



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

**Technicko-ekonomická optimalizace řízení vlastní spotřeby**

**Technical and economic optimization of auxiliary power usage**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Ekonomika a řízení energetiky

Vedoucí práce: Ing. Martin Beneš, Ph.D.

**Bc. Petr Spálenka**

---

**Praha 2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Petr Spálenka

Studijní program: elektrotechnika, energetika a management  
Obor: ekonomika a řízení energetiky

Název tématu: Technicko-ekonomická optimalizace řízení vlastní spotřeby

Pokyny pro vypracování:

- analýza vlastní spotřeby hnědohelného bloku EPR II a určení hlavních spotřebičů z pohledu řízení technologického procesu výrobního bloku
- analýza možných alternativních způsobů regulace technologického procesu
- výběr technických a provozních parametrů potřebných pro ekonomické výpočty
- posouzení technicko-ekonomické efektivnosti jednotlivých způsobů regulace

Seznam odborné literatury:

Doležal, J., Šťastný, J., Špetlík, J., Bouček, S., Brettschneider, Z.: Jaderné a klasické elektrárny, Praha, ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04936-5  
Raval, T.N., Patel, R.N.: Optimization of Auxiliary Power Consumption of Combined Cycle Power Plant, Procedia Engineering, 2013

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Beneš, Ph.D. – ČVUT FEL, K 13116

Platnost zadání: do konce letního semestru akademického roku 2015/2016  
L.S.

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.  
vedoucí katedry

Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 4.11.2014

### **Prohlášení**

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů pro vypracování závěrečných prací, a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje“.

**V Praze dne**

**podpis**

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli, Ing. Martinu Benešovi, Ph.D., za odborné vedení mé diplomové práce. Poděkování patří také Ing. Zdeňku Vlčkovi za poskytnuté podklady a rady. Dále bych chtěl poděkovat tátovi za domluvení nejedné konzultace s odborníky a též mamce za provedenou korekturu. Velké díky patří i mé přítelkyni za její podporu v průběhu zpracování této diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato práce popisuje důležité prvky vlastní spotřeby uhelné elektrárny. Určuje největší spotřebiče v elektrárně a pro napájecí čerpadlo vypočítává nejlepší variantu regulace průtoku. Pro výpočet ekonomické efektivity různých variant regulace využívá několik možností ocenění vlastní spotřeby a také dvou různých režimů provozu elektrárny. Výsledkem je nejen výběr nejvhodnější regulace, ale také metodika výpočtu, kterou je možné aplikovat i na ostatní prvky vlastní spotřeby elektrárny.

## **Klíčová slova**

Vlastní spotřeba, regulace čerpadla, uhelná elektrárna, napájecí čerpadlo, CAPM, WACC

## **Abstract**

This thesis describes most important elements of auxiliary power consumption in coal power plant. It shows the biggest appliances in power plant it calculates the best option for water flow regulation in feed pump. This work uses several options to evaluate the cost of auxiliary electricity and two different modes of power plant operation to compute economical effectiveness. The result is not only a selection of the best flow regulation of feed pumps, but also a certain calculation methodology that can be applied to other elements of auxiliary power consumption.

## **Key words**

Auxiliary power consumption, pump regulation, coal power plant, feed pump, CAPM, WACC

# Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod.....  | 1  |
| 2     | Postavení uhelných elektráren v energetice ..... | 2  |
| 2.1   | Princip fungování uhelných elektráren .....      | 3  |
| 3     | Vlastní spotřeba.....                            | 3  |
| 4     | Kotelna .....                                    | 5  |
| 4.1   | Kotel.....                                       | 5  |
| 4.2   | Dopravníky.....                                  | 8  |
| 4.3   | Ventilátory .....                                | 9  |
| 4.3.1 | Axiální ventilátory .....                        | 11 |
| 4.3.2 | Radiální ventilátory .....                       | 12 |
| 4.3.3 | Regulace škrcením .....                          | 13 |
| 4.3.4 | Regulace otáčková .....                          | 13 |
| 4.3.5 | Regulace natáčením oběžných lopatek .....        | 14 |
| 4.3.6 | Regulace natáčením lopatek v sání .....          | 15 |
| 4.3.7 | Vzduchový ventilátor .....                       | 16 |
| 4.3.8 | Kouřový ventilátor .....                         | 17 |
| 4.3.9 | Recirkulační ventilátor .....                    | 17 |
| 4.4   | Mlýny .....                                      | 17 |
| 5     | Strojovna .....                                  | 18 |
| 5.1   | Čerpadla .....                                   | 18 |
| 5.1.1 | Regulace obtoková .....                          | 22 |
| 5.1.2 | Regulace škrcením .....                          | 22 |
| 5.1.3 | Regulace otáčková .....                          | 23 |
| 5.1.4 | Regulace natáčením lopatek.....                  | 23 |
| 5.1.5 | Napájecí čerpadlo.....                           | 24 |
| 5.1.6 | Kondenzátní čerpadlo.....                        | 24 |
| 5.1.7 | Bagrovací čerpadlo.....                          | 25 |
| 5.1.8 | Čerpadlo chladící vody .....                     | 25 |
| 5.1.9 | Ostatní čerpadla.....                            | 25 |
| 6     | Elektrické pohony ve vlastní spotřebě .....      | 25 |
| 6.1   | Stejnoseměrné stroje .....                       | 26 |
| 6.2   | Asynchronní stroje .....                         | 27 |
| 6.3   | Synchronní stroje .....                          | 28 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 7    | Popis bloku EPR II.....                        | 29 |
| 8    | Analýza vlastní spotřeby bloku EPR II.....     | 30 |
| 8.1  | Výpočet příkonu vybraných spotřebičů .....     | 30 |
| 8.2  | Porovnání příkonu prvků vlastní spotřeby ..... | 33 |
| 9    | Návrh regulace napájecího čerpadla .....       | 35 |
| 9.1  | Regulace 1 - Škrčení .....                     | 36 |
| 9.2  | Regulace 2 - Olejová spojka .....              | 37 |
| 9.3  | Regulace 3 - Turbonapajčka.....                | 40 |
| 9.4  | Regulace 4 - Elektronapajčka.....              | 41 |
| 9.5  | Vstupní parametry.....                         | 43 |
| 9.6  | Výpočty.....                                   | 46 |
| 9.7  | Výsledky .....                                 | 47 |
| 10   | Ekonomické analýzy .....                       | 49 |
| 10.1 | Výnosnost vlastního kapitálu .....             | 49 |
| 10.2 | WACC.....                                      | 51 |
| 10.3 | Cena elektrické energie.....                   | 52 |
| 10.4 | Provoz bloku .....                             | 57 |
| 10.5 | Předpoklady modelu.....                        | 58 |
| 11   | Výsledky .....                                 | 59 |
| 11.1 | Ocenění 1 - burza .....                        | 59 |
| 11.2 | Ocenění 2 - náklady výroby .....               | 60 |
| 11.3 | Ocenění 3 - marginální náklady .....           | 62 |
| 12   | Citlivostní analýzy .....                      | 63 |
| 13   | Závěr .....                                    | 67 |
| 14   | Citovaná literatura.....                       | 69 |
| 15   | Přílohy.....                                   | 73 |

## Seznam zkratek

|           |  |
|-----------|--|
| BREF LCP  | Best Available Techniques Reference Document Large Combustion Plants |
| CAPM      | Capital asset pricing model  |
| EGP, a.s. | Energoprojekt Praha a.s.   |
| EIA       | Environmental impact assessment                                      |
| EPR II    | Elektrárna Pruněrov II   |
| FM        | Frekvenční měnič   |
| FVE       | Fotovoltaická elektrárna   |
| IGBT      | Insulated gate bipolar tranzistor                                    |
| KO EPR II | Komplexní obnova elektrárny Pruněrov II                              |
| MRP       | Market risk premium  |
| NČ        | Napájecí čerpadlo  |
| NPV       | Net present value  |
| PXE       | Power Exchange Central Europe  |
| S&P       | Standard & Poor's  |
| ST        | Středotlaký  |
| VT        | Vysokotlaký  |
| VTO       | Vysokotlaký ohřívač  |
| WACC      | Weighted Average Cost of Capital                                     |

## Seznam jednotek

|                 |                           |
|-----------------|---------------------------|
| °C              | Celsiův stupeň            |
| dB              | Decibel                   |
| Hz              | Herz                      |
| kg              | Kilogram                  |
| kPa             | Kilopascal                |
| kW              | Kilowatt                  |
| m <sup>2</sup>  | Čtvereční metr            |
| m <sup>3</sup>  | Krychlový metr            |
| mg              | Miligram                  |
| min             | Minuta                    |
| MJ              | Megajoule                 |
| mm              | Milimetr                  |
| MPa             | Megapascal                |
| MW              | Megawatt                  |
| MWh             | Megawatthodiny            |
| Nm <sup>3</sup> | Normativní krychlový metr |
| ot              | Otáčky                    |
| s               | Sekunda                   |
| t               | Tuna                      |
| V               | Volt                      |



## Seznam použitých symbolů

|            |                      |                                  |
|------------|----------------------|----------------------------------|
| $\lambda$  | [-]                  | Součinitel tření                 |
| $\Delta p$ | [kPa]                | Celkové tlakové navýšení         |
| $A_d$      | [%]                  | Poměrné množství hořlaviny       |
| $A_r$      | [%]                  | Poměrné množství popeloviny      |
| $c$        | [m/s]                | Rychlost proudění kapaliny       |
| $d$        | [m]                  | Poloměr potrubí                  |
| $D$        | [Kč]                 | Dluh                             |
| $E$        | [Kč]                 | Vlastní jmění                    |
| $g$        | [kg/s <sup>2</sup> ] | Gravitační zrychlení             |
| $H$        | [m]                  | Dopravní výška                   |
| $l$        | [m]                  | Délka potrubí                    |
| $p$        | [Pa]                 | Tlak                             |
| $P_{ven}$  | [kW]                 | Příkon ventilátoru               |
| $Q_{ir}$   | [MJ/kg]              | Výhřevnost paliva                |
| $Q_m$      | [kg/s]               | Hmotnostní průtok                |
| $Q_v$      | [m <sup>3</sup> /s]  | Objemový průtok                  |
| $r_c$      | [-]                  | Náklad cizího kapitálu           |
| $r_e$      | [-]                  | Náklad vlastního kapitálu        |
| $r_f$      | [-]                  | Bezriziková úroková míra         |
| $r_m$      | [-]                  | Přirážka trhu                    |
| $S$        | [m <sup>2</sup> ]    | Plocha                           |
| $S_r$      | [%]                  | Poměrné množství síry            |
| $U_n$      | [V]                  | Napájecí napětí                  |
| $w$        | [m/s]                | Rychlost proudění vzduchu        |
| $W_{tr}$   | [%]                  | Poměrné množství vody            |
| $Y$        | [J/kg]               | Měrná energie kapaliny           |
| $\alpha$   | [-]                  | Přebytek vzduchu ve spalínách    |
| $\beta$    | [-]                  | Faktor systematického rizika     |
| $\eta_m$   | [-]                  | Mechanická účinnost              |
| $\xi$      | [-]                  | Součinitel místní tlakové ztráty |
| $\rho$     | [kg/m <sup>3</sup> ] | Hustota                          |

# 1 Úvod

Komponenty vlastní spotřeby elektráren hrají důležitou roli v jejich spolehlivém a hospodárném provozu, a proto je velmi důležitý jejich návrh a výběr. S růstem jednotkových výkonů bloků se zvyšují i nároky na jednotlivá zařízení a stejně tak rostou i požadavky společnosti na kvalitu dodávek elektrické energie. Výpadek zařízení v důležitém bodě technologického procesu výroby elektrické energie tak může mít za následek odstavení celé elektrárny. To následně může vést k ekonomickým ztrátám jak na straně výrobce, tak k národohospodářským ztrátám na straně spotřeby.

Návrh strojních zařízení se musí provádět souběžně s návrhem elektrického pohonu a jeho řízení. Pro regulaci ventilátorů a čerpadel je totiž možné využít jak regulací v rámci strojní části, tak regulaci otáčkami elektropohonu. Tyto regulace se musí navrhovat s ohledem na ekonomickou návratnost investice.

Vlastní spotřeba se navrhuje i s ohledem na podobu provozu. Pokud blok bude často regulovat svůj výkon, ekonomické rozdíly mezi jednotlivými variantami regulace budou značné. Pokud však blok bude provozován po většinu času na jmenovitý výkon a bude regulovat jen minimálně, rozdíly v ekonomických výsledcích různých variant nebudou tak významné. Proto je nutné už před návrhem projektu vědět, jaká bude doba využití maxima elektrárenského bloku.

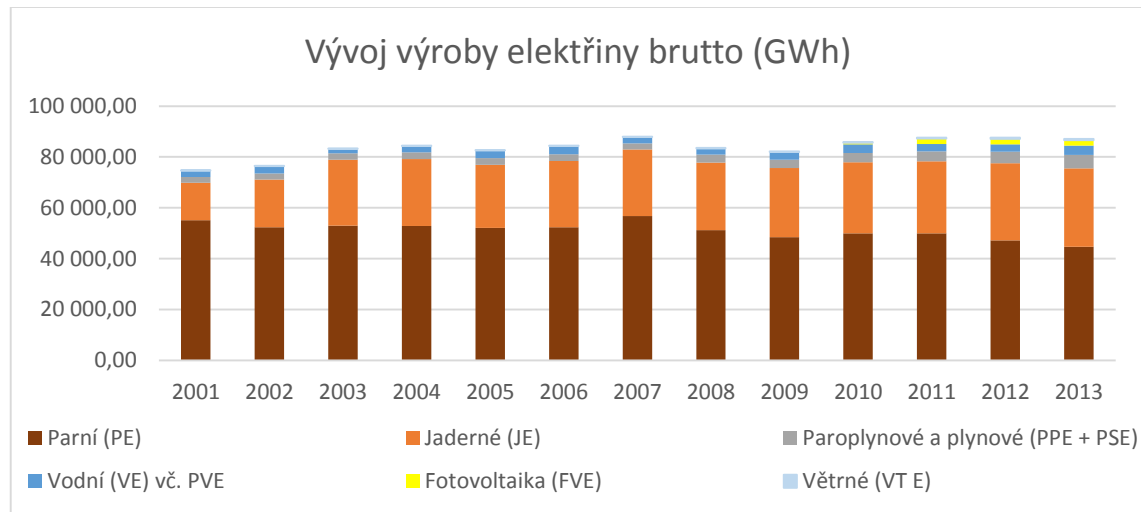
Důležitým parametrem pro výpočet je i ocenění elektřiny, která je potřeba na napájení vlastní spotřeby. Jak bude ukázáno později v práci, provozní náklady nejvíce ovlivňují volbu neekonomičtější varianty a ty úzce souvisí s oceněním odebírané elektřiny.

V této práci se tedy zaměřím na popis důležitých zařízení ve vlastní spotřebě modernizované uhelné elektrárny Pruněřov II. Provedu výpočty potřebného mechanického výkonu pro vybrané prvky vlastní spotřeby a pro napájecí čerpadla provedu výpočty nejvhodnější regulace v závislosti na využití elektrárny a ceně elektrické energie.

Cílem práce je tedy nejen určit nejvhodnější regulaci napájecího čerpadla, ale také ukázat, jakou metodiku by bylo možné využít i pro ostatní prvky vlastní spotřeby.

## 2 Postavení uhelných elektráren v energetice

Uhelná elektrárna je v dnešním světě stále ještě nejpoužívanější zdroj výroby elektrické energie. V České republice je z celkového instalovaného výkonu 21 079 MW k 31. 12. 2013 celých 10 819 MW právě v uhelných zdrojích [1]. Ačkoli je instalovaný výkon v posledních 10 letech téměř konstantní, výroba z uhelných zdrojů se snižuje.



Obrázek 2.1 Vývoj výroby elektřiny brutto [1]

K útlumu výroby uhelných elektráren přispěly tři hlavní faktory. Prvním z nich je zvýšená výroba jaderných zdrojů. V letech 2002 a 2003 došlo ke spuštění 1. a 2. jaderného bloku elektrárny Temelín, což i podle grafu ovlivnilo množství elektrické energie vyrobené z uhlí. Druhým faktorem byla ekonomická krize. Ta vedla ke snížení vyrobené elektrické energie v roce 2008 o 5 000 GWh oproti předchozímu roku. Snížení bylo plně kompenzováno snížením výroby z uhelných zdrojů [1]. Posledním podstatným vlivem byl solární boom. Díky vysokému instalovanému výkonu fotovoltaických elektráren (dále jen „FVE“) 2 132 MW [1] a přednostnímu výkupu dotované elektrické energie, uhelné elektrárny dále ustupují do pozadí. Mezi roky 2007 a 2013 snížily výrobu o 12 000 GWh.

Další vývoj uhelných zdrojů je těžké predikovat v situaci, ve které se energetika ČR nachází, a to jak ve vztahu k FVE, tak ve vztahu k nařízením EU. Podle dokumentu o nejlepších dostupných technikách pro velká spalovací zařízení (BREF LCP), na jehož aktualizaci se od roku 2011 pracuje, má vyjít nařízení Evropské komise závazné pro všechny členské státy EU. Podle prvního návrhu revize z června 2013 by však emisními parametry nevyhovoval žádný z evropských uhelných bloků a dokonce ani jedna z nejmodernějších paroplynových elektráren, nacházející se v německém Irschingu, která se chlubí rekordní tepelnou účinností

60,75 % [2]. Dokument má k finální verzi ještě daleko, přesto stihl jeho návrh vyvolat vlnu nejistoty v evropské energetice.

## **2.1 Princip fungování uhelných elektráren**

Uhelné elektrárny využívají jako paliva buď černé, nebo hnědé uhlí. Přes všechny nedostatky je však ve většině případů využíváno hnědé uhlí. Nevýhodou hnědého uhlí, konkrétně lignitu, který se využívá k energetickým účelům, je jeho malá výhřevnost (cca. 11-13 MJ/kg oproti 18-30 MJ/kg běžného černého uhlí), menší podíl uhlíku a vyšší podíl popelovin. Výhodnou je že povrchová těžba vychází levněji než důlní těžba uhlí černého. Palivo je tak u hnědouhelných elektráren levnější a provozní náklady jsou nižší.

Hlavními surovinami pro výrobu elektrické energie v uhelné elektrárně jsou uhlí a voda. Uhlí je ze skládky přes pásový dopravník přivedeno do uhelného mlýnu, kde je rozemleto na malé částičky. Následně je přivedeno do kotle, kde při vysoké teplotě shoří. Kotel obsahuje soubor mnoha tisíc vodovodních trubek, kde je vodě předáváno teplo ze spalování a voda se tak mění v páru. Ta dále pokračuje přes přehřívák páry potrubím až na lopatky vysokotlakého dílu turbíny. Pára předá část své kinetické energie a tím roztočí turbínu. Pro zvýšení účinnosti pára prochází přehřívákem a pokračuje na středotlaký nebo nízkotlaký díl turbíny. Zde předá zbývající využitelnou energii a postupuje do kondenzátoru. V něm přechází zpět do kapalného skupenství ochlazením chladicí kapalinou a je hnána čerpadly znovu do kotle. Spojením hřídele turbíny a generátoru, se rotačním pohybem generuje elektrický proud, který je následně vyváděn z elektrárny do sítě. Pro lepší účinnost celého cyklu se využívá regeneračního ohřevu napájecí vody. Ten spočívá v odvedení části páry, než projde celým tělesem turbíny. Tato pára s vysokou teplotou a energií přes systém tepelných výměníků ohřívá vodu vycházející z kondenzátoru. Teplota napájecí vody jdoucí do kotle se tímto způsobem zvýší a celý cyklus má tak ještě vyšší účinnost a k tomu i menší spotřebu paliva. Nevýhodou je, že regeneračním ohřevem, dojde ke snížení využitelného elektrického výkonu elektrárny, jelikož celý objem vyrobené páry neprojde všemi tělesy turbíny.

## **3 Vlastní spotřeba**

Vlastní spotřeba elektrárny slouží k zajištění procesu výroby elektrické energie. Zařízení vlastní spotřeby se starají o cirkulaci vody, dopravu paliva, odvod kouře a spalín a v neposlední řadě

také o mletí paliva. Většina těchto točivých zařízení je poháněná elektromotory. Struktura vlastní spotřeby je uvedena níže v tabulce.

| <b>Provoz</b>                   | <b>Energetické nároky (%)</b> |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Zauhlování                      | 0,15                          |
| Mlýny paliva                    | 2                             |
| Vzduchový ventilátor            | 1                             |
| Kouřový ventilátor              | 1,1                           |
| Napájecí čerpadlo               | 2,4                           |
| Chladicí čerpadlo               | 2,4                           |
| Odstruskování                   | 0,08                          |
| Společná spotřeba               | 2                             |
| <b>Celková vlastní spotřeba</b> | <b>11,13</b>                  |

Tabulka 3.1 Energetické nároky vlastní spotřeby [3]

Z tabulky vyplývá, že pro obecnou uhelnou elektrárnu jsou největšími spotřebiči ve vlastní spotřebě čerpadla, následovaná mlýny a ventilátory. Celková vlastní spotřeba se pohybuje okolo 11 % z vyrobené energie. V případě modernizovaných bloků elektrárny Pruněřov (dále jen „EPR II“) dosahuje vlastní spotřeba 24,5 MW z instalovaného výkonu bloku 250 MW, což činí 9,8 %.

K zajištění napájení spotřebičů vlastní spotřeby slouží několik energetických zařízení, která takto zajišťují vyšší bezpečnost dodávky elektrické energie. První z nich je najížděcí zdroj, který se využívá při najíždění elektrárny ze studeného stavu. Tímto zdrojem je elektrizační soustava, která přes záložní nebo odbočkový a blokový transformátor dodá elektrickou energii potřebnou pro start elektrárny. Stejným způsobem může být elektrická energie dodána i z diesel generátorů nebo blízké vodní elektrárny. Při provozu elektrárny už nemusí být elektrická energie pro vlastní spotřebu odebírána ze soustavy, elektrárna si ji vyrobí sama. Elektrická energie pro vlastní spotřebu tak z generátoru jde přímo do odbočkového transformátoru. Pokud by při provozu elektrárny došlo k poruše např. na odbočkovém transformátoru, je možné elektrárnu napájet z nouzového zdroje. Tím je akumulátorová baterie se střídačem, popřípadě diesel generátor. Nejdůležitější spotřebiče nutné pro odstavení elektrárny jsou napájeny přímo z baterií. Jde hlavně o ovládací a měřicí prvky elektrárny, důležité elektropohony, blokovou dozornu a nouzové osvětlení. Akumulátorové baterie jsou dimenzovány na provoz jen několika málo hodin, proto je potřeba v této době buď obnovit dodávku elektrické energie ze sítě, nebo najet zdroje záložní např. diesel generátory. Ve většině případů však dochází k odstavení elektrárny.

Vlastní spotřebu můžeme dělit do několika bloků. Zařízení, která zajišťují provoz kotelny, zařízení zajišťující provoz strojovny a pomocné provozy.

## 4 Kotelna

Jak již název napovídá, jedná se o budovu, v níž se nachází jeden nebo více kotlů. Sem je palivo přiváděno ze skládky paliva dopravníkem až do zásobníku paliva. Ze skládky může být palivo navlhle, proto pokračuje podavačem do sušící šachty, kde je horkým vzduchem z kotle zbaveno nadbytečné vlhkosti. Samospádem padá do uhelných mlýnů, které uhlí semelou na prášek. Před samotným vstupem do kotle uhelný prášek projde ještě třídící šachtou, kde jsou odloučeny příliš velké částice, které se vrací zpět do mlýnů. Mletí uhlí se provádí hlavně z důvodu menší kvality energetického uhlí. Jeho rozemletí vede k lepšímu spalování. Palivo je následně hnáno do samotného kotle. Zde je spáleno a předává tepelnou energii vodě. Spaliny jsou poté hnány spalínovým ventilátorem do komína. Během této cesty, nebo v průběhu spalování je nutné zajistit, aby do ovzduší nebyly vypouštěny toxické látky. Hlavním problémem jsou plyny  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{CO}$ . Na jejich vypouštění jsou stanoveny limity. Maximum pro  $\text{SO}_2$  je  $500 \text{ mg/Nm}^3$ ,  $\text{NO}_x$   $650 \text{ mg/Nm}^3$  a  $\text{CO}$  smí být vypuštěno  $250 \text{ mg/Nm}^3$ . Těmto limitům se musí přizpůsobit i výběr typu kotle a jeho parametrů.

### 4.1 Kotel

Parní kotel se skládá ze soustavy tepelných výměníků, které zajišťují přenos tepla ze spalování a spalín na kapalinu, páru a vzduch. Parní kotel slouží k vyvíjení vodní páry. První částí kotle jsou hořáky nebo spalovací rošt. Do nich je přiváděno palivo z mlýnů (pokud je potřeba upravit hrubost) s primárním vzduchem. Okolo jsou ještě vyvedeny přívody sekundárního vzduchu, který zajišťuje optimální poměr kyslíku v reakci. Hořáky jsou v kotli umístěny v daných geometrických uspořádáních. Pro potřeby najíždění a udržování kotle při nízkém výkonu je kotel vybaven pomocnými hořáky na ušlechtilá paliva (většinou zemní plyn).

Vzduch využívaný ke spalování je nasáván vzduchovým ventilátorem z prostoru stropu kotelny a z vnějšího prostředí. V části kotle, kde je umístěn regenerační ohřívák vzduchu, je přiváděný vzduch ohříván spalínami na vyšší teplotu. Část tohoto vzduchu je následně vedena do mlýnů spolu s palivem a označuje se jako primární vzduch. Další část vzduchu vede přímo k hořákům a nazývá se sekundární vzduch [4].

Spaliny vznikající hořením jsou konvekcí vedeny svisle vzhůru, procházejí výparníkem, přehřívákem páry, následně jsou otočeny a proudí dolů přes přihřívák a ohřívák napájecí vody až do regeneračního ohříváku vzduchu.

Výparník se nachází v nejnižší části kotle, kde dochází k hoření paliva. Spaliny zde mají nejvyšší tepelnou energii, kterou předávají napájecí vodě. Ta zde mění skupenství a putuje do přehříváku. U nemodernizovaných bloků EPR II se voda z parametrů 245 °C a 16,2 MPa mění ve vodní páru s parametry 540 °C a 13,2 MPa. Pokud se jedná o bubnový kotel, je nad výparníkem umístěn buben, který slouží jako separátor vody a páry. Pára dále putuje do přehříváku, který odstraní zbylou vlhkost.

Přehřívák je součástí tlakového systému kotle, kde dochází k předávání tepla ze spalin vodní páře, která byla vytvořena v nižších částech kotle. Provedena je teplosměnnými trubkami o velké ploše (tisíce tenkých trubiček protékaných párou). Pro ilustraci přehřívák páry použitý ve starém bloku EPR II měl teplosměnnou plochu 9 905 m<sup>2</sup>. V obvyklých případech dochází ke zvýšení teploty o 5 °C nad teplotu páry z výparníku.

Další komponentou kotle je mezipřehřívák nebo jen přihřívák páry. Ten ohřívá páru, která prošla vysokotlakým dílem turbíny a vrací se zpět do kotle. Do přihříváku přichází s parametry okolo 325 °C a 2,72 MPa a odchází s parametry 540 °C a 2,45 MPa do středotlakého nebo rovnou nízkotlakého dílu turbíny. Přehřívák EPR II měl před modernizací v jednom kotli teplosměnnou plochu 7 844 m<sup>2</sup>.

Posledním místem, při cestě spalin kotle, je ohřívák vody neboli ekonomizér. Ten zajišťuje poslední ohřátí vody před vstupem do kotle. Vzhledem k jeho poloze je ohříván pouze spalinami o relativně nízké teplotě a tak musí mít několikrát větší teplosměnnou plochu než ostatní části kotle. V rámci EPR II to bylo 18 972 m<sup>2</sup>.

Spaliny dále vycházejí ven z kotle a pokračují do elektrostatického odlučovače, kde jsou zbaveny pevných nespálených částic – popílku a poté jsou kouřovým ventilátorem vháněny do komína.

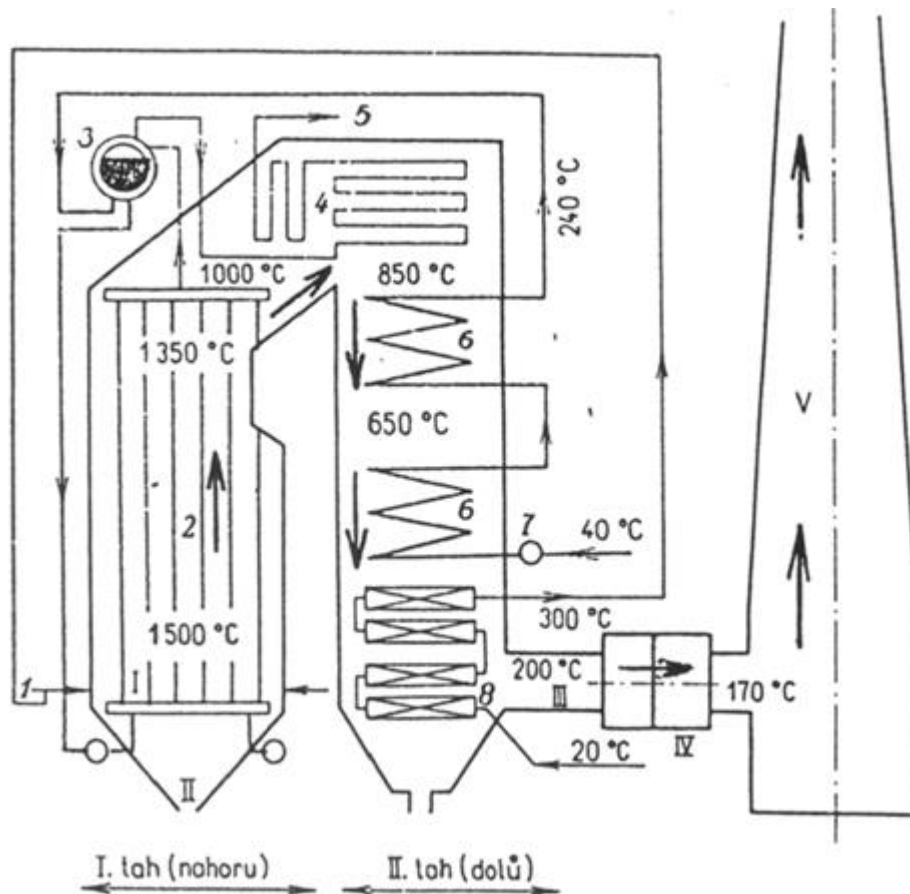
Existuje několik druhů kotlů. Ty nejméně výkonné a historicky nejstarší jsou roštové. Zde palivo z dopravníku padá na rošt, kde několik minut hoří. Ze spodu je přiváděn primární vzduch. Aby palivo roštem nepropadlo, musí mít danou minimální velikost. Z tohoto důvodu tento typ kotle nepotřebuje mlýny a odpadá nemalá položka vlastní spotřeby. Stejně tak není potřebná další úprava paliva jako sušení, či odplyňování. Dnes se tento kotel využívá hlavně ve starších

lokálních výtopnách. Nevýhodou těchto kotlů je velká ztráta mechanickým nedopalem a propadávání nevyhořelého paliva roštem [5].

Nejpoužívanějším druhem kotlů v ČR jsou kotle práškové. Jako palivo se využívá uhelný prach. Uhlí je semleto mlýny na částice o velikosti okolo 1 mm. Tím se až stonásobně zvýší měrný objem paliva a dochází k intenzivnějšímu spalování [5]. U práškových kotlů rozeznáváme ještě dva typy, granulační a výtavné. Granulační kotle se provozují při nižších teplotách spalování do 1 500 °C, aby nemohlo dojít k tečení popela. Ten se natavuje a shlukuje ve škváru, která padá do nižších částí kotle tzv. výsypky, odkud je odváděna mimo kotel. Tento typ kotlů je vhodný pro méně kvalitní druhy paliv a oproti výtavným mají i vyšší regulační schopnosti [5]. Výtavný kotel už podle názvu musí při spalování překročit teplotu tečení popela. Struska je z kotle odváděna v tekutém stavu. To znamená, že v dolní části kotle, kam struska stéká, musí být zajištěna vysoká teplota, aby nedošlo k jejímu zatuhnutí. V horní části kotle naopak musí být zaručeno, že se struska nebude lepit na stěny kotle a snižovat tak jeho účinnost. Velkou výhodou výtavných kotlů, je malý obsah popelovin ve spalinách. Ve formě tekuté strusky se zachytí až 70 % popelovin [5]. Nevýhodou je potřeba kvalitního paliva, které zaručí vysokoteplotní spalování.

Posledním typem kotle je fluidní kotel. V tomto kotli je palivo spalováno ve fluidní vrstvě. Tato vrstva je složena z hořícího paliva a popela a chová se jako tekutina [6]. U fluidních kotlů s cirkulující fluidní vrstvou je dnem ohniště přiváděn primární vzduch v podstechiometrickém množství [5]. Nad ním je přívod sekundárního vzduchu. Sekundární vzduch udržuje fluidní vrstvu v optimálním prostoru pro hoření a zároveň se stará o správný přísun kyslíku pro dohořívání paliva. Spalování probíhá po celé výšce nádoby spalovací komory a je ohraničeno až cyklonem [4]. V tomto zařízení dochází k oddělení zbytků paliva s aditivem a popelem, tyto putují zpět do spodní části kotle a na spaliny s jemným popílkem, které odcházejí do teplosměnných ploch a dále do odlučovače prachu. Přidáním aditiva dochází k výraznému omezení produkce SO<sub>x</sub>, v některých případech až o 95 % [5]. Tyto kotle jsou schopné spalovat i velmi nekvalitní paliva jako lignit nebo biomasu a to při nízké teplotě okolo 860 °C [4]. Nízkou teplotou spalování je dosaženo redukce emisí NO<sub>x</sub> [5]. Tyto kotle nevyžadují takovou jemnost mletí jako kotle práškové. Velikost uhelných zrn může být 0 až 10 mm [4]. Jelikož tyto kotle nepotřebují takovou úpravu paliva, uspoří se zde na vlastní spotřebě. Tato úspora je zčásti vyrovnávána vyšší spotřebou vzduchových ventilátorů [4].





Obrázek 4.1 Schéma práškového kotle [7]

- |                         |                 |                       |
|-------------------------|-----------------|-----------------------|
| I – ohniště             | 1 – hořáky      | 6 – ekonomizér        |
| II – výpust strusky     | 2 – výparník    | 7 – napájecí čerpadlo |
| III – sopouch           | 3 – buben       | 8 – ohřívák vzduchu   |
| IV – odlučovače popílku | 4 – přehřívák   |                       |
| V – komín               | 5 – výstup páry |                       |

Na obrázku 4.1 je znázorněno zjednodušené schéma dvoutahového práškového kotle. V prvním tahu s nejvyšší teplotou spalin je umístěn výparník, nad ním je umístěn buben. Ve druhém tahu je shora přehřívák, ekonomizér a ohřívák vzduchu. Jednotahový kotel by byl příliš vysoký, proto se využívá dvou a více tahů.

## 4.2 Dopravníky

Dopravníky jsou jedním z nejčastěji využívaných strojů k dopravě materiálu na krátké a střední vzdálenosti. Dopravují různé druhy materiálů od sypkých až po kusové a to jak ve vodorovném, tak šikmém směru. K dopravě uhlí v elektrárně se používá pásový dopravník, který se skládá z následujících hlavních částí:

Dopravní pásy rozdělujeme podle materiálu, z nichž jsou vyrobeny. Ten také udává, na dopravu jakého materiálu je pás vhodný. Pás musí být dostatečně pevný, odolný proti poškození dopravovaným materiálem, schopný odolávat střídavému namáhání a lehký [8]. Kostra pásu je tvořena z textilních či ocelových vláken, která zajišťují pevnost pásu [8]. Na nosnou vrstvu je nanášena krycí vrstva, nejčastěji z pryže nebo jiného pružného materiálu, která chrání před abrazivními nebo jinak škodlivými účinky okolí a přepravovaného materiálu. Pásy mohou být hladké, při větších sklonech je nutné použít dopravník s žebrováním, aby bylo zabráněno pohybu materiálu po pásu. Pro delší přepravní vzdálenosti se pásy nevyrábějí v celku, ale je nutné je po částech spojit ocelovými spojkami.

Pásové stoličky se využívají k zajištění průhybu pásu po celé jeho dopravní délce. Pro přepravovaná množství materiálu v případě uhelných elektráren připadají lze používat pouze víceválečkové stolice na nosné větvi pásu.

Hnací buben s elektromotorem slouží k přenosu hnacího momentu z motoru na pás. Motor může být umístěn buď uvnitř nebo vně bubnu. Buben je z vnější strany opatřen protiskluzovou vrstvou nebo vzorem, aby nedocházelo k protáčení bubnu proti pásu. Druhý buben, tzv. hnaný, je na opačném konci pásu. Není vybaven motorem, zajišťuje pouze vedení pásu.

Napínací zařízení pásu se využívá k zajištění správné tažné síly pásu. Na napnutí pásu závisí přenos hnacího momentu mezi hnacím bubnem a pásem. K tomu se využívá posuvné napínací kolo, kdy posunem jeho polohy pomocí šroubů nebo hydraulickým zařízením se dosáhne potřebné napínací síly.

### **4.3 Ventilátory**

Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje sloužící k dopravě plyných látek. Oproti strojům pístovým mají stále propojené sací a výtlačné potrubí. V elektrárně se ventilátory využívají k zajištění vyššího tlaku vzduchu. Dnešní moderní kotle sestávají z několika tahů a dosahují vysokých výkonů, a proto jenom komínový efekt k zajištění proudění vzduchu nestačí. Vzduch musí být nasáván a vháněn do kotle uměle. Objem vzduchu jdoucí do kotle ovlivňuje kvalitu spalování, proto jsou kladeny velké nároky na řízení otáček vzduchových ventilátorů. Poté, co přesně daný objem vzduchu projde kotlem, se mění na spaliny a ty jsou komínovým, popřípadě spalínovým ventilátorem vháněny do komína a vyváděny z elektrárny. Do spalínového ventilátoru vstupují spaliny o teplotě okolo 130 °C, což je třeba brát v úvahu při návrhu ventilátoru.

Důležitou rovnicí, která charakterizuje potrubní systém, je velikost tlakových ztrát. Ty vznikají třením proudícího média o stěny potrubí.

$$\Delta_{Pz} = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad \mathbf{1}$$

|           |                                  |                      |
|-----------|----------------------------------|----------------------|
| $\lambda$ | součinitel tření                 | [-]                  |
| $d$       | poloměr potrubí                  | [m]                  |
| $l$       | délka potrubí                    | [m]                  |
| $\xi$     | součinitel místní tlakové ztráty | [-]                  |
| $\rho$    | hustota protékané látky          | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $w$       | rychlost proudění                | [m/s]                |

Z tlakového a objemového čísla se vytvářejí diagramy, podle kterých je možno vybírat optimální typ ventilátoru pro dané zapojení. Výpočet je možné provést i přímo. Příkon ventilátoru se počítá jako:

$$P_{ven} = \frac{\Delta p Q_v}{\eta_m} \quad \mathbf{2}$$

|            |                         |                     |
|------------|-------------------------|---------------------|
| $P_{ven}$  | příkon ventilátoru      | [kW]                |
| $\eta_m$   | mechanická účinnost     | [-]                 |
| $\Delta p$ | tlakové navýšení        | [kPa]               |
| $Q_v$      | objemový průtok vzduchu | [m <sup>3</sup> /s] |

Paralelní spolupráce dvou ventilátorů se využívá v případech, kdy je potřeba dosáhnout většího hmotnostního průtoku. Zároveň s tím je možno dosáhnout vyšší spolehlivosti provozu, jelikož při výpadku jednoho ventilátoru je možné systém provozovat za sníženého výkonu. Při rozhodování mezi dvěma paralelně spolupracujícími ventilátory a jedním ventilátorem o větším výkonu je nutné spolu s ekonomickou stránkou zvažovat právě i zvýšenou spolehlivost paralelního systému.

Sériové zapojení se využívá ke zvýšení statického tlaku na výstupu ze systému. V elektrárnách však není nutné o této variantě uvažovat.

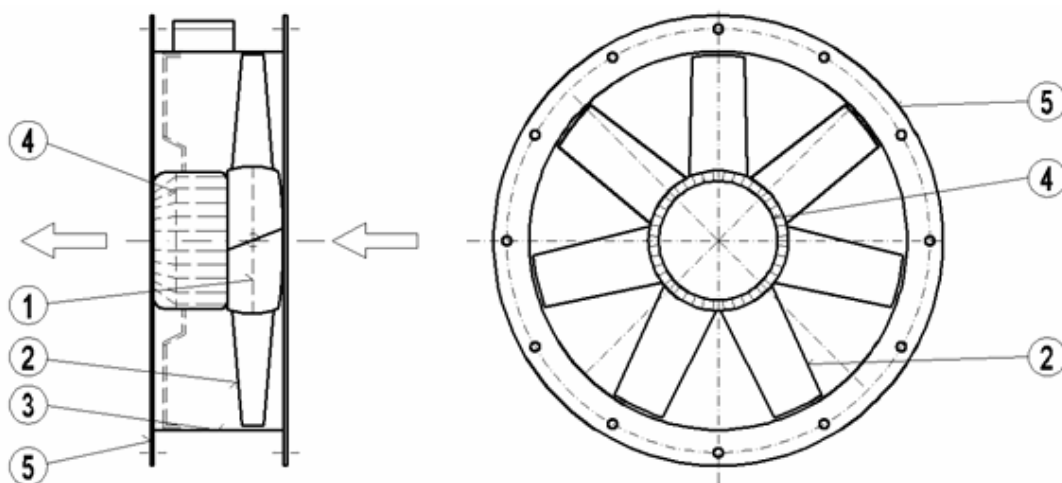
Při výpočtech regulací otáček ventilátoru, ale i čerpadla, je možné využívat zákony afinity. První z nich říká, že objemový průtok stoupá lineárně s otáčkami, tlak stoupá s kvadrátem otáček a výkon roste se třetí mocninou otáček. Z toho plyne, že nejúspornější regulací je ta, která využívá možnosti změny otáček ventilátoru.

### 4.3.1 Axiální ventilátory

Axiální ventilátory mají přívod i vývod vzduchu v jedné linii. Vzduch protéká rovnoběžně s osou rotace. Využívají se hlavně v případech, kde není zapotřebí vysokého tlaku, ale je potřeba dosáhnout vysokého hmotnostního průtoku.

U axiálních ventilátorů se používá hlavně difuzorový tvar jak rotorových tak statorových lopatek. Tento tvar je odvozen od tvaru křídla letadla. Lopatka je od paralelního směru proudění natočena o náběžný úhel, který zajišťuje pohyb vzduchu. Změnou tohoto úhlu resp. změnou natočení lopatky na hřídeli, se dá měnit výsledný hmotnostní průtok ventilátorem.

Pokud by axiální ventilátor obsahoval pouze oběžné kolo s lopatkami, výstupní vzduch by na výstupu rotoval ve směru otáčení ventilátoru. Takto navržený ventilátor je využíván hlavně v aplikacích, kde není potřeba vysokého výkonu. U náročnějších aplikací se umísťují statorové lopatky buď před, nebo za rotorové lopatky, popřípadě vznikají i složitější kombinace např. dva rotory rotující proti sobě.

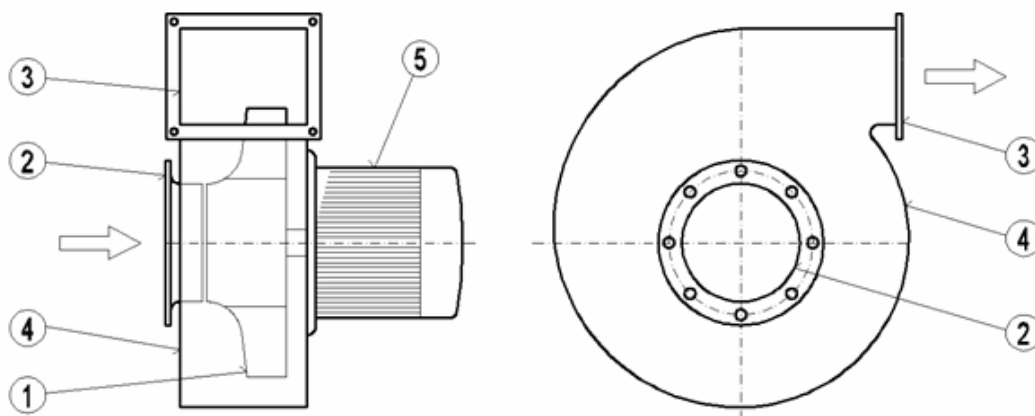


Obrázek 4.2 Axiální ventilátor [9]

1 - rotor      2 - oběžné lopatky      3 - plášť      4 - elektromotor      5 - příruby

### 4.3.2 Radiální ventilátory

U radiálních ventilátorů je vstup vzduchu veden paralelně se osou rotace a jeho směr je oběžným kolem změněn o 90°. Právě oběžné kolo a tvar jeho lopatek má zásadní vliv na účinnost a charakteristiku radiálních ventilátorů.



Obrázek 4.3 Radiální ventilátor [9]

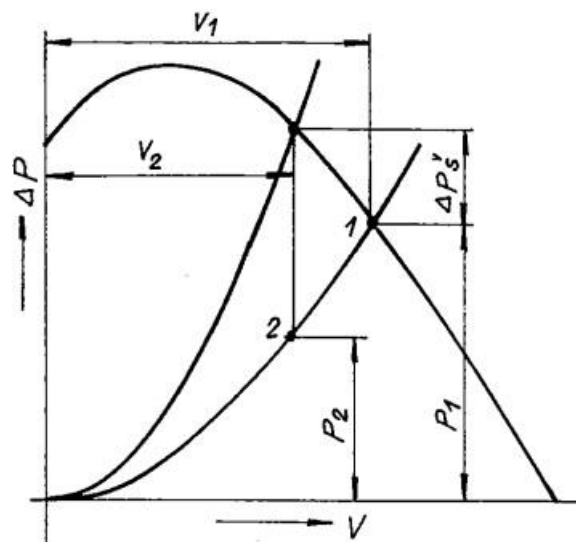
1 - oběžné kolo 2 - sací hrdlo 3 - výtlačné hrdlo 4 - spirální skříň 5 – elektromotor

Oběžná kola s dozadu zahnutými lopatkami se využívají v případech, kde je zapotřebí vysoká účinnost a vysoký statický tlak [10]. Celková dopravní účinnost bývá 82 % až 86 %. Optimální počet lopatek bývá 6 až 15 [10]. S vyšším počtem lopatek by se zužovala tloušťka kanálu mezi nimi a rostly by tlakové ztráty. U radiálních ventilátorů se využívají dva typy lopatek. Levnější ale méně účinné je tvarování lopatek s konstantní tloušťkou. Dražší verze má aerodynamicky tvarované, tzv. profilované lopatky. Tím, že jsou mechanicky pevnější, umožňují dosáhnout vyšších obvodových rychlostí [10]. Tento tvar lopatek má také vyšší regulační schopnosti. Zahnutí lopatek se volí ze tří možností: kruhové, logaritmické nebo parabolické, v závislosti na matematické funkci, podle které se vypočítává zahnutí lopatky. Ke snížení objemových ztrát se využívá ucpávka. Ta má zamezit proudění unikajícího stlačeného vzduchu do míst, kde by způsoboval nevhodné ohýbání proudnic. Nezbytný unikající vzduch je nutné nasměrovat ke krycí desce ventilátoru [10]. Vzduch vycházející z oběžného kola ventilátoru pokračuje do spirální skříň. Jejím úkolem je odebírat stlačený vzduch a převádět ho do výtlačného hrdla ventilátoru [10]. U většiny instalací ve vzduchotechnice se nevyžívají rozvodné lopatky ve spirální skříni. Ty spolu se zvýšením účinnosti současně zvyšují i investiční náklady. Za lopatkami následuje sběrný kanál buď obdélníkového, nebo kruhového průřezu. Kruhový

průřez se využívá u vysokotlakých ventilátorů a je potřeba ho vyrobit odléváním. Obdélníkový průřez je možné vyrobit skládáním plechů a jeho provedení je tudíž levnější.

### 4.3.3 Regulace škrcením

Škrcení je investičně nejlevnější způsob regulace hmotnostního průtoku. Před nebo za ventilátor je instalována škrticí klapka. Úhlem natočení klapky se mění charakteristika potrubí. Tím dochází ke značným ztrátám v systému a tento systém regulace je tak nejméně ekonomický. Využití najde hlavně v instalacích, které nepotřebují často regulovat průtok a pracují při vysokých zatíženích po celou dobu běhu. Motor má v tomto případě stále stejné otáčky a různý průtok je řešen pouze škrcením.

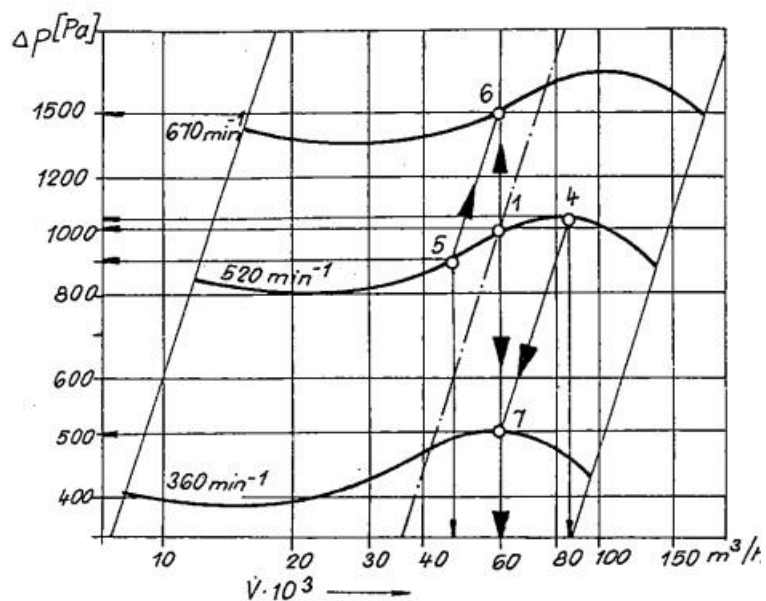


Obrázek 4.4 Regulace škrcením [10]

Obrázek 4.4 znázorňuje, jakým způsobem se mění charakteristika potrubí. Pokud chceme dopravovat menší měrné množství vzduchu  $V$ , musíme část energie  $\Delta p$  mařit přes škrticí klapku.

### 4.3.4 Regulace otáčková

Otáčková regulace je řešena na straně poháněcího zařízení ventilátoru. Motor, nejčastěji asynchronní s kotvou nakrátko, má frekvenčně řízené otáčky. Změnou otáček se nemění charakteristika ventilátoru, pouze se posouvá. Tím se posouvá i bod maximální účinnosti [10], čímž je zajištěno, že při požadované změně hmotnostního průtoku, bude zařízení provozováno s vysokou účinností.



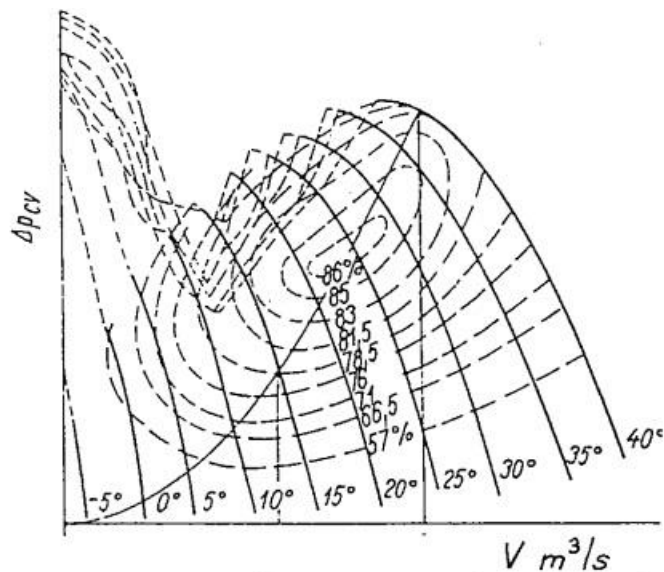
Obrázek 4.5 Otáčková regulace [10]

Z obrázku 4.5 je patrné, že charakteristika ventilátoru se posouvá v rámci obou os, ale její tvar zůstává stejný.

Nevýhodou tohoto řešení jsou vysoké náklady na frekvenční měnič. Toto může být částečně řešeno jinou otáčkovou regulací elektromotoru např. změnou počtu pólů, nebo napěťovou regulací.

### 4.3.5 Regulace natáčením oběžných lopatek

Oběžné lopatky se natáčejí pouze u axiálních ventilátorů. Úhlem jejich natočení se mění charakteristika ventilátoru. Lopatky mají v bodě nejvyšší mechanické účinnosti ventilátoru lopatky natočeny o optimální náběžný úhel.



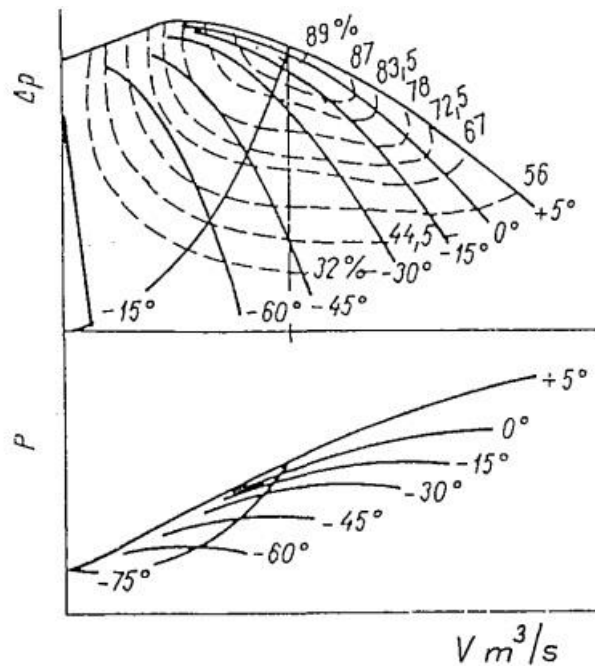
Obrázek 4.6 Regulace natáčením oběžných lopatek [10]

Na obrázku 4.6 jsou uvedeny jednotlivé charakteristiky ventilátoru pro různé náběžné úhly lopatek. Přerušovanou čarou jsou vyvedeny křivky se stejnou účinností. Daný ventilátor má maximální účinnost 86 % s náběžným úhlem v rozmezí 20° až 30°. Těmito hodnotami je dán optimální objemový průtok látky. Tato regulace se provádí při konstantních otáčkách elektromotoru, provedení je konstrukčně i investičně náročné.

#### 4.3.6 Regulace natáčením lopatek v sání

Regulace natáčením lopatek v sání se využívá u radiálních ventilátorů. Lopatky v sání vzduchu uvedou vzduch do rotace, čímž se docílí toho, že vzduch rotuje buď ve směru rotace ventilátoru, nebo proti ní. Tím se zásadním způsobem ovlivní výsledný dopravní tlak ventilátoru. Pokud bude vzduch rotovat proti směru rotace ventilátoru, sníží se jak dopravní tlak ventilátoru, tak dopravované množství vzdušiny.





Obrázek 4.7 Regulace natáčením lopatek v sání [10]

V horní části obrázku 4.7 je nakreslena ventilátorová charakteristika pro jednotlivé úhly natočení lopatek v sání. Přerušovanou čarou jsou opět naznačeny křivky se stejnou hodnotou účinnosti ventilátoru. Ve spodní části je závislost výkonu ventilátoru na úhlu natočení lopatek.

### 4.3.7 Vzduchový ventilátor

Vzduchový ventilátor je jedním z velkých spotřebičů v elektrárně. Ventilátor nasává venkovní vzduch a vhání ho do potrubního systému budovy kotelny. Za ventilátorem se nachází rotační ohřívák vzduchu, který vzduch přehřeje na teplotu okolo 300 °C. Zde se vzduch rozdělí na primární a sekundární. Primární vzduch slouží k sušení paliva a k zajištění hoření. Sekundární vzduch slouží k řízení správného množství kyslíku a k udržování hoření na daném prostoru. V modernějších kotlích se nachází ještě přívod terciárního vzduchu, který zajišťuje správné dohořívání směsi. Jednou z funkcí ventilátorů je vyvolat umělý tah v kotli [11]. Vzhledem k tomu, že moderní kotle pracují ve velkých výkonech a s vyšším počtem tahů, nebylo by ekonomické je provozovat pouze s přirozeným tahem. Pro tahy kotle, které vedou shora dolů je potřeba překonávat komínový efekt. Bez nuceného tahu by vícetahové kotle nemohly fungovat. Ventilátor musí dodávat takové množství vzduchu, které je potřeba na spalování i na pokrytí ztráty v rotačním ohříváku.

### **4.3.8 Kouřový ventilátor**

Kouřový ventilátor je umístěn za elektrostatickými odlučovači a slouží ke zvýšení tahu komína a překonání tlakových ztrát v potrubním systému. Je potřeba počítat s tím, že vzduch, který jím bude procházet, bude mít zvýšenou teplotu a bude obsahovat erozivní částice [11].

### **4.3.9 Recirkulační ventilátor**

Recirkulační ventilátor je umístěn za vývodem spalin z kotle. Tyto spaliny dopravuje zpět do spalovacího prostoru, čímž se snižuje teplota hoření, která má přímý vliv na tvorbu emisí  $\text{NO}_x$ . Nižší teplota zabraňuje vytváření nánosu strusky na stěnách kotle a nedochází ke snížení jeho účinnosti [11]. Tento ventilátor musí vydržet vysoké teploty a velké množství erozivního popílku, má proto nejvyšší nároky na odolnost proti těmto vlivům.

## **4.4 Mlýny**

Elektrárenské mlýny slouží ke zmenšení velikosti spalovaného paliva. Mletím paliva se zvedá jeho měrný objem a hoření je rychlejší a intenzivnější. Mlýnů rozeznáváme několik typů, které se liší jak otáčkami mlecího zařízení, tak způsobem, jakým dochází ke zmenšení velikosti částic uhlí.

Nejvíce využívaným typem mlýnů u nás, jsou mlýny tlukadlové a ventilátorové. Tyto rychloběžné stroje pracují s otáčkami cca 600 ot./min. Ventilátorové mlýny mají na hřídeli sadu kladiv, která rozbijí palivo na menší části, následně vstupující do mlecí sekce, kde jsou sadou stacionárních a rotujících lopatek rozemlety na malé částice. Následně jsou nasávány ventilátorem a unášeny spolu s primárním vzduchem přímo k hořákům. U tlukadlových mlýnů je na ose připevněna sada tlukadel, která nárazem o pancéřovanou stěnu komory rozmělní palivo na malé částice. Výsledný uhelný prach je unášen dále ventilátorem. Tlukadlové mlýny mohou mít otáčky až 1 500 ot./min. Výhodou těchto druhů rychloběžných mlýnů je velký mlecí výkon potřebný v případě nekvalitních paliv. Nevýhodou je rychlý průlet paliva, které vyžaduje vyšší teploty vzduchu ke svému vysoušení.

## 5 Strojovna

### 5.1 Čerpadla

Čerpadlo je mechanický stroj, který protékající kapalině dodává energii. Ta může být ve třech různých formách: kinetická, potenciální nebo tlaková [12]. Záleží na druhu čerpadla. Tato energie je využita např. k zvedání kapaliny, zvyšování tlakové energie, zvyšování kinetické energie nebo k dopravě kapaliny potrubním systémem. Podle způsobu čerpání kapaliny se čerpadla dělí na hydrostatická nebo hydrodynamická. Pro vlastní spotřebu elektrárny jsou nejdůležitější čerpadla hydrodynamická, která jsou z tohoto důvodu v následující části této práce rozebrána podrobněji.

Čerpadla jsou stroje velmi podobné ventilátorům. Stavba axiálních i radiálních čerpadel je na první pohled stejná. Rozdíl je v přepravované látce, která je v případě čerpadel nestlačitelná.

Stejně jako ventilátory mají čerpadla tři druhy ztrát. Ztráty hydraulické zohledňují drsnost ploch obtékaných vazkou kapalinou [12]. Do hydraulických ztrát patří i ztráty při nesprávném vstupu kapaliny do lopatkové mříže. Vnitřní průsaky v čerpadle jsou charakterizovány objemovými ztrátami [12]. Mechanické ztráty vznikají například třením v ložiscích nebo ucpávkách a projevují se snížením využitelného výkonu na hřídeli čerpadla [12].

Právě ucpávka je důležitou součástí hydrodynamických čerpadel. Její funkcí je zabránit úniku dopravované látky z prostoru o větším tlaku do prostoru s nižším tlakem (obvykle vnější prostor okolo čerpadla) [12]. Ucpávka existuje měkká nebo mechanická. Měkké ucpávky jsou ve formě provazců okolo hřídele čerpadla. Předpokládá se u nich mírný průsak přepravované kapaliny do okolí. Mechanická ucpávka se skládá ze dvou kroužků, jednom na rotující hřídeli a druhým na nepohyblivé části stroje. Ke kroužkům je přitlačován prstenec a tím se brání úniku kapaliny. Pokud by bylo potřeba dosáhnout dokonalé těsnosti, je možné přes těsnící kroužky protlačovat kapalinu o vyšším tlaku než má dopravovaná. Mechanické ucpávky jsou méně odolné vůči nečistotám a jsou také dražší.

Základními parametry pro volbu čerpadla jsou měrná energie (tlak) a průtok přepravované látky. Na základě těchto parametrů výrobce zpracovává oblastní diagram. Ten slouží jako vodítko k určení optimálního typu čerpadla, stejně jako k určení jejich případného sériového nebo paralelního řazení. Průtok se udává jako hmotnostní  $Q_m$  [kg/s] nebo objemový  $Q_v$  [m<sup>3</sup>/s]:

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = \rho \cdot S \cdot c \quad 3$$

|        |                            |                      |
|--------|----------------------------|----------------------|
| $\rho$ | hustota kapaliny           | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $S$    | plocha protékaná           | [m <sup>2</sup> ]    |
| $c$    | rychlost proudění kapaliny | [m/s]                |

Měrná energie  $Y$  [J/kg] vyjadřuje množství energie v jednom kilogramu přepravované látky.

Měrná energie čerpadla tedy určuje, kolik energie je předáno čerpadlem kapalině, mezi sacím a výtlačným hrdlem [13]:

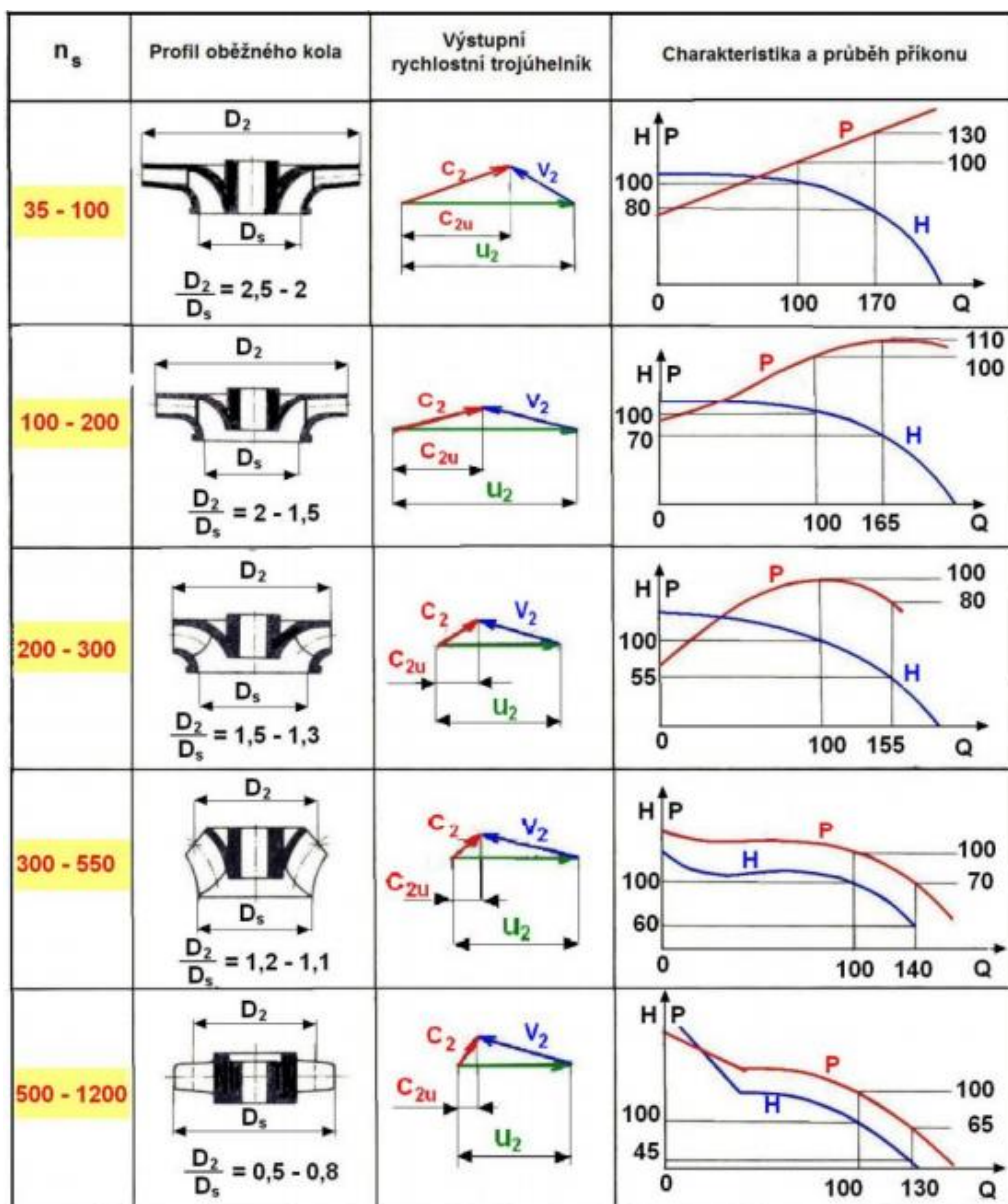
$$Y = g \cdot H = \frac{p}{\rho} \quad 4$$

|        |                      |                      |
|--------|----------------------|----------------------|
| $g$    | gravitační zrychlení | [kg/s <sup>2</sup> ] |
| $H$    | dopravní výška       | [m]                  |
| $p$    | tlak                 | [Pa]                 |
| $\rho$ | hustota              | [kg/m <sup>3</sup> ] |

Výkon čerpadla se vypočítá podle následujícího vzorce.

$$P_{\check{c}} = \Delta Y \cdot Q_m \quad 5$$

Vzhledem k tomu, že jsou čerpadla dělena stejně jako ventilátory, nemělo by smysl zde znovu podrobně probírat jejich typy, ale v následující části bude pouze poukázáno na jejich charakteristiky.



Obrázek 5.1 Charakteristiky čerpadel s různými oběžnými koly [14]

První tři oběžná kola jsou případy radiálních čerpadel. Pro radiální čerpadla je charakteristický růst jejich příkonu s průtočným množstvím. Radiální čerpadla se využívají v zapojeních, kde je nutné dosáhnout vysokých měrných energií při malých průtočných množstvích. Na čtvrtém místě je diagonální oběžné kolo, které je konstrukcí mezi radiálním a axiálním. Čerpadla s nejvyšší měrnou rychlostí jsou axiální. Z charakteristiky je možné vyzorovat, že s rostoucím průtokem klesá příkon čerpadla. Proto jsou axiální čerpadla vhodná pro vysoké průtoky a malé měrné energie.

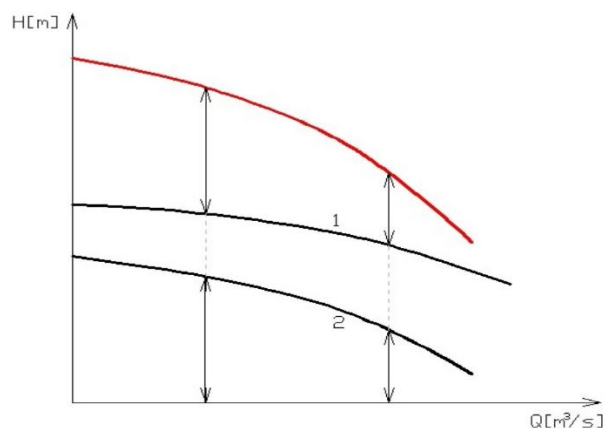
Pracovní bod čerpadla je průsečík mezi charakteristikou čerpadla a charakteristikou potrubí. Systém se v tomto bodě nachází v rovnovážném stavu [15]. Správná volba čerpadla zahrnuje

právě určení pracovního bodu a dosažení maximální možné účinnosti čerpání v jeho okolí. Tím je možné zaručit ekonomický provoz.

Hlavním rozdílem mezi ventilátory a čerpadly je jev jménem kavitace. Na kapalinu působí tlak, který může poklesnout pod hodnotu nasycených par. Při tomto tlaku dochází k vytváření bublin plynu [15]. Jakmile se tyto bubliny dostanou do oblasti vysokých tlaků, implodují a tím vznikají velké tlakové špičky a rázy, které ovlivňují jak charakteristiku čerpadla tak způsobují erozi materiálů. Čerpadla se tak nesmí provozovat v režimu kavitace po delší dobu, jinak může dojít k jejich mechanickému poškození [15].

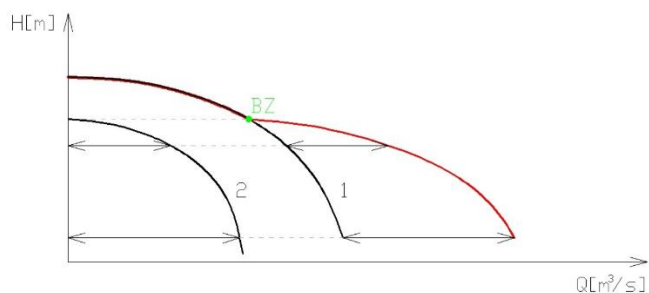
Od kavitační deprese se odvozuje sací výška čerpadla. Sací výška označuje teoretickou výšku, do které je čerpadlo schopné dopravit kapalinu od hladiny nádrže. Sací výšku snižuje charakteristika potrubí. To funguje jako nelineární odpor. Vznikají v něm třecí a místní ztráty. Třecí ztráty závisí na typu proudění a tedy na Reynoldsově čísle a zahrnují například drsnost potrubí. Místní ztráty jsou vyvolané elementy potrubí, jako jsou spojky, odbočky nebo ventily.

Sériové řazení čerpadel se využívá v případě, kdy je potřeba dosáhnout vyšších měrných energií. Charakteristiky obou čerpadel se sčítají přes měrné energie. Ve většině praktických aplikací se sériově řadí stejná čerpadla se stejnými charakteristikami. Pokud to není možné, dají se zapojit sériově i čerpadla s různými charakteristikami.



Obrázek 5.2 Sériové řazení čerpadel [16]

Paralelní zapojení se využívá ke zvýšení průtočného množství. Paralelním zapojením se charakteristiky čerpadel sčítají přes průtočná množství. Pokud by došlo k paralelnímu zapojení dvou naprosto odlišných čerpadel s různou statickou měrnou energií, může dojít k vytvoření bodu zlomu ve výsledné charakteristice.

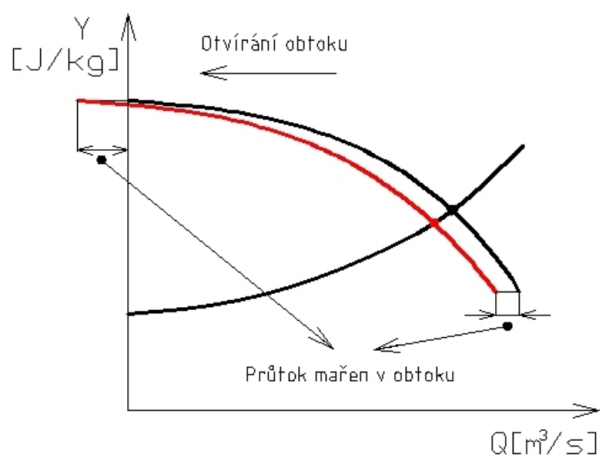


Obrázek 5.3 Paralelní řazení čerpadel [16]

Bod zlomu se nachází ve stejné úrovni, jako je nižší z měrných energií obou čerpadel.

### 5.1.1 Regulace obtoková

Regulací pomocí obtoku se mění charakteristika čerpadla. Za výtlačným potrubím čerpadla je umístěn obtok, který je řízen škrtkicí klapkou. Tento obtok vede zpět do napájecí nádrže.

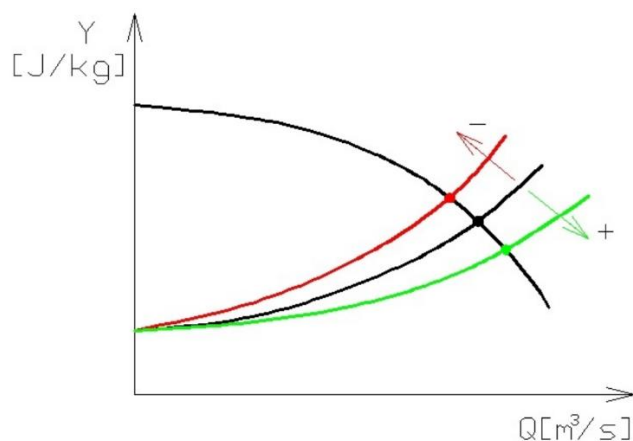


Obrázek 5.4 Regulace čerpadla obtokem [16]

Otevřením klapky obtoku se tedy část průtoku vrací zpět do napájecí nádrže. Charakteristika čerpadla se tím posunuje po ose x vlevo.

### 5.1.2 Regulace škrcením

Při regulaci škrcením je škrtkicí klapka umístěna přímo ve výtlačném potrubí. Jejím zavíráním a otvíráním se mění charakteristika potrubí.

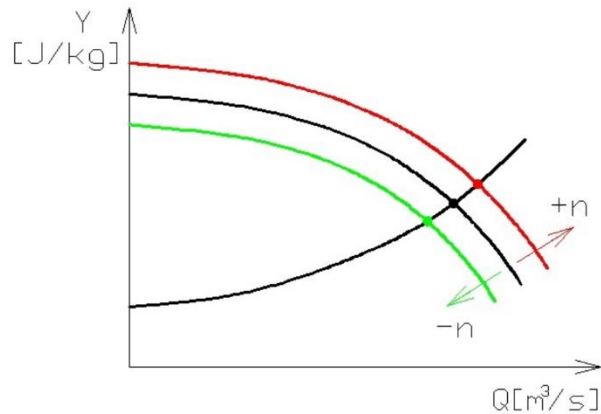


Obrázek 5.5 Regulace čerpadla škrcením [16]

Uzavíráním škrticí klapky se zvětšuje strmost potrubní charakteristiky. Otevíráním se strmost naopak snižuje.

### 5.1.3 Regulace otáčková

Regulace otáčková se provádí přímou změnou otáček čerpadla. Výpočet nové charakteristiky se stejně jako u ventilátorů provádí přes afinní vztahy.

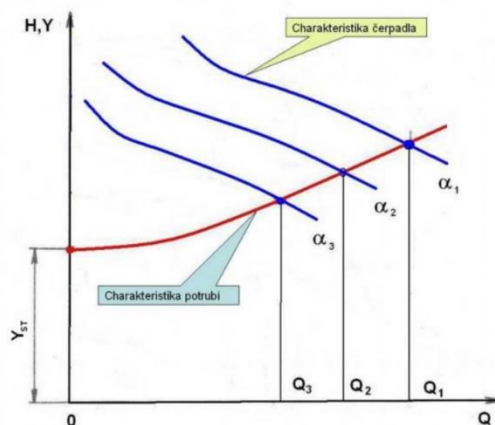


Obrázek 5.6 Regulace čerpadla otáčkami [16]

### 5.1.4 Regulace natáčením lopatek

Regulace natáčením lopatek se provádí pouze u axiálních čerpadel natáčením lopatkových listů. Jedná se o ekonomickou regulaci, kdy čerpadlo pracuje s maximálně dosažitelnou účinností [14].





Obrázek 5.7 Regulace čerpadla natáčením lopatek [14]

Natáčením lopatek dochází k posunu charakteristiky čerpadla podobně, jako je tomu u otáčkové regulace.

### 5.1.5 Napájecí čerpadlo

Napájecí čerpadlo slouží ke vhánění vody do kotle. Přirozený tah kotle omezuje jeho hodnoty maximálního výkonu, proto se využívá napájecího čerpadla ke zvýšení tlaku v oběhu párovoda. Tím je možné dosáhnout i vyšších výkonů a přestupního součinitele, čímž se sníží velikost kotle a uspoří se materiál [3]. Teplota napájecí vody, která prochází čerpadlem, může být až 200 °C. Jedná se o jeden z největších spotřebičů, u kterého je potřeba velké regulační schopnosti. Před rozvojem polovodičové techniky se k pohánění čerpadla využívala turbonapajčka. Jedná se o menší turbínu, která odebírá část středotlaké páry a přes zubovou spojku je spojena právě s napájecím čerpadlem. Byla využívána hlavně z důvodů jednoduché regulace otáček. Její další výhodou je nezávislost na elektrickém napájení, je roztáčena pouze párou a nepotřebuje záložní zdroj. Další výhodou je určitý stupeň samoregulace, kdy množství páry je regulováno výkonem kotle. Nevýhodou je snížení výkonu odběrem části vysokoenergetické páry.

### 5.1.6 Kondenzátní čerpadlo

Kondenzátní čerpadla slouží k dopravě kapaliny z kondenzátoru do nízkotlakých ohříváků napájecí vody. Po výstupu z kondenzátoru má kapalina velmi malý tlak okolo 4 kPa. Prochází systémem nízkotlakých ohříváků, kde dojde ke zvýšení teploty a končí v odplynovaku. Za odplynovákem se již nachází napájecí čerpadlo.

### **5.1.7 Bagrovací čerpadlo**

Bagrovací čerpadlo se využívá k odvodu strusky a popílku, který uniká spodní částí kotle. Struska prochází drtičem, kde jsou rozemlety velké kusy, a padá do splavovacího kanálu, kde se mísí s vodou. Splavovací kanál ústí do bagrovacích jímek. Odtud se bagrovacími čerpadly s vodou smíchaná struska dopravuje na složiště, kde je voda opět oddělena. Čerpadlo musí vydržet vysokou abrazi způsobenou většími částicemi strusky.

### **5.1.8 Čerpadlo chladící vody**

Čerpadlo chladící vody slouží k dopravě chladící vody mezi kondenzátorem a chladící věží. Teplota vody zde není příliš vysoká, jen okolo 30 °C zato nebývá chemicky dokonale upravována. Vzhledem k tomu, že kondenzátor přímo ovlivňuje účinnost a výkon elektrárny, instaluje se zde zařízení kontinuálního čištění kondenzátoru. Před kondenzátorem jsou v daných intervalech vypouštěny kuličky z pěnové gumy, které se po průchodu opět zachytávají [17]. Tyto kuličky strhávají nečistoty v kondenzátoru a tím ho čistí.

### **5.1.9 Ostatní čerpadla**

V elektrárně jsou další desítky menších čerpadel, která se starají například o chlazení zařízení s velkým výkonem. Dále zde nalezneme olejová čerpadla, která jsou nezbytná ke správnému roztočení soustrojí (najížděcí čerpadla) a k vytvoření olejového polštáře mezi hřídelí a nerotující částí turboalternátoru (zvedací čerpadla). Zvedací čerpadla jsou velmi důležitá, proto jsou zařazena do rozvodu zajištěného napájení [18]. Tím je zajištěno, aby při výpadku vlastního napájení nedošlo například k obroušení hřídele alternátoru nebo k přehřátí statorového vinutí.

## **6 Elektrické pohony ve vlastní spotřebě**

Elektrické pohony jsou nedílnou součástí vlastní spotřeby. Slouží k pohánění většiny strojních zařízení elektrárny. Jejich správné navržení a řízení přímo ovlivňuje účinnost a správný chod celé elektrárny. Proto jsou kladeny vysoké podmínky na jejich spolehlivost. Při výběru elektromotoru musíme správně určit jeho výkon, napájecí napětí, záběrný a jmenovitý moment,

dovolené oteplení a čas rozběhu [18]. Všechny tyto parametry musí být uvažovány i s vlivem prostředí, ve kterém bude elektromotor použit.

Elektrický pohon musí podle skript Elektrárny II, které napsali Doležal a Bouček splňovat tato kritéria [18]:

- a) „dostatečný výkon pro provoz technologických zařízení ve všech provozních stavech
- b) momentová charakteristika motoru musí zajistit spolehlivý rozběh a chod zařízení ve všech provozních stavech
- c) motor s výchozí teplotou vinutí  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  musí být možné třikrát zapnout a to bezprostředně za sebou
- d) motor se zahřátým vinutím na  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  musí vydržet minimálně další dva rozběhy
- e) vysoký počet rozběhů
- f) záběrný proud motoru nemá překročit hodnotu 5.5 násobku proudu jmenovitého, maximální moment motoru má být větší než 2 násobek momentu jmenovitého a hlučnost motoru má být menší než 85 dB
- g) elektromotor musí spolehlivě pracovat i při snížení napájecího napětí na  $0,7 U_n$  při 50 Hz
- h) nejdelší přípustná doba setrvání asynchronního motoru ve stavu nakrátko je 5 s pro dvou a čtyřpólové motory; pro šestipólové motory 10 s
- i) bezporuchový provoz bez požadavků na revize po dobu 3 let. tj. asi 15 000 provozních hodin
- j) elektropohony musí vyhovovat podmínkám samonajíždění. Po úplné ztrátě napětí po dobu 2 až 3 sekund se musí elektromotor rozběhnout s maximální zátěží při napětí  $0.65$  až  $0.7 U_n$ “

## 6.1 Stejnosměrné stroje

Stejnosměrné stroje se v elektrárnách prosadily jako první. Díky jejich snadné regulaci se využívaly jako elektropohony mechanických soustav i jako budiče turboalternátorů. Jejich nevýhodou je sběrací zařízení – komutátor, který je náročný na údržbu. Proto je postupem času

nahradily levné a spolehlivé asynchronní pohony. Dnes nalezneme stejnosměrné pohony v elektrárnách hlavně jako záložní pohony pro případ výpadku napájení. Baterie mohou dodávat elektrickou energii přímo a střídač nemusí být dimenzován na vysoké výkony. Podle způsobu, kterým se pohon budí, rozeznáváme tři druhy stejnosměrných pohonů. Jsou to pohony s cizím, sériovým nebo paralelním buzením. Způsob buzení ovlivňuje výslednou charakteristiku pohonu.

Cize buzené elektromotory mají obvod buzení oddělen od obvodu kotvy. Regulace jeho otáček se provádí změnou napětí zdroje a změnou budicího proudu [19]. Pokud regulujeme řízením napětí zdroje při konstantním proudu, nedochází ke změně momentu motoru a jeho výkon tak lineárně roste [19].

Elektromotory se sériovým buzením se vyznačují jedním obvodem buzení a kotvy. Budicí proud je zároveň proudem kotvy [19]. Toho se využívá při těžkých rozběhích, kdy s proudem kotvy se zvyšuje i budicí proud a magnetický tok. Díky tomu si našly své místo v trakci, kde poháněly těžké dopravní prostředky např. vlaky.

Elektromotory s paralelním buzením na rozdíl od dvou předchozích nemohou být regulované změnou napětí [19]. Regulovat se může změnou budicího proudu nebo odporem v obvodu kotvy. Má menší regulační schopnosti než cize buzený motor [19]. Využití našel např. u obráběcích strojů.

## **6.2 Asynchronní stroje**

Asynchronní pohony jsou nejdůležitějšími prvky vlastní spotřeby elektrárny. Za jejich rozšíření nejen do elektráren může jejich jednoduchá konstrukce, téměř bezúdržbový provoz a dostupnost střídavého napětí [20]. Podstatou asynchronních pohonů je vznik točivého magnetického pole. K jeho vzniku je zapotřebí  $n$ -vinutí rozmístěných po obvodu pohonu pro  $n$ -fázovou síť. Běžně se pro napájení využívá trojfázová síť. Toto točivé pole je vytvářeno ve statoru pohonu.

Nevýhodou asynchronních pohonů je obtížnější regulace rychlosti [19]. Nejlepší využití nacházejí v aplikacích, kde není potřeba regulovat rychlost. V elektrárnách se využívají asynchronní motory bez regulace například u čerpadel a ventilátorů, které využívají regulaci natáčením lopatek. Další nevýhodou je velký proudový ráz při spouštění motoru a též jalový účinník, který zapříčiňuje jalové zatěžování sítě [19].

Při otáčení asynchronního motoru se prostřednictvím točivého magnetického pole indukuje do rotoru napětí a proudy. K tomu dochází jen v případě, že se rychlost otáčení rotoru odlišuje od synchronní rychlosti motoru [19]. Při synchronní rychlosti motoru by se neindukovalo napětí ani proudy a stroj by tak měl nulový hnací moment. Provozní stavy motoru tedy přímo závisejí na rozdílu mezi rychlostí rotoru a rychlostí otáčení točivého magnetického pole. Rozdíl těchto rychlostí se nazývá relativní nebo také skluzová rychlost. Pokud podělíme skluzovou rychlost rychlostí synchronní, dostaneme veličinu charakteristickou pro asynchronní pohony: skluz. Skluz může nabývat hodnot mezi 0 a 1.

Asynchronní motory se vyrábějí ve dvou konstrukčních variantách kotvy. Ta může být tvořena buď hliníkovými tyčemi spojenými na koncích do krátka, nebo může být kotva vinutá se sběracími kroužky. Výhodou klecové kotvy oproti vinuté je jednodušší údržba, nevýhodou jsou horší spouštěcí charakteristiky motoru. Pro pohony ve vlastní spotřebě elektráren se využívá právě motorů s klecovou kotvou. Jako jedny z mála totiž splňují vysoké požadavky, které jsou na pohony v elektrárnách kladeny. Nevýhodou složitějšího řízení otáček vyvažuje vysoká spolehlivost a malé investiční náklady.

Rozběh asynchronního motoru s kotvou nakrátko se může dělat přímým připojením na síť. Při tom však vznikají velké proudové rázy ve velikosti až sedminásobku jmenovitého proudu motoru. Proto se takto mohou do klasické 230V sítě připojovat jen menší motory do 3 kW. Pro plynulejší start se využívá několik technik. Mezi ně patří například zařazení odporů do obvodu statoru, startovací transformátor, přepínání hvězda trojúhelník nebo softstartér. Všechny tyto metody se využívají v situacích, kdy není potřeba měnit otáčky motoru.

Nejjednodušším řízením rychlosti asynchronního motoru je přepínání počtu pólů. Tím se skokově mění i otáčky stroje. Nejméně využívaným řízením je změna napětí. Se změnou napětí se mění i moment motoru a tak by mohlo dojít k jeho přetížení a zastavení. Nejvyužívanější metodou je frekvenční řízení. Jelikož jsou otáčky motoru přímo úměrné napájecí frekvenci, změnou této frekvence je možné ovládat i otáčky stroje. Jedná se o nejkonomičtější způsob řízení asynchronního motoru, ale současně také o nejdražší. Měníče frekvence svou cenou mohou překonat i cenu samotného motoru, což velmi zvyšuje investiční náklady.

### **6.3 Synchronní stroje**

Synchronní pohony se využívají jen pro aplikace s nejvyššími výkony, kde už není možné využít asynchronních motorů. Typickým příkladem jsou turbokompresory v jaderných

elektrárnách [18]. V klasických uhelných elektrárnách se však synchronní pohony téměř nevyskytují. V současné době se začaly synchronní pohony využívat v trakci. Jedná se o synchronní pohony s permanentními magnety. Materiál magnetů je slitina neodym-železo-bór, která má vysokou remanentní indukci až 1,25 T [21]. Snižováním ceny tohoto materiálu se motory s permanentními magnety začaly nasazovat do kolejové dopravy [21]. Příkladem může být například v Praze jezdící tramvaj 15 For City [21].

## **7 Popis bloku EPR II**

Projekt komplexní obnovy EPR II zahrnuje obnovení tří stávajících 210 MW bloků a postupné odstavování zbývajících dvou 210 MW neobnovovaných bloků. Jmenovitý výkon jednoho bloku byl navýšen z 210 MW na 250 MW. Ke zvýšení došlo v průběhu řízení EIA, kdy byly požadovány nižší dopady elektrárny na životní prostředí. V rámci obnovy došlo k výměně kotle a většiny zařízení v elektrárně. Nově kotel dosahuje účinnosti 90,5 % a produkuje 544 tun páry za hodinu. Pára z kotle má parametry 18,5 MPa/ 575 °C/ 580 °C. Tím došlo k navýšení účinnosti z 32,7 % na konečných 39,06 %. Výkonový rozsah, ve kterém se může kotel pohybovat bez stabilizačních hořáků, se pohybuje mezi 50 % a 105% jmenovitého výkonu. Výkon, kdy je kotel provozován na 105 % jmenovitého výkonu se nazývá BMCR (Boiler maximum continuous rating – maximální dlouhodobé zatížení kotle).

Pára z kotle jde přímo na lopatky vysokotlakého dílu turbíny. Část páry po průchodu turbínou je odebrána a ve vysokotlakém ohříváku zvyšuje teplotu napájecí vody na 246,6 °C. Větší část páry prochází přehřívákem páry a je následně rozdělována na páru jdoucí do středotlakého dílu a na páru využívanou ve špičkových ohřívácích. Ty slouží k přehřívání teplé vody dopravované z elektrárny do přilehlých měst. Z ohříváků se pára již v kapalném skupenství vrací do odplynováku. Na středotlakém dílu se část páry odebere na regenerační ohřev napájecí vody a zbytek už bez přehřívání putuje na nízkotlaký díl s deseti souměrnými odběry páry. Krajní odběry vedou dále do kondenzátoru, zbylých 8 po dvojicích napájí nízkotlaké ohříváky napájecí vody a ohříváky teplé vody. První tři odběry se využívají k ohřevu teplé vody ve třech výměnících. Z nich je voda dále vedena k přehřátí párou z přehříváku.

## 8 Analýza vlastní spotřeby bloku EPR II

### 8.1 Výpočet příkonu vybraných spotřebičů

V rámci této práce jsem provedl výpočet potřebného příkonu pro oba ventilátory, kondenzátní a napájecí čerpadlo. Pro výpočet příkonu ventilátorů jsem dostal k dispozici prvkové složení paliva. Podle postupu uvedeného ve zdroji [22] jsem z daných hodnot vypočítal potřebný objem vzduchu a vytvořených spalin, které jsem zkombinoval s podklady k oběma ventilátorům k provedení výpočtu potřebného příkonu.

| Uhlí EPR II           |                       |                  |                      |
|-----------------------|-----------------------|------------------|----------------------|
| Výhřevnost            | $Q_{ir}$ [MJ/kg]      | 9,75             |                      |
| Poměrné množství vody | $W_{tr}$ [%]          | 31,00            |                      |
| Množství hořlaviny    | $A_d$ [%]             | 41,00            |                      |
| Množství popeloviny   | $A_r$ [%]             | 28,29            |                      |
| Množství síry         | $S_r$ [%]             | 2,07             |                      |
|                       | <b>Prvkový rozbor</b> | <b>Hořlavina</b> | <b>Surové palivo</b> |
| Množství uhlíku       | C [%]                 | 64,76            | 26,36                |
| Množství vodíku       | H <sub>2</sub> [%]    | 5,71             | 2,32                 |
| Množství dusíku       | N <sub>2</sub> [%]    | 1,18             | 0,48                 |
| Množství kyslíku      | O <sub>2</sub> [%]    | 23,45            | 9,55                 |

Tabulka 8.1 Parametry uhlí Prunéřov

Parametry kotle a spalování jsou následující.

| Kotel                             |       |                    |
|-----------------------------------|-------|--------------------|
| Účinnost                          | 90,5  | %                  |
| Tepelný výkon                     | 473,8 | [MW <sub>t</sub> ] |
| Obsah O <sub>2</sub> ve spalinách | 6     | %                  |
| Zachycení popele v kotli          | 20    | %                  |
| Přebytek vzduchu $\alpha$         | 1,39  |                    |

Tabulka 8.2 Parametry kotle

Z tepelného výkonu kotle jsem dopočítal spotřebu paliva s danými parametry. Z množství vlhkého vzduchu pro vypočítané  $\alpha$  jsem dostal parametry vzduchového ventilátoru z níže uvedené tabulky 8.3. Příkon je počítán podle vzorce 2 na str. 12.

| <b>Vzduchový ventilátor</b>       |            |                     |
|-----------------------------------|------------|---------------------|
| Množství vlhkého vzduchu          | 736 042    | [m <sup>3</sup> /h] |
| Skutečné množství vlhkého vzduchu | 219        | [m <sup>3</sup> /s] |
| Celkové tlakové navýšení          | 3 180      | [Pa]                |
| Účinnost                          | 83         | [%]                 |
| Rezerva                           | 0          | [%]                 |
| <b>Příkon</b>                     | <b>840</b> | <b>[kW]</b>         |

**Tabulka 8.3 Vzduchový ventilátor**

U spalinového ventilátoru jsem vycházel z množství vlhkých spalin za kotlem a jejich předpokládané teploty v komíně.

| <b>Spalinový ventilátor</b>      |              |                     |
|----------------------------------|--------------|---------------------|
| Množství vlhkých spalin          | 848 629      | [m <sup>3</sup> /h] |
| Skutečné množství vlhkých spalin | 389          | [m <sup>3</sup> /s] |
| Celkové tlakové navýšení         | 6 211        | [Pa]                |
| Účinnost                         | 85,9         | [%]                 |
| Rezerva                          | 0            | [%]                 |
| <b>Příkon</b>                    | <b>2 812</b> | <b>[kW]</b>         |

**Tabulka 8.4 Spalinový ventilátor**

Pro výpočet potřebného výkonu napájecích čerpadel (dále jen „NČ“) jsem vycházel z následující tabulky 8.5.



| EPRII - parametry NČ |                  |       | Výkon bloku |        |        |       |
|----------------------|------------------|-------|-------------|--------|--------|-------|
|                      |                  |       | BMCR        | 100 %  | 70 %   | 50 %  |
| Sání                 | tlak             | MPa   | 0,75        | 0,74   | 0,54   | 0,39  |
|                      | teplota          | °C    | 167,9       | 167,0  | 154,8  | 142,9 |
|                      | entalpie         | kJ/kg | 710,0       | 706,3  | 652,8  | 601,7 |
|                      | průtok (celkový) | kg/s  | 185,95      | 183,42 | 128,41 | 91,72 |
| Výtlak               | tlak             | MPa   | 25,29       | 24,88  | 17,60  | 11,80 |

Tabulka 8.5 Parametry výpočtu napájecího čerpadla

Pro výtlak jsem z hodnoty tlaku a teploty napájecí vody v programu IAPWS IF97 určil entalpii vody ve výtlačku. Podle vzorce 5 na str. 21 jsem následně dopočítal potřebný mechanický výkon v jednotlivých provozních bodech kotle.

| Vypočtené hodnoty NČ                      |         |         |         |       |
|---|---------|---------|---------|-------|
| Výkon kotle                               | BMCR    | 100 %   | 70 %    | 50 %  |
| Změna měrné energie<br>$\Delta Y$ [kJ/kg] | 14,1    | 13,8    | 10,7    | 7,3   |
| Výkon<br>P [kW]                           | 2 629,9 | 2 524,0 | 1 368,7 | 671,3 |

Tabulka 8.6 Výkon NČ

Pro jmenovitý výkon kotle je potřeba předat kapalině energii 13,8 kJ/kg a využít 2 524 kW „mechanického“ výkonu. Pro provoz bloku na jmenovitý výkon je nutné mít v provozu alespoň dvě čerpadla. Na hodnoty z tabulky 8.5 se hledá konkrétní model čerpadla a přepočítává se konkrétní mechanický příkon čerpadla přes jeho účinnosti. Pruněrovská NČ typ HGC 5/9 dodala firma KSB, s.r.o. Čerpadla jsou celkem tři: dvě čerpadla jako hlavní, třetí slouží jako záloha v případě havárie jednoho ze dvou hlavních. Jedná se o vícestupňové radiální čerpadlo.

Stejný výpočet jsem provedl i pro kondenzátní čerpadla (dále jen „KČ“).

| EPRII - parametry KČ |                  |       | Výkon bloku |        |       |       |
|----------------------|------------------|-------|-------------|--------|-------|-------|
|                      |                  |       | BMCR        | 100 %  | 70 %  | 50 %  |
| Sání                 | Tlak             | MPa   | 0,01        | 0,01   | 0,01  | 0,01  |
|                      | Teplota          | °C    | 30,6        | 30,6   | 27,5  | 25,3  |
|                      | Entalpie         | kJ/kg | 128,4       | 128,4  | 115,3 | 106,0 |
|                      | Průtok (celkový) | kg/s  | 136,32      | 133,38 | 96,19 | 70,25 |
| Výtlak               | Tlak             | MPa   | 1,50        | 1,50   | 1,30  | 1,15  |

Tabulka 8.7 Parametry výpočtu KČ

Kondenzátní čerpadlo nemusí příliš navyšovat tlak a proto i výsledný výkon dosahuje jen zlomku výkonu čerpadel napájecích.

| Vypočtené hodnoty KČ                      |       |       |       |      |
|---|-------|-------|-------|------|
| Výkon kotle                               | BMCR  | 100 % | 70 %  | 50 % |
| Změna měrné energie<br>$\Delta Y$ [kJ/kg] | 1,2   | 1,2   | 1,2   | 1,2  |
| Výkon<br>P [kW]                           | 167,0 | 163,4 | 115,8 | 83,2 |

Tabulka 8.8 Výkon KČ

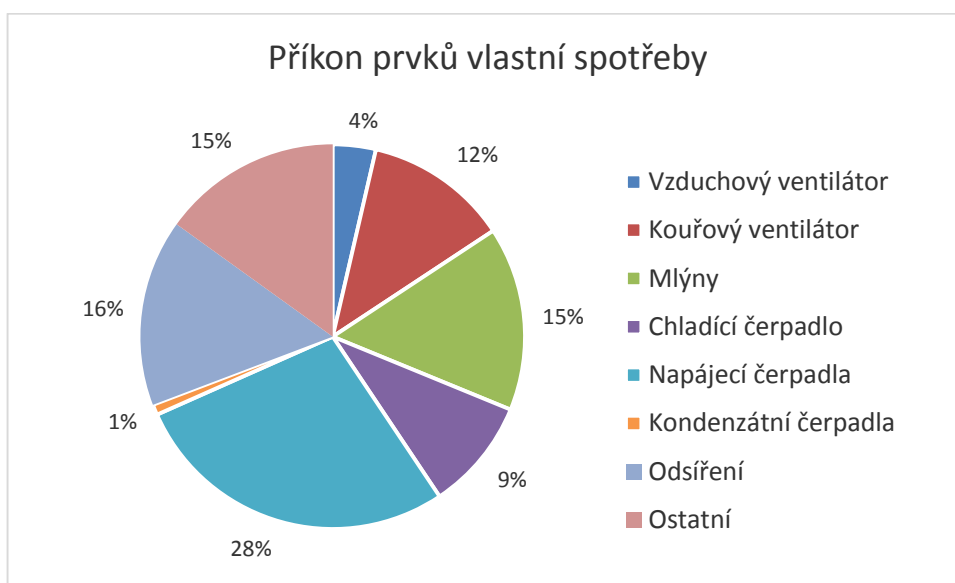
## 8.2 Porovnání příkonu prvků vlastní spotřeby

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty příkonu jednotlivých spotřebičů v rámci elektrárny. U spotřebičů uvedených v předchozí kapitole 8.1 jsou hodnoty příkonu spočítány, u zbylých spotřebičů jsem použil hodnoty, které jsem dostal k dispozici v rámci podkladů od Ing. Zdeňka Vlčka z Energoprojekt Praha, a.s..

| Název                | Příkon [kW]  |
|----------------------|--------------|
| Vzduchový ventilátor | 841          |
| Kouřový ventilátor   | 2813         |
| Mlýny                | 3600         |
| Chladicí čerpadlo    | 2190         |
| Napájecí čerpadla    | 6448         |
| Kondenzátní čerpadla | 204          |
| Odsíření             | 3650         |
| Ostatní              | 3503         |
| <b>Celkem</b>        | <b>23248</b> |

Tabulka 8.9 Vlastní spotřeba EPR II

Odsíření obsahuje celý soubor zařízení pro provoz mokré vápencové vypírky. Pod pojmem ostatní uvažují zařízení, která nepřesahují příkon 800 kW (jako spotřeba transformátoru, generátoru, odvod strusky a popílku atd.). Pro lepší představu jsem hodnoty zobrazil v následujícím grafu.



Obrázek 8.1 Příkon prvků vlastní spotřeby

Z grafu je patrné, že téměř třetinu vlastní spotřeby tvoří NČ kotle. Právě optimalizací jejich regulace se budu zabývat v další části práce.

Pro porovnání uvedu ještě tabulku, kde příkon spotřebičů je vztažen na jmenovitý výkon elektrárny.

| <b>Provoz</b>        | <b>Energetické nároky [%]</b> |
|----------------------|-------------------------------|
| Mlýny                | 1,5%                          |
| Vzduchový ventilátor | 0,4%                          |
| Kouřový ventilátor   | 1,2%                          |
| Napájecí čerpadla    | 2,8%                          |
| Chladicí čerpadlo    | 0,9%                          |
| Kondenzátní čerpadla | 0,1%                          |
| Odsíření             | 1,5%                          |
| Ostatní              | 1,5%                          |
| <b>Celkem</b>        | <b>9,8%</b>                   |

Tabulka 8.10 Energetické nároky bloku EPR II

Tyto hodnoty můžeme porovnat s tabulkou 3.1, která je pro obecnou uhelnou elektrárnu. Velký rozdíl je mezi hodnotami spotřeby chladicího čerpadla, vzduchového ventilátoru a mlýnů. Ostatní hodnoty uvedené v tabulce 8.10 odpovídají hodnotám pro obecnou uhelnou elektrárnu.

## 9 Návrh regulace napájecího čerpadla

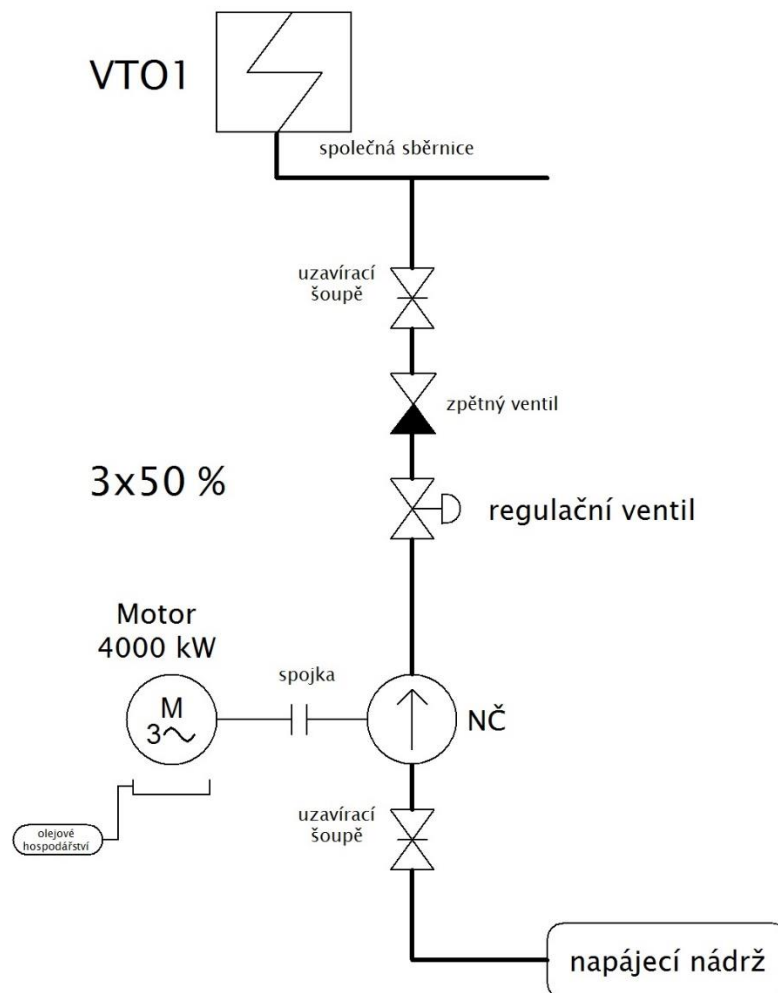
Pro výpočet ekonomické efektivity různých způsobů regulace jsem si vybral největší spotřebič v elektrárně: napájecí čerpadlo. U ostatních čerpadel a ventilátorů by postup byl obdobný, ale nebyly k dispozici podklady potřebné pro výpočty.

Ne všechny typy regulací uvedených v teoretické části se však hodí pro tento konkrétní typ provozu. Proto jsem se do výpočtů rozhodl zařadit 4 varianty regulací. Regulace 1 je řízení průtoku škrticí klapkou ve výtlačném potrubí čerpadla. Tato regulace je nejméně náročná na realizaci avšak při provozu vznikají velké energetické ztráty, a to zejména pokud je potřeba často regulovat průtok. Regulace 2 je využití olejové spojky pro řízení otáček čerpadla. Mezi elektromotor a čerpadlo je umístěna hydraulická spojka, která je schopna měnit otáčky čerpadla při konstantních otáčkách elektromotoru. Tento způsob regulace se v minulosti často využíval například pro řízení mlecího výkonu ventilátorových mlýnů. Pro svou menší účinnost je postupně nahrazována frekvenčními měniči nebo pokročilejšími hydraulickými technologiemi. Regulace 3 je použití turbonapaječky k řízení průtoku čerpadlem. Turbonapaječka je vhodná zejména pro aplikace, kde je nutné výrazně měnit průtok kapaliny. Ač sama nespotřebovává žádnou elektrickou energii, využitím vysokoenergetické páry dojde při uvažování stejného tepelného výkonu kotle ke snížení svorkového výkonu, což má stejný efekt jako kdyby elektrickou energii spotřebovala. Poslední uvažovaná regulace 4 je řízení

otáček elektromotoru pomocí frekvenčního měniče. Tato regulace je z hlediska ekonomiky provozu velmi výhodná. Má však vyšší pořizovací náklady.

## 9.1 Regulace 1 - Škrcení

Jako regulaci 1 budu uvažovat regulaci škrcením, při které jsou konstantní jak otáčky elektromotoru, tak otáčky napájecího čerpadla. Změna průtoku se řeší regulačním ventilem ve výtlačku čerpadla, který mění charakteristiku potrubí. Čím více je ventil zavírán aby zmenšil průtok, tím více energie je mařeno v regulačním ventilu. Tato regulace je velmi nevhodná v případě, že nebude provozována po většinu času na jmenovitý výkon. V minulosti se toto řešení využívalo hlavně z důvodu své jednoduchosti a nízkých investičních nákladů.



Obrázek 9.1 Regulace škrcením

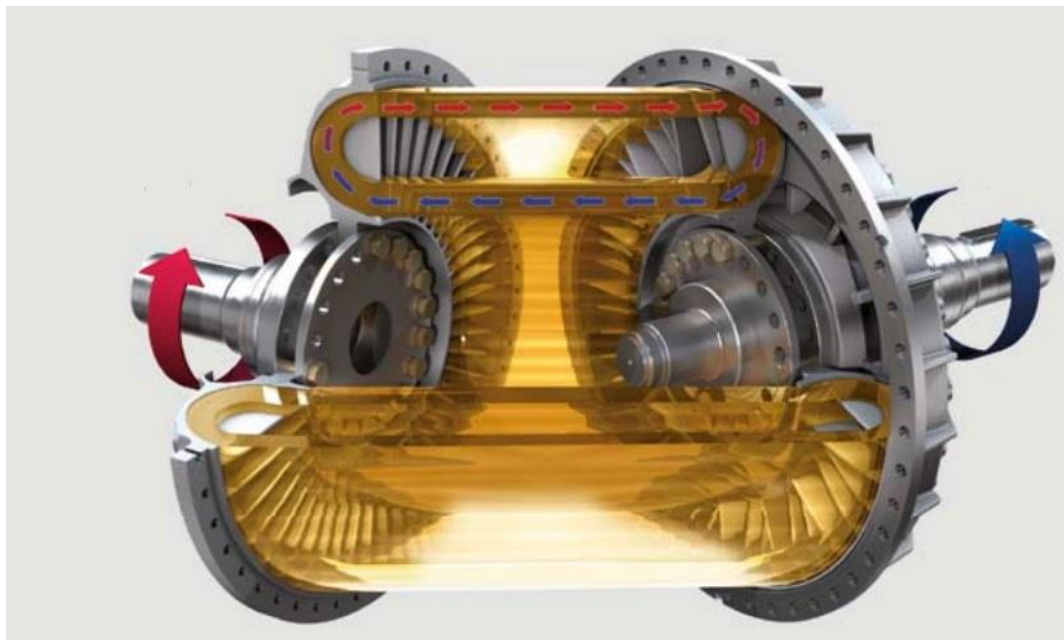
Toto řešení obsahuje elektromotoru včetně planetové převodovky, který by přes pevnou spojku byl propojen s napájecím čerpadlem. Na jeho výtlačku by byl umístěn škrťací ventil. Běžně by

v provozu byla dvě čerpadla a jedno by sloužilo jako záloha. Protože asynchronní motor bez regulace nemůže přesáhnout 3 000 ot./min a čerpadlo na jmenovité otáčky rotuje 3 962 ot./min, je nutné použít převodovku k dosažení dané rychlosti otáčení.

Škrtící ventil by v případě provozu kotle na 50% zatížení musel snést velký rozdíl tlaků. Při průtoku 45,86 kg/s čerpadlem, by na jeho výtlaku bylo 30,6 MPa a do vysokotlakého ohříváku je potřeba jen 11,8 MPa. Tlakový spád na ventilu by tedy činil 18,8 MPa, což by při časté regulaci výkonu a dlouhodobému provozu při nižších zatíženích způsobovalo rychlé opotřebení ventilu a jeho časté výměny.

## 9.2 Regulace 2 - Olejová spojka

Regulace 2 reguluje otáčky čerpadla hydraulickou spojkou Voith. Princip hydraulické spojky je velmi jednoduchý. Jedná se o soustavu dvou rotorů s radiálními lopatkami. Mezi nimi je umístěna kapalina s vyšší kinematickou viskozitou – například olej [23]. Roztáčením hnacího rotoru elektromotorem se začne pohybovat olej ve spojce. Vnitřním třením v kapalině se přenáší hnací moment na hnaný rotor spolu s hnanou hřídelí. Větší účinky má dynamická složka, která nutí olej cirkulovat po obvodu nádoby, kam jej vytlačí odstředivá síla [23]. Vzniká tak spirálovitý pohyb, který je zobrazen na obrázku 9.2.

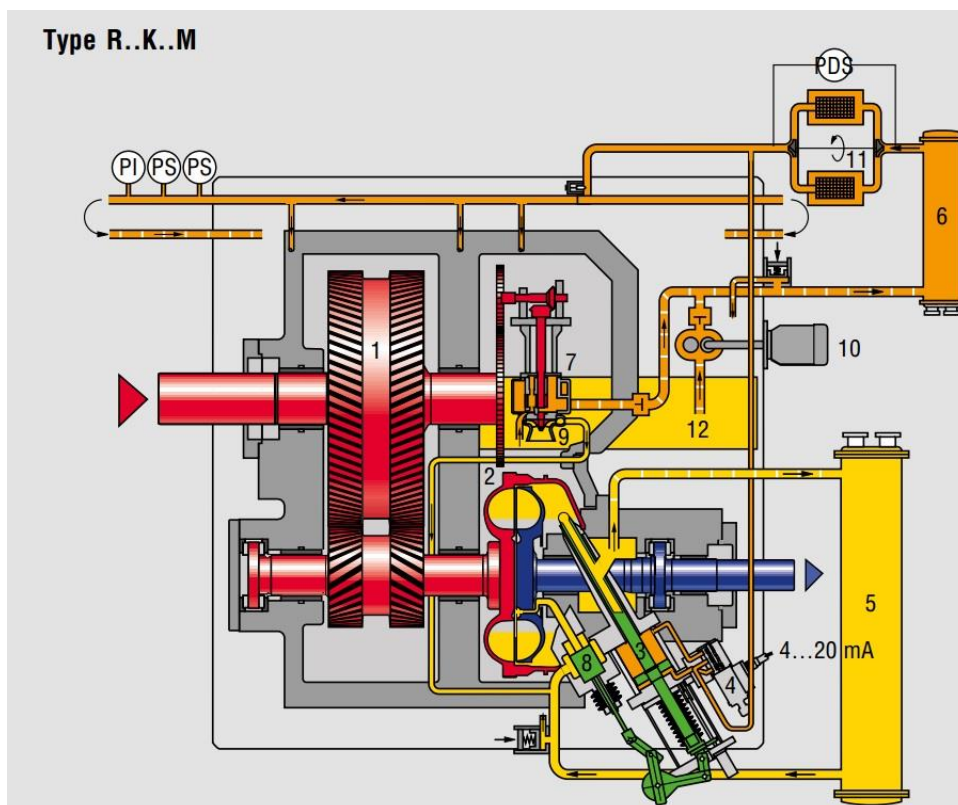


Obrázek 9.2 Hydraulická spojka [23]

Tato složka hnacího momentu, je tím větší, čím je větší rychlost otáčení a odstředivá síla [23]. Pokud by však úhlová rychlost hnaného a hnacího rotoru byla stejná, tato složka by zanikla

[23]. Proto jsou otáčky hnaného rotoru menší než otáčky hnacího. Je zde tedy určitá analogie s asynchronním pohonem. Vzhledem k tomu, že dynamická složka hnaného momentu roste s otáčkami, je rozběh připojeného zařízení plynulý i při skokovém rozběhu hnací strany na jmenovité otáčky. To zvyšuje životnost komponent, neboť ve spojce jsou tlumeny rázy a poháněné zařízení je tak méně mechanicky namáháno. Nevýhodou je, že spojka má stálý skluz a díky tomu i větší ztráty a nikdy nelze plně rozpojit a na hnané straně se musí mechanicky zabrzdit.

Řízení otáček hnané strany může být provedeno dvěma způsoby. Prvním je natáčení lopatek rotorů, jak je popsáno například v kapitole 5.1.4. Druhým způsobem je regulace hladiny oleje. Aby se uplatňovala dynamická složka momentu, spojka není nikdy úplně ponořena do oleje. Tím je zajištěno, že olej bude po obvodu cirkulovat. Upuštěním oleje zvýšíme skluz ve spojce a snížíme tak otáčky hnaného rotoru. Tento způsob využívají hydraulické spojky Voith. Protože vnitřním třením v kapalině vzniká velké množství tepla, je potřeba zajistit cirkulaci oleje mezi nádrží a spojkou. K tomu slouží odváděcí trubice, kterou se zároveň dá nastavit úroveň oleje v olejové spojce a s tím související rychlost otáčení hnaného rotoru [23]. Pro zapojení, kde je vyžadována vyšší rychlost otáčení, obsahují hydraulické spojky Voith i převodovky, které udržují optimální účinnost při požadované rychlosti. V mém případě by podle katalogu bylo nejvhodnější využít typ Voith R 17 K 400 M. Podrobnější popis jednotlivých komponent spojky je uveden na obrázku níže.

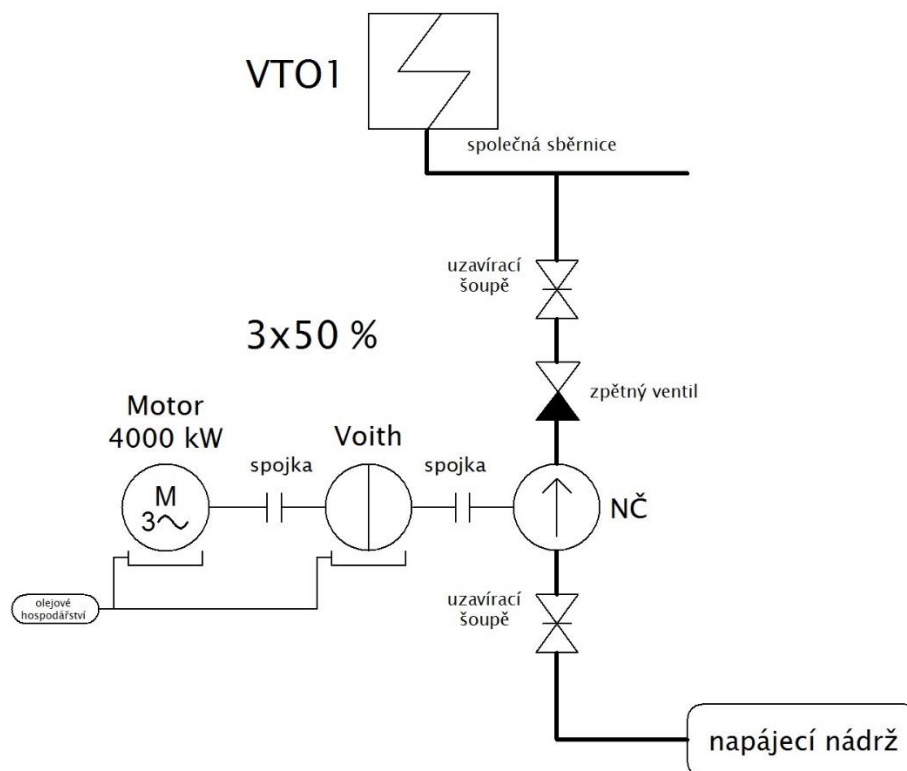


Obrázek 9.3 Voith RKM schéma [24]

- |                           |                          |                            |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 – převodovka            | 2 – hydraulická spojka   | 3 – odváděcí trubice       |
| 4 – polohovací systém     | 5 – chladič oleje spojky | 6 – chladič mazacího oleje |
| 7 – olejová pumpa         | 8 – redukční ventil      | 9 – olejová pumpa          |
| 10 – pumpa mazacího oleje | 11 – filtr               | 12 – olejová nádrž         |

Schematický náčrt zapojení této regulace je možné vidět na obrázku níže.





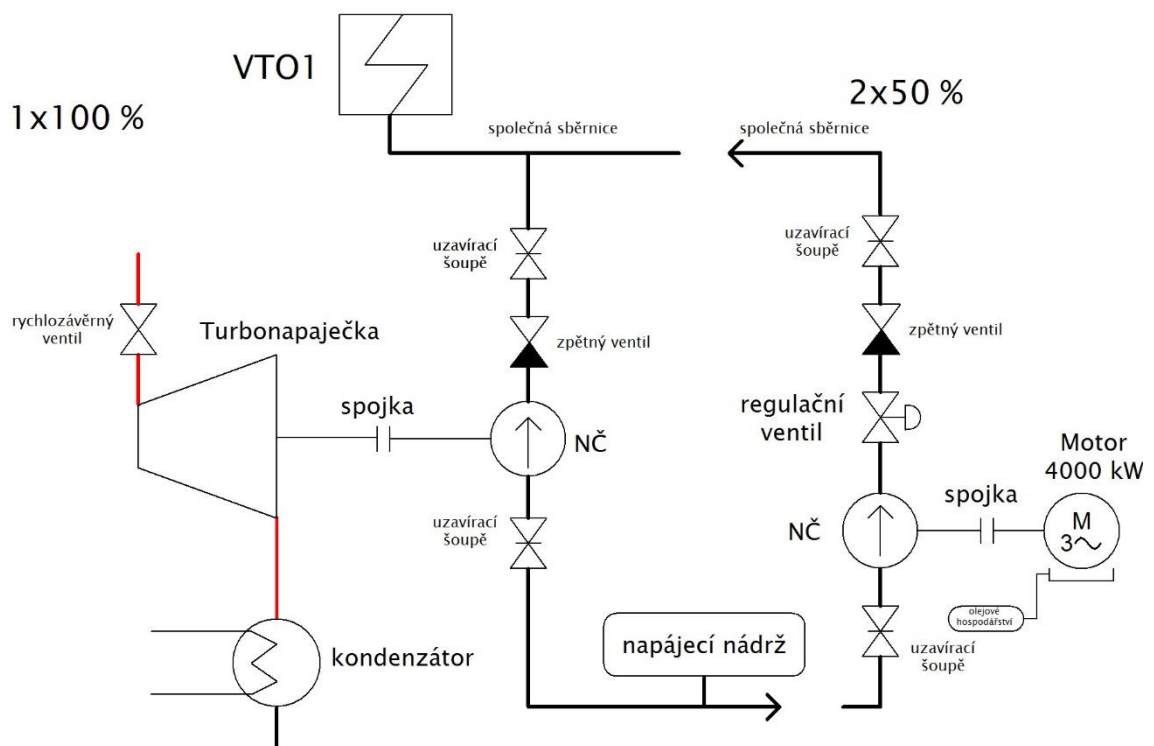
Obrázek 9.4 Regulace hydraulickou spojkou

Na společné hřídeli jsou umístěny elektromotor a hydraulická spojka Voith. Všechny komponenty jsou spojeny pevnými spojkami, které slouží pouze pro rozpojení hřídele v případě servisu dané komponenty. Čerpadlo je zde regulováno otáčkami tzn. změnou skluzu olejové spojky. Elektromotor je po celou dobu ve jmenovitých otáčkách. Stejně jako v předešlé regulaci se počítá se dvěma čerpadly na běžný provoz a se třetím čerpadlem jako zálohou.

### 9.3 Regulace 3 - Turbonapaječka

Regulace 3 je zapojení turbonapaječky jako pohonu napájecího čerpadla. Turbonapaječka je vlastně turbína s klasickou dýzovou regulací, bez dalších odběrů páry. V mém případě je pára na provoz turbonapaječky odebírána před středotlakým dílem turbíny a poté co projde turbonapaječkou je odvedena do kondenzátoru turbonapaječky a následně do hlavního kondenzátoru turbosoustrojí viz příloha 1. Výpočty byly provedeny v programu GateCycle, za což děkuji Ing. Zdeňku Hrdinovi, pracovníkovi EGP, a.s.. Turbonapaječka je ve světě dlouhou dobu zavedená, odzkoušená a může mít velký rozsah výkonů. Její nevýhodou je vysoká pořizovací cena a horší účinnost, která se projevuje hlavně při provozu na jmenovitý výkon a horší dostupnost - mnoho firem jí přestalo vyrábět. Jednou z posledních je firma Siemens, která stále výrobu zachovala. Další možnou nevýhodou je její prostorová náročnost.

V mém případě uvažuji s turbonapaječkou se 100% pokrytím jmenovitého výkonu, která by měla výkon 6,4 MW, který na svorkách znamená úbytek výkonu o 7,21 MW (vlivem rozdílné účinnosti turbonapaječky a VT a ST dílu turbíny). Turbonapaječka ovšem bude několikrát větší než stejně výkonné soustrojí s dvěma elektromotory, protože stejné dva elektromotory bude potřebovat jako zálohu v případě své poruchy. Jedná se tedy o systém  $1 \times 100\% + 2 \times 50\%$ . Elektromotory se využívají při rozběhu celého soustrojí, než dojde k prohřátí turbíny a jako rezerva v případě poruchy turbonapaječky. Protože nejsou příliš využívány, uvažuji u nich regulaci škrcením. Schéma celého zapojení je na dalším obrázku.

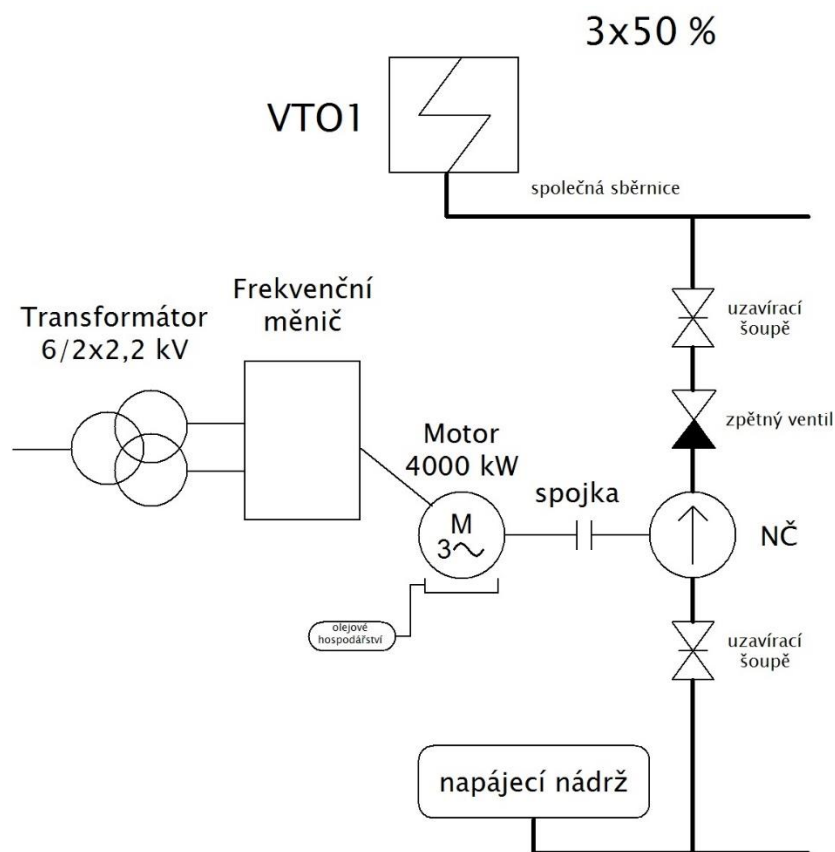


Obrázek 9.5 Schéma regulace turbonapaječkou

V takovéto podobě se tento systém regulace vyskytuje například v elektrárně Tušimice II nebo Mělník III.

## 9.4 Regulace 4 - Elektronapaječka

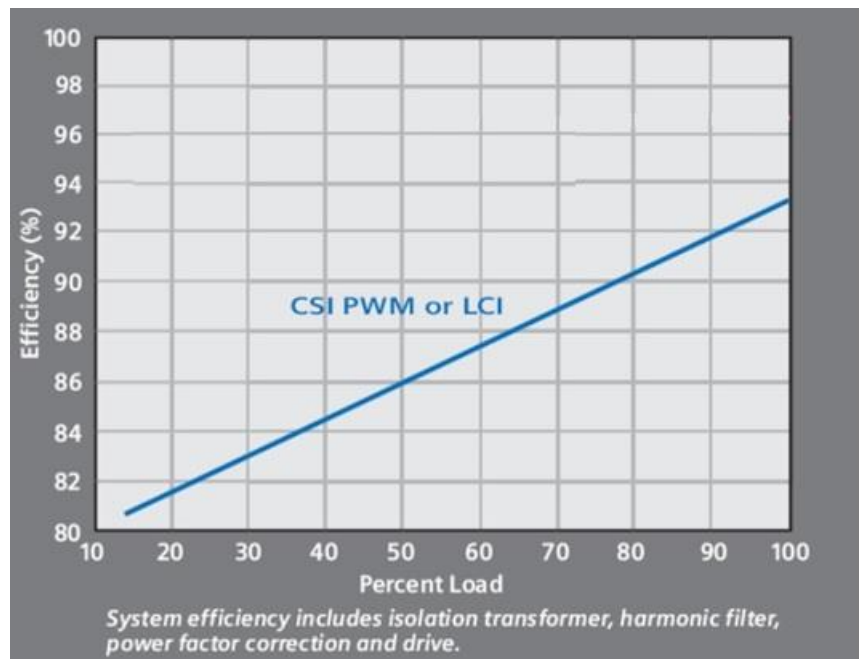
Poslední uvažovanou regulací je řízení otáček jak čerpadla, tak elektromotoru pomocí frekvenčního měniče. Tato metoda je v dnešní době nejvyužívanější, protože i přes své vyšší investiční náklady umožňuje velmi ekonomickou regulaci zařízení.



**Obrázek 9.6 Schéma regulace frekvenčním měničem**

Tato regulace zahrnuje pořízení transformátoru GEA FOL 5000 kVA 6 kV/2×2,2 kV, následuje frekvenční měnič Sinamics GM150 4,16 kV, ve 12-pulsním zapojení. Ten řídí asynchronní motor Siemens Simotics H Compact PLUS 1RN4, 4 MW, 4,16 kV. Čerpadlo je uvažováno jako v předchozích regulacích od firmy KSB typ HGC 5/9.

Účinnost celého zapojení uvažují po konzultaci s Ing. Pavlem Křížem z firmy Siemens lineárně závislou na otáčkách zařízení. To přibližně odpovídá obrázku níže, kde je uvedena závislost účinnosti na zatížení.



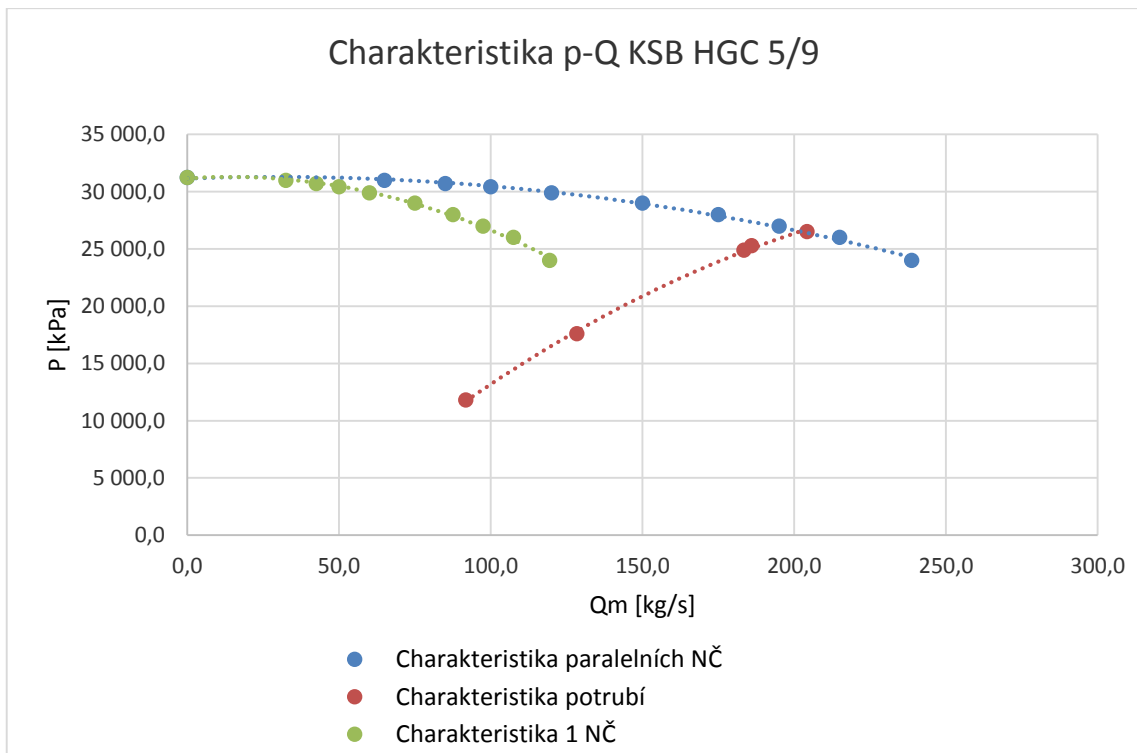
Obrázek 9.7 Závislost účinnosti na zatížení FM [25]

Frekvenční měnič je velmi sofistikované zařízení a proto jsou výkonové IGBT tranzistory vybaveny by-passy pro případ, že by některý z nich vypověděl službu. Pro měniče velkých výkonů je také potřeba dostatek prostoru a speciální větrací systém, s čímž je nutné počítat do finálního návrhu.

Frekvenční měnič se skládá z několika funkčních částí. Jedná se o sadu filtrů, které zpět do sítě nepouštějí vyšší harmonické produkované měničem. Následuje napájecí transformátor a diodový usměrňovač spolu se stejnosměrným meziobvodem s kondenzátorovými bateriemi. Poté až je samotný měnič, který ve dvanácti pulsním zapojení IGBT tranzistorů přemění stejnosměrný proud na střídavý o požadované frekvenci. Mezi měničem a motorem je pak umístěn ještě výstupní filtr, který vyhlazuje sinusový tvar proudu a napětí.

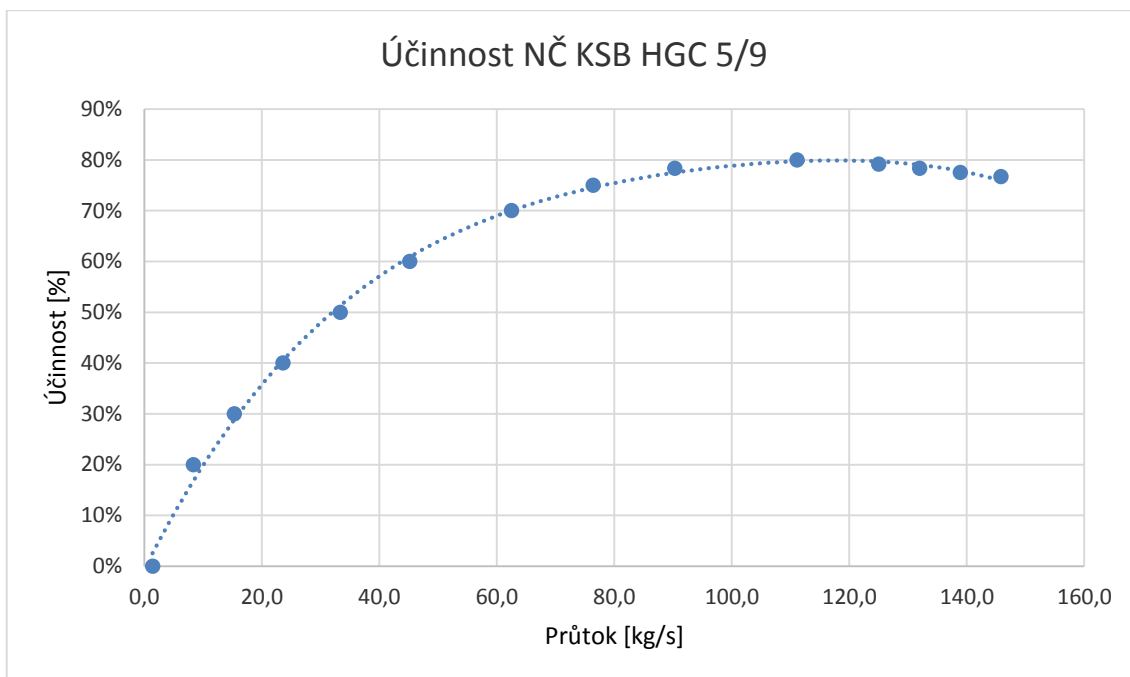
## 9.5 Vstupní parametry

Podmínkou pro zahájení výpočtu bylo zjištění několika zásadních charakteristik daného typu čerpadla, viz příloha 2. Základní charakteristikou je přitom závislost tlaku ve výtlačném potrubí čerpadla na množství čerpané kapaliny. Charakteristiky z dostupných podkladů jsem převedl do tabulkového editoru Excel, a pro přehlednost vynesl do grafů a aproximoval parabolou. Do stejného grafu jsem vynesl i potrubní charakteristiku.



**Obrázek 9.8 Charakteristika p-Q**

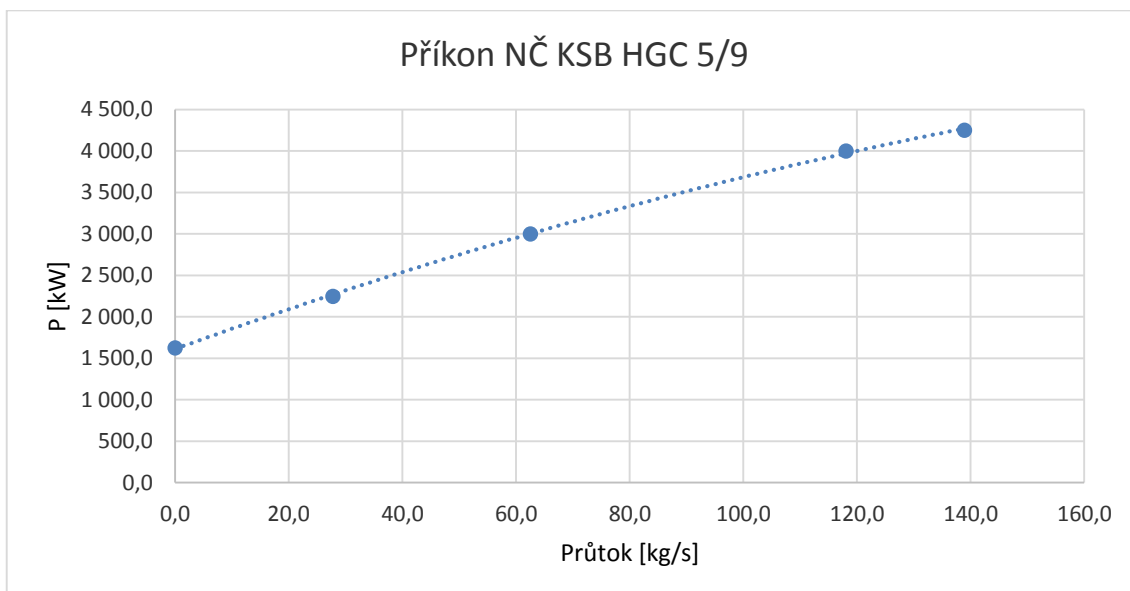
Jelikož jsou napájecí čerpadla zapojena paralelně, sčítají se průtočná množství a výsledná charakteristika se prodlouží podél osy x. Druhou důležitou charakteristikou napájecího čerpadla je závislost mechanické účinnosti na průtoku kapaliny. Stejně jako v předchozím případě jsem hodnoty odečetl z dokumentace k čerpadlu.



Obrázek 9.9 Charakteristika účinnosti

V tomto případě jsem body aproximoval polynomem čtvrtého stupně, jelikož mi parabola nevycházela dostatečně přesně.

Poslední ze základních charakteristik je závislost příkonu napájecího čerpadla na průtoku. Ta je důležitá pro výpočet při regulaci škrcením, kdy se nebude regulovat rychlost čerpadla a nebude se tedy měnit jeho p-Q charakteristika.



Obrázek 9.10 Příkon napájecího čerpadla

## 9.6 Výpočty

Výpočty spotřeby elektrické energie jsem prováděl pomocí účinnosti jednotlivých zařízení v daných provozních bodech. Pro všechny regulace 1, 2, 4 jsem uvažoval navíc k účinnosti napájecího čerpadla i účinnost motoru, odbočkového transformátoru, vedení a pro dané varianty i účinnost olejové spojky a frekvenčního měniče.

Pro regulaci 1 jsem vycházel z příkonové charakteristiky čerpadla a pro jednotlivé výkony kotle jsem dopočítal potřebný příkon na spojce elektromotoru. Pro ostatní regulace řídicí otáčky čerpadla, jsem afinními vztahy dopočítal příkony v závislosti na výkonu kotle.

Jako první jsem spočetl afinní konstantu  $k$  k danému průtoku:

$$k = \frac{p}{Q_m} \quad 6$$

Z rovnosti rovnic 7 a 8, jsem vypočítal afinní průtok  $Q'$  a afinní tlak  $p'$ .

$$p' = k \cdot Q' \quad 7$$

$$p' = a \cdot Q'^2 + b \cdot Q' + c \quad 8$$

Koeficienty  $a, b, c$  jsou koeficienty p-Q charakteristiky čerpadla aproximované parabolou. Čerpadlo KSB HGC 5/9 má matematický zápis charakteristiky p-Q:

$$p = -0,638 \cdot Q^2 + 18,517 \cdot Q + 31156$$

Jejich paralelní zapojení:

$$p = -0,159 \cdot Q^2 + 9,259 \cdot Q + 31156$$

Pro hodnoty afinního průtoku jsem dále dopočítal účinnosti v těchto bodech, které jsou stejné jako účinnosti v mnou hledaných průtocích. Pro dané výkony jsem přepočítal požadované otáčky čerpadla. Výsledná tabulku 9.1 je uvedena níže.

| <b>Výpočet otáčkového řízení přes afinní paraboly</b> |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|
| Výkon kotle   | 100 %    | 70%      | 50%      |
| $k$   | 0,74     | 1,07     | 1,4      |
| Otáčky [ot./min]                                      | 3 797,1  | 3 117,7  | 2 519,7  |
| Afinní tlak [kPa]                                     | 27 089,6 | 28 422,3 | 29 175,8 |
| Afinní průtok [kg/s]                                  | 191,4    | 163,2    | 144,2    |
| Účinnost [%]  | 0,783    | 0,758    | 0,733    |

**Tabulka 9.1** Výpočet otáčkového řízení přes afinní paraboly

Hodnoty účinností napájecího čerpadla využiji ve výpočtu příkonu potřebného na spojnici s elektromotorem.

| <b>Vypočtené hodnoty NČ</b>            |                |                |              |
|--|----------------|----------------|--------------|
| Výkon kotle                            | 100 %          | 70%            | 50%          |
| Změna měrné energie $\Delta Y$ [kJ/kg] | 13,8           | 10,7           | 7,3          |
| Výkon [kW]                             | 2 524,0        | 1 368,7        | 671,3        |
| Účinnost [%]                           | 0,783          | 0,758          | 0,733        |
| <b><i>Příkon 1 NČ [kW]</i></b>         | <b>3 223,9</b> | <b>1 805,8</b> | <b>915,2</b> |

**Tabulka 9.2** Vypočtené hodnoty napájecího čerpadla

Hodnoty příkonů na spojnici jsou společné pro regulace 2 a 4. Pro regulaci 3 byl vypočítán úbytek výkonu na svorkách generátoru a regulace 1 vychází z příkonové charakteristiky čerpadla.

## 9.7 Výsledky

Pro jednotlivé varianty mi vyšlo následující snížení výkonu na svorkách blokového transformátoru. Analogicky se jedná o výkon (popřípadě energii), který není možné dodat do sítě, jelikož je využit ve vlastní spotřebě a neprojde tedy blokovým transformátorem, ale půjde z generátoru rovnou přes odbočkový transformátor do vlastní spotřeby. V případě varianty s turbonapaječkou se přímo snižuje jmenovitý výkon elektrárny.



| <b>Jmenovitý výkon kotle</b> |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Účinnost zařízení [%]</i> | Regulace 1   | Regulace 2   | Regulace 3   | Regulace 4   |
| Odbočkový transformátor      | 0,996        | 0,996        |              | 0,996        |
| Elektrické vedení            | 0,999        | 0,999        |              | 0,999        |
| Elektrický pohon             | 0,96         | 0,96         |              |              |
| FM+trafo+pohon               |              |              |              | 0,94         |
| Hydraulická spojka           |              | 0,87         |              |              |
| Mechanická převodovka        | 0,985        |              |              |              |
| <b>Celková účinnost [%]</b>  | <b>0,941</b> | <b>0,829</b> | <b>1,000</b> | <b>0,936</b> |
| <b>Vlastní spotřeba [kW]</b> | <b>7531</b>  | <b>7774</b>  | <b>7 210</b> | <b>6885</b>  |

Tabulka 9.3 Úbytek energie při jmenovitém výkonu

| <b>70% výkon kotle</b>       |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Účinnost zařízení [%]</i> | Regulace 1   | Regulace 2   | Regulace 3   | Regulace 4   |
| Odbočkový transformátor      | 0,996        | 0,996        |              | 0,996        |
| Elektrické vedení            | 0,999        | 0,999        |              | 0,999        |
| Elektrický pohon             | 0,96         | 0,96         |              |              |
| FM+trafo+pohon               |              |              |              | 0,89         |
| Hydraulická spojka           |              | 0,77         |              |              |
| Mechanická převodovka        | 0,985        |              |              |              |
| <b>Celková účinnost [%]</b>  | <b>0,941</b> | <b>0,739</b> | <b>1,000</b> | <b>0,854</b> |
| <b>Vlastní spotřeba [kW]</b> | <b>6453</b>  | <b>4887</b>  | <b>3 697</b> | <b>4227</b>  |

Tabulka 9.4 Úbytek energie při 70% výkonu

| <b>50% výkon kotle</b>       |              |              |              |              |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <i>Účinnost zařízení [%]</i> | Regulace 1   | Regulace 2   | Regulace 3   | Regulace 4   |
| Odbočkový transformátor      | 0,996        | 0,996        |              | 0,996        |
| Elektrické vedení            | 0,999        | 0,999        |              | 0,999        |
| Elektrický pohon             | 0,96         | 0,96         |              |              |
| FM+trafo+pohon               |              |              |              | 0,86         |
| Hydraulická spojka           |              | 0,71         |              |              |
| Mechanická převodovka        | 0,985        |              |              |              |
| <b>Celková účinnost [%]</b>  | <b>0,941</b> | <b>0,678</b> | <b>1,000</b> | <b>0,825</b> |
| <b>Vlastní spotřeba [kW]</b> | <b>5661</b>  | <b>2697</b>  | <b>1 850</b> | <b>2219</b>  |

Tabulka 9.5 Úbytek energie při 50% výkonu

Hodnoty účinností jednotlivých zařízení jsem konzultoval s Ing. Vlčkem z Energoprojektu Praha, a.s.. Z tabulek je patrné, že při regulaci 1 – škrcení, se hodnoty mění jen minimálně. Největší rozdíl je při nejmenším uvažovaném výkonu kotle. V tom je naopak nejméně náročná turbonapajevka, která při nižších výkonech dosahuje nejmenších úbytků výkonu na svorkách transformátoru. Při jmenovitém výkonu je nejméně energeticky náročná regulace frekvenčním měničem.

## 10 Ekonomické analýzy

Pro každý energetický projekt je důležité správně určit ekonomické vstupní parametry. Jedním z hlavních je určení diskontu pro danou firmu nebo projekt. Diskont je v této práci určován pro firmu ČEZ a.s., která je vlastníkem a budoucím provozovatelem modernizovaných bloků EPR II. Rozhodl jsem se diskont určit pomocí metody CAPM a to před zdaněním a následně aplikovat do WACC.

### 10.1 Výnosnost vlastního kapitálu

Model CAPM slouží k oceňování kapitálových aktiv. Vychází z rovnice

$$r_e = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) \quad 9$$

Kde  $r_e$  je brán jako výnos vlastního kapitálu.

Část  $(r_m - r_f)$  se nazývá MRP (Market Risk Premium). Tato hodnota určuje rizikovou přírážku daného trhu. V rámci této práce budu uvažovat MRP pro Českou republiku, určenou jedním z profesorů z Navarrské univerzity, který pomocí dotazníkového šetření určoval přírážku trhu v rámci 88 zemí. Pro Českou republiku bylo MRP určeno na 6,5 % [26].

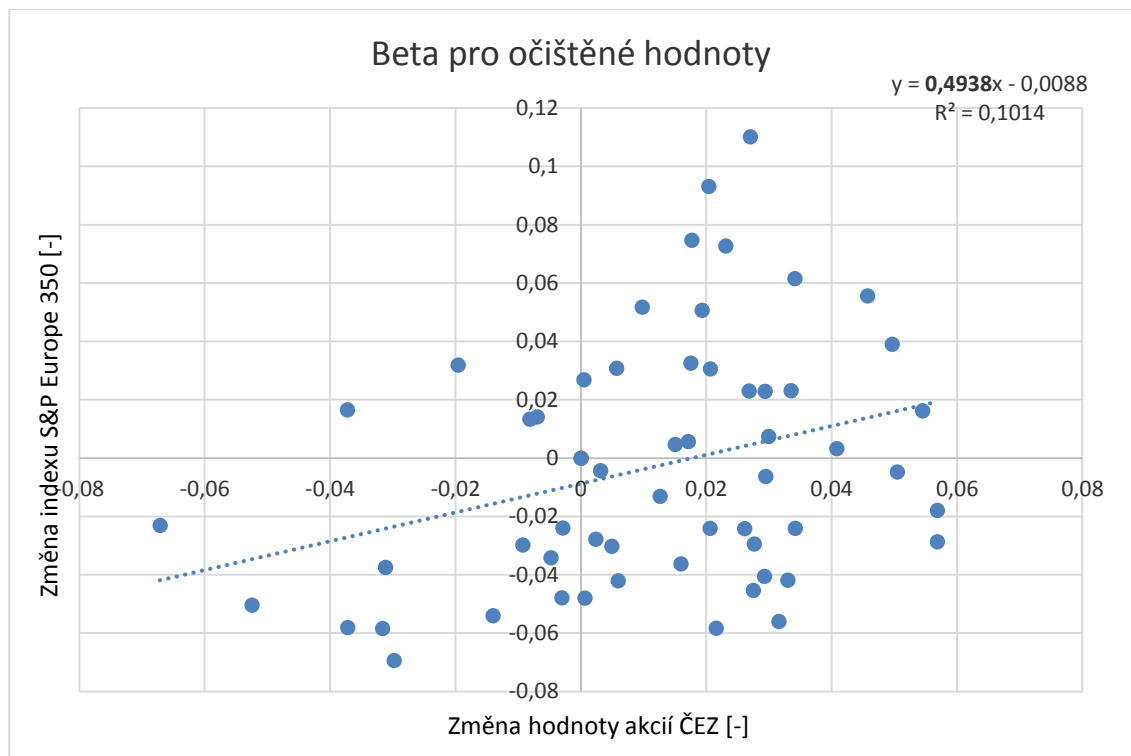
$r_f$  jako bezrizikovou úrokovou míru jsem zvolil z Německých státních dluhopisů. Německo v rámci ratingu jednotlivých ekonomických agentur dostává nejvyšší ohodnocení a tak se jeho deseti-leté dluhopisy dají považovat za nejméně rizikové. Na rozdíl od dluhopisů České republiky, která má například podle Moody's rating A1.

K výpočtu koeficientu Beta jsem využil měsíční průměry hodnoty akcií firmy ČEZ, a.s. a hodnoty indexu S&P Europe 350. Z hodnot za posledních 5 let jsem vytvořil hodnoty procentuální měsíční změny, jak je uvedeno na příkladu níže pro první dva měsíce hodnoty akcií firmy ČEZ, a.s..

$$\Delta = \frac{CEZ_{tn+1}}{CEZ_{tn}} - 1 = \frac{913,7}{893,06} - 1 = 0,023$$

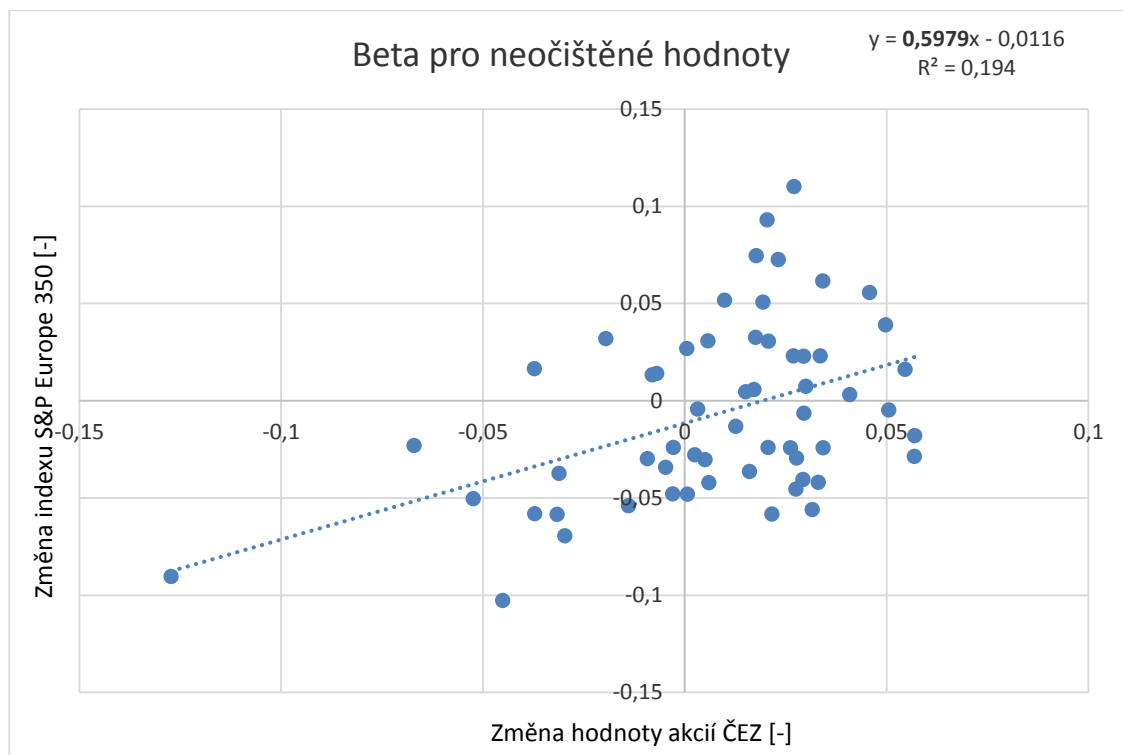
Následně jsem provedl lineární regresi těchto měsíčních hodnot abych získal koeficient Beta. Vzhledem k tomu, že hodnoty akcií jsou pro celou firmu ČEZ, a.s., ovlivňuje je více faktorů, než kdyby se jednalo pouze o hodnoty akcií části firmy ČEZ, a.s., která by se starala pouze o provoz elektrárny. Na základě této skutečnosti jsem vytvořil model, který podle zvoleného

násobku směrodatné odchylky očistí tato data o extrémní hodnoty. Běžně se očišťuje o hodnoty větší než dvojnásobek směrodatné odchylky, v mém případě se domnívám, že rizikovost projektu je menší a proto jsem zvolil koeficient 1,5. Pokud bych použil hodnotu  $2 \times$  směrodatná odchylka, všechna vstupní data by zůstala zachována a koeficient Beta by dosahoval hodnoty 0,598. To přibližně odpovídá hodnotám, které na stránkách uveřejňují agentury Morningstar a CNBC, které koeficient Beta firmy ČEZ, a.s. určily na 0,62 (únor 2015).



Obrázek 10.1 Beta pro očištěné hodnoty

Pro porovnání ještě uvedu graf pro neočištěné hodnoty.



**Obrázek 10.2 Beta pro neočištěné hodnoty**

Hlavním problémem tedy je podmínka odstranění hodnot - aby hodnoty mohly být odstraněny, musí obě (jak změna hodnoty akcií, tak změna indexu S&P 350) překračovat mez zadanou násobkem směrodatné odchylky, což se v mém případě nestalo. Proto jsem určil nižší práh, při kterém jsou extrémní hodnoty již odstraněny. Výsledkem je snížení rizikovosti akcií firmy ČEZ, a.s..

Pro přehlednost uvedu všechna data, která jsem použil ve výpočtu CAPM do jedné tabulky.

|       |       |
|-------|-------|
| $r_f$ | 0,37% |
| MRP   | 6,50% |
| Beta  | 0,49  |

**Tabulka 10.1 Hodnoty modelu CAPM**

Výsledný náklad vlastního kapitálu z těchto vstupních hodnot podle rovnice 9 vychází 3,58 %.

## 10.2 WACC

Poté co jsem určil náklad vlastního kapitálu pomocí metody CAPM, je nutné určit i náklad kapitálu cizího. Firma ČEZ, a.s. ve svých výročních zprávách velmi podrobně vypisuje skladbu svého cizího kapitálu. Uvádí jak výpis všech svých dluhopisů a jejich parametrů, ale také objem bankovních úvěrů, u kterých uvádí, že jsou s úrokem pod 2 %. Protože výpočet výnosnosti všech dluhopisů by byl velmi náročný, rozhodl jsem se využít jeden dluhopis jako zástupný.

Jako bezrizikovou úrokovou míru uvažuji desetileté dluhopisy, jako zástupný dluhopis jsem si vybral patnáctiletý dluhopis, který firma ČEZ, a.s. emitovala v roce 2013. Parametry dluhopisu CEZ AS 13/28 MTN jsou k dispozici na stránkách firmy ČEZ, a.s.<sup>1</sup>. Jeho aktuální cenu jsem dohledal na stránkách frankfurtské burzy.

| CEZ AS 13/28 MTN  |              |
|-------------------|--------------|
| Kupon             | 30           |
| Nominální hodnota | 1000         |
| Cena              | 1149         |
| <b>Výnos</b>      | <b>1,79%</b> |

Protože WACC počítám před zdaněním, výpočet jsem provedl následujícím způsobem

$$WACC = \frac{D}{D + E} \cdot r_c + \frac{E}{D + E} \cdot \frac{r_e}{(1 - d)} \quad 10$$

- D výše dluhu
- E výše vlastního jmění
- $r_c$  náklad cizího kapitálu
- $r_e$  náklad vlastního kapitálu
- d daň 19 %

Podle poslední výroční zprávy pro rok 2013 má firma ČEZ, a.s. dluhy ve výši 187 mld. Kč a vlastní jmění v hodnotě 258 mld. Kč. Struktura dluhu byla z větší části tvořena obligacemi a jen z 16,5 mld. Kč byla tvořena bankovními úvěry. K určení celkového nákladu vlastního kapitálu jsem využil vážený průměr z nákladů obligací a bankovních úvěrů, kde pro obligace uvažuji 1,79 % a pro bankovní úvěry 2%, dostávám výsledný  $r_c$  ve výši 1,81 %.

Po dosazení všech hodnot do vzorce **10** mi vyšla hodnota WACC a tedy i mého uvažovaného diskontu 3,32 %.

### 10.3 Cena elektrické energie

Abych mohl vytvořit ekonomický model, který by porovnával náklady na dobu životnosti celého projektu 25 let, potřeboval jsem ocenit elektrickou energii, kterou pohony napájecích čerpadel budou odebírat. K problému jsem se rozhodl přistoupit z několika stran. První ocenění je, že elektrická energie, kterou využiji pro vlastní spotřebu, je energie kterou nemohu prodat. Jedná se o opportunity cost. Tudíž pro cenu elektřiny budu brát ceny z burzy PXE. Druhým

<sup>1</sup> [http://www.cez.cz/edee/content/file/investori/obligace/final\\_terms\\_500\\_eur\\_2028.pdf](http://www.cez.cz/edee/content/file/investori/obligace/final_terms_500_eur_2028.pdf)

oceněním je opačná strategie. Elektrická energie, kterou spotřebuji v rámci elektrárny, byla v elektrárně s určitými náklady vyrobena a tyto náklady vztažené na jednotku vyrobené elektrické energie, využiji do srovnání. Třetí pohled je z makroekonomického hlediska. Pomocí marginálních nákladů závěrné elektrárny. Tou je zdroj, jehož výstavba a provoz není do budoucna nijak omezen např. docházející palivo, legislativa, vhodné umístění a zároveň se jedná o stabilní zdroj energie. Za takovéto zdroje můžeme označit pouze dva druhy elektráren – jadernou a paroplynovou. Druhou jmenovanou však v práci uvažovat nebudu, jelikož její provoz není za dnešních podmínek ekonomicky výhodný.

### **Ocenění 1 – Burza**

Pro první ocenění jsem tedy hodnoty vyhledal na PXE. Podle mých informací, které jsem dostal z firmy ČEZ, a.s., bude elektrárna díky své vysoké účinnosti provozována v základním zatížení a neplánuje se využívat ji k regulaci. Proto jsem jako základní vzal hodnotu Base load pro rok 2016 s cenou 31,75 EUR za MWh, což při kurzu 27,35 EUR/CZK činí v přepočtu 868 Kč/MWh.

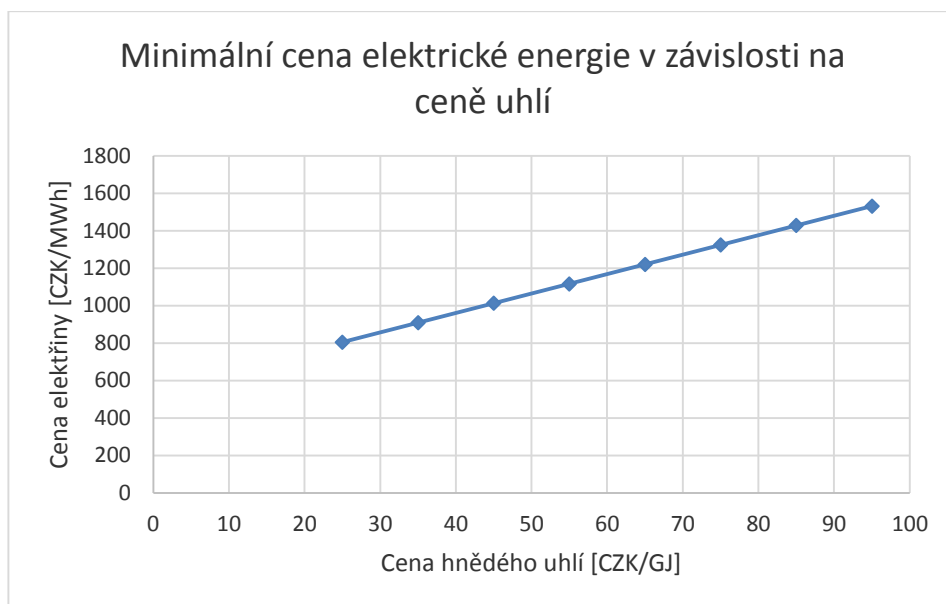
### **Ocenění 2 – Náklady výroby**

Pro druhé ocenění jsem v rámci výpočtů v kapitole 8.1 spočítal kolik tun CO<sub>2</sub> vyprodukuje elektrárna za jednu hodinu provozu na jmenovitý výkon. Tato hodnota spolu s dobou využití maxima elektrárny dá dohromady, kolik tun emisí CO<sub>2</sub> elektrárna vyprodukuje za jeden rok. Cenu emisních povolenek jsem nastavil konstantní po dobu životnosti elektrárny ve výši 17,5 EUR/t [27].

Investiční náklady KO EPR II jsou podle veřejně dostupných dat 32 mld. Kč. KO EPR II obnovuje 3 bloky elektrárny a celkový výkon bude 750 MW. Měrné investiční náklady v tomto případě vycházejí 42,6 mil. Kč/MW.

Cena hnědého uhlí byla největší problém. Z veřejně dostupných zdrojů ji stanovit nelze a použít cenu pro maloobchodníky nedává velký smysl. Proto jsem prošel studii, které jsem dostal k dispozici jako podklady, popřípadě dohledal na internetu. V rámci studie Porovnání alternativních pohonů napájecích soustrojí z roku 2006 se počítá z cenou 27,07 Kč/GJ pro uhlí do elektrárny Ledvice. Podle sektorové analýzy Institutu energetických informací, byl v roce 2013 uzavřen kontrakt firmami ČEZ, a.s. a Czech Coal, a.s. na dodávku hnědého uhlí pro elektrárnu Počeradý za cenu 38,80 Kč/GJ [28]. V ceně nejsou uvažovány dopravní náklady, ale lom Vršany s elektrárnou sousedí a tak dopravní náklady nebudou vysoké. Přímo pro EPR II

byla vypracována studie Ekonomické posouzení rekonstrukce elektrárny Prunéřov, kde je počítáno s cenou 46 Kč/GJ [29]. Studie je z roku 2010.



Obrázek 10.3 Minimální cena elektřiny v závislosti na ceně uhlí

V grafu na obrázku 10.3 jsou již uvedeny výsledky výpočtů po zahrnutí všech vstupních údajů. Je patrné, že cena uhlí je důležitým faktorem při výpočtu variabilních nákladů elektrárny. Ty se při ceně uhlí mezi 25 a 95 Kč/GJ pohybují mezi 900 až 1700 Kč/MWh. Cenu uhlí jsem nastavil na 50 Kč/GJ. V rámci konzultací mi bylo Ing. Tomášem Mánzelem řečeno, že cenu uhlí jsem určil vyšší, avšak při zahrnutí ostatních variabilních nákladů, které jsem naopak snížil, se pohybují ve správné úrovni. Ročně jsem ji pak dále navyšoval o 2 %. Z tepelného výkonu kotle a výhřevnosti paliva jsem spotřebu hnědého uhlí určil na 193 t/h.

Informace o nákladech na provoz a údržbu jsem vyhledal ve studii Projected cost of generating electricity od International energy agency [30]. Zde je pro 600 MW hnědouhelnou elektrárnu s granulačním kotlem a hrubou účinností 43 % počítáno s náklady 8,53 USD/MWh. V přepočtu tedy uvažuji s částkou 213,25 Kč/MWh. Jelikož jsou náklady vztaženy na vyrobenou MWh, uvažoval jsem stejnou hodnotu i pro Prunéřov. Ze stejné studie jsem pak použil náklady na vyřazení elektrárny z provozu 0,14 USD/MWh, čili 3,5 Kč/MWh.

Tato studie však počítá do palivových nákladů i zbylé variabilní náklady. Proto jsem se rozhodl palivové náklady určit jinak a k hodnotě variabilních nákladů se dostat poté. Pokud bych do této studie dosadil cenu paliva 50 Kč/GJ, ostatní variabilní náklady by dosáhly výše 75 Kč/MWh. Podle studie pro Prunéřov, jsou tyto variabilní náklady elektrárny 150 Kč/MWh [29]. V mých

výpočtech jsem se rozhodl použít hodnotu 112 Kč/MWh. Tyto náklady souvisí například s uložením popílku, energosádrovce apod.

Pro provoz EPR II v základním zatížení jsem počítal s dobou využití maxima 7 500 h a pro provoz z řízení EIA 6 300 h (popis obou druhů provozů je v následující kapitole 10.4). Výpočet jsem provedl metodou minimální ceny. Protože ve studii skupiny OECD byl uvažován diskont 5 %, použil jsem stejnou hodnotu i z důvodu, abych mohl pro ilustraci porovnat marginální náklady uhelné a jaderné elektrárny.

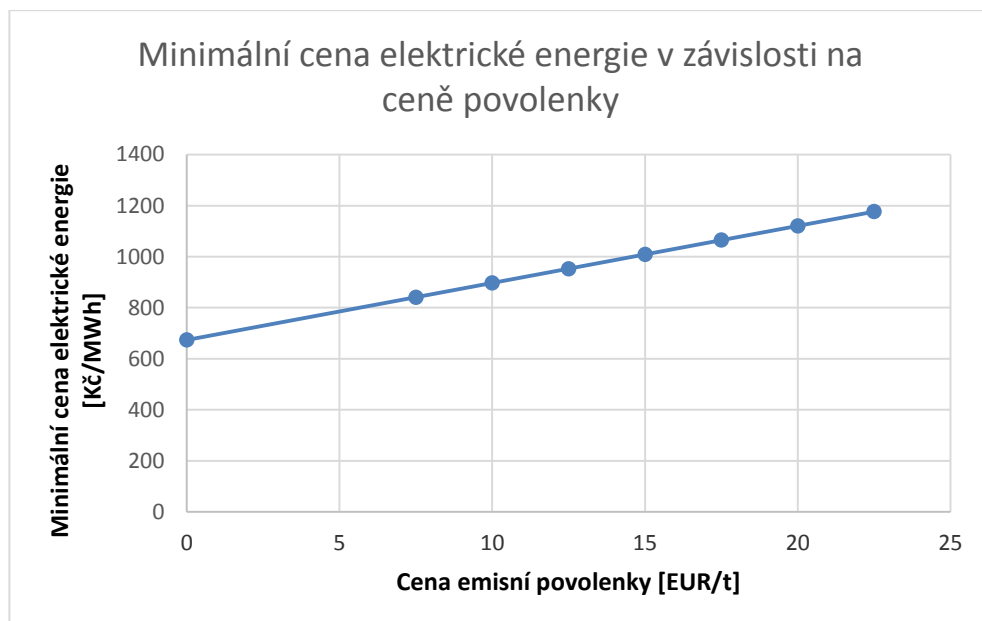
Pro výpočet ekonomické efektivnosti jsou však v tomto případě potřebné jen variabilní náklady. Konkrétně se jedná o palivové, ostatní variabilní náklady a náklady na emise CO<sub>2</sub>. Ty sice budou pro všechny varianty stejné, neboť provoz elektrárny se nemění, ale mění se objem elektrické energie dodané do sítě. Mění se tedy velikost vlastní spotřeby a s ní i minimální cena vyrobené elektrické energie. To je patrné v tabulkách 9.3, 9.4 a 9.5 na str. 50. V následující tabulce je uvedena minimální cena elektrické energie pro jednotlivé regulace v daných provozech.

| <b>Regulace</b> | <b>Provoz EIA</b> | <b>Provoz Základní</b> |
|-----------------|-------------------|------------------------|
| Regulace 1      | 1 073 Kč/MWh      | 1 071 Kč/MWh           |
| Regulace 2      | 1 069 Kč/MWh      | 1 070 Kč/MWh           |
| Regulace 3      | 1 065 Kč/MWh      | 1 067 Kč/MWh           |
| Regulace 4      | 1 065 Kč/MWh      | 1 066 Kč/MWh           |

**Tabulka 10.2** Minimální cena elektrické energie z variabilních nákladů

Tyto ceny jsou při uvažované ceně emisních povolenek 17,5 EUR/t. Z tohoto důvodu vycházejí výše, než se aktuálně pohybují ceny na burze. Při uvažování dnešních cen emisních povolenek okolo 7 EUR/t, by se cena produkované elektrické energie z EPR II pohybovala na úrovni 830 Kč/MWh. Znázorněno je to na obrázku níže.





Obrázek 10.4 Minimální cena elektrické energie v závislosti na ceně povolenky

Tyto poznatky mě přesvědčují o správném odhadu variabilních nákladů elektrárny.

### Ocenění 3 – marginální náklady

U varianty s jadernou elektrárnou jsem vycházel pouze ze studie OECD. Parametry výpočtu přidávám do tabulky níže.

| Parametry jaderné elektrárny |          |         |
|------------------------------|----------|---------|
| Měrné investiční náklady     | [Kč/kW]  | 146 450 |
| Decomissioning               | [Kč/MWh] | 5,5     |
| Palivové náklady             | [Kč/MWh] | 233,25  |
| Provozní a údržbové náklady  | [Kč/MWh] | 368,5   |
| Zatěžovatel                  |          | 0,85    |
| Vlastní spotřeba             |          | 6%      |
| Diskont                      |          | 5%      |
| Doba výstavby                | [roky]   | 7       |

Tabulka 10.3 Parametry jaderné elektrárny

V tomto případě mi marginální cena elektrické energie vyšla 1932 Kč/MWh. Pro porovnání marginální cena energie z uhelné elektrárny: provoz EIA 1952 Kč/MWh.

## 10.4 Provoz bloku

V rámci diagramu denního zatížení rozeznáváme tři druhy zdrojů. Špičkové, pološpičkové a základní. Toto rozdělení odpovídá nejen tomu, kterou část daná elektrárna výkonově pokrývá, ale i tomu, jak moc variabilní je její výkon v průběhu dne. Jelikož EPR II bude provozován jako elektrárna v základním zatížení, předpokládám vysokou dobu využití maxima. Podle dostupných informací z dokumentu EIA, bude elektrárna provozována s dobou využití maxima 6 300 h. Dále v textu uvádím jako provoz EIA. To se mi v rámci základního zatížení zdálo málo, a proto jsem přidal ještě variantu, kde doba využití maxima bude 7 500 h. Dále označuji jako provoz základní. To odpovídá provozu jaký je například v JE Dukovany, kde koeficient využití dosáhl v roce 2013 85,9 %. To je po přepočtu 7 524 hodin. Pro obě varianty jsem využil hodnoty z výpočtových schémat pro Basic design elektrárny. Pozor je nutné si dát na fakt, že 50% výkon kotle neznámá též 50 % vyrobené energie. Z výpočtových schémat je patrné, že 50 % výkonu kotle znamená 121,87 MW na svorkách generátoru, což je o něco méně než polovina ze jmenovitého výkonu.

### **Provoz EIA**

Při provozu bloku po dobu 6 300 hodin na jmenovitý výkon by byla vyrobena elektrická energie 1,575 TWh. Tato vyrobená energie musí být stejná i při proměnném zatížení elektrárny. Proto jsem určil, že elektrárna na jmenovitý výkon bude v provozu po 4 410 hodin a na 70 % výkonu bude v provozu 1 809 hodin. Aby bylo vyrobeno stejné množství energie, po 1 260 h musí elektrárna udržovat 50 % výkonu kotle. Celkem tedy elektrárna bude vyrábět po cca 7 500 hodin.

### **Provoz základní**

U druhé varianty jsem počítal s vyšším využitím jmenovitého výkonu, a proto ze 7 500 hodin bude elektrárna v provozu 6 750 hodin na jmenovitý výkon, 800 hodin bude provozována na výkonu kotle 70 % a zbylých 375 hodin bude provozována na poloviční výkon. Tím bude celkem vyrobeno 1,875 TWh elektrické energie a elektrárna bude v provozu cca 7 900 hodin. Na odstávku a údržbu by zůstalo o něco více než jeden měsíc. Protože elektrárna dodává teplou užitkovou vodu do okolních měst, měsíční odstávka se mi zdá reálná, navíc by nemusela probíhat na všech blocích najednou a potřebný objem teplé vody by mohly zajistit zbylé dva bloky.

Původně byla do výpočtů uvažována i varianta se špičkovým využitím elektrárny, ale vzhledem k informacím, které jsem získal v průběhu zpracování této práce, jsem se jí rozhodl vynechat. Na této variantě by nejvíce vynikly rozdíly mezi regulacemi 3,4 (turbonapajčkou a elektronapajčkou) a 1,2 (škrcení a olejová spojka).

## 10.5 Předpoklady modelu

Při výpočtu NPV všech uvažovaných regulací 1,2,3,4 počítám s životností projektu na 25 let. Na tuto dobu podle firmy ČEZ, a.s. vystačí zásoby uhlí a s dovozem se již neuvažuje a elektrárna se poté odstaví. Ve všech případech také uvažuji růst ceny elektrické energie o 2 % ročně, což odpovídá inflaci, kterou chce udržovat ČNB a se stejným růstem počítám i v rámci údržby zařízení (pohony, armatury, napájecí čerpadla atd.). Po konzultaci s několika různými pracovníky energetických firem jsem náklady na údržbu a opravy stanovil podle rozboru prvků jednotlivých regulací.

| Regulace 1      |             | Regulace 2  | Regulace 3  | Regulace 4  |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Údržba [Kč/rok] | 864 tis. Kč | 708 tis. Kč | 948 tis. Kč | 804 tis. Kč |

Tabulka 10.4 Údržbové náklady

Kompletní tabulka je pro názornost příliš rozsáhlá a proto jí uvádím v příloze 4. Původně jsem uvažoval údržbové náklady ve velikosti 2 % z investičních nákladů. Tento přístup však značně znevýhodňuje regulace s vysokými investičními náklady. Z údajů plánovaných revizí jednotlivých prvků o přibližně stejném výkonu z různých energetických zařízení, jsem po konzultaci s inženýry sestavil výše zmíněnou tabulku a kvůli zahrnutí neobvyklých situací (havárie), jsme plánované roční údržby navýšili o 20 % na hodnoty uvedené v tabulce výše.

Pro investiční náklady jednotlivých variant jsem dostal podklady od Ing. Zdeňka Vlčka. Ve zjednodušené verzi je uvádím v tabulce níže.

| Regulace 1      |                       | Regulace 2            | Regulace 3             | Regulace 4            |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Čerpadlová část | -                     | 48 000 tis. Kč        | 112 060 tis. Kč        | 31 850 tis. Kč        |
| Elektro-část    | -                     | 10 420 tis. Kč        | 8 950 tis. Kč          | 54 860 tis. Kč        |
| Armatury        | -                     | 10 800 tis. Kč        | 5 510 tis. Kč          | 11 650 tis. Kč        |
| <b>Celkem</b>   | <b>52 525 tis. Kč</b> | <b>69 220 tis. Kč</b> | <b>126 520 tis. Kč</b> | <b>98 360 tis. Kč</b> |

Tabulka 10.5 Investiční náklady variant

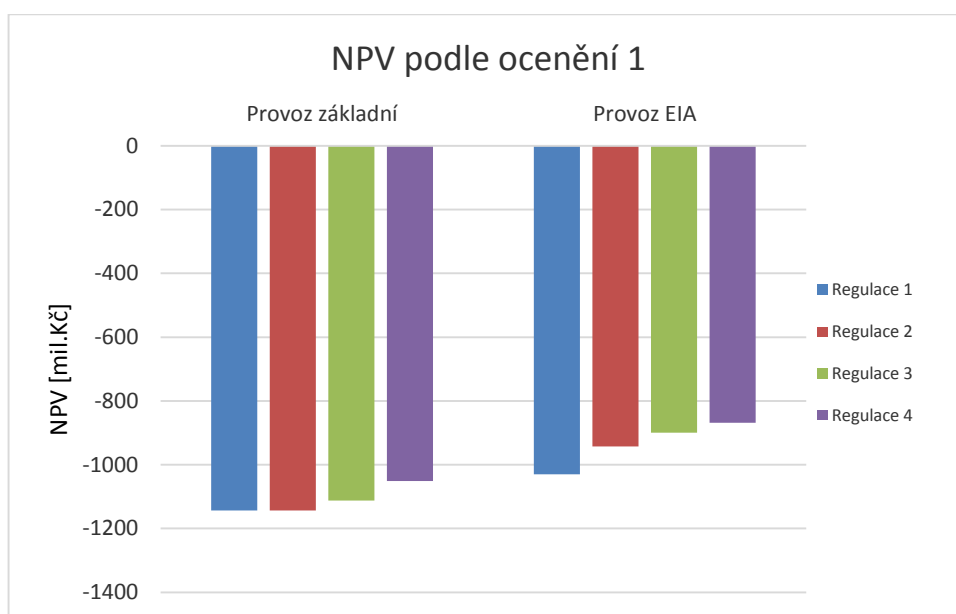
Kompletní přehled je součástí přílohy 3, kde jsou rozepsány ceny jednotlivých komponent.

V rámci těchto předpokladů uvažuji jednotnou životnost všech komponent po celou dobu projektu, takže není potřeba žádných výměn.

## 11 Výsledky

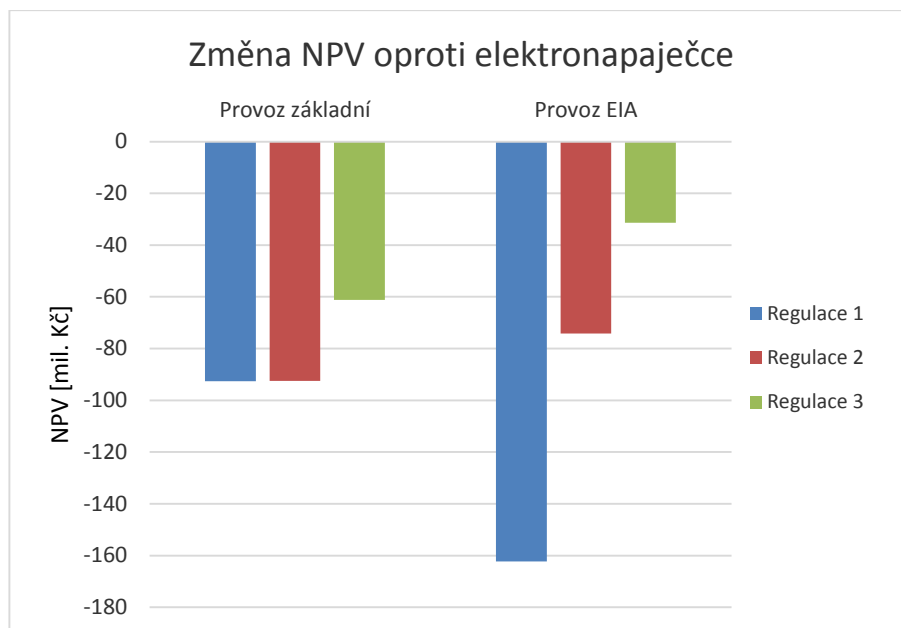
### 11.1 Ocenění 1 - burza

Pro ocenění elektrické energie z burzy mi vyšli následující hodnoty:



Obrázek 11.1 NPV pro ocenění 1

V obou uvažovaných provozech bloku EPR II, se jako nejvýhodnější ukazuje regulace 4 - elektronapaječka. Proto jsem si tuto regulaci zvolil jako základní a vynesl hodnoty zbylých regulací, aby bylo lépe vidět, o kolik je tato regulace výhodnější.

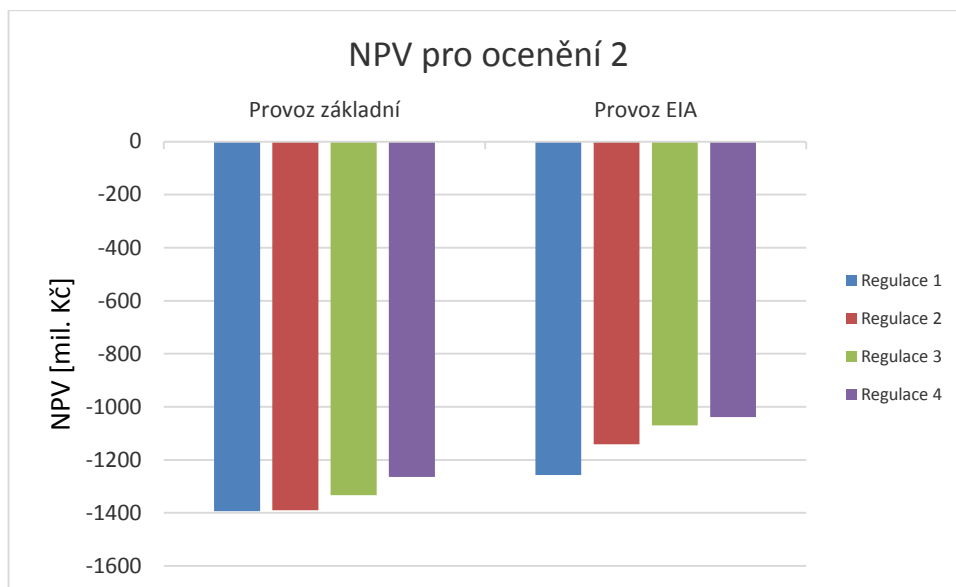


**Obrázek 11.2 Změna NPV proti regulaci elektronapaječkou**

Rozdíly v základním provozu během 25 let nejsou až tak výrazné. Elektrárna je po většinu této doby provozována na jmenovitý výkon a tak se plně neuplatní ztráty ve škrcení a naopak se uplatní ztráty v hydraulické spojkce a vyšší snížení svorkového výkonu turbonapaječky. Celkové NPV pro regulaci 4 - elektronapaječka činí -1 051 mil. Kč pro provoz základní a -868 mil. Kč pro provoz EIA. Právě v provozu EIA, kde dochází k větší regulaci výkonu, se projeví lepší vlastnosti turbonapaječky při nižších výkonech. Rozdíl mezi regulací 4 – elektronapaječka a 3 – turbonapaječka zde tvoří pouhých 31 mil. Kč, jak je znázorněno na obrázku 11.2. Regulace 1 – škrcení a 2 – olejová spojka naopak velmi zaostávají a jsou díky častější změně výkonu výrazně horší než varianta s frekvenčním měničem.

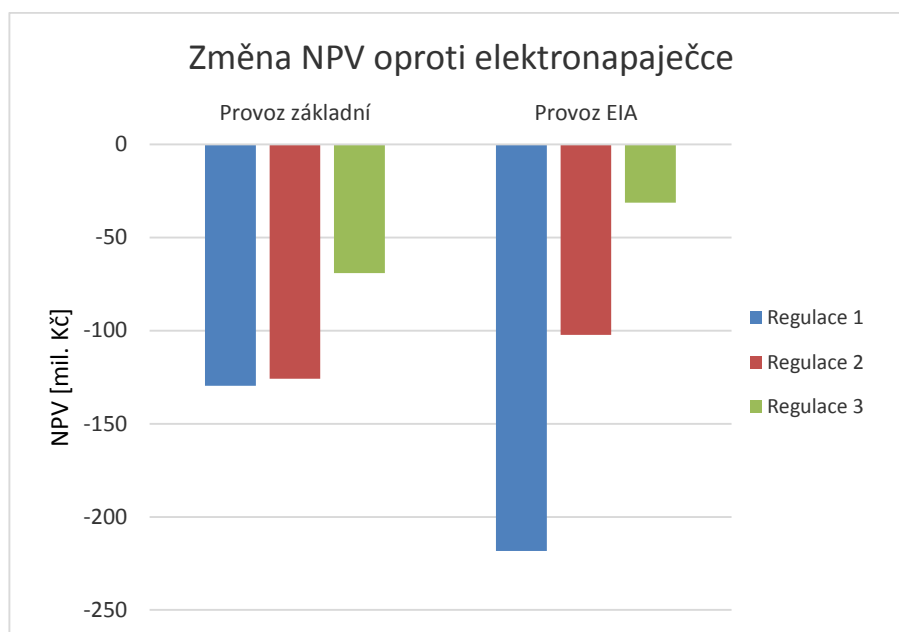
## 11.2 Ocenění 2 - náklady výroby

Různým oceněním elektrické energie v rámci stejných vstupních předpokladů se výsledné varianty příliš nezmění. NPV se změní hlavně proporcionálně. Proto je následující graf velmi podobný obrázku 11.1.



Obrázek 11.3 NPV pro ocenění 2

Pro ocenění 2 se ještě zvýší absolutní hodnota nákladové NPV. Rozdíly mezi nejlepší regulací elektronapaječkou a ostatními regulacemi 1,2,3 se také navýší.

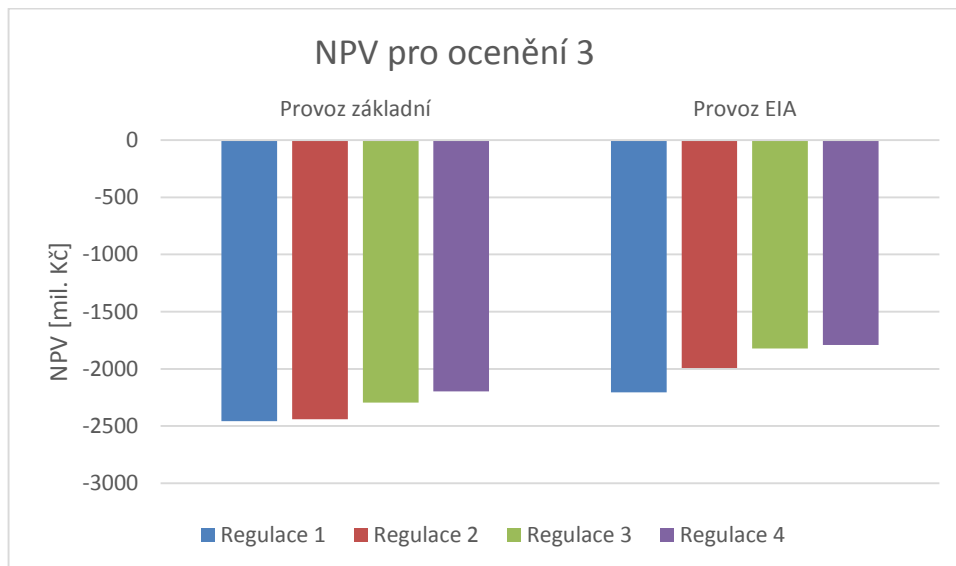


Obrázek 11.4 Změna NPV proti regulaci elektronapajčkou

Je vidět, že při vyšší ceně elektrické energie se zvyšují rozdíly mezi jednotlivými regulacemi, které jsou schopné regulovat ekonomicky (3 - turbonapaječka, 4 - elektronapaječka) a mezi variantami, které mají při regulaci horší parametry (1 - škrcení, 2 - hydraulická spojka).

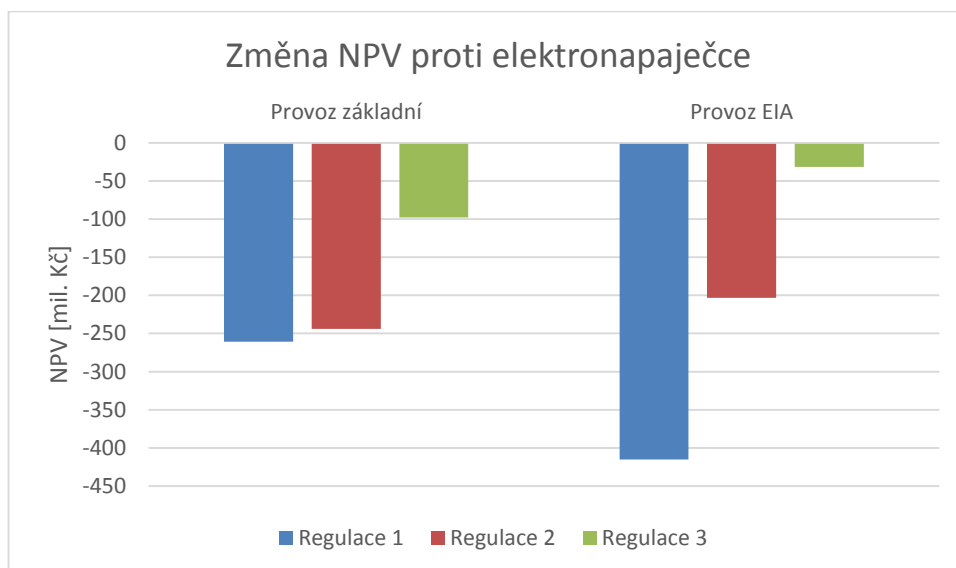
### 11.3 Ocenění 3 - marginální náklady

Nejvyšších záporných hodnot NPV bude dosahovat ocenění odebírané elektrické energie marginálními náklady jaderné elektrárny.



Obrázek 11.5 NPV podle ocenění 3

Oproti předchozím oceněním 1,2 by se zde NPV téměř zdvojnásobilo. Na pořadí regulací to však nic nemění.



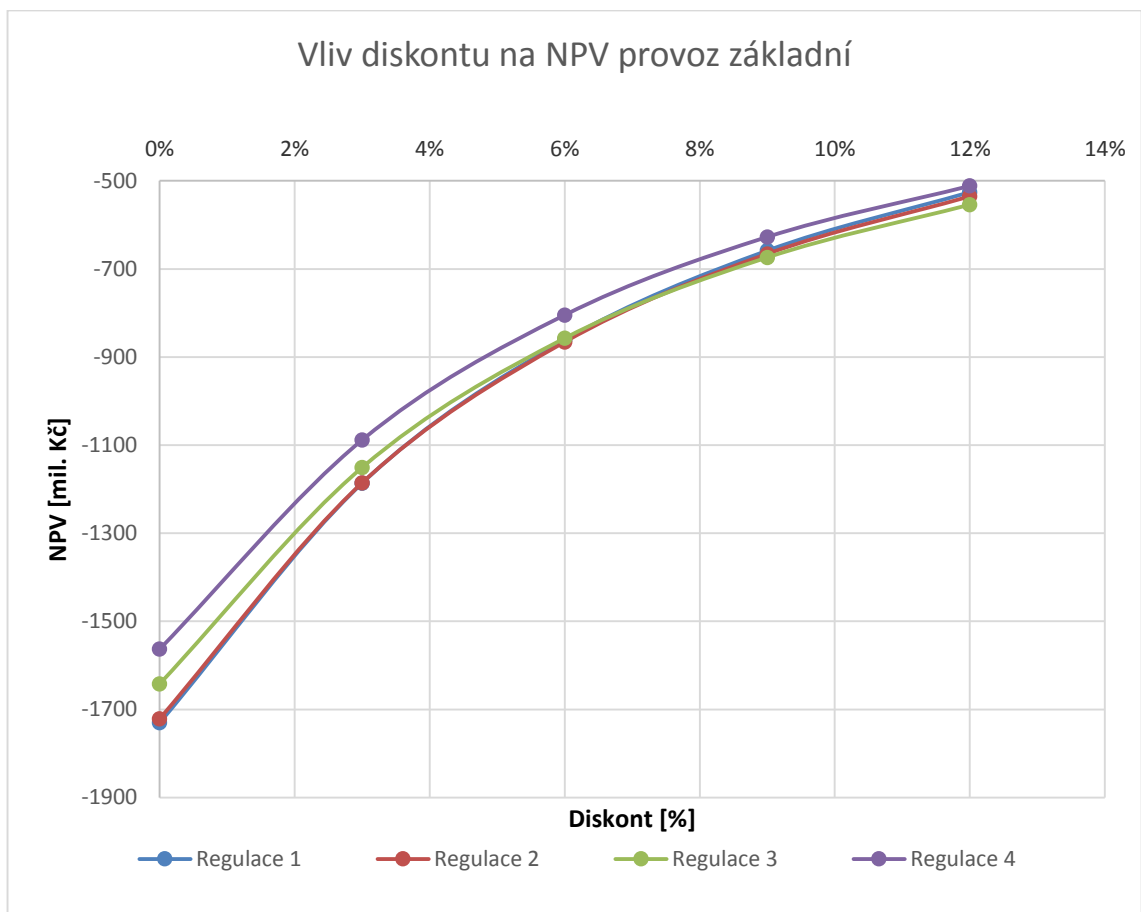
Obrázek 11.6 Změna NPV oproti elektronapaječce

Regulace 4 - elektronapaječkou je stále nejlepší volbou. U provozu EIA vychází regulace 3 - turbonapaječka opět o 31 mil. Kč hůře. Tato hodnota se opakuje ve všech uvažovaných oceněních a mění se jen minimálně. To je dáno tím, že spotřeba elektrické energie za jeden rok

se u těchto dvou typů regulací liší jen o pouhých 5 MWh. Rozdíl je tak tvořen spíše investičními náklady, které má turbonapaječka o 30 mil. Kč vyšší.

## 12 Citlivostní analýzy

Citlivostní analýzy jsem prováděl na ocenění 1 z burzy, jelikož je pro posuzování ekonomické efektivnosti nejrelevantnější. Jako první jsem se zabýval vlivem diskontu na výsledné NPV. V práci uvažovaný diskont 3,3 % jsem v rámci citlivostních analýz uvažoval v rozmezí 0 – 12%.



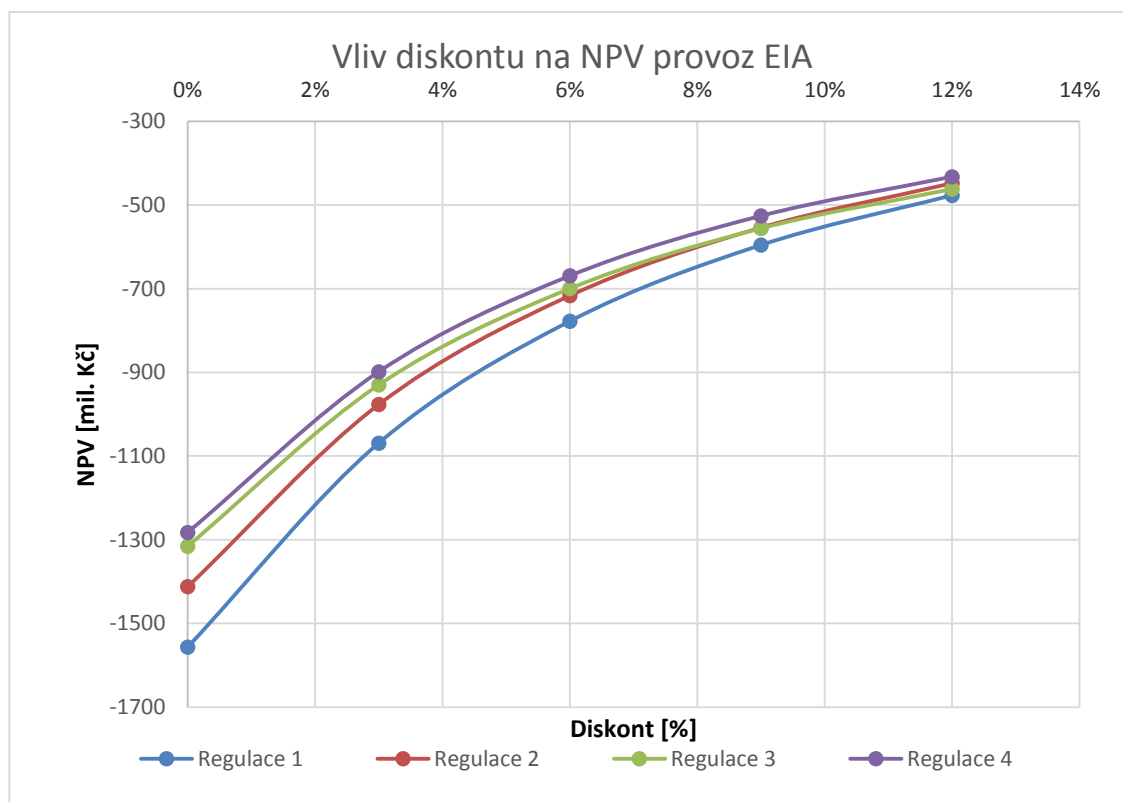
Obrázek 12.1 Vliv diskontu na NPV provoz základní

Z grafu je patrné, že zvyšující se diskont zmenšuje finanční rozdíly mezi jednotlivými regulacemi. Pro 12% diskont se dokonce regulace 1 - škrzení vyplatí téměř stejně, jako regulace 4 - elektronapaječka. Jelikož je graf v horní části méně přehledný, přidám celou tabulku s daty.



| Diskont | Regulace 1    | Regulace 2    | Regulace 3    | Regulace 4    |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0%      | -1,73 mld. Kč | -1,72 mld. Kč | -1,64 mld. Kč | -1,56 mld. Kč |
| 3%      | -1,18 mld. Kč | -1,18 mld. Kč | -1,15 mld. Kč | -1,08 mld. Kč |
| 6%      | -0,86 mld. Kč | -0,86 mld. Kč | -0,85 mld. Kč | -0,80 mld. Kč |
| 9%      | -0,65 mld. Kč | -0,66 mld. Kč | -0,67 mld. Kč | -0,62 mld. Kč |
| 12%     | -0,52 mld. Kč | -0,53 mld. Kč | -0,55 mld. Kč | -0,51 mld. Kč |

Tabulka 12.1 Vliv diskontu na NPV provoz základní



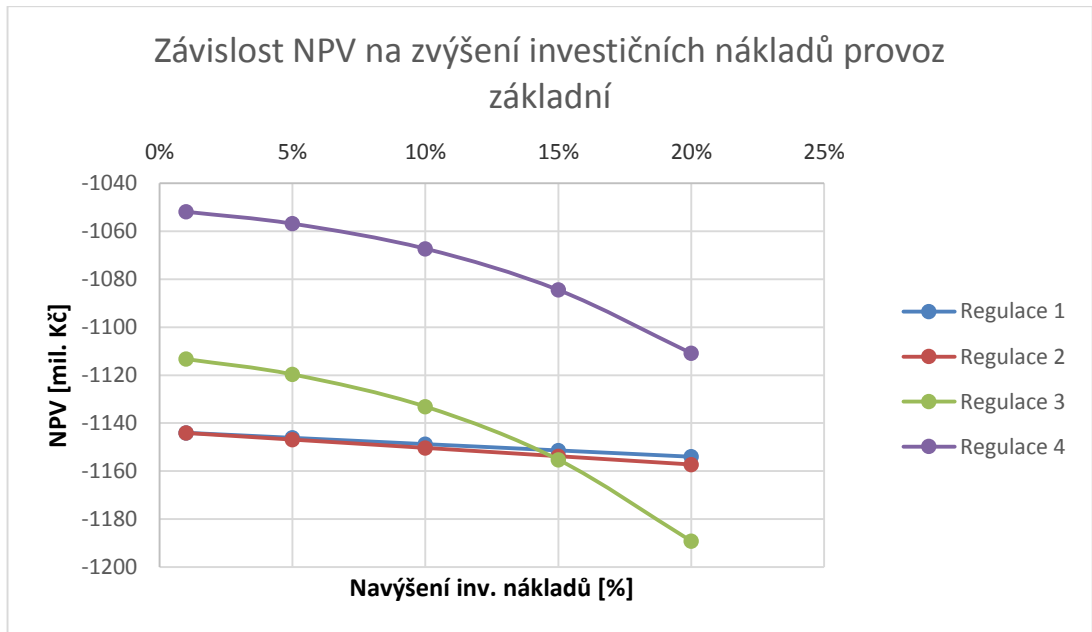
Obrázek 12.2 Vliv diskontu na NPV provoz EIA

Pro provoz EIA však stále vychází nejlépe regulace 4 - elektronapajčka. Regulace 1 - škrcení již ani při vyšších diskontních sazbách nebude mít srovnatelné NPV.

| Diskont | Regulace 1    | Regulace 2    | Regulace 3    | Regulace 4    |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 0%      | -1,55 mld. Kč | -1,41 mld. Kč | -1,31 mld. Kč | -1,28 mld. Kč |
| 3%      | -1,06 mld. Kč | -0,97 mld. Kč | -0,92 mld. Kč | -0,89 mld. Kč |
| 6%      | -0,77 mld. Kč | -0,71 mld. Kč | -0,69 mld. Kč | -0,66 mld. Kč |
| 9%      | -0,59 mld. Kč | -0,55 mld. Kč | -0,55 mld. Kč | -0,52 mld. Kč |
| 12%     | -0,47 mld. Kč | -0,44 mld. Kč | -0,46 mld. Kč | -0,43 mld. Kč |

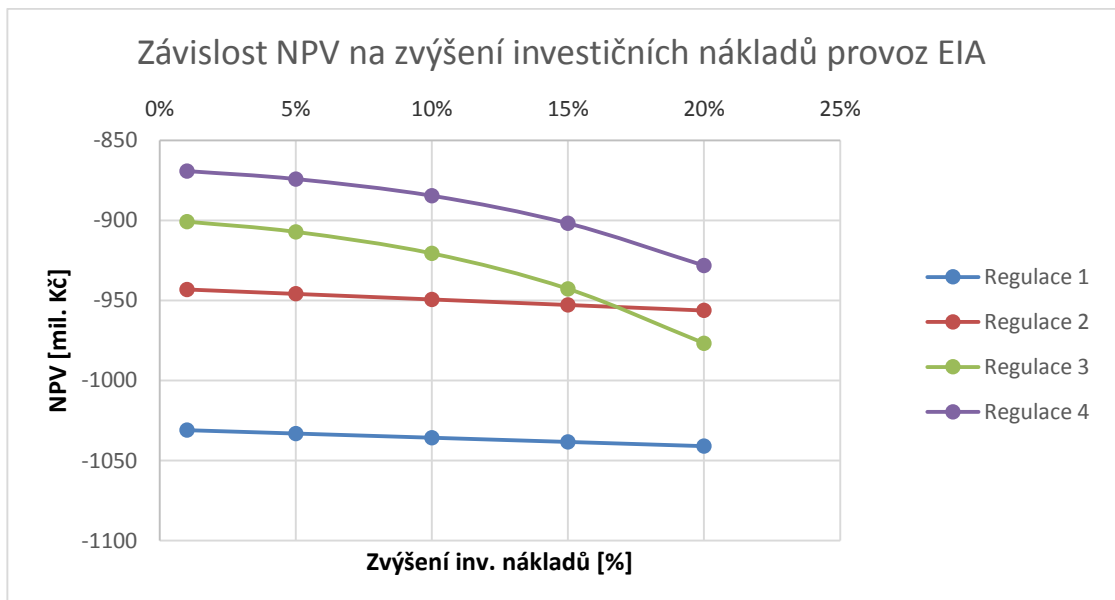
Tabulka 12.2 Vliv diskontu na NPV provoz EIA

Druhou citlivostní analýzu jsem provedl na zvýšení investičních nákladů. Uvažoval jsem zvýšení o daný počet procent z investičních nákladů.



Obrázek 12.3 Závislost NPV na zvýšení investičních nákladů provoz základní

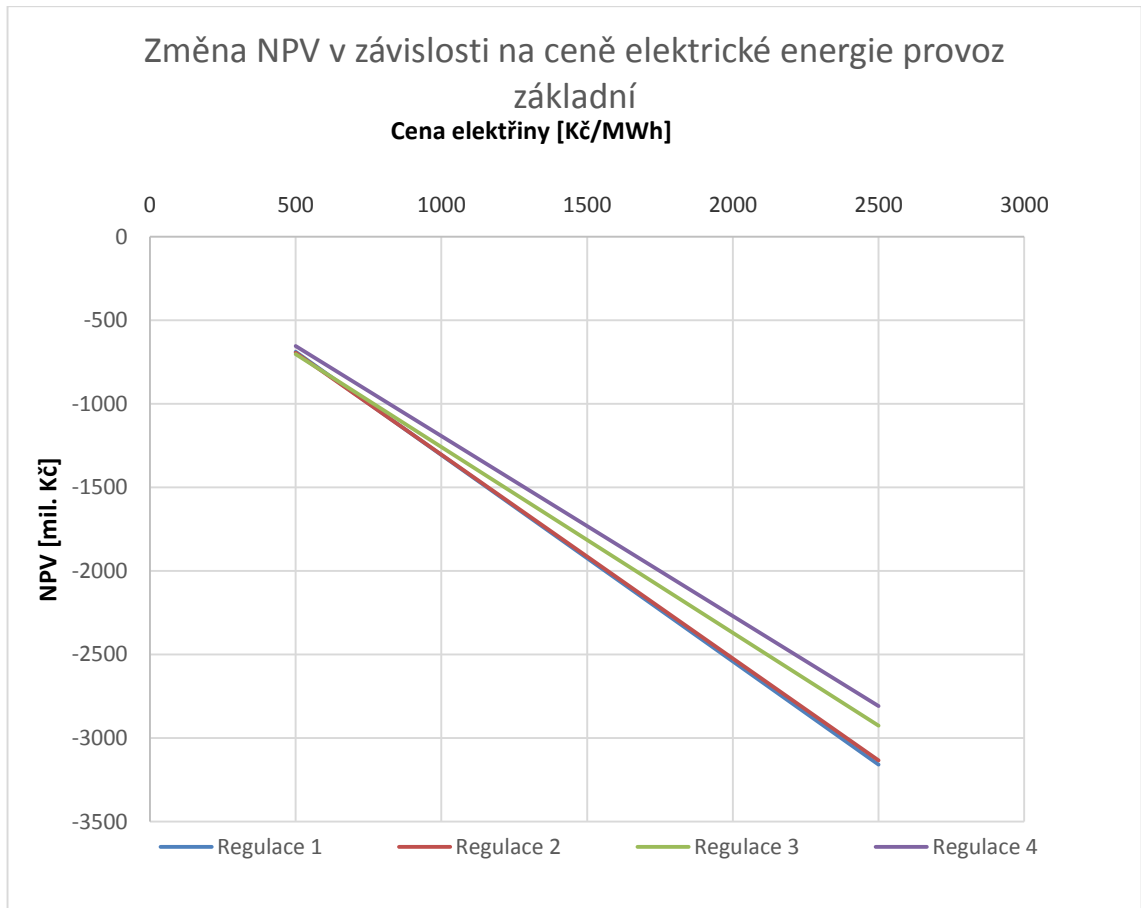
Podle očekávání se nejvíce zvýšení investičních nákladů projevilo na nejdražších regulacích 3,4. Pro 20% zvýšení se regulace 3 - turbonapaječka stává nejnákladnější. Nejlepší regulace 4 – elektronapaječka se nezmění, ani kdyby došlo ke zvýšení investičních nákladů o 20 %.



Obrázek 12.4 Závislost NPV na zvýšení investičních nákladů provoz EIA

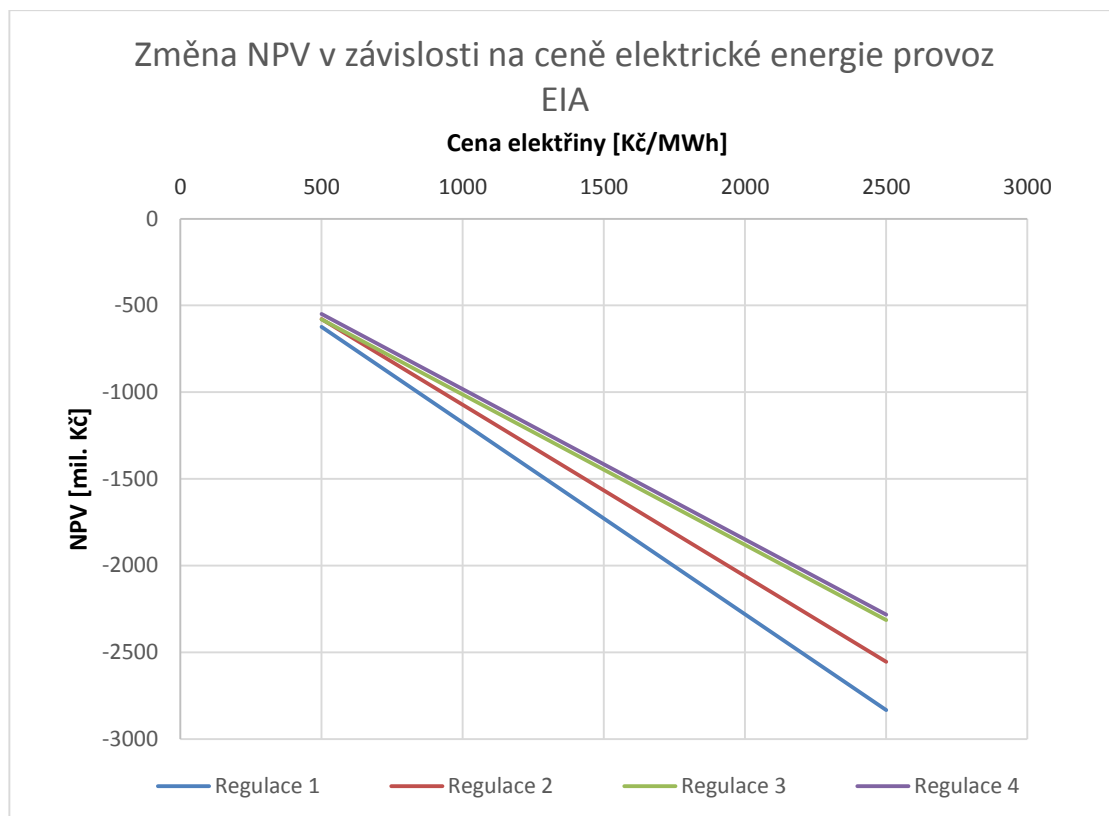
Pro provoz EIA, zůstává pro všechna uvažovaná zvýšení investičních nákladů optimální regulace stejná. Regulace 3 - turbonapaječka se při nejvyšší uvažované změně investičních nákladů stává méně výhodnou než regulace 2 - olejová spojka.

Nejvíce však NPV závisí na ceně elektrické energie odebírané pohonem napaječky.



Obrázek 12.5 Změna NPV s cenou elektřiny provoz základní

Je zřejmé, že čím vyšší cenu elektrické energie zvolím, tím větší budou provozní náklady, ale i v tomto případě bude stále nejlepší volbou elektronapaječka.



**Obrázek 12.6 Změna NPV s cenou elektřiny provoz EIA**

## 13 Závěr

V této práci jsem popsal důležitá zařízení vlastní spotřeby. V druhé části jsem se zaměřil na výpočty příkonu vybraných prvků vlastní spotřeby a celkovou analýzu vlastní spotřeby hnědouhelného bloku EPR II. Další část se věnovala popisu a výběru vhodného typu regulace průtoku napájecího čerpadla bloku EPR II.

Abych ukázal, jaký vliv má různé využívání elektrárny, použil jsem ve výpočtech dvě varianty. První varianta regulovala výkon více a častěji a druhá se chovala téměř jako jaderná elektrárna a byla po většinu času provozována na jmenovitý výkon. Tím mohly vyniknout všechny dobré a špatné parametry zvolených typů regulací.

Důležité v rámci této práce bylo ocenit odebíranou elektrickou energii. Nejvhodnějším způsobem je ocenění cenou z burzy, jelikož se jedná o opportunity cost a elektřinu, kterou musím spotřebovat ve vlastní spotřebě, nemohu prodat. Druhý způsob vycházel z variabilních nákladů bloku EPR II a třetí z marginálních nákladů závěrného zdroje.

Neméně důležitým parametrem výpočtů je určení diskontu. To jsem provedl metodou CAPM pro ohodnocení nákladu vlastního kapitálu, kde jsem koeficient beta určil regresí výnosů akcií skupiny ČEZ na výnosy S&P 350 a oceněním nákladu cizího kapitálu: zástupnou obligací a bankovními úvěry. Tato dvě čísla jsem využil při výpočtu WACC, který mi vyšel 3,32 %.

Jako nejvhodnější regulace napájecího čerpadla mi pro všechny uvažované případy vyšla elektronapaječka s frekvenčním měničem. Její NPV se u ocenění 1 - cenou z burzy pohybuje mezi -868 mil. Kč pro provoz EIA a -1051 mil. Kč pro provoz základní. O tom, že je vhodnou volbou jsem se přesvědčil i citlivostními analýzami, kde pro všechny uvažované změny vstupních parametrů vychází elektronapaječka s frekvenčním měničem jako nejlepší řešení. Zbývá technická řešení jako turbonapaječka, hydraulická spojka nebo škrcení se svými parametry a výsledky nejeví jako ekonomicky efektivní v případě EPR II.

Postupy v této práci by bylo možné aplikovat nejen na ostatní prvky vlastní spotřeby EPR II, ale na jakoukoliv konvenční elektrárnu. Hodnoty diskontu, ocenění odebírané energie a postup určení roční spotřeby energie lze považovat za univerzální a aplikovatelné i na ostatní provozny ve skupině ČEZ.

Zadané cíle práce tedy byly splněny. Nalezl jsem nejvhodnější způsob regulace napájecího čerpadla bloku EPR II a podrobný postup výpočtu je aplikovatelný i na ostatní ventilátory a čerpadla ve vlastní spotřebě bloku EPR II a po úpravě údajů i na ostatní konvenční elektrárny.

## 14 Citovaná literatura

1. DRÁBEK, O. ERÚ. In: *Roční zprávy o provozu* [online]. 28. 5. 2014 [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: [http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9](http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9)
2. BARTOS, F. J. Control Engineering. In: *Irsching power plant: Incubator for high-efficiency gas turbines* [online]. 2. 8. 2011 [cit. 2014-10-15]. Dostupné z: <http://www.controleng.com/single-article/irsching-power-plant-incubator-for-high-efficiency-gas-turbines/c3078aaeea.html>
3. DOLEŽAL, J. et al. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
4. VILIMEC, L. *Stavba kotlů*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2002. ISBN 8024800764.
5. BALÁŠ, M. M. LISÝ a J. MOSKALÍK. Kotle - 2. část. In: *tzbinfo* [online]. 2. 4. 2012 [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
6. POPELKA, O. *FLUIDNÍ KOTEL S CIRKULUJÍCÍ FLUIDNÍ VRSTVOUNA SPALOVÁNÍ UHLÍ A DŘEVNÍ BIOMASY 150t/h*. Brno: 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála [cit. 2014-11-03]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53689](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53689)
7. SKOPAL, V. M. HOFÍREK a J. ADÁMEK. *Stavba a provoz strojů IV: konstrukční uspořádání, provoz a údržba*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.
8. KVITA, J. *Pásový dopravník*. Brno: 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Martin Jonák [cit. 2014-10-25]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=65831](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65831)
9. ZMRHAL, V. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 1. část. In: *tzb-info* [online]. 4. 12. 2006 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>
10. NOVÝ, R. *Ventilátory*. Praha: České vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-010-2385-0.
11. THE BABCOCK & WILCOX COMPANY. *Steam its generation and use*. 41st. Barberton: The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN 978-1147612448.
12. MELICHAR, J. *Hydraulické a pneumatické stroje: část čerpadla*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04383-7.
13. DRÁBKOVÁ, S. *Potrubní systémy a armatury - Část 2* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2011 [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Dil2\\_Dra.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Dil2_Dra.pdf)

14. JANALÍK, J. Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. In: *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin* [online]. 12. 12. 2008, verze 1. [cit. 2014-10-08]. ISBN 978-80-248-1910-5
15. BLEJCHAŘ, T. a S. DRÁBKOVÁ. *Čerpací technika a potrubí: návody do cvičení*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2010 [cit. 2014-12-01]. ISBN 978-80-248-2205-1. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Blechar-Drabkova-CTaPNDC.pdf>
16. KONEČNÁ, K. *Návrh pracovního bodu odstředivého čerpadla*. Brno: 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6696](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6696)
17. VLASÁK, M. CENIA. In: *Pasportizace chladicích systémů* [online]. 8. 10. 2007 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: [http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/\\$pid/CENMSFLZ68BT/\\$FILE/Kapitola%20\\_%C4%8C%C3%A1st%20.pdf](http://www.cenia.cz/web/www/web-pub2.nsf/$pid/CENMSFLZ68BT/$FILE/Kapitola%20_%C4%8C%C3%A1st%20.pdf)
18. DOČEKAL, A. a S. BOUČEK. *Elektrárny II*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1995.
19. MĚŘIČKA, J. V. HAMATA a P. VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-010-2109-2.
20. JIŘÍ, J. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada publishing, 2003. ISBN 80-247-0507-9.
21. BENEŠ, K. *Vývoj synchronních strojů*. Plzeň: 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9443/BP-Krystof\\_Benes.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9443/BP-Krystof_Benes.pdf?sequence=1)
22. DOLEŽAL, R. *Kotle a spalovací zařízení: vysokoškolská učebnice pro fakulty strojního inženýrství*. Praha: SNTL, 1965.
23. VOITH TURBO GMBH & CO. KG. Hydrodynamic couplings. In: *Voith* [online]. 28. 2. 2011 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: [http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1614\\_e\\_cr394\\_en\\_hydrodynamic-fluid-couplings\\_principles-features-benefits.pdf](http://resource.voith.com/vt/publications/downloads/1614_e_cr394_en_hydrodynamic-fluid-couplings_principles-features-benefits.pdf)
24. VOITH. *Geared variable speed couplings* [prezentace]. Voith, 2011 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: [http://voith.com/en/227\\_e\\_cr269\\_en\\_voith-geared-variable-speed-couplings.pdf](http://voith.com/en/227_e_cr269_en_voith-geared-variable-speed-couplings.pdf)
25. KŘÍŽ, P. a M. POCHYLA. *Rozvody elektrické energie v průmyslu: Elektrické pohony* [prezentace]. Západočeská univerzita: 2012 [cit. 20-04-2015]. Dostupné z: [http://kryton.zcu.cz/public/GALERIE%20-%20TRANSFER/KA1\\_workshop/WORKSHOP\\_2\\_Siemens%20I./Prezentace/7\\_Pohony%20velkých%20výkonů.pdf](http://kryton.zcu.cz/public/GALERIE%20-%20TRANSFER/KA1_workshop/WORKSHOP_2_Siemens%20I./Prezentace/7_Pohony%20velkých%20výkonů.pdf)
26. FERNANDEZ, P. L. P. A. I. *Market Risk Premium used in 88 countries in 2014: a survey with 8,228 answers*. IESE Business school: 2014 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: [http://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN\\_ID2456994\\_code12696.pdf?abstractid=2450452&mirid=3](http://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/SSRN_ID2456994_code12696.pdf?abstractid=2450452&mirid=3)

27. BÁRTEK, P. Měsíční zpráva o elektřině: Povolenky v centru pozornosti, poptávka po uhlí zřejmě poroste pomaleji. In: *Investiční web* [online]. 13. 3. 2015, 01:00 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.investicniweb.cz/2015/3/13/mesicni-zprava-o-elektrine-povolenky-v-centru-pozornosti-poptavka-po-uhli-zrejme-poroste-pomaleji-jak-trh-zareaguje-na-qe/>
28. BEJDOVÁ, M. V. JAROŠ a J. RUML. *Aktuální vývoj trhu s hnědým uhlím v ČR v kontextu energetických transakcí roku 2013* [online]. Praha: Inergin, 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.energostat.cz/stahnout-soubor?id=84>
29. BENEŠ, I. et al. *Ekonomické posouzení rekonstrukce elektrárny Prunéřov* [online]. Praha: Cityplan, 2010 [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: <http://www.greenpeace.org/czech/PageFiles/210826/posouzeniP2.pdf>
30. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Projected cost of generating electricity* [online]. OECD, 2010 [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCcQFjAB&url=https%3A%2F%2Fwww.oecd-neo.org%2Fpub%2Fegc%2Fdocs%2Fexec-summary-ENG.pdf&ei=i6lqVY2UAoLbaL-jgMgP&usq=AFQjCNGcqwquBFvIVJK4bwsQ5egTRCXveg&sig2=NKVstnxWAmVd9UpjL5>
31. ŠNAIDER, Z. all for power. In: *Technická zpráva: Komplexní obnova Elektrárny Prunéřov II* [online]. 2013 [cit. 2014-10-04]. Dostupné z: [http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/1\\_technicka\\_zprava.pdf](http://www.allforpower.cz/UserFiles/file/2011/1_technicka_zprava.pdf)
32. DOWDELL, D. W. MARTIN a M. MILLER. SYSTEM AND METHOD FOR CONVERSION OF BALL AND RACE COAL PULVERIZERS TO ROLL AND RACE COAL PULVERIZERS. In: *Intellectual property in Australia* [online]. 4. 8. 2011 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://www.ipaustralia.com.au/applicant/babcock-and-wilcox-power-generation-group-inc/patents/AU2011100764/>
33. MIKLÍK, T. *Odsíření spalín fluidního kotle*. Brno: 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15575](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15575)
34. VOLÁK, V. tlakinfo.cz. In: *ÚPRAVA VODY V PROVOZU TEPELNÝCH ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ* [online]. 30. 4. 2004 [cit. 2014-12-07]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py/t.py?t=2&i=696>



## Seznam obrázků

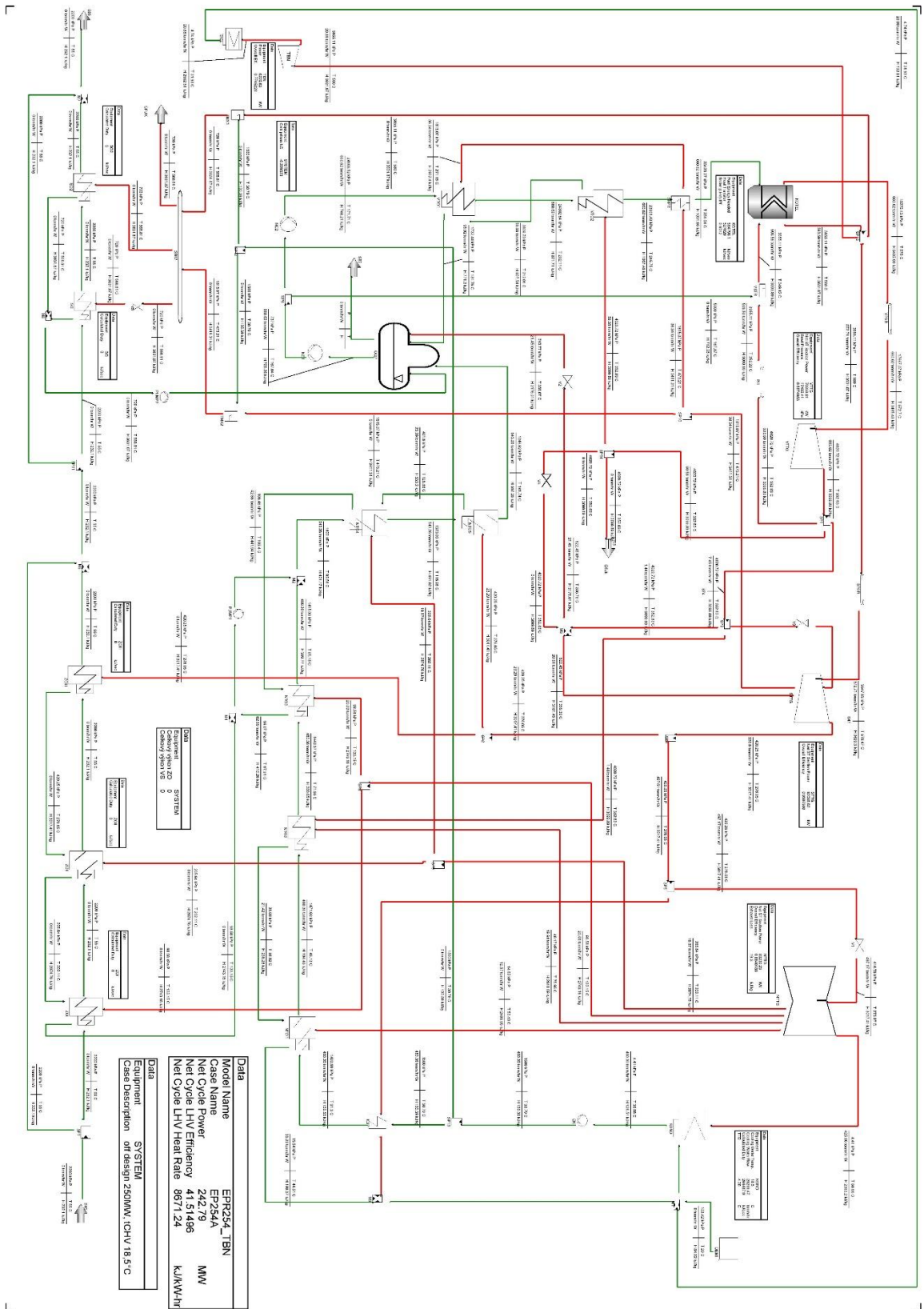
|  |    |
|--|----|
| Obrázek 2.1 Vývoj výroby elektřiny brutto [1] .....                                | 2  |
| Obrázek 4.1 Schéma práškového kotle [7] .....                                      | 8  |
| Obrázek 4.2 Axiální ventilátor [9] .....   | 11 |
| Obrázek 4.3 Radiální ventilátor [9].....   | 12 |
| Obrázek 4.4 Regulace škrcením [10].....  | 13 |
| Obrázek 4.5 Otáčková regulace [10].....  | 14 |
| Obrázek 4.6 Regulace natáčením oběžných lopatek [10] .....                         | 15 |
| Obrázek 4.7 Regulace natáčením lopatek v sání [10].....                            | 16 |
| Obrázek 5.1 Charakteristiky čerpadel s různými oběžnými koly [14].....             | 20 |
| Obrázek 5.2 Sériové řazení čerpadel [16] .....                                     | 21 |
| Obrázek 5.3 Paralelní řazení čerpadel [16].....                                    | 22 |
| Obrázek 5.4 Regulace čerpadla obtokem [16] .....                                   | 22 |
| Obrázek 5.5 Regulace čerpadla škrcením [16].....                                   | 23 |
| Obrázek 5.6 Regulace čerpadla otáčkami [16].....                                   | 23 |
| Obrázek 5.7 Regulace čerpadla natáčením lopatek [14].....                          | 24 |
| Obrázek 8.1 Příkon prvků vlastní spotřeby .....                                    | 34 |
| Obrázek 9.1 Regulace škrcením.....   | 36 |
| Obrázek 9.2 Hydraulická spojka [23] .....  | 37 |
| Obrázek 9.3 Voith RKM schéma [24] .....  | 39 |
| Obrázek 9.4 Regulace hydraulickou spojkou.....                                     | 40 |
| Obrázek 9.5 Schéma regulace turbonapajčkou .....                                   | 41 |
| Obrázek 9.6 Schéma regulace frekvenčním měničem .....                              | 42 |
| Obrázek 9.7 Závislost účinnosti na zatížení FM [25] .....                          | 43 |
| Obrázek 9.8 Charakteristika p-Q.....   | 44 |
| Obrázek 9.9 Charakteristika účinnosti .....  | 45 |
| Obrázek 9.10 Příkon napájecího čerpadla.....                                       | 45 |
| Obrázek 10.1 Beta pro očištěné hodnoty .....                                       | 50 |
| Obrázek 10.2 Beta pro neočištěné hodnoty.....                                      | 51 |
| Obrázek 10.3 Minimální cena elektřiny v závislosti na ceně uhlí.....               | 54 |
| Obrázek 10.4 Minimální cena elektrické energie v závislosti na ceně povolenky..... | 56 |
| Obrázek 11.1 NPV pro ocenění 1 .....   | 59 |
| Obrázek 11.2 Změna NPV proti regulaci elektronapajčkou.....                        | 60 |
| Obrázek 11.3 NPV pro ocenění 2 .....   | 61 |
| Obrázek 11.4 Změna NPV proti regulaci elektronapajčkou .....                       | 61 |
| Obrázek 11.5 NPV podle ocenění 3.....  | 62 |
| Obrázek 11.6 Změna NPV oproti elektronapajčce.....                                 | 62 |
| Obrázek 12.1 Vliv diskontu na NPV provoz základní .....                            | 63 |
| Obrázek 12.2 Vliv diskontu na NPV provoz EIA .....                                 | 64 |
| Obrázek 12.3 Závislost NPV na zvýšení investičních nákladů provoz základní .....   | 65 |
| Obrázek 12.4 Závislost NPV na zvýšení investičních nákladů provoz EIA .....        | 65 |
| Obrázek 12.5 Změna NPV s cenou elektřiny provoz základní .....                     | 66 |
| Obrázek 12.6 Změna NPV s cenou elektřiny provoz EIA .....                          | 67 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 3.1 Energetické nároky vlastní spotřeby [3] .....                  | 4  |
| Tabulka 8.1 Parametry uhlí Prunéřov .....                                  | 30 |
| Tabulka 8.2 Parametry kotle .....  | 30 |
| Tabulka 8.3 Vzduchový ventilátor .....                                     | 31 |
| Tabulka 8.4 Spalinový ventilátor .....                                     | 31 |
| Tabulka 8.5 Parametry výpočtu napájecího čerpadla.....                     | 32 |
| Tabulka 8.6 Výkon NČ .....   | 32 |
| Tabulka 8.7 Parametry výpočtu KČ.....                                      | 33 |
| Tabulka 8.8 Výkon KČ .....   | 33 |
| Tabulka 8.9 Vlastní spotřeba EPR II.....                                   | 34 |
| Tabulka 8.10 Energetické nároky bloku EPR II .....                         | 35 |
| Tabulka 9.1 Výpočet otáčkového řízení přes afinní paraboly.....            | 47 |
| Tabulka 9.2 Vypočtené hodnoty napájecího čerpadla .....                    | 47 |
| Tabulka 9.3 Úbytek energie při jmenovitém výkonu.....                      | 48 |
| Tabulka 9.4 Úbytek energie při 70% výkonu .....                            | 48 |
| Tabulka 9.5 Úbytek energie při 50% výkonu .....                            | 48 |
| Tabulka 10.1 Hodnoty modelu CAPM .....                                     | 51 |
| Tabulka 10.2 Minimální cena elektrické energie z variabilních nákladů..... | 55 |
| Tabulka 10.3 Parametry jaderné elektrárny .....                            | 56 |
| Tabulka 10.4 Údržbové náklady .....  | 58 |
| Tabulka 10.5 Investiční náklady variant .....                              | 58 |
| Tabulka 12.1 Vliv diskontu na NPV provoz základní.....                     | 64 |
| Tabulka 12.2 Vliv diskontu na NPV provoz EIA .....                         | 64 |

## 15 Přílohy

# 1 Tepelné schéma s turbonapajčkou



## 2 Charakteristika NČ



Code name  
Prunerov II

Project No.  
7220150186

Type - size  
**HG 5/9**

Item No.  
1

Revision  
13

Speed [1/min]  
3962

Date  
17.11.2008

Hydraulic  
HG 5/9 9.51S 9.0

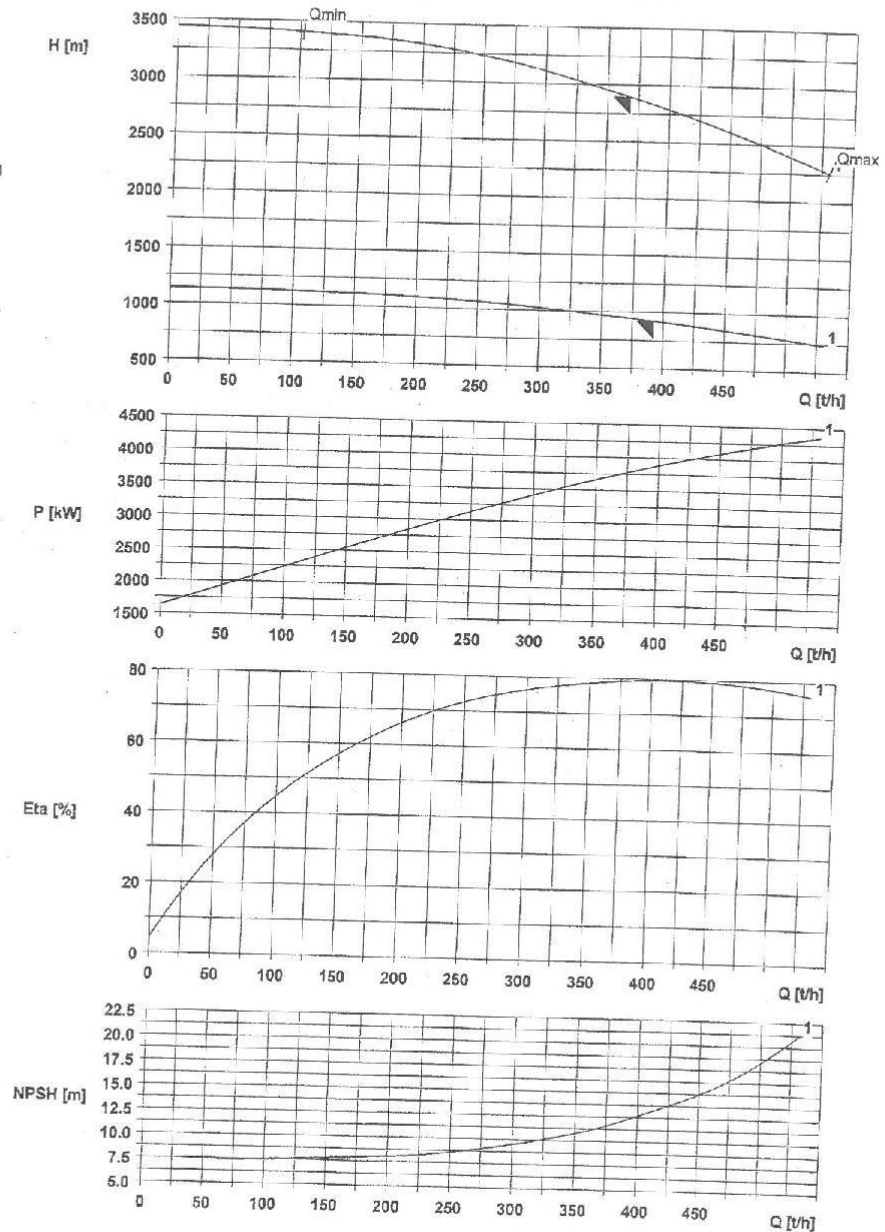
Temperature [C]  
168

Page  
1

Opened tapping

Density [kg/m<sup>3</sup>]  
899.4

1: HG 5/9 9.51S 9.0  
n: 3962 [1/min]



### 3 Investiční náklady

#### Varianta 1

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| Čerpadla + motory | 41 925 000,00 Kč |
| Armatury          | 10 600 000 Kč    |
| Celkem            | 52 525 000 Kč    |

#### Varianta 2

| <b>Var- 3x 50% napájecí čerpadlo s elektromotorem a otáčkovou regulací hydraulickou spojkou</b> |  |                          |                         |
|---|--|--------------------------|-------------------------|
| <b>Hlavní stroje</b>  |  |                          |                         |
| <b>1.</b>   | 3x   | čerpadlo                 | 28 500 000 Kč           |
| <b>2.</b>   | 3x   | elektromotor             | 10 420 000 Kč           |
| <b>3.</b>   | 3x   | hydraulická spojka VOITH | 17 740 000 Kč           |
| <b>4.</b>   | 3x   | spojka vč. krytu         | 1 160 000 Kč            |
| <b>5.</b>   | 3x   | spojka vč. krytu         | 600 000 Kč              |
| <b>Hlavní stroje součet:</b>  |  |                          | <b>58 420 000,00 Kč</b> |
| <b>Potrubí a armatury</b>   |  |                          |                         |
| <b>6.</b>   | sací potrubí ( vč. TS DN 300 PN 40 s rámem )   |                          | 1 470 000 Kč            |
| <b>7.</b>   | převáděcí potrubí                              |                          | 1 150 000 Kč            |
| <b>8.</b>   | výtlak a potrubí minimálního obtoku            |                          | 4 170 000 Kč            |
| <b>9.</b>   | chladicí voda                                  |                          | 2 130 000 Kč            |
|   | - pro elektromotor                             |                          |                         |
|   | - pro čerpadla                                 |                          |                         |
|   | - pro chladiče oleje                           |                          |                         |
| <b>10.</b>  | přívod a odvod mazacího oleje                  |                          | 540 000 Kč              |
|   | - od strojů                                    |                          |                         |
|   | - ke chladičům                                 |                          |                         |
|   | - pracovního oleje ke chladičům                |                          |                         |
| <b>11.</b>  | Celkem sestávající z:                          |                          | 290 000 Kč              |
|   | - odvod průsakové vody                         |                          |                         |
|   | - vypouštění převáděcího potrubí               |                          |                         |
|   | - odvodušnění podávacího a napájecího čerpadla |                          |                         |
|   | - vypouštění oleje                             |                          |                         |
|   | - vypouštění tvarovky se sítem                 |                          |                         |
| <b>12.</b>  | kotvení  |                          | 450 000 Kč              |
| <b>13.</b>  | měřicí přístroje a odběrová místa              |                          | 400 000 Kč              |
| <b>14.</b>  | olejová náplň hydraulické spojky               |                          | 200 000 Kč              |
| <b>Potrubí a armatury součet:</b>   |  |                          | <b>10 800 000 Kč</b>    |
| <b>Celkem:</b>  |  |                          | <b>69 220 000 Kč</b>    |

Varianta 3

| <b>Var. - 1x100% napájecí čerpadlo s kondenzační turbínou + 2 x50%ENČ</b> |    |   |                       |
|---|----|---|-----------------------|
| <b>Hlavní stroje</b>  |    |   |                       |
| <b>1.</b>   | 1x | čerpadlo KNE 4.1-300-6-000-F/2                      | 10 910 000 Kč         |
| <b>2.</b>   | 1x | turbína   | 81 760 000 Kč         |
| <b>3.</b>   | 1x | spojka vč. krytu                                    | 390 000 Kč            |
| <b>4.</b>   | 2x | elektromotor + čerpadlo + regulační ventil          | 27 950 000 Kč         |
| <b>Hlavní stroje součet:</b>  |    |   | <b>121 010 000 Kč</b> |
| <b>Potrubí a armatury</b>   |    |   |                       |
| <b>5.</b>   |    | sací potrubí ( vč. TS DN 400 PN 40 s rámem )        | 660 000 Kč            |
| <b>6.</b>   |    | převáděcí potrubí                                   | 500 000 Kč            |
| <b>7.</b>   |    | výtlač a potrubí minimálního obtoku                 | 3 010 000 Kč          |
| <b>8.</b>   |    | chladičí voda                                       | 760 000 Kč            |
|   |    | - pro elektromotor                                  |                       |
|   |    | - pro čerpadlo                                      |                       |
|   |    | - pro chladiče oleje                                |                       |
| <b>9.</b>   |    | přívod a odvod mazacího oleje                       | 190 000 Kč            |
|   |    | - od strojů   |                       |
|   |    | - ke chladičům                                      |                       |
|   |    | - pracovního oleje ke chladičům                     |                       |
| <b>10.</b>  |    | Celkem sestávající z:                               | 100 000 Kč            |
|   |    | - odvod průsakové vody                              |                       |
|   |    | - vypouštění převáděcího potrubí                    |                       |
|   |    | - odvodu vzdušného podávacího a napájecího čerpadla |                       |
|   |    | - vypouštění oleje                                  |                       |
|   |    | - vypouštění tvarovky se sítím                      |                       |
| <b>11.</b>  |    | kotvení   | 150 000 Kč            |
| <b>12.</b>  |    | měřicí přístroje a odběrová místa                   | 130 000 Kč            |
| <b>Potrubí a armatury součet:</b>   |    |   | <b>5 510 000 Kč</b>   |
| <b>Celkem</b>   |    |   | <b>126 520 000 Kč</b> |

Varianta 4

| <b>Cenová část Varianta FM</b>          |          |          |              |                      |
|---|----------|----------|--------------|----------------------|
| Napájecí čerpadlo                       |          |          |              |                      |
| Popis                                   | Jednotka | Množství | Kč/jednotka  | Kč celkem            |
| Dokumentace a inženýring                | sada     | 1        | 290 000 Kč   | 290 000 Kč           |
| Dodávka čerpadla                        | ks       | 3        | 9 500 000 Kč | 28 500 000 Kč        |
| Montáž čerpadla a elektromotoru         | ks       | 3        | 590 000 Kč   | 1 770 000 Kč         |
| Uvedení do provozu                      | ks       | 3        | 90 000 Kč    | 270 000 Kč           |
| Dodávka náradí                          | sada     | 1        | 1 020 000 Kč | 1 020 000 Kč         |
| <b>Napájecí čerpadlo 1. blok celkem</b> |          |          |              | <b>31 850 000 Kč</b> |

| Elektročást                       |          |          |              |                      |
|-----------------------------------|----------|----------|--------------|----------------------|
| Popis                             | Jednotka | Množství | Kč/jednotka  | Kč celkem            |
| Dokumentace a inženýring          | sada     | 1        | 290 000 Kč   | 290 000 Kč           |
| Dodávka elektromotoru             | ks       | 3        | 6 170 000 Kč | 18 510 000 Kč        |
| Dodávka měniče                    | ks       | 3        | 6 510 000 Kč | 19 530 000 Kč        |
| Dodávka transformátoru            | ks       | 3        | 4 730 000 Kč | 14 190 000 Kč        |
| Dodávka kabelů                    | sada     | 3        | 470 000 Kč   | 1 410 000 Kč         |
| Uvedení do provozu                | ks       | 3        | 310 000 Kč   | 930 000 Kč           |
| <b>Elektročást 1. Blok celkem</b> |          |          |              | <b>54 860 000 Kč</b> |

| Armatury a potrubní části                       |          |          |              |                      |
|---|----------|----------|--------------|----------------------|
| Popis   | Jednotka | Množství | Kč/jednotka  | Kč celkem            |
| Dokumenace a inženýring                         | sada     | 1        | 130 000 Kč   | 130 000 Kč           |
| Dodávka armatur                                 | sada     | 3        | 2 710 000 Kč | 8 130 000 Kč         |
| Dodávka potrubních částí                        | sada     | 3        | 570 000 Kč   | 1 710 000 Kč         |
| Montáž  | sada     | 3        | 390 000 Kč   | 1 170 000 Kč         |
| Uvedení do provozu                              | sada     | 3        | 170 000 Kč   | 510 000 Kč           |
| <b>Armatury a potrubní části 1. blok celkem</b> |          |          |              | <b>11 650 000 Kč</b> |

|                       |  |  |  |                      |
|-----------------------|--|--|--|----------------------|
| <b>1. blok celkem</b> |  |  |  | <b>98 360 000 Kč</b> |
|-----------------------|--|--|--|----------------------|

| Variantanta:             | Škrzení   |              | Olejová spojka  |  | Turbonapajčka |                 | Elektroapajčka   |                       |                                    |
|--------------------------|---|--------------|-----------------|--|---------------|-----------------|--|-----------------------|------------------------------------|
| Oblast:                  | ks  | Náklady /rok | ks              | Náklady /rok   | ks            | Náklady /rok    | ks   | Náklady /rok          |                                    |
| Elektrická část          | Motor 4000 kW   | 3            | 60000           | Motor 4000 kW  | 3             | 60000           | Motor 4000 kW regulovatelný<br>Frekvenční měnič<br>Trafo 6/2,3 kV                                  | 3<br>3<br>3           | 60000<br>300000<br>3               |
| Čerpadlová část          | Čerpadlo KSB HGC  | 3            | 210000          | Čerpadlo KSB HGC                                       | 3             | 210000          | Čerpadlo KSB HGC   | 3                     | 210000                             |
| Armatury a příslušenství | Chladicí okruh<br>Olejové hospodářství                      |              | 10000           | Spojka Voith<br>Chladicí okruh<br>Olejové hospodářství | 3             | 220000<br>10000 | Čerpadlo KSB HGC<br>Čerpadlo Sigma KNE 4.1<br>Turbínka<br>Chladicí okruh<br>Olejové hospodářství   | 2<br>1<br>1<br>1      | 140000<br>70000<br>80000<br>10000  |
| Ostatní                  | Regulační ventil vč. EHP<br>Zpětný ventil<br>Zavírací šoupě | 3<br>3<br>6  | 350000<br>90000 | Zpětný ventil<br>Zavírací šoupě                        | 3<br>6        | 90000           | Regulační ventil vč. EHP<br>Zpětný ventil<br>Zavírací šoupě<br>Kondenzátor<br>Rychlozávěrný ventil | 2<br>3<br>6<br>1<br>1 | 230000<br>90000<br>20000<br>110000 |
| CELKEM                   | Zubové spojky<br>Potrubí                                    |              | 720000          | Zubové spojky<br>Potrubí                               |               | 590000          | Zubové spojky<br>Potrubí   |                       | 790000                             |
| CELKEM                   | zohlednění poruch k=1,2                                     |              | 864000          |  | 708000        |                 | 948000   |                       | 670000                             |
|                          |   |              |                 |  |               |                 |  |                       | 804000                             |

#### 4 Údržbové náklady