.6. Chladicí věž 2B

Kombinací vstupních parametrů, které jsem zahrnul do lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců, jsem vytvořil 4 modely.

- chv4_a
- chv4_b
- chv4_c
- chv4_d

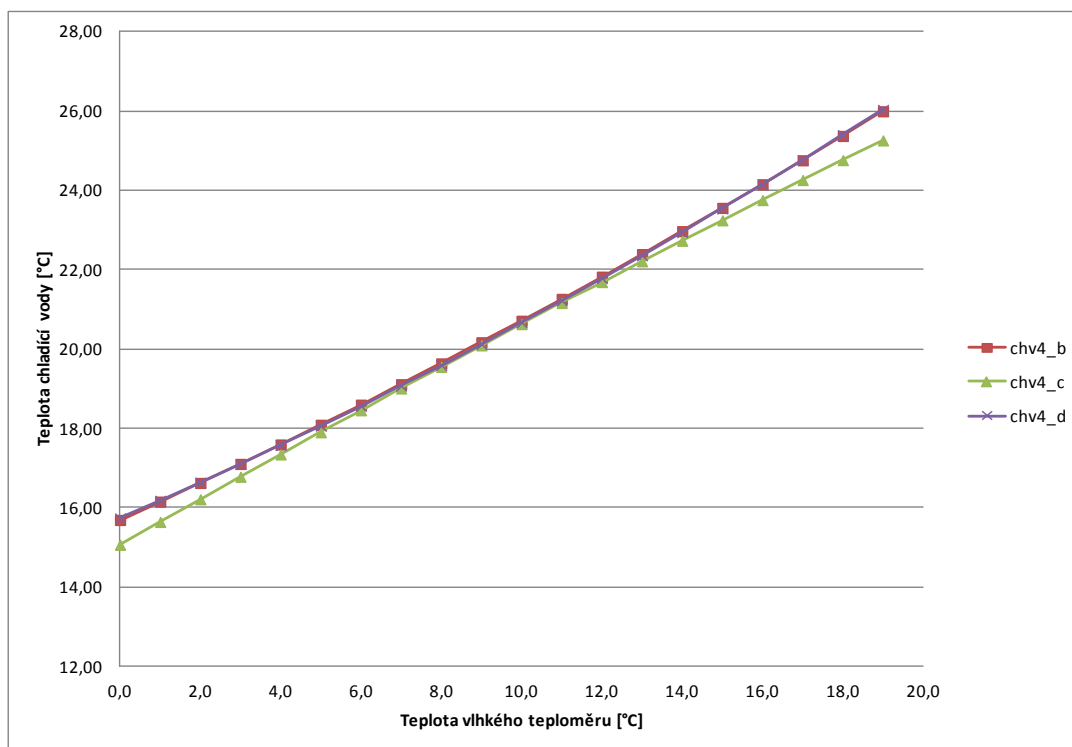
Při pokusu o vytvoření prvního modelu chv4_a byl zjištěn singulární charakter matice, model nebylo možné vůbec vytvořit. U všech zbývajících modelů byla zaznamenána multikolinearita a heteroskedasticita a jejich parametry byly statisticky významné. Odhady parametrů β_0 až β_6 jsou uvedeny v tab. 11.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 11: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 2B

model	chv4_a	chv4_b	chv4_c	chv4_d
Abs	0	185,6463856	4786,103001	-107,3749612
Tvt	0	0,45794963	0,578738719	0,440691335
Tvt ²	0	0,004456572	-0,002203343	0,00535598
Fchv1	0	-0,008497948	0,000364721	0,000365931
Fchv1 ²	0	6,73E-08		
Q1	0	0,102604289	-10,18887965	0,103771642
Q1 ²	0		0,005411585	
	singular. Mat	významný	významný	významný

Tyto odhady parametrů nám dopomohly k vytvoření rovnice pro srovnání modelů. Změnou hydraulického a tepelného zatížení se měnila poloha křivek. Z grafu 8 můžeme pozorovat různé průběhy křivek. Dle literatury a zkušeností odborníků, jsme podle tvaru křivky mohli rozpoznat, který z modelů se nechová fyzikálně korektně.



Graf 8: Vykreslení modelů pro parametry Fchv=67000t/h a Q=950MW věž 2B

Shrnutím výsledků se ukázalo, že model chv4_a měl singulární char. matice, chv4_c byl fyzikálně nekorektní a u modelu chv4_b existovala nelinearita vzhledem k průtoku chladicí vody, tentokrát se teplota s klesajícím průtokem snižovala pomaleji. Pro další práci se tedy využil model chv4_d.

Všechny parametry modelu chv4_d byly určeny jako statisticky významné a jsou uvedeny v tab. 12.

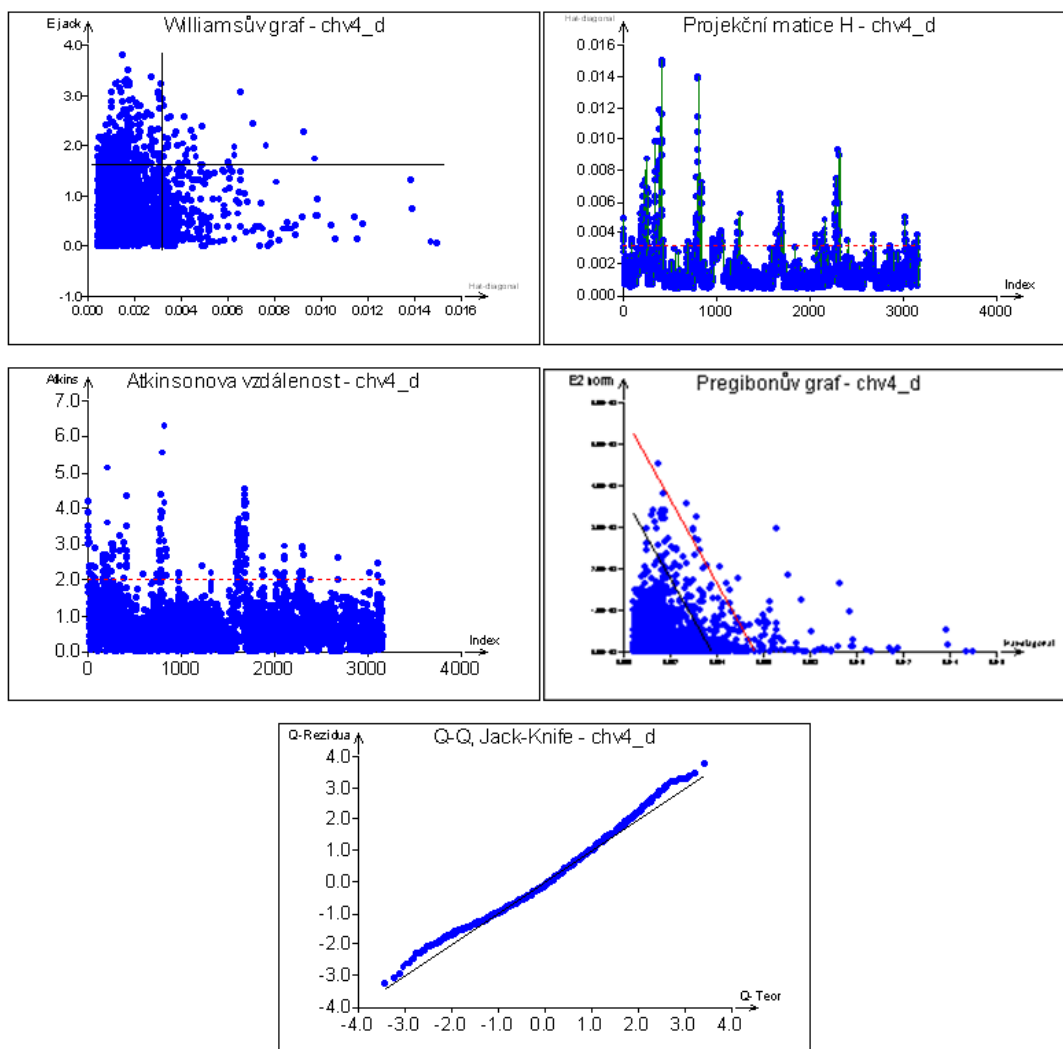
Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Tabulka 12: Odhady parametrů pro model chv4_d

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-107,37496	4,8474202	Významný	0	-116,87936	-97,870558
Tvt	0,44069134	0,01409353	Významný	0	0,41305795	0,46832472
Tvt^2	0,00535598	0,0006356	Významný	0	0,00410975	0,00660221
Fchv4	0,00036593	1,73E-05	Významný	0	0,00033205	0,00039981
Q4	0,10377164	0,00505819	Významný	0	0,09385398	0,1136893

6.6.1. Analýza vlivných bodů

Všechny grafy k analýze vlivných bodů jsou na obr. 20. Pomocí nich se vyhledaly extrémní a odlehlé body.

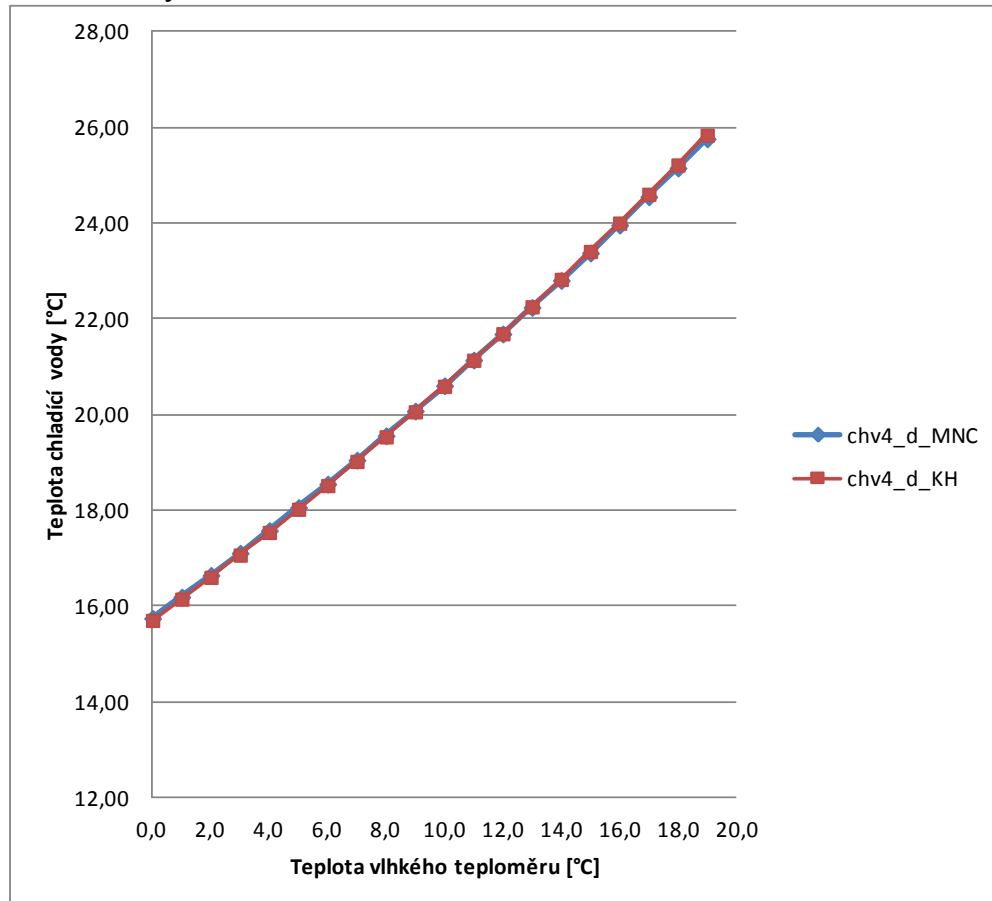


Obrázek 20: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv4_d

Celkem bylo nalezeno 376 vlivných bodů. Z toho 107 odlehlých bodů, které byly vyloučeny a poté byly znovu určeny regresní parametry.

6.6.2. Zpřesněný model

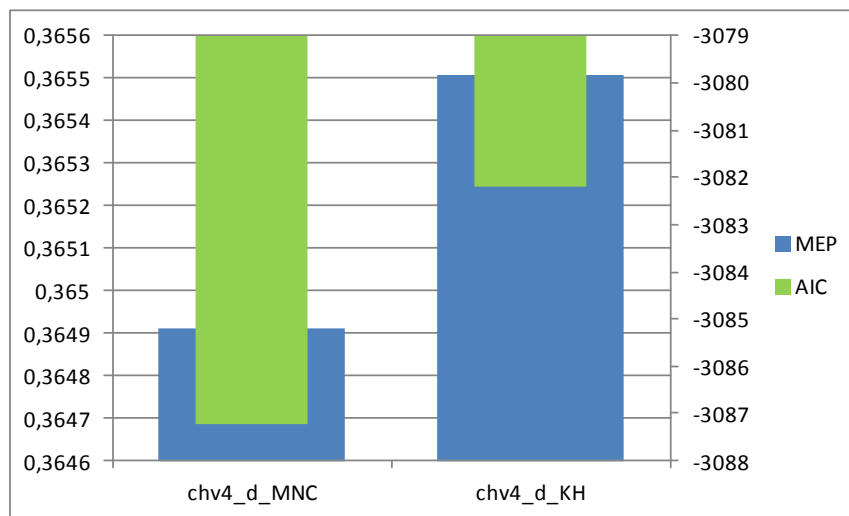
Použitím metody nejmenších čtverců a korekcí hodnotí jsem obdržel 2 regresní modely, z nichž byly statisticky významné oba. Jak je patrné z grafu 9, nebyla zjištěna žádná fyzikální nekorektnost..



Graf 9: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000t/h$ a $Q=950MW$ věž 2B

U Každého modelu byla detekována homoskedasticita, takže vytvoření modelů podle váhových funkcí nebylo zapotřebí. proto jsem je posuzoval na základě koeficientů MEP a AIC. Podle očekávání vyšel nejlépe model vytvořený metodou nejmenších čtverců chv4_d_MNC, který měl nejnižší hodnoty koeficientů, jak lze vidět na grafu 10.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž



Graf 10: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 2B

Proto jsem zvolil model chv4_d_MNC jako regresní model věže 2B. Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese jsou uvedeny v tab. 13.

Tabulka 13 :Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věž 2B

Proměnná	Odhad	Směr.Odch.	Závěr	Pravděpod.	Spodní mez	Horní mez
Abs	-111,0135	4,53261779	Významný	0	-119,90079	-102,12622
Tvt	0,44010416	0,01325664	Významný	0	0,41411133	0,46609698
Tvt^2	0,00459746	0,00059289	Významný	1,20E-14	0,00343496	0,00575997
Fchv4	0,00032743	1,60E-05	Významný	0	0,0002961	0,00035877
Q4	0,11033363	0,00470456	Významný	0	0,10110921	0,11955805

Vícenásobný korelační koeficient R :	0,975674654
Koeficient determinace R^2 :	0,95194103
Predikovaný korelační koeficient Rp :	0,905909798
Střední kvadratická chyba predikce MEP :	0,364911841
Akaikeho informační kritérium :	-3087,232741

Tvar modelu věže 2B je popsán závislostí:

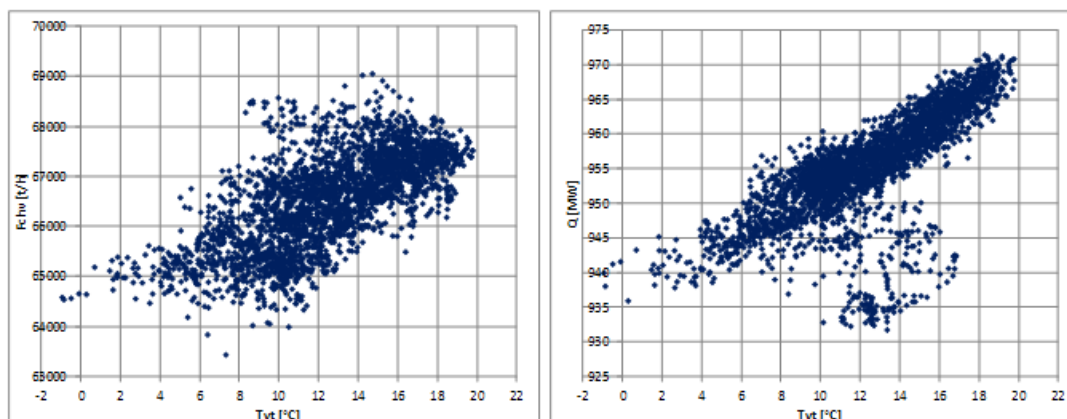
$$y = -111,0135 + 0,4401 \cdot x_1 + 0,0046 \cdot x_1^2 + 0,00033 \cdot x_2 + 0,1103 \cdot x_3$$

,kde

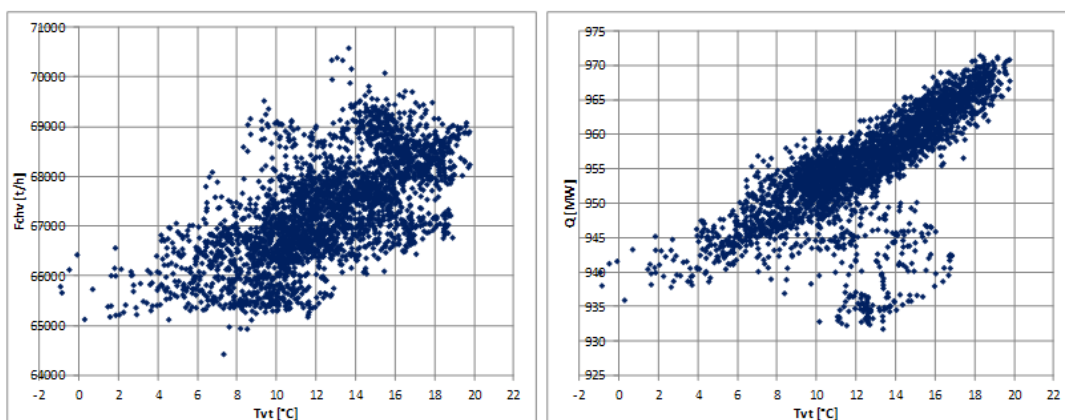
- x_1 ... teplota vlhkého teploměru (Tvt)
- x_1^2 ... teplota vlhkého teploměru v druhé mocnině (Tvt^2)
- x_2 ... hydraulické zatížení, hmotnostní průtok (Fchv)
- x_3 ... tepelné zatížení, předané teplo (Q)
- y ... teplota chladicí vody (T-out)

6.7. Porovnání modelů

Pro správnou vizualizaci modelů chladících věží byla potřeba vybrat taková data, aby mezní hodnoty dat byly dostatečně pokryty měřením. Ty jsme určili ze dvou typů grafů. Z prvního grafu lze získat interval dat, při jaké hodnotě průtoku a teplotě vlhkého teploměru má smysl použít data (graf F_{chv} - T_{vt}). Z druhého grafu získáváme interval hodnot předaného tepla a vlhkého teploměru (graf Q - T_{vt}). Takto jsme zjistili vhodné rozsahy dat u každé z věží.



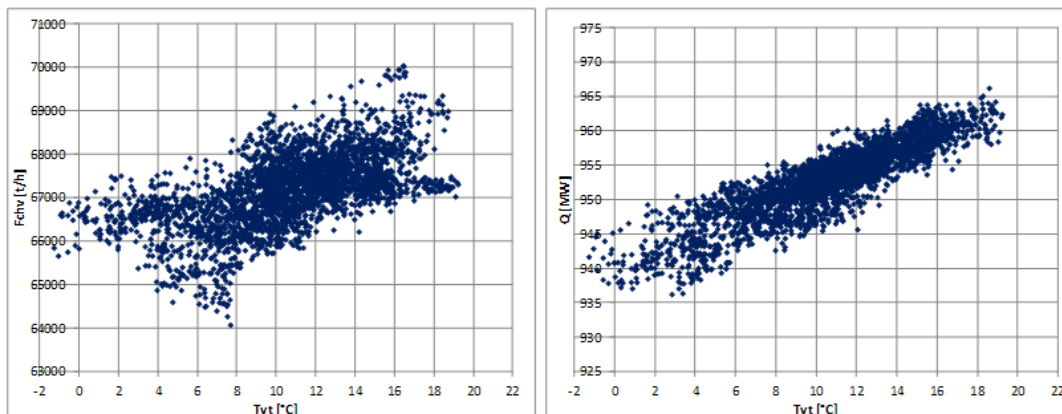
Graf 11: Rozsahy dat pro věž 1A



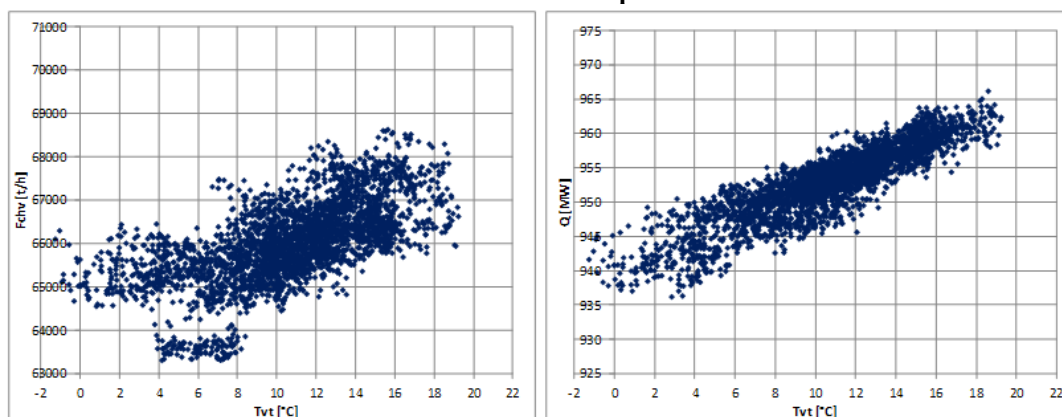
Graf 12: Rozsah dat pro věž 1B

Z grafu 11 a 12 jsme zvolili rozsah teplot vlhkého teploměru od 5 – 18 °C a to u obou věží. Vhodné rozpětí průtoku u věže 1A je 65000 – 68000 t/h a u věže 1B je 65500 – 69000 t/h. Hodnoty předaného tepla u obou se pohybují v rozsahu 940 – 965 MW.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladící věž



Graf 13: Rozsah hodnot pro věž 2A

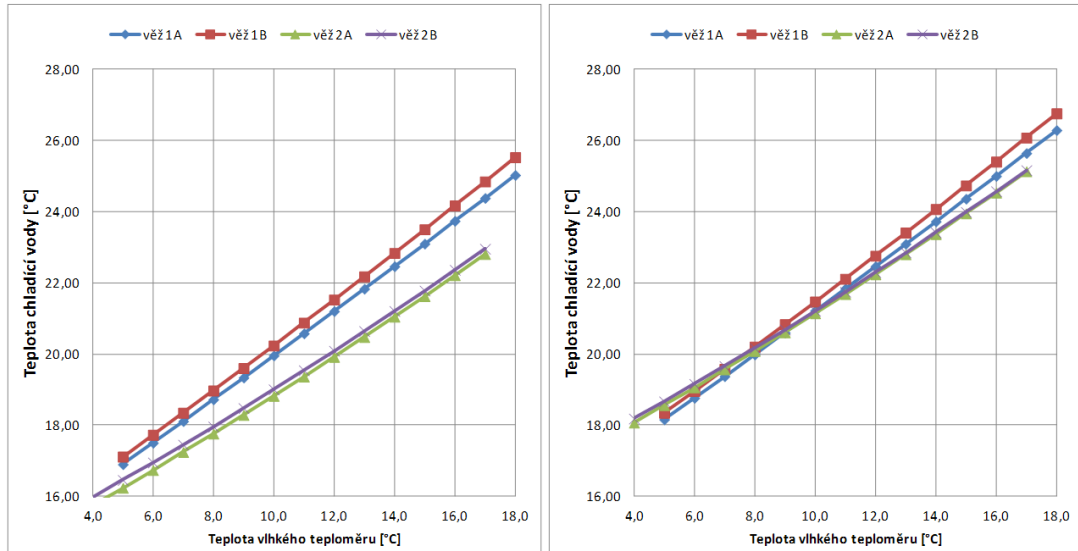
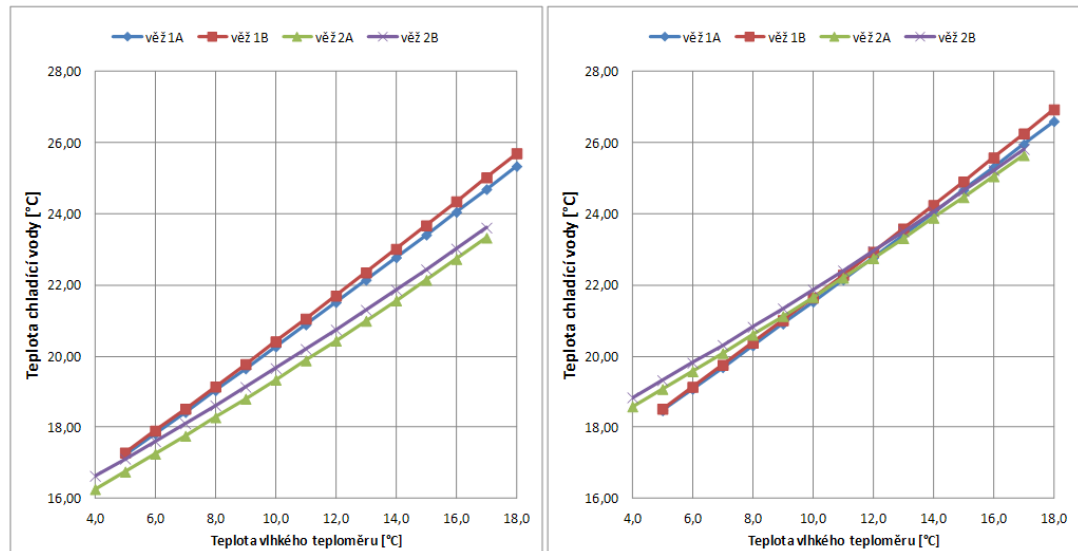


Graf 14: Rozsah hodnot pro věž 2B

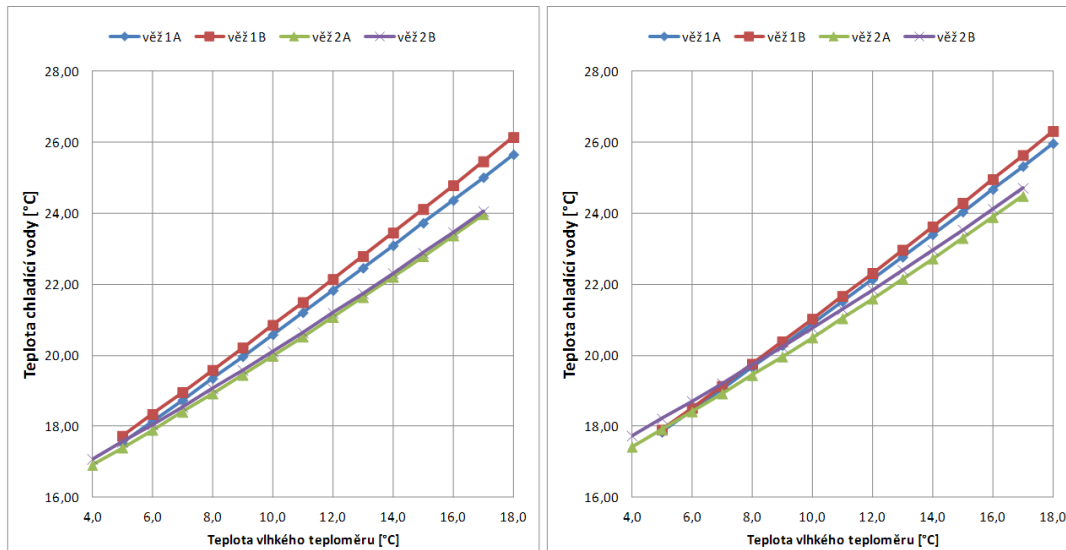
Zvolený rozsah vlhkého teploměru se pohybuje od 4 – 17 °C u obou modelů. Věž 2A má doporučený rozsah 65500 – 69000 t/h a věž 2B pak 64500 – 67500 t/h. Pro předané teplo je vhodné u modelů věží 2A a 2B zvolit rozmezí 940 – 960 MW. K volbě vhodných hodnot jsme využili grafy 13 a 14.

Jak můžeme pozorovat z grafů věže 1A a 1B se pohybují v rozmezí teplot vlhkého teploměru 5 – 18 °C, a věže 2A a 2B v rozsahu 4 – 17 °C. V grafech lze vidět simulaci chování u průtoků 65500 t/h a 67500 t/h s předaným teplem 940, 950 a 960 MW.

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Graf 15: Grafy parametrů věží pro $F=65500\text{t/h}$ a $Q=940\text{MW} / Q=960\text{MW}$ Graf 16: Grafy parametrů věží pro $F=67500\text{t/h}$ a $Q=940\text{MW} / Q=960\text{MW}$

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu - chladicí věž

Graf 17: Grafy parametrů věží pro $Q=950\text{MW}$ a $F=65500\text{t/h}$ / $F=67500\text{t/h}$

U grafů s uvedenými parametry nepozorujeme žádnou fyzikální nekorektnost. Rozdíly mezi modely jsou způsobeny několika faktory. Teplota vlhkého teploměru je měřena v jednom místě a je společná pro všechny věže, některé věže se mohou nacházet v různé vzdálenosti od měření teploty. Věže 1A a 1B jsou společně zapojeny v jiném tepelném schématu, než věže 2A a 2B. I celkově menší rozsah vstupních dat (F , Q) má nepříznivý vliv na kvalitu modelu. Změna rozsahu průtoku 65500 až 67500 t/h (= 2000 t/h) představuje 3 % z maximální hodnoty průtoku chladicí vody, změna předaného tepla od 940 do 960 MW (= 20 MW) činí pouhých 2 % z maximální hodnoty předaného tepla.

Závěr

Stanovení výkonnosti chladicího okruhu je komplexní úloha, jež může být řešena různými přístupy. Ve své práci jsem se zaměřil na nejdůležitější část chladicího okruhu – chladicí věže a pro stanovení výkonnosti jsem použil metody regresní analýzy. Hlavním ukazatelem výkonnosti věží je teplota chladicí vody na výstupu z chladících věží. Pro výpočet této teploty jsem vytvořil lineární regresní modely. Vstupem do těchto modelů byla teplota vlhkého teploměru (reprezentující stav atmosféry), průtok chladicí vody (představující hydraulické zatížení chladicí věže) a množství předaného tepla (tepelné zatížení věže).

Na základě dat, která jsem obdržel, jsem vytvořil modely pro každou ze čtyř věží technologického celku. Z výsledků lze usoudit, že nejvhodnějším modelem vytvořeným z obdržených dat byl model vytvořený z prvních mocnin všech vstupních parametrů a druhou mocninou teploty vlhkého teploměru. Obecně lze očekávat, že závislost teploty chladicí vody na průtoku chladicí vody a předaném teple je také nelineární, ale pouze parametr teploty vlhkého teploměru měl dostatečně velkou variabilitu, aby bylo možné tuto nelinearitu zachytit. Ostatní dva parametry měly variabilitu řádově menší, a proto bylo nutné obě závislosti linearizovat. S ohledem na malý rozsah obou parametrů v datech je linearizace těchto závislostí přípustná a lze předpokládat, že jsem se tímto řešením nedopustil chyby, která by mohla negativně ovlivnit výsledky. Pro přesnější určení závislosti teploty chladicí vody na průtoku chladicí vody a předaném teple by bylo nutné mít k dispozici data, u nichž tyto veličiny vykazují větší variabilitu. Druhou možností by bylo provedení fyzikálních analýz, které by však přesáhly rámec mé práce.

Vytvořené modely jednotlivých věží byly statisticky významné a z grafů závislosti teploty chladicí vody na vstupních parametrech jsem došel k závěru, že se chovají fyzikálně korektně. Lze je tedy použít pro stanovené účely, tj. hodnocení a diagnostiku chladících věží, případně i pro potřeby optimalizace provozu.

Použité informační zdroje

- [1] MIKYŠKA, Ladislav a Jaroslav ŠEBEK. *Chladicí věže: provoz a údržba*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1989, 188 s.
- [2] ČERNÝ, Václav. *Parní kotle a spalovací zařízení: vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 526, [1] s.
- [3] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie: zdroje a přeměna energie* [online]. 2006 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: www.transformacni-technologie.cz
- [4] MYPLAST S.R.O. *Technologie pro chladicí věže* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.myplast.cz/Technologie-pro-chladici-veze/>
- [5] LENTUS AGILIS, SPOL. S R.O. *Ventilátory a chladicí věže* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.lentus.cz/ventilatory/index.php?uvod>
- [6] CENIA, ČESKÁ INFORMAČNÍ AGENTURA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Pasportizace chladicích soustav v energetice ČR* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: https://www.google.cz/webhp?sourceid=chrome-instant&rlz=1C1DVCB_enCZ355CZ355&ion=1&espv=2&es_th=1&ie=UTF-8#q=Chladic%C3%AD+soustavy+zvl%C3%A1%C5%A1t%C4%9B+velk%C3%BDch+spalovac%C3%ADch+za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD+%C4%8CEZ%2C+a.+s
- [7] MELOUN, Milan. *Chemometrie I.: Jednorozměrná data* [online]. [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://meloun.upce.cz/vyuka/chemometrie-i>
- [8] MACHÁT, Zdeněk. *Tvorba lineárních regresních modelů při analýze dat*. třebíč, 2013.
- [9] MACHÁT, Zdeněk a Jiří PLISKA. *INFERENČNÍ STATISTIKA: Statistické zpracování experimentálních dat*. Třešť, 2013.
- [10] PLISKA, Jiří, Zdeněk MACHÁT, Libor VĚŽNÍK, Jiří SMÍŠEK a Vladimír BEER. *Optimalizace chladicího okruhu Jaderné elektrárny Dukovany* [online]. 2013 [cit. 2015-05-28].

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rankine - Clausiův cyklus obecné schéma	16
Obrázek 2: Řez chladicí věží	18
Obrázek 3: Rozstřikovací trysky - Myplast s.r.o	21
Obrázek 4: Eliminátory - Myplast s.r.o	21
Obrázek 5: Chladicí výplně - Myplast s.r.o	22
Obrázek 6: Ventilátor - LENTUS AGILIS, SPOL. S R.O.	23
Obrázek 7: Aspirační psychrometr	25
Obrázek 8: Bilance chladicí věže.....	27
Obrázek 9: Williamsův graf, obecný	32
Obrázek 10: Pregibonův graf, obecný	32
Obrázek 11: Rankitový graf, obecný	33
Obrázek 12: Projekční matice - H graf, obecný.....	33
Obrázek 13: Parciální regresní grafy, obecné	34
Obrázek 14: Konstantnost rozptylu	35
Obrázek 15: Schéma vstupních a výstupních parametrů	37
Obrázek 16: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv1_d	40
Obrázek 17: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv2_b	44
Všechny grafy k analýze vlivných bodů jsou na obr. 19. Pomocí nich se vyhledaly extrémní a odlehlé body.	48
Obrázek 19: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv3_d	48
Obrázek 20: Grafy použité při analýze vlivných bodů modelu chv4_d	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Norma ČSN 75 7171 pro otevřené systémy s odparem.....	24
Tabulka 2: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 1A.....	39
Tabulka 3: Odhady parametrů pro model chv1_d	40
Tabulka 4: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 1A.....	41
Tabulka 5: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 1B.....	42
Tabulka 6: Odhady parametrů pro model chv2_b	43
Tabulka 7: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 1B.....	46
Tabulka 8: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 2A.....	47
Tabulka 9: Odhady parametrů pro model chv3_d	48
Tabulka 10: Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věže 2A.....	50
Tabulka 11: Odhady parametrů pro počáteční modely věže 2B.....	51
Tabulka 12: Odhady parametrů pro model chv4_d	52
Tabulka 13 :Odhady parametrů a statistické charakteristiky regrese pro model věž 2B.....	54

Seznam grafů

Graf 1: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 1A ...	39
Graf 2: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 1B.....	43
Graf 3: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 1B.....	45
Graf 4: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 1B	45
Graf 5: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 2A ...	47
Graf 6: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 2A ...	49
Graf 7: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 2A	49
Graf 8: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 2B.....	51
Graf 9: Vykreslení modelů pro parametry $F_{chv}=67000\text{t/h}$ a $Q=950\text{MW}$ věž 2B....	53
Graf 10: Graf hodnot parametrů MEP a AIC modelu věže 2B	54
Graf 11: Rozsahy dat pro věž 1A	55
Graf 12: Rozsah dat pro věž 1B	55
Graf 13: Rozsah hodnot pro věž 2A	56
Graf 14: Rozsah hodnot pro věž 2B	56
Graf 15: Grafy parametrů věží pro $F=65500\text{t/h}$ a $Q=940\text{MW}$ / $Q=960\text{MW}$	57
Graf 16: Grafy parametrů věží pro $F=67500\text{t/h}$ a $Q=940\text{MW}$ / $Q=960\text{MW}$	57
Graf 17: Grafy parametrů věží pro $Q=950\text{MW}$ a $F=65500\text{t/h}$ / $F=67500\text{t/h}$	58