

# Jaderné a klasické elektrárny

Jaroslav Doležal | Jiří Šťastný | Jan Špetlík |  
Stanislav Bouček | Zbyněk Brettschneider





# **Jaderné a klasické elektrárny**

Jaroslav Doležal

Jiří Šťastný

Jan Špetlík

Stanislav Bouček

Zbyněk Brettschneider



České vysoké učení technické v Praze

Praha 2011

Publikace byla zpracována za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2011 – část A – Program EFEKT.



MINISTERSTVO  
PRŮMYSLU A OBCHODU



Recenzent: doc. Ing. František Přibyl, CSc.

© Jaroslav Doležal, Jiří Šťastný, Jan Špetlík, Stanislav Bouček,  
Zbyněk Brettschneider, 2011

ISBN 978-80-01-04936-5

Vážení čtenáři,

čas, kdy tato publikace vznikla, je ve znamení pokračujících dynamických změn v energetice. Energetika jako celek, nejen výroba, přenos a distribuce elektřiny, na které se zaměřuje tato edice odborných publikací, je ovlivňována zásadními událostmi. Plně se otevřel trh s elektřinou a plynem, stále narůstá podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny, mění se a vyhraňují postoje k jaderné energetice. V rámci Evropy se stále více diskutuje o využití primárních zdrojů i paliv, rostou nároky na přenosovou soustavu.

Celý rozvoj energetického odvětví by však nebyl možný bez dostatku kvalitních lidských zdrojů. Proto považuji za akutní problém zajištění dostatečného počtu odborníků pro budoucí činnost v této náročné technické oblasti. Předpokladem pro přípravu kvalitních odborníků jsou kvalitní odborné základy a já věřím, že právě tato publikace je dokáže poskytnout.

Celá edice odborných publikací je svým způsobem výjimečná, neboť po delší době opět věnuje pozornost jednotlivým oblastem elektroenergetiky a velmi kvalitně standardizuje poznatky z tohoto náročného oboru. Je jisté, že tato edice může přispět k větší konsolidaci a spolupráci v oboru technického vzdělávání, vědy a výzkumu, aby se opět zvýšila prestiž technických oborů. Ministerstvo průmyslu a obchodu, které významně podpořilo vznik této ediční řady, chce tímto způsobem přispět k zajištění konkurenceschopnosti hospodářství na území České republiky, které bylo vždy založeno na kvalitní technické produkci.

Řada publikací vznikla ve spolupráci kolektivů autorů technických vysokých škol České republiky. Rád bych závěrem poděkoval autorům za jejich profesionální přístup při přípravě publikace a také mým kolegům z ministerstva za zajištění realizace projektu. Všem uživatelům přeji, aby jim publikace napomohla při jejich vzdělávání a práci a stala se nedílnou součástí knihovny, ke které se budou pravidelně vracet.



Ing. Roman Portužák, CSc.

ředitel odboru elektroenergetiky

Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky

## **Obsah**

<b>1.</b>	<b>Obecné otázky energetiky .....</b>	<b>10</b>
1.1.	Energie a její přeměny .....	10
1.2.	Státní energetická koncepce .....	12
1.3.	Obnovitelné, neobnovitelné a alternativní zdroje .....	14
1.3.1.	Výhody a nevýhody neobnovitelných zdrojů .....	14
1.3.2.	Výhody a nevýhody alternativních zdrojů .....	14
1.4.	Ekologizace elektráren .....	15
1.5.	Další aspekty elektráren .....	16
1.6.	Základní energetické a elektrárenské pojmy .....	19
1.7.	Řazení elektráren do křivky trvání výkonů .....	21
1.8.	Literatura .....	22
<b>2.</b>	<b>Tepelné centrály .....</b>	<b>23</b>
2.1.	Parní tepelné centrály .....	23
2.1.1.	Okruh paliva, škváry a popela .....	25
2.1.2.	Okruh vzduchu a kouřových plynů .....	25
2.1.3.	Okruh páry, napájecí a chladící vody .....	26
2.1.4.	Okruh elektrický .....	26
2.2.	Energetické nároky okruhů a vlastní spotřeba .....	26
2.3.	Tepelné oběhy a jejich zdokonalování .....	30
2.3.1.	Energetické bilance tepelné elektrárny .....	36
2.3.2.	Energetická bilance parní kondenzační turbíny s třístupňovým regeneračním ohřevem napájecí vody .....	37
2.3.3.	Energetická bilance přihřívání páry .....	38
2.3.4.	Energetická bilance kondenzátoru .....	39
2.4.	Teplárny a výtopny .....	43
2.5.	Paroplynové centrály .....	45
2.6.	Kogenerace .....	47
2.7.	Základní ekonomické ukazatele a charakteristické hodnoty tepelných oběhů elektráren .....	48
2.7.1.	Přehled účinností tepelné elektrárny .....	49
2.8.	Vliv provozních poruch na ekonomii bloku .....	54
2.8.1.	Odezva kondenzačního zařízení na provozní poruchy .....	54
2.8.2.	Poruchy v systému regeneračního ohřevu napájecí vody .....	56
2.9.	Parní kotle .....	57
2.9.1.	Spalovací zařízení .....	59
2.10.	Regulační programy tepelných elektráren .....	65
2.10.1.	Řízený klouzavý tlak .....	70
2.11.	Některé regulační obvody .....	73
2.11.1.	Regulace bubenových kotlů .....	73
2.11.2.	Regulace průtlačných kotlů .....	75
2.11.3.	Regulace parních turbín .....	76
2.12.	Literatura .....	79

<b>3.</b>	<b>Jaderné elektrárny .....</b>	<b>80</b>
3.1.	Specifika jaderné elektrárny .....	81
3.2.	Základy jaderné fyziky.....	82
3.2.1.	Základní specifika elektráren z hlediska použitého chladiva .....	114
3.3.	Dynamika jaderných elektráren.....	127
3.3.1.	Dynamika jaderného reaktoru .....	127
3.4.	Řídící systémy JE, bezpečnost .....	133
3.4.1.	Řídící systém.....	133
3.4.2.	Bezpečnost.....	135
3.4.3.	Základní principy a požadavky bezpečnosti .....	136
3.5.	Regulační programy a regulační obvody .....	139
3.5.1.	Režimy práce a regulační programy JE s tlakovodními reaktory.....	139
3.5.2.	Regulační programy .....	141
3.5.3.	Provozní režimy reaktoru .....	146
3.5.4.	Regulace reaktoru .....	147
3.5.5.	Související regulace .....	150
3.5.6.	Perspektivy rozvoje JE .....	152
3.5.7.	Generace jaderných reaktorů.....	153
3.5.8.	Energetické zdroje budoucnosti .....	157
3.6.	Literatura .....	161
<b>4.</b>	<b>Elektrická část elektráren .....</b>	<b>162</b>
4.1.	Zdroje vlastní spotřeby elektrárny .....	162
4.2.	Výpočet velikosti zdrojů vlastní spotřeby elektrárny .....	163
4.3.	Elektrická schémata elektráren .....	164
4.3.1.	Základní schémata s jedním odbočkovým a blokovým transformátorem na generátor .....	167
4.3.2.	Dva blokové a dva odbočkové transformátory na jeden generátor .....	168
4.3.3.	Paralelní spolupráce dvou bloků .....	169
4.4.	Elektrické stroje v elektrárnách .....	171
4.4.1.	Synchronní stroje .....	171
4.4.2.	Volba elektromotorů pro pohony vlastní spotřeby elektrárny .....	177
4.5.	Princip činnosti asynchronních strojů .....	179
4.6.	Transformátory v elektrárnách .....	181
4.7.	Vlastní spotřeba elektráren .....	183
4.8.	Dimenzování vlastní spotřeby .....	186
4.9.	Kontrola navrženého zdroje vlastní spotřeby elektrárny .....	188
4.10.	Kontrola navrženého zdroje při samonajíždění elektromotorů .....	192
4.11.	Fázování alternátoru .....	195
4.11.1.	Fázování s chybou modulu .....	196
4.11.2.	Fázování s chybou fáze .....	196
4.11.3.	Fázování s chybou kmitočtu .....	197
4.11.4.	Samosynchronizace .....	198
4.11.5.	Asynchronní chod stroje .....	198
4.11.6.	Diagram mezních zatížení synchronního generátoru .....	198
4.11.7.	Diagram mezních zatížení stroje s vyniklými póly .....	201
4.12.	Zapouzdřené vodiče .....	202
4.13.	Literatura .....	204

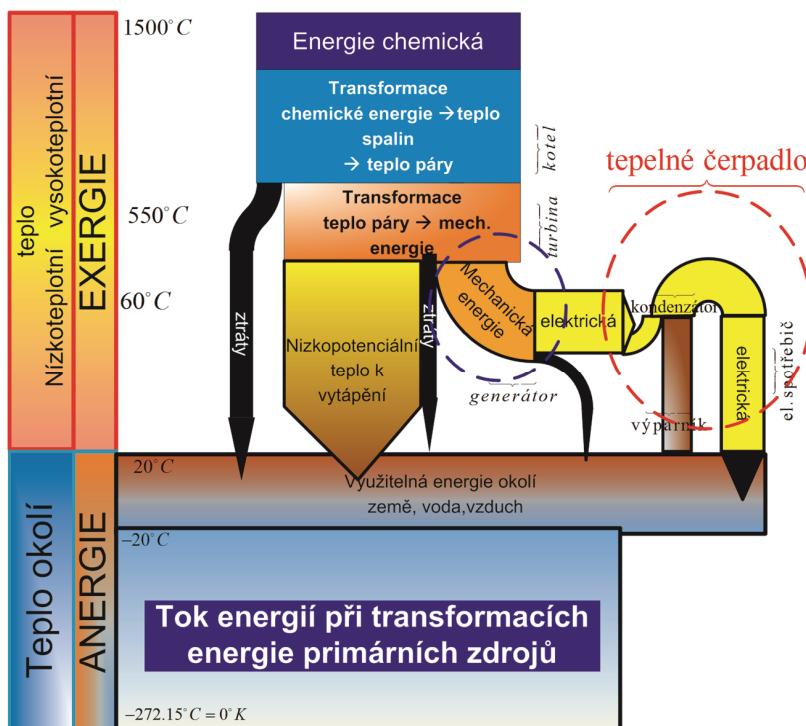
<b>5.</b>	<b>Informační technologie v elektrárnách .....</b>	<b>205</b>
5.1.	Distribuované řídicí systémy (DCS) .....	205
5.2.	Distribuované řídicí systémy na bázi PLC.....	207
5.3.	Úrovně řízení v distribuovaném řídicím systému .....	208
5.3.1.	Úroveň technologického procesu.....	208
5.3.2.	Úroveň řízení procesu .....	210
5.4.	Dohlížecí (operátorská) úroveň .....	213
5.4.1.	Úroveň managementu.....	213
5.5.	Komunikace v rámci distribuovaného řídicího systému .....	214
5.5.1.	Sítě pro přenos procesních dat – průmyslové sítě.....	214
5.5.2.	Informační síť LAN, WAN .....	215
5.5.3.	Referenční model ISO/OSI.....	215
5.5.4.	Fyzická vrstva.....	216
5.5.5.	Linková vrstva .....	219
5.5.6.	Aplikační vrstva .....	224
5.6.	Sériová rozhraní (sběrnice).....	225
5.6.1.	Rozhraní RS232.....	225
5.6.2.	Rozhraní (sběrnice) RS485 a RS422.....	226
5.6.3.	Proudová smyčka .....	227
5.7.	Nejběžnější používané průmyslové sítě (sběrnice) .....	228
5.7.1.	Profibus .....	230
5.7.2.	MPI (Multi Point Interface).....	232
5.7.3.	CAN .....	232
5.7.4.	MODBUS .....	233
5.7.5.	MODBUS Serial Line.....	234
5.7.6.	MODBUS PLUS .....	235
5.7.7.	AS-I.....	235
5.8.	TCP/IP a Ethernet .....	236
5.8.1.	Síťový protokol TCP/IP .....	237
5.8.2.	Ethernet .....	239
5.8.3.	Průmyslový Ethernet .....	240
5.8.4.	Profinet .....	241
5.9.	Literatura .....	244
<b>6.</b>	<b>Budicí systémy generátorů .....</b>	<b>245</b>
6.1.	Odbuzovače .....	246
6.1.1.	Odbuzovač se zhášecím odporem.....	246
6.1.2.	Odbuzovač se zhášecí komorou .....	247
6.1.3.	Odbuzení přepólováním zdroje .....	248
6.2.	Budicí obvody .....	248
6.2.1.	Statický systém se střídavým budičem, kroužky a neřízenými ventily..	250
6.2.2.	Statický systém se střídavým budičem, s kroužky a řízenými ventily...	250
6.2.3.	Systém s rotujícími neřízenými ventily, střídavým budičem a bez kroužků .....	251
6.2.4.	Systém s rotujícími řízenými ventily, střídavým budičem a bez kroužků ....	252
6.3.	Systémové stabilizátory - PSS .....	252
6.3.1.	Princip PSS .....	253
6.3.2.	Typy PSS .....	256

6.3.3.	Metody pro nastavení a ladění PSS .....	257
6.3.4.	Metody ověřování funkce PSS.....	258
6.4.	Literatura .....	259

# 1. Obecné otázky energetiky

## 1.1. Energie a její přeměny

Energie, zejména elektrická, se stala jednou z nejdůležitějších podmínek fungování ekonomiky a dokonce i životaschopnosti moderní lidské společnosti, protože její užívání se stalo takovou samozřejmostí, bez které si současný život neumíme představit. Elektrickou energii nevyrábíme, ale získáváme ji přeměnou z jiných forem energií. Řetězec přeměn ukazují obr. 1.1 a 1.2.



Obr. 1.1: Přeměny energií

Všechny zdroje energií lze členit do tří skupin:

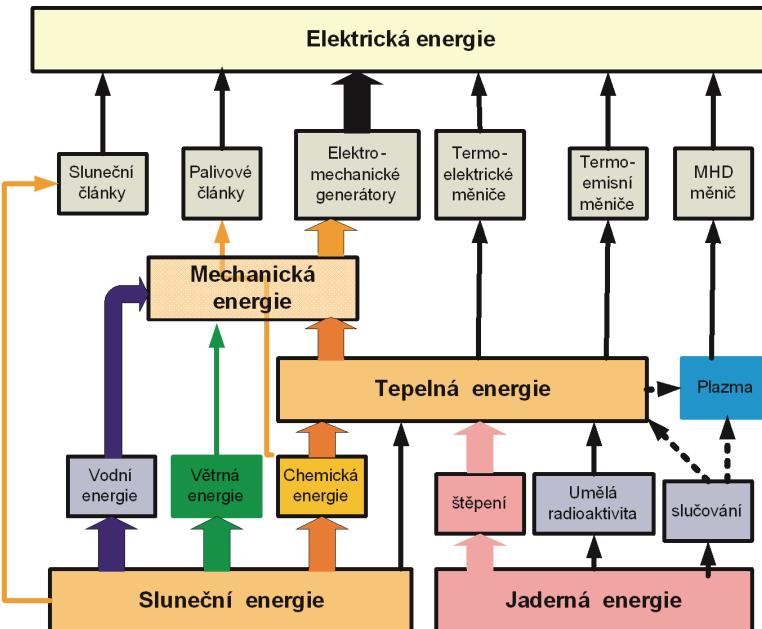
- Zdroje vázané na určité místo s omezenou a zmenšující se kapacitou (uhlí, plyn, zemní olej, rašelina, uran)
- Zdroje vázané na určité místo s obnovující se kapacitou (vodní toky, biomasa)
- Zdroje, které nejsou vázané na místo, s prakticky nelimitovanou kapacitou (sluneční záření, příliv a odliv, energie větru)

Pro kvantifikaci energie se používá řada jednotek, jejichž základní přehled je uveden v převodní tab. 1.1:

	J	kWh	kcal	Btu
J	1	$2.778 \cdot 10^{-7}$	$2.389 \cdot 10^{-7}$	$9.479 \cdot 10^{-7}$
kWh	$3.6 \cdot 10^6$	1	0.86	$3.413 \cdot 10^3$
kcal	4186	1163	1	$3.968 \cdot 10^3$
Btu	$1055 \cdot 10^3$	$2.93 \cdot 10^{-4}$	$2.52 \cdot 10^{-4}$	1

Tab. 1.1: Převodní tabulka vybraných jednotek energie

Možnosti získávání elektrické energie prezentuje obr. 1.2.



Obr. 1.2: Řetězce přeměn energií na energii elektrickou

**Elektrická energie** je jedním ze základních typů široce využívané energie s následujícími užitečnými vlastnostmi:

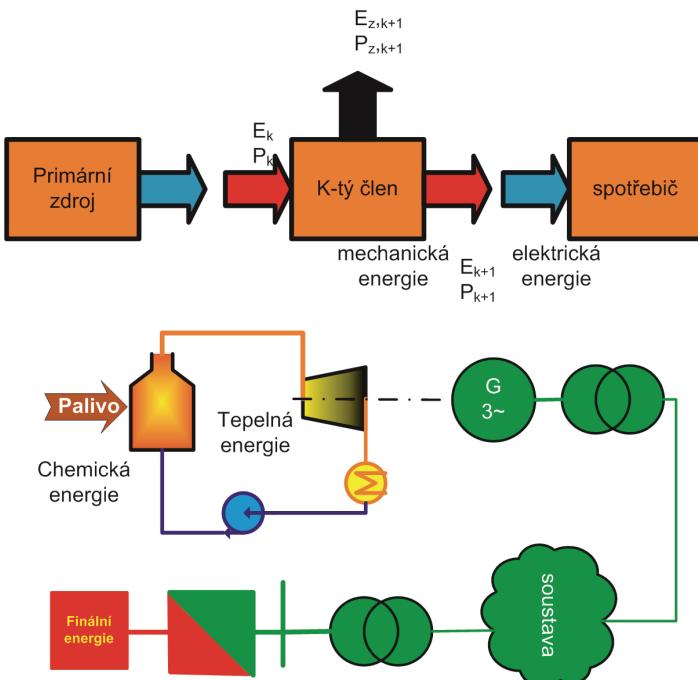
- a) snadná transformovatelnost na jiné druhy energie
  - b) snadná transportovatelnost na velké vzdálenosti
  - c) možnost generovat energii ve velkých jednotkách
- a jednou nevýhodou vlastnost: nelze ji jednoduše akumulovat.

Elektrickou energii nevyrobíme, ale získáváme ji přeměnou z energií prvních zdrojů. Podle použitého druhu první energie členíme elektrárny na:

- a) **tepelné** - využívají energie uvolněné spalováním fosilního paliva (uhlí, nafta, plyn)
- b) **jaderné** - využívají energie jaderné reakce

- c) **vodní** - využívají potenciální energie vodních zdrojů
- d) **ostatní** - využívají energie větrné, sluneční, geotermální, přílivu a odlivu

Než se energie primárního zdroje dostane k místu finálního užití, musí se podrobit řetězci přeměn. Na obr. 1.3 je znázorněna přeměna chemické energie primárního zdroje na tepelnou, mechanickou a elektrickou, která se po transformaci na vhodnou napěťovou úroveň transportuje do místa spotřeby, kde se zpětně transformuje na užitnou napěťovou úroveň a přemění se měničem (motor, topidlo,...) do požadované finální formy (mechanická, tepelná,...).



Obr. 1.3: Řetězec přeměn energie od zdroje ke konečnému užití

Pro definování pracovního bodu sériově řazených přeměn jsou rozhodující charakteristiky počátečního a koncového řetězce. Mezilehlé řetězce se v tomto procesu neprojeví a nabízejí jen transportní službu. Například pro určení pracovního bodu v charakteristikách P-f jsou rozhodující charakteristiky primární regulace turbín a charakteristika koncové spotřeby.

## 1.2. Státní energetická koncepce

Základním předpokladem funkčnosti rozvinuté společnosti je dobré pracující energetický sektor, který zajišťuje dostupnou, bezpečnou, k životnímu prostředí šetrnou a cenově přijatelnou energii. Státní energetická koncepce je výraznou částí hospodářské politiky, která svou vizí konkretizuje státní priority a cíle, jichž chce dosáhnout při ovlivňování rozvoje energetického hospodářství s horizontem příštích tří let. Současná koncepce byla vytvořena na základě analýz vývoje a sou-

časného stavu energetického hospodářství, s přihlédnutím k postupům a standardům Evropské unie a závazkům z mezinárodních smluv v oblasti energetického hospodářství a je založena na širokém zdrojovém mixu s akcentem na využívání tuzemských zdrojů a ke snižování energetické náročnosti.

Při volbě priorit, cílů a souboru nástrojů státní energetické koncepce jsou respektována nejen hlediska energetická, ale rovněž hlediska ekonomická, ekologická a sociální. Vize státní energetické koncepce definuje základní priority, které mají být v ideálním případě dosaženy v průběhu sledovaného období a dodrženy až do jeho konce.

Základní priority vize české energetické koncepce jsou následující :

- Nezávislost na cizích zdrojích energie (rizikové zdroje, spolehlivost dodávek)
- Bezpečnost zdrojů energie (zejména jaderných)
- Udržitelný rozvoj (ochrana životního prostředí)

Konkrétní plnění těchto priorit jsou obsaženy v následujících bodech:

#### **a) Maximalizace energetické efektivnosti**

- 1) využití energetických zdrojů. Vede k preferenci zdrojů s vysokou účinností alokovaných tak, aby se následnou dopravou energie generovaly minimální ztráty.
- 2) technologických procesů. Cílem tohoto bodu je snížit relativně vysokou energetickou náročnost (vůči hodnotám v EU) tvorby hrubého domácího produktu preferencí takových technologií, které co nejfektivněji zhodnocují energii při tvorbě přidané hodnoty.
- 3) využití tepla. Cílem tohoto bodu je maximalizace úspor tepla ve všech oborech činnosti
- 4) spotřebičů elektrické energie. Cílem tohoto bodu je preference úsporných spotřebičů (např. žárovky atp.) a ztrát v rozvodech energie.

#### **b) Zajištění vhodné struktury energetických zdrojů**

- 1) Podpora výroby energie z obnovitelných zdrojů energie. Cílem tohoto bodu je určitá preference všech typů obnovitelných zdrojů energie.
- 2) Maximalizace využití domácích zdrojů. Plnění tohoto bodu má za úkol dosažení maximální energetické nezávislosti státu preferencí maximálního využití všech vytěžitelných zásob fosilních paliv s ohledem na ekologické důsledky.
- 3) Optimalizace využití jaderné energie. Plnění tohoto cíle vede ke snižování ekologické zátěže prostředí a zvyšování energetické nezávislosti.

**c) V časovém horizontu do roku 2030 naplnit následující strukturu primárních energetických zdrojů:**

- tuhá paliva: 31 ÷ 33 %
- plynná paliva: 19 ÷ 20 %
- kapalná paliva: 12 ÷ 13 %
- jaderné palivo: 23 ÷ 24 %
- obnovitelné zdroje: 12 ÷ 13 %

Lze konstatovat, že zásobování energiemi je složitý celosvětový problém a jeho řešení založené na elektrárnách s fosilními palivy má svůj omezený časový horizont a je proto třeba maximálně využívat celého spektra zdrojů energií včetně všech možností na zvýšení efektivnosti přeměn a důsledně se snažit o snižování energetické náročnosti.

### **1.3. Obnovitelné, neobnovitelné a alternativní zdroje**

Udržitelný rozvoj moderní společnosti v 21. století je možný pouze za předpokladu zajištění energetických požadavků v průmyslové i komunální oblasti, které se týkají zejména dodávky elektrické energie a tepla, včetně zajištění často velmi kolísajících výkonových požadavků v čase. Primární energetické zdroje využívané k výrobě elektrické energie se dělí na neobnovitelné (tradiční fosilní paliva), obnovitelné (vodní energie, větrná energie, sluneční energie, geotermální energie, tepelná čerpadla, biomasa a energie mořských vln, případně využívání přílivu a odlivu) a alternativní (jaderná energie, palivové články, bioplyn).

#### **Výhody a nevýhody obnovitelných zdrojů**

**Výhody:** nevyčerpateľné a ekologické, relativně nízké provozní náklady.

**Nevýhody:** nízká výkonová hustota (sluneční, větrná), nízká výkonová pohotovost (sluneční, větrná), kromě vodní energie podstatně vyšší celkové výrobní náklady (Kč/kWh) - nutnost dotací, velmi nepříznivý rozdíl mezi podílem na instalovaném výkonu a podílem na výrobě elektrické energie.

#### **1.3.1. Výhody a nevýhody neobnovitelných zdrojů**

**Výhody:** vysoká výkonová hustota, vysoká výkonová spolehlivost a pohotovost.

**Nevýhody:** vysoká ekologická zátěž (těžba, doprava, emise spalin), omezené zásoby, trvale stoupající cena.

#### **1.3.2. Výhody a nevýhody alternativních zdrojů**

**Výhody:** vysoká výkonová hustota (JE), vysoká výkonová spolehlivost, v případě budoucího přechodu na jadernou fúzi prakticky nevyčerpateľnost zdroje.

**Nevýhody:** určité bezpečnostní obavy (JE)

## **1.4. Ekologizace elektráren**

Základem ekologického provozu elektráren je snížení obsahu škodlivých látek v emisích, které začíná odsířením a denitrifikací vstupujícího paliva. Obsah síry v palivu kolísá dle druhu a místa těžby. V českých pánvích obsahuje černé uhlí asi 1 % síry, hnědé uhlí 1 ÷ 3 %. Síra má v palivu různé formy výskytu například síran, čisté formy, organické formy a z 30 ÷ 70 % má formu pyritickou ( $\text{FeS}_2$ ), což je minerál s 2,5krát větší měrnou hmotností než uhlí. Tohoto rozdílu měrných hmotností využívá fyzikální separace síry, při které se z rozemletého paliva proudem vody unášeji lehčí složky paliva a těžší pyrit se usazuje. Touto metodou lze snížit obsah pyritu o 30 ÷ 60 %.

### **Odsiřování kouřových spalin**

Proces odsiřování spalin snižuje obsah  $\text{SO}_2$  ve spalinách před jejich výstupem do ovzduší odsiřovacími technologiemi zařazenými za koncem spalovacího cyklu. Z několika možných postupů se v ČR použily dva:

#### **Mokrá vápencová vypírka**

Ve vysoké nádobě (výška = 40 m, průměr = 15 m) procházejí spalinou vícestupňovou sprchou rozstříkující vápencovou suspenzi, se kterou oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ) reaguje a v konečné fázi všech reakcí vzniká sádrovec dále stavebně využitelný.

#### **Polosuchá vápencová metoda**

Aktivní látka se jako vodní suspenze vstříkuje do proudu horkých spalin, ve kterých se voda odpaří a produkt reakce se zachycuje v tuhé formě.

#### **Denitrifikace**

Denitrifikace spalin označuje odstraňování různých oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) ze spalin primární a sekundární metodou.

- Primární metoda zabraňuje vzniku  $\text{NO}_x$  již konstrukcí kotle a řízením spalování lze snížit o 40 ÷ 60 %.
- Sekundární metoda likviduje již vzniklé  $\text{NO}_x$  selektivní katalytickou redukcí ve speciálním reaktoru, kde jsou katalyzátorem oxidy vanadu, molybdenu nebo wolframu na nosiči z oxidu titaničitého. Přes katalyzátor se vedou spaliny se vstříkovaným amoniakem a vzniká elementární dusík a voda. Metoda je sice dražá ale relativně účinná (90 %).

#### **Program ekologizace elektráren**

V letech 1992-1998 byl elektrárenskou společností ČEZ realizován unikátní program ekologizace provozu tepelných elektráren směřovaný k vylepšení jejich technického stavu na úroveň vylučující další devastaci životního prostředí. V rámci tohoto programu v celkové hodnotě investic asi 100 miliard Kč bylo instalováno celkem 28 odsiřovacích jednotek odsiřujících celkem 6462 MW instalovaného výkonu, z toho 5930 MW metodou mokré vápencové vypírky (MVV), 220 MW polosuchou vápencovou metodou (PSV), 497 MW bylo vybaveno moderním fluidním

spalováním. Současně s tímto programem se utlumil provoz starých nevyhovujících zařízení (2020 MW).

Elektrárna	výkony (MW)	data realizace
Hodonín	55 , 50,	1.1993, 1.1995, 8.1996
Počerady	200	1.1994
Ledvice	110	2.1994
Tušimice 1	110 , 2x110	9.1996, 12.1998
Tušimice	110	4. 1998
Tisová	50	6.1998
Ledvice	200	12. 1998
Poříčí	55	12. 1998
Mělník 2	2x110	12. 1998

**Tab.1.2: Program útlumu starých elektráren**

Elektrárna	Výkon (MW)	Instalováno
Tisová	86,86	12. 95, 11.97
Hodonín	60,45	9. 97, 10.97
Poříčí	55,55	10.96, 9.98
Ledvice	110	10. 98

**Tab. 1.3: Program výstavby fluidních kotlů**

Elektrárna	Výkon (MW)	Metoda	Instalováno
Prunéřov 1	4 x 110 MW	MVV	12. 95
Prunéřov 2	5 x 210 MW	MVV	8. 96
Počerady	2 x 200 MW, 3x200	MVV	11.94, 11.96
Ledvice	2 x 110 MW	PSV	12. 96
Tušimice 2	4 x 200 MW	MVV	5. 97
Tisová	100 MW	MVV	11.97
Chvaletice	2 x 200 MW,2x200	MVV	12. 97,11.98
Dětmarovice	4 x 200 MW	MVV	6. 98
Mělník	720 MW	MVV	11. 98

**Tab. 1.4: Program odsiřování v ČR**

## 1.5. Další aspekty elektráren

### Porovnávání typů elektráren

Na úvod porovnávání lze konstatovat, že každý typ nějakým způsobem ovlivňuje okolní životní prostředí. Následující námítky lze uplatňovat u všech velkých zdrojů:

- Vliv na krajinnou ekologii (JE, TE, VE)
- Spalovací technologie a emise skleníkových plynů (TE)
- Úroveň jaderné bezpečnosti a skladování jaderného odpadu (JE)

Bohužel u všech skupin obyvatelstva vykristalizoval princip odporu proti jakékoliv stavbě většího energetického díla v blízkosti místa jejich bydliště. To je ale v přímém rozporu s mentalitou moderního člověka, který automaticky vyžaduje maximální pohodlí plynoucí z dostatku energie. Zajištění dostatku energie je velkým problémem pro budoucnost. Přístup k primárním energetickým zdrojům je i předmětem mocenských strategií a sporů. Situaci navíc komplikuje celosvětová aktivace odpůrců jaderné energetiky po havarijních v sovětském Černobylu a japonské Fukušimě ústící dokonce k odklonu od jaderné energetiky. Proti těmto tendencím ale hraje svoji pozitivní roli:

- Úspěšný rozvoj druhé a plány dalších generací jaderných elektráren
- Moderní konstrukce jaderného paliva umožňující delší cyklus jeho výměny
- Pokroky při řešení problematiky ukládání jaderného paliva.

Při porovnávání jednotlivých typů elektráren se jako optimální jeví metodika vzájemného porovnání rizika a zisku volby. Jako podklad také slouží finanční porovnávání různých investičních, provozních a externích nákladů.

Externí náklady jsou vyvolány procesy předcházejícími výrobě a procesy následnými.

typ elektrárny	náklady \$/W	náklady \$/kWh	
		primární zdroje	externí provozní
moderní JE	2-2.5	uhlí	2
moderní fosilní	1.5-2	nafta	1.6
moderní plynová s kombin. cyklem	1-2	plyn	0.36
		jádro	0.04
		vítr	0.22
		voda	0.22

Investiční náklady.

Externí a provozní náklady

Tab. 1.5: Finanční porovnání nákladů

### Programy a modernizace tepelných elektráren

Strategie programů obnovy je založena na poznatku, že komplexní obnova bloku (retrofit - podstatná výměna zařízení od kotle k turbíně) vyžaduje podstatně nižší investiční náklady než výstavba bloku nového. Dosáhne se tím však jen částečných zlepšení účinnosti a ekologie a menšího prodloužení životnosti (o 25 let) než výstavbou nového bloku, který má životnost kolem 50 let.

V současných plánech obnovy přichází v úvahu plnění těchto bodů:

- Postupné dožívání odsířených elektráren (životnost odsířovací technologie je asi 15 let)
- Retrofity vybraných elektráren
- Výstavba nových moderních zdrojů

- Útlum provozu těch bloků, u kterých by v budoucnu nevyhověl provoz zpřísněným ekologickým podmínkám nebo by byl limitován nedostatkem vhodného paliva (například Prunéřov 1, Mělník 3, Chvaletice)

Z predikce čerpání zásob uhlí v ČR lze navíc s vysokou pravděpodobností předpokládat, že v období 2035-2050 uhelné elektrárny ztratí své dominantní postavení na trhu s energiemi.

### Cesty modernizace tepelných elektráren

Cílem modernizací je:

- Zvyšování tepelné účinnosti procesu ( $\eta$  = získaná elektrická energie/energetický obsah paliva)
- Minimalizace měrné spotřeby paliva
- Snižování škodlivých emisí

Možnost splnění tétoho bodu nabízí paroplynová kogenerace s moderní technologií zplyňování uhlí (CCT – Clean Coal Technologies - přeměna uhlí na horký spalitelný plyn, při které se současně neutralizují škodlivé emise). Plyn pak expanduje v plynové turbíně pracující v kombinovaném paroplynovém cyklu.

### Metody zplyňování paliva

- **Tlakové zplyňování a paroplynový cyklus.** Ke zplynění uhlí pod tlakem dochází v sesuvném loži, při fluidní nebo hořákové technologii. Při jeho styku s kyslíkem nebo párou vzniká plyn s obsahem CO a H<sub>2</sub>. Plyny vyčázející pod tlakem z uhelných zplyňovacích reaktorů se zbaví prachových částic a odsíří. Po vyčištění se vedou do plynové turbíny pohánějící elektrický generátor. Odpadní teplo kombinované s teplem reaktoru se dále využívá k výrobě vysokotlaké páry pro parní turbínu. Touto technologií lze dosáhnout tepelné účinnosti oběhu až  $\eta = 55\%$ . Navíc oproti konvenčním tepelným elektrárnám snižuje spotřebu vody, úroveň emisí SO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub> je až o 25 % nižší než u nejmodernějších práškových ohnišť a o řadu nižší než u starých kondenzačních elektráren.
- **Dvoufázové metody spalování.** V prvé fázi je uhlí zplyněno a část jeho energie je využita ve vysokoteplotních plynových turbínách. Ve druhé fázi je koksový zbytek ze zplyňovacího procesu spalován ve fluidním ohništi konvenčního parního oběhu.

### Trendy vývoje parních turbín

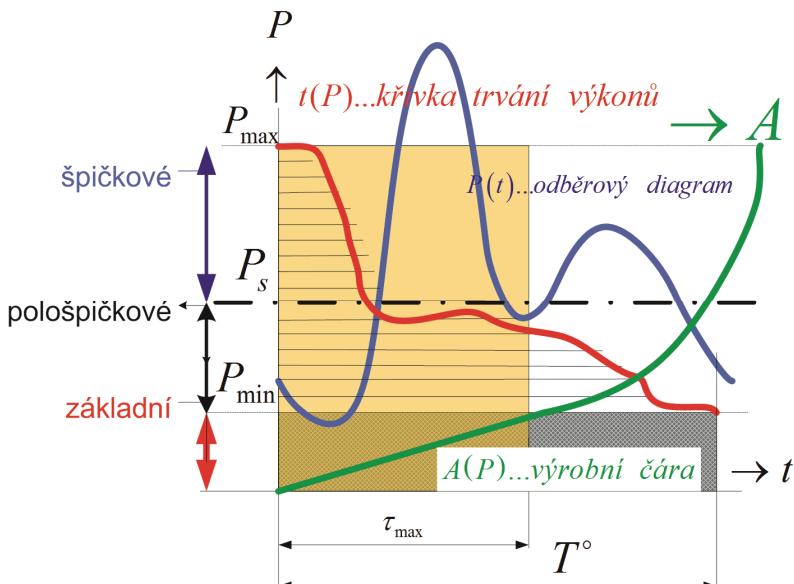
Snaha po zvyšování tepelné účinnosti elektrárny vede ke zvyšování parametrů admisní páry do nadkritických hodnot ( $p \geq 22,1$  MPa,  $t \geq 600$  °C) a zvýšení účinnosti nad 40 %. Pokud by vyvíjené monokrystalické slitiny pro lopatky umožnily jít až na teplotu admisní páry  $t = 700$  °C, mohla by se zvýšit účinnost oběhu až na 50 %.

**Plynové turbíny.** Pokud by materiál lopatek a jejich chlazení umožnily zvýšit vstupní teplotu na 1300 °C, lze do 30 let očekávat zvýšení účinnosti až na 50 %.

## 1.6. Základní energetické a elektrárenské pojmy

znak	význam	rozměr
T	perioda diagramu ( 24h-denní, 168h-týdenní, 720h-měsíční, 8760h-roční)	h
$\tau_{\max}$	doba využití maxima	h
P,Q,S	činný, jalový, zdánlivý výkon	W,Var,VA
$P_{\min}$ , $P_{\text{stř.}}$ , $P_{\max}$ .	minimální, střední, maximální výkon diagramu	W
$P_{z0}, A_{z0}$	Příkon a energie chodu zařízení naprázdno	W,Wh
$P_{zv}, A_{zv}$	Příkon a energie závislá na výkonu zatížení	W,Wh
$\in$	zatěžovatel	-
A	Práce, energie	Wh
$A_v$	Energie vlastní spotřeby	Wh
$A_p$	Dodávka na prahu elektrárny	Wh

Průběh zatížení v závislosti na čase  $P(t)$  znázorňuje diagram zatížení, který má na svislé ose okamžité hodnoty výkonu a na vodorovné ose čas.



Obr. 1.4: Diagram zatížení

Plocha pod tímto diagramem je celková vyrobená energie určená vztahem:

$$A = \int_0^T P(t) dt \quad (1.1)$$

Tuto plochu vyjadřujeme pomocí charakteristických hodnot dvou rovnoplochých obdélníků.

$$A = P_{stř} \cdot T = P_{max} \cdot \tau_{max} \quad (1.2)$$

V tomto výrazu a diagramu znamenají:

$$\tau_{max} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}{P_{max}} \quad P_{stř} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{T}$$

kde

$\tau_{max}$  ..... doba využití maxima, tj. doba za kterou se dosáhne při výkonu  $P_{max}$  stejně práce jako při proměnlivém zatížení  $P(t)$

$P_{stř}$  ..... střední zatížení reprezentující trvalé zatížení při kterém se za periodu  $T$  dosáhne stejně práce jako při proměnlivém zatížení  $P(t)$

$P_{max}$  ..... skutečné maximální zatížení ve sledovaném období  $T$  obvykle reprezentované 15minutovým průměrem nebo okamžitou hodnotou

$P_{min}$  ..... skutečné minimální zatížení ve sledovaném období  $T$  obvykle reprezentované 15minutovým průměrem nebo okamžitou hodnotou.

Z rovnice (1.2) vyplývá vztah pro zatěžovatele soustavy:

$$\xi = \frac{P_{stř}}{P_{max}} = \frac{\tau_{max}}{T} \quad (1.3)$$

Setřídíme-li výkony z diagramu od nejmenších k největším podle doby jejich trvání dostaneme čáru trvání výkonu  $t(P)$ . Nejmenší výkon trvá po celou dobu  $T$ . Plocha pod touto křivkou udává hodnotu vyrobené energie  $A$  za období  $T$ . Z křivky trvání výkonů  $t(P)$  se její integrací podle svislé osy získá výrobní čára  $A(P)$

$$A(P_{max}) = \int_0^{P_{max}} t(P) dP \quad (1.4)$$

Pro dodávku na prahu elektrárny platí vztah:

$$A_p = A - A_v \quad (1.5)$$

$$A_z = A_{z0} + A_{zv} \quad (1.6)$$

kde

$A_{z0}$  ..... ztráty v železe, ventilační, třením, dielektrické

$A_{zv}$  ..... ztracená energie průchodem proměnlivého proudu konstantní rezistencí R

$$A_{zv} = \int_0^T R \cdot i^2(t) dt \quad (1.7)$$

Alternativní vyjádření ztracené energie rovnoplochými obdélníky:

$$A_{zv} = RI_{ef}^2 \cdot T = RI_{max}^2 \tau_z \quad (1.8)$$

Doba plných ztrát závisející na tvaru diagramu zatížení

$$\tau_z = T \left( \xi \frac{I_{ef}}{I_{stř}} \right)^2 \quad (1.9)$$

V reálném provozu nemusí být zařízení vždy plně zatíženo a proto se pro respektování těchto poměrů v procesech dimenzování definují následující činitele:

$$\text{činitel využití: } K_v = \frac{P_{max}}{P_n} \leq 1 \quad (1.10)$$

$$\text{činitel současnosti: } K_s = \frac{P_{\Sigma,max}}{\sum_{\forall i} P_{i,max}} \leq 1 \quad (1.11)$$

$P_{\Sigma,max}$  .... dosažené maximum skupiny zařízení

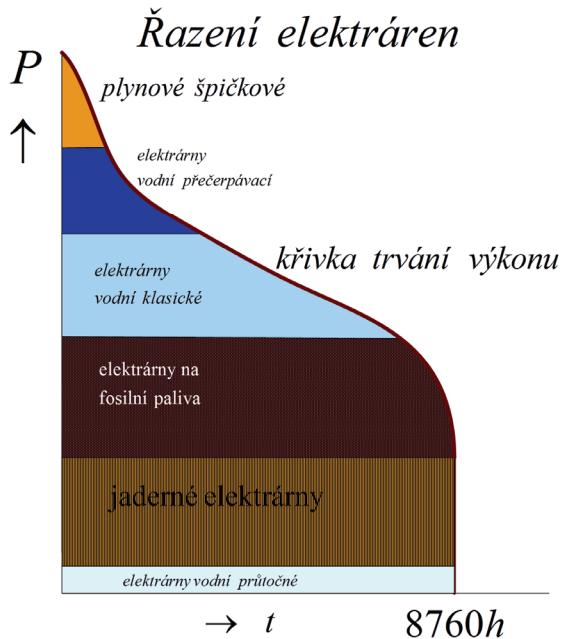
$$\text{koeficient náročnosti: } \beta = \frac{K_s \cdot K_v}{\eta_r \eta_z} \leq 1 \quad (1.12)$$

$\eta_r, \eta_z$  .... účinnosti rozvodu a zařízení.

## 1.7. Řazení elektráren do křivky trvání výkonů

Křivka trvání výkonů vznikne přiřazením doby trvání ke každé hodnotě výkonu diagramu zatížení. V tomto diagramu lze přehledně zařadit jednotlivé typy elektráren. Do nízkých hodnot základního zatížení se zařazují elektrárny, jejichž trvalý provoz je vynucen technologií nebo přírodou. Jsou to zejména průtočné vodní

elektrárny a elektrárny jaderné. Do středního pásmo se zařazují elektrárny tepelné a vodní s možností dodávky proměnlivého výkonu. Do špičkových hodnot pak elektrárny, které mohou rychle měnit výkon a jsou rychle startovatelné. Jsou to zejména špičkové elektrárny plynové a vodní elektrárny přečerpávací.



Obr. 1.5: Řazení elektráren

## 1.8. Literatura

- [1] Klaus Heuck Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab Elektroenergiesysteme Springer 2007
- [3] Herbert Windisch Termodynamik OldenbourgVerlag Mochen 2008
- [4] Šťastný, J.: Energetická strojní zařízení ČVUT Praha 2010
- [5] R.A.Zahoransky. Energietechnik. Wieweg+Teubner 2009
- [6] S. Kaplan. Power Plant Characteristics and Costs.Nova Science Publishers, Inc.2010
- [7] [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz)
- [8] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)

## 2. Tepelné centrály

### 2.1. Parní tepelné centrály

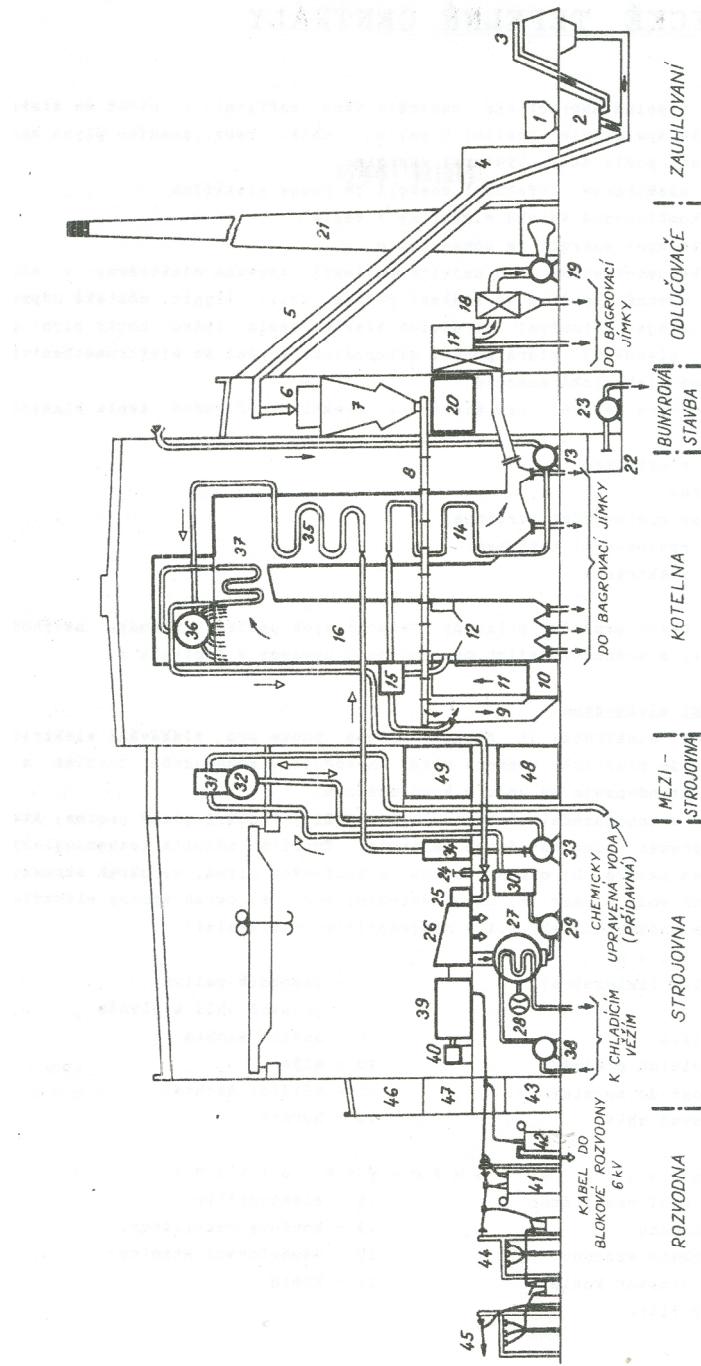
Podle způsobu transformace primárního energetického zdroje se dělí na:

- Kondenzační tepelné elektrárny
- Teplárny
- Výtopny

**Kondenzační elektrárny** – slouží výhradně k výrobě elektrické energie. Jejich transformační účinnost je definovaná tepelnou účinností oběhu s kondenzační turbínou.

Okruh paliva, strusky a popela			
1	přísun paliva	7	zásobník paliva
2	výsypka	8	podavač paliva k mlýnům
3	skladka paliva	9	sušící šachta
4	třídič	10	mlýn
5	dopravní most	11	třídící šachta
6	pásový podavač	12	hořáky
22	bagrovací jímka	23	bagrovací čerpadlo
Okruh vzduchu a kouřových plynů			
13	sací ventilátor vzduchu	18	elektrostatický odlučovač
14	ohřívák vzduchu	19	kouřový ventilátor
15	rozvod horkého vzduchu	20	usměrňovací stanice
16	spalovací prostor kotle	21	komín
17	mechanický filtr		
Okruh páry, napájecí a chladící vody			
24	hlavní uzávěr páry	32	zásobník napájecí vody
25	primární regulátor turbíny	33	napájecí čerpadlo
26	parní turbína	34	vysokotlaký ohřívák nap. vody
27	kondenzátor	35	ohřívák nap. vody (ekonomizér)
28	vývěva	36	buben kotle
29	čerpadlo kondenzátu	37	přehřívák
30	nízkotlaký ohřívák nap. vody	38	čerpadlo chladící vody
31	odplyňovák		
Okruh elektrický			
39	turboalternátor	45	vyvedení výkonu do vvn
40	budič	46	bloková dozorna
41	blokový transformátor	47	společná rozvodna VS
42	odbočkový transformátor	48	bloková rozvodna VS
43	transformátory nn	49	bloková tepelná rozvodna
44	rozvodna vvn		

Tab. 2.1: Popis technologie kondenzační tepelné elektrárny



Obr. 2.1: Technologie tepelné elektrárny

Technologie tepelné elektrárny je tvořena soubory koncepčně řazených zařízení. Moderní koncepce blokového uspořádání řadí do série soubory kotle – turbíny – generátoru – blokového transformátora a vyvedení výkonu do systému. Sériové řazení vyžaduje maximální spolehlivost jednotlivých článků řetězce, neboť porucha jednoho článku znamená vyřazení z provozu celého bloku.

Z hlediska toku provozních hmot se technologie tepelné elektrárny člení na:

- 1) Okruh paliva, škváry a popela
- 2) Okruh vzduchu a kouřových plynů
- 3) Okruh páry, napájecí a chladící vody
- 4) Okruh elektrický
- 5) Okruhy pomocné (mazacího a regulačního oleje, chlazení generátoru, chladicího oleje transformátoru)

### 2.1.1. Okruh paliva, škváry a popela

Zdrojem primární energie v tepelné elektrárně je palivo ve formě tuhé, kapalné, plynné. V ČR se většinou užívá tuhé palivo, převážně hnědé uhlí. Tuhé palivo se dopravuje po železnici nebo vodě. Palivo se skládá do výsypek **2**, odkud se transportuje buď na skládku **3**, nebo přes úpravu na vhodnou velikost v drticí stanici a dále po šíkmých dopravních pasech do zásobníků **7** a odtud k podavačům paliva a následně do mlýnů **10**, ve kterých se palivo mele na jemný prášek, suší a vhání ventilátorem **13** spolu s horkým vzduchem přes hořáky **12** do topeniště parního kotla, kde shoří a tuhé zbytky (horká struska) padají do výsypek, kde se ochladí vodou a následně nadrtí v drtičích na vhodnou velikost zrna a vodou splachují do bagrovacích jímek a odtud přemisťují čerpadly na vzdálené složiště strusky. Do bagrovacích jímek se splavuje i popílek z tahů kotle a odlučovačů popílku z kouřových plynů.

### 2.1.2. Okruh vzduchu a kouřových plynů

Kouřové plyny jsou jedním z produktů spalovacího procesu a využívají se ke zvyšování účinnosti a efektivnosti procesu. Ve výparníku kotle tvořeném trubkami předávají teplo protékající vodě a přeměňují ji na sytu páru, která se z bubnu **36** vede do parojemu a dále do přehříváku **37**. Přehřátá pára vstupuje do turbíny, kde dochází k transformaci tepelné a tlakové energie na energii mechanickou. Zbytkového tepla kouřových plynů se využívá k předehřívání napájecí vody **35** a ohřívání vzduchu vedeného ventilátorem **13** s práškovým palivem přes hořáky do topeniště kotle. Před vstupem do komína **21** se kouřové plyny čistí v mechanických a elektrostatických filtrech. Potřebný komínový tah se vytváří kouřovým ventilátorem **19**.

### 2.1.3. Okruh páry, napájecí a chladící vody

Okruh páry a napájecí vody je uzavřený a z externích zdrojů se doplňují jen ztráty vzniklé netěsnostmi. V kondenzátoru **27** se expandované páře odejme kondenzační teplo a vzniklý kondenzát se dopravuje kondenzátním čerpadlem **29** přes nízkotlaký ohřívák **30** do odplyňováku **31** a následně do zásobníku napájecí vody, z kterého ji napájecí čerpadlo **33** tlačí přes vysokotlaký ohřívák **34** a ekonomizér **35** do bubnu kotle **36**. Přehřátá pára se tlakovým rozdílem mezi kotlem a turbínou transportuje přes regulační a uzavírací ventily do turbíny **26**, kde expanduje a tím přeměňuje tepelnou energii páry na mechanickou, která pohání generátor, kde dochází k transformaci na energii elektrickou.

### 2.1.4. Okruh elektrický

Tento okruh je tvořen elektrickou částí elektrárny. Podrobněji viz kap. 5.

## 2.2. Energetické nároky okruhů a vlastní spotřeba

Analýzou základních okruhů tepelné elektrárny se získají podklady pro dimenzování jejich vlastní spotřeby.

Při známém elektrotepelném ekvivalentu

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} \Rightarrow 1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ} \quad (2.1)$$

a účinnosti elektrárny  $\eta_E$  je na výrobu jedné kWh potřeba energie

$$e_1 = 3,6 / \eta_E \quad (\text{MJ} / \text{kWh}) \quad (2.2)$$

kterou musí dodat palivo o výhřevnosti  $q_f$  (MJ/kg). Měrná spotřeba paliva na 1 kWh je pak určena výrazem:

$$m_{f1} = \frac{e_1}{q_f} = \frac{3600}{\eta_E q_f} = \frac{3600}{0,3 \cdot 12} = 1 \quad (\text{kg paliva}/1 \text{ kWh}) \quad (2.3)$$

Do kterého byly dosazeny typové hodnoty  $\eta_E = 0,3$ ,  $q_f = 12 \text{ MJ/kg}$

Měrná spotřeba páry na výrobu jedné kWh  $m_{p1}$  (kg/kWh) je závislá na entalpii admisní páry  $h_a$  (MJ/kg) definované funkční závislostí na tlaku  $p_a$  a teplotě páry  $T_a$  a na účinnosti turbíny  $\eta_T$  dle vztahu:

$$m_{lp} = \frac{3,6}{(h_a - h_{nv}) \cdot \eta_E} = \frac{3,6}{3,0,3} = 4 \quad (\text{kg páry}/1 \text{ kWh}) \quad (2.4)$$

ve kterém byly použity typové údaje  $(h_a - h_{nv}) = 3 \text{ MJ/kg}$ ,  $\eta_E = 0,3$ . Na odvedení kondenzačního tepla  $q_c$  obsaženého v 1 kilogramu páry chladicí vody je třeba při předpokládaném ohřátí  $\Delta\vartheta_c$  měrné spotřeby chladicí vody  $m_{lc}$ :

$$m_{lc} = \frac{q_c}{c_c \cdot \Delta\vartheta_c} = \frac{2340}{4,186 \cdot 10} = 60 \text{ (kg vody/1 kg páry)} \quad (2.5)$$

Ve výrazu (2.5) označuje  $c_c = 4,186 \text{ (kJ/kg.K)}$  měrnou tepelnou kapacitu chladicí vody,  $\Delta\vartheta_c = 10^\circ\text{C}$ ,  $q_c = 2340 \text{ kJ/kg}$  obvyklé ohřátí a kondenzační teplo pro obvyklé parametry chladicí vody a tlaku v kondenzátoru.

Výsledná hodnota rovnice (2.5) se využije pro výpočet spotřeby chladicí vody na výrobu 1 kWh.:

$$m_{lcp} = m_{lc} \cdot m_{lp} = 60 \cdot 4 = 240 \text{ (kg vody/kWh)} \quad (2.6)$$

Velkými spotřebiči vlastní spotřeby jsou důležité pohony jako vodní čerpadla (napájecí a chladicí vody) a ventilátory (vzduchový a kourový). Stanovení jejich výkonu můžeme buď podrobnější analýzou jejich obvodů a využitím teoretických vztahů, nebo použitím prakticky ověřených měrných energetických ukazatelů uvedených v tab. 2.2.

znak	rozsah hodnot	Rozměr	použito	význam
P	$P_{min}-P_{max}$	MW	P	vyráběný elektrický výkon
A	$A_{min}-A_{max}$	MWh	A	vyrobená energie
$K_d$	$1 \div 1,9$	kWh/t	1,5	měrná energie pro dopravu paliva ze skládky do kotelny
$K_M$	$10 \div 30$	kWh/t	20	měrná energie pro dopravu paliva ze skládky do kotelny
$K_s$	$1,1 \div 2,6$	kWh/t	2	měrná energie pro dopravu škváry a popela (dle vzdálenosti)
$K_{chn}$	$5 \div 6$	kWh/t	6	měrná energie obíhající vody potřebná k zajištění oběhu 1 tuny vody
$K_{cw}$	0,1	kWh/t	0,1	měrná spotřeba na dopravu chladicí vody
$K_v$	$3 \div 9$	$\text{m}^3/\text{kg}$	6	ukazatel množství vzduchu na spálení 1kg paliva
$K_p$	0,3		0,3	popelnatost paliva
$r_c$	2,34	MJ/kg	2,34	měrné výparné teplo chladicí vody
$\alpha$	$1,2 \div 1,3$	p.u.	1,3	poměrný přebytek vzduchu

Tab. 2.2: Tabulka měrných ukazatelů

Výkon čerpadla napájecí vody:

$$P_{\text{čnv}} = K_{\text{čnv}} \cdot m_{\text{lp}} \cdot P \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} P = 0,024 P \quad (2.7)$$

Výkon čerpadla chladicí vody:

$$P_{\text{cw}} = K_{\text{cw}} \cdot m_{\text{lp}} \cdot m_{\text{lc}} \cdot P \cdot 10^{-3} = 0,1 \cdot 4 \cdot 60 \cdot 10^{-3} P = 0,024 P \quad (2.8)$$

Chlazení emisní páry v kondenzátoru může být realizováno jako:

- Otevřený chladicí okruh - průtočné chlazení
- Uzavřený chladicí okruh s chladicími věžemi

Průtočné chlazení vyžaduje proti uzavřenému okruhu asi poloviční spotřebu energie, ale vzhledem k ekologickým mantinelem na ohřívání teploty vody v řece a jejich, z tohoto hlediska nedostatečným průtokům, je výstavba elektráren s průtočným chlazením omezena, a proto se většina elektráren staví s uzavřeným chladicím okruhem. Ochlazování chladicí vody ve věži se děje odpařováním její části, při kterém se odejme zbytku výparné teplo  $r_c$ , které ochladí o cca 15 °C přibližně 37 kg vody.

Poměrná ztráta vody je dána podílem:

$$m_{\Delta c} = 1/37 = 0,027 \quad (2.9)$$

Tento údaj lze s uvažováním všech existujících netěsností zaokrouhlit na hodnotu  $m_{\Delta c} = 0,03$ , která se musí v provozu nahrazovat z externích zdrojů (vodovodní řád, řeka, nádrže).

### Doprava a úprava paliva

Doprava paliva zatíží vlastní spotřebu následujícím výkonem:

$$P_d = m_{f1} \cdot K_d \cdot 10^{-3} \cdot P = 1 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 10^{-3} P = 0,0015 P \quad (2.10)$$

a k úpravě a mletí paliva je zapotřebí výkon:

$$P_d = m_{f1} \cdot K_m \cdot 10^{-3} \cdot P = 1 \cdot 20 \cdot 10^{-3} P = 0,02 P \quad (2.11)$$

### Okruh škváry a popela

Dopravu škváry a popela zajišťují bagrovací čerpadla, jejichž výkon  $P_{bc}$  závisí na popelnatosti, měrném množství paliva a výkonu:

$$P_{bc} = m_{f1} \cdot K_p \cdot K_s \cdot 10^{-3} \cdot P = 0,3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot P = 0,0006 P \quad (2.12)$$

Při hydraulické dopravě škváry je spotřeba vody  $\lambda$  násobkem ( $\lambda = 21$ ) množství škváry a při průměrné dopravní tlakové výšce  $p_{ds} = 20 \text{ kPa}$  a účinnosti  $\eta_{bc} = 0,7$  je výkon bagrovacího čerpadla:

$$P_{bc} = \frac{p_{bc} \cdot \lambda \cdot m_{f1} \cdot K_p \cdot K_s \cdot 10^{-3} \cdot P}{3600 \cdot \eta_{bc}} = \frac{20 \cdot 21 \cdot 1.2}{3600 \cdot 0,7} \cdot 10^{-3} \cdot P = 0,005P \quad (2.13)$$

### Okruh vzduchu a kouřových plynů

Tento okruh významně ovlivňuje kvalitu spalování a tím i emisní produkci škodlivých látek. Hlavní spotřebiče jsou vzduchový a kouřový ventilátor. Jejich výkon se vypočítá z obecného vztahu:

$$P_v = \frac{Q_v \cdot p_{dv}}{\eta_v} \quad (2.14)$$

ve kterém znamenají:

$Q_v$  ..... objemové průtokové množství ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$P_{dv}$  ..... dopravní tlaková výška ventilátoru (Pa)

$\eta_v$  ..... účinnost ventilátoru (-)

### Vzduchový ventilátor

Dopravuje vzduch do spalovacího prostoru a pro výpočet měrného množství vzduchu  $Q_{1vv}$  potřebného k úspěšnému spálení 1 kg paliva o výhřevnosti  $q_f$  lze využít vztah:

$$\begin{aligned} Q_{1vv} &= (0.5 + q_f / 4186) \cdot \alpha = \\ &= (0.5 + 16 / 4186) \cdot 1.3 = 6 \text{ (m}^3 / \text{kg paliva)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

při tlakové dopravní výšce ventilátoru  $p_{dvv} = 3 \text{ kPa}$  a účinnosti ventilátoru  $\eta_{vv} = 0,5$  je výkon ventilátoru:

$$P_{vv} = \frac{Q_{1vv}}{3600} \frac{p_{dvv}}{\eta_{vv}} P = \frac{6 \cdot 3 \cdot P}{3600 \cdot 0,5} = 0,1P \quad (2.16)$$

### Kouřový ventilátor

Hmotnost paliva se spálením rozdělí na hmotnost škváry a popela určené popevnatostí a zbytek je hmotnost kouřových plynů. Toto rozdělení je definováno vztahem:

$$m_{kp} = (1 - K_p) \left( \text{kg kouřových plynů / z } 1\text{kg paliva} \right) \quad (2.17)$$

Kouřové plyny mají teplotu  $\theta_k$ , ke které přísluší jiná měrná hmotnost, kterou získáme přepočítáním měrných hmotností podle absolutních teplot při vstupech  $\rho_0 = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $\theta_k = 160^\circ\text{C}$ :

$$\rho_{\theta_k} = \rho_0 \frac{273,15}{273,15 + \theta_k} = 1,25 \frac{273,15}{273,15 + 160} = 0,78 \text{ kg/m}^3 \quad (2.18)$$

Objemové množství vzniklé spálením 1 kg paliva :

$$Q_{k1} = \frac{1 - K_p}{\rho_{\theta_k}} = \frac{0,7}{0,78} = 1 \text{ m}^3 \quad (2.19)$$

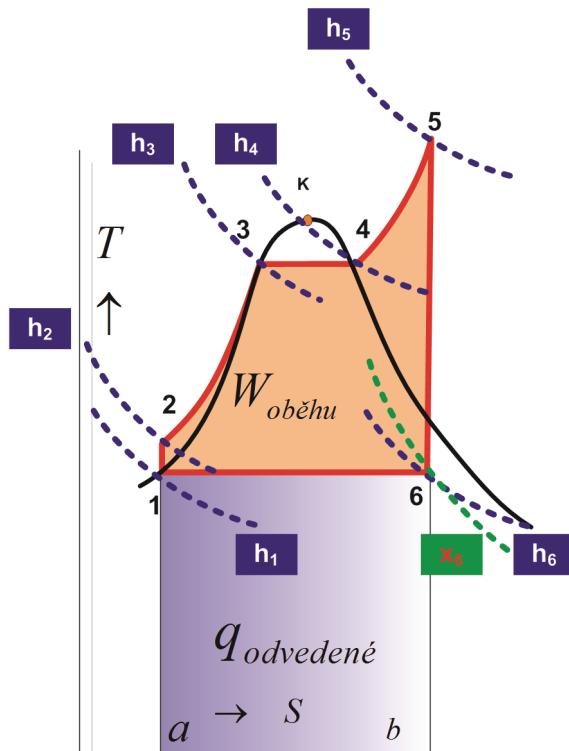
Spálením 1 kg paliva vzniká navíc 1 m<sup>3</sup> spalin, takže celkové měrné objemové množství média dopravované kouřovým ventilátorem  $Q_{kv1}$  je dáno součtem ohřátého objemového množství dopravovaného vzduchovým ventilátorem a objemového množství vzniklých spalin.

provoz	energetické nároky ( % )
zauhllování	0,15
mlýny paliva	2
vzduchový ventilátor	1
kouřový ventilátor	1,1
napájecí čerpadlo	2,4
chladičí čerpadlo	2,4
odstruskování	0,08
společná spotřeba elektrické energie	2
celková vlastní spotřeba	11,13

Tab. 2.3: Energetické nároky vlastní spotřeby

## 2.3. Tepelné oběhy a jejich zdokonalování

Oběhy tepelných elektráren umožňují přeměnu primární chemické energie obsažené ve fosilním palivu na konečný produkt ve formě ušlechtilé energie elektrické.



Obr. 2.2: T-S diagram R-C parního oběhu

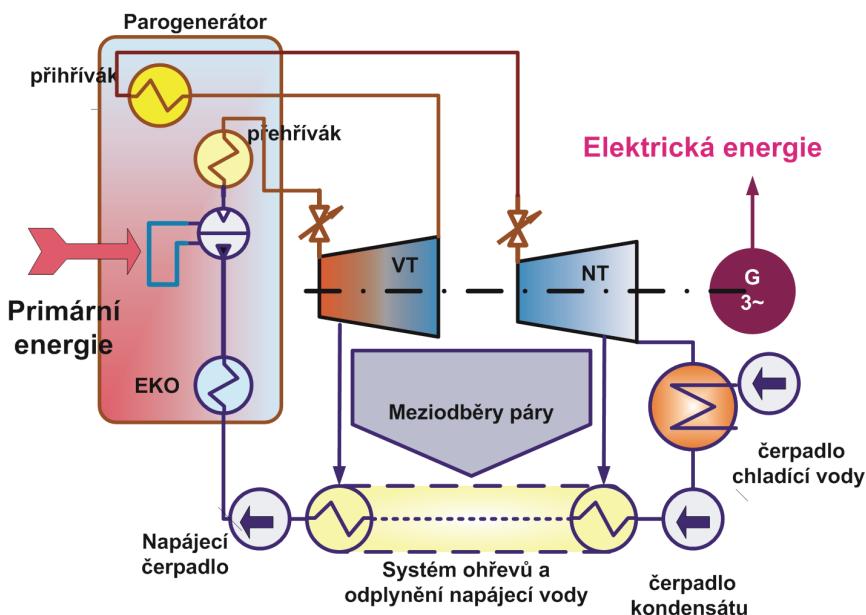
- 1-2..... komprese čerpadlem
- 2-3-4..... izobarický ohřev a odpar vody ve výparníku
- 4-5..... izobarické přehřívání páry
- 5-6..... adiabatická expanze páry v turbíně
- 6-1..... izobarická kondenzace páry v kondenzátoru

Tepelná účinnost základního Rankin-Clausiova tepelného oběhu (obr. 2.2) je definována vztahem:

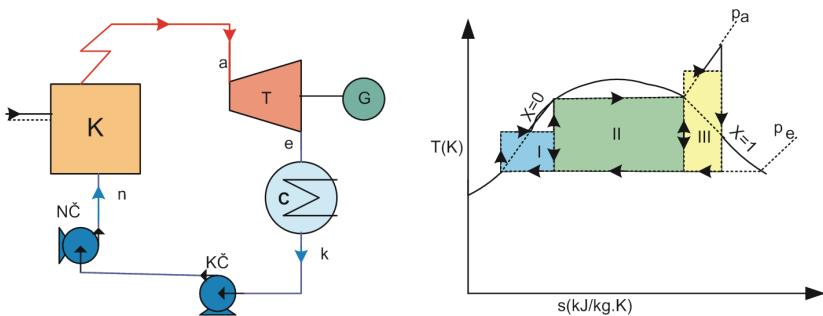
$$\eta_t = \frac{Q_{\text{privedené}} - Q_{\text{odvedené}}}{Q_{\text{privedené}}} = \frac{(h_5 - h_2) - (h_6 - h_2)}{(h_5 - h_2)} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_2} = \frac{w}{h_5 - h_2} \quad (2.20)$$

Na obr. 2.3 je základní schéma zapojení oběhu s kondenzační turbínou bez běžně používaných modifikací, zajišťujících zvýšení tepelné účinnosti oběhu (re-generační ohřev napájecí vody, přihřívání páry). Kondenzační elektrárny, osazené kondenzačními turbínami se svorkovým výkonem 100 ÷ 1000 MW tvoří v evropském regionu základ propojené energetické soustavy.

Transformační řetězce, probíhající v energetických systémech, se v převážné většině týkají transformací tepelné energie na elektrickou, popřípadě mechanickou energii, nebo přenosem tepelné energie z jednoho na druhého nositele (spaliny/pára, pára/voda atd.). Základní termodynamické zákony (I. a II. zákon termodynamiky) určují možnosti, hranice a "směr" těchto transformací. Vyplývá z nich např. všeobecně známý poznatek, že všechny energetické formy lze poměrně snadno transformovat na tepelnou energii. Jednu kWh elektrické energie lze snadno přeměnit např. prostřednictvím rezistoru beze zbytku na tepelnou energii:  $1 \text{ kWh} \rightarrow 3600 \text{ kJ}$ . Nikdy se ale nepodaří získat z 3600 kJ tepelné energie 1 kWh elektrické energie. Tuto omezenou transformovatelnost tepelné energie plně popisuje II. zákon termodynamiky. Převážná většina energetických systémů vyrábějících elektrickou energii pracuje na bázi tzv. Rankin–Clausiova parního oběhu, jehož schéma zapojení a znázornění v T-s diagramu je na obr. 2.4. Z T-s diagramu je zřejmé, že tepelná účinnost R-C oběhu je mnohem nižší než účinnost ideálního Carnotova oběhu se stejným rozsahem teplot. Rozdělíme-li R-C oběh formálně na tři na sebe navazující dílčí oběhy (I., II., III.) a nahradíme je Carnotovými oběhy se stejnou účinností (viz obr. 2.4), je zřejmé, jaké úpravy reálného oběhu vedou ke zvýšení tepelné účinnosti.



Obr. 2.3: Struktura tepelného oběhu parní elektrárny



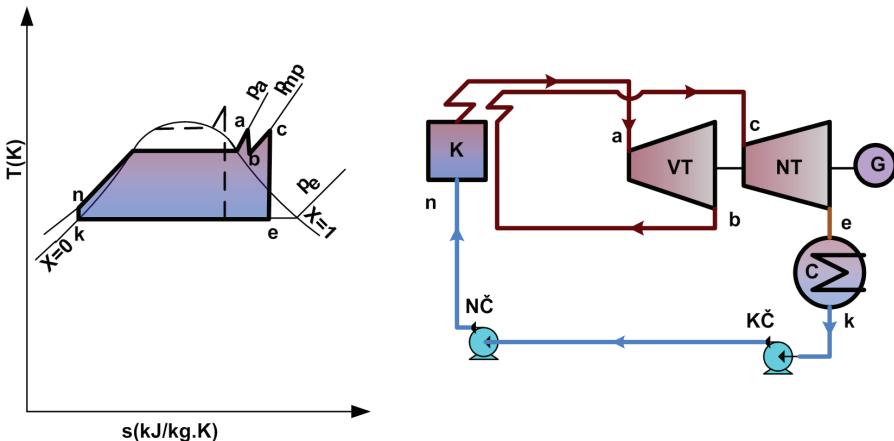
Obr. 2.4: Rankin-Clausiův oběh (schéma zapojení a T-s diagram)

### Zvyšování tlaku a tím i teploty syté páry, případně snižování tlaku a tedy i teploty kondenzace páry

Zvýšení tlaku a tedy i teploty syté páry dílčího oběhu II zvyšuje v souladu s definicí tepelné účinnosti i účinnost tohoto tepelného oběhu. Jedná se o na první pohled jednoduchý zásah – zvýšení tlaku a teploty v systému. Ve svých důsledcích je ale provázen rychle stoupajícími materiálovými, konstrukčními a bezpečnostními požadavky. V současnosti jsou u moderních energetických oběhů zcela běžné i nadkritické tlaky generované páry (tlaky vyšší než 22,14 MPa). Snižování teploty a tlaku kondenzující páry je limitováno teplotou okolí. Vysvětlení je jednoduché. Při kondenzaci páry musí být odváděno kondenzační teplo do okolního prostředí a podle II. zákona termodynamiky teplo samovolně přechází pouze z látky s vyšší teplotou do látky s teplotou nižší. V současnosti jsou běžné kondenzační teploty páry kolem 300 °C. Tato kondenzační teplota odpovídá kondenzačnímu tlaku cca 4 kPa.

### Opakování části oběhu, která má nejvyšší účinnost - přihřívání páry

Z obr. 2.4 je zřejmé, že tepelná účinnost dílčího oběhu III je větší než oběhu II. (náhradní Carnotův oběh se stejnou účinností má větší rozsah teplot než oběhu II). Proto má opakování této části R-C oběhu za následek zvýšení tepelné účinnosti celého oběhu. Praktická realizace tohoto procesu se nazývá „přihřívání páry“. Po dosažení vhodného tlaku expandující páry v parní turbíně se expanze přeruší a pára se vrátí zpět do parogenerátoru, kde se opět zvýší její teplota (obvykle na původní teplotu admisní páry) při konstantním tlaku. Po tomto přihřátí pokračuje dále expanse páry v turbíně. Základní schéma oběhu s přihříváním páry spolu se znázorněním tohoto oběhu v T-s diagramu je na obr. 2.5. Z uvedeného obrázku vyplývá zároveň i nutnost zavedení přihřívání páry u oběhů s vysokými hodnotami admisního tlaku páry. (Průběh expanze páry bez přihřívání při vysokém admisním tlaku a teplotě páry je znázorněn píšťalovou čarou). Pokud by nebylo zavedeno v tomto případě přihřívání, skončila by expanse hluboko v oblasti mokré páry. (Větší obsah vody v expandující páře vyvolává značné provozní problémy, snižuje životnost lopatek i termodynamickou účinnost turbíny). U velmi vysokých, popř. i nadkritických admisních tlaků, je proto často zavedeno dvojí i trojnásobné přihřívání páry během expanze.



Obr. 2.5: Základní schéma oběhu s přihříváním páry, T-s diagram oběhu

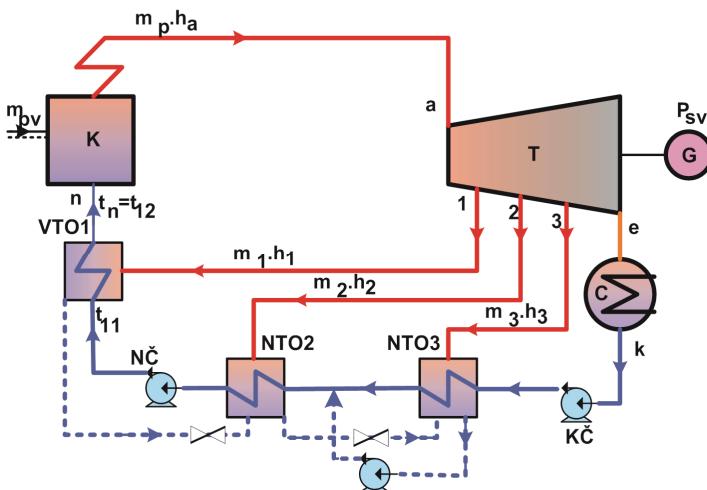
### Regenerační ohřev napájecí vody (carnotizace)

Cílem regeneračního ohřevu napájecí vody odběrovou párou z turbíny je potlačit nepříznivý vliv té části náhradního R-C oběhu, která má nejnižší tepelnou účinnost (z obr. 2.4 je zřejmé, že se jedná o část I). Napájecí voda je během dopravy mezi kondenzátorem a napájecí hlavou kotle postupně ohřívána soustavou tzv. regeneračních ohříváků (tepelných výměníků typu kondenzující pára-voda). Principiální schéma zapojení regeneračního ohřevu je na obr. 2.6. Topnou látkou každého z těchto výměníku je vždy část expandující páry, odebrané ve vhodném místě turbíny. Vzhledem k tomu, že se k ohřevu napájecí vody využívá kondenzační тепло páry, je „vhodné místo odběru topné páry“ pro daný regenerační výměník určováno její teplotou kondenzace. Vzhledem k tomu, že teplotu kondenzace páry jednoznačně určuje její tlak, lze pro každý regenerační ohřívák stanovit odběrové místo v turbíně, ve kterém má odebraná pára nejnižší možný tlak, umožňující z hlediska II. zákona termodynamiky ohřev vody na požadovanou teplotu. Regenerační ohříváky jsou obvykle povrchové trubkové tepelné výměníky. Uvnitř trubek proudí ohřívaná napájecí voda, na vnějším povrchu trubek kondenzuje topná pára. Směšovací výměníky, u kterých není tlakově odděleno topné a ohřívané médium se pro svou obtížnou regulovatelnost používají pouze výjimečně, ačkoliv jsou termodynamicky výhodnější (vodu lze ohřát až na teplotu kondenzace topné páry). Přívod topné páry do jednotlivých výměníků není regulován, výměníky typu kondenzující pára-voda mají samoregulační vlastnosti. Při změně provozních parametrů, vyvolaných např. změnou výkonu turbíny, se po odeznění přechodového jevu samy vždy nastaví do nové rovnovážné polohy. Proto se pro odběry páry z turbíny, které napájí regenerační ohříváky vžil název neregulované odběry páry. Množství tepla, které je třeba dodat při průtoku 1 kg napájecí vody regeneračním systémem k jejímu ohřátí na požadovanou teplotu  $t_{nv}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), je dánou vztahem:

$$\Delta q_{reg} = (h_n - h_k) = c_w \cdot (t_n - t_k) .$$

Tato tepelná energie, dodaná regeneračním systémem, je samozřejmě naprostě shodná s množstvím tepelné energie, kterou by bylo nutné dodat vodě, kdyby byla ohřívána na stejnou teplotu přímo v parním generátoru. Proto se na první pohled jeví regenerační ohřev napájecí vody jako

zbytčný. Jeho výrazný vliv na zvýšení tepelné účinnosti oběhu ale vyplývá ze skutečnosti, že jeho zavedením se sníží množství tepla bez užitku odvedeného v kondenzátoru. Pára, odebraná v průběhu expanze v turbíně pro regenerační ohřev, předá po své částečné expanzi v turbíně své kondenzační teplo na ohřev napájecí vody. Toto teplo se tedy „vrátí“ zpět do oběhu, celkové množství tepelné energie odvedené v kondenzátoru, připadající na jednotku výkonu, se sníží, tepelná účinnost oběhu se zvýší. Toto zvýšení účinnosti je velmi výrazné, u moderních elektrárenských bloků přesahuje 10 %. Při tom je nutno mít na paměti, že maximální teoreticky dosažitelná tepelná účinnost Carnotova oběhu při dnešních teplotních parametrech parních oběhů se pohybuje okolo 60 %!



Obr. 2.6: Principiální schéma zapojení regeneračního ohřevu napájecí vody

Zavedení regeneračního ohřevu napájecí vody přináší na rozdíl od přehřívání páry i celou řadu konstrukčních, provozních a ve svých důsledcích i investičních výhod. Mezi nejdůležitější patří:

- a) **Zvýšení průtoku páry vysokotlakou částí turbíny** – výhodné z důvodu malého měrného objemu vysokotlaké páry – delší oběžné lopatky mají menší okrajové ztráty.
  - b) **Snížení průtoku páry nízkotlakou částí turbíny** – výhodné z důvodu velkého měrného objemu nízkotlaké páry (během expanze páry v kondenzační turbíně se měrný objem páry zvětší cca 2000krát).
  - c) Výrazně se sníží rozměry jak nízkotlakých dílů parní turbíny tak i rozměry kondenzátoru.
  - d) Menší odvedené teplo v kondenzátoru sníží spotřebu chladicí vody.

Vzhledem k uvedeným skutečnostem jsou v současnosti prakticky všechny energetické bloky s parní turbínou středních a velkých výkonů vždy vybaveny regeneračním ohrevem napájecí vody.

**Poznámka:** U principiálních schémat oběhů v této kapitole není z důvodu větší přehlednosti uvedena napájecí nádrž a odplyňovací zařízení, umístěné před napájecím čerpadlem.

### 2.3.1. Energetické bilance tepelné elektrárny

Ke stanovení základních energetických transformací tepelného oběhu stačí poměrně jednoduché prostředky. Příslušné tepelné diagramy, schéma zapojení jednotlivých prvků v oběhu a schopnost aplikačního použití I. a II. zákona termodynamiky. V současnosti jsou běžně dostupné počítačové programy, umožňující velmi přesné a rychlé získání všech potřebných stavových veličin pracovního média, nejčastěji vodní páry, včetně grafického vyjádření probíhajících termodynamických změn v jednotlivých prvcích tvořících tepelný oběh. Přesto je vhodné z důvodu přehlednosti a správné indexace jednotlivých stavových veličin grafické znázornění řešeného problému v některém z tepelných diagramů. Obecně lze říci, že pro získání názoru o funkci a směru tepelných toků v oběhu je vhodný T-s diagram. Diagram h–s je vhodný pro získání konkrétních stavových veličin, zejména entalpií. Pro ostatní technické plyny a páry lze rovněž získat příslušné podklady v odborné literatuře příslušného oboru.

Před každým řešením technicko-ekonomického nebo provozního problému, který souvisí s tepelným oběhem, je vhodné analyzovat problém z hlediska fyzikální reálnosti a technické proveditelnosti. Zejména v energetice nejsou odpovědi na obě tyto otázky vždy na první pohled zřejmé. Jako další krok je nutné definovat zjednodušující podmínky řešení, které by vždy měly korespondovat s předpokládaným použitím výsledného řešení. Jiné budou při porovnávání několika variantních řešení problému, jiné při detailním propočítávání optimální varianty. Vždy je ale užitečné pokusit se o orientační vyhodnocení vlivu zavedeného zjednodušujícího předpokladu na výsledné řešení alespoň z hlediska polarity chyby, kterou tento zavedený zjednodušující předpoklad vyvolá.

Profesionální návrhy energetických systémů, jejichž základní součástí jsou různé formy tepelných oběhů jsou dnes samozřejmě řešeny pomocí moderní výpočetní techniky s respektováním všech provozních, konstrukčních a ekonomických aspektů v celém předpokládaném rozsahu provozních parametrů, s respektováním všech tlakových, tepelných a objemových ztrát, včetně analýzy přechodových jevů a vzájemného ovlivňování jednotlivých prvků systému.

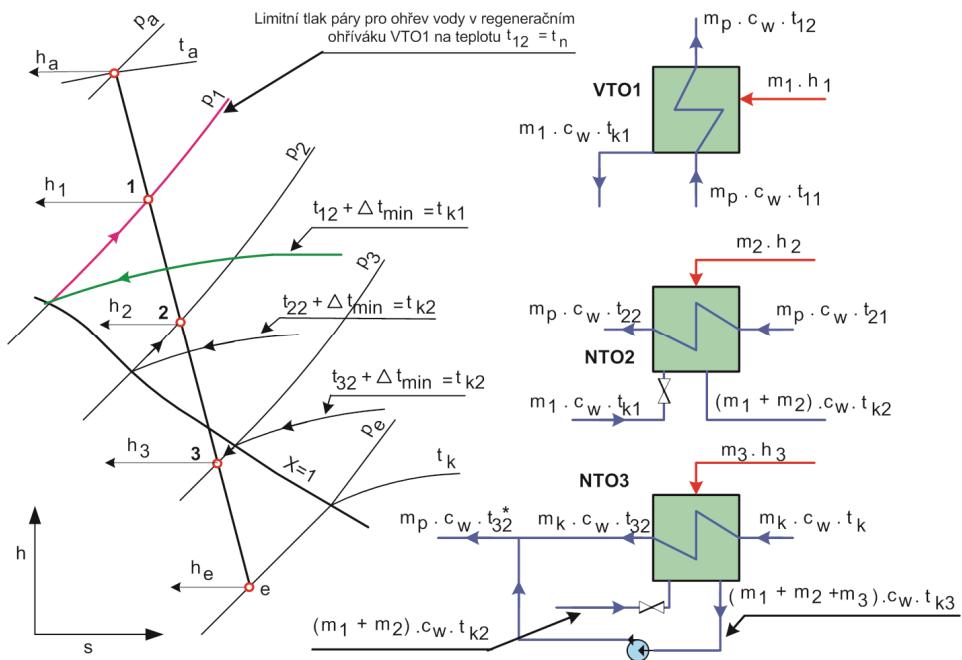
Dále uvedené základní energetické bilance mají proto za cíl pouze objasnit provozní vlastnosti, vzájemné provozní vazby jednotlivých prvků tepelných oběhů v energetice a tím usnadnit a zkvalitnit rozhodovací procesy při řízení a provozní optimalizaci těchto energetických systémů. Základní znalost chování, regulačních možností a vzájemného ovlivňování jednotlivých prvků, které při vzájemné součinnosti umožňují optimální provoz energetických celků, jejichž součástí je tepelný oběh, je nutnou podmínkou pro úspěšné, technicky a ekonomicky optimální řízení energetických systémů.

Pro každé dílčí zařízení, které je součástí oběhu lze sestavit rovnici energetické bilance, která je formálně shodná s 1. Kirchhoffovým zákonem v elektrotechnice. Pouze se zamění elektrický proud energetickým tokem. Pracovní médium ve většině tepelných oběhů tvoří vodní pára nebo plyn. Tato média mohou být nositeli vnitřní, tlakové, kinetické a potenciální energie. Vzhledem k tomu, že rych-

losti proudění v parních nebo plynových potrubích se obvykle pohybují v rozsahu  $10 \div 30$  m/s, pohybuje se kinetická energie proudícího plynu v rozsahu pouze několika set J/kg a lze jí tedy zanedbat. Navíc se obvykle vstupní a výstupní rychlosť přibližně rovná a v bilanci se tedy vzájemně odečtou. Totéž lze konstatovat o potenciální energii plynu nebo páry. Lze tedy při tomto zjednodušení považovat entalpii za celkovou energii 1 kg páry nebo plynu a energetické toky vyjadřovat součinem hmotnostního průtoku pracovního média a entalpie na vstupu, respektive výstupu bilancovaného uzlu.

### **2.3.2. Energetická bilance parní kondenzační turbíny s třistupňovým regeneračním ohrevem napájecí vody**

Schéma zapojení parního oběhu s třístupňovým regeneračním ohřevem napájecí vody je na obr. 2.6. Při regeneračním ohřevu se obvykle volí ohřátí napájecí vody ve všech stupních přibližně stejné. Průběh teplot v regeneračním ohříváku VTO1 je znázorněn na obr. 2.8. Správná volba odběrového tlaku topné páry pro jednotlivé regenerační ohříváky je zřejmá z obr. 2.7.



Obr. 2.7: Stanovení odběrového tlaku páry pro požadovanou teplotu ohřátí

Z obr. 2.8 plyne rovnice energetické bilance turbíny (předpoklad:  $\eta_m \cdot \eta_g = 1$ )

$$m_p \cdot h_a = P_{sv} + m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2 + m_3 \cdot h_3 + (m_p - m_1 - m_2 - m_3) \cdot h_e \quad (2.21)$$

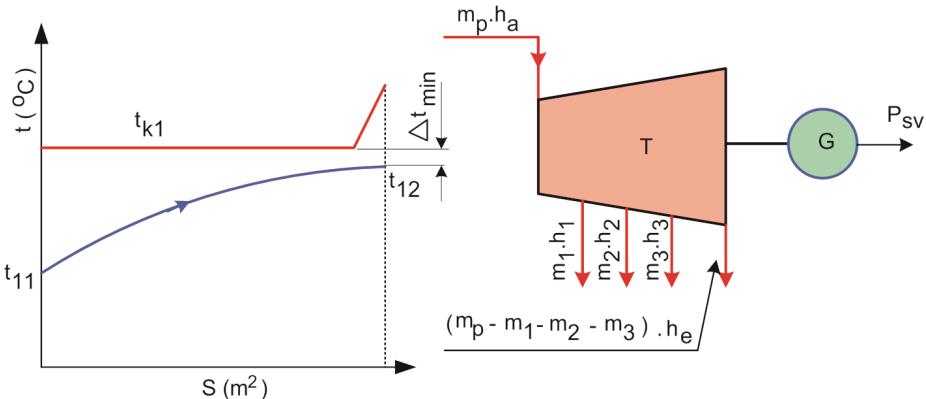
$\mu_m$  ..... mechanická účinnost turbíny (1)

$\mu_g$  ..... účinnost generátoru (1)

$P_{sv}$  ..... svorkový výkon generátoru (W)

Z obr. 2.7 plynou rovnice energetické bilance jednotlivých regeneračních ohříváků napájecí vody. Jako ukázka je uvedena bilanční rovnice pro ohřívák VTO1

$$m_1 \cdot h_1 + m_p \cdot c_w \cdot t_{11} = m_p \cdot c_w \cdot t_{12} + m_1 \cdot c_w \cdot t_{1k} \quad (2.22)$$



Obr. 2.8: Průběh teplot v ohříváku VTO1 a energetický tok turbínou

### 2.3.3. Energetická bilance přihřívání páry

Schéma zapojení parního kotle a turbíny je znázorněno na obr. 2.9. Pro větší názornost je schéma uvedeno bez odběrů páry pro regenerační ohřev napájecí vody, které jsou u oběhů s přihříváním páry vždy realizovány.

Energetická bilance kotle:

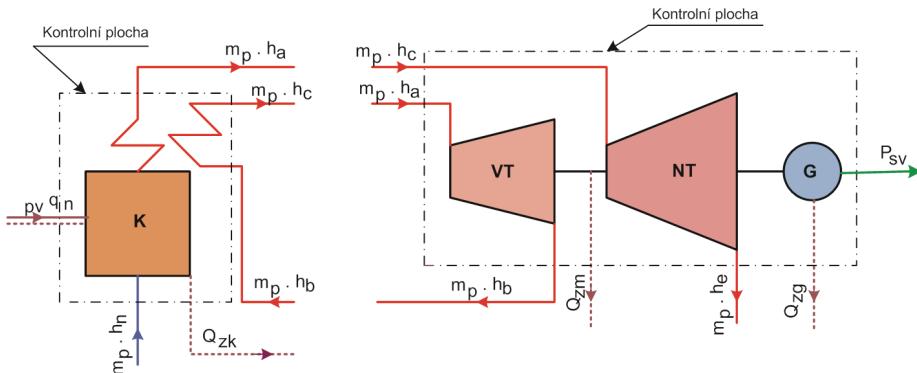
$$m_{pv} \cdot q_n + m_p \cdot h_n + m_p \cdot h_b - m_p \cdot h_a - m_p \cdot h_c - Q_{zk} = 0 \quad (2.23)$$

Energetická bilance turbíny:

$$m_p \cdot h_a + m_p \cdot h_c - m_p \cdot h_b - m_p \cdot h_e - P_{sv} - Q_{zm} - Q_{zg} = 0 \quad (2.24)$$

Ztráty kotle:

$$Q_{zk} = m_{pv} \cdot q_n \cdot (1 - \eta_k) \quad (2.25)$$



Obr. 2.9: Schéma zapojení kotle a turbíny s přihříváním páry

Mechanické ztráty turbíny:

$$Q_{zm} = m_p \cdot (h_a - h_b + h_c - h_e) \cdot (1 - \eta_m) \quad (2.26)$$

Ztráty generátoru:

$$Q_{zg} = m_p \cdot (h_a - h_b + h_c - h_e) \cdot \eta_m \cdot (1 - \eta_g) \quad (2.27)$$

$m_{pv}$  ..... hmotnost paliva (kg/s)

$q_n$  ..... výhřevnost paliva (kJ/kg)

### 2.3.4. Energetická bilance kondenzátoru

Účelem kondenzačního zařízení, které je součástí tepelného oběhu s kondenzační turbínou, je realizovat odvod tepelné energie z oběhu pomocí kondenzace emisní páry z turbíny při co nejnižším tlaku a teplotě. Čím nižšího tlaku v kondenzátoru je za provozu turbíny dosaženo, tím větší práci  $w = \Delta h$  vykoná každý kg páry, expandující v turbíně (obr. 2.10). Kondenzační zařízení se skládá z vlastního kondenzátoru, čerpadla chladicí vody CH, čerpadla kondenzátu KČ a vývěry V, která má za úkol odsávat vzduch, který se dostane za provozu do kondenzátoru netěsnostmi podtlakové části turbíny a kondenzátoru. Přítomnost i malého množství vzduchu v kondenzátoru zvyšuje celkový tlak a snižuje celkový součinatel prostupu tepla  $k$  ( $\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$ ). To způsobuje zkrácení expanze a tedy i zhoršení provozní ekonomie celého bloku. U parních turbín se používá téměř výhradně povrchových kondenzátorů typu kondenzující pára/voda, které jsou přímo spojeny s výfukovým hrdlem nízkotlakého dílu turbíny. Trubkami kondenzátoru proudí chladicí voda, pára kondenzuje na vnějším povrchu trubek. Vzniklý kondenzát je kontinuálně odváděn ze sběrné nádrže, umístěné ve spodní části kondenzátoru. Při fázové změně (kondenzaci páry) závisí teplota kondenzace jednoznačně na okamžitém tlaku páry. Proto se kondenzátor v běžném provozním režimu chová samoregulačně. Dojde-li za provozu k odchylce některého parametru (např. teploty nebo hmot-

nostního průtoku chladicí vody), kondenzátor se po proběhnutí přechodového jevu sám stabilizuje do nového rovnovážného provozního stavu. Tlak, a tedy i teplota kondenzace, se nastaví na takovou hodnotu, aby tepelný výkon odpovídal výkonu, nutnému pro kondenzaci okamžitého hmotnostního průtoku páry do kondenzátoru.

$$m_k \cdot h_e + m_w \cdot c_w \cdot t_{w1} = m_k \cdot c_w \cdot t_k + m_w \cdot c_w \cdot t_{w2} \quad (2.28)$$

$$Q_k = m_k \cdot (h_e - c_w \cdot t_k) = m_w \cdot c_w \cdot \Delta t_{w12} \quad (2.29)$$

Tepelný výkon kondenzátoru:

$$Q_k = k \cdot S \cdot \Delta t_{stř} \quad (2.30)$$

Střední teplotní spád:

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta 1 - \Delta 2}{\ln \frac{\Delta 1}{\Delta 2}} \quad (2.31)$$

$k$  ..... součinitel prostupu tepla ( $\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ );

$S$  ..... teplosměnná plocha kondenzátoru ( $\text{m}^2$ )

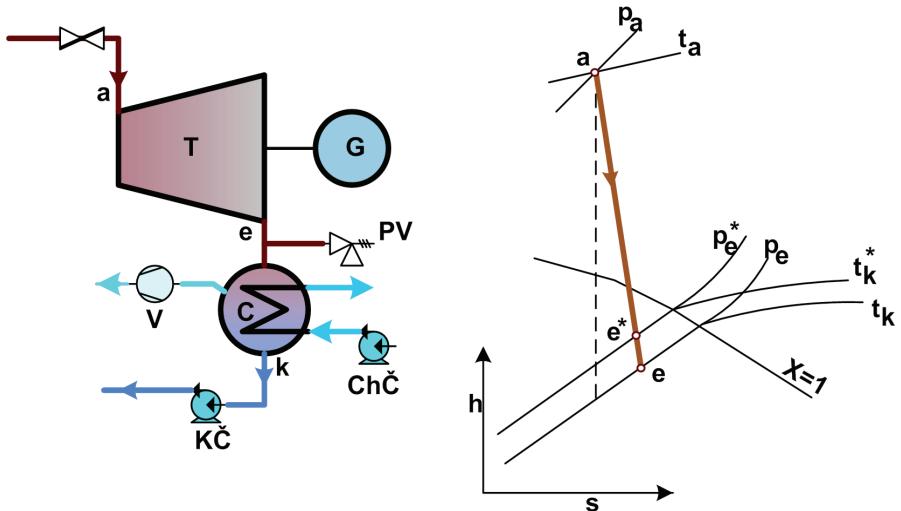
**Provozní tlak a tedy i teplota kondenzace jsou jednoznačně limitovány výstupní teplotou chladicí vody!**

Průběh teplot v kondenzátoru je znázorněn na obr. 2.11.

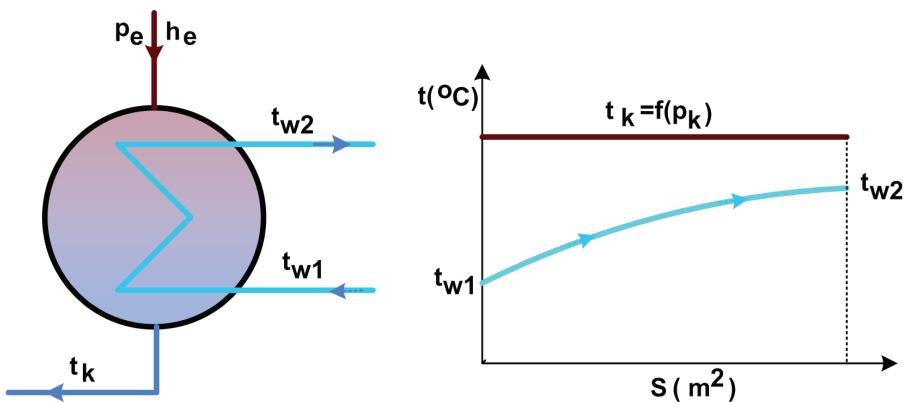
Každá závada na kondenzačním zařízení značně zhoršuje provozně ekonomické ukazatele bloku vzhledem k tomu, že má obvykle za následek zvýšení kondenzačního tlaku. Např. zvýšení tlaku kondenzace ze 4 kPa na 5 kPa, (tedy o 1 setinu atmosférického tlaku!!) vyvolá zkrácení expanze o cca 30 kJ/kg, které se např. u 100 MW turbín projeví poklesem výkonu o cca 2,5 ÷ 3 MW.

Mezi hlavní příčiny špatného (neekonomického) provozu kondenzace patří zejména:

- Nadměrná netěsnost podtlakové části oběhu (NT díly turbín, kondenzátor)
- Chybná činnost nebo porucha čerpadel chladicího okruhu
- Nedostatečná činnost vývěv.



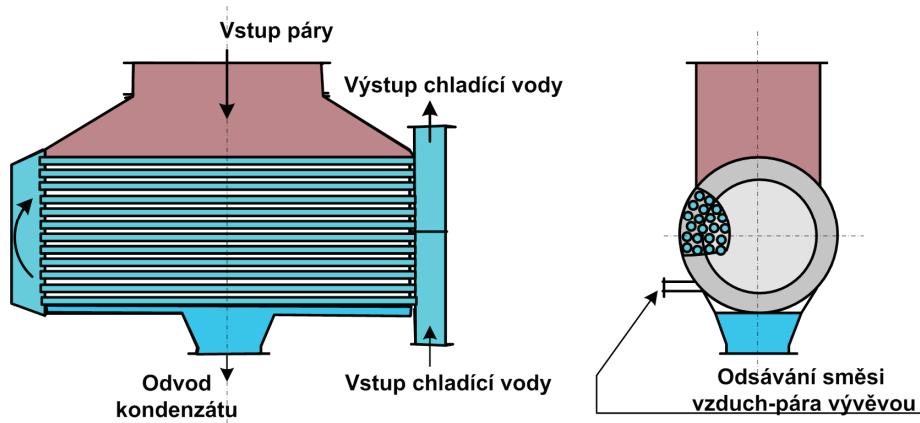
Obr. 2.10: Schéma zapojení kondenzátoru parní turbíny



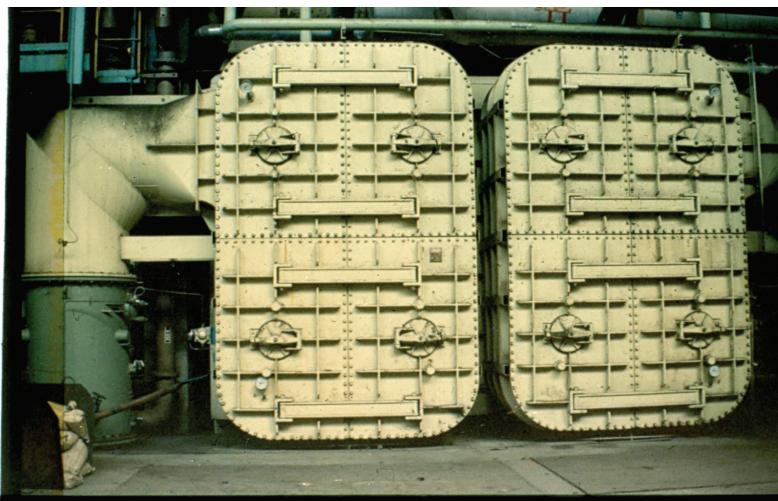
Obr. 2.11: Průběh teplot v kondezátoru

Schéma povrchového dvoutahového kondenzátoru je na obr. 2.12.

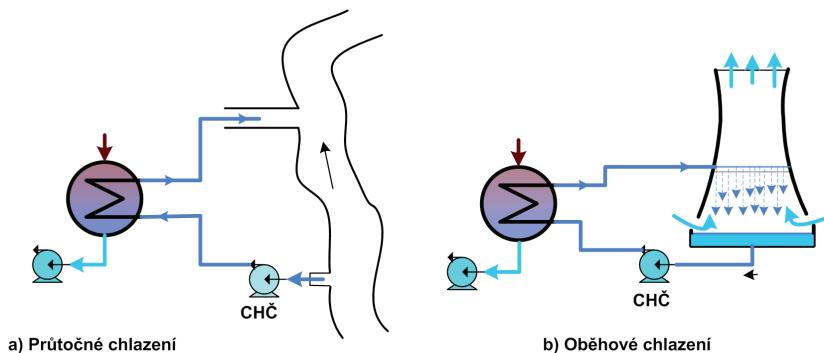
U energetických bloků s velkým jednotkovým výkonem (200 MW a více), kde obvykle nejsou splněny podmínky pro volbu průtočného chlazení, se používá chlazení oběhové (církuulační), které využívá k chlazení vody ohřáté v kondenzátoru chladicí věž. Princip průtočného a oběhového chlazení je zřejmý z obr. 2.14.



Obr. 2.12: Schéma dvoutahového kondenzátoru



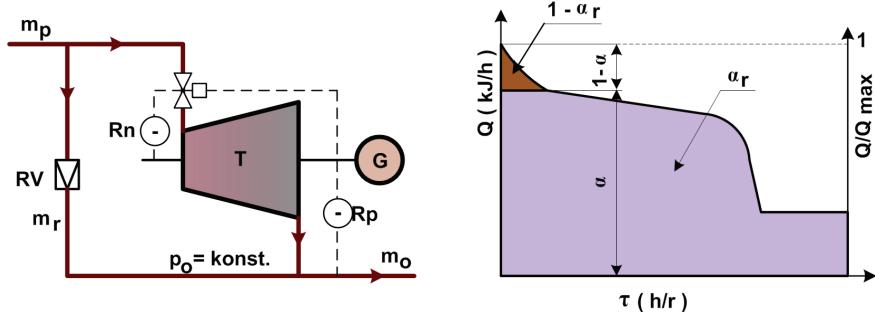
Obr. 2.13: Čelní pohled na kondenzátor



Obr. 2.14: Princip průtočného a oběhového chlazení

## 2.4. Teplárny a výtopny

Teplárny slouží k výrobě elektrické energie se současnou s dodávkou tepelné energie. Teplonosným médiem pro dodávku tepla je obvykle vodní pára nebo horlká voda. Jsou osazeny protitlakými turbínami (obr. 2.15) nebo turbínami s regulovaným odběrem páry (obr. 2.16).



Obr. 2.15: Schéma zapojení a diagram spotřeby tepla protitlaké turbíny

Důležitým provozně ekonomickým údajem u protitlakových turbín je tzv. teplárenský součinitel  $\alpha$ , respektive roční teplárenský součinitel  $\alpha_r$ :

$$\alpha = \frac{Q_T}{Q_{\max}} ; \alpha_r = \frac{Q_t^r}{Q^r} \quad (2.32)$$

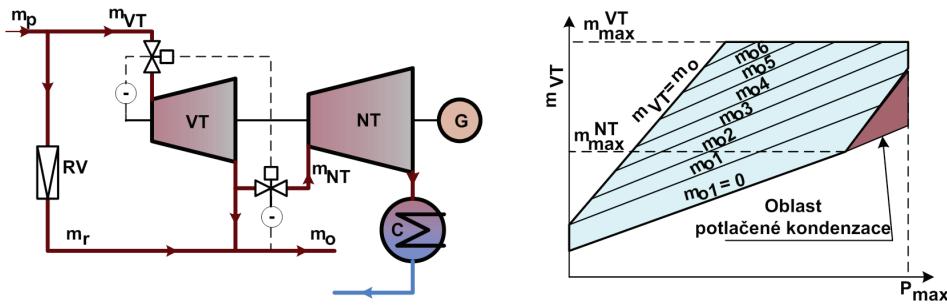
$Q_T$  ..... podíl max. spotřeby tepla dodávaný párou z turbíny (GJ/h)

$Q_{\max}$  ..... maximální dodávka tepla (GJ/h)

$Q_r$  ..... roční dodávka tepla (GJ/r)

$Q_t^r$  ..... roční dodávka tepla párou z turbíny (GJ/r)

Z obr. 2.15 je zřejmé, že by nebylo ekonomické dimenzovat pro daný diagram spotřeby tepla hĺenosť turbíny na hodnotu odpovídající maximální spotřebě tepla  $Q_{\max}$ . Turbína by po většinu roku pracovala s podstatně nižším hmotnostním průtokem, než na který byla navržena, a tedy i s podstatně nižší účinností. Rozměry turbíny a investiční náklady by se ale zvětšily. Proto se obvykle v závislosti na tvaru předpokládaného diagramu spotřeby tepla volí optimální teplárenský součinitel  $\alpha < 1$ . V období vysoké spotřeby tepla prochází část páry obtokovým potrubím s redukčním ventilem.



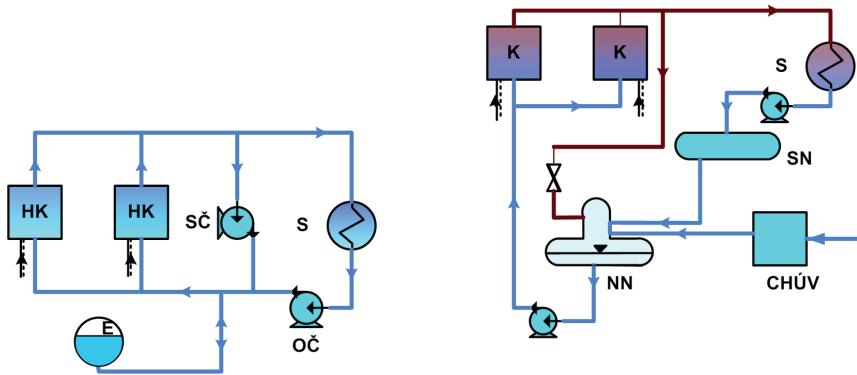
Obr. 2.16: Schéma a spotřební diagram turbíny s jedním regulovaným odběrem

Teplárenské turbíny nejčastěji s jedním nebo dvěma regulovanými odběry páry umožňují, stejně jako turbíny protitlaké, současnou výrobu elektrické energie a dodávku tepelné energie. Zapojení turbíny a její regulace ale na rozdíl od turbín protitlaké umožňuje v poměrně širokém rozsahu vzájemnou nezávislost dodávky elektrické a tepelné energie. Schéma regulace a spotřební diagram turbíny s jedním regulovaným odběrem je na obr. 2.16. Regulace turbíny s regulovaným odběrem musí umožnit:

- 1) Změnu odběrového množství  $m_o$  při zachování podmínky  $P_{sv} = \text{konst.}$  a  $p_o = \text{konst.}$
- 2) Změnu svorkového výkonu  $P_{sv}$  při zachování podmínky  $p_o = \text{konst.}$  a  $m_o = \text{konst.}$

Oba tyto požadavky platí samozřejmě jen pro předpokládanou oblast činnosti soustrojí. Z ekonomických důvodů je obvykle tlustota VT dílu větší než tlustota NT dílu turbíny (tzv. potlačená kondenzace) – maximálního výkonu soustrojí nelze dosáhnout čistě kondenzačním provozem. Spotřební diagram na obr. 2.16 je ideální. Skutečný diagram není přímkový, ovlivňuje jej změna termodynamické účinnosti turbíny i vliv škrčení páry v regulačních ventilech.

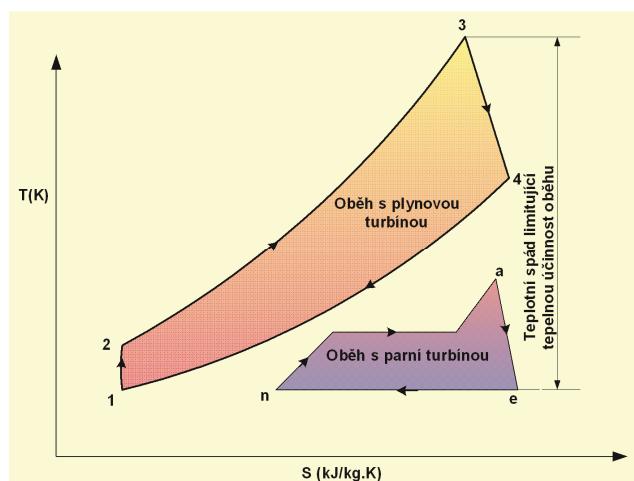
**Výtopny** slouží pouze pro dodávku tepelné energie. Tepelným nositelem je obvykle horká voda, která se používá v případě, že je tepelná energie dodávána na větší vzdálenost u velkých výkonů i desítky km, nebo pára. Zjednodušené schéma horkovodní výtopny je uvedeno na obr. 2.17. Horká voda je dodávána odběrateli z horkovodních kotlů HK pomocí oběhových čerpadel OČ. V případě nízké teploty vratné vody zajišťuje směšovací čerpadlo potřebné zvýšení teploty vody na vstupu do kotle z důvodu zamezení poklesu teploty spalin pod teplotu rosného bodu. Na obr. 2.17 je zjednodušené schéma parní výtopny. Vratný kondenzát je shromažďován ve sběrné nádrži SN. Po odplynutí je spolu s přídavnou vodou z chemické úpravny CHÚV dodáván do napájecí nádrže NN a napájecím čerpadlem do kotle.



Obr. 2.17: Horkovodní výtopna a parní výtopna

## 2.5. Paroplynové centrály

Vhodným propojením parního oběhu s oběhem s plynovou turbínou do jednoho funkčního celku lze do značné míry využít výhodných vlastností obou oběhů a současně potlačit jejich některé nevýhodné vlastnosti. Vzniklý dvoulátkový oběh umožňuje dosažení vyšší tepelné účinnosti, než které je možno dosáhnout při jejich samostatné činnosti. Průběh termodynamických změn paroplynového oběhu je znázorněn na obr. 2.18, základní schéma zapojení na obr. 2.20.

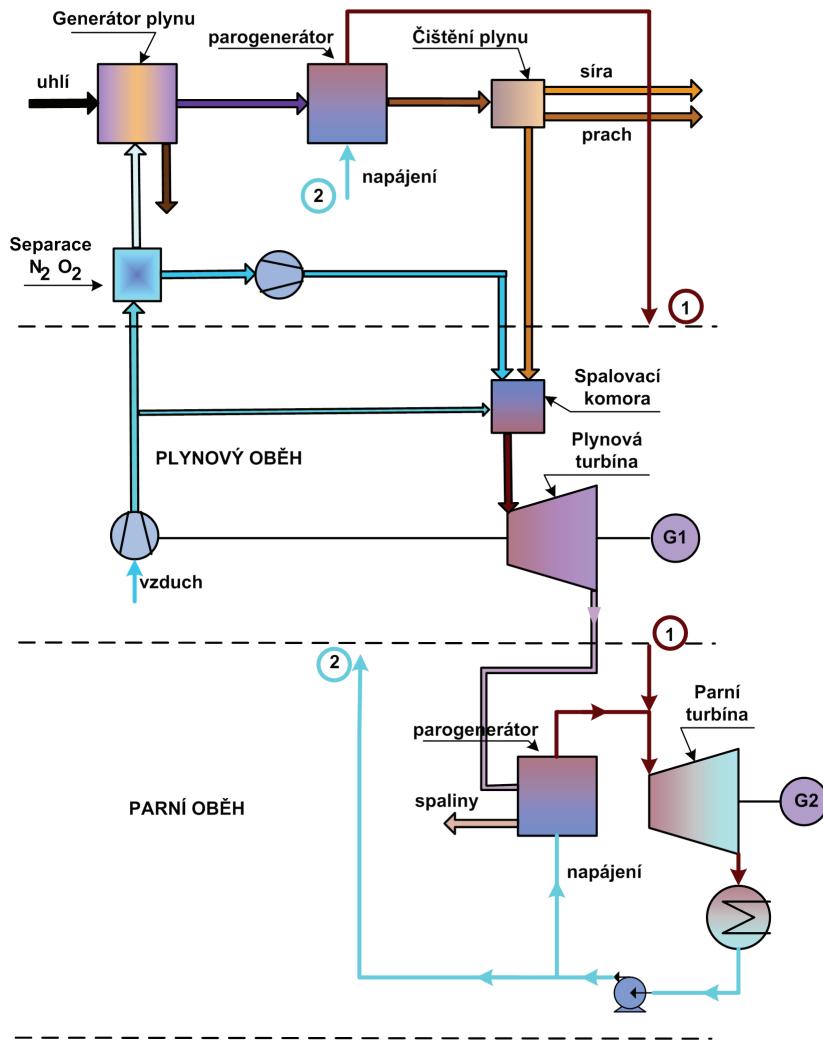


Obr. 2.18: T-s diagram paroplynového oběhu

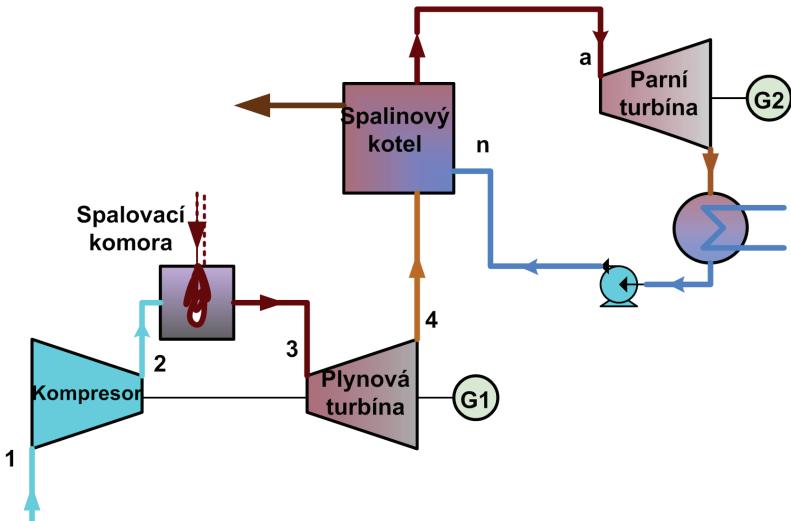
**Poznámka:** Diagram uvedený na obr. 2.18 vyjadřuje průběh změn dvou odlišných látek – vodní páry a vzduchu, respektive spalin v jednom diagramu, proto je pouze ilustrativní. Měřítko na ose x, vyjadřující entropii látky je ve skutečnosti pro každé pracovní médium jiné!

Výstavba a provoz moderních paroplynových elektráren, se ukazuje jako jedna z možných variant rozvoje současné energetiky, která do jisté míry snižuje ekologická rizika. Na obr. 2.19 je uvedeno schéma moderního paroplynového oběhu s využitím moderní technologie zplyňování uhlí. (CCT technologie – Clean Coal Technologies).

CCT technologie (zplyňování uhlí)



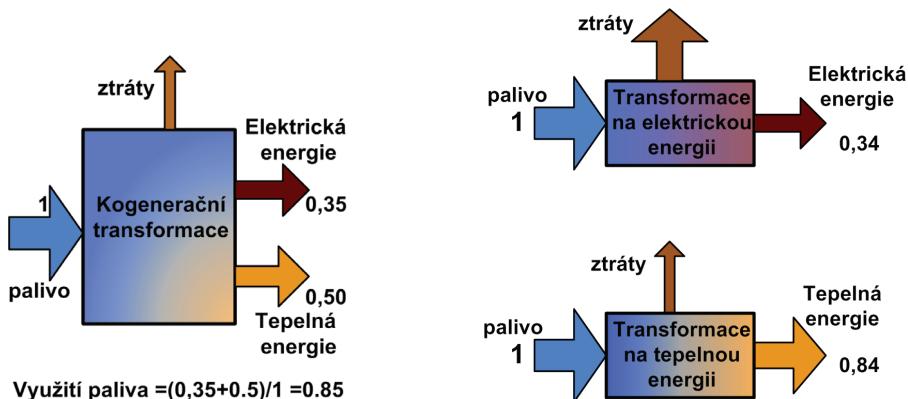
Obr. 2.19: Schématické uspořádání paroplynového oběhu s technologií CCT



Obr. 2.20: Principiální schéma paroplynového oběhu

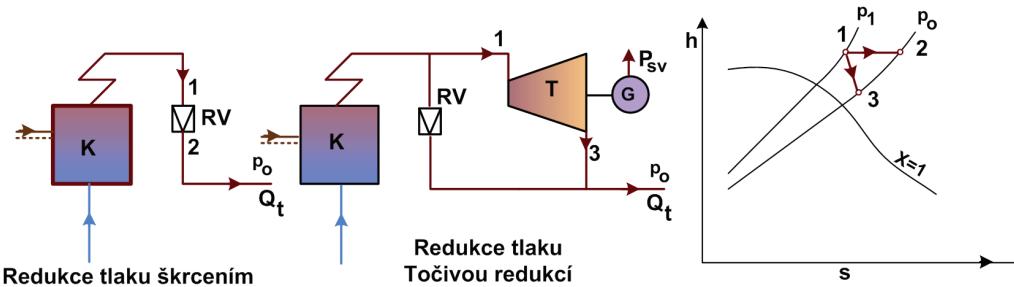
## 2.6. Kogenerace

Kogenerace znamená generace více typů energií paralelně. Tato strategie dosahuje vyšší využití paliva, jak prezentuje obr. 2.21 a je velmi perspektivní v oblasti kogenerace tepelné a elektrické energie, pro kterou se používá zkratka KVET. tzv. velkou kogeneraci reprezentují teplárny (viz kap. 2.4)



Obr. 2.21: Princip kogenerace

Tak zvaná malá kogenerace, při které se nahrazuje dříve běžné škrcení páry, generované ve středotlakých kotelnách, točivou redukcí, využívající tlakový rozdíl dříve mařený v redukčním ventilu k výrobě elektrické energie, umožňuje současnou dodávku tepelné energie pro technologické nebo komunální účely. Princip funkce je zřejmý z obr. 2.22.



Obr. 2.22: Schéma točivé redukce

Odběratelé tepelné energie  $Q_t$  (kW), jejíž nositelem je pára, prakticky vždy využívají kondenzační teplo, a proto je z jejich hlediska akceptovatelný i jiný způsob snížení tlaku páry, např. expanzí v turbíně, při které je pokles exergie páry během expanze využit s poměrně vysokou účinností, např. na výrobu elektrické energie. Využitelnost tepelné energie páry u spotřebitele tato expanze v turbíně z kvalitativního hlediska neovlivní - výparné teplo páry ani teplota kondenzace se nezmění. Spotřebitel bude v případě náhrady redukčního ventilu točivou redukcí odebírat za předpokladu stejného tepelného výkonu více páry. Energetické náklady na toto zvýšení výroby páry u dodavatele se rovnají vnitřnímu výkonu točivé redukce. Dokonce ani nezáleží (a to je z ekonomického hlediska zásadní) na dosažené hodnotě termodynamické účinnosti vřazené turbíny. Čím bude nižší, tím bude nižší při stejném průtoku páry elektrický výkon, ve stejném poměru bude nižší také potřebný přídavný tepelný výkon kotle, a tedy ve stejném poměru budou nižší i přídavné náklady na palivo. K realizaci tak lze použít relativně jednoduché a tedy i investičně méně náročné turbíny. Ekologická zátěž příruškem emisí vyvolaná přídavnou výrobou elektrické energie je bez ohledu na termodynamickou účinnost turbíny cca. třikrát nižší než při výrobě stejného množství elektrické energie v kondenzačních elektrárnách. To je důležité zejména při posuzování emisí  $\text{CO}_2$ , které jsou u fosilních paliv v současnosti neodstranitelnou složkou spalin. Při poměrně velkém počtu kotelen malých a středních výkonů by větší rozšíření tohoto způsobu kogenerace přineslo značné ekonomické, energetické i ekologické efekty.

## 2.7. Základní ekonomické ukazatele a charakteristické hodnoty tepelných oběhů elektráren

Pro každé technicko-ekonomické hodnocení tepelného oběhu jsou pro daný provozní stav důležité zejména následující ukazatele: Spotřeba paliva, hmotnostní průtok pracovního média (např. vodní páry), hmotnostní průtok chladicí vody, měrná spotřeba tepla, páry, případně paliva, tepelná účinnost oběhu a velikost vlastní spotřeby (spotřeba elektrické energie k zajištění provozu všech agregátů elektrárny). Pro každé dílčí zařízení, které je součástí oběhu, lze sestavit rovnici energetické bilance.

## 2.7.1. Přehled účinností tepelné elektrárny

Logickou snahou všech provozovatelů energetických zařízení „vyrábějících“ elektrickou energii je dosáhnout optimálního poměru mezi vyrobenou elektrickou energií a tepelnou energií, dodanou do systému. Zde je nutno zdůraznit, že to vždy nemusí být nejvyšší dosažitelný poměr. O úspěšnosti zařízení vždy nakonec rozhodují výsledné kalkulace vztažené na vyrobenou kWh, samozřejmě se započítáním všech, tedy i ekologických a bezpečnostních nákladů. Limitní teoretickou hranici tohoto transformačního poměru (teplné účinnosti) určuje Carnotův oběh, složený ze dvou izotermických a dvou adiabatických vratných termodynamických změn.

Tepelná účinnost oběhu:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{\Delta q}{q_1} = \frac{w}{q_1} \quad (2.33)$$

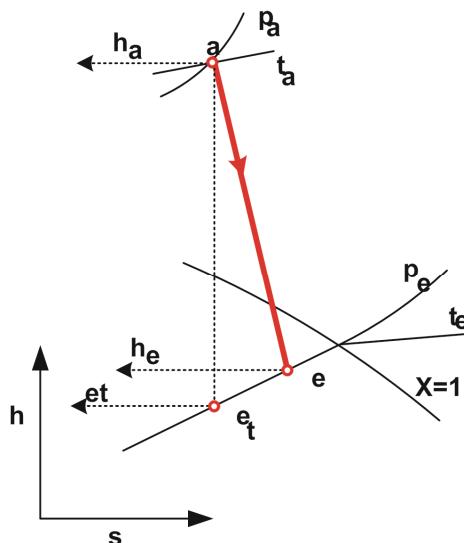
$q_1$  ..... dodané teplo (J/kg)

$q_2$  ..... odvedené teplo (J/kg)

$w$  ..... práce oběhu (J/kg)

Tepelná účinnost Carnotova oběhu:

$$\eta_t^C = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (2.34)$$



Obr. 2.23: Expanze v parní turbíně

Z rov. (2.33) a (2.34) plyne zvláštní postavení tepelné účinnosti. Teoretická max. hranice není rovna 1, závisí pouze na teplotním poměru mezi teplotou média odvádějícího a dodávajícího tepelnou energii, tedy na poměru mezi nejnižší a nejvyšší teplotou pracovního média v průběhu pracovního cyklu. Rozvoj energetiky v posledních cca 150 letech byl proto zaměřen na hledání a vývoj takových energetických zařízení a systémů, které by umožnily s co nejnižšími investičními a provozními náklady dosáhnout co možná nejvyšší tepelné účinnosti. Zároveň, vzhledem k tomu, že takto získanou elektrickou energii nelze ve větší míře akumulovat, jsou zejména v posledních padesáti letech preferovány energetické systémy s co největší regulační pružností, rychlostí a rozsahem. Dostatek takových celků v energetické soustavě umožňuje snížit palivové i ostatní provozní náklady soustavy.

Za předpokladu bezezrátové adiabatické expanze ideálního plynu v turbíně je expanze znázorněna izoentropou mezi body a-e<sub>t</sub> (obr. 2.23). Při skutečné expanzi reálného plynu (páry) roste entropie, část kinetické energie uvolněné expanzí se vlivem ztrát přemění zpět na teplo. Expanze proto vždy skončí vpravo od teoretického bodu e<sub>t</sub>. Vzhledem k tomu, že i při skutečné expanzi páry je splněna nutná podmínka dq = 0, lze aplikací 1. věty termodynamiky snadno vypočítat práci, kterou vykoná 1 kg páry při expanzi v turbíně.

$$dq = 0 = dh - v.dp = dh - dw \Rightarrow w = h_a - h_e \quad (2.35)$$

Obdobně pro teoretickou práci platí:

$$w_{th} = h_a - h_{et} \quad (2.36)$$

Poměr mezi skutečnou a teoreticky možnou prací při expanzi v turbíně vyjádřuje **vnitřní termodynamická účinnost**:

$$\eta_{tdi} = \frac{w}{w_{th}} = \frac{h_a - h_e}{h_a - h_{et}} \quad (2.37)$$

Termodynamickou účinnost lze stanovit pro každý turbínový pracovní stupeň, skládající se vždy z dvojice statorových a rotorových lopatek, nebo pro určitou část turbíny např. vysokotlaký díl, respektive pro celou turbínu. Celková termodynamická účinnost moderních kondenzačních turbín se pohybuje v rozsahu cca 65 % ÷ 85 %. Při praktickém používání hodnot tepelné účinnosti oběhu, termodynamické účinnosti a výkonu turbíny je nutno důsledně rozlišovat místo, ke kterému je daná hodnota vztahována. Nejčastěji používané druhy jsou uvedeny v tab. 2.4.

Vztažný bod $\eta$ a výkonu	Termodynamická účinnost	Tepelná účinnost	Výkon turbíny
Ideální turbína	1	$\eta_t = \frac{h_a - h_{et}}{h_a - h_n}$	$P_{ad} = m \cdot (h_a - h_{et})$
Vnitřní	$\eta_{tdi} = \frac{w}{w_{th}} = \frac{h_a - h_e}{h_a - h_{et}}$	$\eta_t^i = \eta_t \cdot \eta_{td}$	$P_i = P_{ad} \cdot \eta_{td}$
Spojka turbíny		$\eta_t^{sp} = \eta_t \cdot \eta_{td} \cdot \eta_m$	$P_{sp} = P_i \cdot \eta_m$
Svorky generátoru		$\eta_t^{sv} = \eta_t^{sp} \cdot \eta_g$	$P_{sv} = P_{sp} \cdot \eta_g$

Tab. 2.4: Základní definice účinností a výkonu bloku

Tepelná účinnost:

$$\eta_t^i = \frac{h_a - h_e}{h_a - h_n} = \frac{w}{h_a - h_n} = \frac{m \cdot w}{m \cdot (h_a - h_n)} = \frac{P_i}{Q_1} \quad (2.38)$$

Mechanická účinnost:

$$\eta_m = \frac{P_{sp}}{P_i} \quad (2.39)$$

Účinnost generátoru:

$$\eta_g = \frac{P_{sv}}{P_{sp}} \quad (2.40)$$

Účinnost kotle: (obr. 2.24)

$$\eta_k = \frac{Q_1}{m_{pv} \cdot q_n} = \frac{m \cdot (h_a - h_n)}{m_{pv} \cdot q_n} \quad (2.41)$$

Mechanická ztráta:

$$Q_{zm} = (1 - \eta_m) P_i \quad (2.42)$$

Ztráta generátoru:

$$Q_{zg} = (1 - \eta_g) P_{sp} \quad (2.43)$$

Po úpravě:

$$Q_{zm} = (1 - \eta_m) \frac{P_{sv}}{\eta_m \cdot \eta_g}; Q_{zg} = (1 - \eta_g) \frac{P_{sv}}{\eta_g} \quad (2.44)$$

$P_i$  ..... vnitřní výkon turbíny (kW)

$P_{sp}$  ..... spojkový výkon turbíny (kW)

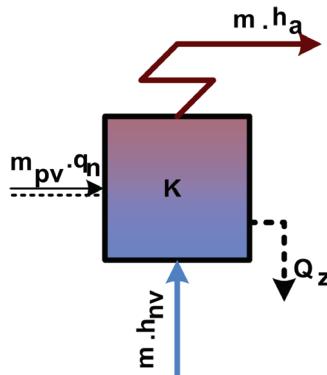
$P_{sv}$  ..... svorkový výkon turbíny (kW)

$m_{pv}$  ..... hmotnost paliva (kg/s)

$q_n$  ..... výhřevnost paliva (kJ/kg)

$m$  ..... hmotnost páry (kg/s)

**Poznámka:** Vztahy uvedené v tab. 2.4 a rov. (2.35) ÷ (2.44) platí pro základní R-C oběh. Vztahy pro reálné oběhy elektráren s regeneračním ohřevem napájecí vody a s přihříváním páry je samozřejmě nutné modifikovat podle skutečného zařízení.



Obr. 2.24: Toky energií v kotli

Důležitými provozně-ekonomickými ukazateli tepelných elektráren jsou:

Měrná spotřeba tepla:

$$q_s = \frac{3600 \cdot Q_1}{P} \quad (\text{kJ/kWh}) \quad (2.45)$$

Měrná spotřeba páry:

$$m_{sp} = \frac{3600 \cdot m}{P} \quad (\text{kJ/kWh}) \quad (2.46)$$

Při hodnocení ekonomické výhodnosti teplárenských provozů i malých kogeneračních jednotek je nutno mít neustále na paměti, že se jedná o spojení z kvalitativního hlediska dvou zcela zásadně odlišných procesů: transformaci tepelné energie na energii elektrickou, která je vždy omezená, a její limitní hodnotu určuje teplotní rozsah pracovního média v tepelném oběhu a prostou transformaci tepla z jednoho média na druhé, která je z kvalitativního i kvantitativního hlediska téměř bezezrátová. V teplárenství je proto nevhodné používání tzv. účinnosti teplárenského provozu ve tvaru:

$$\eta_T = \frac{P + Q_d}{Q_{\text{pal}}} \quad (2.47)$$

$P$  ..... elektrický výkon (kW)

$Q_{\text{pal}}$  ..... dodaná energie paliva (kW)

$Q_d$  ..... tepelný výkon předaný odběrateli (kW)

Vyjadřuje pouze sumaci kvantitativních ztrát energie, (které jsou nutným projevem provozu každého technického zařízení) navíc bez respektování různé kvality těchto ztrát, plynoucích z polohy daného zařízení v tepelném oběhu. Každou z těchto ztrát lze samozřejmě vyjádřit pomocí účinnosti konkrétního zařízení, která je také důležitým ukazatelem pro případnou provozní, respektive konstrukční optimalizaci tohoto prvku. Od jednoduché náhrady redukčního ventilu u středotlaké kotelny rotační redukcí, až po moderní paroplynovou teplárnou, se bude tato účinnost vždy blížit jedné. Po celou dobu existence teplárenství a tedy i KVET byly, a dodnes jsou, hledány metody, které by co nejobjektivněji vyjadřovaly „účinnost kombinované výroby elektřiny a tepla“. Žádná z metod nebyla, a není, bez výhrad v praxi akceptována. Důvodů, proč je tomu tak, je několik:

- Jedná se o dvě kvalitativně odlišné energetické transformace realizované v jednom tepelném cyklu, respektive v několika cyklech, které jsou ale spolu funkčně svázány.
- Kvantitativní i kvalitativní parametry obou transformací se často velmi výrazně případ od případu liší.
- Ani jedna z takto získaných energetických forem (elektrická energie a tepelná energie) se po transformaci nedá ve větší míře „skladovat“, a proto je obvykle jedna z nich (dodávka tepla nebo výroba elektrické energie), zejména u velkých zdrojů, prioritní.

Jediným, obecně platným a nezpochybnitelným ukazatelem, rozhodujícím o konkurenční schopnosti KVET, je její ekonomická výhodnost posuzovaná v konkrétním čase a prostoru. Jedním z důležitých parametrů, ovlivňujícím ekonomickou výhodnost, je samozřejmě i poměrná úspora paliva. Není ale ani zdaleka jediným. Určitým způsobem může ekonomickou výhodnost KVET ovlivnit, a také v mnoha státech ovlivňuje, i státní energetická politika prostřednictvím zákonů a různých forem dotací. V ČR došlo v tomto ohledu k určité změně, reprezentované např. zákonem č. 406/2000 Sb. a vyhláškami č. 150/2001 Sb. a 212/2001 Sb.

## 2.8. Vliv provozních poruch na ekonomii bloku

Při posuzování vlivu poruchy jednotlivých prvků tepelného oběhu je vždy nutné věnovat pozornost nejen vlastnímu prvku, u kterého došlo k poruše, ale i umístění prvku v tepelném oběhu, které často rozhodujícím způsobem ovlivňuje výsledný dopad poruchy na provozní parametry energetického zařízení.

### 2.8.1. Odezva kondenzačního zařízení na provozní poruchy

Kondenzační zařízení velmi citlivě reaguje na každou změnu provozních parametrů tepelného oběhu, která ve svých důsledcích vyvolá změnu výstupní teploty chladicí vody  $t_{w2}$  nebo velikosti součinitele prostupu tepla  $k$  ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ). Kondenzátor se v rozsahu nehavarijních změn provozních parametrů chová samoregulačně (po odeznění přechodového jevu, vyvolaného změnou některého provozního parametru, se kondenzační zařízení vždy sám nastaví do nového rovnovážného provozního stavu). Dále jsou stručně popsány odezvy kondenzačního zařízení na nejčastěji se vyskytující provozní změny, respektive poruchy, které ve svých důsledcích prakticky vždy znamenají zvýšení tlaku v kondenzačním zařízení a tedy i zhoršení provozní ekonomie bloku.

- Snížení hmotnostního průtoku chladicí vody** – snížení průtoku chladicí vody vyvolá přechodný pokles výkonu kondenzačního zařízení  $\Rightarrow$  hromadění páry v parním prostoru kondenzačního zařízení  $\Rightarrow$  stoupání tlaku v kondenzačním zařízení  $\Rightarrow$  zvyšování teploty kondenzace. Zvyšování tlaku a teploty kondenzace se zastaví po dosažení nového rovnovážného stavu, kdy hmotnostní průtok páry do kondenzačního zařízení je tak jako před poruchou roven hmotnosti vzniklého kondenzátu ( $m_e = m_k$ ). Zvýšený tlak v kondenzačním zařízení vyvolá zkrácení expanzní čáry a snížení výkonu.
- Zvýšení vstupní teploty chladicí vody při zachování původního hmotnostního průtoku** – vyskytuje se zejména u průtočného chlazení vlivem střídání ročních období. Vyvolá opět přechodný pokles tepelného výkonu kondenzačního zařízení, způsobený snížením teplotního rozdílu mezi teplotou kondenzace a teplotou chladicí vody. Dojde tedy opět k přechodnému hromadění páry v kondenzačním zařízení a ke stoupání tlaku a teploty kondenzace v parním prostoru kondenzačního zařízení až do dosažení nového rovnovážného stavu. Vliv na provozní ekonomii bloku je stejný jako v předcházejícím případě.
- Znečištění vnitřního povrchu trubek kondenzačního zařízení** – pro přibližné stanovení prostupného součinitele u tenkostenné trubky lze použít vztahu platného pro rovnou stěnu ve tvaru:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.48)$$

$k$  ..... prostupní součinitel ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )

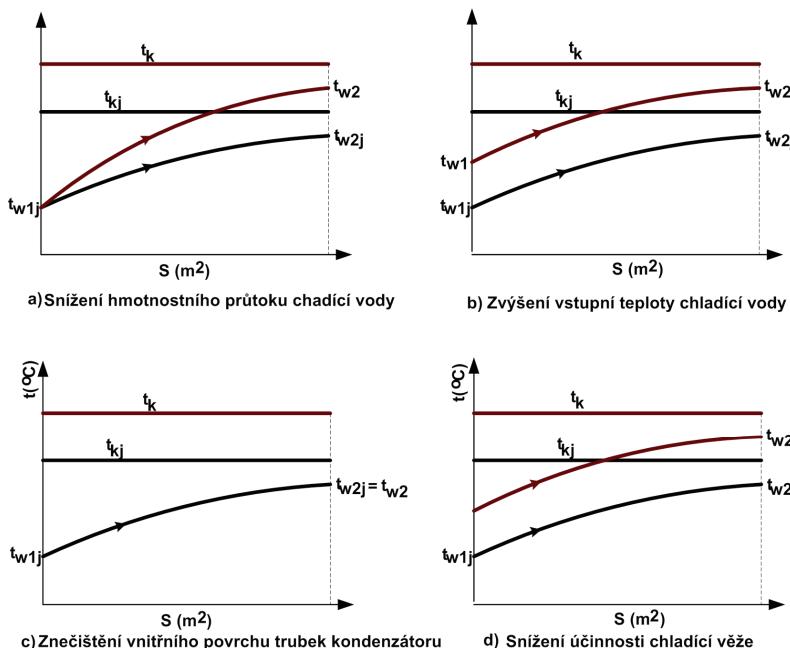
$\alpha_{1,2}$  ..... přestupní součinitel ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$s$  ..... tloušťka stěny trubky (m)

$\lambda$  ..... tepelná vodivost ( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ )

Vytvoření i tenkého nánosu na vnitřní stěně trubek vyvolá vzhledem k vysokým hodnotám  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  a  $\lambda$  značné snížení výsledného součinitele prostupu tepla, které opět znamená, že kondenzátor dosáhne nového rovnovážného stavu až po odpovídajícím zvýšení teplotního rozdílu mezi kondenzující parou a chladicí vodou, které vykompenzuje snížení prostupního součinitele tepla. Zvýšení teplotního rozdílu opět vyvolá stoupnutí tlaku v kondenzátoru a zhoršení provozní ekonomie bloku. Proto se kondenzační zařízení, zejména s průtočným chlazením obvykle vybavují zařízením na kontinuální čištění vnitřních stěn trubek kondenzátoru.

- d) **Snížení účinnosti chladicích věží při oběhovém chlazení kondenzátoru** – snížení účinnosti chladicích věží může být vyvoláno např. poruchou vestavby v chladicí věži, která slouží k rovnoměrnému rozptýlení chladicí vody nebo nepříznivým stavem atmosféry (vysoká teplota, vysoká vlhkost vzduchu). Zhoršení účinnosti vyvolá stoupání vstupní teploty chladicí vody do kondenzátoru se stejnou odezvou jako při poruše popsáné v bodě b). Průběh odezvy na jednotlivé popsané poruchy je znázorněn na obr. 2.25.



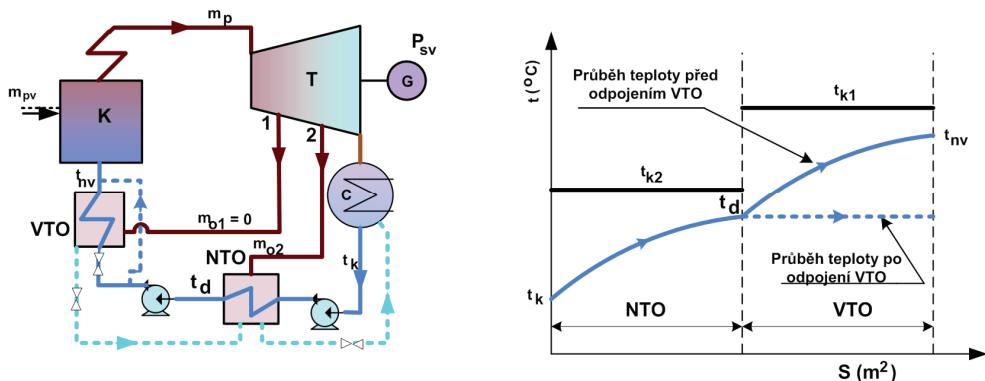
Obr. 2.25: Odezvy kondenzátoru na provozní poruchy (černá čára - stav před poruchou; červená čára - nový ustálený stav pod vlivem poruchy)

## 2.8.2. Poruchy v systému regeneračního ohřevu napájecí vody

Regenerační ohřev napájecí vody je nejúčinnější metodou zvýšení tepelné účinnosti energetického oběhu. Samozřejmou podmínkou udržení ekonomicky nejvhodnějších povozních parametrů bloku je proto bezporuchový provoz regeneračního řetězce s optimálními provozními parametry. Regenerační ohřev napájecí vody je obvykle tvořen sériově řazenými tepelnými výměníky typu kondenzující pára/voda (viz kap. 2.3). Provozní porucha některého z nich znamená jeho časově omezené odstavení a převedení ohřívané napájecí vody obtokovým potrubím do následujícího ohříváku. Vliv odstavení regeneračního výměníku je z důvodu zvýšení názornosti dokumentován na příkladu dvoustupňového regeneračního ohřevu. (Skutečný počet regeneračních ohříváků je větší, obvyklý počet je 6 až 10 sériově řazených výměníků).

### Vliv odstavení vysokotlakého regeneračního ohříváku

Schéma zapojení a průběh teplot regeneračního ohřevu před a po poruše je znázorněno na obr. 2.26.



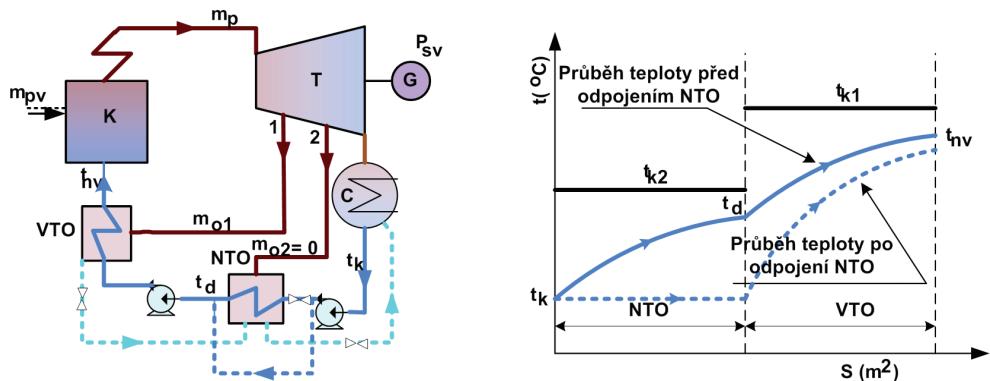
Obr. 2.26: Odezva na odpojení VT ohříváku

Odstavení VT ohříváku vyvolá snížení teploty napájecí vody na hodnotu  $t_d$ , tepelný výkon kotle se tedy při zachování původního hmotnostního průtoku páry  $m_p$  musí zvýšit o hodnotu  $\Delta Q_k = Q_{VTO}$ . Zvýšení tepelného výkonu kotelní jednotky vyvolá samozřejmě zvýšení spotřeby paliva o  $\Delta m_{pv}$ . Hmotnostní průtok páry  $m_{01}$ , který není v důsledku odstávky VT ohříváku odebrán z turbíny v bodě 1, zvýší výkon turbíny o hodnotu  $\Delta P_{sv} = m_{01} \cdot (h_1 - h_e)$ . Celková provozní ekonomie bloku se ale sníží (teplná účinnost oběhu se sníží). Vypnutím jednoho nebo i několika VT ohříváků lze zvýšit výkon turbíny za cenu snížení provozní ekonomie bloku.

### Vliv odstavení nízkotlakého regeneračního ohříváku

Schéma zapojení a průběh teplot regeneračního ohřevu před a po poruše je znázorněno na obr. 2.27. Odstavení NT ohříváku vyvolá na vstupu do VT ohříváku zdvojnásobení teplotního spádu mezi ohřívanou vodou a kondenzující topnou párou. Výkon VT ohříváku se zvýší tak, že téměř nahradí odpadlý výkon NT ohříváku.

Teplota napájecí vody se oproti původnímu stavu před odstávkou téměř nezmění a tedy se nezmění ani spotřeba paliva při zachování původního hmotnostního průtoku vyráběné páry. Vzhledem k tomu, že výkon VT ohříváku stoupne téměř o hodnotu původního výkonu NT ohříváku, stoupne i spotřeba topné páry VT ohříváku na přibližnou hodnotu  $m_{o1} + m_{o2}$ . Svorkový výkon turbíny následkem odstávky NT ohříváku klesne o hodnotu  $\Delta P = m_{o2} \cdot (h_1 - h_{12})$ . Odstávkou NT ohříváku tedy při stejné spotřebě paliva klesne svorkový výkon turbíny, což opět vyvolá snížení provozní ekonomie bloku. U skutečného energetického bloku, který má větší počet jak NT, tak VT regeneračních ohříváků, se odezva na odstavení některého z regeneračních ohříváků řídí umístěním odstaveného výměníku v regeneračním řetězci.



Obr. 2.27: Odezva na odpojení NT ohříváku

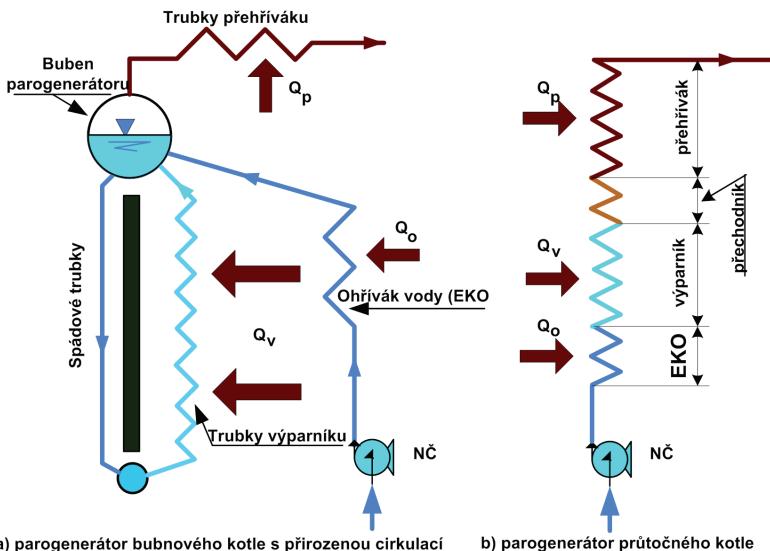
Čím je blíže k napájecí hlavě kotle, tím je odezva podobnější popsané reakci o odstavení vysokotlakého RO, čím je výměník blíže ke kondenzátoru turbíny, tím je odezva podobnější reakci o odstavení nízkotlakého RO.

## 2.9. Parní kotle

Rychlý vývoj moderních parních kotlů velkých jednotkových výkonů byl umožněn zavedením principu spalování uhlíkového prášku ve velkoprostorových granulačních nebo výtavných ohništích, vytvořených pomocí soustavy paralelních trubek výparníku (část parogenerátoru, ve které dochází k fázové změně – odparu). Parogenerátor se tak stal v podstatě soustavou paralelních trubek, připojenou k jednomu až třem bubenům, z nichž alespoň jeden vždy plnil úlohu gravitačního separátoru sýté páry od vody. Potřebná cirkulace vody ve výparníku byla vyvozená rozdílem hustoty vody v neotápěných, tzv. spádových trubkách a hustoty směsi vody s párou v otápěných trubkách výparníku (varnicích), tvořících stěny spalovací komory. S postupným zvyšováním tlaku vyráběné páry tento rozdíl hustot  $\Delta\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) velmi rychle klesá, při dosažení kritického tlaku vody je nulový. S růstem tlaku vyráběné páry bylo proto nutné zvyšovat stálé výšku spalovací komory a tak kompenzovat pokles  $\Delta\rho$ , aby byla udržena potřebná intenzita cirkulace parovodní směsi ve výparníku.

Dalším typem vývojové řady parních kotlů je průtočný kotel. Jde v podstatě o soustavu paralelních trubek, kde na jednom konci vstupuje voda a na druhém

vystupuje přehřátá pára. Odpadá zde kotelní buben, který je hlavně u vysokotlakých zařízení těžkou a technologicky náročnou částí kotle. První praktické pokusy o sestrojení tohoto kotla se uskutečnily ve 20. letech minulého století (Ramzin – SSSR, Benson – Německo). Pro své konstrukční, provozní a regulační problémy, v tehdejší době těžko zvládnutelné, se používaly v prvé polovině minulého století spíše výjimečně. Dnes jsou podmínky pro spolehlivý provoz průtočných kotlů velmi příznivé. Moderní regulační technika, vyspělá metalurgie a zvládnuté technologie dokonalé úpravy napájecí vody umožňují bezpečně vyřešit všechny obtížné stránky provozu tohoto typu parních kotlů. Principiální funkční schéma parogenerátoru bubnového kotla s přirozenou cirkulací a parogenerátoru průtočného kotla je uvedeno na obr. 2.28. Dalším vývojovým typem je průtočný kotel s přídavným oběhem (superponovanou cirkulací). Kotel tohoto typu je v provozu v EMĚ III.



Obr. 2.28: Funkční schéma parogenerátoru bubnového a průtočného kotla

#### Charakteristické vlastnosti parogenerátoru bubnového kotla

- Nucený průtok vody je pouze v ohříváku vody a je přerušen bubnem parogenerátoru, který plní funkci gravitačního separátoru páry.
- V bubnu je vždy rozhraní mezi vroucí vodou a sytotou parou – hladina vody v bubnu je důležitá řídicí veličina regulace napájení kotle.
- Přirozená cirkulace zajišťuje chlazení varnic a trvalé vyrovnávání chemického složení kotelní vody ve spádových a varných trubkách a umožňuje snadný odluh kotle, udržující koncentraci solí v kotelní vodě v daných mězích.
- Výhřevné plochy ohříváku vody a přehříváku páry se nemění s výkonem kotle

- Relativně velká zásoba vody zlepšuje akumulační a regulační vlastnosti kotle (po určitou dobu je bubnový kotel schopen dodávat větší hmotnostní průtok páry, než odpovídá jeho okamžitému tepelnému výkonu).

### **Charakteristické vlastnosti průtočného kotle**

Průtok vody, parovodní směsi i přehřáté páry ve všech výhřevních plochách kotle je vynucen výstupním tlakem napájecího čerpadla. Proto mohou být průtočné rychlosti mnohem vyšší, než je obvyklé u kotlů bubnových. Vyšší průtočné rychlosti ovšem odpovídá i vyšší přestupní součinitel  $\alpha$  ( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) a z něj plynoucí materiálové úspory.

Mezi ohřívací, odpařovací a přehřívací částí parogenerátoru nejsou u některých typů (Benson, Ramzin) pevné hranice. Při snižování výkonu kotle se obvykle hranice začátku a konce odparu posunují směrem ke vstupu do kotle.

Regulace průtočného kotle je obtížnější. K dispozici není výška hladiny v bubnu, parogenerátor má ve srovnání s parogenerátorem bubnového kotle podstatně menší akumulační schopnost.

- Kotel vyžaduje dokonalou demineralizaci napájecí vody.
- Hodnota admisního tlaku páry není omezena.
- Při nuceném průtoku je možno použít trubky menšího průměru, odpadá buben a tím klesá hmotnost kotle.
- Teplotu admisní páry lze udržet konstantní v širokém rozsahu výkonu kotle.
- Větší regulační pružnost, rychlejší najízdění a odstavování kotle.
- Odpadá ztráta odluhem.
- Tvar ohniště, jehož stěny tvoří trubky parogenerátoru, lze libovolně tvarovat a tedy i snadno přizpůsobit optimálním rozměrům.

Porovnáním provozních vlastností obou typů parních kotlů vyplynou důvody pro sázování moderních průtočných kotlů v energetice.

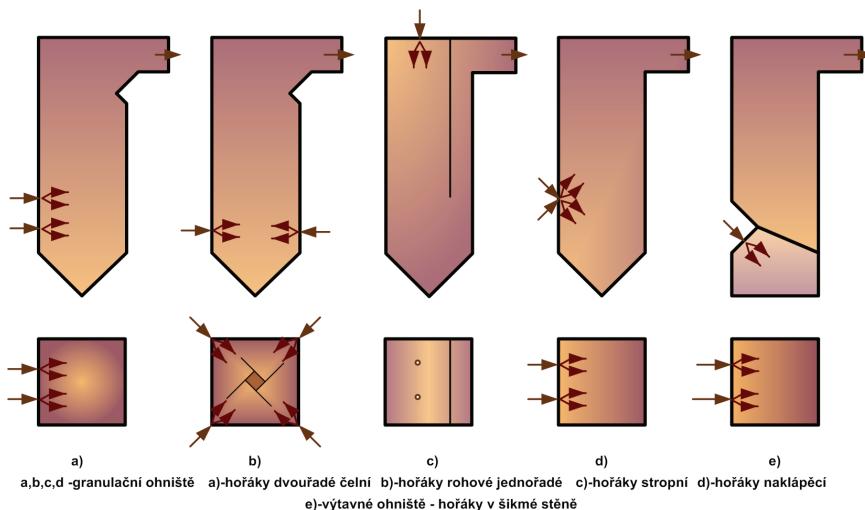
#### **2.9.1. Spalovací zařízení**

Spalovací zařízení parního kotle se skládá z ohniště a z pomocného zařízení, tj. např. spalinových a vzduchových ventilátorů, ohříváku spalovacího vzduchu, zařízení na přípravu paliva ke spalování (sušení, mletí) atd. U kotelních jednotek větších výkonů, používaných v energetickém průmyslu převládají prášková ohniště granulační, výtavná, případně cyklónová. V současnosti se stále více prosazují ohniště fluidní. Ve všech typech práškových ohniště se spaluje práškové palivo, dodávané do spalovací komory spolu se spalovacím vzduchem soustavou vhodně rozmístěných hořáků. Příklady umístění hořáků práškových ohniště spolu s obvyklými tvary spalovacích komor jsou na obr. 2.29. Tvar ohniště a umístění hořáků určují tvar a velikost plamene, prostorové rozložení teploty v ohništi, podmínky pro přenos tepla do jednotlivých výhřevních ploch a charakter proudění spalin v ohništi. Přibližná doba spalování uhelného zrna je závislá zejména na velikosti zrna

(jemnosti mletí) a pohybuje se v rozsahu 0,5 až 2 s. Střední rychlosť pohybu práškového paliva při hoření v ohništi se pohybuje v rozsahu 5 až 15 m/s. S rostoucí velikostí zrnění práškového paliva je nutné pro udržení potřebné rychlosti hoření vyšší rychlosť pohybu paliva ve spalovací komoře. Potřebné rychlosti a kvality spalovací reakce i velmi málo výhrevných paliv, kterých se zejména v naší energetice používá, se dosahuje vysokým ohřátím spalovacího vzduchu (300 až 400°C).

### Granulační ohniště

U granulačních práškových ohnišť probíhá spalování při nižších teplotách, po polovině nepřekročí teplotu tavení a odchází z ohniště v tuhé formě. Tvar ohniště je nejčastěji čtvercový nebo obdélníkový s kuželovou výsypkou pro odvádění popelovin, uzavřenou vodním uzávěrem. Nejvyšší teplota v jádře plamene bývá v rozsahu 1100 až 1500°C. Granulační ohniště je vhodné i pro spalování méně hodnotných paliv s velkým podílem vody a popela. Granulačním ohništěm je vybavena většina kotlů českého energetického průmyslu. Lze je provozovat v poměrně značném regulačním rozsahu, (minimální výkon je cca 30 % jmenovitého výkonu) bez nutnosti zapojení tzv. stabilizačních hořáků. Určitou nevýhodou je větší přebytek vzduchu při spalování, který snižuje účinnost kotle a poměrně vysoké nároky na odlučovací zařízení vzhledem k velkému obsahu tuhých částic ve spalinách.



Obr. 2.29: Tvary práškových ohnišť a obvyklé umístění hořáků

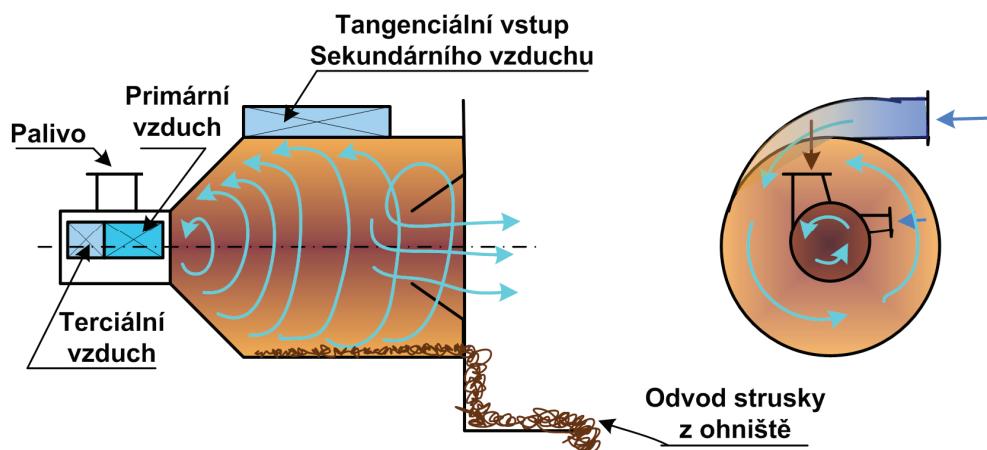
### Výtavná ohniště

U výtavných ohnišť je teplota v aktivní části ohniště větší než je teplota tečení popelovin spalovaného paliva, které se odvádí ve formě tekuté strusky obvykle nepřetržitě. Podmínky pro tvorbu a odvod tekuté strusky jsou zajišťovány v dolní části spalovacího prostoru (tzv. výtavný prostor) pokrytím trubek výparníku keramickou hmotou. Tím se sniží přenos tepla z tohoto prostoru a udrží požadovaná vysoká teplota (1500 až 1700°C). Horní část ohniště tvoří tzv. vychlazovací prostor, který tvoří také trubkové stěny výparníku ale bez keramického pokrytí. Tato ohniště se hodí pro spalování kvalitnějšího paliva (vyšší výhrevnost, malý obsah

vody). Kotle s výtavným ohništěm pracují s menším přebytkem vzduchu, mají tedy vyšší účinnost a jsou schopny zachytit větší podíl pevných zbytků po spalování.

### Cyklónová ohniště

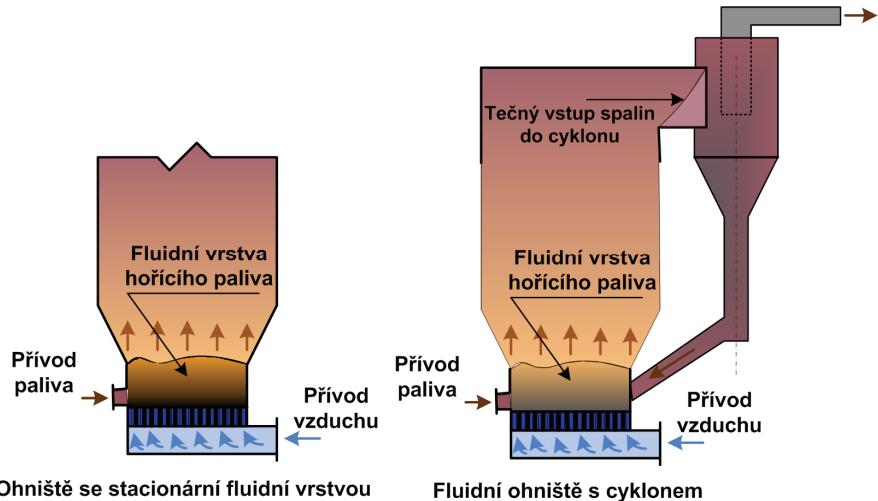
V cyklónovém ohniště se dosahuje vysoké rychlosti spalování vytvořením vírového pole s velkými relativními rychlosťmi mezi spalovacím vzduchem a jednotlivými zrny paliva (100 až 200 m/s.). Tak jako u výtavného ohniště, navazuje na vlastní cyklónové ohniště vychlazovací prostor. Vzhledem k vysoké rychlosti spalování lze používat i hrubě mleté palivo (zrnění až 5 mm) a tím získat značnou úsporu mlecí práce. Cyklónová ohniště (obr. 2.30) jsou buď horizontálního, nebo vertikálního uspořádání. Zachycení popelovin (tekutá struska) je u cyklónových ohnišť poměrně vysoké (80 až 90 %).



Obr. 2.30: Schéma cyklónového ohniště

### Fluidní ohniště

V tomto typu ohniště dochází ke spalování drceného paliva s velikostí zrn do 6 mm v kypící (fluidní) vrstvě, kterou vytváří primární vzduch, vháněný vertikálním směrem do ohniště. Zrna paliva postupně vyhořívají, přesouvají se do vyšší úrovně fluidní vrstvy a v poslední fázi hoření jsou vynášeny proudem spalin z ohniště. Moderní fluidní ohniště jsou obvykle cirkulačního typu. U těchto ohnišť je na výstupu ze spalovacího prostoru umístěn tzv. horký nebo studený cyklón, jehož úkolem je odloučit ze spalin větší, obvykle dokonale nespálené částice paliva a vrátit je zpět do spalovacího prostoru. Vzhledem k poměrně dlouhé době, po kterou se palivo udržuje ve spalovacím prostoru ohniště, lze spalovat ve fluidních ohništích i paliva s relativně nízkou výhřevností. Výhodou fluidních ohnišť je možnost spalování paliv s velmi nízkou výhřevností a velkým podílem popela, úspora mlecí práce a možnost odsíření spalin pouhým přidáním drceného vápence do paliva. Mezi nevýhody patří zejména zvýšená spotřeba energie pro pohon dmychadel primárního vzduchu vzhledem k poměrně značné tlakové ztrátě při průchodu vzduchu fluidní vrstvou. Schéma fluidního ohniště se stacionární fluidní vrstvou a fluidní vrstvou je na obr. 2.31. Největší fluidní kotel s parním výkonem 350 t/h v ČR byl uveden do provozu v r. 1996 v elektrárně Tisová.



Obr. 2.31: Schéma fluidního ohniště

### Ohniště na kapalná a plynná paliva

Jsou podstatně jednodušší než ohniště spalující tuhá paliva. Odpadá odvod tuhých zbytků po spalování (popela) a zachycování jemných frakcí popílku, sušení a mletí paliva. Spalování probíhá s velmi malým přebytkem vzduchu, ztráta citelným teplem spalin (komínová ztráta) je menší, účinnost kotle na kapalná a plynná paliva je proto větší. V energetickém průmyslu ČR se až na malé výjimky prakticky nepoužívají.

### Provozní parametry spalovacích zařízení

**Výhřevnost**  $q_n$  (kJ/kg) - množství tepelné energie, uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a ochlazením spalin na teplotu 20°C bez kondenzace vodních par ve spalinách.

**Spalné тепло**  $q_v$  (kJ/kg) - množství tepelné energie, uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a ochlazením spalin na teplotu 20°C se započítáním tepla, uvolněho kondenzací vodních par ve spalinách.

Z uvedených definic vyplývá vztah mezi spalným teplem a výhřevností

$$q_n = q_v - 2453.(W + 9.H_2) \quad (2.49)$$

W ..... poměrné množství vody v palivu (1)

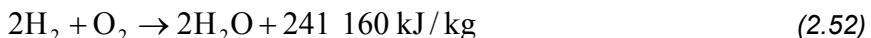
H<sub>2</sub> ..... poměrné množství vodíku v palivu (1)

Fosilní palivo se skládá z **hořlaviny a přítěže**. **Hořlavina H** je část paliva reagující s oxysličovadlem. Skládá se z prvků aktivních (oxidací se uvolňuje tepelná energie) a pasivních (oxidací se teplo neuvolňuje). Např. v nejrozšířenějším palivu v energetickém průmyslu v ČR – uhlí, jsou aktivními prvky v hořlavině uhlík, vodík

a síra. Pasivními prvky jsou kyslík a dusík. **Přítěží** tuhých a kapalných paliv je obsah popela A a vody W. Obsahy hořlaviny, popeloviny a vody jsou mezi sebou svázány zřejmým vztahem

$$H + A + W = 1 \quad (2.50)$$

Spalování je po chemické stránce oxidace spalitelných částí paliva, po fyzikální stránce se jedná o přívod kyslíku k hořlavým částem paliva, odvod spalovacích produktů a předávání uvolněné tepelné energie. Spalovací proces je možno sledovat staticky, kdy se sledují pouze vstupní a výstupní produkty procesu (hmotnostní a energetická bilance), nebo dynamicky, kde se sledují a ovlivňují spalovací pochody v časovém a prostorovém průběhu. Dynamika spalování je poměrně složitý proces, jehož zvládnutí je ale při konstrukci a provozu moderních spalovacích zařízení nezbytné. Oxidace hořlaviny probíhá podle známých rovnic



Vyjádřením rovnic (2.51) až (2.53) ve stechiometrickém tvaru lze při známém složení paliva určit potřebné minimální objemové množství kyslíku  $V_{O_2 \min}$  ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ ). Ze známého složení vzduchu, který obsahuje cca 21 objemových % kyslíku, lze stanovit stechiometrické (minimální) množství suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spálení hořlaviny v 1 kg paliva ve tvaru:

$$V_{vs\ min} = \frac{100}{21} \cdot V_{O_2 \min} \quad (2.54)$$

Pro zajištění spolehlivého okysličení a tím i chemicky dokonalého spalování v časově a prostorově omezené oblasti ohniště je nutné přivádět do tohoto prostoru více vzduchu, než je teoreticky zapotřebí. Tento nutný přebytek vzduchu je definován tzv. **součinitelem přebytku vzduchu  $\alpha$** .

$$\alpha = \frac{V_v}{V_{v\ min}} \geq 1 \quad (2.55)$$

$V_v$  ..... skutečné množství vzduchu

$V_{v\ min}$  ..... teoretické (stechiometrické) množství vzduchu

Optimální hodnoty přebytku vzduchu na výstupu ze spalovacího prostoru závisí hlavně na typu spalovacího zařízení.

rošťová ohniště	$\alpha_{\text{opt.}} = 1,3 \div 1,5$
prášková ohniště	$\alpha_{\text{opt.}} = 1,15 \div 1,25$
cyklónová ohniště	$\alpha_{\text{opt.}} = 1,05 \div 1,1$
ohniště na kapalná a plynná paliva	$\alpha_{\text{opt.}} = 1,01 \div 1,15$

K vlastní oxidaci paliva ve spalovacím prostoru se samozřejmě využije pouze množství kyslíku odpovídající stechiometrickému množství. Kyslík přivedený navíc plní funkci „katalyzátoru“. Umožňuje dokonalé vyhoření paliva v reálném čase, sám se jí však nezúčastní. Vlivem netěsností ve spalinovém traktu kotle dochází k přisávání „falešného vzduchu“, který při proudění spalin postupně zvyšuje přebytek vzduchu. Každé zbytočné zvýšení přebytku vzduchu zhoršuje provozní ekonomii kotelní jednotky (zvyšuje komínovou ztrátu a potřebný výkon spalinového ventilátora). Obdobně jako stechiometrický objem spalovacího vzduchu  $V_{v\min}$  lze vypočítat i minimální objem spalin  $V_{s\min}$  vzniklý dokonalým spálením bez přebytku vzduchu. Skutečný objem spalin plyne ze vztahu:

$$V_s = V_{s\min} + (\alpha - 1) \cdot V_{v\min} \quad (2.56)$$

Přibližně lze určit potřebné teoretické (minimální) objemy spalovacího vzduchu a vzniklých spalin pomocí empirických vzorců, založených na znalosti výhřevnosti používaného paliva (tzv. Rosinovy vztahy). Například pro tuhá paliva se používají vztahy:

$$V_{v\min} = 0,5 + 0,2436 \cdot q_n \cdot 10^{-3} \quad (2.57)$$

$$V_{s\min} = 1,375 + 0,2269 \cdot q_n \cdot 10^{-3} \quad (2.58)$$

### Účinnost a ztráty parního kotla

**Účinnost parního kotla**  $\eta_k$  [1], vyjadřující poměr mezi tepelnou energií dodanou pracovnímu médiu (vodě a páre) a tepelnou energií, dodanou do kotla spalováním paliva je možno vyjádřit a tedy i vypočítat v podstatě dvěma způsoby:

- a) Přímá metoda:

Vzhledem k tomu, že v parogenerátoru probíhá transformace tepelné energie při isobarické změně, platí:  $dq = dh$ . Pro vyjádření účinnosti kotelní jednotky tedy platí vztah:

$$\eta_k = \frac{m_p \cdot (h_a - h_{nv})}{m_{pv} \cdot q_n} \quad (2.59)$$

b) Nepřímá metoda:

Ztráty tepelné energie při provozu kotelní jednotky jsou dány součtem ztrát způsobených nedokonalým uvolněním tepelné energie při spalovacím procesu a ztrát, vyvolaných nedokonalým využitím uvolněného tepla. Do prvej skupiny patří tzv. ztráta mechanickým nedopalem a ztráta chemickým nedopalem. U moderních kotlů jsou obě tyto ztráty relativně velmi malé. Ve druhé skupině se jedná zejména o ztrátu citelným teplem spalin (tzv. komínová ztráta). Jedná se o největší ztrátu parního kotle. Závisí přímo úměrně na množství spalin a na teplotě spalin v patě komína. Za provozu je proto udržován přebytek vzduchu  $\alpha$  na co nejnižší úrovni (která ovšem ještě zajišťuje dokonané spalování) a výstupní teplota spalin na co nejnižší úrovni (závisí na obsahu vodních par a oxidu siřičitého ve spalinách, případně na typu odsirovací technologie). Do této skupiny dále patří ztráta citelným teplem tuhých zbytků a ztráta sáláním a vedením.

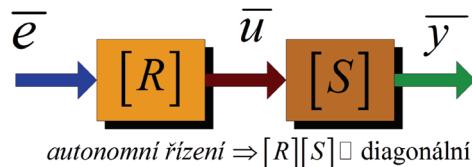
Při tomto vyjádření účinnosti kotelní jednotky platí zřejmý vztah:

$$\eta_k = 1 - \sum \zeta_i \quad (2.60)$$

$\sum \zeta_i$  .... součet dílčích ztrát parního kotle

## 2.10. Regulační programy tepelných elektráren

V moderném blokovém uspořádání kotel - turbína - generátor vzniká konzistentní objekt, který je možné z regulačního hlediska uspořádat jako víceparametrový (MIMO) regulovaný objekt s mnoha navzájem se ovlivňujícími vstupy a výstupy.



Obr. 2.32: Schéma vícerozměrového spojení regulátoru a soustavy

Tento objekt je charakterizován širokým spektrem časových konstant rotačních a objemových zásobníků energie:

- Kotel, jehož akumulační objemová konstanta  $T_{AK} = 200 \div 400$  s.
- Turbína s časovou konstantou parních objemů  $T = 10$  s a mechanickou časovou konstantou rotujících hmot  $T_J = 10$  s.
- Generátor s elektrickými časovými konstantami v rozmezí  $10^0$  a  $10^{-1}$  s.

Přenosové vlastnosti regulátoru a systému se ve vícerozměrových případech (MIMO systémy) znázorňují přenosovými maticemi ve kterých položka s indexy r,s reprezentuje přenos mezi r-tým vstupem a s-tým výstupem. Propojení regulátoru a

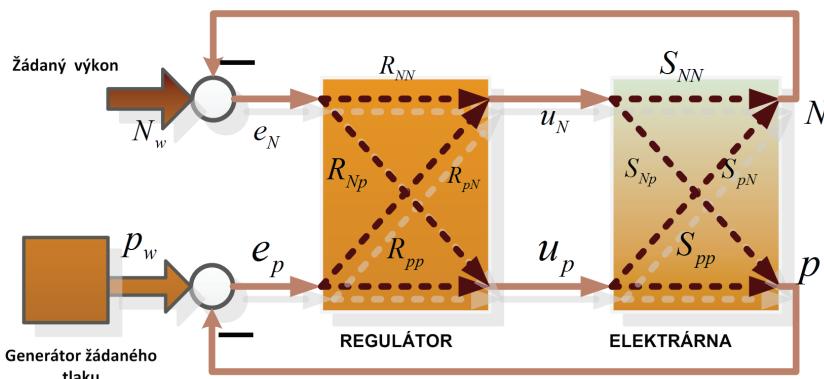
soustavy MIMO systému ukazuje obr. 2.32. Aby regulační odchylka s indexem  $r$  ovlivňovala pouze výstup se stejným indexem, tj. regulace se jevila jako autonomní, musel by součin přenosové matice regulátoru a soustavy vytvořit diagonální matici. Pro vytvoření nediagonálních vazeb regulátoru se během vývoje základních elektrárenských regulačních obvodů vytvořila typová schémata.

Pro prezentaci regulačních programů je účelné zjednodušit situaci na objekt se dvěma majoritními vstupy a výstupy. Tyto dvě veličiny nesou informace o energetické rovnováze mezi výrobou a spotřebou.

- **Tlak páry** na výstupu kotle je měřítkem rovnováhy mezi výrobou páry v kotli a spotřebou páry v turbíně.
- **Otačky** soustrojí, které jsou měřítkem rovnováhy mezi generovaným mechanickým výkonem turbíny a el. výkonem dodávaným do sítě.

Hlavními regulátory a akčními veličinami jsou:

- $R_k$  - Regulátor kotle ovládající tepelný příkon do kotle reprezentovaný hmotnostním tokem fosilního paliva  $m_f^*$  s výhřevností  $q_f$ .
- $R_T$  - Regulátor turbíny ovládající tepelný příkon do turbíny reprezentovaný hmotnostním tokem páry  $m_p^*$  s entalpií  $h_a$ .

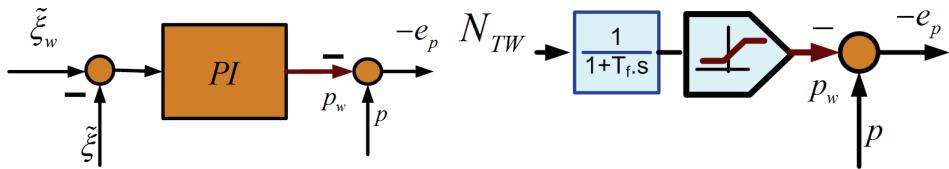


Obr. 2.33: Schéma systému se dvěma vstupy a výstupy

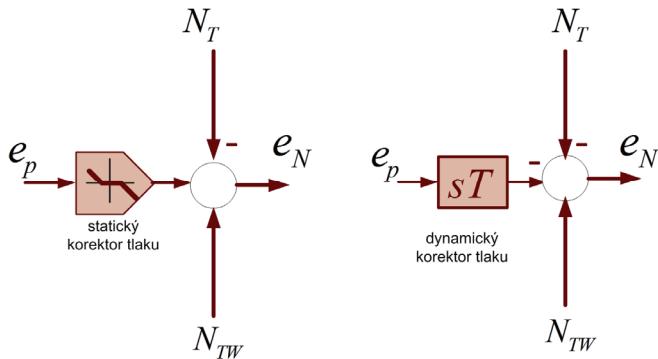
Regulační programy elektráren definují vzájemné přiřazení mezi akčními a regulovanými veličinami regulačních obvodů elektráren.

<p><math>p</math>.....aktuální hodnota tlaku  <math>e_p</math>....regulační odchylka tlaku  <math>p_w</math>...žádaná hodnota tlaku  <math>R_{NN}, R_{pp}</math>...hlavní přenosy regulátoru  <math>R_{pN}, R_{Np}</math>...vedlejší přenosy regulátoru  <math>u_N, u_p</math>...akční veličiny regulace výkonu a tlaku přiřazené dle reg. programů,</p>	<p><math>N_T</math>.....aktuální hodnota výkonu turbíny  <math>e_N</math>.....regulační odchylka výkonu  <math>N_w</math>.....žádaná hodnota výkonu  <math>S_{NN}, S_{pp}</math>...hlavní přenosy soustavy  <math>S_{pN}, S_{Np}</math>...vedlejší přenosy soustavy</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### Korekční vazby:



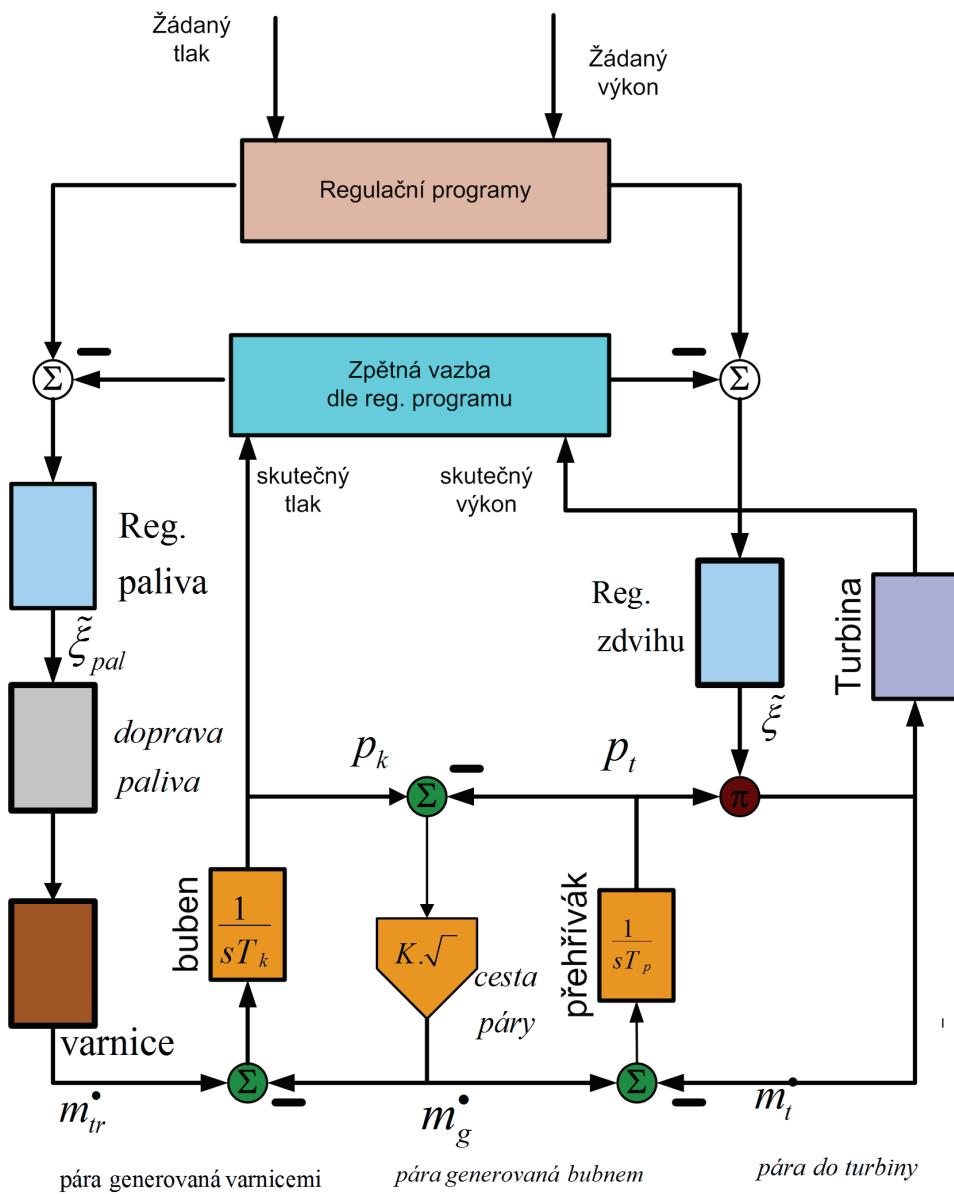
Obr. 2.34: Generátory žádané hodnoty tlaku



Obr. 2.35: Generátory korekce RpN žádané hodnoty výkonu

typ programu	admisní tlak	regulátory		generátor tlaku $p_w$
		$R_k$ řídí	$R_T$ řídí	
klouzavý tlak	přirozený klouzavý	výkon $N_T$	nic	žádný
klasické schéma	klouzavý, řízený statickou funkcí	tlak $p$	výkon $N_T$	statický
	klouzavý, řízený dynamickou funkcí			dynamický
	pevný			$p_w = \text{konst.}$
neklasické schéma	pevný	výkon $N_T$	tlak $p$	$p_w = \text{konst}$
	klouzavý, řízený statickou funkcí			statický
	klouzavý, řízený dynamickou funkcí			dynamický

Tab. 2.5: Přehled regulačních programů parních elektráren



Obr. 2.36: Zjednodušené schéma elektrárny

označení	význam	obvyklé hodnoty, rovnice
$T_{d-pal}$	Dopravní zpoždění paliva	40-60 s
$T_{pal}$	Časová konstanta paliva	20-40 s
$T_{tr}$	Časová konstanta přenosu tepla v trubkách	5-7s
$T_k$	Časová konstanta parovodní směsi a bubnu	90-300 s
$T_{pr}$	Časová konstanta přehříváku	5-15s
$\tilde{\xi}_{pal}$	Výstup regulátoru množství paliva	$\tilde{\xi}_{pal} = f(\text{regulátor})$
$\tilde{Q}_{pal}$	Teplo generované palivem	$\tilde{Q}_{pal}^* = \frac{1}{T_{pal}} \left\{ \tilde{\xi}_{pal} (t - T_{d-pal}) - \tilde{Q}_{pal} \right\}$
$\tilde{m}_{tr}^*$	Množství páry vyrobené v trubkách	$(\tilde{m}_{tr}^*)^* = \frac{1}{T_{tr}} \left\{ \tilde{Q}_{pal} - \tilde{m}_{tr}^* \right\}$
$\tilde{m}_T^*$	Množství páry na vstupu VT	$\tilde{m}_{pg}^* = k \sqrt{\tilde{p}_k - \tilde{p}_T}$
$\tilde{m}_{pg}^*$	Množství páry na výstupu bubnu	$\tilde{m}_{pg}^* = k \sqrt{\tilde{p}_k - \tilde{p}_T}$
$\tilde{p}_k$	Tlak syté páry v bubnu	$\tilde{p}_k^* = \frac{1}{T_k} \left\{ \tilde{m}_{tr}^* - \tilde{m}_{pg}^* \right\}$
$\tilde{p}_T$	Tlak v regulační komoře turbíny	$\tilde{p}_T^* = \frac{1}{T_{pr}} \left\{ \tilde{m}_T^* - \tilde{m}_{pg}^* \right\}$
$\tilde{A}_v$	Plocha regulačního ventilu	$\tilde{A}_v = f(\tilde{\xi})$
$\tilde{\xi}$	Zdvihu ventilu turbíny	$\tilde{\xi} = f(\text{regulátor})$

Tab. 2.6: Parametry a rovnice zjednodušeného schématu

### Klouzavý tlak

Přirozený klouzavý tlak je typ regulace, ve kterém jsou regulační ventily v celém rozsahu regulace v konstantní poloze. Tlak se nereguluje a mění se podle lineární závislosti mezi tlakem a výkonem.

$$\tilde{N}_T = K \cdot \tilde{\xi} \cdot \sqrt{p_a^2 - p_e^2} = K \cdot \tilde{\xi} \cdot p_a \quad (2.61)$$

Ze zjednodušení platného pro kondenzační elektrárnu ( $p_e \rightarrow 0$ ) vyplývá lineární závislost tlaku na výkonu se směrnicí určenou inverzí zdvihu ventilu (pro větší zdvih je úhel s osou x menší). Je třeba si ale uvědomit, že s rostoucím tlakem roste i teplota bodu varu a tím i akumulace. Tato vlastnost zpomaluje regulaci výkonu.

## Výhody klouzavého tlaku

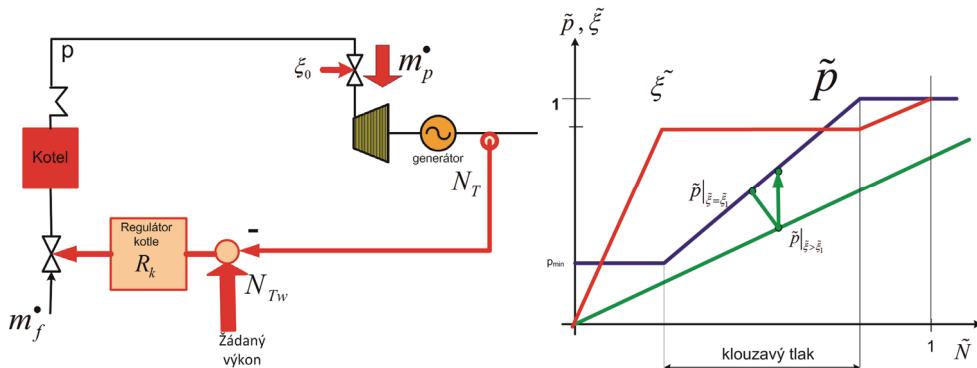
- Jednodušší regulace teploty přehřáté i přihřáté páry díky samoregulačním schopnostem
- Menší změny teploty na vstupu turbíny při změnách  $N \rightarrow$  umožňuje rychlejší zatěžování, což je vhodné pro proměnlivé zatížení.
- Dobrá účinnost

## Nevýhody

- nevýhodou je pomalá reakce výstupního výkonu na změnu požadované hodnoty, protože velká časová konstanta kotle je ve smyčce výkonu. Pro použití elektrárny v sekundární regulaci výkonu se schéma modifikuje na řízený klouzavý tlak.

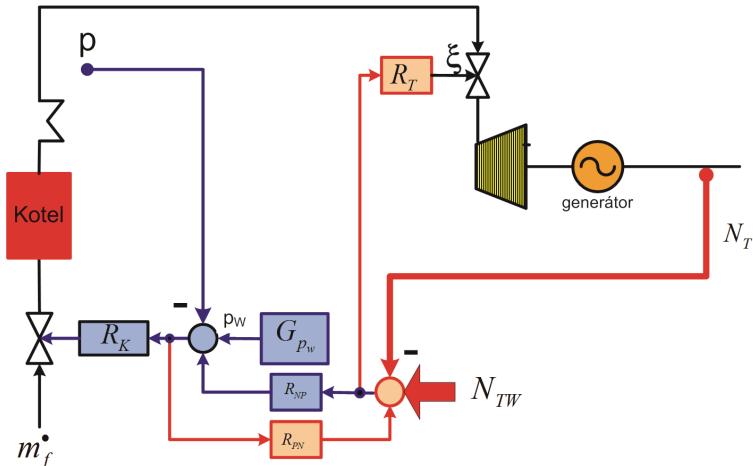
### 2.10.1. Řízený klouzavý tlak

Tento provozní režim má schéma, ve kterém se požadovaná hodnota tlaku generuje ze statické závislosti mezi admisním tlakem a výkonem turbíny. Cílem závislosti je docílit v určité části charakteristiky poměry odpovídající režimu klouzavého tlaku a tím využít výhodných vlastností tohoto režimu. Závislost je charakterizována tím, že pro počáteční hodnoty výkonu se generuje konstantní hodnota  $p_{min}$ , následuje fáze režimu klouzavého tlaku s konstantní polohou ventilu (například 0,9) a lineárně rostoucím tlakem. Po dosažení nominální hodnoty tlaku následuje regulace na konstantní tlak. Není-li ventil v horní poloze, je pro pokrytí rychlého nárůstu výkonu rezerva ve zdvihi, pomocí které se rychle zvedne výkon turbíny, který se hradí z akumulace kotle, po jejímž vyčerpání tlak klesne a kotelní regulátor zvýší tok paliva a tlak ze zrestaurauje na původní hodnotu.



Obr. 2.37: Schéma a charakteristiky řízeného klouzavého tlaku

## Klasické schéma



Obr. 2.38: Klasické schéma řízení bloku

V tomto schématu je výkon řízen regulátorem turbíny  $R_T$  řídící zdvih ventilu turbíny ovládajícím hmotnostní tok páry  $m_p^\bullet$  a admisní tlak tokem přiváděného paliva  $m_f^\bullet$ .

### Výhody

- velké časové konstanty kotle jsou vně regulační smyčky výkonu
- rychlá a přesná regulace výkonu

### Nevýhody

- obtížná regulace tlaku a z toho plynoucí větší kolísání tlaku páry
- teplotní změny na výstupu kotle
- nižší termodynamická účinnost

Pro zlepšení kvality regulace tlaku se do nediagonální vazby mezi regulační odchylkou tlaku a žádanou hodnotou výkonu zařazuje statický nebo dynamický korektor tlaku. Statický korektor při záporné regulační odchylce tlaku (tlak je vyšší než žádaná hodnota) a překročení pásma necitlivosti generuje dodatečný kladný signál k požadované hodnotě výkonu a ta způsobí dodatečné zvětšení odběru páry do turbíny a tím i pokles tlaku. Pásma necitlivosti v korektoru tlaku má za úkol omezit kmitavost regulace. Dynamický korektor v ustáleném stavu generuje nulový korekční signál a při odchylce generuje korekční signál na změnu výkonu úměrný rychlosti změny tlaku.

## Klasické schéma se statickým zadáváním tlaku $p_w = f(N_w)$

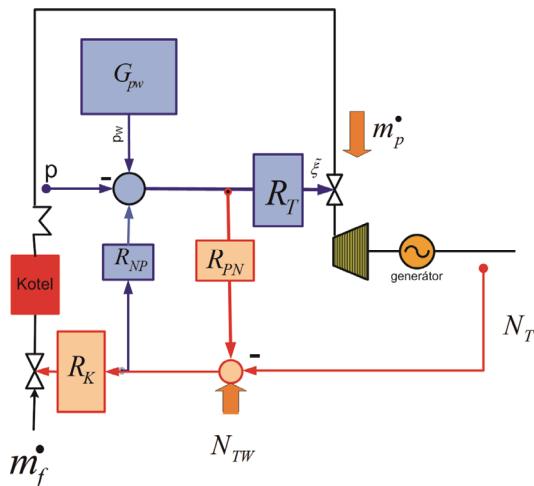
Aby se dosáhlo v klasickém schématu lepších termodynamických poměrů a účinnosti, které jsou charakteristické pro systém s přirozeným klouzavým tlakem, je požadovaný tlak generován pevnou funkční závislostí v závislosti na žádaném výkonu. Zařazený dynamický člen se zpožděním prvního řádu stabilizuje dynamiku přechodových jevů.

## Klasické schéma s dynamickým zadáváním tlaku

Dynamický člen je zapojen jako PI regulátor konstantního otevření ventilů turbíny, který zajišťuje v ustáleném stavu konstantní polohu ventilů. Při změně polohy ventilů následuje změna požadované hodnoty tlaku a regulátor kotle změní tepelný příkon do kotle a tím i množství páry tak, aby se ventil vrátil do zadané polohy.

## Neklasické schéma

V neklasickém schématu se řídí tlak páry na výstupu kotle regulátorem turbíny  $R_T$  a výkon turbíny regulátorem kotle  $R_K$ . V tomto zapojení je tlak před turbínou regulován přesně a rychle, což zajišťuje termodynamickou účinnost cyklu. Nevýhodou zapojení je, že se velká akumulační konstanta kotle  $T_{Ak}$  zařadí do regulační smyčky výkonu, což významně zpomalí dynamiku regulace výkonu. Pro dosažení příznivějších vlastností cyklu se dá použít statické nebo dynamické zadávání požadované hodnoty tlaku.



Obr. 2.39: Neklasické schéma řízení bloku

**Statické zadávání tlaku:** Požadovaná hodnota tlaku je generována v závislosti na žádané hodnotě výkonu přes statický a dynamický člen se zpožděním prvního řádu s časovou konstantou úměrnou  $T_{Ak}$ , který zamezuje nestabilitám v dynamických procesech. Statická část zajišťuje příznivou vazbu mezi tlakem a výkonem.

**Dynamické zadávání tlaku:** Schéma zajišťuje v ustálených stavech zadanou hodnotu polohy regulačních ventilů. Při změně žádané hodnoty výkonu regulátor

kotle  $R_K$  změní tok paliva  $m_f^*$  a v jeho důsledku i  $m_p^*$  a tlak  $p$ . Regulátor turbíny změní  $m_p^*$  tak, aby udržel konstantní tlak  $p$ . Změna zdvihu  $\xi$  vytvoří regulační odchylku  $e_\xi$  a regulátor opraví žádanou hodnotu tlaku  $p_w$  tak, aby odchylka  $e_\xi$  konvergovala k nule.

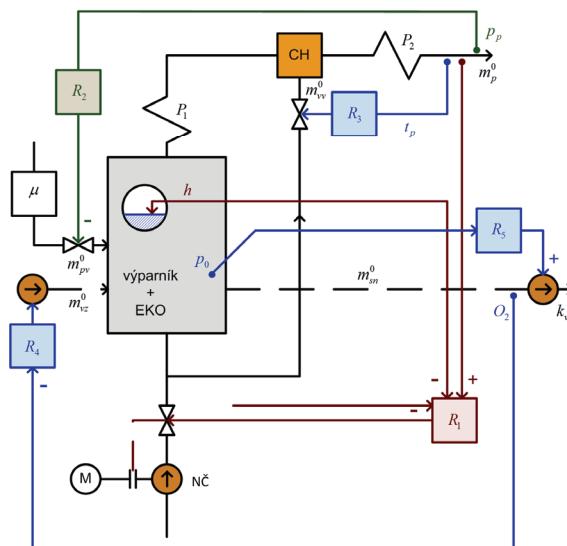
## 2.11. Některé regulační obvody

Parogenerátory bubnové či průtočné koncepce jsou z regulačního hlediska velmi složitá zařízení, na která se musí pohlížet jako víceparametrový objekt s více navzájem se ovlivňujícími vstupy a výstupy.

### 2.11.1. Regulace bubnových kotlů

Na standardním bubnovém kotli se zpravidla vyčleňuje 5 hlavních obvodů, jejichž správná funkce je pro provoz limitujícím faktorem. Nejjednodušší struktura a výčet těchto obvodů je na obr. 2.40.

Regulační obvody kotle



- |                                   |                               |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1. Regulace hladiny               | $m_{pv}^* \rightarrow h$      |
| 2. Regulace výkonu                | $m_p^* \rightarrow P_2$       |
| 3. Regulace teploty příhřaté páry | $m_{pv}^* \rightarrow t_p$    |
| 4. Regulace jakosti spalování     | $m_{vz}^* \rightarrow \alpha$ |
| 5. Regulace podtlaku v ohništi    | $m_{in}^* \rightarrow P_0$    |

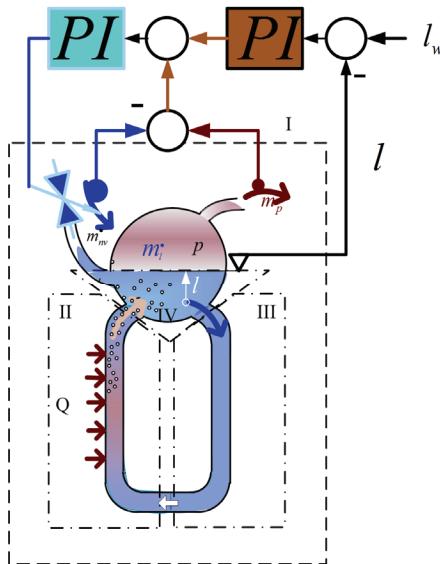
Obr. 2.40: Struktura regulace bubnového kotle

## Obvod regulace napájení

Zajišťuje bezpečný provoz kotle vyrovnanou bilanci dodávky napájecí vody s generací páry dle podmínky ustáleného stavu:

$$m_{nv}^* = m_p^* \quad (2.62)$$

Ukazatelem této bilance je hladina vody v bubnu, jejíž dynamika vykazuje nestabilní chování. Zvýšení přítoku napájecí vody  $m_{nv}^*$  by odpovídalo adekvátní zvýšení hladiny, ale v důsledku ochlazení parních bublinek, obsažených ve směsi páry a vody pod hladinou, se naopak hladina sníží a teprve po eliminaci bublinek dochází k nárůstu hladiny. Při snížení přítoku dochází k analogickému jevu s počátečním zvýšením hladiny a následný pokles hladiny. Pro eliminaci těchto jevů byla zkonstruována struktura tříimpulsové regulace (obr. 2.41), ve které se vedle hladiny snímají průtoková množství páry i vody a zpracovávají v sofistikovaném regulátoru napájecí vody.



Obr. 2.41: Tříimpulsové schema regulace hladiny v bubnu

## Obvod regulace výkonu

Zajišťuje vyrovnanou energetickou bilanci mezi tokem paliva  $m_f^*$  a tokem páry  $m_p^*$ . Indikátorem této bilance je tlak admisní páry a akční veličinu určuje regulační program. (řízení toku paliva nebo páry)

## Obvod regulace teploty přehřáté páry

Cílem tohoto obvodu je udržování teploty přehřáté páry v zadaných mezích. Teplota páry se nemění, pokud se nemění poměr přírůstku entalpií dle vztahu:

$$\Delta \tilde{h} = \frac{\Delta h_o + \Delta h_v + \Delta h_p}{\Delta h_p} = \text{konst} \quad (2.63)$$

$h_0$  ..... entalpie ohříváku napájecí vody

$h_v$  ..... entalpie výparníku

$h_v$  ..... entalpie výparníku

Tento poměr se udržuje:

- změnou tepelných příkonů (například spalin) do těchto částí
- vstřikem napájecí vody do přehříváku

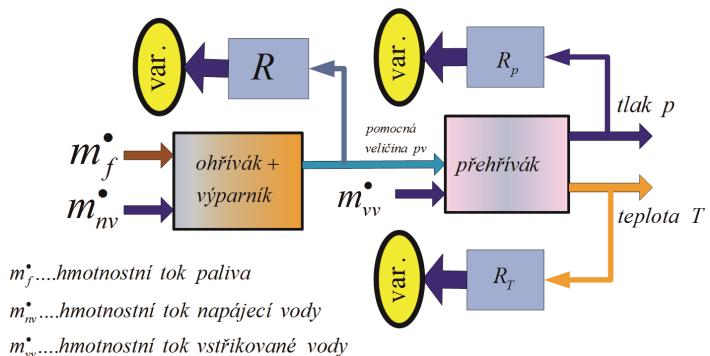
### Obvod regulace kvality spalování

Kvalita spalování a s ní související emise škodlivých látek do ovzduší jsou předmětem ekologického hodnocení provozu elektrárny. Cílem obvodu regulace kvality spalování je proto zajistit optimální podmínky pro spalovací podmínky s minimálními emisemi. Přibližně se dají zajistit poměrem palivo-vzduch  $m_f^* / m_{vz}$  nebo poměrem pára-vzduch  $m_p^* / m_{vz}$  a podrobněji optimální hodnotou přebytku spalovacího vzduchu  $\alpha = m_{vz}^* / m_{vz,\text{teor}}$ , jemností uhelného prášku, či podtlakem spalin v ohništi.

### Obvod regulace podtlaku v ohništi

Tlak ve standardním ohništi je třeba udržovat nižší než je tlak v okolí. U přetlakových ohnišť tento problém odpadá.

#### 2.11.2. Regulace průtlačných kotlů



Obr. 2.42: Zjednodušená struktura regulace průtočného kotle

Při návrhu regulace průtočného kotla je důležité vybrat vhodnou variantu dle tab. 2.7.

regulovaná veličina	akční veličina varianty 1	akční veličina varianty 2
teplota páry $T_p$	tok napájecí vody $m_{nv}^*$	tok paliva $m_f^*$
tlak $p$	tok paliva $m_f^*$	tok napájecí vody $m_{nv}^*$

**Tab. 2.7: Akční veličiny**

Tab. 2.7 také označuje místo zapojení výstupu jednotlivých regulátorů, které je ve schématu obecně naznačeno zkratkou var.

Obvykle se pro zlepšení dynamiky volí struktury rozdělující regulovaný objekt na dílčí obvody s výběrem pomocné regulované veličiny  $pv$  například:

- teplota páry za výparníkem
- tlakový spád na výparníku
- rozdíl hmotnostních průtoků páry a vody

### 2.11.3. Regulace parních turbín

Výkon parní turbíny závisí na hmotnostním průtoku páry a entalpickém spádu dle vztahu:

$$N_T = m_p^* h_{ad} \eta_T \quad (2.64)$$

$N_T$  ..... mechanický výkon na spojce turbíny

$m_p^*$  ..... hmotnostní průtokové množství páry turbínou

$\eta_T$  ..... spojková termodynamická účinnost

Základní veličinou s nevyšší citlivostí a řiditelností na regulaci výkonu  $N_T$  je hmotnostní průtokové množství páry  $m_p^*$ , které je, analogicky jako proud u Ohmo-va zákona, přímo úměrná tlakovému spádu na turbíně (napětí) a nepřímo úměrná hydraulické impedance, která nepřímo úměrně závisí na průtokovém průřezu  $A_T$ . Dle těchto závislostí lze změnu  $m_p^*$  realizovat těmito způsoby:

- změnou tlakového spádu na turbíně
- změnou hydraulické impedance turbíny
- obtokem části turbíny

Pro poměrný průtok části turbíny  $\tilde{m}_p^* = m_p^* / m_{pb}^*$  platí zákon kužele:

$$\tilde{m}_p^* = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{(p_{1b}^2 - p_{2b}^2)\Gamma_1}} \quad (2.65)$$

kde

1,2..... indexy vstupu a výstupu

b..... index pro označení bázové (vztažné) veličiny

p..... tlak

$$\tilde{T}_1 = T_1 / T_{lb} \text{ poměrná vstupní teplota}$$

Jedná-li se o kondenzační turbínu, u které  $p_2 = p_e \rightarrow 0$ , a za předpokladu malých změn teploty tedy přibližně  $\tilde{T}_1 = 1$  platí:

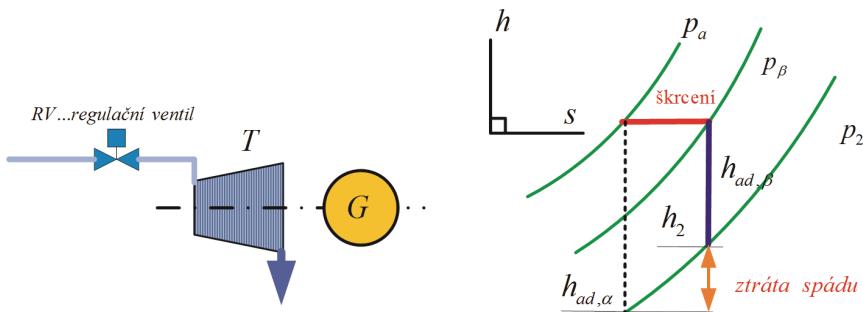
$$\tilde{m}_p^\bullet = \tilde{p}_1 = \tilde{p}_a \quad (2.66)$$

Tento výraz dokumentuje přímou závislost průtokového množství na vstupním tlaku, který také současně při zanedbatelně malém výstupním tlaku reprezentuje tlakový spád. Změna vstupního tlaku se realizuje škrcením v regulačním ventilu.

### Regulace škrcením

Škrcení je ztrátový regulační proces, při kterém se zmenšením průtokového průřezu regulačních (škrťicích) ventilů zvýší jejich hydraulický odpor a tím i tlaková ztráta daná rozdílem tlaků mezi vstupem a výstupem ventilů:

$$\Delta p_r = p_{a\alpha} - p_{a\beta} \quad (2.67)$$

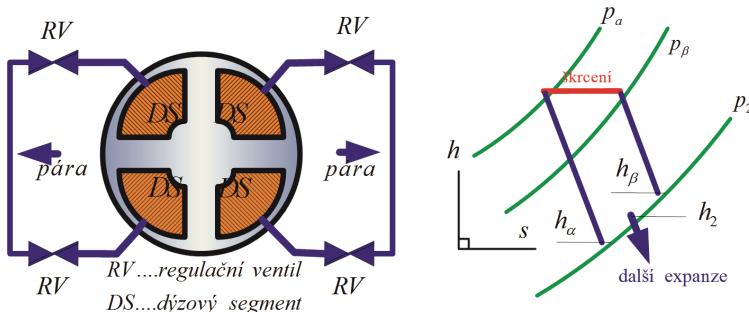


Obr. 2.43: Regulace výkonu turbíny škrcením

V důsledku zvýšení  $\Delta p_r$  se při konstantní entalpii sníží tlak ze vstupního  $p_{a\alpha}$  na  $p_{a\beta}$  a tím i adiabatický spád z  $h_{ad,\alpha}$  na  $h_{ad,\beta}$  a částečně i průtok páry  $m_p^\bullet$  a účinnost  $\eta_T$ .

## Skupinová regulace

Změna průtokového průřezu  $A_T$  by se pro zachování charakteru průtoku měla provádět spojité v každém turbínovém stupni, což však není konstrukčně dobře proveditelné, a proto se mění průřez nespojité bud' jen na vstupu turbíny ve speciálním regulačním stupni, nebo vpouštěním páry do jednotlivých dýzových segmentů, ve kterých dochází ke škrcení jen u části páry. Při skupinové regulaci se mění průtokový průřez v regulačním stupni umístěném na začátku turbíny. U tohoto stupně je vstup páry do turbíny strukturován do několika dýzových segmentů rozmištěných po obvodu a majících své regulační ventily RV, které mění průtokový průřez tím, že mohou zaujmout libovolnou polohu mezi úplným otevřením a úplným zavřením.



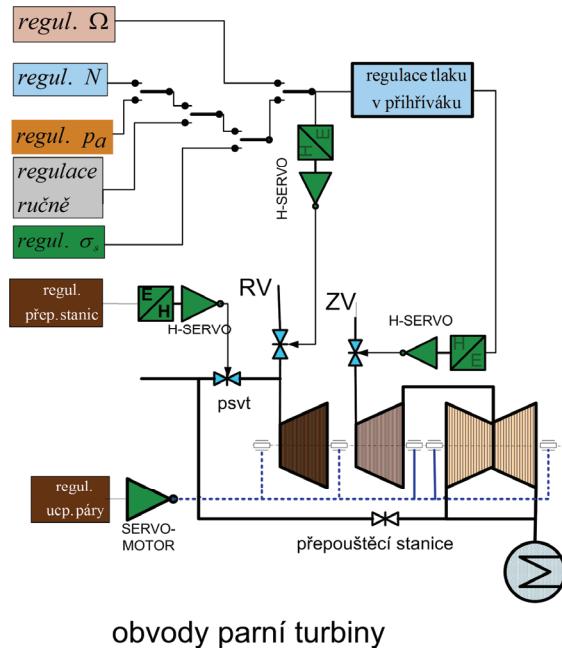
Obr. 2.44: Skupinová regulace výkonu parní turbíny

Je-li ventil v mezipoloze mezi koncovými polohami, dochází v něm ke škrcení. Situaci ilustruje případ dvou virtuálních segmentů  $\alpha$  a  $\beta$ , ve kterém RV segmentu  $\alpha$  je plně otevřen a RV segmentu  $\beta$  je v mezipoloze. U segmentu  $\alpha$  expanduje nezmenšené množství  $m_\alpha^\bullet$  z tlaku  $p_a$  na společný výstupní tlak  $p_2$  a u segmentu  $\beta$  snížené množství  $m_\beta^\bullet$  a škrcením sníženého tlaku  $p_\beta$ . Obě množství se na výstupu regulačního stupně smísí na výslednou entalpii dle vztahu:

$$h_2 = \frac{m_\alpha^\bullet h_\alpha + m_\beta^\bullet h_\beta}{m_\alpha^\bullet + m_\beta^\bullet} \quad (2.68)$$

Po smísení obou průtočných množství expanze pokračuje standardním způsobem v dalších stupních turbíny.

## Struktura regulačních obvodů turbíny



obvody parní turbíny

Obr. 2.45: Struktura regulačních obvodů parní turbíny

Strukturu základních regulačních obvodů parní turbíny a strukturu logických bloků řízení polohy ventilu v nestandardních situacích dokumentuje obr. 2.45. Základní akční veličinou je zdvih ventilu řídící hmotnostní průtok páry turbínou, který je ve standardním režimu řízen dle regulačního programu.

## 2.12. Literatura

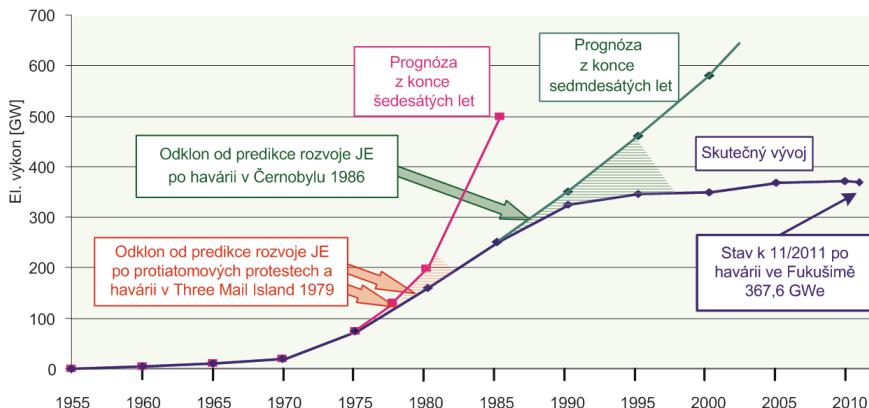
- [1] Klaus Heuck - Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab - Elektroenergiesysteme Springer 2007
- [3] Herbert Windisch - Termodynamik OldenbourgVerlag Mochlen 2008
- [4] R.A.Zahoransky - Energietechnik. Wieweg+Teubner 2009
- [5] P.Kundur. Power System Analysis and Control. Mc.Graw Hill 1999.
- [6] D. Lindsley - Power Plant Control and Instrumentation. 2005 The Institution of Electrical Engineers, London,UK.
- [7] A.K.Raja - Power Plant Engineering. 2006. New Age International (P) Ltd., Publishers
- [8] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)
- [9] S.Bouček, A.Dočkal - Elektrárny II. Skripta ČVUT 1995
- [10] M.Cipra, J.Salaba, J.Šťastný - Energetická strojní zařízení. Skripta ČVUT 1981
- [11] B.Janeba - Regulace a automatizace turbosoustrojí. Skripta ČVUT 1983.

### 3. Jaderné elektrárny

Energetické koncepce velké většiny států včetně ČR počítají s rostoucí spotřebou elektrické energie, největší trend vzrůstu její výroby bude u ekonomicky rychle rostoucích zemí, především v Asii, Jižní Americe a Severní Africe. Svou roli hraje i populární rozvoj. To zákonitě vyvolá potřebu výstavby dalších zdrojů energie, především elektráren a tepláren. Zásoby ekonomicky výhodných fosilních zdrojů jsou však v současné době odhadovány na několik desítek až stovek let. Vzhledem k budoucnosti je proto nutné hledat a rozvíjet nové zdroje a efektivnější způsoby výroby tepelné a elektrické energie a zvyšovat účinnost jejího transportu a spotřeby.

Jednou z relativně nových forem využitelné energie, kterou se během posledních šedesáti let podařilo zvládnout, je energie jaderná. Ta by zřejmě po dořešení technologických problémů rychlých množivých reaktorů a především zvládnutím jaderné fúze odsunula pomyslnou hranici vyčerpání neobnovitelných energetických zdrojů do nedohledna.

V posledních letech však prožívá jaderná energetika určitou krizi. Přes rychlý poválečný rozvoj, příznivé prognózy a euporii šedesátých a sedmdesátých let probíhá od druhé poloviny osmdesátých let útlum jejího rozvoje, nejprve v USA a později i v Evropě. Jedním z hlavních důvodů je reakce veřejnosti na havárie jaderných elektráren (Three Mile Island, Černobyl a Fukušima), ty jsou zřejmě z obr. 3.1. Proč tomu tak je, když negativní dopady jejich provozu na životní prostředí na jednotku vyrobené energie jsou podle nezaujatých komparačních studií v porovnání s většinou ostatních zdrojů ve většině parametrů podstatně nižší a důsledky některých ekologických katastrof jsou přinejmenším srovnatelné (Bóphál, aj.)? Důvody souvisí především se specifikem jaderných elektráren ve vztahu k ostatním zdrojům elektrické energie, s obavou obyvatel (a jejím častým zneužíváním) z následků havárií a následným únikem radioaktivních prvků, s nakládáním s radioaktivním „vyhořelým“ palivem i s odpady vzniklými během provozu a zpracování, či přepracování jaderného paliva. Svou úlohu hraje i nebezpečí zneužití radioaktivních i štěpitelných produktů pro vojenské a teroristické účely.



Obr. 3.1: Predikovaný a skutečný instalovaný výkon v provozovaných JE.  
Data o celkovém instalovaném výkonu převzata z databáze PRIS.

Ve vyspělých zemích vzrůstá v současnosti tlak na přehodnocování energetické situace a snižování finančních prostředků na výzkum i výstavbu jaderných zařízení. Na druhé straně významně vzrostly investiční náklady na stavby nových elektráren, především díky náročnějším podmínkám pro udělování licencí. Svou roli sehrála i nasycenosť optimálního podílu jaderných elektráren v elektrizačních soustavách některých států, omezení vývozu jaderných technologií do krizových oblastí a v neposlední řadě i lobby ostatních výrobců elektrické energie, která tuto situaci využila. Snížení finančních prostředků mj. poznamenalo negativně i vývoj moderních typů reaktorů včetně předpovídáných zdrojů příštího tisíciletí - termo-nukleárních reaktorů.

Jaderná energetika bude obecně akceptována až její příznivci prokáží převedení jejich pozitiv nad negativy. Současně však musí navrhnut i její oponenti proveditelné alternativy s bezpečnějšími, realizovatelnými a ekonomickými zdroji energie, které uspokojí budoucí poptávku a nebudou neúměrně zatěžovat rozpočet domácností. Společným cílem obou stran musí být udržitelný rozvoj na naši planetě.

Omezený rozsah dovoluje prezentovat jen základní informace z oblasti jaderné energetiky. Poměrně rozsáhlá část týkající se elementárních fyzikálních základů je uvedena pro usnadnění pochopení problematiky týkající se provozu jaderných elektráren a v tomto smyslu je doplněna o názorné příklady.

Vzhledem k tomu, že v ČR jsou instalovány a v perspektivě příštích desetiletí i plánovány jen jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory a také ve světě je v současnosti většina provozovaných, stavěných i projektovaných elektráren tlakovodních, je i obsah kapitoly zaměřen především na tento typ, speciálně na jejich primární část.

### 3.1. Specifika jaderné elektrárny

V jaderných elektrárnách se využívá tepelná energie vznikající při řízené nukleární (jaderné) reakci. Dosud je zvládnuta a využívána pouze řízená štěpná reakce, na bezpečném zvládnutí řízené termojaderné reakce (termojaderné syntézy), která by prakticky vyřešila problematiku energetických zásob, se intenzivně pracuje v řadě výzkumných pracovišť. Termojadernou syntézu se k výrobě energie bohužel podařilo využít resp. zneužít pouze spontánně – v tzv. vodíkové bombě.

Jaderné elektrárny vyrábí tepelnou a z ní elektrickou energii zcela odlišným způsobem než klasické tepelné elektrárny, kde teplo získáváme chemickou exotermickou reakcí - oxidací zejména fosilních paliv. Kromě principu tepelného zdroje jsou zde i další podstatné rozdíly:

- „Palivo“ pro výrobu tepla na určité období (kampaň) je prakticky ve všech jaderných elektrárnách umístěno v reaktoru, oproti kontinuální dodávce zvenku u tepelných elektráren.
- Koncentrace energie v palivu na jednotku hmotnosti je v jaderných elektrárnách podstatně vyšší. Z 1 kg hnědého uhlí vytváří tepelná elektrárna asi 1 kWh elektrické energie. Jaderná elektrárna s tlakovodními reaktory vytváří z 1 kg jaderného paliva přibližně 1 GWh, tj. asi  $10^6$  krát více. Srovnáme-li množství vytěžené horniny, jsou tyto poměry vzhledem k nízkému obsa-

hu uranu v rudách podstatně mírnější, přesto opět vypovídají ve prospěch jaderných elektráren. Na jednotku vyrobené energie je třeba u tepelných elektráren vytěžit řádově 10 až 100krát více horniny (včetně hlušiny) než pro jaderné.

- Při štěpných reakcích vznikají radioaktivní izotopy s různě dlouhými polohy rozpadu, tzn., že s palivem, ani se zařízením, které se nacházelo v okolí štěpné reakce, nelze volně nakládat několik desítek až milionů let a po celou tu dobu musí být zabezpečeno proti úniku škodlivého záření a možnému zneužití.
- V jaderných reaktorech nelze skokem přerušit vývin tepla, neboť i po „odstavení“ reaktoru, dochází v aktivní zóně k reakcím (rozpadům), doprovázeným vývinem tepelné energie. Např. tlakovodní reaktory produkují ještě minutu po odstavení víc než 1 % původně generované tepelné energie. To je např. u reaktoru v elektrárně Temelín 30 MW<sub>t</sub>, které je potřeba bezpečně odvést tak, aby nedošlo k varu chladiva, přehřátí palivových elementů v aktivní zóně a porušení jejich pokrytí spojeným s únikem radioaktivního materiálu.
- Odvod zbytkového tepla po odstavení reaktoru lze zpravidla provést jen prostřednictvím tepelných výměníků. To je jedním z důvodů, proč je v jaderných elektrárnách více chladicích smyček (okruhů, ve kterých se předává teplo z reaktoru směrem k turbínám). Tímto opatřením se podstatně zvyšuje spolehlivost odvodu tepla z reaktoru při poruše na technologickém zařízení chladicího okruhu.
- Během kampaně reaktoru, tj. provozu s jednou vsázkou, se mění struktura paliva - snižuje se obsah štěpitelné složky (tzv. vyhořívání). Tento stav je s ohledem na povolené rozsahy regulačních, řídicích a bezpečnostních orgánů reaktoru nutné průběžně kompenzovat množstvím absorbátoru v aktivní zóně.
- Poměrně strmé teplotní spády mezi palivem a chladivem, s tím spojená možnost poškození palivových elementů nebo jejich pokrytí a úniku radioaktivních štěpných produktů.
- Technicky, technologicky i ekonomicky náročnější palivový cyklus, tj. cesta paliva od těžby až po ukládání nebo přepracování vyhořelých palivových článků.
- Absence škodlivin CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> a SO<sub>2</sub> vypouštěných do ovzduší.

## 3.2. Základy jaderné fyziky

Procesy probíhající v mikrosvětě elementárních částic, sil a interakcí jsou značně složité a některé zatím prakticky neprokázané, i když na jejich objasnění pracuje řada pracovišť. Pro snadnější pochopení těchto procesů jsou proto vytvářeny zjednodušené modely a vztahy, kterými se je vědci snaží popsat tak, aby co nejvíce odpovídaly poznaným zákonitostem. Také zde budeme vycházet ze zjednodušených ale obecně používaných vztahů.

## Atomové jádro základní pojmy

- **Atomové jádro** - centrální část atomu (průměr jádra je řádově  $10^{-15}$  až  $10^{-14}$  m). U prvků (kromě atomu vodíku H<sub>2</sub>) je složeno z neutronů a protonů.
- **Neutron** - bez elektrického náboje
- **Proton** - jednotkový elektrický náboj – tzv. elementární náboj  $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$  C
- **Nukleony** - souhrnný název pro protony a neutrony
- **Hmotnostní číslo A** (nukleonové) - součet protonů a neutronů v atomovém jádře
- **Atomové číslo Z** (protonové) - počet protonů v atomovém jádře
- **Neutronové číslo N** - počet neutronů v jádře
- **Hmotnostní číslo** určuje fyzikální vlastnosti příslušného prvku, atomové číslo určuje chemické vlastnosti prvku a pořadí v periodické tabulce.
- Zápis:  ${}^A_Z X$ ,  ${}^A X$ , XA. (např.  ${}^{235}_{92} U$ ,  ${}^{235} U$ , U235).
- **Atomová jednotka hmotnosti - u** (1 u = 1 / 12 klidové hmotnosti neutrálního atomu nuklidu uhlíku C12 v základním stavu).
- $1 \text{ u} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- **Izotopy** - prvky mající stejná atomová čísla Z, ale odlišná hmotnostní čísla A (stejný počet protonů v jádře (v základním stavu i elektronů v obalu)), ale odlišný počet neutronů, **mají tedy shodné chemické, ale rozdílné fyzikální vlastnosti**.

proton	$1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	1,007277 u
neutron	$1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	1,008665 u
elektron	$9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	0,000548 u

Tab. 3.1: Klidové hmotnosti základních částic

V přírodě se vyskytují prakticky izotopy všech prvků. V současnosti klíčový prvek jaderné energetiky - uran, je v přírodním stavu složen ze tří izotopů: U238 (99,282 %), U235 (0,712 %) a U234 (0,006 %).

## Jaderné síly

V oblasti atomového jádra působí síly, z nichž nejdůležitější jsou elektrostatické (Coulombovy) síly a jaderné síly. **Gravitační síly** mezi nukleony jsou v tomto mikrovsvětě oproti ostatním prakticky zanedbatelné.

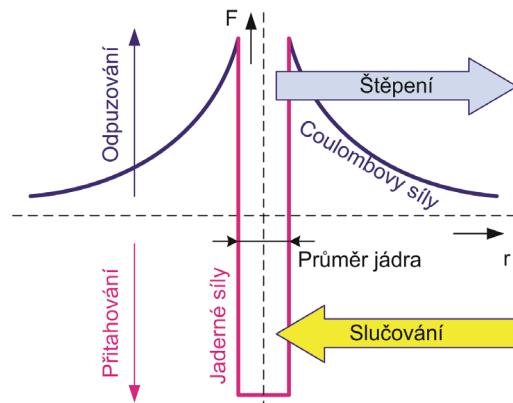
**Elektrostatické síly.** Působí na nukleony s elektrickým nábojem, řídí se Coulombovým zákonem a jejich velikost je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti nabitéch částic. Jsou přibližně  $10^{35}$  až  $10^{36}$  krát větší než síly gravitační. V atomovém jádře, kde vzdálenosti mezi kladně nabitými protony jsou řádově do  $10^{-15}$  m, působí jako poměrně silné **odpudivé síly**. Celková velikost elektrostatických sil závisí na počtu protonů i neutronů v jádře a na jejich vzájemném poměru. S rostoucím počtem neutronů (obecně i nukleonů) v jádře klesá poměrná elektrostatická síla vztažená na jednotlivé protony.

**Jaderné síly.** Nezávisí na elektrickém náboji nukleonů a působí pouze v oblasti atomového jádra. Mají tedy omezený dosah a celkově jsou o dva až tři řády větší než síly elektrostatické. V jaderné fyzice se zpravidla uvažuje existence dvou jaderných sil - slabé a silné.

**Slabé jaderné síly.** Řídí procesy radioaktivního rozpadu jader. Uplatňují se např. při rozpadu neutronů v jádře na proton, elektron a elektronové antineutrino. Jejich dosah je řádově  $10^{-16}$  m. Jsou slabší než síly elektrostatické, ale přibližně  $10^{25}$ krát silnější než síly gravitační.

**Silné jaderné síly.** Mají omezený dosah, řádově  $10^{-15}$  m. **Působí pouze do vzdálenosti odpovídající rozměrům atomového jádra, potom klesají k nule.** V oblasti jádra jsou silami **přitažlivými**, přibližně 100 až 1000krát většími než odpudivé elektrostatické síly a o 13 řádu silnějšími než slabé jaderné síly. Především díky silným jaderným silám (interakcím) je drženo atomové jádro pohromadě.

Zidealizovaný průběh součtu jaderných a elektrostatických sil v závislosti na vzdálenosti od pomyslného středu jádra nám ukazuje oblast o poloměru menším než  $10^{-15}$  m, kde převládají silné jaderné síly. Výslednice sil zde tvoří tzv. **potenciálovou jámu**. Její poloměr je v některé odborné literatuře uváděn jako definice poloměru jádra. Za hranicí tohoto poloměru prakticky vymizí potenciál přitažlivé jaderné síly a zůstává jen elektrostatická Coulombova síla asymptoticky klesající k nule. Chceme-li jádro rozdělit musíme překonat silné jaderné síly a naopak při skládání jádra musíme překonat Coulombovy odpudivé síly a dostat nukleony do oblasti působení silných jaderných sil.



Obr. 3.2: Potenciálová jáma

## Vazební energie jádra

Při přesných měření bylo zjištěno, že klidová hmotnost atomového jádra všech známých prvků i jejich izotopů je menší, než součet hmotností jednotlivých nukleonů. Tento rozdíl nazývaný **hmotnostní schodek** (defekt), lze vysvětlit pomocí Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií. Při vzniku jádra z volných nukleonů je vykonána kladná práce, která se projeví úbytkem celkové energie soustavy. Stejnou energii je jádru třeba dodat, chceme-li soustavu opět rozložit na volné nukleony. Tuto energii nazýváme **vazební energie jádra**. Vazební energie jádra je u stabilních prvků kladná, čím vyšší vazební energie, tím je prvek stabilnější.

Pro hmotnostní schodek jádra platí:

$$\Delta m_j = Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_j \text{ (kg)} \quad (3.1)$$

kde

$Z$  ..... protonové číslo (-)

$N$  ..... neutronové číslo (-)

$m_p$  ..... klidové hmotnosti protonu (kg, u)

$m_n$  ..... klidové hmotnosti neutronu (kg, u)

$m_j$  ..... celková hmotnost jádra (kg, u)

Aplikací Einsteinova vztahu mezi hmotností a energií lze z hmotnostního schodku, který je pro všechny nuklidu kladný, vypočítat vazební energii jádra:

$$W\Delta m_j = \Delta m_j \cdot c^2 \text{ (J, kg, ms}^{-1}\text{)} \quad (3.2)$$

Dosadíme-li v této rovnici za kilogramy a Jouly jednotky obvyklé v jaderné fyzice, tj. atomové hmotnostní jednotky (u) a megaelektronvolty (MeV), pro které platí převodní vztahy:

$$1u = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg a } 1 \text{ MeV} = 1,60219 \cdot 10^{-13} \text{ J}, \quad (3.3)$$

dostaneme při rychlosti světla ve vakuu  $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$  jednoduchý vztah určující vazební energii odpovídající hmotnostnímu schodku ve tvaru:

$$W\Delta m_j = 931,5 \cdot \Delta m_j \text{ (MeV, u)} \quad (3.4)$$

Podíl vazební energie jádra a hmotnostního (nukleonového) čísla se nazývá **nukleonová vazební energie –  $e\Delta m_j$**

$$e\Delta m_j = W\Delta m_j / A \text{ (MeV)} \quad (3.5)$$

**Nukleonová vazební energie** (v literatuře též zvaná střední, nebo průměrná vazební energie) není konstantní. Přibližně do hodnoty  $A = 20$  prudce stoupá s po-

měrně velkým rozptylem hodnot, v úseku mezi  $A = 30$  a  $A = 150$  je téměř plochá s maximem okolo  $A = 60$  kde  $e\Delta m_j = 8,8$  MeV a potom s rostoucím  $A$  pozvolna, téměř lineárně, klesá k hodnotě  $e\Delta m_j = 7,6$  MeV.

Bude-li součet vazebních energií nově vzniklých jader větší, než vazební energie původních, lze této vlastnosti využít pro získání energie. Při štěpení jádra s vazební energií  $W\Delta m_j$  na dva odštěpky s vazebními energiemi jader  $W\Delta m_{j1}$  a  $W\Delta m_{j2}$ , resp. s nukleonovými vazebními energiemi  $e\Delta m_{j1}$  a  $e\Delta m_{j2}$ , se uvolní energie:

$$W_s = W\Delta m_{j1} + W\Delta m_{j2} - W\Delta m_j = e\Delta m_{j1} \cdot A_1 + e\Delta m_{j2} \cdot A_2 - e\Delta m_j \cdot A$$

$$(\text{MeV}) \quad (3.6)$$

Při syntéze (fúzi) dvou jader s vazebními energiemi  $W\Delta m_{jI}$  a  $W\Delta m_{jII}$ , resp. s nukleonovými vazebními energiemi  $e\Delta m_{jI}$  a  $e\Delta m_{jII}$ , na nové jádro s energií  $W\Delta m_j$  se uvolní energie:

$$W_f = W\Delta m_j - W\Delta m_{jI} - W\Delta m_{jII} = e\Delta m_j \cdot A - e\Delta m_{jI} \cdot A_I - e\Delta m_{jII} \cdot A_{II}$$

$$(\text{MeV}) \quad (3.7)$$

Pro oba dva vztahy platí:

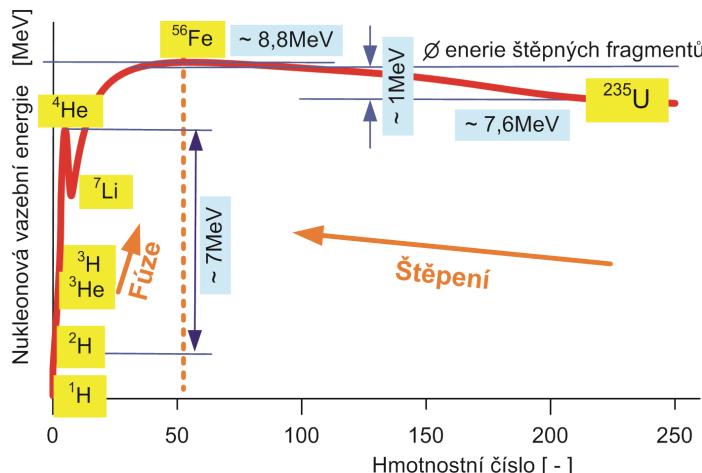
$$A = A_1 + A_2 = A_I + A_{II} \quad (3.8)$$

Tento proces si lze pro názornost představit ve dvou fázích:

- totální rozložení původních jader na volné nukleony - k tomu je třeba **dat** vazební energii původních jader
- složení nových jader, přičemž se **uvolní** energie odpovídající součtu vazebních energií nově vzniklých jader

Např. při rozštěpení uranu U235 na dva odštěpky s hmotnostními čísly  $A_1$  a  $A_2$  v rozmezí 75 až 160 se zvýší nukleonová vazební energie asi o 1 MeV, tzn., že celková uvolněná energie na jedno štěpení je přibližně 230 MeV. Podobně u syntézy tritonu s protonem vodíku za vzniku izotopu helia se uvolní energie:  $H_3 + H_1 = He4 + 19,81$  MeV (vazební energie tritia  $H_3$  je 8,482 MeV a helia  $He4$  je 28,296 MeV)

Lze tedy konstatovat, že jadernou energii můžeme získat reakcemi při nichž vznikají středně těžká jádra buď štěpením velmi těžkých jader, nebo syntézou velmi lehkých jader. Jadernou energii lze také definovat jako část vazební energie uvolněné při jaderných interakcích na úkor hmotnostního úbytku.



Obr. 3.3: Nukleonová vazební energie

### Radioaktivní přeměny

Jádra některých izotopů jsou nestabilní, bez příspěvku vnější energie se mění a uvolňují přitom hmotné elementární částice nebo fotony - dochází u nich k tzv. **radioaktivnímu rozpadu** – radioaktivitě prvku. V přírodě se nachází především radioaktivní prvky s vysokými atomovými čísly, uměle lze vytvořit radioaktivní izotopy většiny prvků.

Za předpokladu, že radioaktivita je statistický děj, lze jí popsat dif. rovnicí:

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda \cdot n \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (3.9)$$

kde

$n$  ..... počet původních atomů daného radionuklidu v čase  $t$  (s)

$\lambda$  ..... rozpadová nebo přeměnová konstanta ( $s^{-1}$ )

Řešením dostaneme rovnici popisující zákon radioaktivního rozpadu:

$$n(t) = n_{(0)} \cdot e^{-\lambda t} \quad (3.10)$$

V praxi se často používá termín **poločas rozpadu** -  $T_{1/2}$ , je to střední doba, za kterou se z počátečního počtu atomů daného radionuklidu samovolně přemění právě polovina. Z předcházející rovnice vyplývá pro poločas rozpadu:

$$0,5 \cdot n_{(0)} = n_{(0)} \cdot e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow 2 = e^{\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = \underline{0,693 / \lambda} \text{ (s)} \quad (3.11)$$

Nově vzniklé nuklidu mohou být opět radioaktivní a jejich rozpad může pokračovat s novou přeměnovou konstantou.

## Nejčastější radioaktivní rozpady

- 1) **Rozpad  $\alpha$**  - probíhá u většiny přirozených radioaktivních prvků, je charakteristický hlavně pro těžké prvky. Při tomto rozpadu je z jádra radioaktivního prvku uvolněn helion ( jádro helia), nazývaný též částice  $\alpha$ , o klidové hmotnosti  $m_A = 6,656 \cdot 10^{-27}$  kg a s dvojnásobným kladným elementárním nábojem. Energie částice leží mezi 4 MeV a 9 MeV, přičemž vyšší energie přísluší rychlejším přeměnám. Počáteční rychlosť částice je vysoká, ale brzy se sníží ionizováním prostředí a rozptylem. Záření je tedy málo pronikavé a je potlačeno např. již listem papíru. Při rozpadu se mění hmotnostní i atomové číslo a vzniká nový prvek, např.:  
$$^{233}\text{U} \rightarrow {}^4\alpha + {}^{229}\text{Th} \quad (3.12)$$

- 2) **Rozpad  $\beta$**  rozdělujeme na rozpad  $\beta^-$ , kdy je z jádra vystřelen záporný elektron a na rozpad  $\beta^+$ , kdy je z jádra vystřelen kladný pozitron.
- 3) **Rozpad  $\beta^+$**  provází přirozené radioaktivní prvky s nadbytkem neutronů a je obvykle provázen zářením gama. Hmotnostní číslo po rozpadu  $\beta^-$  zůstává stejné, neboť hmotnost se úbytkem elektronu změnila jen nepatrně. Vzroste však atomové číslo o 1, protože přibyl další proton, a tak vlastně vznikl nový prvek. Záření  $\beta^-$  je pronikavější než záření  $\alpha$ , svojí počáteční energií snižuje především ionizací prostředí, rozptylem a brzdňím záření. Je pohlceno např. silným hliníkovým plechem. Jako příklad si lze uvést rozpad tritia na helium:



- 4) **Rozpad  $\beta^+$**  doprovází umělé radioaktivní prvky s přebytkem protonů o vysoké energetické hladině. Ke vzniku pozitronů je potřeba poměrně vysoká energie  $> 1,02$  MeV, o kterou musí poklesnout energie původního jádra. Vystřelený pozitron po zpomalení reaguje s elektronem a vyzáří se dvě kvanta gama záření o celkové energii 1,02 MeV. Také rozpadem  $\beta^+$  vznikne nový prvek, neboť v jádru dochází k přeměně protonů na neutron o nižší energetické hladině a tedy ke snížení atomového čísla o 1. Jako příklad lze uvést transmutaci izotopu dusíku na uhlík:



- 5) **Záření  $\gamma$**  - nastává u vybuzených jader při přeskupování nukleonů s různými energetickými hladinami vyzářením fotonu z jádra. Nemá vliv na atomové ani hmotnostní číslo. Toto záření často doprovází rozpad  $\alpha$  i  $\beta$ . U těžkých jader má kaskádovitý charakter a vytváří složité spektrum. Je to elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou, řádově  $10^{-11}$  až  $10^{-13}$  m. Je velmi pronikavé, k jeho utlumení je třeba silné vrstvy prvků s vysokými hmotnostními čísly (ollovo).

- 6) **Zachycení elektronu jádrem** - nastává u jader s přebytkem protonů o nižších energiích. Jádro zachytí elektron zpravidla z nejnižší sféry K, proto se této transmutaci říká zachycení K. Výjimečně dochází i k zachycení elektronu z vyšších sfér, potom jde o zachycení L, M, ... Na uvolněné místo přejde elektron z nižší sféry, přičemž se uvolní energie ve formě roentgenova záření.
- 7) **Neutronová emise** - vyskytuje se pouze v rozpadových řetězcích, kde vazební energie nově vzniklého vybuzeného jádra nestačí k udržení neutronu. Touto emisí se snižuje hmotnostní číslo o jedničku, atomové číslo se nemění. Neutronová emise je zdrojem tzv. zpožděných neutronů velmi důležitých pro regulaci jaderného reaktoru. Jako příklad lze uvést častý rozpadový řetězec jodu vzniklého štěpením uranu, kdy po jeho  $\beta$ -rozpadu na xenon dochází k neutronové emisi:



### Jaderné reakce

Jadernými reakcemi nazýváme přeměnu atomového jádra vnějším působením elementárních částic nebo jiného jádra. Přeměnou jádra je myšleno vyslání částice z jádra, rozštěpení či roztríštění jádra a změna energetických hladin nukleonů.

Částice způsobující nejčastěji jadernou reakci jsou: protony, neutrony, alfa částice, deuterony a fotony. (Foton je tzv. polní částice, tedy částice s nulovou klidovou hmotností, ale nenulovým polem).

Jaderné reakce jsou poměrně těžko uskutečnitelné. Především vlivem malých rozměrů terčového jádra (asi  $10^{-15}$  m) vzhledem k rozměrům atomu je při ostřelování elementárními částicemi malá pravděpodobnost zásahu a také proto, že při požadované interakci kladně nabité částice (protonu) s jádrem nebo dvou jader vzájemně působí velmi intenzivně odpudivé Coulombovy síly způsobené souhlasným nábojem. Odpudivá síla je i u elementárních jader vodíku značná a za normálních podmínek nelze tuto jadernou reakci uskutečnit. Lze ji usnadnit zvýšením teploty prostředí na několik milionů stupňů, kdy kinetická energie jader je tak vysoká, že překoná elektrostatické síly a jádra se dostanou do takové blízkosti, kde začínají působit silné jaderné síly. Jaderná reakce uskutečněná za těchto podmínek se nazývá **termonukleární**.

Elektrostatické síly nepůsobí na částici bez náboje - neutron. Tomu stačí podstatně nižší energie k uskutečnění jaderné reakce než ostatním částicím. Neutronové jaderné reakce jsou z hlediska současné energetiky nejdůležitější.

Volné neutrony jsou radioaktivní, rozpadají se exotermicky s poločasem asi 12,8 minut na proton, elektron a antineutrino. Podle některých teorií jsou neutron a proton jen dva stavy téže částice, které říkáme **nukleon**. Neutrony dělíme podle energie kterou získají při jaderných interakcích na:

**Tepelné neutrony** (termální, pomalé) - mají energii do 0,5 eV, rychlosť řádově do  $10^4$  m/s a teplotu do 6000 K. Průměrné hodnoty pro celé spektrum tepelných neutronů jsou však podstatně nižší.

**Rychlé neutrony** - mají energii nad 0,5 MeV (asi do 17 MeV), rychlosť o řád nižší než rychlosť světla a teplotu řádově  $10^{10}$  K.

**Epitermální neutrony** - mají energii ležící mezi hodnotami pro tepelné a rychlé neutrony.

Neutron v jaderném reaktoru dosahuje okamžitě po štěpení U235 průměrné energie 2 MeV a, pokud není absorbován, klesá jeho energie až o osm řádů, než dojde k interakci s dalším jádrem U235, nebo k jeho rozpadu. V energetickém reaktoru je doba jeho „života“  $10^{-5}$  až  $10^{-4}$  s.

### Neutronové jaderné reakce

V jaderné energetice mají význam tyto reakce neutronu s jádrem: rozptyl, radiační (zářivé) zachycení a štěpení.

- 1) **Rozptyl** je nedestruktivní jaderná reakce, při níž se hmotná částice (v našem případě neutron) dopadající na atomové jádro buď přímo odrazí, nebo ji jádro zachytí a stejný druh částice uvolní. Počet nukleonů (hmotnostní číslo) se nemění. Podle typu reakce rozeznáváme pružný a nepružný rozptyl.
  - a) **Pružný rozptyl** lze popsat pomocí zákona o zachování energie a hybnosti a přirovnat ke srážce dvou mís. Již z prostého fyzikálního náhledu je zřejmé, že čím více se blíží hmotnost terčového jádra hmotnosti dopadajícího neutronu a čím více se blíží jeho trajektorie středu jádra, tím více kinetické energie jádro převezme. Snižování kinetické energie je proto nejintenzivnější při srážce neutronu s jádrem vodíku a jeho izotopy. Je zřejmé, že při středové srážce s jádrem vodíku H1 ztratí neutron prakticky veškerou kinetickou energii. Průměrný počet srážek n neutronů potřebný na snížení energie z hodnoty  $W_1$  na hodnotu  $W_2$  se určuje za pomoci tzv. středního logaritmického snížení energie  $\xi$  (logaritmického dekrementu):

$$n = \xi^{-1} \cdot \ln (W_1 / W_2) \quad (3.16)$$

V obyčejné vodě ( $\xi = 0,925$ ) používané jako moderátor v tlakovodních reaktorech musí prodělat neutron v průměru asi 20 srážek, než poklesne jeho energie na hladinu umožňující štěpení.

- b) **Nepružný rozptyl** probíhá ve třech fázích: 1) pohlcení neutronu jádrem, 2) zvýšení energie jádra na tzv. excitační energii a přeskupení nukleonů na nové energetické hladiny, 3) uvolnění neutronu s nižší energií, než měl pohlcený. Přebytek energie se vyzáří.

Nepružný rozptyl odebírá neutronu poměrně značnou část energie, ale pro jeho uskutečnění musí mít neutron energii vyšší než 0,1 MeV. Tato reakce se tedy již neuplatní při snižování energie epitermálních a tepelných neutronů.

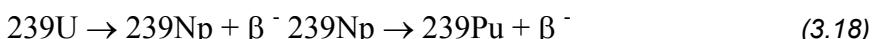
- 2) **Radiační zachycení** (pohlcení, absorpcí). Je-li energie dopadajícího neutronu na terčové jádro menší než při nepružném rozptylu, může být

jádrem pohlcena a nedojde již k uvolnění dalšího neutronu o nižší energii. Kinetická energie neutronu vybudí jádro, nukleony se přeskupí na nové energetické hladiny a přebytečná energie se vyzáří. Radiačním zachycením se tedy zvýší počet neutronů o jeden, a tím i hmotnostní číslo prvku.

Látky, které mají tuto schopnost, se používají v jaderných reaktorech jako absorbéry volných neutronů (bór, kadmium). Dalším příkladem je využití radiačního zachycení u rychlých množivých reaktorů k výrobě plutonia Pu239 z uranu U238. (Tato reakce probíhá v menší míře i u tepelných reaktorů.)



Radioaktivní U239 se postupně,  $\beta^-$  rozpadem, transmutuje na Np239 a dále na Pu239



- 3) **Štěpení.** K této reakci dochází zvýšením energie terčového jádra (excitacní energie) na energii větší než vazební po zasazení neutronem. Jádro se rozdělí na dvě části (fragmenty, odštěpky, trosky) a dva nebo tři volné neutrony. Štěpení je doprovázeno gama a beta zářením.

Štěpení je klíčovou jadernou reakcí. Při jednom štěpení U235 se uvolní relativně značná energie (asi 200 MeV). Uvolněné neutrony umožňují vyvolat další štěpnou reakci. Tuto reakci si přiblížíme v další části.

### Pravděpodobnost neutronových jaderných reakcí

Neutron (obecně částice) procházející vrstvou látky může vyvolat některou z jaderných reakcí. Je-li látka i proud neutronů homogenní, lze popsat vzniklé reakce statisticky a veličinám přiřadit jejich střední hodnoty. Typ jaderné reakce způsobené neutronem je závislý především na druhu terčového jádra a na energii neutronu. Míru pravděpodobnosti, že dojde k určité reakci nazýváme **účinný průřez** pro tuto reakci. Účinný průřez můžeme vztáhnout na pomyslnou rovnou desku o síle jednoho jádra, pak má název **mikroskopický účinný průřez**, nebo na jednotku objemu, pak se nazývá **makroskopický účinný průřez**.

Mikroskopický účinný průřez má vzhledem k rozměrům jádra velmi malou hodnotu (do  $10^{-25} \text{ m}^2$ ), proto byla pro mikroskopický účinný průřez zvolena jednotka  $10^{-28} \text{ m}^2$ , dříve zvaná barn. Výraz „mikroskopický účinný průřez“ se v odborné literatuře vzhledem k jeho častějšímu použití (v místech, kde nemůže dojít k omyleu) zkracuje na **účinný průřez**.

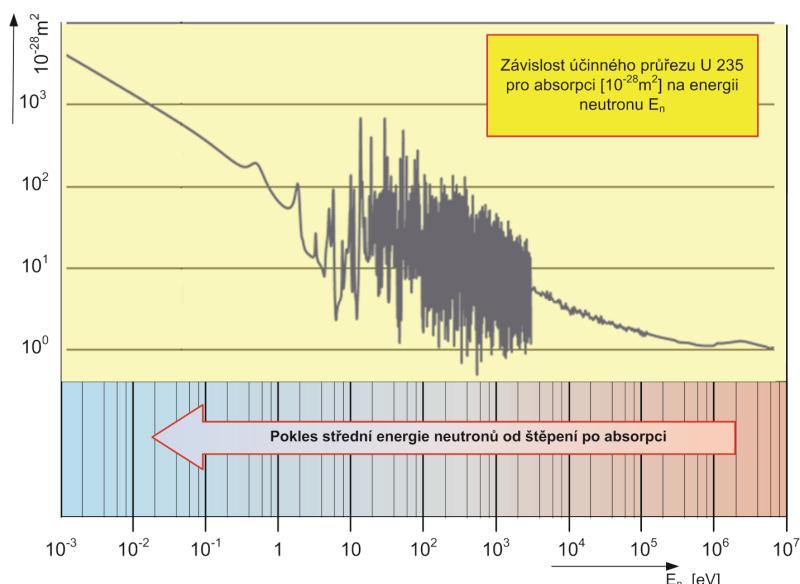
V jaderné energetice jsou nejdůležitějšími účinnými průřezy účinný průřez pro: štěpení, absorpci, zachycení, rozptyl, pružný rozptyl a nepružný rozptyl.

Jednotlivé účinné průřezy se zjišťují experimentálně. U absorpcí jsou rozdíly hodnot účinných průřezů vysoké. Kromě závislosti na typu částice a jádra jsou značně závislé i na energii dopadajícího neutronu. Např. u izotopu U235 je účinný průřez pro štěpení tepelnými neutrony téměř 500krát vyšší, než účinný průřez pro

štěpení rychlými neutrony. Rozdíly absorpčních průřezů jsou podstatné i u izotopů téhož prvku. Např. u izotopu U238 je účinný průřez pro štěpení tepelnými neutrony prakticky nulový. U většiny těžkých prvků závisí účinný průřez pro absorpci (štěpnou i neštěpnou) nepřímo úměrně na jejich rychlosti, resp. na odmocnině z jejich kinetické energie, a to především v oblastech nižších energií. Závislost nemá u většiny těžkých prvků hladký průběh, v tzv. **rezonanční oblasti** má několik extrémně vysokých špiček zvyšujících účinný průřez pro absorpci (pro její neštěpnou část, respektive účinný průřez pro zachycení) až o tři až čtyři řády. Rezonanční oblast leží při spodní hranici epitermálních energií neutronů (0,1 až 5000 eV). Např. u U238 je tato oblast 5 až 2000 eV. Rozdíl hodnot u rozptylu je poměrně malý, pro většinu prvků leží v intervalu  $(1 \div 13) \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ .

Účinné průřezy pro jednotlivé izotopy a energie dopadajících částic jsou pro fyzikální výpočty tabelizovány v rozsáhlých souborech.

**Střední volná dráha  $\lambda$ .** Prochází-li neutronový tok kolmo homogenním prostředím, klesá jeho mohutnost exponenciálně s tloušťkou vrstvy. Dráha, resp. síla vrstvy, při které poklesne tento tok na 1/e původní hodnoty, se nazývá střední volná dráha pro příslušnou interakci. V případě rozptylu odpovídá střední volná dráha střední vzdálenosti, kterou neutron urazí mezi dvěma po sobě následujícími srážkami.



**Obr. 3.4: Závislost účinného průřezu pro absorpcí U235 na energii neutronu během jeho života v tlakovodním reaktoru**

Podíl střední logaritmické ztráty energie  $\zeta$ , a střední volné dráhy pro rozptyl  $\lambda$  nazýváme **moderační schopnost**. Tato vlastnost je jedním z kvalitativních měřítek moderátoru. Další důležitou charakteristikou moderátoru je **součinitel moderace** daný podílem moderační schopnosti a makroskopického účinného průřezu pro absorpcí. Součinitel moderace nejlépe vystihuje kvalitu moderátoru z hlediska ne-

utronové bilance v reaktoru, neboť kromě rychlosti moderace zahrnuje i úbytek neutronů při interakcích.

## Štěpení jádra

Po zachycení (absorpci) neutronu jádrem se zvýší energie nového složeného jádra o kinetickou energii neutronu a o podstatně vyšší energii vazební (stejnou jako tu, kterou bychom museli jádru dodat, aby nazpět uvolnilo neutron). Vzniklá excitační energie zvýší oscilace nukleonů. Je-li excitační energie vyšší než vazební (aktivacní), nukleony se od sebe více vzdalují a zmenšují tak působnost silných jaderných sil. Minimální excitační energie potřebná k rozdelení jádra se nazývá **kritická energie neutronu pro štěpení**.

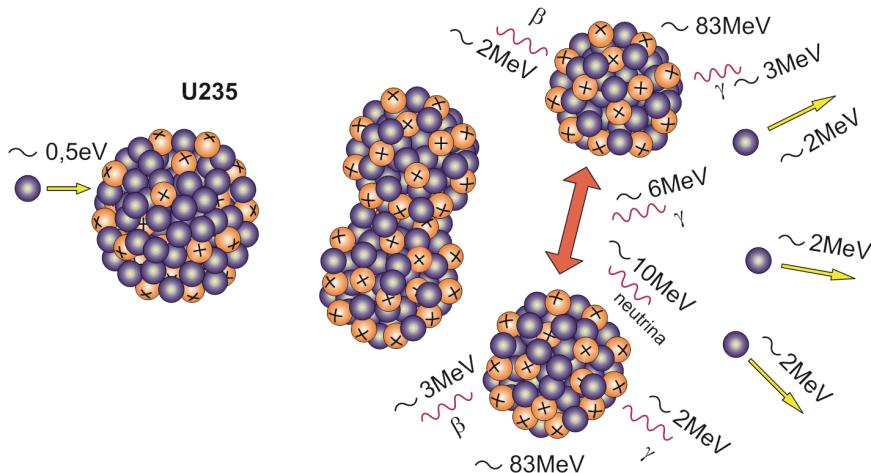
Vycházíme-li z představy kapkového modelu, dostane vybuzené jádro protáhlý tvar a na vzdálenějších koncích přestanou působit silné jaderné síly a uplatní se jen síly odpudivé, elektrostatické. Pokud se energie nesníží uvolněním částice, nebo gama zářením, a silné jaderné síly nevrátí jádro zpět do kulovitého tvaru, dojde k jeho rozdelení (rozštěpení) na dva fragmenty (odštěpky) a dva až tři volné neutrony. Součet kinetických energií obou fragmentů je asi 165 MeV. Rozdelení energie mezi oba fragmenty není symetrické a souvisí také s jejich nestejnými hmotnostními čísly a pravděpodobností jejich získání. Nejvyšší pravděpodobnost nabyté energie je v okolí 98 MeV a 66 MeV. Kinetická energie fragmentů je hlavním zdrojem tepelné energie v reaktoru (cca 85 %). Ve fragmentech je zpravidla nadbytek neutronů oproti jejich stabilnímu izotopu. Z nich jsou dva až tři emitovány jako okamžité volné neutrony, v čase řádově  $10^{-14}$  s. Jejich energetické spektrum je v rozmezí 0,1 až 17 MeV. Průměrná energie jednoho neutronu je asi 2 MeV. Některé štěpné fragmenty mají stálé dostatek excitační energie a emitují s časovým zpožděním další volný neutron s nižší energií. Tomuto neutronu se říká zpožděný a má velký význam pro regulaci reaktoru, neboť prodlužuje průměrný život jedné generace všech volných neutronů. Časový odstup vzniku zpožděných neutronů od štěpné reakce je závislý na poločasu rozpadu příslušného fragmentu, zpravidla jej rozdělujeme do šesti časových pásem (skupin).

Nutnou podmínkou pro štěpení je, aby kinetická energie neutronu byla vyšší, než rozdíl kritické a vazební energie. Na příklad u izotopů U233, U235, a Pu239 je kritická energie pro štěpení menší než vazební. Proto stačí ke štěpení těchto izotopů i nízká energie tepelných neutronů. Naproti tomu u izotopu U238 je vazební energie asi 5,5 MeV a kritická energie asi 7 MeV, proto k jeho štěpení musí mít neutron kinetickou energii vyšší než 1,5 MeV. Tuto reakci tedy může vyvolat jen neutron právě vzniklý (rychlý, okamžitý). Jak bylo dříve uvedeno, je účinný průřez U238 pro štěpení velmi nízký, a proto také pravděpodobnost vzniku této reakce je malá. Ani u izotopů, kde kritická energie je menší než vazební, nedochází vždy ke štěpení a přebytečná energie se vyzáří gama zářením. Např. u jádra U235 dojde po zachycení neutronu ke štěpení s pravděpodobností asi 85 %.

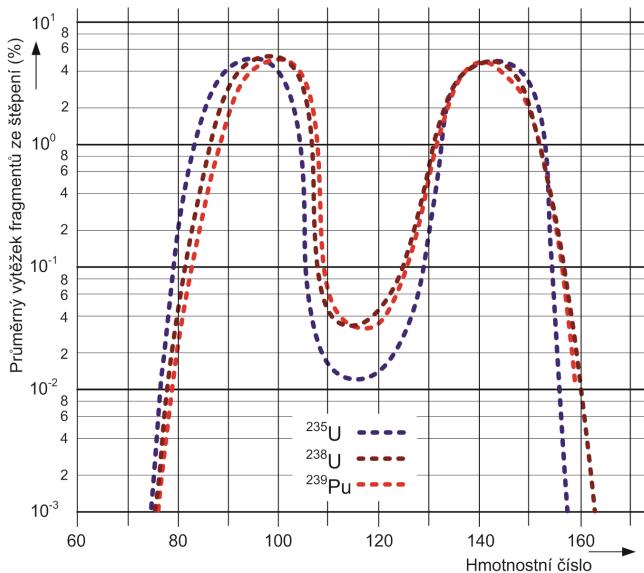
Analýzou fragmentů vzniklých při štěpení uranu byla prokázána jeho transmutace na víc jak 80 prvků, tzn., že probíhá víc jak 40 druhů štěpení. Četnost zastoupení nových prvků je však značně nerovnoměrná. Nejvyšší pravděpodobnost vzniku mají prvky s hmotnostními čísly v okolí A = 95 a A = 140, tedy prvky s hmotností zhruba 40 % a 60 % hmotnosti štěpeného prvku.

Při štěpné reakci, musí platit rovnost mezi počtem protonů v původním jádře a vzniklých fragmentech a také rovnost mezi počtem neutronů v původním jádře, zvýšený o jeden (aktivující štěpnou reakci), a počtem neutronů ve fragmentech spolu s počtem neutronů uvolněných při štěpení:

$$Z_0 = Z_1 + Z_2 A_0 + 1 = A_1 + A_2 + (2 \text{ nebo } 3) \text{ neutrony} \quad (3.19)$$

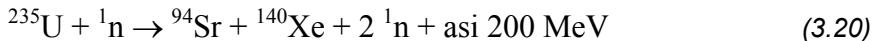


Obr. 3.5: Štěpení jádra U235 s uvedením uvolněných energií



Obr. 3.6: Výtěžek fragmentů ze štěpení vybraných izotopů

Jako příklad lze uvést jeden z častějších případů štěpení v reaktoru:



(Vzniklé izotopy stroncia i xenonu jsou vysoce radioaktivní, dále se rozpadají).

### Energie uvolněná při štěpné reakci

Průměrné rozdělení energií z jednoho štěpení uranu U235 je:

jednotky	$(10^{-13} \text{ J})$	(MeV)	(%)
kinetická energie odštěpků	265,0	165,4	83,4
energie volných neutronů	9,6	6,0	3,0
energie okamžitého záření gama	9,6	6,0	3,0
energie neutrín	17,8	11,1	5,6
energie záření gama při rozpadu	8,0	5,0	2,5
energie záření beta při rozpadu	8,0	5,0	2,5
celkem	318,0	198,0	100,0

Z energií uvedených v přehledu nemůže být využita energie neutrín, které ne-reagují s hmotou a opouštějí aktivní zónu. Také záření gama zachycené v biologickém stínění vyzáří část energie mimo reaktor. Na druhé straně neštěpné interakce neutronů přináší další zisk energie asi 4 MeV na jedno štěpení.

Pro U235 a U233 se udává využitelná energie asi 190 MeV, tj.  $30,4 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ , pro Pu239 asi 199 MeV, tj.  $31,9 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  na jedno štěpení. Teoretický výtěžek energie z jednotky hmotnosti lze vypočítat, vynásobíme-li počet atomů štěpitelného prvku v této jednotce využitelnou energií na jedno štěpení.

Jako příklad uveďme zjednodušený výpočet teoreticky využitelné energie získané rozštěpením 1kg U235. 1 kg U235 obsahuje  $N_A / A$  atomů, to je po dosazení Avogadrovy konstanty  $N_A$  a hmotnostního čísla A uranu U235:

$$6,022 \cdot 10^{26} / 235 = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ atomů} \quad (3.21)$$

rozštěpením všech jader U 235 se uvolní energie

$$W = 2,56 \cdot 10^{24} \cdot 30,4 \cdot 10^{-12} = 7,78 \cdot 10^{13} \text{ J} \cong \underline{2,13 \cdot 10^7 \text{ kWh}} \cong$$

$$\cong 900 \text{ MWd} \quad (3.22)$$

V přírodním uranu je jen 0,712 % izotopů U235. Pro některé typy reaktorů se jeho obsah uměle zvyšuje - dochází k obohacení paliva. V jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory o elektrickém výkonu 1000 MW, je průměrné obohacení paliva ve vsázce kolem 3,5 %. V takové elektrárně by, při obvyklém vyhoření paliva na 1 % a při účinnosti 33 %, činila hmotnost samotného paliva tj. U235 a U238 při ročním nepřetržitém provozu na jmenovitém výkonu přibližně:

$$(P \cdot t_k / \eta_e \cdot W_d) \cdot 100 / \Delta o_u = (1000 \cdot 365 / 0,33 \cdot 900) \cdot 100 / 2,5 \cong \\ \cong 49,2 \cdot 10^3 \text{ kg} \quad (3.23)$$

kde:

$P$  ..... elektrický výkon elektrárny v MW

$t_k$  ..... doba pobytu paliva v reaktoru ve dnech

$\eta_e$  ..... účinnost výroby el. energie

$W_d$  ..... vytěžitelná energie z 1 kg paliva v MWd

$\Delta o_u$  ..... snížení obohacení paliva v procentech

Ve skutečnosti je při výpočtu hmotnosti jaderného paliva nutné respektovat mnohem více parametrů (např. v palivu je uran ve formě oxidu  $UO_2$ , částečně se štěpí rychlými neutrony i  $U238$  (až 3%), neutrony jsou generovány i zářením  $\gamma$  aj.).

Za stejné období, při průměrné výrobě 1 kWh z 1 kg uhlí, by tepelná elektrárna o stejném výkonu spotřebovala  $8,76$  milionů tun uhlí, tedy přibližně  $1,78 \cdot 10^6$  krát větší hmotnost paliva než jaderná. U elektráren s rychlými reaktory je vzhledem k vyššímu využití paliva tento poměr ještě výraznější.

## Řetězová reakce

Při jednom štěpení  $U235$  vzniká průměrně 2,5 volných neutronů, každý s energií přibližně 2 MeV. K tomu, aby se udržela řetězová reakce, musí zůstat pro další štěpení minimálně jeden neutron s energií 1 eV a nižší, tzn., že musíme neutronům snížit energii (rychllosť) o více jak šest řádů a 40 % jich zachovat pro následující štěpné reakce. Ze zbývajících 60 % neutronů, které se nepodílí na další štěpné reakci, je většina absorbována v palivu, moderátoru, chladivu, v konstrukčních materiálech a záměrně instalovaných absorbátorech. Část neutronů unikne ze soustavy (z aktivní zóny), a pokud není vrácena reflektorem, již se neuplatní. Absorpce, při které nenastane štěpná reakce, se často nazývá parazitní. Velikost parazitní absorpce je závislá na mnoha technicko-provozních a fyzikálních parametrech, a většinou ji během provozu nelze, vyjma pomocí k tomu určených absorbatérů, podstatně ovlivnit. Únik neutronů závisí na uspořádání aktivní zóny, jejích rozměrech a tvaru, i na účinnosti reflektoru.

Předpoklad pro udržení řetězové reakce se často vyjadřuje **multiplikačním činitelem „k“** (koeficientem násobení neutronů). Je to poměr počtu volných neutronů jedné generace k počtu neutronů předcházející generace.

Multiplikační činitel rozlišujeme podle toho, zda je určen pro nekonečné prostředí, potom jej značíme  $k_{\infty}$  a používáme uvedený název, nebo pro konečné (reálné) prostředí, kde uvažujeme únik neutronů ze soustavy, potom jej nazýváme **efektivní multiplikační činitel** a značíme  $k_{ef}$ . Z hlediska rozvoje řetězové reakce mohou nastat tyto případy:

$k_{ef} > 1$  - soustava je **nadkritická**, počet štěpení exponenciálně stoupá

$k_{ef} = 1$  - soustava je **kritická**, počet štěpení se nemění

$k_{ef} < 1$  - soustava je **podkritická**, počet štěpení se exponenciálně snižuje

Velikost multiplikačního činitele je závislá na mnoha parametrech soustavy, jejichž vliv se zpravidla zahrnuje do čtyř součinitelů:

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f(-) \quad (3.24)$$

kde význam jednotlivých součinitelů je :

- 1)  **$\eta$  - součinitel reprodukce neutronů.** Vyjadřuje střední počet okamžitých i zpožděných neutronů uvolněných jedním pomalým neutronem absorbovaným (štěpně i neštěpně) v palivu. Jeho hodnota roste u uranu podle stupně obohacení izotopem U235 od  $\eta = 1,34$  pro přírodní uran, po  $\eta = 2,07$  pro čistý U235. Při obohacení přírodního uranu na 2 % je např.  $\eta = 1,74$ .

Tento součinitel se často dělí na součinitel využití pomalých neutronů v palivu –  $a$ , udávající střední poměr neutronů způsobujících štěpení ke všem neutronům absorbovaným v palivu, a součinitel  $v$ , určující průměrný počet volných neutronů vzniklých při jednom štěpení,  
 $\Rightarrow \eta = v \cdot a$

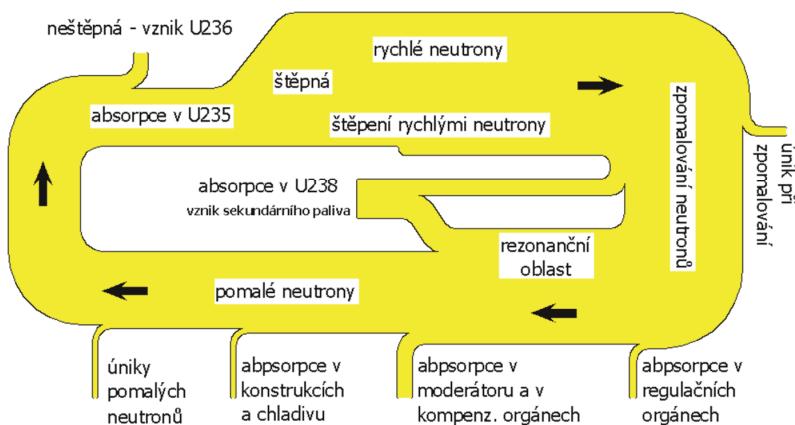
- 2)  **$\varepsilon$  - multiplikační součinitel rychlých neutronů.** Je to poměr celkového počtu neutronů, vzniklých při štěpení účinkem neutronů všech energií, k počtu neutronů, vzniklých při štěpení jen pomalými neutrony. Část rychlých neutronů vyvolá v izotopu U238 štěpnou reakci, po které se zvýší počet volných neutronů asi o 3 ÷ 5 %, tomu odpovídá  $\varepsilon = 1,03 \div 1,05$ . Jeho velikost závisí především na „hustotě“ paliva v soustavě a použitém moderátoru. U rychlých množivých reaktorů, vzhledem k absenci moderátoru, „vyšší hustotě“ paliva v aktivní zóně a vyššímu obohacení paliva, je jeho hodnota podstatně vyšší, až o 30 %, tj.  $\varepsilon = 1,3$ .

- 3)  **$p$  - součinitel pravděpodobnosti úniku rezonanční absorpcí.** Vyjadřuje pravděpodobnost toho, že neutron během zpomalování nebude pohlcen v tzv. rezonanční oblasti uranu U238, aniž by způsobil štěpení (rezonanční oblast je pásmo několika desítek úzkých energetických hladin, ve kterých má daný prvek střídavě vysoké a nízké absorpční schopnosti). Absorpce v ostatních složkách paliva je v této oblasti zanedbatelná. Je to tedy poměr počtu právě zpomalených neutronů k počátečnímu počtu rychlých neutronů. Hodnoty tohoto součinitela jsou v rozmezí  $p = 0,85$  pro přírodní uran, až po  $p = 1$  pro U235. Se vzrůstající teplotou mírně klesá. Závisí také na vlastnostech moderátoru (rychlosti snižování energie neutronů) a uspořádání paliva (v jakém prostředí se neutrony po dobu svého života pohybují).

- 4) **f - součinitel využití tepelných neutronů.** Vyjadřuje poměr počtu tepelných neutronů, absorbovaných palivem, k celkovému počtu absorbovaných tepelných neutronů. Je tedy mírou pravděpodobnosti úniku tepelných neutronů parazitní absorpcí. Závisí především na absorpčních vlastnostech prostředí. Vzhledem ke snadnému použití přídavných absorbátorů je jediným součinitelem, který lze během provozu reaktoru jednoduše ovlivnit a využít pro regulaci.

## ŽIVOTOPIS NEUTRONŮ V TEPELNÉM REAKTORU

(pro multiplikační koeficient  $K_{ef}=1$ )



Obr. 3.7: Životopis 1 generace neutronů v tlakovodním reaktoru při  $k_{ef} = 1$

Vzhledem ke konečným rozměrům reaktoru dochází během „života neutronů“ k jejich úniku z aktivní zóny. Tento nezanedbatelný jev lze ovlivnit především tvarem aktivní zóny a reflektorem vracejícím část uniklých neutronů zpět do aktivní zóny. Optimální z hlediska tvaru je koule, neboť má nejmenší poměr povrchu k objemu. Z praktického hlediska je však aktivní zóna kulového tvaru u heterogenních reaktorů těžko realizovatelná. Nejčastější tvar aktivní zóny je válcový. Od reflektoru požadujeme co nejmenší absorpcí; zpravidla tuto funkci plní moderátor, neboť obklopuje rovnoměrně aktivní zónu.

Označíme-li celkovou pravděpodobnost setrvání neutronů v soustavě P, platí pro efektivní multiplikační činitel:

$$k_{ef} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f \cdot P = k_{\infty} \cdot P \quad (3.25)$$

### Perioda reaktoru a vliv zpozděných neutronů

Pokud je multiplikační součinitel  $k_{ef}$  různý od jedné, změní se počet neutronů n v každé generaci na  $a \cdot k_{ef}$ , respektive o  $a \cdot (k_{ef} - 1)$ . Časovou změnu počtu neutronů lze tedy vyjádřit vztahem:

$$dn / dt = n \cdot (k_{ef} - 1) / T_a \quad (s^{-1}) \quad (3.26)$$

kde  $T_a$  je střední doba života neutronů jedné generace.

Řešením této diferenciální rovnice dostaneme pro časovou závislost počtu neutronů:

$$n = n_0 \cdot e^{t(k_{ef} - 1) / T_a} \quad (3.27)$$

kde  $n_0$  je počet neutronů v čase  $t = 0$ .

Obdobný vztah platí i pro hustotu neutronového toku. Dobu za kterou vzroste počet neutronů, respektive hustota neutronového toku e-krát, nazýváme **periodou reaktoru**  $T_e$ . Z předcházejícího vztahu platí pro  $T_e$

$$\frac{n}{n_0} = e^{T_e(k_{ef} - 1) / T_a} = e \Rightarrow T_e = T_a / (k_{ef} - 1) \quad (3.28)$$

Perioda reaktoru je mírou změny neutronového toku a tedy i výkonu reaktoru. Je velmi důležitou a stálou sledovanou veličinou při provozu reaktoru. Na rychlosti změny výkonu reaktoru lze ukázat význam zpožděných neutronů. Okamžité neutrony mají střední dobu života asi  $10^4$  až  $10^3$  s. Zpožděné mají průměrnou dobu života (počítáno od okamžiku rozštěpení jádra) asi 12 s. Podíl zpožděných neutronů je asi  $\beta = 0,0065$ , podíl okamžitých neutronů je  $(1 - \beta)$ , tj. asi 0,9935.

Pro

$$1 < k_{ef} < 1 / 0,9935 \approx 1 + \beta \quad (3.29)$$

je sice soustava nadkritická pro všechny neutrony, ale jen pro okamžité neutrony je podkritická. Proto musíme uvažovat celkovou průměrnou dobu života neutronů, tj. přibližně:

$$T_a = 0,9935 \cdot 0,001 + 0,0065 \cdot 12 = 0,08 \text{ s} \quad (3.30)$$

V případě, že

$$k_{ef} > 1 / 0,9935 \approx 1 + \beta \quad (3.31)$$

je soustava nadkritická i na okamžitých neutronech s nadkritičností pro okamžité neutrony  $k_{ef0} = k_{ef} - \beta$ . Pro takovouto soustavu již ale platí hodnota  $T_a = 0,001$  s a rychlosť změny neutronového toku a tím i výkonu se řídí úměrně vztahu:

$$n = n_0 \cdot e^{(k_{ef} - 1)1000t} \quad (3.32)$$

Z tohoto vztahu je patrné jak rychle by vznikl výkon reaktoru při překročení hodnoty  $k_{ef}$  nad hodnotu  $1 + \beta$ . Např. při zvýšení multiplikačního součinitele na 1,008 by za 3 s vzrostl výkon přibližně  $e^{4,5}$ krát, tj. asi devadesátkrát. Při zvýšení na hodnotu  $k_{ef} = 1,01$  by výkon za 3 s vzrostl  $e^{10,5}$ krát, tj. asi  $36 \cdot 10^3$ krát. Z uvede-

ných příkladů je zřejmé, že hranice  $k_{ef} > 1 + \beta$  nesmí být nikdy překročena, ani u odstaveného nebo tzv. najízděného reaktoru. V reaktorech je řada zabezpečení, včetně omezení možnosti zvýšení multiplikačního součinitele nad přípustnou hodnotu regulačním systémem, či chybným zásahem operátora, aby nemohlo k tomuto případu dojít.

## Reaktivita a koeficienty reaktivity

V praxi je často používána místo multiplikačního koeficientu jeho poměrná hodnotu - **reaktivita**. Reaktivita reaktoru -  $\rho$  je definována jako poměrná hodnota přebytku **efektivního** multiplikačního činitele vztahem

$$\rho = (k_{ef} - 1) / k_{ef} \quad (3.33)$$

reaktor je tedy při:

$\rho < 0$  podkritický       $\rho > 0$  nadkritický

$\rho = 0$  kritický       $\rho > \beta_{ef}$  nadkritický na okamžitých neutronech

Změnu reaktivity závislou na změně **jednoho** z parametrů reaktoru nazýváme **koeficientem reaktivity**  $k_{px}$  od příslušného parametru. Parametrem reaktoru je v tomto případě míněn provozní parametr jednotlivých komponent reaktoru, takže může být například koeficient reaktivity od teploty paliva, od tlaku chladiva, od teploty moderátoru atd.

$$k_{px} = \partial \rho / \partial x \quad (A^{-1}) \quad (3.34)$$

kde

$x$  ..... příslušný parametr reaktoru

$A$  ..... měrová jednotka příslušného parametru (K, kPa, ...)

Změny efektivního multiplikačního součinitele respektive reaktivity, které nejsou způsobené úcelově, tj. regulačním nebo kompenzačním systémem, mohou být z hlediska kampaně i celé doby provozu reaktoru krátkodobé, střednědobé a dlouhodobé.

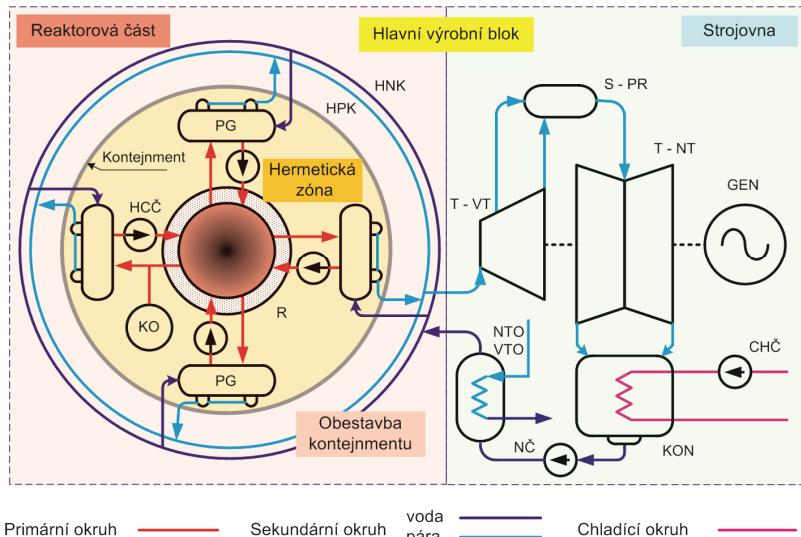
- **krátkodobé** vlivy jsou především odezvy na teplotní, výkonové a tlakové změny v normálních provozních tolerancích
- **střednědobé** zahrnují vliv nerovnovážných otrav reaktoru štěpnými produkty při větších rychlých výkonových změnách reaktoru
- **dlouhodobé** vznikají vyhoříváním paliva a zastruskováním reaktoru

Vzhledem k požadavkům na délku kampaně a hloubku vyhoření paliva (jeho efektivitu) je nutné tyto nestacionární jevy brát v úvahu při návrhu konstrukce reaktoru, návrhu vsázky paliva a kompenzačních systémů s ohledem na velikost zásoby reaktivity.

## Popis jaderné elektrárny

V zásadě každou jadernou elektrárnu lze prostorově rozdělit z hlediska technologií, provozního režimu a zabezpečení na část zajišťující provoz reaktoru, část strojní - zajišťující provoz turbín a výrobu elektrické energie a část zajišťující technologicky provoz elektrárenského bloku. Reaktorová část se strojní zpravidla tvoří jeden společný stavební celek, tzv. **hlavní výrobní blok**, rozdělený vnitřními vestavbami na zařízení s aktivními provozy – reaktorovnu a část se strojním a k němu příslušejícím technologickým zařízením – strojovnu.

Dispoziční schéma výrobního bloku JE



Obr. 3.8: Zjednodušené dispoziční schéma hlavního výrobního bloku JE

V reaktorovně jsou umístěny technologie podílející se na výrobě tepelné energie a jejím přenosu do strojovny. Hlavními komponentami jsou: reaktor, hlavní cirkulační potrubí, hlavní cirkulační čerpadla, tepelné výměníky – parogenerátory, kompenzátor objemu (u tlakovodních reaktorů), barbotážní systém, zásobníky vody sloužící k dochlazování reaktoru, bazény čerstvého a vyhořelého paliva, systémy kontinuálního čištění chladiva, systémy doplňování chladiva, regulační a bezpečnostní systémy, systémy měření a kontroly aj. Zařízení, v nichž se nacházejí aktivní části, včetně chladiva reaktoru o provozních parametrech (tlak a teplota), je u novějších elektráren umístěno v tzv. kontejnmentu. Kontejnement je ochranná obálka lokalizující dopad případné poruchy. Jeho úkolem je zajistit bezpečnost okolí před účinky havárie v primárním okruhu i jeho bezpečnost před vnějšími vlivy. Kontejnement vytváří hermeticky oddělený prostor. Jeho pevnost je navržena tak, aby vydržel přetlak při úniku chladiva i při maximální projektové havárii (roztržení hlavního cirkulačního potrubí). Za normálního provozu je v kontejnmentu udržován mírný podtlak a proudění vzduchu ve směru vzrůstající aktivity tak, aby nedocházelo k případnému úniku radioaktivních izotopů atmosférou do okolí. Některé v současnosti stavěné elektrárny mají kontejnenty dva, jeden ocelový – vnitřní (zajišťující mj. lepe hermetičnost a umožňující chlazení z vnějšku) a druhý z předpjatého betonu.

V reaktorovně musí být jednotlivé technologie účelně uspořádány tak, aby zajímaly co nejmenší prostor a snížily se tak hydraulické ztráty i ztráty přenosem tepla o nízkých parametrech, v neposlední řadě i stavební náklady (kontejnment je stavebně a tím i finančně velmi náročná komponenta). Jaderný reaktor je zpravidla umístěn ve vertikální ose reaktorové části a symetricky obklopen biologickým stínením, tepelnými výměníky a oběhovými čerpadly. Nad vícemístnem (u varných pod dnem) reaktoru je volný prostor, zaručující bezpečnou výměnu paliva i dalších vestaveb reaktoru a přístup k regulačnímu a bezpečnostnímu systému. Tepelné výměníky, oběhová čerpadla a spojovací potrubí jsou s ohledem na co nejmenší mechanické namáhání způsobené teplotními dilatacemi umístěny v pružném nebo pohyblivém loži. Z hlediska prostoru je výhodnější vertikální poloha tepelných výměníků, u tlakovodních reaktorů VVER jsou však parogenerátory uloženy horizontálně. Parogenerátory u vodu chlazených reaktorů mají být uloženy v takové výši, aby při odkrytí víka reaktoru zůstala zaplavena celá chladicí smyčka vodou.

Pro reaktorovou část platí zpřísňené bezpečnostní předpisy. Vstup do ní má jen omezený počet zaměstnanců. Je rozdělena do několika zón, zpravidla hermeticky oddělených, s různými stupni povoleného přístupu až zákazu vstupu během provozu reaktoru.

**Strojovna** se prakticky neliší od tepelných elektráren, turbíny však pracují při velkých výkonech s nižšími parametry páry, u tlakovodních a varných reaktorů se sytou párou. Tomu odpovídají větší rozměry turbín, separátorů, potrubí a armatur, i požadavek na co nejkratší cestu páry od výměníku k turbíně.

Ve většině případů se i u velkých výkonů používá čistě blokové uspořádání, tzn. jedna turbína na reaktor, bez zásadního požadavku na orientaci osy turbín. Výjimku tvoří např. bloky s reaktory VVER 440 (např. Dukovany) se dvěma podél-ně uspořádanými turbínami o výkonu 220 MW.

V jaderných elektrárnách se musí i strojovna zabezpečit proti případným únikům radioaktivních částic z páry a kondenzátu. Tyto se mohou do sekundárního okruhu dostat netěsnostmi v tepelných výměnících (parogenerátorech) mezi primárním a sekundárním okruhem. Z těchto důvodů je zvýšený požadavek i na těsnost zařízení strojovny a na vracení úniků do parovodního cyklu. Pokud jsou v sekundárním oběhu obsaženy radioaktivní plyny (H<sub>3</sub>, O<sub>19</sub>, N<sub>16</sub>, N<sub>17</sub>) jsou pomocí ejektoru spolu se vzduchem průběžně odsávány a přes zásobník, který slouží jako zpožďovací člen zajišťující pokles aktivity a přes filtry, vypouštěny komínem do atmosféry.

**Mezistrojovna** - prostor mezi reaktorovou částí a strojovnou, ve kterém jsou mj. instalovány technologie související se sekundární částí parogenerátorů, např. turbonapáječky včetně kondenzátorů, napájecí hlavy, napájecí a parní kolektor. Mezi důležité zařízení zde instalované patří i pomocné napáječky používané při najíždění a odstavování elektrárny i při jejím udržování v tzv. horké rezervě (stav, kdy je elektrárna připravena na připojení k elektřizační soustavě a výrobou pokrývá jen svoji vlastní spotřebu) a olejové hospodářství. V mezistrojovně bývá umístěn i velín bloku.

**Pomocné provozy.** V jaderné elektrárně pracuje celá řada provozů, které si ce nejsou součástí hlavního technologického procesu, ale bez nichž by nebyl možný řádný chod elektrárny. V sekundární části jsou pomocné provozy obdobné po-

mocným provozem parní části tepelné elektrárny. Jejich požadovaná spolehlivost je však u jaderných elektráren vyšší. V primární části je mnoho pomocných provozů se speciálním režimem, neboť pracují s radioaktivními látkami.

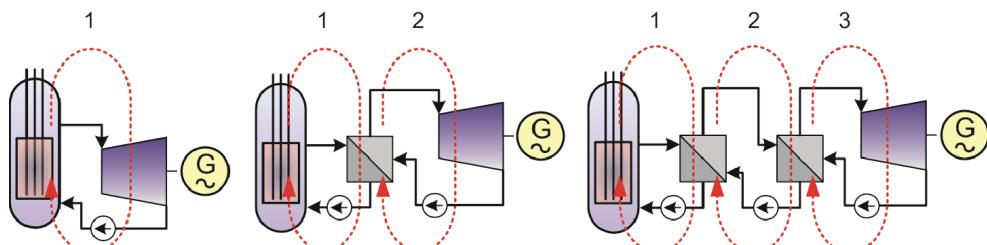
Mezi nejdůležitější pomocné provozy primární části patří: sklady kontejnerů s palivem; systémy úpravy a čištění vody primárního okruhu a vody z bazénu výměny paliva; systémy speciální kanalizace a čištění odpadních vod z různých filtrů, odluhů, odkalů, úniků netěsností, prádelem atd.; sklad a zahušťování kapalných aktivních odpadů; sklad pevných aktivních odpadů; přípravna dezaktivace roztoků; speciální kontrolní laboratoře; zásobníky technických plynů atd. Pomocné provozy primární části bývají umístěny v samostatné budově a jsou často společné pro více hlavních výrobních bloků.

Jedním z důležitých provozů z hlediska bezpečnosti jsou redundantní diesel-generátorové stanice. Tyto mají za úkol v případě ztráty hlavního i rezervního napájení vlastní spotřeby elektrárny elektrickou energií toto napájení nahradit v takovém rozsahu, aby bylo možné reaktor bezpečně odstavit, udržovat jej v podkritickém stavu a zajistit odvod zbytkového tepla v potřebném množství a po potřebné době a zajistit napájení všech aktivních systémů souvisejících s jadernou bezpečností.

Jaderná elektrárna a její okolí se dělí do několika pásem podle povolené úrovni radioaktivity na pásmo kontrolované, čisté pásmo, hygienické ochranné pásmo a pásmo sledování a ochrany okolí. Např. celý primární okruh spadá do kontrolovaného pásmo.

### Okruhy v jaderných elektrárnách

Teplo vzniklé při štěpení jaderného paliva se odvádí z reaktoru uzavřeným okruhem prostřednictvím teplonosného média - **chladiwa**, kterým může být voda, plyn, nebo tekutý kov (Na), buď přímo do turbíny, je-li elektrárna jednookruhová, nebo častěji do tepelného výměníku, je-li elektrárna dvojokruhová. Ve výměníku, kterému se říká parogenerátor, se vytvoří pára o příslušných parametrech, která podobně jako v tepelné elektrárně pohání turbínu mechanicky spojenou s alternátorem. V elektrárnách, kde je jako chladiivo používán tekutý kov (sodík), bývá z hlediska bezpečnosti mezi primárním a sekundárním okruhem ještě tzv. **vložený okruh**, kde proudí také tekutý kov zpravidla s vyšším tlakem než v primárním okruhu. Jeho úkolem je zabránit úniku radioaktivních štěpných produktů směrem k sekundárnímu okruhu. Tyto elektrárny mají často přívlastek **tříokruhové**.



Obr. 3.9: Okruhy v jaderných elektrárnách

Oběh chladiva mezi zdrojem (reaktorem) a odběrem tepla (turbínou, výměníkem) včetně příslušného technologického zařízení se nazývá **primární okruh** (primární smyčka, primár).

Oběh teplonosného média (páry) mezi parogenerátorem a turbínou se nazývá **sekundární okruh** (sekundární smyčka, sekundár).

## Základní typy jaderných reaktorů

Součástí reaktoru jsou tyto hlavní komponenty: Jaderné palivo, moderátor, látka pro odvod tepla z aktivní zóny - chladivo, hermetický systém, stínění, reflektor, množivá zóna a systémy řízení, měření, ochrany a diagnostiky.

Kombinací především prvních tří jmenovaných komponent spolu s energetickým spektrem štěpicích neutronů lze vytvořit celou řadu typů jaderných reaktorů. Prakticky každá z komponent může mít různou formu, význam některých může být potlačen (moderátor u rychlých reaktorů) nebo naopak přebírá funkce jiných částí (moderátor může být současně chladivem, reflektor součástí řídícího systému atd.), a tak existuje mnoho kombinací a tím i možných koncepcí reaktoru. Ne všechny jsou z mnoha důvodů vhodné. Během více jak půl století výroby jaderných reaktorů se osvědčilo několik typů, které jsou v současnosti projektovány a stavěny, pochopitelně s výraznými inovacemi vedoucími k vyšší spolehlivosti a bezpečnosti včetně orientace na pasivní a inherentní principy

Rozdělení do skupin je možné podle více hledisek. V počátcích jaderné energetiky to byly dvě základní skupiny určené vzájemným *uspořádáním paliva a moderátoru* v reaktoru:

**Homogenní reaktory** - v nich je palivo rozptýleno v moderátoru buď formou roztoku, chemické sloučeniny, slitiny nebo prosté suspenze práškového paliva v kapalině. Jejich výhodou je možnost plynulé výměny paliva během provozu reaktoru.

**Heterogenní reaktory** - v nich je jaderné palivo odděleno od moderátoru uložením v palivových elementech s hermetickým pokrytím tak, aby se zabránilo úniku aktivních látek do chladiva nebo do moderátoru. U heterogenních reaktorů bývá chladivo zároveň i moderátorem.

V energetice jsou využívány především heterogenní reaktory, které jsou technologicky více zvládnuté. V provozu je několik demonstračních a experimentálních vysokoteplotních reaktorů, o kterých lze hovořit jako o (kvazi)homogenních. Jejich palivo je ve formě koulí sestávajících z mikroelementů paliva (peletek  $\text{UO}_2$ ) s vyšším obohacením a grafitu, které jsou průběžně vsypávány do reaktoru a ze dna po „vyhoření“ odebrány. Grafit zde slouží jako moderátor i bariéra proti úniku štěpných fragmentů do prostředí. Homogenní reaktory najdou zřejmě uplatnění v blízké budoucnosti jako tzv. podkritické systémy, se kterými se počítá při likvidaci (transmutaci) vysokoaktivních jaderných odpadů. Jaderné palivo spolu s vysokoaktivními odpady zde budou obsaženy v roztavených solích plnících funkcí chladiva.

Z fyzikálního hlediska, tj. podle energie neutronů, při které dochází ke štěpení, a tím i podle jejich rychlosti, dělíme reaktory v zásadě na tepelné a rychlé.

**Tepelné reaktory** - ke štěpení jaderného paliva u nich dochází především tepelnými neutrony, to jsou neutrony s energií do 1 eV. Tento typ reaktorů musí ob-sahovat moderátor snižující hladinu energie právě vzniklých neutronů o 6 až 7 řádů při jejich nízké absorpci.

**Rychlé reaktory** - jsou to reaktory v podstatě bez moderátoru, které využívají ke štěpení především rychlé neutrony, tj. neutrony s energií nad 0,1 MeV. Protože zároveň se štěpením ve většině těchto reaktorů vzniká nový štěpitelný materiál, nazýváme je též množivé reaktory .

V oblasti energií neutronů mezi tepelnými a rychlými pracují reaktory epiter-mální a intermediální. Epitermální (nadtepelné) reaktory - v nich je štěpení způsobeno především neutrony s energiemi ležícími v oblasti nad 1 eV, ale nedosahující vyšších energií. Intermediální reaktory pracují převážně s neutrony středních energií, tj. s neutrony o energiích řádově desítky eV až desítky keV. Oba uvedené typy reaktorů se v energetice prakticky neuplatnily.

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné	Voda ( $H_2O$ )	$H_2O$	Tlakovodní (PWR, VVER)
			Varný (BWR)
	Grafit	$CO_2$	Plynem chlazený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotní (HTGR)
		$H_2O$	Vodou chlazený (LWGR)
		$D_2O$	Těžkovodní (CANDU) (PHWR)
	Těžká voda ( $D_2O$ )	$H_2O$	Těžkovodní chlazený lehkou vodou (HWLWR)
		$CO_2$	Těžkovodní chlazený plynem (HWGCR)
Rychlé	-	Na	Rychlý, množivý (FBR)

**Obr. 3.10: Základní rozdělení jaderných reaktorů**

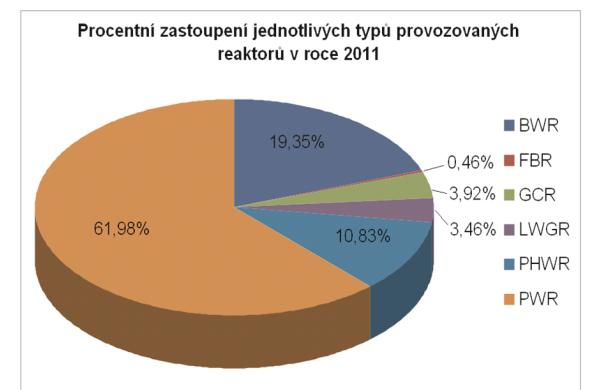
Reaktory je možno dělit do skupin i podle účelu na:

- Energetické - vyrábějící tepelnou energii určenou k distribuci a přímé spo-třebě (jaderné výtopny) nebo k její přeměně na jinou konečnou formu, nej-častěji elektrickou (jaderné elektrárny) či mechanickou (jaderné pohony). Častá je i výroba více druhů energií (jaderné teplárny).
- Výzkumné - s různou hustotou neutronového toku (výkonu), sloužící k výzkumu především v oblasti jaderné fyziky, záření a vlivů záření na ma-teriály a živé organismy.
- Vývojové (experimentální) - určené k získání fyzikálních údajů potřebných pro projektování a vývoj nových koncepcí reaktorů a modelování jejich různých provozních i havarijních stavů. Speciální část tvoří tzv. prototypové nebo demonstrační reaktory mající stejné vlastnosti, ale nižší parametry oproti reaktoru vyráběnému v budoucnu sériově.

- Průmyslové - používané např. v chemickém průmyslu k realizaci radiačně chemických přeměn ve větším měřítku, k výrobě vodíku, v potravinářském průmyslu k výrobě pitné vody, ke konzervaci, ve farmakologii, v zemědělství (osiva), při konzervaci a restauraci starožitností atd.
- Produkční - slouží k výrobě různých izotopů, zářičů i k výrobě sekundárního paliva (tzv. breedery).
- Školní – s nízkým až velmi nízkým výkonem (tzv. nulový), s vysokým stupněm zajištění s ohledem na možnost bez rizika modelově řešit i různé kritové stavy reaktoru či elektrárny. Jsou využívány spolu s trenažéry pro výcvik budoucí obsluhy reaktoru, k průběžnému ověřování jejich znalostí, k řešení různých modelových situací atd.

### Energetické reaktory

Energetické reaktory jsou nejčastěji rozdělovány do skupin podle použitého chladiva a moderátoru. Pokud se reaktor svou fyzikální podstatou nebo parametry liší od obvyklých typů, uvádí se v označení i tato vlastnost (rychlý, pokročilý, vysokoteplotní atd.). Palivo se v označení typu reaktoru neuvádí vzhledem k tomu, že se dosud téměř výhradně používá uran lišící se pouze formou a stupněm obohacení. Tabulka uvádějící nejvíce provozované typy energetických reaktorů je uvedena spolu s jejich procentním zastoupením na obr. 3.11.



BWR	Boiling water reactor	Varný lehkovodní reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor	Rychlý množivý reaktor
GCR	Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	Plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
LWGR, RBMK	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor - Reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj	Vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor (kanálový)
PHWR, CANDU	Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor, Canada Deuterium Uranium	Tlakovou těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PWR, VVER	Pressurized Water Reactor - Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor	Tlakovou vodou chlazený a moderovaný reaktor

Obr. 3.11: Zastoupení jednotlivých typů reaktorů z hlediska instalovaného výkonu v %

Na konci roku 2011 bylo provozováno celkem na 434 jaderných energetických reaktorů s celkovým instalovaným elektrickým výkonem téměř 368 GW a 64 reaktorů bylo ve výstavbě s celkovým výkonem téměř 62 GW (aktualizovaná data PRIS z 5.12.2011). Jednotlivé typy reaktorů jsou z technologických, bezpečnostních i ekonomických důvodů zastoupeny nerovnoměrně. Na obrázku je uvedeno procentní zastoupení provozovaných energetických reaktorů v součtu jejich instalovaných výkonů. Toto rozdělení se v nejbližší budoucnosti zřejmě ještě více změní ve prospěch bezpečných tlakovodních reaktorů (z nově budovaných reaktorů je 83 % tlakovodních).

### Formy jaderného paliva

Jadernými palivy v reaktoru jsou nejčastěji přírodní uran obohacený uranem 235 (1,5 ÷ 5%); přírodní uran (s izotopickým složením 99,276 % U238, 0,718 % U235 a cca 0,004 % U234); směsné palivo MOX (mixed oxide fuel) vyrobené z ochuzeného uranu z obohacovacích závodů a plutonia, které se získává separační z „vyhořelého“ jaderného paliva, popřípadě z vyřazených jaderných hlavic. U tohoto paliva odpadá energeticky náročná fáze obohacování. Ve směsi je 7 % Pu, v případě použití vojenského plutonia cca 5 %) a thorium 232, které se po zachycení neutronu změní na protaktinium a následném  $\beta^-$  rozpadu na dobře štěpitelný U233. Palivo je možné vyrobit ve formě kovu nebo v keramické formě, zpravidla jako oxid, výhledově i jako karbid, nitrid nebo silicid.

**Kovový uran** – používal se především v počátcích jaderné energetiky u grafitem moderovaných reaktorů i u některých reaktorů těžkovodních. Jeho výhodou je dobrá tepelná vodivost, vyšší koncentrace štěpitelných jader a jednodušší přepracování vyhořelého paliva. Taví se však již při teplotě 1133°C a má poměrně malou chemickou odolnost. Vzhledem k těmto nepříznivým vlastnostem se uran v čisté kovové formě v současné době prakticky nepoužívá. Pokud je použití kovového uranu účelné, zlepšují se chemické a tepelné vlastnosti různými přísadami (Cr, Ni, Zr, Mo, Al).

**Keramické palivo** - nejčastěji používaný  $\text{UO}_2$  má řadu výhod: vysoká teplota tavení (2878°C), nereaguje s ostatními materiály, nemá fázové přeměny. Nevýhodou keramického paliva je jeho nižší tepelná vodivost, nižší koncentrace jader a z toho vyplývající potřeba vyššího obohacení. Keramická paliva se z práškové formy lisují do tablet (pelet), pak se spékají a velmi přesně opracovávají. Vloží se do povlakové trubky, vakuově vysuší, naplní ochranným plynem pod tlakem a hermeticky uzavřou (zavaří).

Samotná peleta tvoří tzv. první ochrannou bariéru, pokud nedojde k jejímu poškození (tavení) zůstává v ní 99 % radioaktivních látek.

### Palivové elementy

Vlastní palivo uzavřené v ochranném obalu zabraňujícím úniku štěpných produktů včetně příslušných komponent (např. plnicí plyn, přítlačné pružiny zajišťující bezpečnou dilataci a minimální ztráty neutronů mezi palivovými tabletami, aj.) nazýváme palivový element. Palivový element je často ve vztahu k jeho tvaru nazýván též palivový prut, proutek, palivová tyč nebo peleta (kulový tvar, používaná jako volně sypané palivo). Palivový element je tedy základní, hermeticky uzavřený, palivový stavební prvek, ze kterých se skládá palivový soubor. Na kvalitě palivo-

vých elementů a jejich pokrytí závisí bezpečný provoz reaktoru. Porušení těsnosti pokrytí paliva znamená prolomení druhé ochranné bariéry a možnost vyšší kontaminace chladiva radioaktivními štěpnými produkty.

Poruchy pokrytí se eliminují vysokou kvalitou povlakových materiálů, dokonalem vakuovým vysušením před hermetickým uzavřením, vhodně zvoleným tlakem plynu v povlakové trubce a nízkými trendy změn výkonu reaktoru. Povlakové materiály musí být vyrobeny z materiálů vyhovujícím těmto požadavkům:

- nízká absorpcie neutronů, nízká sekundární reaktivita, stálost materiálu
- vysoký součinitel tepelné vodivosti, nízký součinitel tepelné roztažnosti resp. minimální rozdíl součinitelů tepelné roztažnosti paliva a povlakové trubky
- maximální hermetičnost
- vysoká mechanická pevnost i při vysokých teplotách
- vysoká odolnost proti korozi i erozi ze strany chladiva i paliva
- dobrá tažnost a svařitelnost
- cenově příznivý

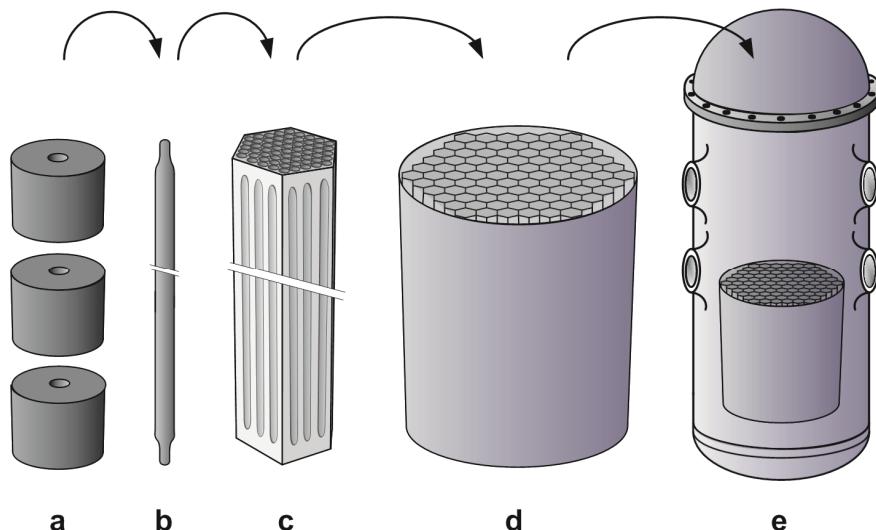
## Palivové soubory

Prakticky všechny současné reaktory v jaderných elektrárnách jsou heterogenní, tzn., že palivo musí být hermeticky odděleno od chladiva a moderátoru. Palivo je v energetických reaktorech umístěno v palivových souborech složených z jednotlivých palivových elementů. Je to vlastně nejmenší komplex palivových elementů, který se do aktivní zóny vkládá a z ní vyjímá jako celek.

Palivový soubor uložený v plechovém pouzdře, kterým prochází chladivo z jednoho konce (obvykle dolního) podél palivových elementů na konec druhý a odtud zpět do nádoby reaktoru, nazýváme často palivová kazeta. Palivová kazeta je výhodnější z hlediska rovnoměrného proudění chladiva, radiálního rozložení teploty v aktivní zóně i z hlediska konstrukce. Její nevýhodou je zvýšená parazitní absorpcie neutronů a v případě zvýšení hydraulického odporu především v okolí vstupu chladiva do kazety snížení jeho průtoku a následné zhoršení chlazení. Jejich používání se u moderních JE snížuje. Konstrukce palivových souborů i pokrytí palivových elementů musí umožňovat bezpečný a spolehlivý provoz, dopravu, montáž, výměnu i skladování. Součástí palivových souborů jsou mj. distanční mřížky, technologické kanály určené pro regulační systémy, kanály pro vnitroreaktorová měření (teplota, neutronový tok), hlavice, koncovky aj.

Nové palivové soubory obsahující jen neprepracovaný uran, ať přírodní nebo obohacený, jsou prakticky neaktivní. Lze s nimi pracovat bez ochranného stínění a chlazení. Palivové články obsahující prvky získané přepracováním „vyhořelého“ paliva např. plutonium Pu239 a Pu241 jsou však již radioaktivní a musí s nimi být zacházeno jako s aktivním materiélem. Výroba palivových souborů je náročná z hlediska přesnosti, dodržení projektovaných parametrů, možného poškození povlaku či konstrukce a zanesení nečistoty.

Při jejich přepravě a skladování je nutné dbát toho, aby nemohla vzniknout kritická soustava ani při havarijním stavu (např. shlukem velkého množství palivových článků a jejich zaplavení vodou). Také vkládání a vyjmání paliva z reaktoru musí být prováděno velmi pečlivě, aby nedošlo k poškození palivových článků, pokrytí paliva nebo vodicího zařízení (váha jednoho souboru je až několik set kilogramů). K tomu slouží např. u tlakovodních reaktorů tzv. zavážecí stroj s přesným naváděcím systémem řízeným počítačem a kontrolovaným pomocí kamer průmyslové televize.



Obr. 3.12: Sestavení aktivní zóny a její umístění: a) palivová tableta (peleta), b) palivový element, c) palivový soubor, d) sestavení aktivní zóny a její umístění v tzv. koši, e) umístění koše aktivní zóny v tlakové nádobě

### Vyhřívání a reprodukce paliva

Během kampaně reaktoru (doba, po kterou je reaktor v provozu bez výměny nebo přeskupení paliva, délka kampaně reaktoru je dána druhem paliva a způsobem provozu) klesá koncentrace štěpitelných jader v palivu, dochází k tzv. **vyhřívání** paliva. Za určitou dobu tak vzhledem k poklesu zásob reaktivity v kompenzačních a regulačních orgánech nelze reaktor provozovat (udržet v kritickém stavu). Jak bylo v úvodu kapitoly zmíněno, vznikají v palivu neštěpnou absorpcí neutronu nové štěpitelné materiály. Toto sekundární palivo sníží rychlosť poklesu koncentrace všech štěpitelných jader a prodlužuje tak schopnost udržení řetězové reakce. Podíl nově vzniklých štěpitelných jader k počtu rozštěpených jader z původního paliva se nazývá **koeficient reprodukce paliva b (konverzní faktor)**. Který lze odvodit z již dříve definovaných součinitelů:

$\mu$  ..... součinitel reprodukce neutronů, určující počet rychlých neutronů uvolněných absorpcí jednoho tepelného neutronu

$\epsilon$  ..... součinitel rozmnožení na rychlých neutronech

f..... součinitel využití tepelných neutronů

Pro ustálený stav reaktoru musí platit bilance neutronů:

$$\eta \cdot \varepsilon - 1 - (1-f) = b \Rightarrow b = \eta \cdot \varepsilon + f - 2 \quad (3.35)$$

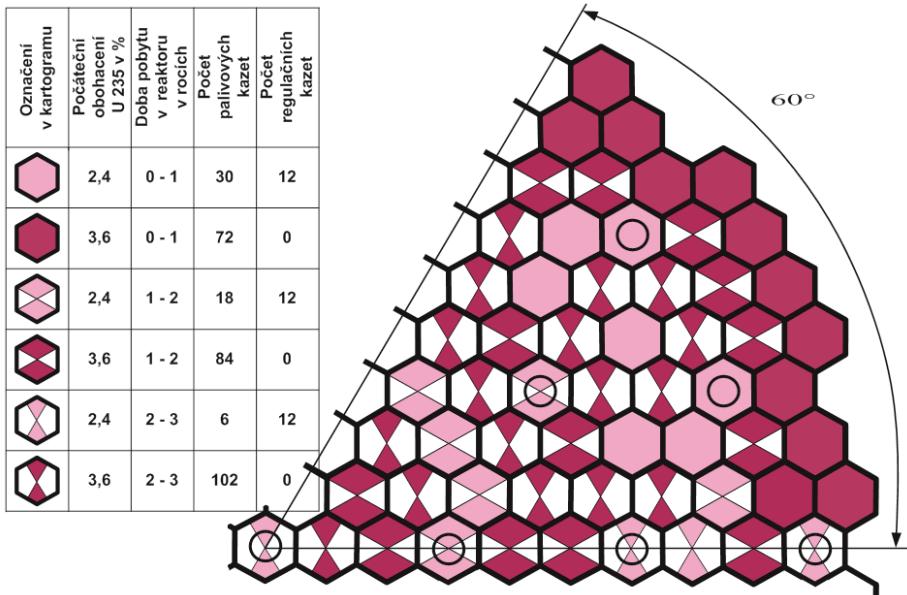
kde průměrný počet neutronů vzniklých na jedno štěpení tepelným neutronem  $\eta \cdot \varepsilon$  bez jednoho neutronu potřebného na další štěpení a bez neutronů parazitně absorbovaných v aktivní zóně ( $1-f$ ) nám dává teoretickou možnost počtu neštěpných absorpcí v U238 nebo v Th232 a jejich transmutaci na sekundární štěpný materiál, tj. na Pu239, Pu242 a U233. U tlakovodních reaktorů tak například můžeme postupně rozštěpit víc jader uranu než činí původní obohacení. Z přírodního uranu s obsahem 0,712 % štěpitelného U235 můžeme teoreticky rozštěpit téměř 7 % původního množství všech jader uranu, prakticky ztrátami při následných přepracování pouze asi 1 až 2 %. U rychlých reaktorů jsou tyto poměry podstatně příznivější – teoreticky lze využít pro štěpení veškerý uran, prakticky asi 50 až 60 %.

### Výměna paliva a uzavření palivového cyklu

V aktivní zóně reaktoru, vzhledem k jejím rozměrům, uspořádání a hustotě palivových elementů i obohacení, může být jen určité množství paliva. Při jeho přebytku hrozí nebezpečí rozšíření jaderné reakce, při jeho nedostatku nelze jadernou reakci samovolně udržet a zaniká. Množství paliva pro bezpečné udržení řetězové reakce se nazývá kritické množství. Jak jsme dříve uvedli, dochází během provozu reaktoru k vyhořívání paliva a ke vzniku parazitních absorbérů - jedů. Mění se tedy neutronová bilance. K udržení řetězové reakce resp. kritického množství je nutno buď průběžně měnit palivo (to lze např. u kanálových typů reaktorů nebo u vysokoteplotních reaktorů s "vsypávaným" palivem), nebo zpočátku kampaně vložit do aktivní zóny více paliva (nadkritické množství) a nepříznivý přebytek reaktivity eliminovat přídavnými absorbéry, jejichž množství lze během provozu reaktoru měnit (snižovat). K tomuto účelu se používají jednak tzv. "vyhořívající absorbéry" (absorbéry v konstrukčních částech palivových článků, jejichž účinný průřez se během kampaně snižuje), dále absorbéry rozpuštěné v chladivu nebo moderátoru (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), jejichž koncentrace se během kampaně snižuje odseparováním, a tzv. kompenzační články (absorbéry v pevném provedení, které lze podle potřeby zasouvat do aktivní zóny). Pokud palivo celkově "vyhoří" na určitý stupeň, blížící se kritickému množství bez absorbéra, je třeba palivo v aktivní zóně vyměnit a přeskupit.

Informace o hloubce vyhoření i rozložení vývinu tepla po objemu aktivní zóny jsou velmi důležité z hlediska efektivního provozu reaktoru a tím i celé elektrárny. Proto se provádí přesné fyzikálně-jaderné výpočty optimálního obohacení paliva a jeho konfigurace v reaktoru s ohledem na teplotní, mechanické a materiálově-strukturní důsledky. U tlakovodních reaktorů se např. pro rovnoměrnější rozložení hustoty neutronového toku i vývinu tepla v aktivní zóně umisťovaly palivové soubory s nejvyšším obohacením na její okraj a směrem ke středu se obohacení snižovalo. V současnosti se nejvíce obohacené palivo na okraj aktivní zóny neumísťuje s ohledem na prodlužování životnosti tlakové nádoby i zmenšeného úniku neutronů ze soustavy. Při plánované částečné výměně paliva se palivové soubory podle

stupně vyhoření přeskupují nebo nahrazují čerstvým palivem. Vyjmuté soubory se uloží do bazénu vyhořelého paliva poblíž reaktoru, kde postupně dochází ke snižování jejich zbytkového výkonu způsobeného rozpady štěpných fragmentů.



Obr. 3.13: Kartogram 1/6 aktivní zóny reaktoru VVER

V reaktorech VVER bývá palivo během tříleté až pětileté kampaně vícekrát překládáno, tzn. že projde až pěti pozicemi v aktivní zóně. Při změně pozice je palivočí článek kontrolován jako celek, zda nedošlo u některého z jeho palivočích elementů k porušení pokrytí. První příznaky porušení pokrytí některého z článků se projeví kontaminací chladiva už při odstavování reaktoru (velký pokles tlaku prostředí, ve kterém se palivočí články nacházejí, tj. z provozního na atmosférický - až o 15 MPa). Nelze však jednoduše určit, ve kterém článku k poškození došlo. Kontrola jednotlivých článků probíhá např. ve speciálním hermetickém kontejneru zaplněném vodou snižováním jejího tlaku minimálně o 0,5 MPa a následnou kontrolou aktivity a kontaminace vody.

Příklad kartogramu 1/6 aktivní zóny reaktoru VVER 440 včetně obohacení a časového harmonogramu pobytu v reaktoru z počátku provozu JE, kdy se soubory s nejvíce obohaceným palivem vkládaly na okraj AZ, je uveden na obr. 3.13. Aktivní zóny reaktorů jsou zpravidla děleny do několika středově souhlasných sektorů, proto stačí uvést jeden sektor.

Vyrořelé jaderné palivo u reaktorů moderovaných vodou (asi 85 % všech energetických reaktorů) obsahuje přibližně:

- 95 % jaderného paliva s nižším obsahem U235
- 4 % radioaktivních štěpných produktů
- 1 % sekundárního paliva (Pu239)

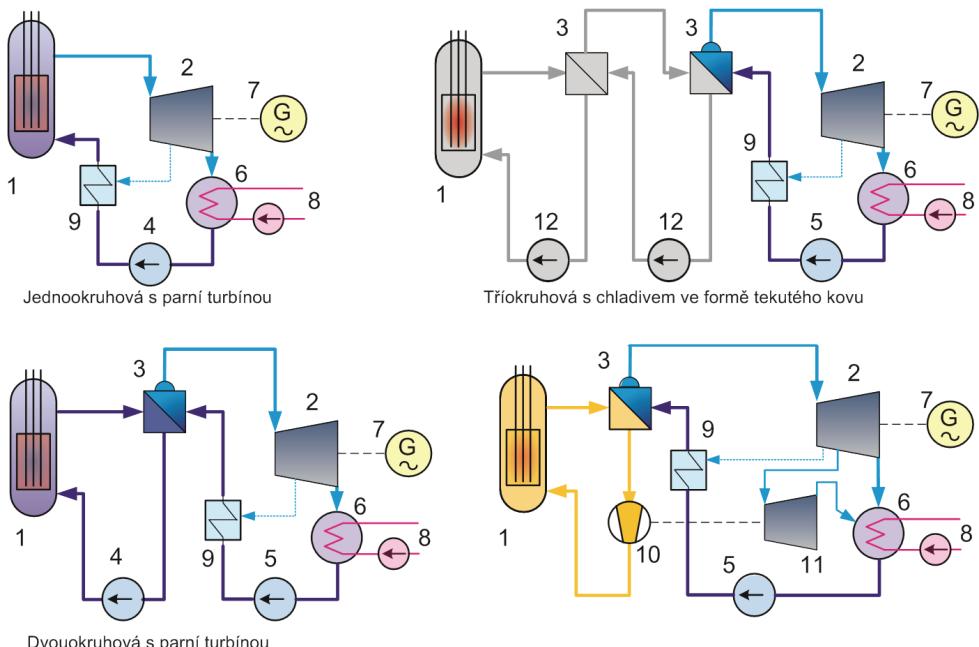
Býlo by tedy účelné vyhořelé palivo přepracovat a opět využít. Faktorem, který přepracování znesnadňuje a ekonomicky znevýhodňuje, je vysoká radioaktivita i přítomnost toxického plutonia. Poměrný zbytkový výkon uvolňovaný zářením  $\beta$  a  $\gamma$  z paliva v čase  $T$  po vyjmutí z reaktoru lze pro  $T > 30$  s přibližně vyjádřit empirickým vztahem:

$$p_z T = 0,066 [T^{-0,2} - (T + T_0)^{-0,2}] \quad (3.36)$$

kde  $T_0$  je čas, po který bylo palivo ozařováno v reaktoru při vztažné hodnotě výkonu  $p_z = 1$ .

Vyhořelé palivo je proto nutno po určitou dobu skladovat za stálého nuceného chlazení, zpočátku zpravidla v blízkosti reaktoru v bazénu vyhořelého paliva a později v meziskladech mimo hlavní výrobní blok, buď v tzv. vymíracích nádržích (v bazénech pod hladinou vody, nebo ve speciálních kontejnerech) po dobu, než poklesne aktivita krátkodobých radionuklidů. Také během manipulace, dopravy a případného přepracování musí být dodržován přísný bezpečnostní režim.

### Základní schémata a koncepce jaderných elektráren



Legenda: 1) reaktor, 2) turbína, 3) tepelný výměník, 4) oběhové čerpadlo, 5) napájecí čerpadlo, 6) kondenzátor, 7) generátor, 8) chladící okruh, 9) přihřívák, 10) oběhové dmychadlo, 11) pomocná turbína, 12) sodíkové čerpadlo

Obr. 3.14: Základní typy JE dělené podle počtu okruhů

Jaderné elektrárny mají (především v závislosti na použitém reaktoru) různé uspořádání a parametry hlavních technologických okruhů, tzv. tepelné schéma. Tepelná schémata lze dělit podle více kritérií. Zpravidla se dělí podle počtu okruhů teplonosného média mezi reaktorem a turbínou, typu chladiva a typu pracovního média v turbíně. Lze navrhnut mnoho kombinací, v praxi se však osvědčilo pouze několik základních koncepcí jaderných elektráren, o kterých se stručně zmíníme:

- jednookruhová s lehkou vodou jako chladivem a s parní turbínou (elektrárny s varnými reaktory typu BWR a LWGR/RBMK)
- dvojokruhová s kapalným chladivem (těžkou nebo lehkou vodou) a s parní turbínou (elektrárny s reaktory typu PHWR, PWR)
- dvojokruhová s plynným chladivem ( $\text{CO}_2$ ) a s parní turbínou (elektrárny s reaktory typu GCR, Magnox)
- tříokruhová s vloženým okruhem a parní turbínou, chladivem reaktoru je tekutý kov (sodík), teplosměnnou látkou vloženého okruhu je sodík nebo jeho slitina (elektrárny s rychlými reaktory - FBR)

#### **Základní specifika elektráren hlediska počtu okruhů teplonosného média mezi reaktorem a turbínou**

**Jednookruhové elektrárny.** Chladivo reaktoru je zároveň pracovní látkou v turbíně. Tato koncepce se používá především u varných reaktorů. Jednookruhové elektrárny s plynovými turbínami se v jaderné energetice více neuplatnily, neboť k dosažení účinnosti srovnatelné s parními turbínami musí mít plynová poměrně vysokou teplotu pracovního media (až  $800^\circ\text{C}$ ). Efektivní provoz reaktorů s tak vysokými teplotami je s ohledem na technologickou náročnost i na bezpečnost problematický.

Výhodou jednookruhového uspořádání je jednoduší tepelný cyklus i jeho vyšší účinnost, neboť odpadají ztráty vznikající v tepelných výměnících a s nimi souvisejícími technologiemi. Pára na vstupu do turbíny tak může mít vyšší parametry.

Nevýhodou jednoho okruhu je průchod chladiva obsahujícího radioaktivní látky všemi hlavními částmi jaderné elektrárny. To vyvolává nutnost zvláštních bezpečnostních opatření i zvýšení nároků na spolehlivost a životnost. Zařízení strojovny je trvale kontaminováno a během provozu je zpravidla nepřístupné. Celkové investiční náklady se tak i přes úspory vzniklé jednodušším schématem zvyšují.

**Dvojokruhové elektrárny.** Jsou nejužívanějším typem jaderných elektráren. Separovaný primární okruh umožňuje použití různých druhů chladiva reaktoru a řeší z velké části otázku přítomnosti radioaktivních látek mimo reaktorovou část. Tepelný výměník - parní generátor vyrábí páru, se kterou je možno nakládat podobně jako v konvenční tepelné elektrárně. Ve strojovně jsou podstatně jednoduší bezpečnostní systémy než u jednookruhových elektráren a jsou zde umístěny jen pro případ porušení těsnosti parního generátoru a úniku aktivních látek z primárního okruhu do sekundárního.

**Tříokruhové elektrárny.** Tří okruhů se využívá s ohledem na zvýšenou bezpečnost u jaderných elektráren s rychlými reaktory, tj. s reaktory chlazenými tekutým kovem (sodíkem).

tým kovem (Na). Kromě primárního a sekundárního okruhu je použit ještě další, tzv. vložený okruh. Je nutný především (včetně opatření) ze dvou důvodů:

- 1) při průniku páry ze sekundárního do primárního okruhu netěsnostmi ve výměníku (tlak páry je vyšší než tlak sodíku) by mohla vysoká afinita sodíku způsobit havárii. Proto se ve vloženém okruhu jako teplo nosné látky používá také tekutý sodík nebo jeho směs. Tím se kritické místo (přechod sodík / voda) přenese do oblasti sekundárního okruhu.
- 2) bezpečnější izolace radioaktivních izotopů (Na24) obsažených v kovovém chladivu (vznikají absorpcí při průchodu chladiva aktivní zónou). Případnému přechodu se zamezí vyšším tlakem ve vloženém okruhu než v primárním.

Konkrétní tepelná schémata se prakticky liší u všech elektráren. Jejich koncepcie závisí na typu reaktoru, jeho parametrech, způsobu zařazení elektrárny do diagramu zatížení, požadavcích na regulaci přenosové soustavy, umístění elektrárny, možnosti chlazení aj. Jaderné elektrárny, na rozdíl od tepelných, se provozují zásadně s izolovaným cyklem. Důvodem je ochrana okolí elektrárny před únikem nebezpečných zplodin. Vyššího využití energie v jaderném palivu je možné dosáhnout v uzavřeném palivovém cyklu, kdy dochází k přepracování tzv. „vyhořelého paliva“. Uzavřený cyklus lze u jaderných elektráren uskutečnit vzhledem k absenci chemické reakce (spalování) a tím i podstatné změně složení paliva.

### **3.2.1. Základní specifika elektráren z hlediska použitého chladiva**

#### **Jaderné elektrárny s reaktory chlazenými vodou**

Elektrárny s reaktory chlazenými vodou tvoří převážnou část provozovaných jaderných elektráren, asi 95 %. Do této skupiny patří elektrárny s tlakovodními reaktory moderovanými lehkou vodou, těžkou vodou nebo grafitem a elektrárny s varnými reaktory moderovanými vodou nebo grafitem. Jejich společným rysem je teplota páry pohybující se těsně nad mezí sytosti. Vyrovnanou bilanci mezi výrobou a odebranou párou z reaktoru lze zajistit v případě potřeby regulačním ventilem řídícím obtok páry kolem turbíny do kondenzátoru.

Nevýhodou cyklu se systou párou je její zvýšená vlhkost a z toho vyplývající nutnost průběžně separovat a přihřívat páru. Další nevýhodou je poměrně nízká účinnost tepelného oběhu a velké průtočné množství páry.

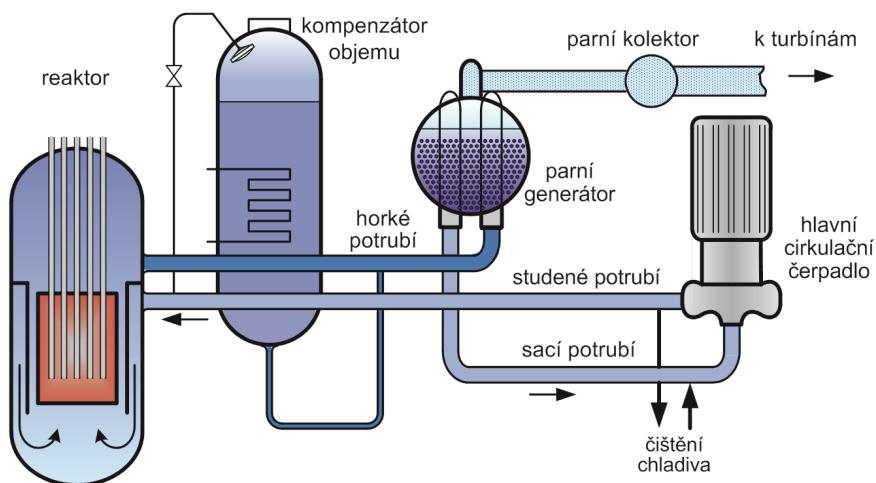
#### **Elektrárny s tlakovodními reaktory**

Tyto elektrárny s reaktory chlazenými a moderovanými obyčejnou (lehkou) tlakovou vodou jsou nejrozšířenějším typem jaderné elektrárny. Jejich podíl tvoří asi 62 % veškerého instalovaného výkonu v jaderných elektrárnách. Pokud zahrneme do této skupiny i elektrárny s tlakovodními reaktory kanálového typu, chlazené i moderované těžkou vodou, jejich podíl vzroste na téměř 73 %. Vzhledem k poměrně vysoké životnosti tlakovodních elektráren, jejich spolehlivosti, současné rozestavěnosti i projektovým záměrům bude mít tento typ elektráren výsadní postavení ještě několik desítek let. Také základní koncepce tlakovodní elektrárny se prakticky od spuštění prvního demonstračního bloku Yankee v roce 1961 nezměnila.

la a lze říci, že se v poslední době značně standardizovala. Také Československá a poté Česká republika se orientovala po počátečním experimentu s elektrárnou A1 na bezpečné tlakovodní reaktory. V Dukovanech jsou v prakticky bezproblémovém provozu čtyři bloky s reaktory VVER 440 od roku 1985, a na jihu Čech elektrárna Temelín se dvěma bloky VVER 1000.

Elektrárny s tlakovodními reaktory jsou zásadně dvojokruhové. Tlak v primární části musí bezpečně zaručovat kapalnou fázi chladiva i při zvýšené teplotě vzniklé například nerovnoměrným rozložením výkonu v aktivní zóně. Objem páry vznikající na stěnách v palivových kanálech (kanálech) nesmí překročit určitou mez (asi 1 %).

Chladivo proudí z reaktoru tzv. horkou větví do parního generátoru, kde předává část tepelné energie sekundárnímu okruhu. Zpět se vrací tzv. studenou větví přes oběhová čerpadla do vrchní části reaktoru. Odtud prochází mezi nosným válcem aktivní zóny a tělesem tlakové nádoby směrem ke dnu reaktoru. Zde se chladicí kapalina mísí, otáčí svůj směr a vnitřkem nosného válce rovnoramenně vstupuje do aktivní zóny. V palivových kanálech odnímá teplo vzniklé při štěpení a vrací se zpět do nátrubku horké větve. Počet chladicích smyček se pohybuje od 2 do 6. Tepelný výkon na smyčku bývá u posledních typů elektráren 750 až 950 MW. Tlak v primárném okruhu se podle výkonů a teploty chladiva pohybuje u jednotlivých reaktorů v rozmezí 10 až 16 MPa, výstupní teplota chladiva z reaktoru v rozmezí 270 až 335°C. Střední ohřátí chladiva v reaktoru je při nominálním výkonu 20 až 35°C.

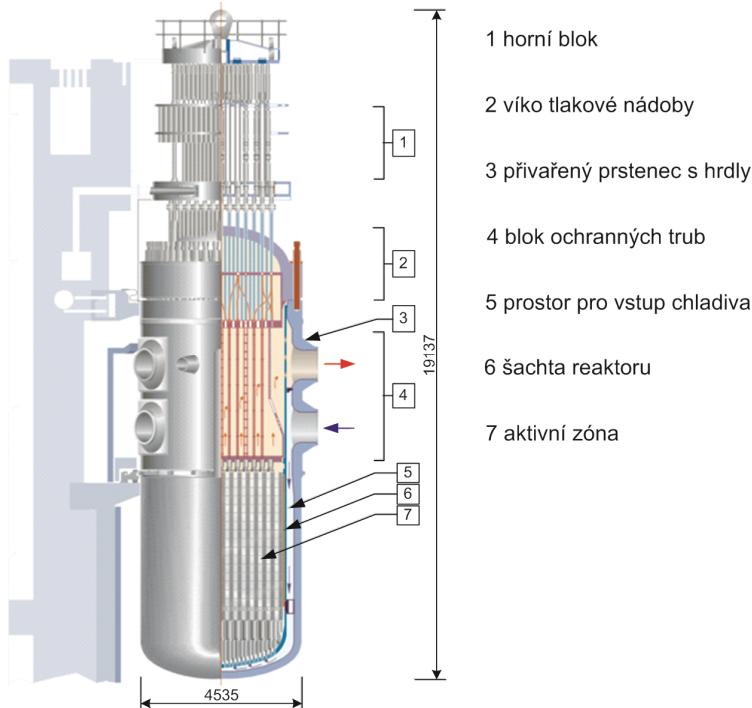


Obr. 3.15: Hlavní komponenty primárního okruhu tlakovodní elektrárny

Reaktor je heterogenní, umístěný ve vertikálně orientované tlakové nádobě, výhradně válcového tvaru. Nádoba je svařena z prstenců a půlkruhového nebo eliptického dna. Na vrchní straně je odnímatelné víko obdobného tvaru jako dno. Vnitřní stěna je zpravidla opatřena navařenou výstelkou z kvalitního nerezového materiálu. Během provozu je nádoba vystavena působení vysokých tlaků, teplot i záření. Záření způsobuje aktivitu nádoby a podporuje její korozii, má i nepříznivý vliv na mechanické vlastnosti materiálu změnou jeho krystalické mřížky (vzrůstá křehkost). Výměna nádoby po zahájení provozu je vzhledem k její radioaktivitě

prakticky nemožná a musí proto splňovat přísná kriteria kvality, spolehlivosti a životnosti, neboť je jedním z hlavních technologických celků limitujících svou životnost i životnost elektrárny. V současnosti jsou již vypracovány a vyžívány technologie pro tzv. vyžíhání nádoby reaktoru a snížení její křehkosti bez jejího vyjmutí z reaktorové šachty.

V tlakové nádobě je umístěn vyjmíatelný nosný válec aktivní zóny, tzv. koš. V koši jsou zasunuty ve vertikální poloze palivové, regulační, popř. i havarijní a kompenzační soubory (kazety). Soubory mají šestihranný nebo čtvercový profil a jejich rozmístění v reaktoru je určeno kartogramem. Soubory s nejvíce obohaceným uranem se dříve zpravidla s ohledem na rovnoměrnější rozdělení teploty ukládaly na okraj aktivní zóny. V současnosti se s ohledem na neutronovou bilanci (více neutronů unikne ze soustavy) a na zatížení nádoby neutronovým tokem ukládají více obohacené soubory do vnitřní části AZ.



**Obr. 3.16: Podélnej řez reaktorem VVER-1000**  
**(Zdroj: [cs.wikipedia.org/wiki/VVER](https://cs.wikipedia.org/wiki/VVER))**

Palivové soubory sestávají především z nosného pláště nebo vodicí konstrukce a z palivových elementů uložených v distančních mřížkách. U většiny reaktorů jsou v palivových souborech i trubičky s pohyblivě umístěnými absorpčními tyčkami umožňujícími regulaci výkonu - tzv. klastry, a trubičky pro vnitroreaktorová čidla měření teploty a neutronového toku. Především u starších typů reaktorů jsou používány samostatné regulační články, jejichž spodní část je palivovým článkem. Z bezpečnostních důvodů je vždy absorpční část nad palivovou. K regulaci (např. při snižování výkonu) pak dochází vysouváním palivové části zpravidla do spodní-

ho prostoru nádoby reaktoru a zároveň zasouváním absorpní části do aktivní zóny. Tím je neutronový tok současně snižován jak úbytkem štěpného materiálu, tak zvýšenou absorpcí tepelných neutronů. Poháněny jsou buď elektromotorem přes pastorek a ozubenou tyč, systémem elektromagnetů a západek, nebo krokovými motory. Rychlosť jejich posuvu je dána funkcí, kterou právě plní. Při havarijním stavu padají prakticky vlastní vahou (jen s mírným tlumením) do aktivní zóny. Také při výpadku napájení jejich pohonů automaticky padají do aktivní zóny a odstavují reaktor.

Palivové elementy (tyče, pruty) jsou složeny z přesně lisovaných a opracovaných tablet oxidu uraničitého  $\text{UO}_2$  uložených hermeticky v povlakové trubce ze zirkonové slitiny. Palivové tablety vlivem vzniku stěpných produktů během vyhořívání nabývají na objemu (bobtnají). Proto je v horní části povlakové trubky volný prostor (asi 10 % celkového). V tomto prostoru je instalována pružina z nerezové oceli stlačující sloupec palivových tablet směrem ke spodní části a umožňující jeho expanzi až o 20 cm. Volný prostor slouží zároveň jako jímkou pro plynné produkty štěpení. Palivová tyč u tlakovodních reaktorů je naplněna heliem o tlaku 0,7 až 2 MPa. Po vyhoření paliva je vlivem štěpných produktů (především plynných) tlak v tyči až 16 MPa. S ohledem na zvětšování objemu i vyšší teplotu je v některých peletách v ose vylisován otvor nebo vybrání.

Výměna paliva za provozu je u tlakovodních reaktorů prakticky nemožná. Důvodem je především vysoký tlak v nádobě reaktoru a s tím související komplikace při konstrukci víka a s utěsněním otvorů na výměnu paliva. Dalším důvodem je velká změna rozložení neutronového toku v aktivní zóně po vytažení palivového článku a zaplnění uvolněného místa vodou. Před výměnou paliva se tedy musí reaktor odstavit, snížit tlak a otevřít víko tlakové nádoby. U elektráren s tlakovodními reaktory se palivo vyměňuje tzv. mokrou cestou, tzn. že se zaplaví šachta reaktoru, spojovací kanál i bazén paliva do výše umožňující přesun palivových článků (kazet) mezi bazénem a reaktorem pod hladinou vody.

## **Elektrárny s varnými reaktory**

Podobně jako elektrárny s tlakovodními reaktory generují sytu páru. Rozdíl je v tom, že chladicí voda u varných reaktorů se v horní části AZ ohřívá nad bod varu pro příslušný tlak a po separaci a vysušení používá přímo k pohonu turbíny. Má tedy značně jednodušší tepelný cyklus. Je to druhá nejužívanější koncepce jaderných elektráren. Spolu s elektrárnami s varnými reaktory kanálového typu tvoří 23 % podíl celkového instalovaného výkonu jaderných elektráren.

Většina varných reaktorů má tlakovou nádobu naplněnou obyčejnou (lehkou) vodou do bezpečné výšky nad aktivní zónu. Vzhledem k tomu, že voda plní zároveň i funkci moderátoru, nesmí překročit hmotnostní obsah páry ve vodě (v oblasti aktivní zóny) určitou hranici (asi 14 %). Z tohoto důvodu se u varných reaktorů používá nucený oběh chladiva, buď vnitřní, vnější, nebo hybridní. Parovodní směs vystupuje z aktivní zóny do cyklónových separátorů, kde se většina vody odloučí a pokračuje jako vlhká pára (asi 5 %) do žaluziových separátorů, které páru dosuší. Oba typy separátorů jsou umístěny v tlakové nádobě nad aktivní zónou. Pára o vlhkosti nižší než 0,1 % je zavedena do vysokotlaké části turbíny. Regulovat výkon reaktoru je možné, vzhledem k velkému zápornému teplotnímu koeficientu reaktivit, i změnou intenzity nuceného oběhu chladiva. Veškeré pohony regulačních tyčí,

vývody měřicích čidel a zařízení k výměně palivových článků musí být umístěny ve spodní části tlakové nádoby nebo pod jejím dnem. Toto opatření komplikuje konstrukci reaktoru, ale je nezbytné vzhledem k umístění separátorů u víka nádoby.

Výhodou těchto elektráren oproti tlakovodním je vyšší účinnost tepelného cyklu, nižší tlak v nádobě reaktoru a nižší průtok chladiva reaktorem.

Nevýhodou tohoto typu elektrárny je především radioaktivní kontaminace všech technologických částí, jimiž proudí chladivo. Kontaminace páry je poměrně nízká, neboť přeměnou vody v páru se sníží její radioaktivita v průměru o tři řády, přesto je aktivita ve strojovnách jednookruhových elektráren vyšší než u dvojokruhových a je nutné provést bezpečnostní a hygienická opatření (odsávání z míst možných úniků, speciální upravky atd.).

Samostatnou skupinu elektráren s varnými reaktory tvoří elektrárny kanálového typu moderované grafitem. Tyto elektrárny jsou používané pouze v zemích bývalého Sovětského svazu. Nejznámější je tzv. černobylský typ s reaktory RBMK. Jak název říká (RBMK - reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj /kipjaščij/), jde o elektrárny s velkým výkonem. Typ RBMK 1500 uvedený do provozu v roce 1983 v Ignolinu byl reaktorem s největším výkonem na světě. Do definitivního zastavení jejich vývoje a výroby počátkem devadesátých let byly projektovány i elektrárny s tepelným výkonem reaktoru 6500 MW, což při jejich poměrně vysoké termické účinnosti znamenalo 2400 MW elektrického výkonu.

V reaktorech typu RBMK se místo tlakové nádoby používá tlakových varných kanálů, u některých starších typů reaktorů kanálů rozdělených do dvou skupin (varných a přehřívaných). Kanály procházejí aktivní zónou válcového tvaru složenou z grafitových bloků, ve kterých je otvor pro palivový kanál nebo absorpční tyč. Aktivní zóna je obložena reflektorem složeným z plných grafitových bloků. U reaktoru RBMK 1000 je v aktivní zóně 1693 palivových kanálů a 179 regulačních kanálů. Tloušťka bočního grafitového reflektoru je 90 cm, horního a spodního axiálního reflektoru 50 cm, hmotnost grafitu 1760 tun. Palivové a regulační kanály procházejí reflektorem, spodní a horní ocelovou konstrukcí a betonovým stíněním. Na horních koncích jsou připojeny ke sběrným trubkám odvádějícím páru do bubnových separátorů. Na spodních koncích je přívod napájecí vody o teplotě 270°C a tlaku 8 MPa. Voda na výstupu z kanálu má teplotu sytosti 284°C a odpařuje se. Parní obsah v kanále je omezen a kontrolován s ohledem na nepříznivý vliv snížené koncentrace vody na reaktivitu. Primární okruh má dvě hlavní chladicí smyčky, každá s 846 (847) technologickými kanály, dva bubnové separátory a 4 hlavní oběhová čerpadla. Ze separátorů jde pára do parního kolektoru a k oběma turbínám.

Výhodou tohoto typu oproti dříve popsanému typu varného reaktoru je zejména možnost výměny paliva za provozu, dále odpadá tlaková nádoba a vzhledem k vysokému množství technologických kanálů i možnost jejich sériové výroby.

Nevýhodou je značně komplikovaný rozvod chladicí vody a páry, velký počet spojů - kritických míst. Další nevýhodou je velký objem aktivní zóny a téměř dvojnásobné investiční náklady než u elektráren s tlakovodními reaktory o stejném výkonu.

## **Elektrárny s plynem chlazenými reaktory**

Elektrárny s reaktory chlazenými plynem lze s ohledem na odlišnou technologii i tepelné schéma rozdělit na elektrárny s nízkoteplotními, pokročilými a vysokoteplotními reaktory.

### **Elektrárny s nízkoteplotními reaktory**

Jsou koncipovány jako dvojokruhové s chladivem CO<sub>2</sub>. Palivem je přírodní kovový uran. Moderátorem je vzhledem k použitému chladivu grafit. Nízké dovolené provozní teploty kovového uranu (asi 650°C), spolu s pokrytím slitinami hořčíku, dovolují provoz jen s poměrně nízkými teplotami plynu na výstupu z reaktoru (asi 360 až 410°C). To má za následek poměrně komplikovanou konstrukci parního generátoru a nižší účinnost tepelného cyklu (25 až 30 %). Tyto elektrárny resp. jejich reaktory jsou známé pod označením Magnox.

Výhodou těchto elektráren je možnost použití přírodního uranu jako paliva a tedy nezávislost na obohacovacích závodech. Další výhodou je vysoký součinitel reprodukce paliva a poměrně vysoká bezpečnost.

Nevýhody vyplývají z menší moderační schopnosti grafitu a tím i velké aktivní zóny. Aktivní zónu s těmito rozměry a s ohromnou hmotností grafitu lze umístit jen do nádoby z předpjatého betonu. To má za důsledek i vysoké investiční náklady. Nepříznivý je i příkon primárních oběhových dmychadel, který spotřebuje až 15 % vyrobené elektrické energie. Další nevýhodou je malé vyhoření paliva 3 až 4 MWd/kg, (vzhledem k nízkému obsahu U235) a z toho plynoucí nutnost měnit palivové články za provozu. Tyto nevýhody mají vliv i na zvýšené provozní náklady.

V šedesátých letech minulého století se především z ekonomických důvodů upustilo od další výstavby elektráren s reaktory tohoto typu.

### **Elektrárny s pokročilými reaktory**

Po zkušenostech s provozem elektráren s nízkoteplotními reaktory byl navržen a realizován tzv. pokročilý typ (AGR). Tento reaktor používá jako palivo mírně obohacený uran (1,5 až 2,5 %) ve formě kysličníku uraničitého. Povlakovým materiálem je speciální nerezová ocel, a tak je možné dosáhnout podstatně vyšších teplot. Teplota CO<sub>2</sub> na výstupu z reaktoru dosahuje až 600°C. Termická účinnost se zvýšila až na 40 % a vyhoření paliva je asi 20 MWd/kg. Aktivní zóna je proto podstatně menší. Primární okruh je řešen tzv. integrálním uspořádáním - je uložen včetně parogenerátorů a dmychadel spolu s reaktorem v tlakové nádobě s předpjatého betonu, pouze pohony dmychadel jsou umístěny vně. Teplota v jednotlivých kanálech se reguluje nastavitelnými clonami, které řídí průtočné množství chladicího plynu.

Přestože tyto elektrárny mají podstatně příznivější parametry než předcházející typ, nepočítá se v současnosti s jejich další výstavbou.

### **Elektrárny s vysokoteplotními reaktory**

Elektrárny s vysokoteplotními reaktory jsou navrhovány jako dvouokruhové. Jako palivo lze použít silně obohacený uran ve formě částeček oxidu uraničitého nebo karbidu uranu o průměru 0,2 až 0,8 mm. Tyto částečky mají několikanásobný obal, díky kterému jsou schopny udržet svůj tvar a zamezit úniku štěpných produk-

tů i při teplotách kolem 2000°C. Částečky jsou vloženy do palivových článků ve tvaru hexagonálních bloků nebo do koulí o průměru asi 60 mm pro volné vsypávání do aktivní zóny. Chladivem je helium o tlaku 3 až 5 MPa. Jeho teplota na výstupu z reaktoru dosahuje 750 až 780°C. Takto vysoká výstupní teplota umožňuje dosáhnout parametrů páry odpovídající moderním tepelným elektrárnám (tlak 17 až 18 MPa, teplota páry kolem 530°C) a zvýšit tím účinnost parního cyklu. Z vysokotlakého stupně turbíny je odebírána část páry, která po přihřátí pohání turbínu spojenou s dmychadly zajišťujícími cirkulaci helia a odvod tepla z aktivní zóny. Dmychadla mají pro případ poruchy náhradní pohon (elektromotor, vodní turbína). Dosažené parametry plynu umožňují přímé použití plynové turbíny v jednookruhovém oběhu. Je navrhováno integrální provedení, při kterém je celý tepelný okruh uzavřen v ochranné obálce. Toto uspořádání zvyšuje účinnost tepelného cyklu i účinnost celé elektrárny vzhledem k podstatně nižší vlastní spotřebě. Komplikací jsou technologické problémy, např. koroze kovových materiálů, způsobená vysokou teplotou helia.

### **Elektrárny s rychlými reaktory**

Filozofie rychlých reaktorů spočívá v možnosti vysokého energetického využití uranu, tj. vyššího podílu nově vzniklého štěpitelného materiálu. Jak jsme si dříve uvedli, lze pomocí rychlých neutronů vzniklých při štěpné reakci, transmutovat U238 na lépe štěpitelné Pu239.

První řízená řetězová reakce s rychlými neutrony byla uskutečněna v americkém experimentálním reaktoru Clementin roku 1946 a rychlý reaktor EBR-1 spuštěný roku 1951 v Idaho Falls v USA byl vůbec prvním reaktorem využitým i pro výrobu elektrické energie.

Možnosti vyššího využití zásob uranu i přeměny levnějšího thoria na štěpitelný U233 byly důvodem optimistických prognóz, podle kterých měly mít rychlé reaktory v současné době již větší podíl na výrobě energie než reaktory tepelné. Technické, technologické i finanční potíže, později i celkový útlum jaderné energetiky však znamenaly značné zbrzdění jejich vývoje. Také relativně nízká současná cena uranu oproti drahé technologii rychlých reaktorů nepodněcuje jejich rozvoj. Dalším problémem (i když dříve považovaným za výhodu) se v současnosti jeví velké množství plutonia vyrobené v těchto reaktorech, které může být použito po přepracování opět jako palivo, ale i zneužito pro vojenské a teroristické účely. Původní iniciativu USA a Velké Británie ve vývoji rychlých reaktorů převzaly Francie, Japonsko a Rusko.

V aktivní zóně rychlých reaktorů smí být jen minimum konstrukčních prvků a pokud možno z materiálů málo absorbujících a zpomalujících neutrony. Také chladivo musí mít malý účinný průřez pro absorpci a rozptyl. Jelikož je účinný průřez pro štěpení rychlými neutrony ve srovnání s průřezem pro štěpení tepelnými neutrony u U235 asi 420krát menší a u Pu239 asi 370krát menší, je nutné použít palivo s vysokým obohacením (17 až 35 %). Jako paliva se často používá UO<sub>2</sub> ve formě lisovaných tablet umístěných v hermeticky uzavřených trubkách z nerezavějící oceli. Povlaková trubka s palivem je vyplněna héliem a má na koncích dostatečně velký prostor pro expanzi plynných štěpných produktů.

Krátká doba života rychlých neutronů vyžaduje co nejvyšší hustotu paliva v aktivní zóně. Palivové články musí být tedy co nejvíce směstnány, tomu odpovídá

i jejich tvar, jsou konstruovány jako šestihranné případně čtyřhranné. Články jsou také často sevřeny speciálním systémem zajišťujícím stálý tlak na jejich stěny a zároveň umožňujícím expanzi článků způsobenou jejich teplotními dilatacemi i změnou objemu palivových elementů vlivem hromadění štěpných produktů. Vzhledem k uvedeným okolnostem má aktivní zóna menší objem než u tepelného reaktoru stejného výkonu, respektive větší měrné zatížení na jednotku objemu či na kilogram paliva (až 800 MW/m<sup>3</sup> a 850 kW/kg). Je proto nutné zajistit intenzivnější odvod tepla. Jako chladivo se z tohoto důvodu používá téměř výhradně sodík nebo jeho sloučeniny. Sodík má velkou měrnou tepelnou kapacitu i vysoký koeficient přestupu tepla, malý účinný průřez pro absorpci i rozptyl a je-li dostatečně čistý, nezpůsobuje nadměrnou korozi konstrukčních materiálů. Sodík navíc, vzhledem k vysoké teplotě varu (883°C při atmosférickém tlaku), umožňuje použití nižšího tlaku v primárním okruhu (od 0,15 MPa), a proto nehrozí nebezpečí roztržení potrubí.

Nevýhodou sodíku je jeho až explozivní reakce při styku s vodou a v menším měřítku i se vzduchem. Tato okolnost spolu s aktivací sodíku (v aktivní zóně vzniká radioaktivní izotop Na24) vyžaduje tříokruhové uspořádání elektrárny (sodík – sodík – voda, tlak v druhém sodíkovém okruhu je s ohledem na bezpečnost vyšší než v primárním). U prvních rychlých reaktorů se používala jako chladivo i rtuť. Do budoucna se počítá s héliem s ohledem na zjednodušení chladicího okruhu i možnosti dalšího zvýšení koeficientu reprodukce paliva.

U většiny rychlých reaktorů je aktivní zóna ze všech stran obklopena množivou zónou plnící zároveň funkci reflektoru. Palivové články mají proto ve své spodní a horní části množivý materiál. Obohacení palivových článků umístěných ve střední části aktivní zóny je nižší s ohledem na rovnoměrnější vývin tepla. Vnitřní část množivé zóny, tj. část sousedící s aktivní zónou, se zpravidla štěpením sekundárního paliva také podílí na výrobě tepla (až 20 %). U nových prototypů rychlých reaktorů se navrhuje umístění části množivých článků přímo v aktivní zóně, tím by se ještě více zvýšilo využití paliva.

## Tepelné výměníky

Jaderné elektrárny jsou ve většině případů (vyjma elektráren s varními reaktory) koncipovány jako dvojokruhové, elektrárny s rychlými reaktory jako tříokruhové. K předávání tepla z primární do sekundární smyčky, v případě tříokruhových z primární do vložené a z vložené do terciární, slouží tepelné výměníky. Jsou to tedy jakési transformační stanice mezi dvěma izolovanými obvody, které předávají tepelnou energii z primárního teplonosného media na sekundární, přičemž se mění energické parametry obou medií (tlak, teplota, průtok) a často i jejich skupenství.

Tepelné výměníky jsou spolu s reaktorem technicky nejnáročnějšími částmi primárního okruhu. Velké předávané výkony, při poměrně nízkých teplotách, vyžadují velké průtoky teplonosných medií a velké teplosměnné plochy. To má za následek značně větší hmotnost a investiční náklady na jednotku předávaného výkonu, než je tomu u výměníků stejného typu pracujícího při vyšších teplotách. Na druhé straně jsou méně tepelně i mechanicky namáhány.

Výměníky jsou instalovány co nejbliže zdroji tepelné energie (reaktoru nebo předcházejícímu výměníku), aby se snížily co nejvíce ztráty a ušetřil prostor. U tříokruhových elektráren je primární výměník instalován většinou přímo v tělese

reaktoru. Výměníky se často umisťují do speciálních, hermeticky uzavřených boxů a jsou za provozu nepřístupné. Větší porucha na výměníku znamená zpravidla snížení výkonu nebo odstavení reaktoru.

Vzhledem k důležitosti výměníků jsou na ně kladené vysoké nároky z hlediska spolehlivosti, kvality a životnosti. Na příklad porucha vlivem netěsnosti může způsobit únik radioaktivního chladiva buď vně výměníku, nebo do sekundárního okruhu, a kontaminovat jej. Při větší poruše může dojít i k poklesu tlaku v primárním okruhu a případnému varu chladiva nebo zvýšení poměrného obsahu páry v reaktoru se všemi jeho důsledky na reaktivitu a teplotu pokrytí palivových článků.

U jaderných elektráren lze v zásadě rozlišit výměníky podle toho, zda v nich probíhá nebo neprobíhá změna skupenství sekundárního teplonosného média. K první skupině patří parogenerátory. Primárním médiem u nich může být horký plyn, tekutý kov nebo tlaková voda. Sekundární médiem je výhradně voda, resp. pára. K druhé skupině náleží výměníky u elektráren s vloženým okruhem, kde primárním i sekundárním médiem je tekutý kov, nebo výměníky u dvojkruhových elektráren s plynovými turbínami.

Výměníky lze dělit i podle jiných kriterií, např. podle konstrukce, vlastností teplonosných médií, nebo podle jejich parametrů. S ohledem na množství a pestrost jednotlivých typů výměníků se stručně seznámíme pouze s tepelnými výměníky používanými v tlakovodních elektrárnách.

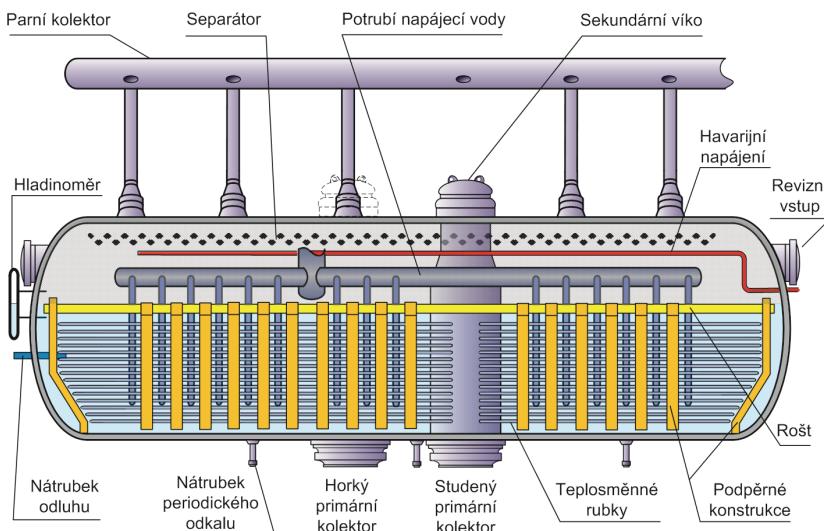
### **Parní generátory u reaktorů chlazených tlakovou vodou**

Jsou to nejčastěji používané parní generátory v jaderných elektrárnách. Obvykle jsou navrženy na výrobu syté nebo mírně přehřáté páry. Sestávají z válcové tlakové nádoby, ze soustavy trubek (několik tisíc) ukončených v trubkovnici kolektoru a zpravidla ze separátoru a sušiče páry. Chladivo z reaktoru protéká trubkami a ohřívá vodu sekundárního okruhu, která je obklopuje. Je to tedy opačně než u většiny kotlů a parogenerátorů plynem chlazených reaktorů. Důvodem pro průchod chladiva trubkami je především vysoký tlak v primárním okruhu (až 17 MPa), na který by musela být dimenzována tlaková nádoba, další důvod a výhoda zároveň je větší prostor pro separátor, případně i přehřívák páry, který tak může být umístěn v tělese parogenerátoru přímo nad hladinou vroucí kapaliny. Tato koncepce umožňuje i vyšší přestup tepla na jednotku teplosměnné plochy, než by tomu bylo u výroby páry v trubkách (přestup tepla voda - kov - voda je intenzivnější než přestup voda - kov - plyn, který by nastal při vývinu páry v omezeném prostoru slabé trubky). Parní generátory pro tlakovodní reaktory jsou jak vertikálního, tak horizontálního provedení. Vertikální provedení bývá s ohledem na co nejmenší prostor v ochranné obálce instalováno v elektrárnách tzv. „západních zemí“.

Ve spodní části vertikálního parogenerátoru je vstupní a výstupní komora chladiva oddělená silnou deskou - trubkovnicí od prostoru se sekundární vodou. Do otvorů trubkovnice jsou nalisovány výbuchem nebo tlakovým rázem a často i zavařeny konce trubek ve tvaru obráceného U. Trubkami prochází chladivo ze vstupní do výstupní komory a přes povrch trubek tvořící teplosměnnou plochu je jeho teplo předáváno sekundární vodě. Hladina vody je dostatečně vysoko nad vrcholem trubek aby při přechodových stavech nedocházelo k jejich odhalení. V horní části je zpravidla cyklonový (odstředivý) separátor a žaluziový sušič páry. Vzhledem k jejich rozměrům bývá vrchní část rozšířena

U reaktorů VVER jsou používány horizontální parogenerátory, jejich předností je velká plocha hladiny, u které nedochází k nadměrnému strhávání kapek vody, proto k vysušení páry stačí pouze žaluziový separátor. Trubky jsou do kolektorů zalisovány z boku, a proto se neusazuje v místě spoje kal, jak je tomu u vertikálně orientovaných parogenerátorů. Poruchy v místě spojů trubka - trubkovnice jsou tak méně časté. Ve dně nádoby parogenerátoru jsou umístěny vývody pro odkalování (nárazové), odluhování (kontinuální) bývá často i na boku parogenerátoru. Nedostatkem je především větší potřebný prostor v okolí reaktoru.

Pro ilustraci si uvedme některé parametry parogenerátoru pro JE Temelín. Tepelný výkon 750 MW (čtvrtina tepelného výkonu reaktoru), průměr nádoby 4 m, délka nádoby 14,75 m, teplosměnná plocha  $6115 \text{ m}^2$ , počet trubek 11000 ks, průměr trubek 16 mm. Schématické uspořádání horizontálního parogenerátoru je na obr. 3.17.



Obr. 3.17: Schématické uspořádání parogenerátoru VVER-1000

### Hlavní cirkulační čerpadla a dmychadla

Cirkulační čerpadla a dmychadla zajišťují pomocí jimi vytvořeného tlakového spádu průchod chladiva primární smyčkou elektrárny (v případě tříokruhové i přenos teplonosného média ve vloženém sekundárním okruhu). Jsou to jedna z nejnáročnějších zařízení v jaderných elektrárnách vzhledem k jejich vysokým provozním parametrům i k nepřistupnosti během provozu.

U reaktorů s kapalným chladivem (teplonosným médiem) se používají převážně mechanická, rotační čerpadla většinou radiálního provedení, vertikálně orientovaná. Vzhledem k tomu, že pracují s velkým průtokem a s poměrně malou dopravní výškou (60 - 90 m), jsou vesměs jednostupňová.

U reaktorů chlazených tekutým kovem (sodíkem) lze kromě mechanických odstředivých čerpalidel použít, vzhledem k jejich specifickým vlastnostem, i čerpadla elektromagnetická.

## Odstředivá čerpadla

Jsou nejpoužívanějším typem hlavních cirkulačních čerpadel v jaderných elektrárnách. V zásadě je lze rozdělit podle způsobu těsnění na zapouzdřená (bezučpávková) a čerpadla s těsněním hřídele (ucpávková).

**Zapouzdřená čerpadla.** U těchto čerpadel je hnací jednotka - elektromotor umístěna spolu s čerpadlem v hermetickém pouzdře. Z toho vyplývá jejich hlavní přednost - kolem rotující části nemůže docházet k úniku aktivního chladiva. Vinutí statoru, případně i rotoru, lze ochránit před negativními vlivy chladiva reaktoru inertní kapalinou s vlastním oběhem a malým přetlakem vůči primárnímu okruhu, nebo tenkostěnnými povlaky z nerezavějící oceli či jiné vhodné slitiny. Povlaky vinutí však poněkud snižují účinnost čerpadla.

Jejich nevýhodou je nižší účinnost, vyšší cena a špatný přístup k motoru při opravách. Velkou nevýhodou je především to, že rotor, který musí mít vzhledem ke ztrátám způsobeným třením v kapalině menší průměr a tím i větší délku, má menší moment setrvačnosti. Velký moment setrvačnosti je důležitý při přechodech na jiné napájení a v havarijních stavech, kdy je potřeba překlenout dobu, než bude zajištěn náhradní zdroj (např. dieselagregát), a průběžně dochlazovat reaktor. Z toho vyplývají i zvýšené nároky na zajištění náhradního zdroje a příslušná bezpečnostní opatření.

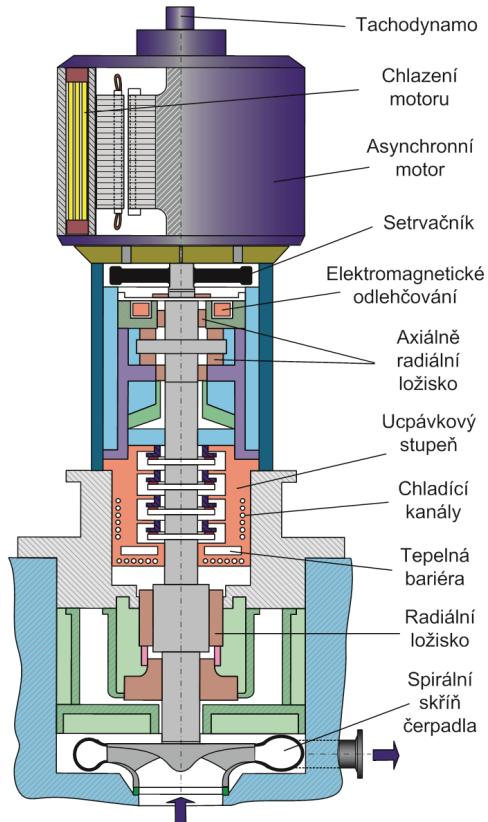
Zapouzdřená čerpadla se dosud používají u jaderných elektráren s nižšími výkony. Použita jsou např. u reaktorů VVER 210, 365 a prvních typů VVER 440.

**Ucpávková čerpadla.** Používají se u většiny novějších jaderných elektráren, kde chladivem je voda. Odstraňují některé problémy zapouzdřených čerpadel - nízkou účinnost, nemožnost použití výkonnějšího setrvačníku pro překlenutí výpadků napájení a doběh, finančně nákladné provedení motoru, nepřístupnost při opravách atd. Na druhou stranu vyžadují poměrně složitý těsnicí systém kolem hřídele, u kterého musíme připustit určitou netěsnost spojenou s úniky chladiva. Ten snižuje účinnost čerpadla a je jedním z kritických prvků. Při návrhu těsnění se volí zpravidla kompromis mezi dokonalou těsností s malými úniky a např. hydrostatickým těsněním s nepatrnými ztrátami třením, ale značnými ztrátami chladiva netěsnostmi. Za vyhovující se u velkých čerpadel považují úniky do 0,1 až 0,15 l/sec. Schématické uspořádání ucpávkového čerpadla je uvedeno na obr. 3.18.

## Elektromagnetická čerpadla

Tato čerpadla, používaná pro dopravu tekutého kovu, pracují na podobném principu jako elektromotor, tzn. využívají sil vychylující vodič protékaný proudem v elektromagnetickém poli. Vychylovaným vodičem je v tomto případě dopravovaný tekutý kov. Tento typ čerpadel má některé přednosti: jednoduchost, spolehlivost, schopnost pracovat při vysokých teplotách dopravované kapaliny (až 800°C) i při vysoké radioaktivitě, snadná regulovatelnost průtoku. Jejich nevýhodami jsou: poměrně nízká účinnost (20 až 50 %), vysoká hmotnost, u stejnosměrných (kondukových) čerpadel, vzhledem k jejich nízkým jmenovitým napětím (1 až 3 V), nutnost masivních přívodů proudu (řádově pro desítky až tisíce kA), potřeba vlastního zdroje (transformátor, usměrňovač).

Pro uvedené nevýhody se v současnosti u většiny velkých rychlých reaktorů chlazených sodíkem tento princip u hlavních cirkulačních čerpadel nepoužívá.



Obr. 3.18: Schématické uspořádání upcpávkového cirkulačního čerpadla

### Oběhová dmychadla

U elektráren s plynem chlazenými reaktory zajišťují cirkulaci chladiva v primární smyčce oběhová dmychadla. Nejčastěji jsou navrhována jednostupňová axiální, pro větší tlakové spády i odstředivá. Problémem podobně jako u čerpadel je únik aktivního plynu. Používají se proto upcpávky zahlcované neaktivním plynem s vyšším tlakem nebo speciální olejové upcpávky. Vzhledem k tomu, že musí být zajištěno bezpečné trvalé chlazení reaktoru (plyn má malou měrnou tepelnou kapacitu), má chladicí okruh buď více paralelně pracujících dmychadel, často s vzájemně nezávislými pohony (princip diverzity), nebo nouzové chladicí systémy.

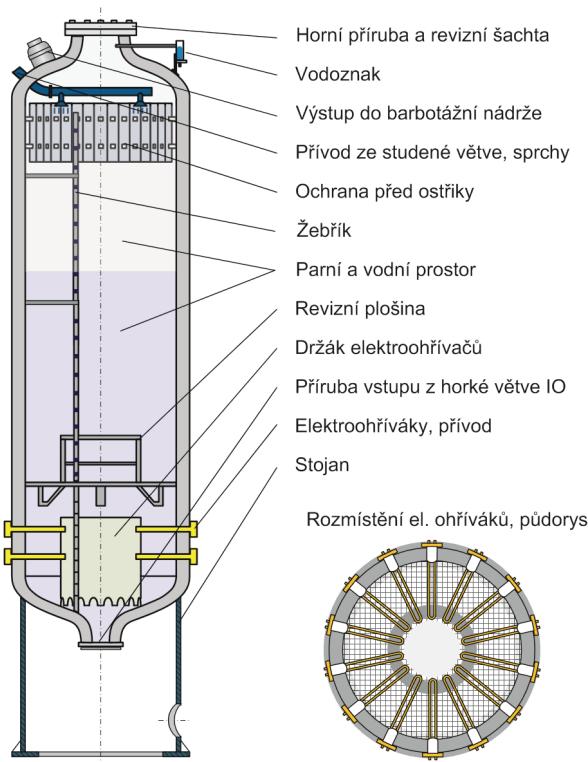
### Kompenzátor objemu

V primárním okruhu jaderných elektráren dochází vlivem změny výkonu ke změně teploty a tím i hustoty, objemu a tlaku chladiva. Tyto změny mají sekundárně vliv nejen na namáhání technologických částí primárního okruhu, ale i na reaktivitu aktivní zóny, především v případech, kdy je chladivo zároveň moderátorem.

Změny objemu se eliminují pomocí okruhu paralelně napojeného k jedné z chladících smyček a připojeného k zásobníku s chladicím mediem, k tzv. kom-

penzátoru objemu. Tento systém vyrovnává změny objemu chladiva tím, že primárnímu okruhu buď odebírá, nebo dodává chladivo.

Kompenzace změny tlaku může být uskutečněna buď hydrostatickým tlakem kapaliny - zásobník s otevřenou hladinou je umístěn v příslušné výšce nad primární smyčkou, nebo pomocným objemem uzavřeným proti vnějšímu tlaku - tlakovou nádobou o příslušném objemu, která v případě kapalného chladiva má nad jeho hladinou plynový nebo parní polštář zajišťující "pružnost". U tlakovodních reaktorů se používá pouze uzavřený kompenzační okruh. Velikost kompenzátoru (jeho plynového prostoru) musí být navržena tak, aby při běžných přechodových procesech byl tlak chladiva udržován v povolené toleranci. Schématické uspořádání je uvedeno na obr. 3.19.



**Obr. 3.19: Schématické uspořádání kompenzátoru objemu VVER 1000**

V nádobě kompenzátoru jsou v případě potřeby umístěny i akční členy regulátoru tlaku primárního obvodu. U kompenzátoru s parním polštářem, který je výhodný u tlakovodních reaktorů, je tlak udržován na požadované hodnotě změnou počtu sepnutých elektrických ohřívačů generujících páru. V případě nadměrného vzrůstu je tlak snižován kondenzací páry pomocí sprch umístěných v horní části kompenzátoru objemu, nebo v krajním případě přepouštěním pojistnými ventily do tzv. barbotážní nádrže.

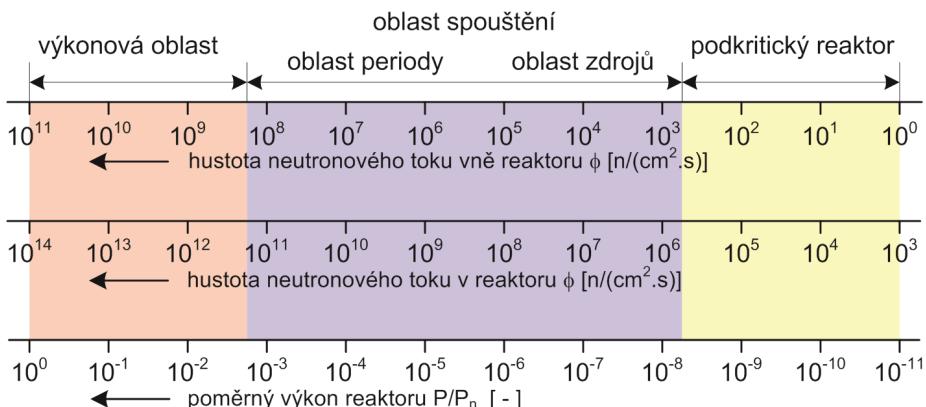
Barbotážní nádrž (barbotér) je u tlakovodních reaktorů součástí kompenzačního systému. Je to tlaková, chlazená nádoba sloužící jako expanzní a konden-

zační prostor pro páru přepouštěnou z kompenzátoru objemu. Pára jde do barbotéru jednak díky netěsnostem pojistných ventilů, při jejich zkouškách, a nebo při jejich ochranné činnosti během abnormálních provozních stavů, doprovázených nepovoleným nárůstem tlaku v primárním okruhu. Barbotér je často využíván i jako zásobník inertního plynu (dusíku) během spouštění a odstavování reaktoru.

### 3.3. Dynamika jaderných elektráren

#### 3.3.1. Dynamika jaderného reaktoru

Zajištění bezpečného, spolehlivého a ekonomického provozu jaderných elektráren není možné bez znalosti jejich dynamických procesů, obzvláště v oblasti aktivní zóny. Nové typy reaktorů, heterogenní stavba aktivní zóny, růst instalovaných výkonů či požadavky ze strany elektrizační soustavy na výrobu s proměnlivým výkonem jsou jen částí aspektů majících vliv na dynamiku jaderných zařízení a je potřeba je řešit. Nestacionární stavy při provozu reaktorů v rozsahu neutronových toků desítky řádu a dobách trvání příslušného procesu od zlomků milisekund do milionů let je potřeba rozdělit do příslušných skupin podle zvolených priorit se zanedbáním pro danou oblast marginálních vlivů tak, aby byly vůbec řešitelné. Na příklad v rozpadových řetězcích, kde na sebe za daných podmínek navazují poločasy rozpadu v řádu sekund a v řádu dnů, lze krátké poločasy zanedbat, nebo izotopy s poločasy rozpadu tisíců let lze brát jako stabilní atd.

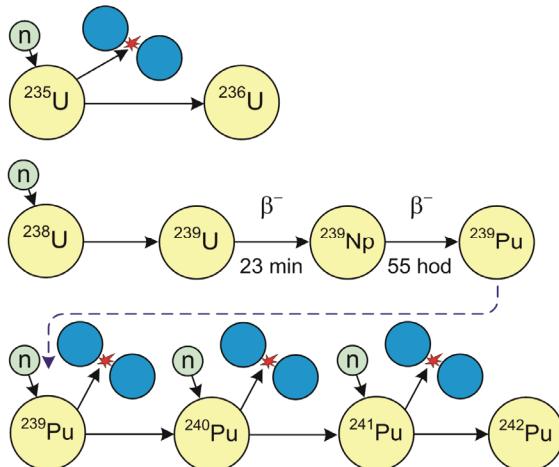


Obr. 3.20: Rozsah výkonu a odpovídající hustoty toků v tlakovodním reaktoru

V jaderné fyzice se nestacionární dělí do kategorií nazývaných kinetikami. Z hlediska času je dělíme na krátkodobou, střednědobou a dlouhodobou kinetiku, na kinetiku bez a s uvažováním zpožděných neutronů; z hlediska prostorového rozložení na bodovou a prostorovou kinetiku reaktoru aj. Důležité je i řešení problému stacionárního stavu (reaktivita  $\rho = 0$ ) nazývaného kritická rovnice pro určité uspořádání, použité vlastnosti komponent a tvar AZ. V následujícím textu jsou vzhledem k rozsahu této problematiky pouze nastíněny postupy řešení vybraných dějů.

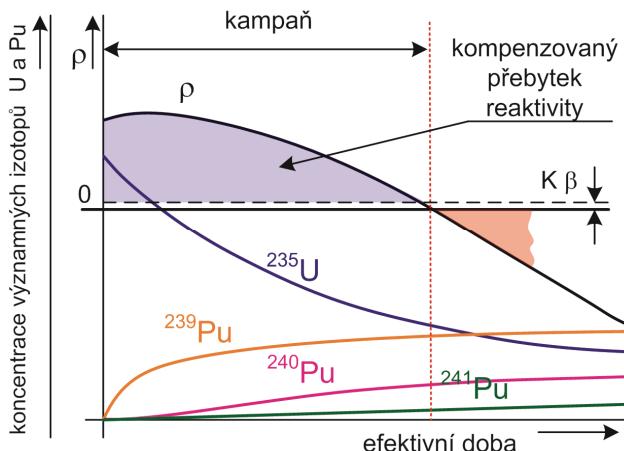
## Dlouhodobá kinetika reaktoru

Optimální vsázka paliva souvisí s množstvím paliva, jeho obohacením a rozmístěním v AZ, s množstvím absorbátoru v regulačních a kompenzačních systémech, které určují i časové změny v izotopickém složení paliva a průběh reaktivit. Během vyhořívání paliva vznikají kromě množství štěpných fragmentů i nové štěpítelné prvky - transurany, zejména plutonium; tomuto palivovému cyklu se také říká uran – plutoniový. Na obr. 3.21 jsou schématicky znázorněny postupné transmutace izotopů  $^{235}\text{U}$  a  $^{238}\text{U}$  obsažených v palivu tlakovodního reaktoru.



Obr. 3.21: Transmutace paliva v tlakovodním reaktoru

Grafické znázornění průběhu koncentrace významných izotopů na efektivní době je uvedeno spolu s průběhem reaktivity a ukončením kampaně na obr. 3.22.



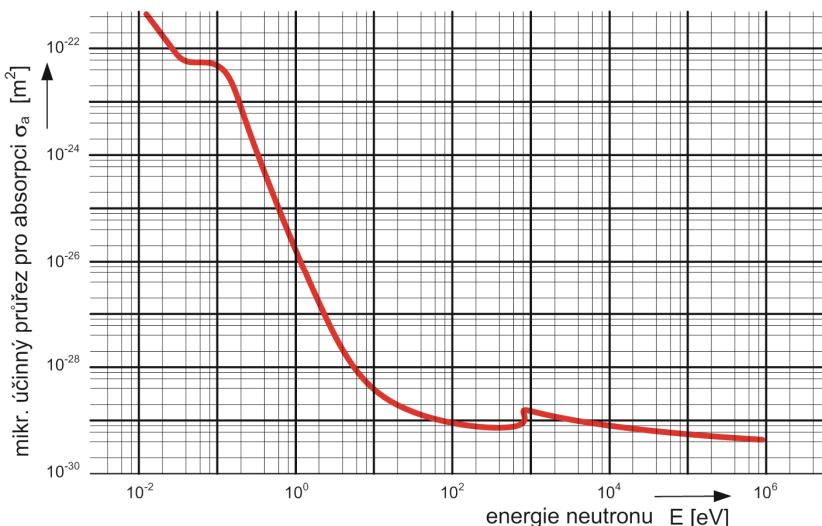
Obr. 3.22: Schématický průběh reaktivity v závislosti na koncentraci izotopů U a Pu

Přebytek reaktivitu během palivové kampaně lze kompenzovat homogenním i heterogenním způsobem (roztok  $H_3BO_3$  v chladivu, kompenzační tyče). Každý ze způsobů má své výhody a nevýhody. Homogenní způsob nemá vliv na prostorové rozložení neutronového toku, ale je pomalejší (především při snižování množství absorbátoru), heterogenní je rychlejší, ale způsobuje prostorové deformace toku neutronů. Oba způsoby se proto zpravidla kombinují.

### Střednědobá kinetika reaktoru

Za provozu reaktoru vznikají v palivu produkty štěpení s různým poměrným zastoupením, s různými absorpcními vlastnostmi a různými poločasy rozpadu. Absorpce neutronů v izotopech s krátkým poločasem rozpadu, resp. vliv těchto izotopů na reaktivitu se nazývá otrava reaktoru. Absorpce neutronů ve stabilních izotopech nebo v izotopech s dlouhým poločasem rozpadu se nazývá zastruskování reaktoru (zamoření reaktoru). Parazitní látkami, které svým vysokými absorpcními schopnostmi snižují reaktivitu reaktoru, se říká jaderné jedy.

Zvlášť nepříznivé vlastnosti (viz obr. 3.23) i vzhledem k poměrně vysokému zastoupení mezi štěpnými produkty má  $^{135}Xe$  mající velmi vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů (cca  $3 \cdot 10^6$  barnů, respektive  $3 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ , tj. cca 5000krát větší než má izotop  $^{235}U$ , používaný jako majoritní štěpitelná složka paliva v jaderných reaktorech). Obdobné vlastnosti (i když podstatně menší ale nezanedbatelné) má  $^{149}Sm$ . Izotop  $^{135}Xe$  je radioaktivní, pokud neabsorbuje neutron, samovolně se rozpadá s poločasem 9,2 hod. na cesium - způsobuje tak otravu reaktoru.  $^{149}Sm$  je stabilní a pokud neabsorbuje neutron, dál se samovolně nerozpadá a způsobuje zastruskování (zamoření) reaktoru.

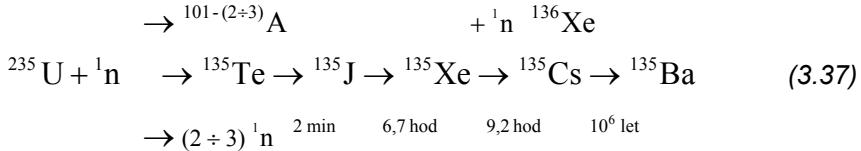


Obr. 3.23: Závislost účinného průřezu pro absorpci  $^{135}Xe$  na energii neutronů

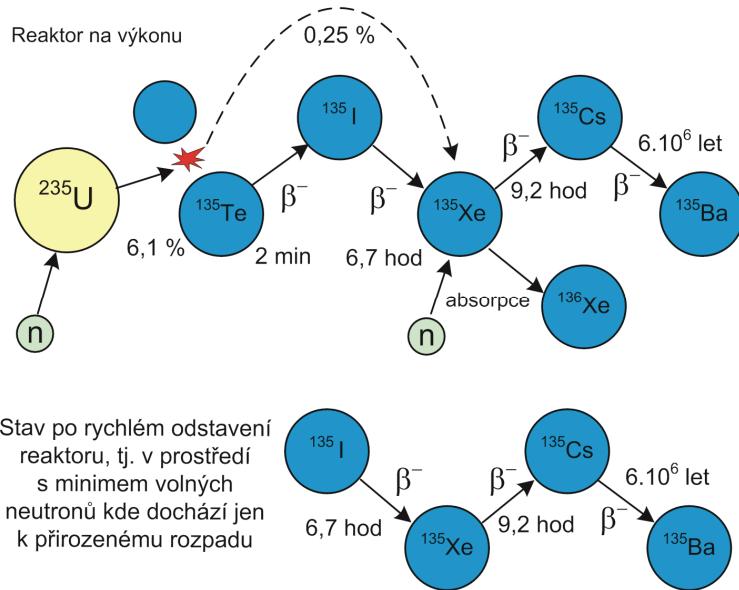
Ostatní produkty štěpení, ač jich je celkem asi 13,5krát více, mají podstatně menší význam, buď pro jejich nízký výtěžek nebo pro zanedbatelnou absorpci neutronů. Vzhledem k tomu, že v sobě zahrnují všechny konečné produkty transmu-

tací, jejich koncentrace během provozu reaktoru (kampaně) neustále stoupá. Jejich vliv na reaktivitu se zahrnuje do zastruskování reaktoru.

Izotop  $^{135}\text{Xe}$  vzniká buď přímo štěpením uranu (asi 0,3 % odštěpků), nebo rozpadovou řadou přes telur a jod:



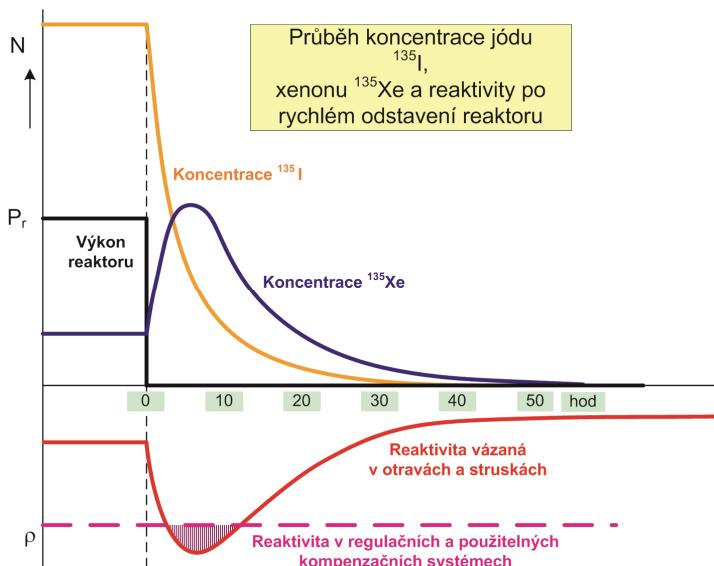
Telur, jehož výtěžek ze štěpení uranu je velmi vysoký (asi 6,1 %), se rychle rozpadá na  $^{135}\text{J}$  a ten dále beta rozpadem s poločasem 6,7 hod na  $^{135}\text{Xe}$ . Celkově vzniklý  $^{135}\text{Xe}$  (asi 6,3 %) se buď dále rozpadá s poločasem 9,2 hod na prakticky stabilní cesium, nebo absorpcí neutronu transmutuje na stabilní  $^{136}\text{Xe}$ , který absorbuje velmi málo tepelných neutronů, a tak se při výpočtu neutronové bilance neuvažuje.  $^{135}\text{Xe}$  při své přeměně na  $^{136}\text{Xe}$  odebírá určitou část neutronového toku. Tomuto ději při stabilním výkonu reaktoru (stabilním neutronovém toku) říkáme stacionární otrava reaktoru. Zůstává při něm zachován i poměr izotopů  $^{135}\text{J}$ :  $^{135}\text{Xe}$  a  $^{135}\text{Cs}$ . U tlakovodních reaktorů váže přibližně 2,5 % reaktivity při jmenovitém výkonu. Schématicky je tento děj uveden na obr. 3.24.



Obr. 3.24: Změny v rozpadovém řetězci s  $^{135}\text{Xe}$  za provozu a po odstavení reaktoru

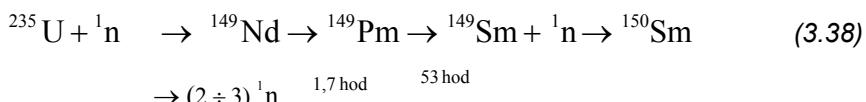
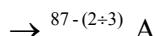
Kromě trvalé absorpce neutronů způsobuje  $^{135}\text{Xe}$  další negativní jevy. Jedním z nich je tzv. „Jodová jáma“ vznikající po rychlém odstavení reaktoru. Její do-

pad si lze vysvětlit na zápisu pro vznik  $^{135}\text{Xe}$  nebo z obr. 3.24, ze kterých je zřejmý rychlý vznik  $^{135}\text{J}$  po štěpení  $^{235}\text{U}$  přes telur (s  $T/2 = 2$  min) a následný vznik silného absorbéru  $^{135}\text{Xe}$  (s  $T/2 = 6,7$  hod), který se buď přirozeně rozpadá ( $T/2 = 9,2$  hod) nebo absorbuje neutron a transmutuje na prakticky stabilní  $^{136}\text{Xe}$ . V okamžiku odstavení reaktoru se sníží neutronový tok na minimum a  $^{135}\text{Xe}$  se může pouze přirozeně rozpadat na  $^{135}\text{Cs}$ , navíc s delším poločasem rozpadu, než kterým je generován. Rozdíl mezi generováním a rozpadem  $^{135}\text{Xe}$  způsobí růst jeho podílu v palivu. Pokud reaktivita vázaná v  $^{135}\text{Xe}$  přesáhne reaktivitu vázanou v regulačních tyčích, nelze reaktor spustit. Schématický popis tohoto průběhu je na obr. 3.25.

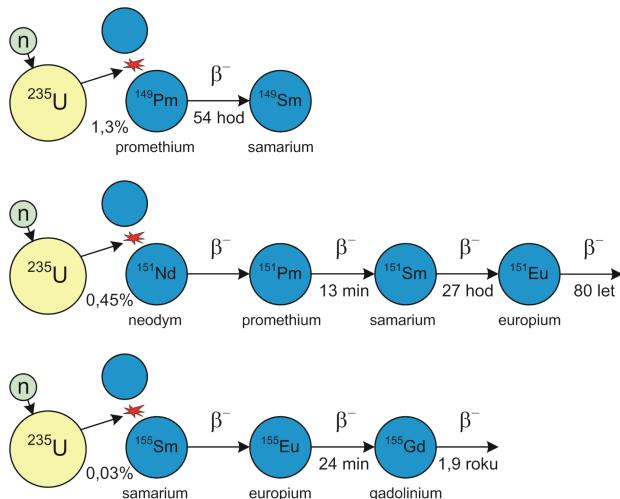


Obr. 3.25: Schématický průběh reaktivity po rychlém odstavení reaktoru

Izotop samaria 149Sm je poměrně významná struska ( $\sigma_a = 6,82 \cdot 10^4$  barnu ( $10^{-28} \text{ m}^2$ )), vzniká průměrně z 1,3 % štěpení  $\beta$ -rozpadem prométhea, z hlediska přirozeného rozpadu je stabilní a zaniká jen absorpcí tepelného neutronu dle vztahu:



V rovnovážném stavu je počet vznikajících atomů  $^{149}\text{Pm}$  a zanikajících atomů  $^{149}\text{Sm}$  stejný, přičemž rovnovážný stav nezávisí na rozdíl od otravy xenonem na výkonu reaktoru. (Změnou výkonu a tím i toku neutronů se ve stejném smyslu změní generování  $^{149}\text{Sm}$  i jeho transmutace na  $^{150}\text{Sm}$ ).



**Obr. 3.26: Vznik vybraných významnějších strusek v tlakovodním reaktoru**

Otrava a zastruskování reaktoru odebírají absorpcí část neutronů a váží společně kolem 3 % reaktivity. Při návrhu aktivní zóny je potřeba o tuto hodnotu zvýšit zásobu reaktivity. Účinky  $^{135}\text{Xe}$  jsou výraznější a projevují se především při změnách výkonu. Kromě uvedeného mohou způsobit u rozměrově větších aktivních zón prostorové oscilace, které mohou mít za důsledek lokální zvýšení výkonu a tím i teploty. Frekvence oscilací je nízká, odpovídá zhruba poločasu rozpadu  $^{135}\text{U}$  (6,7 hod).

### Příklad na krátkodobou kinetiku

Krátkodobé kinetiky uvažují nestatisticky vliv zpožděných neutronů, rozdělených do skupin podle délky jejich života od štěpení přes nepružný rozptyl (neutronovou emisi) až po jejich absorpci

Jako výchozí se často berou rovnice odvozené pro „chladný reaktor“ (reaktor nulového výkonu) pro šest skupin zpožděných neutronů. (Chladný reaktor je reaktor bez uvažování teplotních zpětných vazeb na reaktivitu.)

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k_{ef} \cdot (1 - \beta) - 1}{1} \cdot n_0 + \sum_i^6 \lambda_i \cdot c_i(t) \quad (3.39)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{k_{ef} \cdot \beta_i}{1} \cdot n_0 - \lambda_i \cdot c_i(t) \quad (3.40)$$

$c_i$  ..... koncentrace mateřských jader fragmentů emitujících zpožděné neutrony i-té skupiny

$\lambda_i$  ..... rozpadové konstanty mateřských jader fragmentů i-té skupiny

$\beta_i \dots$  podíl i-té skupiny zpožděných neutronů

Soustava těchto rovnic spolu s respektováním zpětných vazeb je často využívána pro modelování problematiky regulace výkonu v JE.

## 3.4. Řídící systémy JE, bezpečnost

Řízení lze definovat jako souhrn aktivit zabezpečujících na základě získaných a analyzovaných informací o řízené entitě její požadovanou funkci tak, aby plnila ve stanovené kvalitě své úkoly.

Jaderná elektrárna má za úkol vyrábět elektrickou energii v předepsané kvalitě a požadovaném množství v souladu s bezpečnostními, technickými i ekonomickými podmínkami. Její řídící systém musí zajistit tyto podmínky ve všech provozních režimech, tzn. i při spouštění a odstavování elektrárny včetně kontroly po odstavení. Jaderná elektrárna klade vzhledem ke své výjimečnosti zvýšené nároky na řídicí systémy oproti většině ostatních provozů.

### 3.4.1. Řídící systém

Řídící systém lze z hlediska jeho funkce rozdělit do těchto skupin:

- Regulační systém
- Systém měření a kontroly
- Bezpečnostní a ochranný systém (havarijní systém)
- Informační systém
- Systém logických obvodů a automatů
- Pomocné systémy

**Regulační systém** je zpravidla složen z řady regulačních obvodů ať separátérních či vzájemně propojených, jejichž úkolem je udržet regulované veličiny v zadáne toleranci. V jaderné elektrárně se vyskytují prakticky všechny druhy regulačních systémů. Jejich funkci je potřeba vzhledem k navazujícím technologiím a množství kladných zpětnovazebních smyček zkoordinovat tak, aby nedocházelo k velkým přeregulováním, oscilacím a ostatním negativním jevům.

**Systém měření a kontroly** zajišťuje měření velkého množství (několik tisíc) různých fyzikálních a technologických parametrů, včetně převodu na elektrické analogové či digitální signály, zajišťuje rektifikaci měřicích přístrojů a naměřených hodnot.

Na JE jsou zastoupeny téměř všechny měřitelné veličiny. Měření teploty, tlaku, průtoku, hladiny a pod. se provádí zpravidla obdobnými způsoby a s použitím obdobných čidel, převodníků a měřicích přístrojů jako u klasických tepelných elektráren. Měření tepelného výkonu reaktoru se provádí odvozením z měřeného neutronového toku vně i uvnitř reaktoru, případně z průtoku a teplotního rozdílu chladiva na vstupu a výstupu z reaktoru nebo z tepla předaného sekundárnímu obvodu. Měření neutronového toku je důležité i pro zjišťování prostorového rozložení výkonu a periody reaktoru.

S ohledem na požadovanou zvýšenou bezpečnost a spolehlivost provozu JE jsou i na měřicí obvody kladený zvýšené nároky. Například na čidla umístěná v aktivní zóně nebo na místech se zvýšenou radiací jsou kromě přesnosti a spolehlivosti kladený požadavky na životnost, inercii k neměřeným veličinám, citlivost apod. Důležité parametry jsou měřeny pomocí několika nezávislých měřicích kanálů.

K systému měření a kontroly přísluší i dozimetrie, tj. měření radiace v prostorách jaderné elektrárny a jejím okolí. Dozimetrické měření lze rozdělit na biologické a technologické. Biologické má za úkol měřit dávky ionizujícího záření, které obdržel provozní personál a hladinu ionizujícího záření ve všech prostorách JE.

Technologické dozimetrické měření zajišťuje radioaktivitu technologického zařízení, pracovních látek (např. chladiva), plynných úniků ventilačním komínem, odpadních vod, aerosolů apod. Tím vlastně kontroluje správnou činnost JE; např. zvýšená radioaktivita chladiva signalizuje možné porušení pokrytí palivových článků. Dozimetrické měření včetně registrace výsledků vykonává dozimetrická služba. Údaje ze stabilně umístěných přístrojů jsou vyhodnocovány v dozimetrické dozorně. Radiace vně provozních objektů a v okolí JE je kontrolována periodicky speciální službou vnější dozimetrie měřením  $\gamma$  záření a odebíráním vzorků životního prostředí.

**Bezpečnostní a ochranný systém** má za úkol v případě překročení povolených mezních hodnot provozních parametrů určených pro daný režim nebo při chybných manipulacích zajistit příslušným zásahem zařízení jaderné elektrárny před poškozením a vyloučit, v krajním případě snížit na dohodnutou míru, ohrožení okolí důsledky případné havárie a úniku radioaktivity. Bezpečnostní a ochranný systém je jedním z nejdůležitějších v JE. Je vybavován vlastními měřicími kanály a automatizovanými bezpečnostními mechanismy, neboť příčiny poruch mohou snadno ujít pozornosti obsluhujícího personálu a poruchy se svými důsledky se zpravidla rozvíjí velmi rychle. Z tohoto důvodu, pokud je aktivován, pracuje většinou nezávisle, aby nebyla ovlivňována jeho činnost a svůj úkol dokončil. Tyto systémy jsou brány často jako samostatná skupina s oddělenými aktivačními a komunikačními kanály. Bezpečnosti, vzhledem k její důležitosti, je věnována samostatná část této kapitoly.

**Informační systém** zajišťuje prezentaci hodnot měřených veličin obsluhujícímu personálu, dlouhodobou registraci důležitých veličin, signalizaci stavů a předání informací dalším systémům. Uchování měřených dat je důležité zejména pro analýzu příčin havarijních situací, pro predikci poruchových stavů a ekonomické zhodnocení provozu.

V JE, kde je měřeno až  $10^4$  veličin, je nutné průběžné zpracování údajů, včetně výpočtů neměřených nebo neměřitelných tak, aby obsluhující personál (operátor) měl k dispozici aktuální informace, seřazené podle stupně důležitosti, redukované podle příslušného provozního stavu nebo požadavku operátora, případně graficky zpracované.

Informační systém také signalizuje opticky nebo akusticky o vybočení důležitých veličin z dovoleného parametrického prostoru a o stavu dvou nebo tří hodnotových veličin (zapnuto, vypnuto, mezipoloha atd.).

**Systémy logických obvodů a automatů.** Tyto systémy zastávají celou řadu funkcí, počínaje dálkovým ovládáním, blokováním chybných manipulací, určováním posloupnosti manipulací až po automatické řízení provozu. Pracují zpravidla s dvouhodnotovými veličinami. Na JE jsou automatické systémy značně využívány s ohledem na nepřístupnost řady zařízení v oblasti se zvýšenou radiací, na složitost či nepřehlednost úkonů při manipulaci atd. Správně navržené logické systémy snižují riziko chybné manipulace, a tak zvyšují spolehlivost a bezpečnost provozu JE.

Logické obvody s funkcí výběrových členů (prahové a majoritní funkce) jsou součástí bezpečnostního, regulačního i měřicího systému. V současnosti je požadován pro bezpečnostní a regulační systém důležitých technologických zařízení JE výběr vstupních signálů alespoň dva ze tří, tzn. že při shodě dvou signálů ze tří dochází na jejich základě k havarijnímu nebo regulačnímu zásahu. U systémů regulace a ochran reaktoru je výběr vstupní informace s ohledem na požadovanou vysokou spolehlivost a bezpečnost ještě vyšší (např. 2 x 2 ze 3).

Návrhy logických výběrových členů vycházejí z poměrně složitých výpočtů pravděpodobnostní analýzy. Výběry s extrémně vysokými pravděpodobnostmi správné informace nemají své opodstatnění, neboť je třeba vzít v úvahu další okolnosti, které celkovou pravděpodobnost degradují (požár, selhání lidského činitele, životnost atd.).

**Pomocné systémy.** Jsou to systémy, které přímo nezasahují do řízení, ale souvisejí s ním např. z hlediska prevence poruch, ekonomie provozu, zajištění komfortu obsluhy atd. Z nich jedny z nejdůležitějších jsou systémy provozní a technické diagnostiky. Diagnostiku lze definovat jako objektivní rozpoznávání stavu objektů a posouzení jejich schopnosti vykonávat požadovanou funkci nebo jako rozpoznávání charakterů procesů a jevů, i z tohoto hlediska je snaha ji zařadit do systému řízení, především do systému ochran s cílem zvýšit bezpečnost a spolehlivost provozu JE.

Diagnostické systémy mají za úkol analyzovat získané informace, indikovat čas a místo vzniku anomálie, druh anomálie a určit její pravděpodobnou příčinu a následně vydat doporučení pro provozní personál, tzn. navrhnut postup při odstranění zjištěné anomálie nebo doporučit příslušný bezpečnostní zásah. Diagnostikou je možné rozeznat řadu anomalií, jako jsou: lokální var, kavitace, tlakové pulsace, uvolněné části, cizí tělesa, mechanické poškození i porušení integrity rotujících nebo obtékanych částí, posuvy, úniky, selhání čidel, poruchy měřicích kanálů atd. K tomu se využívá řada metod (akustické, vibrační, defektoskopické aj.).

### 3.4.2. Bezpečnost

Všechny výrobní procesy představují větší či menší rizika ohrožení života a zdraví lidí nebo poškození životního prostředí a majetku. Jaderně energetické zdroje nesou s sebou navíc potenciální rizika úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření přesahující přijatelnou mez z chráněných prostor do okolního prostředí. Toto riziko je aktuální již od těžby či loužení hornin s obsahem pro štěpení využitelných izotopů, přes jejich úpravu a zpracování, výrobu technologických komponent a celků, vlastní provoz, až po konečnou likvidaci paliva i samotného objektu. Z tohoto důvodu je také jaderná energetika ve středu pozornosti nejmén-

ně více než jiná energetická odvětví a jsou na ní kladený zvýšené bezpečnostní požadavky.

### 3.4.3. Základní principy a požadavky bezpečnosti

Bezpečnost je vlastnost, vyjadřující schopnost objektu být při plnění svých funkcí za stanovených podmínek ve stavu, kdy riziko ohrožení života a zdraví lidí, životního prostředí a poškození majetku je omezeno na přijatelnou úroveň.

Bezpečnostní a ochranný systém jaderné elektrárny má za úkol v případě překročení povolených mezních hodnot provozních parametrů určených pro daný režim včetně jejich trendů, nebo při chybných manipulacích, zajistit příslušným zásahem zařízení před poškozením a vyloučit, v krajním případě snížit na dohodnutou míru, ohrožení okolí důsledky případné havárie a úniku radioaktivity. Bezpečnostní a ochranný systém je jedním z nejdůležitějších v JE. Je vybavován automatickými a samočinnými bezpečnostními prostředky, neboť příčiny poruch mohou snadno ujít pozornosti obsluhujícího personálu a poruchy se svými důsledky se mohou rozvíjet velmi rychle. Na ochranné systémy jsou kladený tyto požadavky:

- systém vždy zajistí příslušný ochranný zásah, je-li toho zapotřebí
- systém nezpůsobí bezdůvodný ochranný zásah

V případě nesplnění první podmínky dochází k tzv. nebezpečné poruše (nebezpečnému selhání), v případě nesplnění druhé podmínky dochází k bezpečné poruše (bezpečnému selhání). Je zřejmé, že nebezpečná porucha může vyvolat podstatně horší následky s ohrožením bezpečnosti i zdraví obsluhujícího personálu, bezpečná porucha má zpravidla následky pouze ekonomické (např. snížení výkonu reaktoru, nebo v krajním případě jeho odstavení). Jelikož nelze zajistit absolutní spolehlivost ochranného systému, je snaha navrhnout systém tak, aby v případě jeho poruchy docházelo k poruše bezpečné.

Provoz jaderné elektrárny je spojen vždy s určitým rizikem. Snahou projektanta i provozovatele je snížit toto riziko na minimum. Ke zvýšení spolehlivosti bezpečnostních systémů včetně řídicích a měřicích obvodů se kromě výběru vysoce spolehlivých jednotlivých komponent používá jejich paralelní řazení nebo zálohování. Z tohoto hlediska lze přístup ke zvýšení bezpečnosti rozdělit na tyto principy:

- Redundance – současné použití více principiálně i technologicky souhlasných zařízení. Přínos redundancy ke zvýšení spolehlivosti systému není zpravidla jednoznačný. Eliminuje náhodné chyby či poruchy, u chyb vyvolaných vnějšími vlivy (teplota, tlak, radiace) a u systémových chyb či poruch je přínos ke zvýšení spolehlivosti menší.
- Diverzifikace (diverzita) – současné použití dvou a více konstrukčně nebo fyzikálně odlišných principů nebo zařízení. Příčina poruchy jednoho zařízení tak nemusí vyvolat poruchu u ostatních, čímž diverzifikace podstatně eliminuje výskyt chyb ze společné příčiny. Nevýhodou tohoto principu jsou vyšší investice na údržbu a skladované náhradní díly.
- Separace – prostorové oddělení jednotlivých prvků zabezpečovacích systémů, tzn. oddělená čidla, kabelové trasy, vyhodnocovací systémy, akční členy atd. Separací snižujeme pravděpodobnost současně poruchy dvou

systémů způsobenou vnějšími vlivy (požár, mechanické poškození, zaplavení, atd.).

- Hierarchie a selektivita – určení typu nebo účinku bezpečnostního zásahu na základě závažnosti poruchy. Tento princip snižuje pravděpodobnost bezpečné poruchy vyššího stupně, než který je nezbytně nutný. V případě selhání nebo neúčinnosti nižšího stupně ochranného zásahu je s příslušnou časovou prodlevou aktivován stupeň vyšší. Pro provoz jaderných elektráren má především ekonomický přínos.

Například u reaktoru mohou být podle druhu identifikované poruchy provedeny tyto havarijní zásahy: rychlé odstavení reaktoru, pomalé odstavení reaktoru, částečné snížení výkonu, omezení zvyšování výkonu a jiné.

Z hlediska zdroje energie potřebného k aktivaci bezpečnostního systému se dělí bezpečnostní principy jaderných elektráren na:

- inherentní - využívá energii zabezpečovaného systému
- pasivní - využívá nastřídanou energii (spádovou, tlakovou, energii mechanických středačů aj.)
- aktivní - ke své činnosti potřebuje vnější zdroj energie

### **Inherentní bezpečnost**

Inherentně (vnitřně, přirozeně) bezpečný je takový systém, který je sám schopen kompenzovat vnější vlivy včetně chyb obsluhy i případné selhání regulačních orgánů. Podmínka inherentní bezpečnosti je například zajištěna návrhem aktivní zóny reaktoru včetně příslušných technologií tak, aby v provozní výkonové oblasti převládaly záporné teplotní vazby na reaktivitu (poměrné množství štěpení, neutronový tok) a nedocházelo tak vlivem poruchy k jejím významným odchylkám.

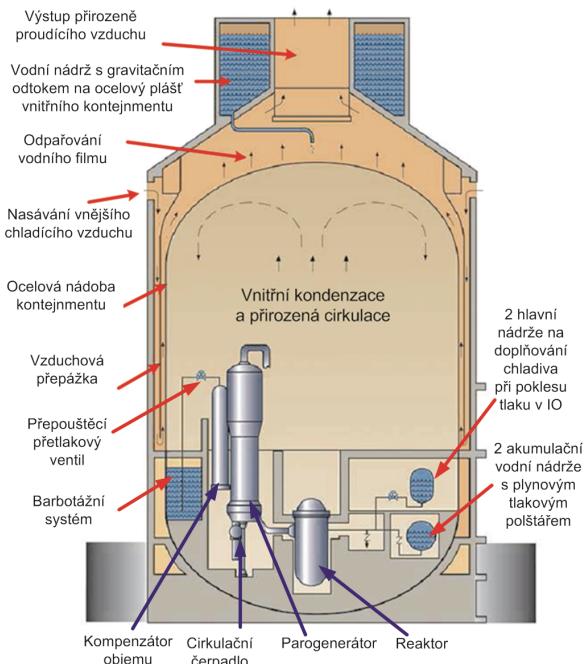
### **Pasivní bezpečnost**

Pasivně bezpečný ochranný systém je takový, který je schopen plnit svou ochrannou funkci i v případě výpadku všech vnějších zdrojů energie, zpravidla elektrické. Jako příklad lze uvést hydroakumulátory určené k chlazení reaktoru a prostoru hermetické obálky. Jsou umístěny v dostatečné výšce nad zaplavovaným prostorem, aby k jejich činnosti nebylo potřeba čerpadel. Obdobnou funkci mají i tlakové zásobníky chladicí vody, naplněné zčásti plynem, které lze umístit z diverzifikačního hlediska i pod nádobu reaktoru, dále zaplavovací bazény, barbotážní nádrže aj. K rychlému zastavení štěpné reakce slouží různé mechanismy, které při ztrátě elektrického napájení umožní vstup absorpčních prvků do aktivní zóny, zpravidla vlivem gravitace, předepojatých pružin nebo rozdílu tlaků.

### **Aktivní bezpečnost**

Aktivní bezpečnostní systém je takový systém, který ke své činnosti potřebuje vnější zdroje, převážně elektrické. Jeho úkolem je zajistit bezpečný, spolehlivý a ekonomický chod v provozních režimech a bezpečné snížení výkonu či odstavení reaktoru v abnormálních či havarijních stavech včetně odvodu tepla z primárního okruhu, respektive z reaktoru. Jeho činnost je zpravidla úzce spojena s měřicím a

regulačním systémem. Napájení bezpečnostního (ochranného) systému v jaderných elektrárnách je vždy zařazeno do nejvyššího stupně spolehlivosti a je zajištěno minimálně ze tří nezávislých diverzifikovaných zdrojů, které jsou navíc redundantní. Totéž lze říci i o jejich komunikačních kanálech s výběrovými rozhodovacími členy zajišťujícími verifikaci informací.



**Obr. 3.27: Příklad pasivních bezpečnostních systémů k doplňování ztráty chladiva a chlazení vnitřního kontejnmentu a u JE AP1000 (červené šipky)**  
**(Zdroj: Informační leták firmy Westinghouse)**

## Bezpečnostní požadavky na jaderné elektrárny

Základní požadavky z hlediska jaderné bezpečnosti jsou v zásadě stále stejné: U všech jaderných elektráren se od řídicích a bezpečnostních (havarijních) systémů vyžaduje schopnost zajistit v případě potřeby při všech v projektu uvažovaných provozních a mimořádných událostech následující úkony:

- zastavit štěpnou reakci a reaktor v tomto stavu udržovat po potřebnou dobu
  - zajistit bezpečné chlazení a odvod zbytkového tepla z aktivní zóny
  - zabránit únikům radioaktivních látek nad příslušné povolené limity

Novým se stává přístup, kdy se z bezpečnostního řetězce stále více omezují aktivity člověka (jako jednoho z nejslabších článků, který je přes vysokou kvalifikaci ovlivnitelný mnoha vnějšími faktory) a jsou nahrazovány především diverzifikovanými pasivními a inherentními bezpečnostními prvky.

## **Legislativa ČR pro oblast jaderné energetiky**

V České republice je základním dokumentem pro činnosti, při kterých se vyskytuje ionizující záření nebo jeho zdroje Zákon č. 18/1997 Sb., o místovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, tzv. Atomový zákon. Uvedený zákon stanovuje pravidla a způsoby kontroly jejich dodržování. Jeho součástí jsou i prováděcí vyhlášky, které stanovují požadavky a zásady pro projektování, výstavbu, uvádění do provozu, provoz a výřazování z provozu jaderných zařízení. Kontrolu plnění požadavků zákona provádí Státní úřad pro jadernou bezpečnost.

### **Prováděcí právní předpisy**

Výklad Atomového zákona je upřesňován prováděcími právními předpisy (vyhláškami SÚJB). V těchto vyhláškách se podrobně definují příslušné požadavky. Uvedeny jsou pouze vyhlášky, které se týkají bezpečnosti.

- Vyhláška č. 144/1997 Sb., o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií, ve znění vyhlášky č. 500/2005 Sb (novelizovaný text vyhlášky a novelizovaná příloha k vyhlášce).
- Vyhláška č. 146/1997 Sb., stanovující činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků, ve znění vyhlášky č. 315/2002 Sb.
- Vyhláška č. 214/1997 Sb., o zabezpečování jakosti při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření a o stanovení kritérií pro zařazení a rozdělení vybraných zařízení do bezpečnostních tříd (vyhláška byla zrušena vyhláškou č. 132/2008 Sb., právní poměry byly uvedeny do souladu s touto novou vyhláškou k 1. 5. 2010).
- Vyhláška č. 215/1997 Sb., o kritériích na umísťování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření.
- Vyhláška č. 106/1998 Sb., o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu.
- Vyhláška č. 195/1999 Sb., o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.

## **3.5. Regulační programy a regulační obvody**

### **3.5.1. Režimy práce a regulační programy JE s tlakovodními reaktory**

Jaderná elektrárna jako mnohoparametrový systém vyžaduje řadu spolehlivých regulačních obvodů schopných zajistit její optimální činnost při všech normálních provozních režimech.

Režimy práce mohou být v jednotlivých JE nazývány různě, vždy je lze z hlediska provozně bezpečnostního rozdělit na:

- normální provozní režimy
  - stacionární
  - přechodové
- havarijní režimy

**Havarijní režimy** jsou takové, při nichž dochází k neplánovaným, nedovoleným změnám parametrů a pracovních podmínek základních technologických zařízení JE ohrožujících bezpečnost provozu. Na zvládnutí havarijních režimů se především podílí bezpečnostní a havarijní systém, který často, především u závažnějších poruch a havárií, blokuje zásahy regulačního systému i zásahy obsluhy.

**Normální stacionární** provozní režimy jsou charakterizovány konstantními provozními parametry bloku nebo jejich změnou s velmi malým trendem.

**Normální přechodové** provozní režimy jsou charakterizovány dostatečně velkými změnami základních provozních parametrů v čase. Přechodové režimy jsou například spouštění i normální odstavování reaktoru nebo dostatečně velká změna výkonu bloku.

V současnosti je hlavním provozním režimem JE stacionární režim při výkonu bloku na energetických hladinách blízkých jmenovitému (zařazení JE do základní části denního diagramu). Se vzrůstajícím podílem výroby elektrické energie z JE bude i je nutné zařadit do proměnné části denního diagramu a regulace frekvence a předávaných výkonů elektrizační soustavě. Zkoušky v řadě JE prokázaly schopnost bloku pracovat v proměnném zatížení, ale trvalý provoz v tomto režimu přináší řadu problémů, především vlivem teplotního namáhání a pnutí materiálu. Na příklad u palivových článků se změnou výkonu změní teplota chladiva nepatrně (maximálně o několik stupňů), ale teplota paliva podstatně (až o několik set stupňů). Vlivem toho vznikají teplotní napětí, která mohou vyvolat deformaci palivových kazet, případně jejich dehermetizaci a následnou kontaminaci primárního okruhu. Dalším problémem je náchylnost k nestacionárním otravám reaktoru izotopem  $^{135}\text{Xe}$ . Potřeba rychleji překonávat otravy si vyžadá větší zásobu reaktivity. U reaktorů pracujících v proměnné části denního diagramu budou tedy kladené vyšší nároky na konstrukci palivových kazet a na obohacení paliva. Přes tyto a jiná opatření bude nutné dodržovat řadu omezení týkající se rychlosti změn výkonu, velikosti skokových změn výkonu, počtu regulačních a havarijních zásahů apod. Pochopitelně si musí reaktor v požadovaném rozmezí výkonů zachovat své samoregulační vlastnosti a nesmí příliš klesat celková termická účinnost.

Jako příklad jiného, konkrétního rozdělení režimů lze uvést JE Temelín, kde se provozní režimy bloku dělí na režimy:

Normální – jsou to všechny plánované stav a operace, které vyžaduje provoz bloku, při dodržení provozních limitů a podmínek bezpečného provozu. Jsou to například: stacionární provoz na výkonu, výkonové změny, spouštění a odstavování bloku, výměna paliva.

Abnormální (poruchové) – neplánované stavby bloku spojené s odchylkou parametrů mimo hranice normálních provozních podmínek, ale s jejichž výskytem se

v projektu uvažuje. Jsou to například výpadky komponent I.O nebo II.O, popřípadě poruchové změny parametrů neaktivující přímo systém ochran reaktoru nebo inicializaci bezpečnostních systémů. Blok je po odstranění příčin a následků schopen normálního provozu.

Havarijní – stavы ohrožující bezpečnost provozu, překračující provozní limity a podmínky a představující riziko porušení integrity palivových článků. Pro řešení těchto stavů jsou vypracovány typově orientované předpisy, určující postupy pro optimální obnovení bezpečného stavu.

Dalším z parametrů pro rozdělení provozních stavů je výkon. Podle výkonu dělíme provozní stavы bloku na: provoz na výkonu, provoz v nevýkonovém stavu, provoz v horkém stavu, provoz v polohorkém stavu, provoz ve studeném stavu a provoz při odstávce.

### 3.5.2. Regulační programy

Při všech normálních provozních režimech, jak stacionárních tak přechodových, musí řídící systém zajistit požadovanou rovnováhu mezi výkonem generovaným reaktorem a výkonem odebraným sekundárním okruhem a předaným elektrizační soustavě. Strategii řízení provozu bloku jaderné elektrárny při normálních provozních režimech určující závislost jeho hlavních parametrů na změně výkonu nazýváme **regulační program**.

Hlavními parametry v této souvislosti rozumíme vstupní, výstupní a střední teplotu chladiva v reaktoru –  $T_{C1}$ ,  $T_{C2}$ ,  $T_{CS}$ ; tlak v primárním okruhu –  $p_{IO}$ ; tlak v hlavním parním kolektoru za parogenerátory –  $p_{pg}$ ; teplotu páry v parogenerátoru  $T_{II}$ ; průtok chladiva reaktorem –  $Q_C$  a objem chladiva v primárním okruhu  $V_C$ .

Regulační program je určen již v projektu elektrárny v souvislosti s požadavky na příslušné technologické objekty a je výchozím podkladem pro návrh obvodu výkonové regulace. Vliv změny výkonu na hlavní parametry lze ukázat z tepelných bilancí reaktoru a parogenerátoru.

Pro tepelný výkon předaný z reaktoru do chladiva respektive do primárního okruhu platí:

$$P_I = Q_C \cdot c_c \cdot (T_{C2} - T_{C1}) \quad (W) \quad (3.41)$$

$c_c$ ..... měrná tepelná kapacita chladiva  $(J/(kg.K))$

$T_{C1}, T_{C2}$  vstupní a výstupní teplota chladiva  $(K)$

Za zjednodušených předpokladů při konstantním průtoku chladiva v primárním okruhu platí pro tepelný výkon předávaný sekundárnímu okruhu vztah:

$$P_{II} = k \cdot S \cdot (T_I - T_{II}(p_{pg})) = P_I \quad (W) \quad (3.42)$$

$k$ ..... součinitel přestupu tepla v parogenerátoru  $(J/(m^2.s.K))$  nebo  $(W/(m^2.K))$

S ..... teplosměnný povrch mezi primárním a sekundárním okruhem v parogenerátoru ( $m^2$ )

$T_I$  ..... střední teplota v primárním okruhu definovaná obdobně jako pro reaktor

$$T_I = T_{CS} = \frac{T_{C1} + T_{C2}}{2} \quad (K) \quad (3.43)$$

$T_{II\ pPG}$  ... teplota sytosti páry v parogenerátoru o tlaku  $p_{pg}$  (K)

Pro parogenerátor vyrábějící sytou páru platí přibližně  $k \cdot S = \text{konst}$ . Ze vztahu (3.42) vyplývá, že rozdíl teplot  $T_I - T_{II\ pPG}$  je úměrný předávanému výkonu.

V jaderných elektrárnách je používána řada regulačních programů, v dalším uvedeme jen některé základní, používané v JE s reaktory VVER:

- Regulační program s konstantní střední teplotou chladiva v reaktoru  $T_{CS} = \text{konst}$ ;  $Q_C = \text{konst}$ ;  $V_C = \text{konst}$
- Regulační program s konstantním tlakem páry v parním kolektoru za parogenerátory  $p_{pg} = \text{konst}$ ;  $Q_C = \text{konst}$
- Regulační program kompromisní, při němž je pro vyšší zatížení bloku udržována konstantní střední teplota chladiva v reaktoru a pro nižší zatížení bloku udržován konstantní tlak páry kolektoru za parogenerátory  $Q_C = \text{konst}$ .

### Regulační program s konstantní střední teplotou chladiva v reaktoru

Je výhodný pro reaktory s velkým záporným teplotním koeficientem reaktivity, kde vzhledem k samoregulačním vlastnostem takovýchto reaktorů klade při proměnlivém odebíraném výkonu menší nároky na počet a velikost regulačních zásahů akčních orgánů obvodů výkonové regulace reaktoru. U tlakovodních reaktorů, které mají záporný teplotní koeficient reaktivity, lze navrhnut aktivní zónu tak, že je schopna dodávat tepelný výkon v požadovaném rozsahu jen s minimálními změnami střední teploty chladiva. Změnou výkonu se mění pouze teplotní rozdíl mezi horkou a studenou větví prim. okruhu. Samoregulační proces si uved' na příkladu zvýšení výkonu dodávaného do soustavy: Zvýšením výkonu turbín se zvýší odebírané množství páry z parogenerátoru a poklesne její tlak i teplota na výstupu z PG. Zvýšeným odběrem tepla se sníží teplota chladiva na výstupu z PG a do reaktoru proudí chladnější médium. V aktivní zóně poklesne teplota, to vyvolá kladnou změnu reaktivity a zvýšení tepelného výkonu reaktoru. Tím se zvýší i střední teplota chladiva na hodnotu blízkou původní. Tepelný výkon reaktoru tedy s jistou úměrou sleduje odebíraný výkon z elektrárny.

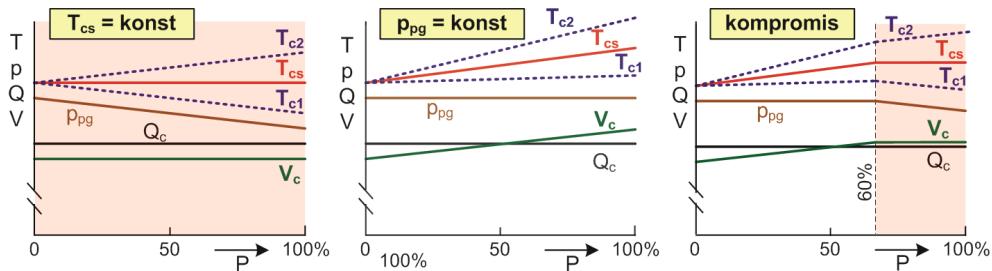
Přednosti tohoto regulačního programu jsou: poměrně malé změny teploty chladiva; malé změny objemu chladiva v primárním okruhu a z toho vyplývající nižší nároky na velikost kompenzátoru objemu a jeho regulační obvody; za předpokladu silných samoregulačních vlastností obvodu není bezpodmínečně nutno používat regulátor výkonu při provozu v energetické oblasti. (Regulátor výkonu je

používán s ohledem: na zkrácení přechodových procesů při samoregulaci, které vlivem dopravního zpoždění a tepelných kapacit trvají poměrně dlouho; na změnu zadaného výkonu ze strany reaktoru, na bezpečnost provozu atd.).

Tento regulační program působí též správně např. při výpadku HCČ a jiných poruchách primárního chodu, při kterých poklesne průtok chladiva reaktorem a nastává zvýšení teploty; také při výpadku turbíny, kdy vlivem zvýšení tlaku a především teploty páry v PG dochází ke zvýšení střední teploty chladiva v primárním okruhu a tím ke snížení výkonu reaktoru. (Krátkodobé zvýšení tlaku, ke kterému v tomto případě dojde, je zpravidla odstraněno přepouštěcími ventily do kondenzátoru, případně do atmosféry.)

Nevýhody tohoto programu jsou: poměrně velké změny teploty a tlaku páry v sekundárním okruhu (tlak s klesající zátěží vzrůstá), takže je nutné dimenzovat sekundární obvod na vyšší tlaky páry; nepříznivé podmínky pro řízení turbíny – při nižších výkonech turbíny je vstupní tlak páry vyšší, což je pravý opak toho, co vyžaduje turbína (s ohledem na účinnost).

Tento program je tedy výhodný především z hlediska primárního okruhu.



Obr. 3.28: Změny parametrů bloku JE v závislosti na výkonu při uvedených regulačních programech

Průběh důležitých parametrů v závislosti na výkonu je uveden na obr. 3.28. Ze vztahu (3.41) vyplývá, že změnou výkonu při  $T_{CS} = \text{konst}$  a  $Q_C = \text{konst}$  se mění rozdíl teplot  $T_{C2}-T_{C1}$ , tedy teplota v horké i studené věti primárního okruhu. Ze vztahu (3.42) vyplývá nutná změna teploty  $T_{II(ppg)}$  a tlaku syté páry  $p_{pg}$ , pokládáme li  $k.S = \text{konst}$ .

Tlak chladiva v primárním okruhu je udržován regulátorem tlaku na konst. zadané hodnotě.

#### Regulační program s konstantním tlakem páry v parním kolektoru za parogenerátory $p_{pg} = \text{konst}$ ; $Q_C = \text{konst}$

Program s konstantním tlakem páry a tedy i konstantní teplotou sytosti je výhodný z hlediska sekundárního obvodu. Výhody a nevýhody tohoto programu jsou opačné než v předešlém případě, tj. u regulačního programu  $T_{CS} = \text{konst}$ . Ze vztahu (3.41) vyplývá, že změnou výkonu se mění střední teplota chladiva v reaktoru. To vyvolá nežádoucí změnu reaktivity vlivem teplotních součinitelů – reaktor se svými samoregulačními vlastnostmi „brání“ změně výkonu. Proto je nutné změnu

reaktivity kompenzovat zásahy akčních orgánů regulátoru výkonu reaktoru. Změna teploty chladiva vyvolá i poměrně velké změny objemu chladiva v prim. okruhu (asi 7 % při plné změně výkonu). Je proto potřebné instalovat větší kompenzátor objemu, který je schopen svými regulačními obvody tyto změny zvládnout.

Výhodou tohoto programu je zvýšení účinnosti tepelného cyklu a nižší nároky na konstrukci parogenerátoru.

Regulaci tlaku páry a tím i strukturu regulačního obvodu lze v tomto programu realizovat dvěma způsoby podle volby priorit v řízení, laicky řečeno zda je důležitější chod reaktoru a od toho se odvíjí výroba elektrické energie, nebo zda bude JE řízena podle požadavků distribuční soustavy. Často se tyto dva přístupy nazývají jako

- regulace od reaktoru k turbíně
- regulace od turbíny k reaktoru

V obou případech musí být styčný bod, podle kterého se řídí vyváženost mezi výkonem vyroběným v reaktoru a odebraným turbínou či turbínami a dále předaným prostřednictvím alternátoru elektrizační soustavě. (Do celkové bilance se pochopitelně musí zahrnout i vlastní spotřeba elektrárny a případné tepelné odběry.) U tlakovodních JE je tímto bodem tlak páry v kolektoru za parními generátory.

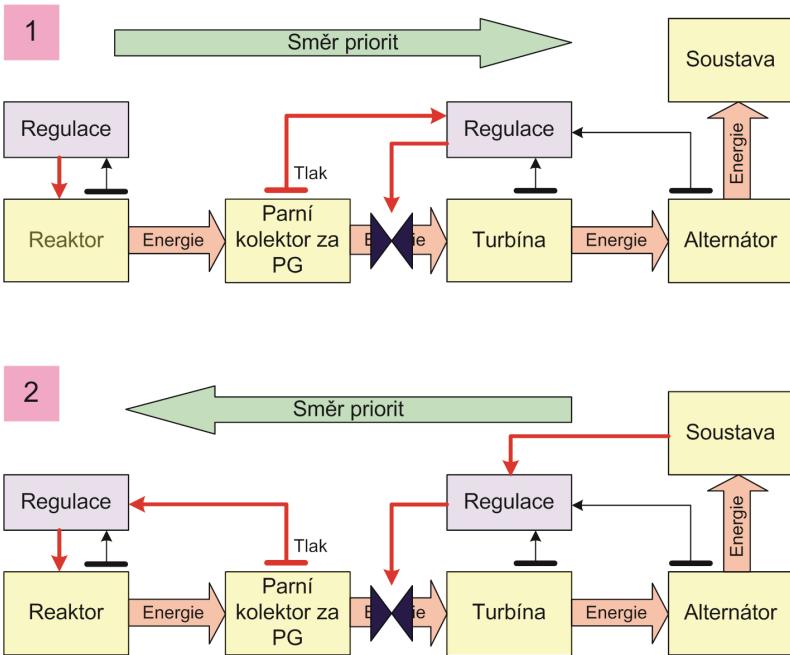
Výkon bloku je určován výkonem reaktoru a tlak v parním kolektoru je udržován na konstantní hodnotě regulačními ventily turbín, tzn. signál od tlaku páry je přiveden na regulátor turbíny.

Výkon bloku je určován výkonem turbín a tlak v parním kolektoru za parogenerátory se udržuje na konstantní hodnotě změnou výkonu reaktoru, tzn. na vstup regulátoru výkonu reaktoru je přiveden signál od tlaku páry. Změna výkonu bloku se provádí změnou zadávané hodnoty regulátoru turbíny.

Regulační obvody reaktoru a turbíny jsou zpravidla navrženy tak, aby mohly pracovat oběma způsoby, každý z nich má své výhody i nevýhody. Např. regulační obvod při způsobu regulace „od turbíny k reaktoru“ nepůsobí správně při poruchách spojených s poklesem nebo ztrátou tlaku (porušení celistvosti potrubí, poruchy přepouštěcích ventilů apod.), kdy vydává signál ke zvýšení výkonu, naopak při poruchách spojených se vzrůstem tlaku (výpadek turbíny) působí správně, tj. snižuje výkon reaktoru. Při způsobu „od reaktoru k turbíně“ například regulátor výkonu reaktoru nereaguje na poruchy v sekundárním obvodu.

Ve skutečnosti je řízení výkonu zajištěno mnohem složitější regulační strukturou zahrnující řadu logických členů schopných řešit co možno nejvíce provozních situací.

Změny základních parametrů bloku v závislosti na výkonu pro tento regulační program lze opět odvodit ze vztahu (3.41) a (3.42). Schematicky jsou uvedeny na obr. 3.29.



**Obr. 3.29: Schématický princip priorit regulace výkonu v JE.**  
**1 - Prioritní reaktor, 2 - Prioritní soustava**

### Regulační program kompromisní

Je vlastně kombinací dvou předcházejících, kde při vyšších hladinách výkonu (60 % až 100 %) se používá regulační program s konstantní střední teplotou chladiva a při nižších hladinách výkonu (0 až 60%) se používá regulační program s konstantním tlakem páry v kolektoru za parogenerátory. Účelem je sloučit výhody obou předcházejících programů z hlediska provozu jaderné elektrárny jako celku.

Pro vyšší hladiny výkonu (na kterých zpravidla elektrárna pracuje) je tímto programem zaručen optimální chod primárního okruhu, především reaktoru. Udržováním konstantního tlaku na nižších hladinách výkonu se sníží horní hranice tlaku a teploty páry, na které musí být sekundární obvod dimenzován, oproti programu s udržováním konstantní teploty chladiva v celém rozsahu výkonu.

Při přechodu z jednoho programu na druhý se mění struktura regulačního obvodu. V části s  $T_{CS} = \text{konst.}$  přejímá řízení výkonu regulátor výkonu reaktoru, na jehož vstup je přivedena odchylka střední teploty chladiva od její zadané hodnoty  $T_{C2} - T_{C1}$ . Střední teplota chladiva se zpravidla vyhodnocuje z rozdílu údajů termočlánků umístěných v horké a studené větvi. Regulace tlaku při nižších hladinách výkonu je možná jak regulátorem turbíny, tak regulátorem reaktoru, jak bylo popsáno v odstavci 2. Průběh parametrů při změně výkonu je uveden na obr. 3.28.

Při řízení JE lze použít ještě další regulační programy, např.: program s udržováním konstantní teploty chladiva na výstupu z reaktoru při konstantním průtoku  $T_{C2} = \text{konst.}$ ,  $Q_C = \text{konst.}$  (což je prakticky jeden z možných kompromis-

ních programů mezi programy pro  $T_{CS} = \text{konst.}$  a  $p_{pg} = \text{konst.}$ ); u reaktorů chlazených plynem nebo sodíkem se používá regulační program s proměnným průtokem chladiva, atd. Na našich JE s reaktory typu VVER jsou používány reg. programy s konstantním tlakem páry, pro blok 1000 MW se uvažuje použití kompromisního programu s udržováním  $T_{CS} = \text{konst.}$  při výkonech bloku nad 70 % jmenovitého výkonu.

### 3.5.3. Provozní režimy reaktoru

Bezpečný, spolehlivý a ekonomický provoz jaderné elektrárny je podmíněn mj. dostatkem přesných a aktuálních informací o hodnotách důležitých fyzikálních a technologických parametrů reaktoru. Jedním z nejdůležitějších parametrů reaktoru, o kterém musí mít řídicí systém i operátor přesnou informaci při všech provozních režimech, je výkon reaktoru. Pro zajištění bezpečnosti provozu jaderné elektrárny musíme znát kromě celkového výkonu reaktoru i jeho prostorové rozdělení v aktivní zóně.

Rovnoměrné rozdělení výkonu v AZ je důležité jak z hlediska bezpečnosti provozu - v místech lokálního zvýšení výkonu (a tím i teploty) vzniká nebezpečí poškození palivových článků a úniku aktivity do primárního okruhu, tak i z hlediska ekonomie provozu - využití prostoru AZ i paliva.

Provozní režimy reaktoru lze rozdělit do těchto oblastí:

**Odstavený reaktor** - reaktor je v podkritickém stavu, tzn. efektivní multiplikační  $k_{ef}$  je menší než jedna. Výkon reaktoru je určen intenzitou cizího zdroje neutronů a stupněm podkritičnosti. Minimální hodnota výkonu odstaveného reaktoru je  $10^{-11}$  až  $10^{-10}$  jmenovitého výkonu. U odstaveného reaktoru se před jeho fyzikálním spouštěním provádí řada kontrolních testů. Testuje se například činnost impulsních čidel pro měření neutronového toku (zavedením cizího zdroje o známém toku neutronů), měření periody reaktoru (změnou vzdálenosti cizího zdroje od příslušného čidla) atd.

**Fyzikální spouštění reaktoru** - reaktor je vyveden z podkritického stavu snížením koncentrace absorbátoru v aktivní zóně reaktoru. Ke spouštění reaktoru je zpravidla používán cizí zdroj neutronů, neboť spontánní rozpad jaderného paliva nestačí vyvinout takový neutronový tok, aby byl dobře měřitelný a mohlo být spolehlivě kontrolováno dosažení kritičnosti. Při prvním spouštění se používá zdroj PuBe, PoBe nebo AmBe a při spouštění reaktoru, který byl již v provozu, beryliový fotoneutronový zdroj (zde již existuje  $\gamma$  záření z rozpadu stěpných produktů jaderného paliva).

Výkon reaktoru je zvyšován udržováním v nadkritickém stavu ( $k_{ef} \geq 1$ ) až po minimální kontrolovatelnou hladinu výkonu. Reaktor se považuje za uvedený na minimální kontrolovatelnou hladinu výkonu při dosažení stabilních měřitelných údajů provozních přístrojů kontroly periody a neutronového toku. Po uvedení na tuto hladinu výkonu se prověruje funkce regulačních a některých havarijních systémů (např. havarijní dávkování kyseliny borité u reaktoru VVER), měří se účinnost regulačních tyčí, při prohřívání se vyšetřují teplotní i tlakové koeficienty reaktivity atd. Při fyzikálním spouštění nejsou kladený vysoké nároky na přesnost, ale je nutné kontrolovat rychlosť změny výkonu reaktoru (periodu reaktoru) tak, aby

ochrany mohly v případě potřeby bezpečně reaktor odstavit. Fyzikální spouštění se provádí zpravidla ručně operátorem a je ukončeno v oblasti  $10^{-5}$  až  $10^{-7}$  jmenovitého výkonu reaktoru.

**Energetické spouštění** - vyvedení reaktoru z minimální kontrolovatelné hladiny výkonu na jmenovitou. Tuto oblast lze ještě rozdělit na tzv. studený stav reaktoru (oblast výkonu  $0,1 \div 1\%$  jmenovitého) a na oblast energetickou, ve které již značný vývin tepla v AZ vyžaduje chlazení reaktoru (odvod tepelné energie pomocí teplonosného média a výměníku sekundárního okruhu). Během energetického spouštění se opět provádí řada kontrolních testů řídících systémů včetně rektifikace měřicích obvodů neutronového toku a ověření správné činnosti jednotlivých technologických částí energobloku. Rychlosť energetického spouštění je omezena vzhledem ke vzniku pnutí v nádobě reaktoru, palivových článcích i ostatních konstrukčních prvcích vlivem nerovnoměrného ohřevu.

**Provoz na jmenovitém výkonu** nebo v požadovaném energetickém pásmu výkonu. V tomto režimu, ve kterém je JE převážnou část svého „života“, je nutné udržovat s potřebnou přesností základní parametry bloku. Předepsaná závislost základních parametrů bloku (výkon reaktoru, teplota, tlak a průtok chladiva, tlak v sekundárním okruhu atd.) na dodávce elektrické energie do soustavy se řídí podle regulačních programů. V tomto provozním režimu je řízení bloku převážně automatizováno a operátoru jsou ponechány pouze některé řídící funkce, například řízení prostorového rozložení výkonu (neutronového toku) v aktivní zóně.

**Odstavení reaktoru** lze rozdělit na:

- plánované odstavení – provádí se po ukončení kampaně při výměně paliva v reaktoru, případně při opravě některého z důležitých zařízení primárního nebo sekundárního okruhu. Vlastní odstavení se provádí zpravidla ručně operátorem zvýšením koncentrace absorbátoru v aktivní zóně (např. zasunutím regulačních kazet) a uvedením do podkritického stavu ( $k_{ef} < 1$ ). Při snižování výkonu je nutné dodržovat rychlosť změny tak, aby nedocházelo k velkým teplotním pnutím.
- havarijní odstavení – nastává na základě příslušného havarijního signálu od systému ochran, nebo na příkaz operátora – zmáčknutím tlačítka HO. Vlastní proces odstavování se provádí automaticky systémem řízení a ochran reaktoru. Rychlosť odstavení je odstupňována a je závislá na závažnosti vzniklé poruchy. Při nejzávažnějších poruchách je reaktor odstaven velmi rychle a proces odstavování po vydání příslušného havarijního signálu již nelze přerušit. Rychlé změny teplot snižují životnost zařízení prim. okruhu – především nádoby reaktoru, potrubí a armatur – proto je nutno poruchy dobře analyzovat a rychlé odstavení použít jen v krajním případě.

### 3.5.4. Regulace reaktoru

Výkon reaktoru se řídí rychlosťí vyhořívání štěpného materiálu uloženého v aktivní zóně, resp. hustotou toku tepelných neutronů, kterému je přímo úměrný. Akční veličinou regulačního obvodu výkonu reaktoru je reaktivita. Chceme-li udržovat konstantní výkon reaktoru, musí být reaktivita rovna nule a efektivní multiplikační součinitel roven jedné. Zavádění reaktivity do množivého prostředí reaktoru

je tedy pouze přechodná záležitost, požadujeme-li změnu výkonu reaktoru z jedné hladiny na druhou. Velikost reaktivity regulačních orgánů je s ohledem na udržení kontrolovatelné štěpné reakce omezena tak, aby (s velkou rezervou) nebylo možné překročit hodnotu  $\beta_{ef}$  a nemohlo ani lokálně dojít ke štěpení „na okamžitých neutronech“ a z toho vyplývajícím důsledkům.

Jak by se změnila rychlosť zvyšování výkonu pro uvedený případ, je zřejmé ze vztahu pro neutronový výkon kdy se střední doba života neutronů sníží z  $\bar{t} = 0,1$  na  $\bar{t} = 0,0001$ :

$$P(t) = P_0 \exp \left\{ \frac{1}{1} \int_0^t [(1-\beta)k_{ef}(t) - 1] dt \right\} \quad (3.44)$$

$P_0$  ..... je výkon reaktoru v čase  $t=0$

Prakticky všechny zásahy do množivého prostředí reaktoru mají vliv na změnu alespoň jednoho z koeficientů ef. multiplikačního součinitele  $k_{ef}$  a tedy i na změnu reaktivitu. Pro řízení štěpné reakce lze prakticky použít pouze některé:

**Změna množství štěpného izotopu** – ovlivňuje koeficienty  $\eta$  a  $\epsilon$ , tj. počet rychlých neutronů při štěpení. U homogenních reaktorů se provádí změnou koncentrace jader štěpeného materiálu v palivovém roztočku, u heterogenních zasouváním a vysouváním palivových kazet z aktivní zóny. Tento způsob řízení výkonu se používá u rychlých reaktorů, zřídka u tepelných ke kompenzaci dlouhodobých změn reaktivitu.

**Změna vlastností moderátoru** – ovlivňuje koeficient  $p$ , tj. úbytek neutronů při procesu zpomalování. Lze realizovat u reaktorů s kapalnými moderátory změnou poměru dvou různých moderátorů (např.  $H_2O$  a  $D_2O$ ). Tento způsob je málo používaný.

**Únik neutronů** – ovlivňuje člen

$$P = \frac{k_{ef}}{k_\infty} \quad (3.45)$$

respektující únik neutronů z reaktoru konečných rozměrů do okolí. Je závislý na poměru objem/povrch aktivní zóny a lze jej zvýšit pomocí reflektoru odrážejícího část neutronů unikajících z reaktoru zpět do aktivní zóny. Tento způsob řízení štěpné reakce je používán u malých reaktorů (výzkumných), kde lze snadno zhodit pohyblivý reflektor a poměrný únik neutronů je tak velký, že jeho změnou lze dosáhnout potřebné změny reaktivitu.

**Absorpce neutronů** – ovlivňuje především koeficient  $f$ , tj. poměr tepelných neutronů pohlcených v palivu k celkovému počtu neutronů pohlcených v množivém prostředí. Realizuje se změnou koncentrace silně absorbující látky (B, Cd, Hf, atd.) v aktivní zóně. Je to nejúčinnější a nejrozšířenější způsob změny reaktivitu využívaný k regulaci výkonu.

Absorpční látku lze do aktivní zóny zavádět několika způsoby:

Ve formě regulačních tyčí hloubkou zasunutí do aktivní zóny. Tímto způsobem lze velmi rychle a přesně měnit reaktivitu. Nevýhodou jsou poměrně složité pohonné mechanismy a lokální deformace neutronového a tím i teplotního pole.

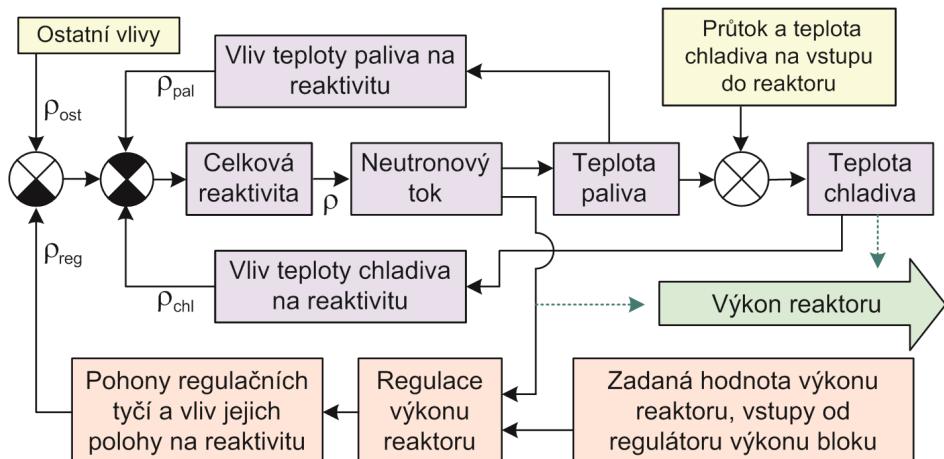
Pomocí vyhořívajících absorbérů obsažených přímo v jaderném palivu, nebo jako samostatné elementy (tyče). Používá se především pro kompenzaci přebytečné reaktivity v počátku kampaně reaktoru.

Změnou koncentrace tekutého absorbéru přidaného do moderátoru nebo chladiva. Tento způsob se nehodí pro regulaci rychlých změn výkonu, neboť především snižování koncentrace absorbéru je poměrně zdlouhavé. Má však tyto výhody: rovnoměrnější rozložení hustoty neutronového toku a tím i vyšší využití výkonu aktivní zóny umožňuje snížení počtu regulačních tyčí a tedy jednodušší konstrukci reaktoru a akčních orgánů, umožňuje dostatečné snížení neutronového toku při odstavení reaktoru (např. při výměně paliva). Jako absorbéru se nejčastěji používá kyselina boritá  $H_3BO_3$  pro své výhodné vlastnosti: poměrně vysoký účinný průřez pro absorpci, dobrá rozpustnost, nízké korozní vlivy, stálost roztoku i její relativně snadné odstranění z roztoku.

Regulace výkonu reaktoru zpravidla probíhá současně ve dvou směrech:

- regulace celkového výkonu reaktoru, tedy reaktoru jako bodového zdroje energie
- regulace rozložení výkonu v prostoru aktivní zóny

Způsob regulace celkového výkonu je určen zapojením jaderného reaktoru do systému řízení bloku JE a jeho regulačním programem. Reaktor může být reguloval na zadanou hodnotu neutronového toku (výkonu) anebo podle zadané hodnoty tepelně technických parametrů bloku (teploty v prim. okruhu, tlak v sekund. okruhu apod.). Regulační obvody jsou zpravidla navrženy tak, aby změnou své struktury mohly řídit výkon reaktoru více způsoby.



Obr. 3.30: Schématické znázornění vlivů na reaktivitu energetického reaktoru

Regulace rozložení výkonu je prováděna na základě údajů vnitroreaktorových detektorů neutronového toku a teploty jako soustava s rozloženými parametry. Má význam pro bezpečnost a ekonomii provozu, neboť v místě lokálního zvýšení výkonu může dojít k poškození pal. elementů litem teplotního pnutí, je nutné snižovat celkový výkon reaktoru, zhoršuje se vyhořívání paliva. Regulační obvod prostorového rozložení výkonu je zpravidla autonomní. Údaje mikroreaktorových detektorů jsou zpracovány počítacem a výsledný obraz teplotního pole, resp. pole hustoty neutronového toku, je předán operátorovi, který provede příslušné akční zásahy „ručně“, anebo řídícímu systému reaktoru. U reaktorů o velkých výkonech je nutné navrhnut jejich systém tak, aby byl schopen regulovat rozložení výkonu s ohledem na možné prostorové oscilace neutronového toku vyvolané přechodovými otřavami.

### 3.5.5. Související regulace

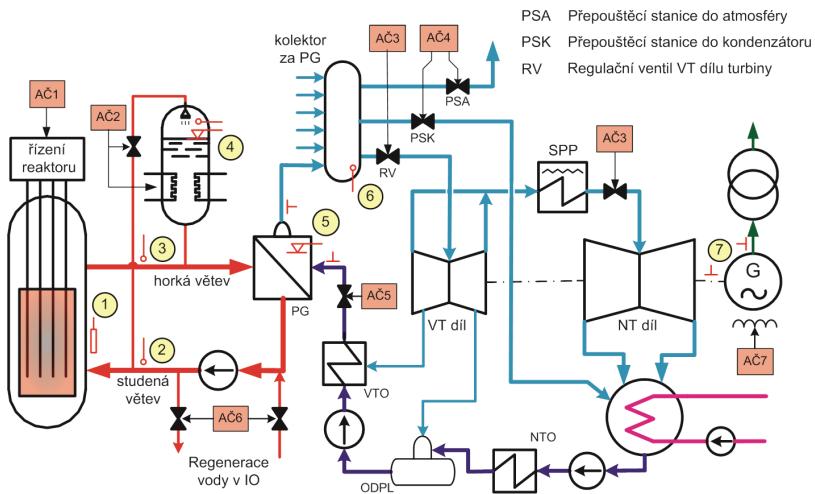
S bezpečným chodem reaktoru souvisí dodržování jeho provozních parametrů především tlaku, průtoku a teploty chladiva včetně omezení rychlosti jejich změn (teplotní pnutí, vodní rázy, zpětné vazby na reaktivitu atd.). Zajistit rovnováhu výkonové i hmotnostní bilance elektrárny od reaktoru po turbínu, a při tom udržovat provozní parametry bloku v příslušných provozních tolerancích mají za úkol hlavní blokové regulační obvody spolu s regulačními obvody navazujících technologií a jejich automatikami. Mezní hodnoty provozních parametrů jsou stanoveny tak, aby s určitou rezervou (s ohledem na dynamické stavy) nezasahovaly do pásma limitačních systémů a nezpůsobily bezdůvodné zásahy ochranných systémů (tzv. bezpečné poruchy). S bilanční rovnováhou bloku JE s tlakovodním reaktorem souvisí především tyto parametry:

- Výkon reaktoru
- Tlak v kompenzátoru objemu
- Hladina v kompenzátoru objemu
- Hladiny v parogenerátorech
- Tlak v hlavním parním kolektoru
- Hladina v napájecí nádrži
- Tlak v napájecí nádrž.
- Tlak v kondenzátoru
- Hladina v kondenzátoru
- Elektrický výkon alternátoru

Příklady umístění akčních členů a měřených parametrů vybraných regulačních obvodů JE s tlakovodním reaktorem je uveden na obr. 3.31.

Jako příklad lze uvést regulaci v kompenzátoru objemu, jehož hlavní úkolem je udržovat tlak v uzavřeném IO. Tlak v kompenzátoru a tím i v IO je udržován pomocí systému sprch napojených přes regulační ventil (AČ2) na studenou větev IO (způsobuje kondenzaci páry v horní části nádoby kompenzátoru a tím snižuje tlak) a systémem elektroohříváků, jehož výkon je měněn spínáním (AČ2) jeho jed-

notlivých sekcí (generuje páru a tím i zvyšuje tlak). Hladina vody je regulována regulačními ventily odpouštění a doplňování vody IO (AČ6) pro její regeneraci.



Obr. 3.31: Rozmístění hlavních měřicích bodů a akčních členů v JE s tlakovodními reaktory

### Měřicí body

- měření neutronového toku, výkonu reaktoru
- teplota a průtok ve studené věti I.O
- teplota a průtok v horké věti I.O
- tlak v I.O, hladina v KO
- průtok napájecí vody do PG, průtok páry z PG a hladina vody v PG
- tlak páry v hlavním parním kolektoru
- otáčky generátoru a napětí

### Akční členy

- řízení výkonu reaktoru, polohou regulačních tyčí
- regulace tlaku v I.O pomocí sprchy a elektrických ohříváků
- regulace otáček turbíny, respektive výkonu elektrárny
- regulace, snižování tlaku v případě nadlimitních hodnot
- regulace hladiny v PG
- regulace hladiny v kompenzátoru objemu
- regulace napětí, respektive jalového výkonu

### **3.5.6. Perspektivy rozvoje JE**

#### **Současný stav jaderné energetiky**

Jaderná energetika je s námi již od padesátých let minulého století. Za tuto dobu si vydobyla pevné místo mezi výrobci elektrické energie. Přestože byl vlivem následků nehody na čtvrtém černobylském bloku silně narušen vztah veřejnosti k ní, a její rozvoj prakticky stagnoval, prožívala od přelomu století obrodu. Renesance jaderné energetiky bylo vidět i v USA, jednoho z největších odpůrců jaderné energetiky v osmdesátých letech minulého století, které přehodnotily energetickou situaci v zemi a včetně prezidenta posvětily domácí rozvoj jaderné energetiky i mezinárodní spolupráci ve výzkumu a vývoji nových jaderných zdrojů a v souvisejících technologiích. Další ránu dostala v březnu roku 2011, kdy jako následek přírodní katastrofy došlo k havárii ve čtyřech blocích jaderné elektrárny Fukušima v Japonsku. Na tuto událost reagovala především Evropa. Německo ukončilo provoz osmi starších reaktorů a do roku 2022 plánuje uzavřít dalších devět, Itálie zamítlá po referendu plán na výstavbu jaderných elektráren, které by pokryly 25 % spotřeby do roku 2030, Švýcarsko uvedlo, že po skončení životnosti svých pěti JE ukončí výrobu z jádra.

Zvyšující se počet obyvatel naší planety, hospodářský rozvoj především v nejlidnatějších státech a tím i poptávka po energetických zdrojích, na druhou stranu úbytek zdrojů fosilních, jejich rostoucí cena, problematika globálního oteplování, větší energetická soběstačnost a zvyšující se spolehlivost a bezpečnost, to vše jednoznačně nahrává jaderné energetice. To ostatně dokazují i informace Světové nukleární asociace WNA, které ukazují, že navzdory uvedené havárii je především v Asii mnoho elektráren rozestavěných, další se projektují a plánují. (Na příklad v Číně je 26 reaktorů ve výstavbě, 56 je projektováno a dalších 120 navrženo). I v Evropě jsou státy, kde součástí energetického mixu jaderná energetika zůstává, mezi ně se řadí i Česká republika.

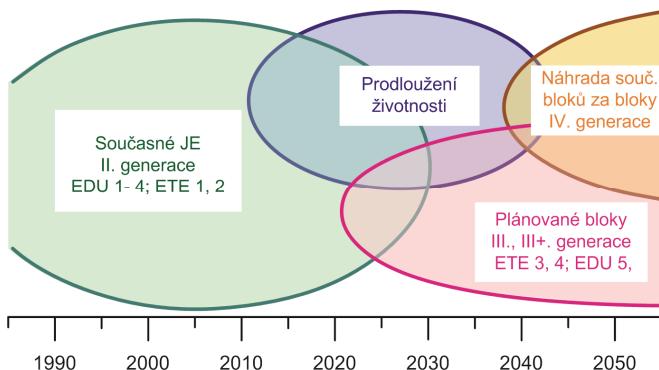
Česká republika vypsala tendr na dostavbu dvou bloků JE Temelín a do budoucna počítá s výstavbou dalšího bloku v JE Dukovany, kde v současnosti bez větších komplikací probíhá modernizace každého ze čtyř bloků, kterou se zvýší jeho jmenovitý výkon ze 440 na 500 MW. Tato akce je součástí jaderné koncepce, která počítá s modernizací stávajících elektráren a prodloužení jejich životnosti na dobu než budou v provozu nové elektrárny III. a IV. generace.

Česká republika má stále poměrně vysoké zásoby uranu (ověřených zásob je více jak 130 000 tun, odhad je podstatně vyšší), čímž se může pochlubit málokterá země v Evropě. Současná těžba je cca 400 tun ročně. Uranový koncentrát je dodáván v souladu se smluvními podmínkami ČEZ do zahraničních konverzních závodů. Vytěžený uran pokryje po přepracování výrobu paliva pro naše jaderné elektrárny (podle stupně obohacení a ekonomické hranice separačních prací se spotřebuje na výrobu 1 kg paliva cca  $5 \div 7$  kg přírodního uranu). Není těžké si spočítat, na jak dlouho by jím byla saturována naše jaderná energetika.

Česká republika zamýslí jít opět cestou osvědčených tlakovodních reaktorů, pochopitelně odpovídajícím novým, přísnějším bezpečnostním a spolehlivostním podmínkám, reaktorům III. nebo III.+ generace. Do užšího výběru se kvalifikovaly tři reaktory, které ze současného pohledu připadají v úvahu: Tlakovodní reaktor

AP 1000 firmy Westinghouse, tlakovodní reaktor EPR firmy AREVA a tlakovodní reaktor MIR 1200 konsorcia Škoda Jaderné strojírenství s Atomstrojexportem.

V podmínkách tendru je požadavek na funkční referenční elektrárnu nabízeného typu. Výstavba bloků všech tří pilotních typů víceméně úspěšně pokračuje i když s časovým skluzem, daří se také řešit vyskytující se problémy a tak bude možné posoudit prezentovanou kvalitu a technické i ekonomické parametry. Původně předpokládané termíny zahájení výstavby III. bloku v roce 2013 a dokončení výstavby v roce 2020 se však zřejmě posunou. Veškeré náklady na stavbu mají být financovány pouze z prostředků ČEZ, a.s., jejím vlastním kapitálem a úvěry



Obr. 3.32: Současný scénář rozvoje jaderné energetiky v ČR

### 3.5.7. Generace jaderných reaktorů

Jaderné reaktory se podle období výstavby a provozu, stupně technického a technologického vývoje, spolehlivosti a bezpečnosti dělí do čtyř generací:

Generace I: Prototypy komerčních reaktorů z 50. a 60. let, které již dnes prakticky nejsou v provozu.

Generace II: Reaktory uvedené do provozu v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století. Jsou součástí velkých komerčních elektráren a, i když jsou postupně odstavovány, tvoří základ současné jaderné energetiky.

Generace III: Reaktory uváděné do provozu od 90. let minulého století. Jejich koncepce zahrnují mnoho nových, především bezpečnostních prvků. Jsou často označovány jako "pokročilé reaktory".

Generace IV: Reaktory s jejichž komerčním využitím se počítá od roku 2030, kdy životnost mnoha dnes provozovaných reaktorů bude končit. Jejich koncepce budou zahrnovat mnoho inovací včetně uzavřeného palivového cyklu. Místo vody bude většina využívat k chlazení látky, umožňující provoz s mnohem vyšší teplotou a tím i účinností.

#### Reaktory III. a III+. generace

Reaktory, jejichž koncepce vychází ze spolehlivých, úspěšně provozovaných současných jaderných bloků, s mnoha evolučními prvky zaručujícími významný

pokrok z hlediska bezpečnosti a ekonomie provozu. (Vyšší účinnost, vyšší vyhoření paliva, delší doba mezi odstávkami aj.). Především jsou to reaktory tlakovodní nebo varné, navržené na přelomu tisíciletí a v současnosti realizované. Většinou jsou stavěny ve východní Asii, v Japonsku jsou v provozu dva reaktory ABWR 1450, v Evropě je jejich zástupcem např. reaktor EPR stavěný ve Finsku a ve Francii, v USA získal licenci reaktor AP-600 od Westinghouse Company.

Reaktory se zvýšenou pasivní bezpečností (dvojitá obálka, přirozené chlazení, vyšší zajištění odvodu tepla z reaktoru), delší životnosti (60 let), vyšším koeficientem využití výkonu, delší kampaní a jinými vylepšeními jsou prezentovány jako reaktory III+ generace. Jsou to v zásadě všechny v současnosti k výstavbě nabízené bloky. Dosud však není v provozu referenční elektrárna, jejíž provoz by potvrdil nabízené parametry a na kterou řada zájemců čeká. Reaktory III+ generace by měly zajistit výrobu energie v období dvacátých a třicátých let tohoto století. Ač je v současné době schváleno a certifikováno v různých zemích více projektů těchto pokročilých reaktorů, tak díky skluzům (z velké části způsobené licenčním řízením) není dosud žádný v energetickém provozu. Jako příklad reaktorů patřící do této skupiny lze uvést všechny tři v úvodu jmenované reaktory zahrnuté do tendru pro dostavbu JE Temelín, dále reaktory s kuličkovým keramickým palivem PBMR (s výstavbou počítá Čína), americký IRIS od firmy Westinghouse, ABWR a ESBWR od GE, GT-MHR, a také evropský SWR 1000. Všechny reaktory postavené do roku 2030 budou vybrány z této generace.

#### **Reaktory IV. generace**

Podnět k zahájení programu Generation IV International Forum (GIF) dalo v roce 1999 ministerstvo energetiky USA jako odpověď na rostoucí ceny elektřiny, na nutnost snížit emise skleníkových plynů a tím zabránit vlivu na globální oteplování (nikdo v té době nečekal, že Bushova administrativa odmítne Kjótský protokol), na zvyšování světové spotřeby energie a další potíže, zejména s alternativními zdroji. Dosud se do něj zapojilo, kromě univerzit, národních laboratoří a průmyslu v USA celkem 10 zemí

GIF se zabývá dlouhodobější perspektivou a soustředěným výzkumem v oblasti jaderné energetiky. Tato idea vyšla zejména ze zhruba padesáti let zkušeností s jadernou energetikou, přičemž se snaží střízlivě hodnotit nejen její nesporné úspěchy, ale i problémy a nedostatky. Velmi náročné zadání je pak formulováno tak, aby při ekonomické konkurenčeschopnosti jaderné energetiky mohly být její dosavadní nevýhody v maximální míře odstraněny. Veškeré shrnutí, požadavky a body dalšího výzkumu a vývoje jsou shrnuty v dokumentu "A technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems".

Cílem iniciativy je propracovat technologie vybraných 6 perspektivních typů reaktorů pro nasazení po r. 2020. Velká pozornost je věnována těm typům, které díky vysoké teplotě umožní kromě výroby elektrické energie i výrobu vodíku. Vodík je perspektivním palivem využitelným v budoucnosti především v dopravě, kde by měl nahradit ropné produkty. Zároveň je zde jednoznačný požadavek na zvyšování účinnosti jaderných reaktorů.

Jednotlivé reaktorové systémy dle rozdělení GIF jsou následující:

- Plynem chlazený rychlý reaktorový systém – GFR  
(Gas-Cooled Fast Reactor System)
- Olovem chlazený rychlý reaktorový systém – LFR  
(Lead-Cooled Fast Reactor System)
- Reaktorový systém s roztavenými solemi – MSR  
(Molten Salt Reactor System)
- Sodíkem chlazený rychlý reaktorový systém – SFR  
(Sodium-Cooled Fast Reactor System)
- Superkritický vodou chlazený reaktorový systém – SCWR  
(Supercritical-Water-Cooled Reactor System)
- Vysokoteplotní reaktorový systém – VHTR  
(Very-High-Temperature Reactor System)

Každý z těchto systémů má určité výhody a teprve budoucí vývoj ukáže, který, nebo které z těchto reaktorů budou hrát rozhodující úlohu v jaderné energetice příštích desetiletí. Mezi potenciálními zájemci lze vystopovat různou míru zájmu o jednotlivé systémy. Předběžně převažuje zájem o rychlý reaktorový systém chlazený plynem (GFR), superkritický vodou chlazený reaktorový systém (SCWR) a vysokoteplotní reaktorový systém (VHTR). Jednotlivé země vyjadřily své preferenze následovně: SCWR – USA, Japonsko, VHTR – USA, Korea, GFR – USA, Francie, Korea, SFR - Japonsko, LFR – Rusko, USA. Z hlediska časového plánu se jeví jako nejpokrokovější typy SFR a VHTR, které jsou nejvíce prozkoumány a spuštění jejich demonstračních elektráren by mohlo proběhnout okolo roku 2020.

## Cíle projektu GIF

Při hledání parametrů pro výběr vhodných kandidátů pro reaktorové systémy IV. generace byla důležitá tři kritéria: Za prvé by měly sloužit jako základ pro posouzení a porovnání jednotlivých systémů v technologické zprávě (Technology Roadmap). Za druhé jsou zde výzvy a stimuly k nalezení inovačních systémů, a to jak pro palivový cyklus, tak pro technologii reaktoru. A za třetí by měly motivovat k dalšímu společnému snažení ve výzkumu a vývoji, který je již dnes v plném proudu. Vlastní cíle pro jaderné energetické systémy čtvrté generace jsou formulovány ve čtyřech obecných oblastech a to z pohledu dlouhodobé udržitelnosti, ekonomičnosti, bezpečnosti a spolehlivosti a vyloučení zneužití jaderného materiálu.

Je zajímavé, že na prvním místě zde není tradičně jmenovaná bezpečnost, ale udržitelnost (Sustainability). Udržitelnost je definována jako schopnost vyhovět zvyšujícím se požadavkům nynější generace a zároveň neohrozit potřeby generací příštích. Udržitelnost vyžaduje zachování přírodních zdrojů, ochranu životního prostředí, zachování schopnosti budoucích generací uspokojit své vlastní potřeby a vyhnout se nakládání na ně přílišných břemen. Hlavní cíle udržitelnosti zahrnují lepší nakládání s radioaktivním odpadem, minimální ekologický dopad, účinné

zužitkování paliva a vývoj nových energetických produktů, které posouvají jadernou energetiku dále, než jen k výrobě elektřiny. Je definována ve dvou hlavních důrazech:

- Udržitelnost – 1. Zajistit trvale udržitelnou výrobu energie, splňující požadavky na čistotu ovzduší a dostupnost systému pro delší časový horizont. Je zde také požadavek efektivního využití paliva pro celosvětovou výrobu energie.
- Udržitelnost – 2. Minimalizovat množství jaderného odpadu, usnadnit nakládání s ním a výrazně snížit potřebu dlouhodobého dozoru nad úložištěm radioaktivních odpadů a zařízeními vyřazenými z provozu, a tím podstatně zlepšit ochranu obyvatel a životního prostředí.

Již z těchto bodů je zřejmé, kam bude vývoj jaderných systémů nadále směřovat. Nesmí ovšem při tom ztratit konkurenčeschopnost a proto hned následují cíle ekonomické (Economics):

- Ekonomika – 1. Jaderné energetické systémy GIV (Generation IV) musí být cenově výhodnější (z hlediska celého životního cyklu) v porovnání s jinými energetickými zdroji.
- Ekonomika – 2. Jaderné energetické systémy GIV musí mít úroveň finančního rizika srovnatelnou s jinými energetickými systémy (zatím má jaderná energetika s ohledem na vysoké investiční náklady a dlouhou životnost, která znamená i jisté neurčitosti v cenách energie, finanční rizika vyšší).

Stále probíhající přechod od regulovaného na neregulovaný trh s elektrickou energií s sebou přináší zvyšující se počet výrobců a obchodníků (vlastníků/operátorů JE). Dosud byly JE koncipovány zejména jako velké jednotky pro pokrývání základního zatížení denního diagramu. S regionálními výrobci přichází potřeba výroby malých lokálních jednotek. Ekonomické cíle se netýkají pouze minimalizace nákladů na výstavbu a provoz JE a výrobu elektřiny, ale zaměřují se na širokou škálu produktů, které budou v budoucnu nezbytné a které by mohly být významným zdrojem peněz, tak říkajíc "navíc". Za ty hlavní jmenujme např. výrobu vodíku, centralizované zásobování teplem a výrobu pitné vody.

Další cíle jsou již z hlediska využívání jaderné energie „témař klasické“. Je zde jednoznačný trend zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti (Safety and Reliability) JE, snaha výrazně redukovat počet a stupeň úniku radioaktivních materiálů a snížení možnosti významného poškození elektrárny a jejich následků. Systémy čtvrté generace čelí novým výzvám ve spolehlivosti při vysokých teplotách.

Spolehlivost jaderných systémů GIV bude založena zejména na vysoké inherentní (přirozené) a pasivní bezpečnosti. tzv. inherentní bezpečnost předpokládá takové využití základních fyzikálních principů, které by co nejvíce vyloučilo možnost havárie. Prvky pasivní bezpečnosti mají zmírnit následky případných havárií a spolu s bariérami zabránit úniku nebezpečných látek i v případě selhání veškeré aktivní bezpečnostní a havarijní techniky, tedy techniky závislé na dodávce proudu. Velmi významná změna v oblasti bezpečnosti spočívá u jaderných systémů GIV v předpokládané absenci potřeby vnějšího havarijního plánu, tj. nutnosti opatření na ochranu obyvatelstva žijícího v okolí takové elektrárny a tedy i nutnosti zóny havarijního plánování.

Jako poslední je formulován požadavek zdůrazňující trvalou potřebu zabránit šíření jaderných zbraní (Proliferation Resistance and Physical Protection) nebo zneužití jaderných technologií k teroristickým činnostem, která vychází z bezpečnostní klauzule „Nuclear Nonproliferation Treaty“ (NPT) a která monitoruje veškerou světovou zásobu jaderného materiálu v palivovém cyklu, těžbou počínaje, přes obohacení, přeměnu, výrobu, produkci elektřiny, recyklaci a finálním uložením odpadů konče. Je požadováno, aby jaderné energetické systémy GIV zajistily snížení rizika zcizení jaderných materiálů, snížení jejich atraktivity pro případné zneužití k výrobě jaderných zbraní a zvýšení fyzické ochrany proti teroristickým útokům.

### 3.5.8. Energetické zdroje budoucnosti

Již dnes se musíme zamýšlet nad novými zdroji, které posunou časovou hranici ekonomické výroby energie. Přírodní zásoby uranu nejsou nevyčerpateLNé a to i při zvýšení „výtěžnosti“ energie z paliva v rychlých množivých reaktorech. Schůdnou se zatím nejvíce ani cesta získávat uran z míst o nízké koncentraci (mořská voda, naplavené pískové vrstvy atd). Problém, který „trápí“ lidstvo, není pouze zdroj, ale i kvalita celého procesu výroby energie, tj. cesty od těžby až po likvidaci odpadů i výroben. Pro energetiku z toho vyplývá nutnost řešení těchto úkolů :

- hledání nových zdrojů a zefektivnění stávající výroby energie
- zvýšení bezpečnosti provozu elektráren na nejvyšší možnou míru
- eliminace nebezpečí zamoření Země palivovými odpady

Z jaderných zdrojů využitelných pro energetiku, které řeší některé z uvedených problémů a o kterých se v současné době uvažuje jako o zdrojích tohoto tisíciletí, se stručně zmíníme o třech nejpravděpodobnějších, jimiž jsou:

- termonukleární reaktory
- termonukleární hybridní reaktory
- podkritické reaktory

#### Termonukleární reaktory

Slučování velmi lehkých jader v jádra těžší v termonukleárních reaktorech je v současnosti považováno za jednu z reálných alternativ získávaní jaderné energie. O možnostech této transmutace jsme se již zmínili a víme, jak přibližně spočítat teoreticky vytěžitelnou energii z jedné jaderné reakce.

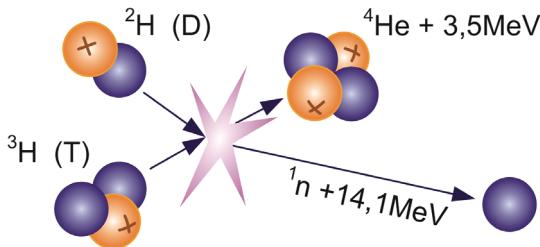
Princip se zdá relativně jednoduchý, přesto se s realizací potýkají řady vědeckých týmů ve specializovaných laboratořích polovinu století. Spontánní termonukleární reakce probíhá ve hvězdách, tj. asi v 99 % hmotnosti vesmíru a je prakticky zdrojem jeho veškeré tepelné energie. Podařilo se uskutečnit jen její neřízenou explozivní formu. První úspěšný pokus s vodíkovou bombou byl proveden už v roce 1953. Energie potřebná k uskutečnění syntézy byla získána ze štěpné reakce. Řízenou termonukleární syntézu se však dosud, přes optimistické prognózy z padesátých a šedesátých let, realizovat nedáří. Problémem je, jak překonat odpudivé elektrostatické síly mezi jádry atomů a přimět je ke sloučení, respektive vytvořit tak vysoký energetický vklad, který by "nastartoval" termonukleární řízenou

reakci. Ze způsobů které teoreticky přicházejí v úvahu jsou v současnosti zkoumány :

- zvýšení energie jader vysokou teplotou prostředí za současného zvýšení jejich hustoty
- zvýšení energie jader nárazy energetických kvant nebo urychlených částic
- zmenšení průměrů atomů a tak dosažení menší výchozí vzdálenosti mezi jádry a menšího základního vkladu energie nutného pro vznik reakce

Prvně uvedený způsob je zatím nejvíce teoreticky i experimentálně rozpracován a podle prognóz odborníků budou reaktory tohoto typu využívány ke komerční výrobě energie již na konci třicátých letech tohoto století.

Jako nejsnáze realizovatelné z hlediska velikosti počátečního energetického vkladu se v současnosti zdá slučování jader izotopů vodíku - tritia a deuteria na hélium:



Obr. 3.33: Slučování izotopů vodíku a tritia

Z jedné reakce teoreticky vznikne energie asi  $2,8 \cdot 10^{-14}$  J (17,6 MeV). Tritium se v přírodě, díky svému relativně krátkému poločasu rozpadu (12 let), prakticky nevyskytuje. Musí se vyrábět uměle a má další nevýhody: Je jedovaté, slabě radioaktivní a snadno difunduje (i kovem). Pro první vsázku jej lze vyrobit ve štěpných reaktorech například reakcemi:

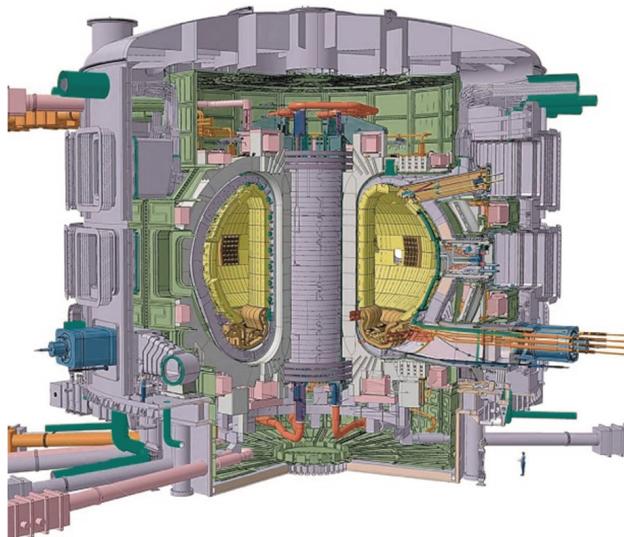


K výrobě dalšího tritia bude zřejmě možné využít stejných reakcí v množivé zóně vlastního termojaderného reaktoru.

Ekonomicky výhodnější bude slučování samotného deuteria popřípadě boru a helia, které bude dle předpovědí vědců uskutečnitelné v druhém vývojovém stupni termojaderných reaktorů. Pokud uvážíme, že voda obsahuje v průměru 0,21 promile deuteria, lze jednoduše spočítat teoretickou výtěžnost energie z litru vody při slučování deuteronů. Ta odpovídá energii, kterou získáme spálením přibližně jedné tuny uhlí.

Termonukleární reakce může být uskutečněna při energiích řádově 0,01 MeV, což odpovídá teplotě prostředí 108 K ( $1 \text{ eV} = 1,2 \cdot 10^4 \text{ K}$ ) a při splnění tzv. Lawsonova kriteria, které určuje podmínky pro udržení samovolné řetězové syntézy. Tuto podmínkou je dosažení určité hodnoty součinu teploty, hustoty, plazmatu a času, po který se tato hustota udrží. Například pro sloučení deuteria a tritia je nutné dosáhnout při teplotě 108 K hustotu 10 bilionů iontů na  $\text{cm}^3$  po dobu jedné sekundy. Jednotlivé podmínky lze v současnosti splnit, ale splnění kriteria jako celku se zatím nedáří.

V současnosti se staví s více než desetiletým zpožděním mezinárodní experimentální termojaderný reaktor ITER v Cadarache v jižní Francii. Výkon reaktoru by měl být 500 MW, proud v plazmatu 15 MA, objem plazmatu 840  $\text{m}^3$ , intenzita magnetického pole v ose 5,3 T. Úkolem tohoto reaktoru je dosáhnout ustáleného říditelného průběhu fúze deuteria a tritia v plazmatickém stavu a prokázat možné technologické využití fúzní energie pro mírové účely tak, aby bylo reálné v letech 2030 až 2050 postavit demonstrační elektrárnu. K tomu, aby zadaný úkol splnil, musí dosáhnout několika technických podmínek: Dosáhnout po dobu 400 s vysoký energetický zisk 10 (poměr vyroběné energie k energii potřebné na udržení plazmatu) při použití deuteria a tritia, a po dobu delší než 1000 s energetický zisk 5. Reaktor ITER by měl také sloužit k testování jednotlivých komponent z hlediska odolnosti v poli silných neutronových toků a vysokých teplot a prokázat bezpečnost fúze včetně vlivu na životní prostředí.



Obr. 3.34: Ilustrační řez experimentálním termonukleárním reaktorem ITER

### Hybridní reaktory

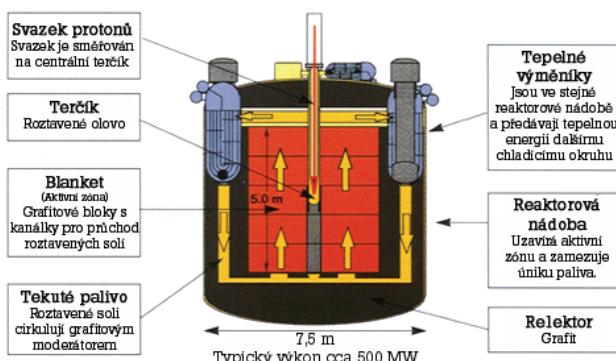
Hybridní reaktory slučují principy obou základních typů jaderných reakcí - štěpení a fúze, s různým podílem na výrobě energie. Prakticky všechny navržené koncepce využívají silného toku neutronů vznikajícího při termojaderné reakci k inicializaci štěpné reakce a k výrobě sekundárního štěpného materiálu. Na jednotku vyroběné energie se u termojaderného reaktoru uvolní přibližně 4krát více neutro-

nú než u reaktoru štěpného. Tato nadprodukce neutronů, pokud není vhodně využita, značně komplikuje konstrukci termojaderného reaktoru. Z tohoto hlediska se řada odborníků přiklání k tomu, že prvním komerčním energetickým reaktorem pracujícím s jadernou fúzí bude reaktor hybridní.

Výhodou hybridních reaktorů je, že jejich štěpná část může pracovat i jako značně podkritická soustava. Produkce sekundárního štěpného materiálu na jednotku výkonu se předpokládá podstatně vyšší (až 5krát), než u rychlých reaktorů. Návrhy uvažují i s výrobou tritia jako paliva pro vlastní termojaderný proces a později i s instalacemi zařízení na likvidaci vysoko aktivních produktů štěpné reakce. V množivé a štěpné části je možné uplatnit zkušenosti z provozu současných reaktorů, provedení termojaderné části bude zřejmě odvozeno od úspěšnosti jednotlivých koncepcí termojaderného reaktoru v praktickém provozu. Jako celek by měl být hybridní reaktor bezpečnější než současné reaktory, také produkce vysoko aktivních odpadů by měla být podstatně nižší. Technicky, technologicky i finančně však bude (z dnešního hlediska) velmi náročný. Sériovou výrobou, vysokou reprodukcí paliva i jeho nižší cenou by se měl provoz hybridních reaktorů po určité době stát efektivním.

### Podkritické reaktory

Reaktor s aktivní zónou, ve které nemůže dojít k rozvoji autonomní štěpné řetězové reakce, označujeme jako „podkritický reaktor“. V izolovaném podkritickém reaktoru musí být multiplikační součinitel neutronů  $k_{ef}$  menší než jedna. K tomu, aby mohl takový reaktor pracovat (a byla přitom splněna podmínka jeho autonomní podkritičnosti), je nutné použít externí zdroj neutronů, nebo zdroj neutronů interní, ale excitovatelný pouze vnějšími podněty. Tím se tato koncepce reaktoru stává kvalitativně odlišnou od současných jaderných reaktorů a z hlediska nepřípustného rozvoje řetězové reakce zcela bezpečnou. Blíží se svým pojetím klasickým elektrárnám, v nichž energii vyrábíme ze zdrojů dodávaných z vnějšku.



Obr. 3.35: Podkritický reaktor ADTT

Externí zdroj neutronů (částic bez elektrického náboje) je poměrně komplikovaný, proto často navrhované koncepce podkritického reaktoru předpokládají zdroj interní. Tím je v reaktoru umístěný terčík, který je ostřelován vysokoenergetickými částicemi (protony) z urychlovače instalovaného mimo reaktor. Materiál terčíku musí po interakci s protonem generovat dostatečný počet neutronů, potřebných pro

další reakce, dochází k tzv. roztříštění jádra. Terčík může být buď přímo z množivého materiálu (přírodní i ochuzený uran nebo thorium), nebo z kovu (Pb, Pb + Bi). Zjednodušeně lze konstatovat závislost počtu generovaných neutronů na hmotnosti terčového jádra a energii dopadajících částic. Velký počet uvolněných neutronů lze využít kromě inicializace štěpné reakce i k výrobě nového paliva (podobně jako u rychlých reaktorů) a k likvidaci jaderných odpadů. Likvidací je myšlená transmutace izotopů s dlouhým poločasem rozpadu na rychleji se rozpadající izotopy, popřípadě na izotopy neaktivní. Reaktory s tímto prioritním účelem se nazývají často transmutory nebo urychlovačem řízené transmutační technologie s mezinárodní zkratkou ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technologies).

Myšlenka využití trítivé reakce není nová, ale bylo od ní upuštěno neboť se dlouho nedařilo dodat částicím potřebnou energii. V současné době už existují urychlovače schopné dodat protonům energii i několik GeV, což je potřebná hranice pro uskutečnění trítivé reakce. Je navrženo několik koncepcí s různým stupněm zaměření. Na jejich vývoji se podílí i Česká republika.

Kdy budou technologie ADTT realizovány, je zřejmě otázka ekonomická. Většina fyzikálních problémů je vyřešena, je třeba dořešit problémy vhodných výkonních urychlovačů, průběžných separací krátkodobých a stabilních izotopů i konstrukčních materiálů

### 3.6. Literatura

- [1] Dočekal A., Bouček S.: Elektrárny, Skriptum ČVUT v Praze, FEL 1989
- [2] Doležal J., Bouček S., Dočekal A.: Elektrárny II, Doplňkové skriptum ČVUT v Praze, FEL 1989
- [3] ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, Praha 2000
- [4] Endrenyi J.: Reliability Modeling in Electric Power Systeme, 1978. John Wiley and Sons, New York
- [5] Roční zpráva o provozu ES ČR za rok 2004, ERÚ, CD-R
- [6] Wolf H.: Energy in a finite world, IIASA, 1981, AustriaX
- [7] Webové stránky společnosti OTE, a.s. <http://www.ote-cr.cz>
- [8] Chemišinec I., Rodryč P.: Změna dodavatele elektrické energie v České republice z pohledu Operátora trhu s elektřinou, Pro-Energy č.1/2007, ISSN 1802-4599.

# **4. Elektrická část elektráren**

## **4.1. Zdroje vlastní spotřeby elektrárny**

Zdroje vlastní spotřeby musí zabezpečit dodávku elektrické energie požadované kvantity a kvality při všech provozních stavech. Kvantita elektrické energie je dána instalovaným příkonem zařízení vlastní spotřeby a ztrát v rozvodu. Kvalita elektrické energie je dána amplitudou napětí, frekvencí a vlivem vyšších harmonických. Rozvodny vlastní spotřeby jsou napájeny dle potřeby ze zdroje najízděcího, pracovního, záložního, doběhového a nouzového.

Spolehlivý a bezpečný provoz elektrárny závisí na spolehlivosti zařízení vlastní spotřeby elektrárny. Proto je napájení vlastní spotřeby elektrárny jištěno rezervními a nouzovými zdroji tak, aby byla zajištěna dodávka elektrické energie zařízením vlastní spotřeby v normálních provozních stavech i při mimořádných poruchových stavech. Návrh vlastní spotřeby elektrárny musí být projektován tak, aby byla zajištěna bezpečnost a bezporuchovost zařízení při trvalém provozu a aby byl zajištěn hospodárný provoz.

### **Najízděcí zdroj vlastní spotřeby**

Najízděcí zdroj slouží pro uvedení elektrárny do chodu z úplného klidu. Většinou se jako najízděcí zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru nebo blokového a odbočkového transformátoru, odpojí-li se od soustavy generátor najízděného bloku. Ve zvláštních případech se pro více výrobních bloků z klidového stavu (např. ostrovní provoz, „najetí ze tmy“) instaluje např. dieselgenerátor, generátor s plynovou turbínou, vodní elektrárna, malá vodní turbína.

### **Pracovní zdroj vlastní spotřeby**

Pracovní zdroj zajišťuje napájení rozvoden vlastní spotřeby při normálním provozu elektrárny. Je navrhován pro dlouhodobý provoz. Nejčastěji se jako pracovní zdroj používá generátor bloku prostřednictvím odbočkového transformátoru.

### **Záložní zdroj vlastní spotřeby**

Záložní zdroj je určený pro dodávku elektrické energie pro vlastní spotřebu v případě poruchy na pracovním zdroji. Nejčastěji se jako záložní zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru.

### **Doběhový zdroj vlastní spotřeby**

Doběhový zdroj umožňuje uvést elektrárnu do úplného klidu při normálních i poruchových stavech. Nejčastěji se jako doběhový zdroj používá elektrizační soustava prostřednictvím záložního transformátoru, nebo akumulátorové baterie.

### **Nouzový zdroj vlastní spotřeby**

Zajišťuje doběh elektrárny při poruše pracovního zdroje a záložního zdroje. Musí se zajistit odvrácení havárie a vážného ohrožení osob, uchování důležitých

informací a ovládání důležitých částí elektrárny. Pro napájení tohoto zdroje bez přerušení dodávky elektrické energie se používá akumulátorová baterie a rotační, nebo statický střídač. V případě možného krátkodobého přerušení napájení spotřebičů se připojuje dieselgenerátor. Stejnosměrné spotřebiče (nouzová olejová čerpadla, ovládání spínačů, cívky stykačů, napájení ústřední a blokové dozorný, důležité elektropohony, střídače, mazutové hořáky, nouzové osvětlení) jsou napájeny z akumulátorové baterie.

## 4.2. Výpočet velikosti zdrojů vlastní spotřeby elektrárny

Při výpočtu velikosti zdroje pro napájení spotřebičů vlastní spotřeby se počítá s činným a jalovým výkonem, se ztrátami v rozvodu a transformátorech a se ztrátami elektrických pohonů a zařízení, které jsou v chodu při maximálním výkonu hlavního technologického zařízení. Zdroj musí být navržen s ohledem na:

- a) krátkodobou přetížitelnost zdrojů
  - b) velikost zkratových proudů a výkonů
- Stanovení zkratových poměrů pro dimenzování zařízení se provádí pro paralelní chod zdrojů, které jsou trvale, nebo dočasně spojeny. Při paralelním chodu zdrojů, které trvá jen několik sekund, lze stanovit zkratové poměry jako při napájení z jednoho zdroje, který však má větší zkratový příspěvek.
- c) napěťové poměry

### Napětí v ustáleném stavu:

Napětí na svorkách spotřebičů vlastní spotřeby je nutné udržovat v tolerancích  $\pm 5\%$ , (výjimečně  $+10\%$ ) jmenovitých hodnot. Pokles pod  $-5\%$  může nastat pouze v podružném rozvodu nn. Napětí na svorkách motorů regulačních pohonů se musí udržovat v mezích nutných pro zajištění spolehlivé funkce pohonů. Napětí na zdrojích nesmí překročit meze stanovené výrobcem.

### Napětí v přechodných stavech:

Napětí na přípojnících vlastní spotřeby za normálního provozu při spouštění jednotlivých elektromotorů nemá klesnout pod 85 % jmenovitého napětí a celkově nesmí poklesnout pod 80 % jmenovitého napětí. Při poruchách, kdy se uplatní samonajízdění, nesmí napětí poklesnout pod 65 % jmenovitého napětí.

Při nesplnění těchto podmínek se mohou provést tato opatření:

- zvýší se výkon transformátoru
- použije se transformátor s nižší reaktancí
- spotřebiče, které nejsou technologicky důležité, se najíždí později

d) funkci ochran zdroje

Při návrhu zařízení elektrické části vlastní spotřeby elektrárny je nutné dodržet dovolené tolerance napětí od jmenovité hodnoty. Ve vlastní spotřebě elektráren se volí tyto napěťové soustavy:

- pro rozvod vlastní spotřeby střídavého napětí vn se volí trojfázová síť na-pěťových hladin 6 kV nebo 10 kV s izolovaným uzlem o kmitočtu 50 Hz
- pro rozvod vlastní spotřeby střídavého napětí nn se užívá trojfázová sou-stava o napětí 400/230 V s pracovním nulovým vodičem. Při napájení vzdálených objektů lze navrhnutou soustavu 500 V s izolovaným uzlem
- pro rozvod vlastní spotřeby stejnosměrného napětí nn se užívá soustava 220 V s oběma póly izolovanými
- napětí ovládacích obvodů se volí podle použitého systému řízení a ovlá-dání

### 4.3. Elektrická schémata elektráren

Návrh elektrického schématu vlastní spotřeby obsahuje splnění následujících bodů:

- Volba výkonu a počtu bloků
- Návrh výkonu alternátoru
- Návrh výkonu blokového transformátoru
- Návrh výkonu odbočkového transformátoru
- Návrh výkonu záskokového transformátoru
- Návrh spotřebičů vlastní spotřeby
- Návrh způsobu zajištění napájení vlastní spotřeby pro standardní provozní stavы
- Návrh způsobu zajištění napájení vlastní spotřeby pro nestandardní pro-vozní stavы
- Návrh vyvedení výkonu

Dále prezentovaná schémata napájení vlastní spotřeby elektráren reprezentují nejčastěji používané typy a mají jen ilustrativní charakter s uvedením pouze nejdů-ležitějších prvků. Zkratky uvedené ve schématech mají tento význam:

G - generátor, BT - blokový, (OT - odbočkový, RT - rezervní, ZT - záskokový) transformátor.

V - vypínač: V tabulkách uvedené varianty jsou modifikovány hodnotami stavu vypínačů. Hodnota (1/0) u vypínače V znamená (zapojení/vynechání) vypínače V ve schématu.

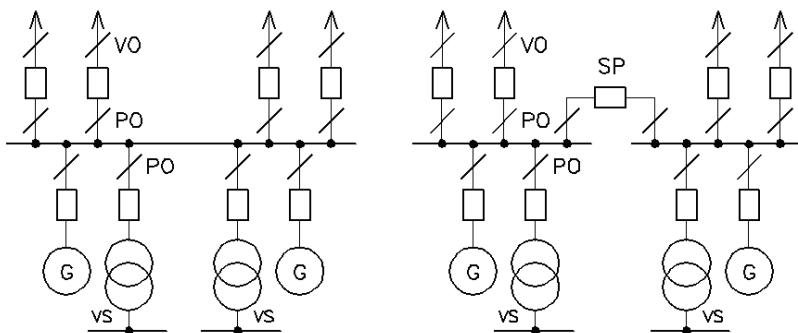
PO - přípojnicový odpojovač, VO - vývodový odpojovač, VS - vlastní spotřeba

## Elektrárenská rozvodná zařízení

Většina elektrického schématu je vždy ukončena tak, aby se mohla spojit s jinou větví, případně aby se mohla realizovat změna topologie schématu. Důležitou roli zde hrají schémata přípojnic.

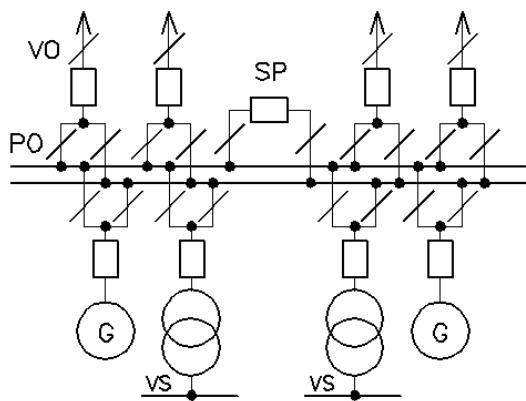
**Schéma s jednoduchým systémem přípojnic.** Nejjednodušší způsob propojení alternátorů na paralelní provoz. Užitím přípojnicových odpojovačů PO a vývodových odpojovačů VO lze provádět opravy a revize vypínačů jednotlivých vývodů bez narušení provozu ostatních vývodů a zvýšit tak operativnost provozu. Toto schéma je investičně výhodné, ale nevýhodou je špatný způsob manipulace (poruchy na přípojnicích, přípojnicových odpojovačích, nebo vývodových vypínačích často znamenají odstavení celé elektrárny). Lze jej použít pro malé, nedůležité elektrárny.

**Dělení přípojnic na sekce.** Zlepšení provozních parametrů oproti jednomu systému přípojnic. Vyšší investice z důvodu instalace podélných spínačů přípojnic (SP). Při opravách a lokálních poruchách na přípojnicích lze odstavit pouze příslušnou část elektrárny, ale včetně její vlastní spotřeby (VS). Nevýhoda u provozu s požadovaným postupným odstavováním VS. Lze zajistit rezervním napájením - samostatným nebo z vedlejšího bloku.



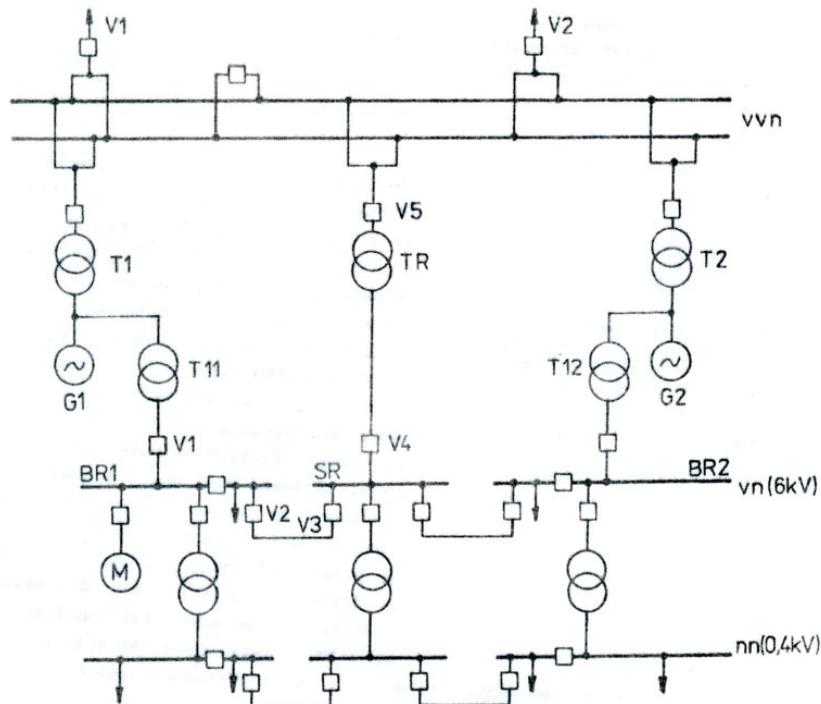
Obr. 4.1: Systémy s jednoduchou přípojnici

**Dva systémy přípojnic.** Zlepšení spolehlivosti dodávky elektrické energie. Alternátory lze propojovat pro paralelní provoz po skupinách, což je důležité pro operativní řízení provozu elektrizační soustavy. Každý vývod lze převést za provozu z jednoho systému přípojnic na druhý manipulací s odpojovači a spínačem přípojnic SP. Při opravách zařízení lze použít volného systému přípojnic bez přerušení provozu elektrárny. Každý vývodový vypínač lze při určitých poruchách přechodně nahradit spínačem přípojnic. Nevýhodami tohoto schématu jsou větší investiční náklady a složitější manipulace s odpojovači. Toto schéma je často užívané u elektráren s nižším počtem bloků a základními nároky na spolehlivost dodávky a provozu.

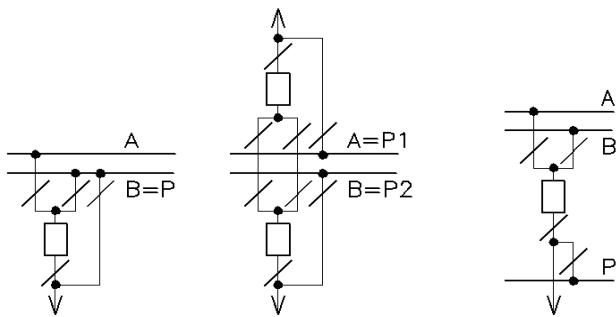


Obr. 4.2: Systém s dvojitou přípojnicí

**Schémata s pomocnou přípojnici.** Užívají se v důležitých rozvodných. Jsou složitější a investičně náročnější. Pomocná přípojnica umožňuje revize a opravy vypínačů odboček bez přerušení dodávky. Modernizaci přístrojového vybavení rozvodných zařízení lze pomocnou přípojnici vypustit a zachovat přitom požadovanou provozní spolehlivost. Napětí na pomocnou přípojnici je přiváděno přes příčný spínač.



Obr. 4.3: Příklad propojení blokové a společné vlastní spotřeby



Ochoz vypínače na pomocnou přípojnici

Hlavní a pomocná přípojnice

**Obr. 4.4: Schémata s pomocnou přípojnicí**

#### 4.3.1. Základní schémata s jedním odbočkovým a blokovým transformátorem na generátor

Schémata jsou kreslena variantně pro různé možnosti zapojení vypínačů dle tabulky variant.

	Název varianty	V1	V2
<b>S1</b>	Bez generátorových vypínačů	0	0
<b>S2</b>	S generátorovým vypínačem před blok. transformátorem BT	0	1
<b>S3</b>	S generátorovým vypínačem na vývodu generátoru G	1	0
<b>S4</b>	S generátorovým vypínačem před BT i na vývodu G	1	1

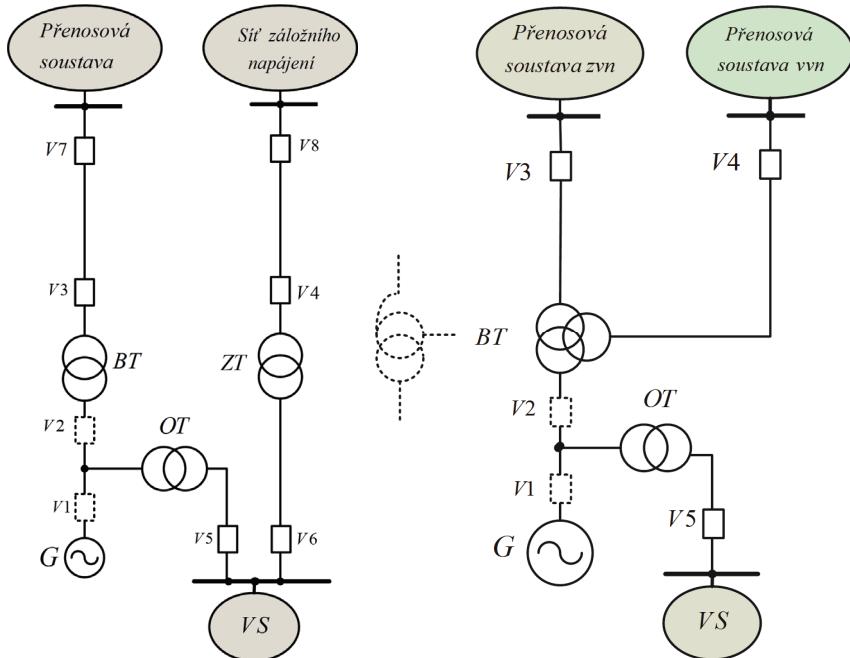
**Tab. 4.1: Varianty schématu**

**Varianta S1** je klasická varianta používaná u menších elektráren na fosilní paliva a tepláren.

**Varianta S2** má vypínač V2 instalovaný mezi odbočkovým a blokovým transformátorem, umožňuje při jeho rozepnutí napájení rozvodny vlastní spotřeby bloku v ostrovním režimu přímo jen z generátoru při poruchách v elektrizační soustavě nebo na blokovém transformátoru. Používá se také v teplárnách.

**Varianta S3** je vhodná pro bloky s alternátory větších výkonů. Používá se generátorový vypínač V1, který je umístěn hned na vývodu z generátoru. Generátorový vypínač umožňuje najízdění i odstavování bloku přímo ze soustavy bez přepínání mezi odbočkovým a rezervním transformátorem. Poruchy na blokovém, odbočkovém nebo rezervním transformátoru vyžadují potřebu dalších rezervních zdrojů. Tato varianta je typická pro jaderné elektrárny.

**Varianta S4** je ve srovnání s předcházejícími nejdražší, neboť má ve vývodu generátoru vypínače V1, V2, které však umožňují nejen najízdění a odstavování bloku, ale i ostrovní provoz vlastní spotřeby při jejím napájení v případě poruch v elektrizační soustavě, nebo na blokovém transformátoru.



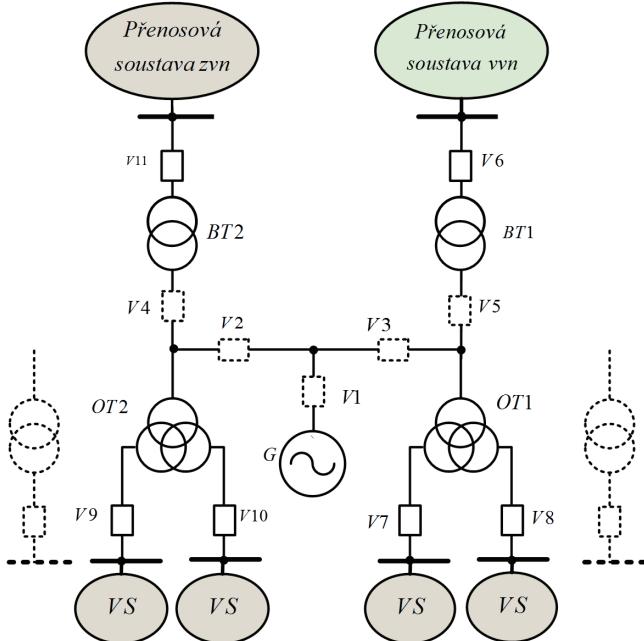
Obr. 4.5: Jeden blokový a jeden odbočkový transformátor na jeden generátor

#### 4.3.2. Dva blokové a dva odbočkové transformátory na jeden generátor

	V1	V2	V3	V4	V5
S5	1	0	0	0	0
S6	0	1	1	0	0
S7	1	0	0	1	1

Tab. 4.2: Tabulka variant

Ve variantě S5 je znázorněno schéma představující variantu, která se převážně užívá pro jaderné elektrárny s velkými výkony. Schéma neobsahuje rezervní transformátor, čímž ale klesá celková spolehlivost provozu elektrárny, neboť jakákoli porucha v oblasti blokového a odbočkového transformátoru vede k odstavení bloku. Najízdění a odstavování bloku se provádí napájením vlastní spotřeby z elektřizační soustavy právě přes blokový a odbočkový transformátor. Schéma vyžaduje vysokou spolehlivost blokové a odbočkové transformátoru. Pro zvýšení spolehlivosti je schéma doplněno o rezervní transformátor. Další zvýšení spolehlivosti nabízí varianta S6 doplněním vypínačů do větví generátoru k oběma blokovým transformátorům. Varianta pak není již tak citlivá na poruchy blokových a odbočkových transformátorů. Proto je možné v ní vypustit ze schématu rezervní transformátor. Aby se při poruše na jednom z blokových transformátorů lépe využila zařízení, instalují se tyto blokové transformátoru s výkonem větším než 50 % výkonu bloku.



**Obr. 4.6: Dva blokové a odbočkové transformátory na jeden generátor**

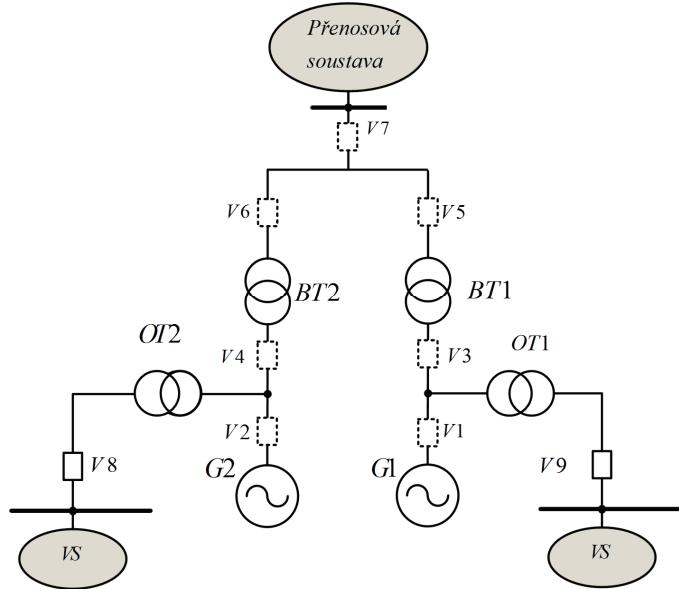
Ve variantě S7 je prezentováno schéma realizované na jaderné elektrárně Biblis v Německu. Toto schéma je velmi pružné, ale drahé. Umožňuje najízdění a odstavování při poruše v některé z obou elektrizačních sítí, nebo na některém blokovém transformátoru. Při poruše na odbočkových transformátorech se musí blok odstavit pomocí nouzového zdroje. Jako odbočkové transformátory lze použít dvou či třívinutové transformátory. Třívinutový transformátor snižuje zkratový výkon a umožňuje rozdělit přípojnice VS na přípojnici s klidným provozem a přípojnici pro proměnlivý provoz. Schéma znázorňuje práci generátoru dvou různých napěťových soustav. Možná je samozřejmě i práce do jedné soustavy.

### 4.3.3. Paralelní spolupráce dvou bloků

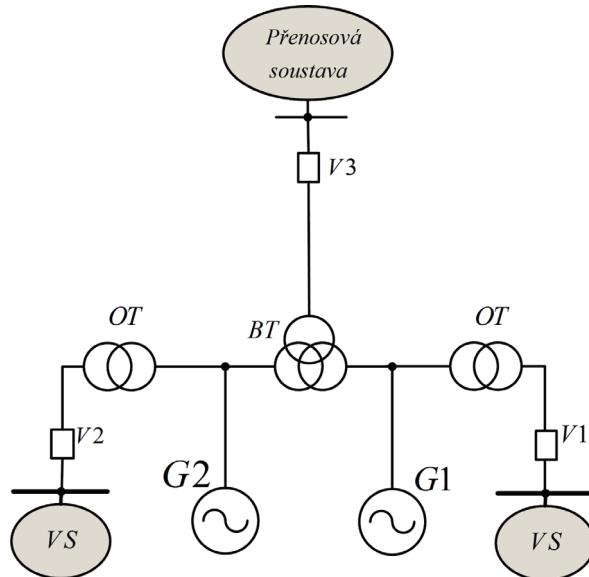
Tento typ schémat je charakteristický pro jaderné elektrárny, kdy jeden reaktor zásobuje energií dva bloky.

	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
S8	0	0	0	0	1	1	0
S9	0	0	1	1	0	0	0
S10	1	1	0	0	0	0	0
S11	1	1	0	0	1	1	0

**Tab. 4.3: Varianty umístění vypínačů při paralelní spolupráci bloků**



**Obr. 4.7: Paralelní spolupráce dvou bloků**



**Obr. 4.8: Paralelní spolupráce na jeden blokový třívinutový transformátor**

## 4.4. Elektrické stroje v elektrárnách

### 4.4.1. Synchronní stroje

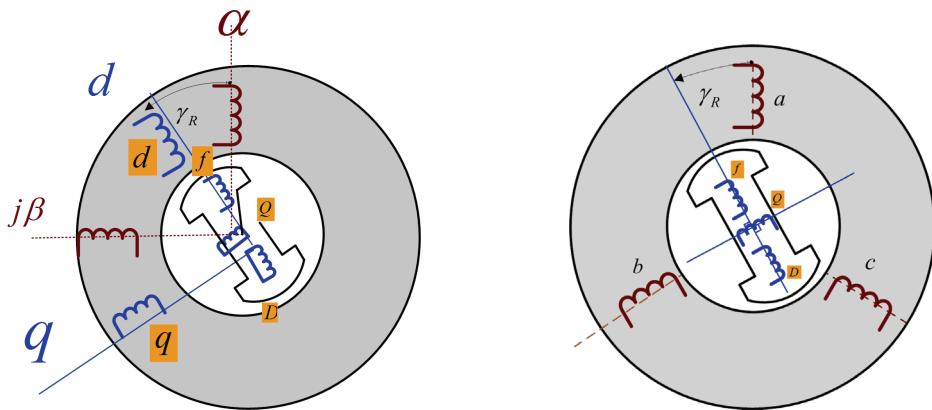
Synchronní generátory jsou základním elektromechanickým měničem energií při generaci elektrické energie ve větších výrobních jednotkách. U malých vodních a větrných elektráren se zase využívají možnosti asynchronních generátorů. Synchronní generátory jsou charakteristické tím, že nemění otáčky se změnou zatížení, ale mají meze zatížení pro zachování stability. Z hlediska otáček a s nimi souvisejícím provedením se člení na dvě základní skupiny:

- vysokorychlostní (turbo)generátory poháněné parními či plynovými turbínami a charakterizované hladkým rotorem s co nejmenším možným průměrem rotujících částí (pro minimalizaci odstředivých sil), velkou osovou délkou a horizontálním uspořádáním. Typově se používají dvoj a čtyřpolové stroje (v případě generátorů pro síť 50 Hz jsou otáčky 3000/min nebo 1500/min).
- nízkorychlostní generátory poháněné vodními turbínami a mívající otáčky na úrovni 500/min a nižší, větší počet vyniklých pólů a průměr a menší osovou délku s vertikálním uspořádáním

Synchronní stroj má dvě hlavní části: stator a rotor. Obě části jsou vybavené vinutími. Vinutí statoru je umístěno v drážkách rozmištěných ekvidistantně podél jeho vnitřního obvodu a je složeno ze tří fragmentů příslušejících jednotlivým fázím. Budicí vinutí turbogenerátorů je umístěno podobným způsobem v drážkách na rotoru, zatímco v případě hydrostrojů na vyniklých pólech rotoru, který je navíc vybaven tlumicím vinutím (amortizérem) tvořeného vodivými klíny v drážkách budicího vinutí. U hydrostrojů se umísťuje do osových drážek v půlových nástavcích. Stejnosměrný budicí proud točícího se rotoru vyvolává ve stroji točivé magnetické pole, které indukuje v každé ze tří fází statorového vinutí napětí protlačující v případě uzavřeného obvodu statoru trifázový proud, který prostorovým součtem (určeno polohou vinutí) okamžitých hodnot vytváří své vlastní točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole statoru se superponuje s tokem rotoru ve výsledný tok, který se otáčí synchronně s rotem a synchronní úhlovou rychlosí vůči statoru. Protože se podle Lenzova indukčního zákona relativním pohybem vodiče a magnetického pole indukuje ve vodiči napětí musí být stator pro omezení vzniku vříivých proudů složen z plechů.

V tlumicím vinutí rotoru se začnou dle téhož principu indukovat tlumicí proudy v případě, že se úhlová rychlosť rotoru z nějakého důvodu odchylí od úhlové rychlosti aktivní sítě, do které stroj pracuje. Tyto proudy vyvolají pak magnetický tok a tím i moment opačného směru, který působí tlumicím účinkem na oscilace.

Modely znázorňující činnost strojů mohou pro zjednodušení využívat transformace mezi různými uspořádáními vinutí, která ale mají tu vlastnost, že výsledná pole jsou identická. Zpravidla se transformují vícefázová vinutí na vinutí dvojfázová a vše se zobrazí v souřadnicích pevně spojených s rotem. Toto uspořádání má tu výhodu, že vzájemné indukčnosti jsou konstantní.



**Obr. 4.9: Modely synchronních strojů s vyniklými póly**

Osy d,q jsou spojeny s rotorem, osy abc, αβ jsou spojeny se statorem.

f ..... budicí vinutí

D,Q..... tlumící vinutí rotoru v ose d,q

abc ..... vinutí fází statoru

d,q ..... vinutí statoru transformovaná na rotor

Pro vysvětlení činnosti synchronního stroje uvažme v rovině kolmé na osu stroje rotující prostorový fázor toku vyjádřený v poměrných hodnotách:

$$\vec{\psi} = (\psi_q + j\psi_d) e^{j\omega t} \quad (4.1)$$

Jeho derivací vznikají podle indukčního zákona v zasažených vinutích poměrné hodnoty indukování napětí:

$$\vec{u}_i = \vec{\psi}^\bullet = \left\{ \underbrace{(\psi_q^\bullet - \omega\psi_d)}_{u_{iq}} + j \underbrace{(\psi_d^\bullet + \omega\psi_q)}_{u_{id}} \right\} e^{j\omega t} \quad (4.2)$$

které dosadíme do rovnice pro statorové napětí:

$$\underbrace{(\underline{u}_q + j\underline{u}_d) e^{j\omega t}}_{\vec{u}} = -r \underbrace{(\underline{i}_q + j\underline{i}_d) e^{j\omega t}}_{\vec{i}} - \underbrace{(\underline{u}_{iq} + j\underline{u}_{id}) e^{j\omega t}}_{\vec{u}_i} \quad (4.3)$$

Získáme 5 diferenciálních rovnic popisující lineární model synchronního stroje:

$$\begin{bmatrix} u_q \\ u_d \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & & -i_q \\ & r & 0 & -i_d \\ & & r_f & i_f \\ 0 & & r_D & i_D \\ 0 & & & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ -i_d \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\psi_q \\ -\psi_d \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix}}_{\text{transf.}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \omega\psi_d \\ -\omega\psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{rotačot}} \quad (4.4)$$

V rovnicích se vyskytují dvě formy napětí: rotační a transformační. Pro funkci stroje je rozhodující forma rotační, transformační se objevuje při přechodných jevech. Diferenciální rovnice doplňují algebraické vztahy pro poměrná toková spřažení:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_f \\ \psi_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_d & l_{ad} & l_{ad} \\ l_{ad} & l_f & l_{ad} \\ l_{ad} & l_{ad} & l_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_f \\ i_D \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_q & l_{aq} \\ l_{aq} & l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Cívkové poměrné indukčnosti jsou dány součtem indukčnosti vazební a rozptylové:

$$\begin{aligned} l_d &= l_{ad} + l_{\sigma d}, & l_q &= l_{aq} + l_{\sigma q}, \\ l_f &= l_{ad} + l_{\sigma f}, & l_D &= l_{ad} + l_{\sigma D}, & l_Q &= l_{aq} + l_{\sigma Q} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$u_d = -r.i_d - \overbrace{\{(l_{ad} + l_{\sigma})i_d + l_{ad}(i_f + i_D)\}}^{\psi_d^\bullet} - \underbrace{\omega(l_q i_q + l_{aq} i_Q)}_{u_{\omega d}} \quad (4.7)$$

$$u_q = -r.i_q - \overbrace{\{(l_{aq} + l_{\sigma})i_q + l_{aq}i_Q\}}^{\psi_q^\bullet} - \underbrace{\omega(l_d i_d + l_{ad}(i_f + i_D))}_{u_{\omega q}} \quad (4.8)$$

$$u_f = r_f \cdot i_f + \overbrace{\{(l_{ad} + l_{\sigma f})i_f + l_{ad}(i_d + i_D)\}}^{\psi_f^\bullet} \quad (4.9)$$

$$0 = r_D \cdot i_D + \overbrace{\{(l_{ad} + l_{\sigma D})i_D + l_{ad}(i_f + i_D)\}}^{\psi_D^\bullet} \quad (4.10)$$

$$0 = r_Q \cdot i_Q + \overbrace{\{(l_{ad} + l_{\sigma Q})i_Q + l_a(i_f + i_q)\}}^{\psi_Q^\bullet} \quad (4.11)$$

V ustáleném stavu jsou všechny derivace nulové a z této podmínky vyplývá pro tento stav po úpravách rovnice:

$$e = \hat{u} + (r + jx_q) \underbrace{i_q + ji_d}_{\text{reálné číslo (v ose q)}} + j \underbrace{i_d \cdot j(x_d - x_q)}_{\text{imunitní číslo}}$$

$$e = \hat{u} + (r + jx_q) \hat{i}_q + j \hat{i}_d \cdot j(x_d - x_q) \quad (4.12)$$

Z ní se konstruuje fázorový diagram práce generátoru na obr. 4.10.

Synchronní stroj se chová v podstatě jako napěťový zdroj v sérii s proměnlivou vnitřní impedancí, jejíž hodnota je závislá na rychlosti probíhajících změn.

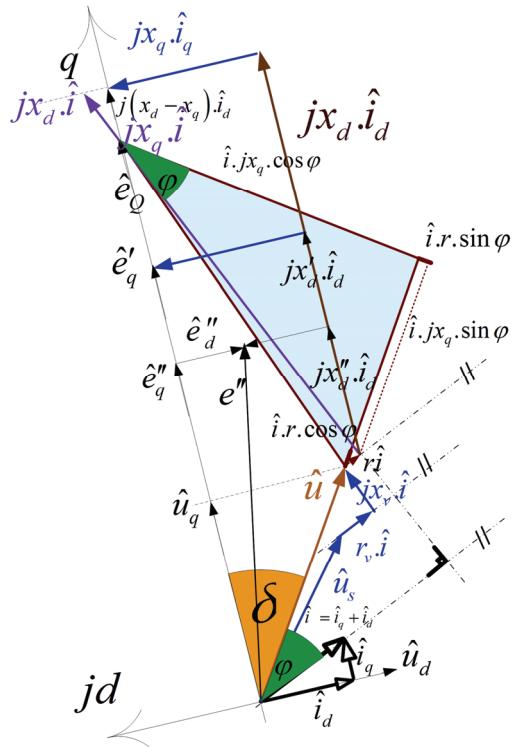
Ve výpočtech se proto zobrazuje jako jednobran s napěťovým zdrojem a některou vhodnou impedancí:

$$\text{Synchronní reaktance: } x_d = x_\sigma + x_{ad}, x_q + x_{aq} \quad (4.13)$$

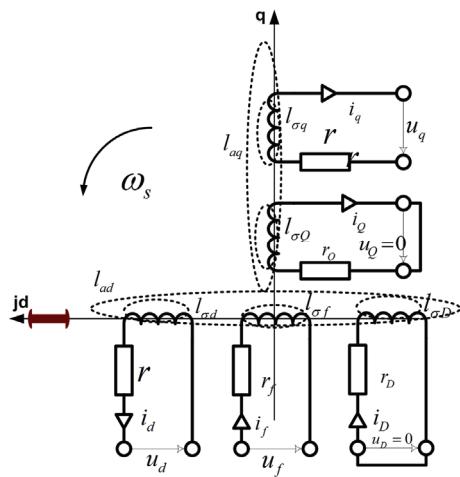
$$\text{Přechodná reaktance: } x'_d = x_\sigma + x_{ad} // x_{\sigma f}, x_q + x_{aq} \quad (4.14)$$

$$\text{Rázová reaktance: } x''_d = x_\sigma + x_{ad} // x_{\sigma f} // x_{\sigma D}, x''_q = x_{aq} // x_{\sigma Q} \quad (4.15)$$

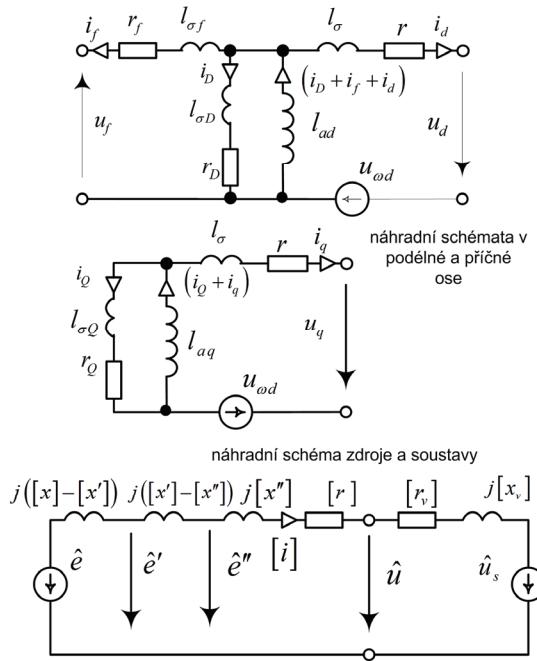
Napětí za přechodnou  $\hat{e}'$  či rázovou reaktancí  $\hat{e}''$  se na počátku přechodného jevu (zkrat) mění relativně pomalu, a proto se výpočtově považují za konstantní a nahrazují chování stroje na počátku přechodných jevů. Platí samozřejmě i pro ustálený stav.



Obr. 4.10: Fázorový diagram práce synchronního generátoru do systému



Obr. 4.11: Model synchronního stroje v osách d,q



Obr. 4.12: Náhradní schémata synchronního stroje

Z fázorového diagramu na obr. 4.10 vyplývají často používané výpočetní vztahy v poměrných hodnotách:

Poměrný zdánlivý výkon:

$$\bar{S} = \hat{u} \cdot \hat{i}^* = \underbrace{\hat{u}_q \cdot \hat{i}_q + \hat{u}_d \cdot \hat{i}_d}_{P} + j \underbrace{(\hat{u}_d \cdot \hat{i}_q - \hat{u}_q \cdot \hat{i}_d)}_{Q} \quad (4.16)$$

Poměrné proudy v osách d,q:

$$\hat{i}_d = \hat{i} \cos(\varphi + \delta + \pi/2), \quad \hat{i}_q = \hat{i} \cos(\varphi + \delta) \quad (4.17)$$

$$|\hat{i}| = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (4.18)$$

Zátěžný úhel:

$$\delta = \arctg\left(\frac{i(x_q \cdot \cos \varphi - r \cdot \sin \varphi)}{u + i(x_q \cdot \sin \varphi + r \cdot \cos \varphi)}\right) \quad (4.19)$$

Napětí za přechodnou reaktancí:

$$|e_Q| = \sqrt{\{u + i \cdot (x_q \cdot \sin \varphi + r \cdot \cos \varphi)\}^2 + \{i \cdot (x_q \cdot \cos \varphi - r \cdot \sin \varphi)\}^2} \quad (4.20)$$

#### 4.4.2. Volba elektromotorů pro pohony vlastní spotřeby elektrárny

Spolehlivý a hospodárný chod elektrárny je určen nejen vhodným schématem vlastní spotřeby elektrárny, ale také správnou volbou pohonů zařízení vlastní spotřeby elektrárny. Nejdůležitějšími vlastnostmi elektromotoru jsou příkon a záběrný moment, které ovlivňují volbu napájecího zdroje z hlediska proudového zatížení, doby trvání rozběhu a poklesu napětí.

V elektrárenském provozu se jedná o pohony strojních zařízení pro:

- dopravu tuhých hmot – dopravníky, podavače
- úpravu tuhých hmot – drtiče, mlýny
- dopravu tekutin – čerpadla
- dopravu a stlačování plynů – ventilátory, kompresory

Pro usnadnění návrhu napájení vlastní spotřeby se rozdělují pohony ve vlastní spotřebě elektráren podle funkce, jakou má poháněné zařízení v technologickém procesu:

- 1) **Důležité pohony** – pohony, jejichž přerušení chodu do doby 15 minut má za následek výpadek výkonu elektrárny.
- 2) **Méně důležité pohony** – pohony, jejichž přerušení chodu do doby 15 minut nemá za následek výpadek výkonu elektrárny. Spadají sem také pohony nezapojené do technologického procesu.
- 3) **Zajišťovací pohony** – pohony nezapojené do technologického procesu, jejichž funkce je však nutná v bezporuchových stavech.

Při návrhu elektrického pohonu je nutné přihlížet k provozním podmínkám a požadavkům zátěže a respektovat vliv prostředí. Provozním podmínkám poháněného zařízení nejlépe vyhovují pracovní charakteristiky elektrických motorů. Určuje se výkon pohonu, otáčky a napětí, záběrný a jmenovitý moment a kontroluje se rozběh a oteplení pohonu.

Základní provozní požadavky na tyto motory jsou následující:

- a) dostatečný výkon pro pohon technologického zařízení ve všech provozních stavech vlastní spotřeby
- b) spolehlivý rozběh a chod motoru ve všech provozních stavech (závislost na momentové charakteristice)
- c) schopnost zapnout třikrát bezprostředně za sebou i při těžkých rozbězích ze studeného stavu (výchozí teplota vinutí 40°C)

- d) schopnost zapnout dvakrát bezprostředně za sebou za provozní teploty (výchozí teplota vinutí 120°C)
- e) bezporuchovost při častém spouštění (150 až 440 rozběhů za rok)
- f) maximální záběrný proud motoru nesmí překročit  $5,5 I_n$ , maximální moment motoru má být větší než  $2 M_n$  a hlučnost motoru má být menší než 85 dB
- g) spolehlivost provozu i při snížení napájecího napětí na 0,7  $U_n$  při 50 Hz po dobu minimálně 15 minut
- h) bezporuchový provoz bez požadavků na revizi po dobu 3 let
- i) musí vyhovovat podmínkám samonajíždění

Všem těmito podmínkám vyhovuje **asynchronní motor** s kotvou nakrátko, který je konstrukčně jednoduchý, vysoko spolehlivý, má dlouhou životnost, nízkou cenu a jednoduché spouštění. Proto mají asynchronní motory v elektrárnách největší využití.

**Synchronní motory** se užívají pro pohony velkých výkonů nad 6 MW. Výhodou je vyšší účinnost než účinnost asynchronních motorů.

**Stejnosměrné motory** se používají pouze pro malé pohony zajištěného napájení.

Spouštěče motorů se užívají plně automatické. Regulační zařízení regulovaných pohonů musí v ustálených provozních stavech udržovat otáčky pohonů v požadovaných mezích.

### **Volba napětí elektromotoru**

Napětí elektromotoru se musí volit s ohledem na možnost vzniku přepětí při vypínání elektromotorů nižších výkonů v sítích 6 kV. Proto je doporučeno pro motory o výkonu do 250 kW jmenovité napětí 400 V, pro motory o výkonu do 500 kW jmenovité napětí 690 V, pro motory od výkonu 250 kW jmenovité napětí 6 kV a pro motory od výkonu 500 kW jmenovité napětí 10 kV.

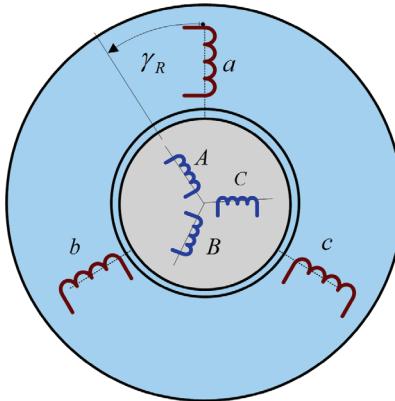
### **Volba výkonu elektromotoru**

Výkon elektromotoru se volí podle příkonu poháněného stroje v ustáleném chodu. Případný větší výkon se volí z důvodu potřeby většího záběrného momentu a dlouhodobého provozu při dolní mezi napětí z dané typové řady výkonů. Výkonová rezerva by neměla překročit 15 % jmenovitého výkonu poháněného zařízení.

### **Volba momentové charakteristiky elektromotoru**

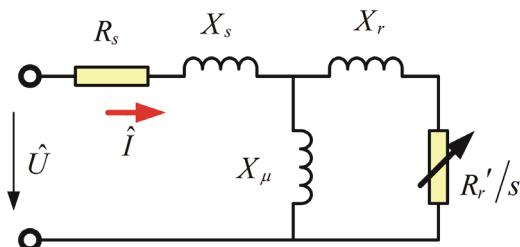
Je nutné zvolit takový typ elektromotoru, jehož momentová charakteristika zajišťuje normální rozběh soustrojí. Průběh rozběhu závisí na dynamickém momentu, což je rozdíl mezi momentem asynchronního motoru a momentem poháněného soustrojí. Pro zajištění spolehlivého rozběhu soustrojí je třeba, aby dynamický moment byl alespoň 20 % hodnoty jmenovitého momentu zátěže v průběhu celého rozběhu, kromě okolí ustáleného stavu. Momentovou charakteristiku elektromotoru obvykle udává výrobce.

## 4.5. Princip činnosti asynchronních strojů



Obr. 4.13: Struktura vinutí asynchronního stroje

Asynchronní stroj má hladký rotor a trojfázové vinutí na statoru i rotoru. (viz obr. 4.13). Je-li rotorové vinutí spojeno dokrátká (klec), může se v něm objevit proud jedině v důsledku indukce, která působí jen v případě, že bude relativní pohyb rotoru vůči točivému poli statoru. Proto má také pohon název asynchronní. Náhradní schéma motoru je na obr. 4.14. Je-li rotor s klasickým třífázovým vinutím, může být napájen z externích zdrojů, což zvyšuje jeho regulační možnosti, ale na druhou stranu snižuje spolehlivost chodu.



Obr. 4.14: Základní náhradní schéma indukčního motoru

$R_s$  označuje rezistanci statoru,  $X_s$  rozptylovou reaktanci statoru,  $X_\mu$  magnetizační reaktanci,  $R_r$ ,  $X_r$  přepočtenou rezistanci rotoru a reaktanci rotoru, s skluz.

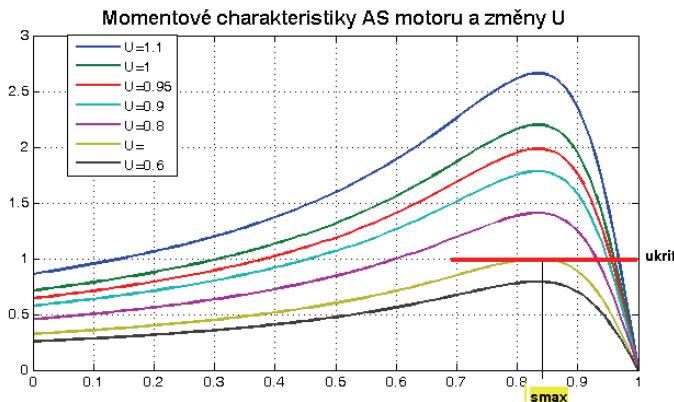
Pro reálné hodnoty platí:  $R_s \rightarrow 0$ ;  $X_m \gg X_s$ , pak proud motoru lze vyjádřit vztahem

$$I = \frac{U}{\sqrt{(X_r + X_s)^2 + \frac{R_r^2}{s^2}}} \quad (4.21)$$

a činný výkon (elektrický) má velikost

$$P_e = \frac{R_r}{s} \cdot I^2 = \frac{U^2 \cdot R_r \cdot s}{(X_r + X_s)^2 \cdot s^2 + R_r^2}. \quad (4.22)$$

Obr. 4.15 znázorňuje závislost  $P_e(s)$  v závislosti na svorkovém napětí  $U$ .



Obr. 4.15: Závislost  $P_e = P(s)$  pro různá napětí  $U$

Výkon (moment) motoru je největší při daném napětí při kritickém skluzu  $s_{kr} = R_r / (X_r + X_s)$ , který rozděluje průběhy charakteristik na stabilní (levá část diagramu  $s < s_{kr}$ ) a nestabilní pravou část  $s > s_{kr}$ .

Mechanická zátěž umožňuje lehký, normální nebo těžký rozběh. Doba rozběhu soustrojí je závislá na velikosti dynamického momentu. S rostoucím dynamickým momentem se zkracuje doba rozběhu. Podle průběhu momentové charakteristiky se rozlišují strojní zařízení:

- 1) s lehkým rozběhem do 4 s
- 2) s normálním rozběhem do 8 s
- 3) s těžkým rozběhem od 8 s do 60 s

Zátěž s lehkým rozběhem se vyznačuje tím, že záběrný moment při  $s = 0$  je malý nebo prakticky nulový, kdežto záběrný moment v případě těžkého rozběhu je takový, že umožňuje vznik jen malého akceleračního momentu. Uvažujme nejprve takovou zátěž, jejíž mechanický moment  $M_m$  je konstantní. Pak

$$P_m = M_m \cdot \omega = M_m \cdot \omega_s \cdot (1 - s) = P_b \cdot (1 - s) \quad (4.23)$$

S respektováním výkonové bilance, ve které elektrický příkon musí také hradit ztráty na rezistanci  $R_r$  o velikosti  $R_r I^2$

$$P_e = P_b \cdot (1-s) + \frac{U^2 \cdot R_r \cdot s^2}{(X_r + X_s)^2 \cdot s^2 + R_r^2} \quad (4.24)$$

Odtud lze spočítat pracovní skluz (za předpokladu, že  $U \geq U_{\min} = \sqrt{2P_b \cdot X}$  ).

## 4.6. Transformátory v elektrárnách

**Princip působení:** Transformátory jsou elektrické stroje složené pouze ze statických částí. Hlavními částmi jsou: magnetický obvod a jedno (autotransformátor) nebo více (dvě, tři ...). Vinutí se pak nazývají primární, sekundární, terciární atd.

Činnost je založena na indukčním zákonu podle kterého je indukované napětí dáné vztahem:

$$u_i = \frac{d\psi_i}{dt} = N_i \frac{d\phi}{dt} \quad (4.25)$$

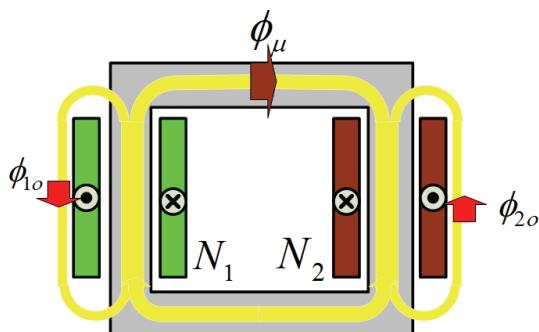
$\phi$  ..... magnetický tok tekoucí magnetickým obvodem

$\psi_i$  ..... cívkový magnetický tok ( $\psi_i = N_i \cdot \phi$ )

$i$  ..... index vinutí

**Úkolem transformátoru je:**

- zajistit galvanické oddělení jednotlivých napěťových hladin
- propojovat systémy o různých hladinách napětí a umožňovat pomocí odboček řízení napětí
- zapojením vinutí limitovat šíření některých nežádoucích veličin



Obr. 4.16: Principiální schéma jednofázového transformátoru

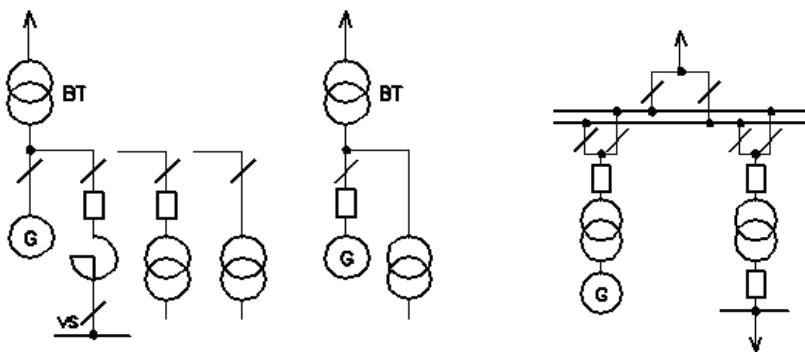
Transformátory v elektrárnách se rozdělují na **hlavní transformátory**, které slouží k vyvedení výkonu do elektrizační soustavy, a **transformátory pro vlastní spotřebu**, které slouží k napájení zařízení zajišťující provoz elektrárny. Transformátory pro vlastní spotřebu se nejčastěji napájí odbočkou ze svorek alternátoru nebo jsou připojeny k síti. Rozdělení transformátorů užitych v elektrárnách:

**Blokové transformátory** převádějí svorkové napětí generátoru ( $10 \div 32$  kV) na napětí přenosové. Spojení transformátoru bývá obvykle trojúhelník - hvězda s uzemněnou nulou. Trojúhelník je z principu na straně generátoru protože zamezuje průtoku proudu nulové složkové soustavy a třetí harmonické a jejich násobků vzniklých v důsledku nesymetrie směrem ke generátoru. Blokové transformátory mají výkon od několika desítek MVA do více než 1000 MVA shodně s výkonem bloku a bývají chlazené olejem. Magnetický obvod transformátoru je umístěn v nádobě naplněné olejem, jenž slouží jako chladivo a izolační médium mezi vinutími. Vzniklé ztrátové teplo je odváděno vnějšími radiátory s přirozenou nebo nucenou cirkulací. Velikost transformátoru je limitována dopravními možnostmi a proto se velké jednotky dodávají ve formě tří jednofázových transformátorů.

Nejčastěji se užívají **jednobloková uspořádání** schémat s trojfázovými transformátory. Dalšími možnostmi zapojení blokových transformátorů jsou **dvooubloková uspořádání**, **dva blokové transformátory na jeden alternátor** a **užití trojvinutových transformátorů**.

### Odbočkové transformátory

Jde o transformátory napájející vlastní spotřebu. Navrhoje se podle schématu pro napájení vlastní spotřeby. Minimální zdánlivý výkon odbočkového transformátoru je dán součtem soudobých příkonů spotřebičů vlastní spotřeby. Napájení pracovního zdroje vlastní spotřeby je nejčastěji realizováno z generátoru přes odbočkový transformátor.



Obr. 4.17: Napájení vlastní spotřeby z odbočky a ze síťové rozvodny

### Rezervní (záložní) transformátor

Jde o transformátor pro napájení vlastní spotřeby v případě výpadku pracovních zdrojů. Zajišťuje napájení záložního zdroje, jeho zdánlivý výkon je závislý na velikosti a důležitosti elektrárny. Záložní zdroje mají mít stejný výkon jako zdroje

pracovní. V případě různé velikosti pracovních zdrojů se záložní zdroj dimenzuje podle největšího pracovního zdroje. Rezervní transformátor je dimenzován tak, aby napájel vlastní spotřebu jednoho bloku a zajišťoval doběh nebo rozběh druhého bloku a polovinu společné vlastní spotřeby. V případě užití jako zálohy dvou nebo více transformátorů, jsou dimenzovány na výkon vlastní spotřeby bloku a výkon společné vlastní spotřeby. Jeden z těchto záložních transformátorů je trvale v chodu a druhý se užívá jako rezervní.

## 4.7. Vlastní spotřeba elektráren

Vlastní spotřeba elektrárny je elektrická energie, kterou potřebujeme pro zajištění činnosti hlavních výrobních zařízení při její výrobě včetně všech jejich ztrát a ztrát v rozvodech. Do vlastní spotřeby se však nezapočítává spotřeba v nevýrobních objektech a ve vedlejších provozech, která se započítává do odběrů elektrárny.

Vlastní spotřeba elektrické energie se udává pro celou elektrárnu v průměru za rok v jednotkách energie (MWh), nebo v % vyrobené energie. Vlastní spotřeba je závislá na druhu elektrárny a dále na faktorech, jako například výkon bloku, provozní režim a využití elektrárny, účinnost jednotlivých zařízení, kvalita fosilního paliva. Průměrné hodnoty vlastní spotřeby udává tab. 4.4.

<b>Typ elektrárny</b>	<b>vybavení</b>	<b>vlastní spotřeba (%) S<sub>n</sub></b>
Elektrárna na fosilní paliva	s turbonapajeckou	4 ÷ 6
	bez turbonapajecky	6 ÷ 12
Paroplynová elektrárna	s turbonapajeckou	2,5 ÷ 3,5
	bez turbonapajecky	5 ÷ 6,5
Jaderná elektrárna		5 ÷ 8
Vodní elektrárna		cca 1
teplárna		14 ÷ 18

Tab. 4.4: Vlastní spotřeba elektráren

Návrh koncepce elektrické části elektrárny vychází z technicko-ekonomických rozborů, respektujících vlastnosti použitých technologií a důležitost dodávek elektrárny v elektrizační soustavě. Koncepce vlastní spotřeby má svoji zajímavou historii. U prvních elektráren se užívalo ve vlastní spotřebě pro pohon důležitých strojů samostatných parních pohonů. V další fázi vývoje byla vlastní spotřeba celé elektrárny napájena ze zvláštního alternátora poháněného parní turbínou. Toto řešení mělo zásadní nedostatek v tom, že porucha ve vlastní spotřebě měla za následek odstavení celé elektrárny. V další fázi vývoje byl přidán na společný hřídel s hlavním soustrojím pomocný alternátor, který napájel vlastní spotřebu celé elektrárny. Toto uspořádání nevyhovovalo však požadavkům opětovného najízdění a automatického záskoku, kterým nakonec vyhovělo napájení vlastní spotřeby elektrárny odbočkou od generátoru bloku, jemuž automatický záskok nečiní žádné potíže. Galvanické oddělení a možnost různých napětí vinutí generátoru a obvodů vlastní spotřeby zajišťuje blokový transformátor. Dalším důležitým požadavkem ve vývoji finálního uspořádání byl růst výkonu jednotek a s tím související požadavek přenosu výkonu na větší vzdálenosti, který vyžaduje co nejvyšší hladinu napětí. Požadované zvýšení hladiny napětí realizuje blokový transformátor. V aktuální fázi vývoje

je standardem blokové uspořádání řadící parogenerátor, turbínu, elektrický generátor do jednoho bloku.

Výpadky dodávek elektrické energie, či dokonce havárie jaderných elektráren, mohou mít dalekosáhlé dopady ekonomické, ekologické a ohrozit životy lidí, a proto je nutné klást vysoké požadavky na spolehlivost elektráren. Základem spolehlivé dodávky elektrické energie z elektrárny je spolehlivý chod její strojní a elektrické části, což samozřejmě vyžaduje vysokou spolehlivost i jednotlivých prvků těchto částí.

Elektrická část elektráren zahrnuje tyto skupiny elektrických zařízení

- a) rozvodny (hlavní rozvodny, rozvodny vlastní spotřeby)
- b) elektrické stroje:
  - generátory (hydrogenerátory, turbogenerátory) a jejich budicí soustavy
  - transformátory (blokové, vlastní spotřeby)
  - elektrické motory vn, nn
- c) elektrické přístroje (vypínače, odpojovače) a měřicí přístroje
- d) spojovací prvky (kabely, vedení, zapouzdřené vývody, přípojnice, uzemnění)
- e) systémy kontroly a řízení (dispečerská zařízení)
- f) pomocné provozy a zařízení

Cílem elektrické části elektrárny je:

- spolehlivé a ekonomické vyvedení generovaného výkonu do elektrické soustavy
- zajištění spolehlivého napájení elektrických spotřebičů elektrárny

Vyvedení výkonu je tvoreno strukturou zařízení zprostředkující spojení generátoru a elektrické soustavy a jeho řešení je znázorněno v hlavním jednopólovém schématu elektrárny. Toto schéma zobrazuje topologii propojení elektrických strojů (generátorů, transformátorů) a elektrických přístrojů (vypínače, odpojovače,...) včetně propojovacích vedení a použitého systému přípojnic.

Řešení problematiky napájení vlastní elektrické spotřeby elektrárny je znázorněno ve schématech vlastní spotřeby.

Pro návrh schémat platí obecně tyto hlavní požadavky:

- zajištění spolehlivého a bezpečného provozu

Charakteristické rysy tohoto požadavku jsou:

- zálohovatelnost napájení pro zařízení VS
- zálohovatelnost při vyvedení výkonu
- bezpečnost při manipulacích, údržbě a revizích

- schopnost najetí ze tmy nebo ostrovního provozu
- schopnost bezpečného odstavení elektrárny

Požadavky na spolehlivost napájení jsou strukturovány do tří stupňů důležitosti:

- **První stupeň důležitosti** zahrnuje případy, u kterých ztráta napájení má za následek ohrožení lidských životů, větší výpadky zařízení a značné ekonomické škody. Charakteristickým příkladem je napájení pohonů chladičích systémů jaderných reaktorů či kotlů. Napájení v tomto případě musí být realizováno nejméně ze dvou nezávislých zdrojů (u nezávislých zdrojů porucha jednoho zdroje neovlivňuje činnost druhého zdroje) bez přerušení napájení.
- **Druhý stupeň důležitosti** zahrnuje případy, u kterých ztráta napájení má za následek podstatné snížení výroby. K napájení se zpravidla také použije dvou nezávislých zdrojů s nižšími nároky na automatizaci přepínání (například je možné ruční přepínání).
- **Třetí stupeň důležitosti** zahrnuje případy, ve kterých přerušení napájení nemá za následek větší ekonomické škody či významné ovlivnění výroby. Pro tento případ stačí napájení z jednoho zdroje.

### Zajištění požadavku operativnosti

Požadavek operativnosti znamená, že elektrické schéma elektrárny musí vyhovovat širokému spektru provozních požadavků. Dodávka elektrické energie musí být zajištěna nejen ve stavech ustálených, přechodných ale i mimořádných. Musí poskytovat podporu i řešení stavů havarijných. Topologie schématu musí také umožňovat realizaci revizí a oprav bez přerušení napájení těch částí, kterých se tato činnost netýká. Podmínky operativnosti zajistí vhodná volba topologie schématu a vybavení odpovídající strukturou přístrojů, jako jsou odpojovače či vypínače s použitím dvou a více systémů přípojnic, aplikaci pomocné přípojnice, případně jednoduchého nebo kombinovaného spínače přípojnic.

### Zajištění ekonomičnosti návrhu a provozu

V tomto bodě se jedná o minimalizaci investičních a provozních nákladů při prioritním splnění požadavků na bezpečnost, spolehlivost a operativnost. Při návrhu elektrického schématu je třeba, aby byly dodržovány zásady ekonomického dimenzování a požadavky na možný rozvoj a budoucí extenze návrhu (například výhledové rozšíření elektrárny o další bloky atd.). Z hlediska provozu je třeba dávat přednost variantám s menšími nároky na údržbu.

Při rozhodování o koncepci hlavního elektrického schématu elektrárny je třeba respektovat řadu dalších faktorů, mezi které patří:

- počet generátorů ve výrobním celku
- mohutnost elektrizační soustavy, do které bude elektrárna pracovat
- provozní pravidla a zvyklosti

- vzdálenost rozvodného zařízení od elektrárny, spolehlivost a hustota sítí a užívaná schémata rozvodných zařízení
- požadavky pro najízdění, provozní a poruchové odstavení bloku

Schéma elektrárny je dále určováno uspořádáním blokového transformátoru, který zajišťuje galvanické oddělení mezi výrobou a přenosem energií a současně realizuje transformaci elektrické energie na vyšší napěťovou hladinu úrovně vvn nebo zvn. S rostoucí hladinou napětí roste přenosová schopnost systému a klesá (při stejném přenášeném výkonu) proud a s jeho kvadrátem i ztráty výkonu. Blokový transformátor je tedy nutnou součástí každé větší elektrárny. Realizován může být jako třífázový, nebo jako tři jednofázové jednotky. Jednofázové transformátorové skupiny se v českých podmínkách užívají, jen když je to nezbytně nutné. Skupina tří jednofázových jednotek vyžaduje více místa než třífázová jednotka a spojení do trojúhelníka musí být vždy venkovního provedení. Transport těchto jednofázových jednotek je však jednodušší. Z důvodů obtížné dopravy nebo ekonomického hlediska může být také použito dvou paralelních třífázových transformátorů o polovičním výkonu.

Vývody z blokového transformátoru jsou vyvedeny buď do elektrárenské rozvodny, nebo do vzdálené rozvodny distributora na různé systémy přípojnic. Je-li mezi blokovým transformátorem a touto rozvodnou větší vzdálenost, mohou být instalovány vypínače na obou koncích spoje.

Schéma jsou modifikována zapojením generátorového vypínače, což je sice drahy přístroj, ale jeho instalace umožňuje najízdění bloku přímo ze soustavy přes blokový a odbočkový transformátor s vypnutým generátorovým vypínačem. Tím se eliminuje přepínání vlastní spotřeby po najetí elektrárny z rezervního zdroje na zdroj pracovní. Užití generátorového vypínače je výhodné tam, kde lokální síť vvn, využitá jako zdroj rezervního napájení, není dostatečně výkonově dimenzována a nemůže dodat potřebný výkon pro najízdění. V hlavních schématech jaderných elektráren se téměř vždy užívá generátorový vypínač. Napájení z rezervního zdroje vede přes rezervní transformátor. Jejich počet je závislý na počtu bloků v elektrárně. Obvykle se navrhují dva a slouží většinou také jako najízděcí a doběhový zdroj elektrické energie při běžném provozu. Pro řešení havarijních stavů a zajištění nepřerušeného napájení zařízení sloužících k bezpečnému odstavení bloku při poruchách je na elektrárnách, zejména jaderných, instalován ještě dieselalternátor jako další nezávislý havarijní zdroj.

## 4.8. Dimenzování vlastní spotřeby

### Hlavní zásady pro návrh vlastní spotřeby

- 1) Zdroje vlastní spotřeby musí zabezpečit ve všech provozních stavech elektrárny napájení vlastní spotřeby elektrickou energií požadované kvality.
- 2) Zdroje musí být navrženy s přihlédnutím k jejich účelu, předpokládané době provozu, možnostem jejich přetížitelnosti a s ohledem na možnost chránění a regulace.

- 3) Projekt musí obsahovat všechny typy zdrojů. Jeden zdroj může zastávat více funkcí, ale v takovém případě musí být navržen podle požadavků náročnějšího použití.
- 4) Schéma vyvedení výkonu musí být navrženo podle požadavků sítě, do které se vyvádí výkon.
- 5) Schéma vlastní spotřeby má být jednoduché a přehledné.
- 6) Schéma hlavního rozvodu se volí podle velikosti elektrárny, zapojení zařízení, způsobu práce elektrárny a rozsahu vlastní spotřeby.
- 7) Pracovní zdroje vlastní spotřeby se navrhují pro dlouhodobý provoz.
- 8) Najízděcí a doběhové zdroje se navrhují na předpokládané doby provozu vyplývající z jejich užití.
- 9) Rezervní zdroje se navrhují na předpokládané výkony a doby provozu potřebné pro napájení vlastní spotřeby, nebo její části při poruchách pracovních zdrojů.
- 10) Nouzové zdroje se navrhují pro napájení zajišťovacích pohonů a spotřebičů, nutných k bezpečnému uvedení elektrárny do klidu, odvrácení velkých havárií a ohrožení osob.
- 11) Transformátory se volí tak, aby se zabezpečilo nejmenších zkratových výkonů.
- 12) Rozvod musí být vybaven spínacími a ochrannými zařízeními.
- 13) Rozvod musí být navržen tak, aby se v případě poruchy dalo pomocí vypínačů zamezit havárii a zabezpečit chod elektrárny.

### Vztahy pro dimenzování vlastní spotřeby

Výkon pracovních, najízděcích resp. záložních zdrojů se stanovuje na základě součtového výkonu všech spotřebičů tj.

$$\sum S_p = \frac{\sum P_{ni}}{\cos \varphi_n} \cdot \beta \quad (4.26)$$

s koeficienty:

náročnosti	současnosti	využití	účinnosti
$\beta = \frac{k_v \cdot k_s}{\eta_m \cdot \eta_s}$	$k_s = \frac{\sum P_{si}}{\sum_i P_{ni}}$	$k_v = \frac{\sum P_i}{\sum_i P_{si}}$	$\eta_m$ : Střední účinnost spotřebičů při daném využití $\eta_s$ : Účinnost napájecí soustavy od místa napojení VS

Jmenovitý výkon napájecího zdroje musí být potom:

$$S_Z \geq \sum S_p \quad (4.27)$$

Dále musí být splněno:

- napětí na svorkách elektromotorů musí být podle ČSN 38 1120 v rozmezí  $U_n \pm 5\%$
- min. pokles napětí při spouštění největšího spotřebiče nemá klesnout pod  $0,85 U_n$ , nesmí však klesnout pod  $0,8 U_n$
- min. pokles napětí spouštění skupiny spotřebičů nesmí klesnout pod  $0,65 U_n$

Pro záložní zdroje navíc:

- jeden záskok. transformátor pro dva bloky, dva pro více bloků
- každý záskok. transformátor musí zajistit současně běžný provoz jednoho bloku + chod druhého bloku naprázdno + 50 % společné vlastní spotřeby
- u jaderných elektráren navíc odstavení druhého bloku

Kontrola velikosti zdrojů pro VS:

Kontrolují se napěťové poměry + volba převodu transformátoru:

- při běžném provozu
- při spouštění největšího spotřebiče
- při spouštění skupiny (resp. skupin) spotřebičů

### Přehled spotřebičů vlastní spotřeby

Spotřebiče vlastní spotřeby bloků jsou napájeny z blokových rozvodů bloků, spotřebiče pracující pro celou elektrárnu jsou napájeny z rozvodny společné vlastní spotřeby. U parních elektráren se řadí mezi zařízení vlastní spotřeby napáječky, mlýny, čerpadla, ventilátory, kondenzátory. Tato pomocná zařízení jsou poháněna elektrickými pohony, které jsou napájeny z blokových rozvodů vlastní spotřeby vysokého napětí a nízkého napětí. Společné pohony (pohony ve vodním hospodářství, v zauhllování, v čerpacích stanicích) se napájí z rozvodů společné vlastní spotřeby.

## 4.9. Kontrola navrženého zdroje vlastní spotřeby elektrárny

U navrženého zdroje se musí kontrolovat:

- 1) napěťové poměry na jeho svorkách a zároveň na svorkách jeho spotřebičů při přechodných stavech
- 2) poměry při krátkodobém přetížení

- 3) funkce a správné nastavení ochran; při návrhu nastavení ochran se musí respektovat mimořádné provozní stavy (těžký rozběh, samonařízdění a změny napájecího napětí)

Podstatou této kontroly je výpočet napětí na přípojnici vlastní spotřeby na počátku vybrané skupiny jevů a jejich porovnání s přípustnými hodnotami. Limity napětí souvisí s kritickými napětími motorů, při kterých se motor zatížený jmenovitým zatížením buď zastaví, nebo nerozeběhne.

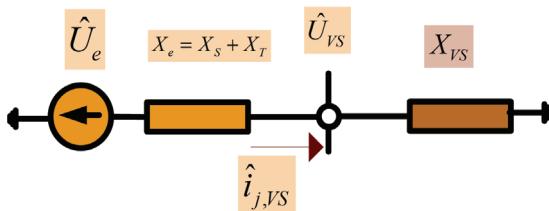
Výpočet se může provádět buď v pojmenovaných nebo poměrných hodnotách. Výpočty v poměrných hodnotách poskytují přehlednější informaci pro srovnávání parametrů strojů a výsledků variantních výpočtů. Pro jednotlivá zařízení jsou poměrné parametry jejich náhradních schémat vztaženy na štítkové hodnoty napětí a výkonu, které však nemusí být přesně totožné s jmenovitými hladinami napětí sítě, ve které mají pracovat. Pro zajištění fyzikální konzistentnosti celého schématu v poměrných hodnotách je výhodné volit jako bázová napětí nominální síťová napětí jednotlivých napěťových hladin a pro celé schéma jednotný bázový výkon  $S_b$ . Výkon je fyzikální veličina, která je proti přepočtům invariantní, neboť matematickými operacemi nesmíme výkon získat ani ztratit.

Na hodnoty bázového napětí a bázového výkonu se všechny použité parametry náhradních schémat musí přepočítat. Jako bázový výkon se zpravidla volí zdánlivý výkon napájecího transformátoru.

Základní schéma napájení vlastní spotřeby ukazuje obr. 4.18, ve kterém je napájecí zdroj znázorněn ekvivalentním jednobranem s ideálním zdrojem napětí  $U_e$  a reaktancí vytvořenou sériovým zapojením ekvivalentní reaktance soustavy a reaktance napájecího transformátoru (blokový, rezervní). Tento zdroj je na přípojnících VS charakterizován modulem zkratového výkonu v pojmenovaných a poměrných hodnotách.

Předpoklady výpočtu:

- 1) schémata a výpočty v poměrných hodnotách (p.u.)
- 2) bázové (vztažné) hodnoty: výkon  $S_b$ ,  $U_b$ : jmenovitá napětí jednotlivých hladin
- 3) uvažuje se jen imaginární složka parametrů a veličin
- 4)  $u_e = \text{konst.}$



Obr. 4.18: Schéma napájení vlastní spotřeby

Obr. 4.18 znázorňuje principiální schéma napájení vlastní spotřeby z reálného zdroje složeného z ideálního napěťového zdroje s konstantním napětím a ekviva-

lentní reaktancí  $X_e$ , vzniklé sériovým spojením ekvivalentní reaktance sítě a reaktance napájecího transformátoru. Reaktance vlastní spotřeby je proměnlivá v závislosti na jevu vlastní spotřeby. Napětí vlastní spotřeby se snadno vypočítá jako napětí na reaktanci  $X_{VS}$  z napěťového děliče tvořeného sériovým spojením reaktancí  $X_e$  a  $X_{VS}$  a napájeného napětím  $U_e$ .

Výpočty jsou obvykle realizovány v poměrných hodnotách, u kterých je nutné na začátku zvolit dvě nezávislé bázové hodnoty v soustavě SI, které tvoří základ pro výpočet závislých bázových veličin. Zpravidla to jsou: vztažný (bázový) výkon  $S_b$  a vztažné napětí  $U_b$ . Vztah mezi nimi je

$$S_b = \sqrt{3} U_b I_b \quad (4.28)$$

$I_b$  ..... hodnota závislého vztažného proudu

Velmi důležitou hodnotou pro dimenzování zařízení vlastní spotřeby je rázový zkratový výkon  $S''_k$ . Tuto hodnotu dodává projektantovi rozvodná organizace. V soustavě SI pro něj platí vztah:

$$S''_k = \sqrt{3} U_e I''_k = \frac{U_e^2}{X_e} \quad (4.29)$$

V poměrných hodnotách je při volbě  $U_b = U_e$  tato hodnota vyjádřena vztahem:

$$S''_k = i''_k = \frac{1}{x_e} \quad (4.30)$$

ve kterém

$x_s, x_T$  .. reaktance sítě, reaktance transformátoru v p.u.

$x_e$  ..... ekvivalentní reaktance jednobranu napájecího zdroje v p.u.,

$$x_e = x_s + x_T$$

Vyjádření napětí vlastní spotřeby v závislosti na proudu vlastní spotřeby  $i_{j,VS}$  a z napěťového děliče  $u_e$ :

$$u_{VS} = \frac{x_{VS}}{x_e + x_{VS}} u_e = i_{j,VS} \cdot x_{VS} \quad (4.31)$$

$x_{VS}$  ..... rezultující reaktance připojená na přípojnici vlastní spotřeby závislá na charakteru probíhajícího jevu. Součástí této reaktance jsou:

$x_z(k)$  ... rozběhová reaktance k-tého motoru v (p.u.) při skluzu  $s = 1$  vztažená na jmenovitý zdánlivý výkon k-tého motoru  $S_{n(k)}$ ,  
 $x_z(k) = 1/i_z(k)$

$i_{z(k)}$  ..... poměrný záběrový proud k-tého motoru při jmenovitém napětí napájení a vztažený na jmenovitý proud motoru  $I_n$ .

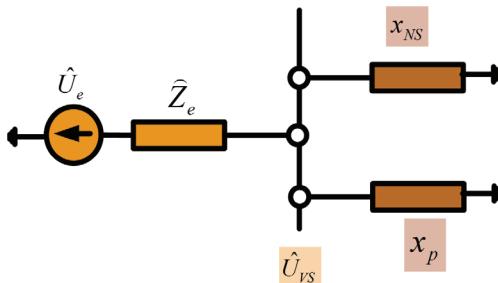
$x_M(k)$  .. rozběhová reaktance k-tého motoru v (p.u.) při skluzu  $s = 1$  počtená na bázový výkon  $S_b$ ,  $x_M(k) = \frac{1}{i_z(k)} \cdot \frac{S_b}{S_n(k)}$

### Kontrola navrženého zdroje při rozběhu největšího spotřebiče, (zpravidla elektromotor napáječky, chladičky, mlýnu)

Rozběhem největšího elektromotoru se rozumí přechodný stav, kdy na přípojnici vlastní spotřeby jsou připojeny všechny elektromotory a spotřebiče vlastní spotřeby zajišťující plný provoz vlastní spotřeby a dále se spouští další asynchronní motor. Kontrola se provádí pro spouštění největšího asynchronního motoru při jmenovitém zatížení bloku. Poklesne-li napětí na přípojnících pod povolenou hodnotu 80 % jmenovitého napětí, spouštěný motor se nemusí rozběhnout.

Zjednodušující předpoklady pro výpočet jsou stejné jako pro případ samonajíždění elektromotorů. Další zjednodušující předpoklady pro výpočet jsou:

- počítá se jen s jalovou složkou proudu předběžné zátěže
- všechny elektromotory pracují se jmenovitým zdánlivým výkonem a jmenovitým účiníkem při jmenovitém zatížení bloku



Obr. 4.19: Schéma při rozběhu největšího spotřebiče

Pro úspěšné spuštění největšího spotřebiče musí být požadovaný zkratový výkon  $S_{kSP}$  menší nebo nejvýše roven skutečnému zkratovému výkonu  $S_k$ .

Jalový proud k-tého spotřebiče

$$I_{kj} = \sin \varphi_k \cdot I_{kn} \quad (4.32)$$

Poměrná reaktance k-tého spotřebiče předběžného zatížení vztažená na své nominální hodnoty

$$x_{p(n)}(k) = \frac{1}{\sin \varphi_k} \quad (4.33)$$

Poměrná reaktance k-tého spotřebiče předběžného zatížení přepočtená na  $S_b$

$$x_p(k) = x_{p(n)}(k) \frac{S_b}{S_n(k)} = \frac{1}{\sin \varphi_k} \frac{S_b}{S_n(k)} \quad (4.34)$$

Poměrná reaktance předběžného zatížení vzniklá paralelní kombinací dílčích spotřeb a vztažená k výkonu  $S_b$

$$\frac{1}{x_p} = \sum_{\forall k} \frac{1}{x_p(k)} \quad (4.35)$$

$Q_p$ ,  $\varphi_p$  ... jalový výkon a průměrný úhel zátěže předběžného zatížení

$$x_p = \frac{S_b}{\sum \sin \varphi_k S_p(k)} = \frac{S_b}{\sin \varphi_p S_p} = \frac{S_b}{Q_p} \quad (4.36)$$

Celková reaktance při rozběhu největšího spotřebiče

$$x_{SP} = x_e + x_p // x_{NS} \quad (4.37)$$

Napětí vlastní spotřeby určené napěťovým děličem

$$u_{SP} = u_e \frac{(x_p || x_{NS})}{x_e + (x_p || x_{NS})} \geq 0,8 \quad (4.38)$$

## 4.10. Kontrola navrženého zdroje při samonajízdění elektromotorů

Nejčastějšími poruchami ovlivňujícími chod elektromotorů ve vlastní spotřebě elektráren jsou zkraty a krátkodobá přerušení napájení. Při ztrátě pracovního napájecího zdroje vlastní spotřeby dochází ke krátkodobému přerušení napájení celé skupiny elektropohonů. Vypínače elektropohonů zůstávají zapnuty, takže po obnovení napájení z rezervního zdroje se elektromotory rozbíhají z těch otáček, na které poklesly v době přerušení napájení. Tento provozní stav elektromotorů se nazývá samonajízdění. Samonajízdění elektropohonů je oproti normálnímu rozběhu

zkomplikováno tím, že se současně rozbíhá celá řada elektropohonů a pokles napětí na společných přípojnicích je způsoben rozběhovými proudy všech elektromotorů. Je nutné při samonajíždění kontrolovat, zda napětí na svorkách elektromotorů nepoklesne pod přípustnou hodnotu 65 % jmenovitého napětí. Při výpočtu se podle požadavků na přesnost volí zjednodušující předpoklady.

Zjednodušující předpoklady užité při výpočtu:

- 1) Otáčky motorů během automatického přepínání ze zdroje pracovního na zdroj rezervní a naopak klesnou na nulu, tedy  $s = 1$ .
- 2) Při výpočtu úbytků napětí v soustavě vvn a vn se uvažují jen reaktance, rezistence elektrických strojů a vedení se zanedbávají.
- 3) Při výpočtu reaktance elektromotoru na počátku rozběhu se počítá pouze s jalovou složkou záběrného proudu (nejvíce ovlivňuje úbytek napětí).
- 4) Úbytky napětí na přívodech k elektromotorům se zanedbávají.

Nejčastěji užívanou metodou kontroly velikosti úbytku napětí při samonajíždění elektromotorů je kontrola pomocí zkratových výkonů. Požadovaný zkratový výkon na přípojnicích  $S_{kSN}$ , který je dán součinem napětí v daném místě těsně před zkratem,  $U_{SN}$  a zkratového proudu  $I_k$ , se porovnává se skutečným zkratovým výkonem  $S_k$ . Je-li požadovaný zkratový výkon  $S_{kSN}$  menší než skutečný zkratový výkon  $S_k$ , je návrh v pořadku.

Pro získání přesnějších výsledků výpočtu se nepočítá s poklesem otáček elektromotorů při změně napětí na nulu.

Zjednodušená kontrola napěťových poměrů předpokládá, že se po předchozím přerušení napájení rozebíhá ze stavu klidu vybraná skupina pohonů. Základem je stanovení rozběhové reaktance motoru z předpokladu, že se rozebíhá ze jmenovitého napětí.

Reaktance vlastní spotřeby při procesu samonajíždění je tvořena paralelním řazením (na společný bázový výkon přepočtených) rozběhových reaktancí motorů zařazených do tohoto procesu:

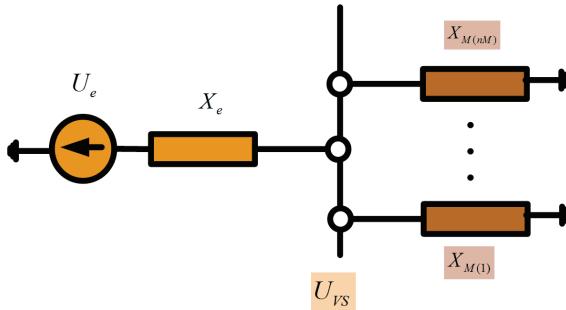
$$\frac{1}{X_{SN}} = \frac{1}{S_b} \sum_{\forall k} i_z(k) S_n(k) \quad (4.39)$$

Výsledný vztah pro reaktaci vlastní spotřeby při samonajíždění

$$X_{SN} = \frac{S_b}{\sum_{\forall k} i_z(k) S_n(k)} \quad (4.40)$$

Výsledné napětí vlastní spotřeby na začátku procesu samonajíždění vyjádřené z poměru napěťového děliče napětí  $u_e$

$$u_{SN} = u_e \frac{x_{SN}}{x_{SN} + x_e} \geq 0,65 \quad (4.41)$$



Obr. 4.20: Schéma při samonajíždění motorů

### Kontrola zkratovým výkonem

Napětí vlastní spotřeby v poměrných hodnotách je rovno součinu

$$u_{VS} = i_{j,VS} x_{VS} \quad (4.42)$$

Je-li v poměrných hodnotách zkratový výkon číselně roven proudu, pak se při kontrole zkratovými výkony porovnává skutečný zkratový výkon reprezentovaný proudem  $i''_k$  s takovou hodnotou proudu  $i_{j,VS}$ , která zajistí přípustnou hodnotu napětí vlastní spotřeby dle nerovnosti:

$$\begin{aligned} i_{j,VS} \cdot x_{VS} &\geq u_{VS,dov} \\ i''_k &> i_{j,VS} \end{aligned} \quad (4.43)$$

V případě porušení předepsaných limitů napětí je problém možno řešit některou z těchto možností:

- 1) Ověřit podmínky podrobnějším výpočtem.
- 2) Změnit parametry (zvýšit výkon, zmenšit reaktanci nakrátko) napájecího transformátoru.
- 3) Omezit výkon zařízení zúčastňujícího se procesu.

Varianty 1, 2 mají za následek zvýšení zkratového výkonu  $S''_k$  a tím, z důvodu vyšší zkratové odolnosti, dražší vybavení rozvodny VS. Ve variantě 2 je dražší i napájecí transformátor. V realizaci bodu 3 se spouštění motorů řeší postupným

spouštěním podle technologických priorit. Omezení spouštěcích proudů umožňují elektronická zařízení „softstart“.

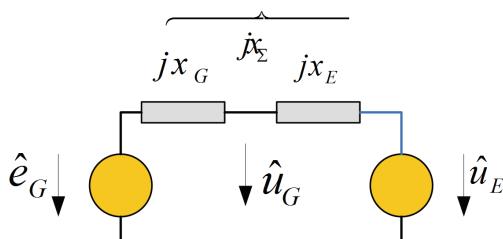
## 4.11. Fázování alternátoru

Fázování je proces spojující, do okamžiku fázování, rozpojené obvody generátoru a soustavy. Teoretické podmínky pro ideální fázování jsou:

- stejný sled fází soustavy a generátoru
- stejný kmitočet
- stejný modul napětí
- nulový vzájemný posuv fází

Z časových důvodů se v provozu přesné plnění všech bodů nemusí dodržet a proto pro praxi realizované operace se připouští některé nepřesnosti (vyjma porušení sledu fází). Pro názorné studijní znázornění důsledků nepřesností se vytvoří schéma, ve kterém je generátor nahrazen jednobranem obsahujícím, pro začátky přechodných jevů, málo měnící se napětí, což je u generátorů s tlumičem napětí za rázovou reaktancí  $\hat{e}_G = \hat{e}''$ , jinak napětí za přechodnou reaktancí  $\hat{e}_G = \hat{e}'$ . K těmto napětím se přiřadí příslušná reaktance  $x_G = x_d''$  nebo  $x_G = x_d'$ . Externí obvod se nahradí podle Theveninovy poučky jednobranem s reaktancí  $x_E$  a napětím  $u_E$ . Sériovým spojením reaktancí generátoru a soustavy vznikne výsledná reaktance omezující rázový proud:

$$x_\Sigma = x_G + x_E \quad (4.44)$$



Obr. 4.21: Náhradní schéma procesu fázování

Těsně po přifázování vznikne proud mající obecně střídavou a stejnosměrnou složku.

## Střídavá složka

Střídavá složka má při chybě fáze i modulu část činnou i jalovou a je určena výrazem:

$$\hat{i}_{\approx} = \frac{\hat{e}_G - \hat{u}_E}{jX_{\Sigma}} \quad (4.45)$$

## Stejnosměrná složka

Stejnosměrná složka vzniká proto, aby vyrovnala hladkým exponenciálním průběhem rozdíl mezi počátečními podmínkami a ustálenými hodnotami proudů. Jinak také řečeno, aby se na indukčnosti neměnil proud skokem. Stejnosměrnou složku nelze znázorňovat ve fázorovém diagramu a může dosáhnout hodnoty:

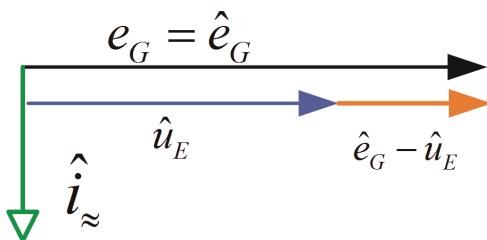
$$i_{\approx} = \sqrt{2}\hat{i}_{\approx} \quad (4.46)$$

### 4.11.1. Fázování s chybou modulu

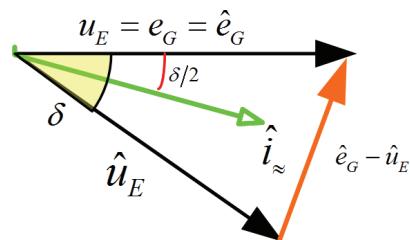
V praxi je přípustné fázovat s chybou modulu 0,05, z čehož pro rozsah rázových reaktancí  $X_d'' \in \langle 0.15 \text{ až } 0.3 \rangle$  a  $X_E \geq 0$  vyplývá hodnota pro modul střídavé složky dle nerovnosti:

$$i_{\approx} = 0,05/jX_{\Sigma} \leq 1/3 \quad (4.47)$$

Napětí generátoru se nastavuje větší a předbíhající napětí sítě, aby stroj po přifázování převzal kladný činný výkon a dodávku jalového výkonu induktivního charakteru. Rázový proud je dle výsledného vztahu (4.45) jalového charakteru.



Obr. 4.22: Diagram fázování s chybou modulu



Obr. 4.23: Diagram fázování s chybou fáze

### 4.11.2. Fázování s chybou fáze

Při umístění vnitřního napětí  $\hat{e}_G = e_G$  do reálné osy je znázornění fázorů v okamžiku fázování znázorněno na obr. 4.23 a k němu odpovídající vztah pro výpočet střídavé složky:

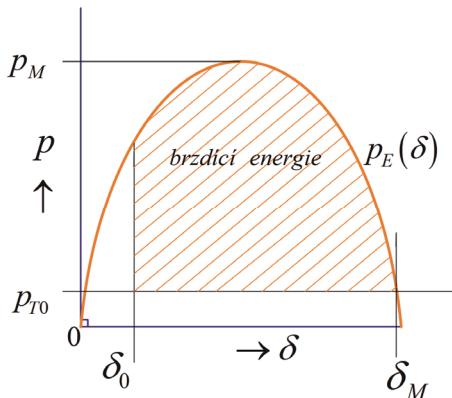
$$\hat{i}_{\infty} = \frac{e_G(1 - e^{-j\delta})}{jX_{\Sigma}} = \frac{2e_G \cdot \sin(\delta/2)}{X_{\Sigma}} e^{-j\frac{\delta}{2}} \quad (4.48)$$

Z výsledného vztahu (4.48) vyplývá, že pro malé odchylky  $\delta$  je rázový proud převážně činného charakteru, protože výraz  $e^{-j\delta/2}$  generuje jen malou imaginární složku.

### 4.11.3. Fázování s chybou kmitočtu

Toto fázování nemusí být vždy úspěšné, neboť rozhodující podmínkou pro úspěšnost je splnění podmínek dynamické stability ve výchozím pracovním bodě, který je určen jen malým výkonem turbíny  $p_{T0}$  (hradí před fázováním jen ztráty), ke kterému přísluší na charakteristice závislosti elektrického výkonu na zátěžném úhlu mezní úhel  $\delta_M$ , (při zanedbání malé hodnoty  $p_{T0}$  má hodnotu  $\delta_M = \pi$ ). Podmínky stability stanovují, že elektrická brzdná energie musí být větší nebo v mezním případě rovna přebytku mechanické energie setrvačných hmot soustrojí. Při jednoduchém vyjádření elektrického výkonu turbosoustrojí vztahem v poměrných hodnotách:

$$p_E(\delta) = p_M \cdot \sin \delta \quad (4.49)$$



Obr. 4.24: Zobrazení brzdicí energie

Podmínka dynamické stability je vyjádřena vztahem:

$$\frac{1}{2} \cdot T_J \Delta \omega^2 \leq \int_{\delta_0}^{\delta_M} p_M \sin \delta \cdot d\delta \quad (4.50)$$

který po realizaci naznačené integrace a podmínce  $p_{T0} = 0$  poskytne relaci pro přípustnou odchylku úhlové frekvence:

$$\Delta\omega = \sqrt{\frac{2}{T_J} \{ p_M (1 + \cos \delta_0) \}} \leq 0,001 \quad (4.51)$$

$T_J$  ..... mechanická časová konstanta soustrojí v poměrných hodnotách

$$(\text{radiánech}), \quad T_J = \frac{J\Omega_{\text{mech}}^2}{M_n}$$

Z výsledného výrazu (4.51) vyplývá, že maximální přípustný rozdíl kmitočtů závisí na fázovém posuvu  $\delta_0$ . V praxi se povoluje maximální poměrný rozdíl kmitočtů  $\Delta\omega = 0,001$ , protože při překročení této hodnoty může rotor generátoru vykonat proti točivému poli statoru několik otáček navíc (prokluz), při kterém dochází ke vzniku velkých proudových a momentových nárazů.

#### 4.11.4. Samosynchronizace

Samosynchronizace je způsob propojení obvodů generátoru a soustavy, při kterém se nenabuzený rotor roztočí do otáček blízkých synchronním a následně se obvody spojí a rotor okamžitě nabudí.

V důsledku nabuzení vznikne synchronizační moment, který vtáhne rotor do synchronismu. Při samosynchronizaci dochází vždy k nárazu jalového charakteru. Při přijatém zjednodušeném modelu je  $\hat{e}_G = 0$  a pro střídavou složku platí:

$$\hat{i}_{\approx} = -\frac{\hat{u}_E}{jx_{\Sigma}} \quad (4.52)$$

Při podrobném řešení pomocí soustavy diferenciálních rovnic stroje a soustavy se ukáže, že řešení vedle střídavé a stejnosměrné složky obsahuje i složky s frekvencemi  $f(1-s)$ ,  $f(1-2s)$ ,  $2f(1-s)$ .

#### 4.11.5. Asynchronní chod stroje

Jedná se o mimořádný provozní stav vznikající například při ztrátě buzení. V tomto případě se stroj začne budit ze sítě tím, že začne odebírat jalovou energii induktivního charakteru a vypadne ze synchronismu zvýšením otáček na hodnotu určenou průsečkem charakteristiky primárního regulátoru a výsledné asynchronní charakteristiky generátoru.

#### 4.11.6. Diagram mezních zatížení synchronního generátoru

Pracovní bod (nebo trajektorie pracovních bodů) synchronního stroje se zobrazuje jako bod (trajektorie) v diagramu o souřadnicích P-Q-U, nebo o souřadnicích R-X-U. Diagram o souřadnicích R-X-U se vytváří inverzí diagramu P-Q-U podle jednotkové kružnice a je výhodný pro mapování činnosti ochran bloku. Hranice těchto diagramů rozdělují prostor stavů přípustných a stavů nepřípustných.

Omezující faktory jsou:

- Ohřátí vinutí statoru
- Ohřátí vinutí rotoru
- Ohřátí čelných spojek statoru
- Stabilita ustáleného chodu
- Přípustnými hodnotami činného výkonu turbíny (bloku)

Při konstrukci se vychází z předpokladu, že chod se jmenovitými proudy je maximální možný trvalý chod a že oteplení s těmito proudy se nedostanou do ne-přípustných hodnot. Z hlediska oteplení budou tedy proudy jmenovitého chodu proudy mezními. Pro chod s jinými napětími než jmenovitými se tedy přípustné hranice ve výkonových souřadnicích budou modifikovat tak, že při vyšším napětí a jmenovitému proudu je z hlediska oteplování přípustný vyšší výkon. Při sestrojování přípustného prostoru se vychází z fázorového diagramu příslušného typu stroje (s hladkým rotorem, s vyniklými póly) v poměrných hodnotách se zanedbánímlivu rezistence statoru.

V tomto diagramu jsou délky fázorů úměrné:

úsečka	význam v diagramu	po násobení $u/x_d$	úměrnost	výkon	omezující faktor
$\overline{0C}$	$x_d \cdot i$	$u \cdot i$	$s$	zdánlivý	bod 1
$\overline{AC} = \overline{PB}$	$x_d \cdot i \cdot \cos \varphi$	$u \cdot i \cdot \cos \varphi$	$p$	činný	bod 5
$\overline{0A}$	$x_d \cdot i \cdot \sin \varphi$	$u \cdot i \cdot \sin \varphi$	$q$	jalový	
$\overline{PC}$	$\hat{e}_Q$	$e_Q \cdot u / x_d$			bod 2

Je-li jalový výkon v prvním kvadrantu, označuje dodávku jalového výkonu induktivního charakteru do sítě (přebuzený stroj) a ve druhém kvadrantu odběr jalového výkonu induktivního charakteru (podbuzený stroj). Pro zjištění podmínky zajišťující stability ustáleného chodu je známo, že mez stability je dána podmínkou:

$$\frac{\partial p}{\partial \delta} = 0 \quad (4.53)$$

Pro turbosoustrojí s charakteristikami činného a jalového výkonu pracující přímo do velké soustavy:

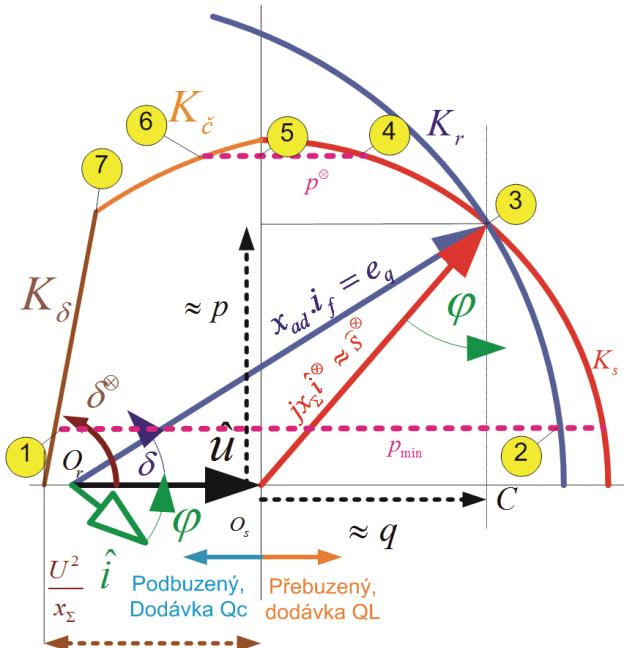
$$p = \frac{e_Q u}{x_{d\Sigma}} \sin \delta, \quad q = \frac{e_Q u}{x_{d\Sigma}} \cos \delta - \frac{U^2}{x_{d\Sigma}} \quad (4.54)$$

se přijímají z hlediska vytvoření bezpečnostního pásu mezní zátěžné úhly  $\delta_M < \pi/2$  například  $\delta_M < 2/3\pi$ . Pak se po dosazení této hodnoty do rovnic (4.54) odvodí mezní charakteristika stability ve tvaru:

$$q = p \cdot \cot g \delta_M - 1/x_{d\Sigma} \quad (4.55)$$

Z hlediska uvedených omezujících podmínek jsou hranice přípustného prostoru vymezeny:

- 1) Oteplení statoru kružnicí  $K_s$  s poloměrem  $S_n$  a středem v bodě O
- 2) Oteplení rotoru kružnicí  $K_r$  s poloměrem  $U_n e_{Qn}/x_{d\Sigma}$  a středem v P



$K_\delta$ ...mez přípustného zátěžného úhlu  $\delta$

$$\delta \leq \delta^\circ, P = \frac{e_Q U}{x_\Sigma} \sin \delta^\circ, Q + \frac{U^2}{x_\Sigma} = \frac{e_Q U}{x_\Sigma} \cos \delta^\circ$$

$$P = \frac{e_Q U}{x_\Sigma} \operatorname{tg} \delta^\circ = \left( Q + \frac{U^2}{x_\Sigma} \right) \operatorname{tg} \delta^\circ \dots \text{primitiva}$$

$K_c$ ...kružnice přípustného oteplení čel vinutí

1-2-3-4-5-6-7...mezní kružnice přípustného prostoru

$K_s$ ...kružnice přípustného oteplení statoru

$$I \leq I^\circ \Rightarrow P^2 + Q^2 \leq (U I^\circ)^2$$

$K_r$ ...kružnice přípustného oteplení rotoru

$$e_Q \leq e_Q^\circ \Rightarrow P^2 + \left( Q + \frac{U^2}{x_\Sigma} \right)^2 \leq \left( \frac{e_Q^\circ U}{x_\Sigma} \right)^2$$

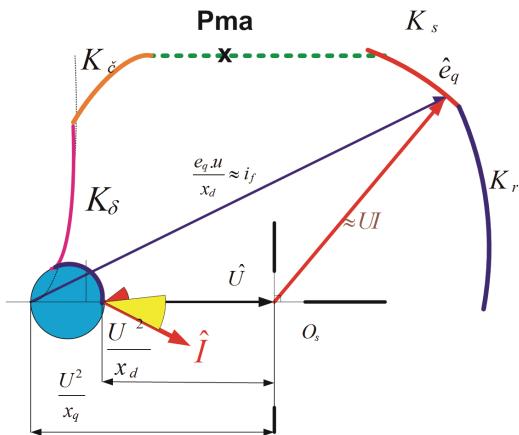
Obr. 4.25: Diagram mezního zatížení turbostroje

#### 4.11.7. Diagram mezních zatížení stroje s vyniklými póly

Při sestrojování tohoto diagramu se opět vychází z informací obsažených v jeho fázorovém diagramu a rovnic pro činný a jalový výkon:

$$p = \frac{ue_q}{x_d} \sin \delta + \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta \quad (4.56)$$

$$e_q = \sqrt{(u + x_q \cdot i \cdot \sin \varphi)^2 + (x_q \cdot i \cdot \cos \varphi)^2 + (x_d - x_q) \cdot i \cdot \cos \gamma} \quad (4.57)$$



Obr. 4.26: Diagram mezního zatížení stroje s vyniklými póly

Po úpravě:

$$e_q = \frac{u^2 + u \sin \varphi (x_d + x_q) + x_d x_q i^2}{\sqrt{(u + x_q \cdot i \cdot \sin \varphi)^2 + (x_q \cdot i \cdot \cos \varphi)^2}} \quad (4.58)$$

Stav bez buzení je dán podmínkou  $e_q = 0$ , která nuluje čitatele rovnice (4.58) a v p-q souřadnicích formuluje rovnici kružnice:

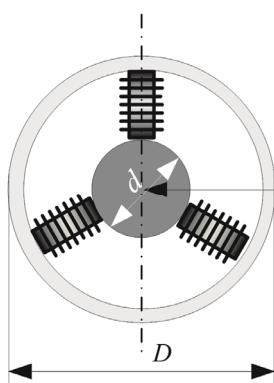
$$p^2 + \left( q - \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_q} \right) \right)^2 = \frac{u^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \quad (4.59)$$

Pracovní body uvnitř kružnice se vyznačují záporným buzením. Pro křivku meze stability platí podmínka  $(\partial P / \partial \delta) = 0$ , ze které vyplývá rovnice:

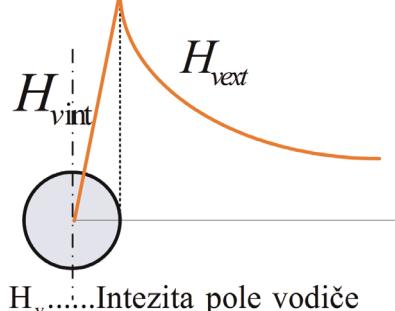
$$p^2 + \frac{\left(\frac{u^2}{x_q} + q\right)^3}{\frac{u^2}{x_d} + q} = 0 \quad (4.60)$$

## 4.12. Zapouzdřené vodiče

S rostoucími jednotkovými výkony moderních elektráren neroste úměrně výstupní napětí a proto rostou výstupní proudy. Řešení vedení velkých proudů si vyžádalo konstrukční uspořádání se zapouzdřenými vodiči. Vodič je umístěn do válcového hliníkového pouzdra chlazeného vodou obíhající v kanálech po obvodu pouzdra. Vodič je izolován od vnějšího hliníkového pláště izolátory. Uspořádání je naznačeno na obr 4.27.



Obr. 4.27: Uspořádání zapouzdřeného vodiče



Obr. 4.28: Pole osamělého vodiče

I	kA	6	10	6	10	14	18	28
U	kV	17.5		25				
d		0.264	0.35	0.264	0.35	0.46	0.58	0.81
D	m	0.640	0.73		0.82	0.93	1.05	1.3
A		0.8	1	1	1.1	1.2	1.3	1.6

Tab. 4.5: Vybrané rozměry zapouzdřeného vodiče

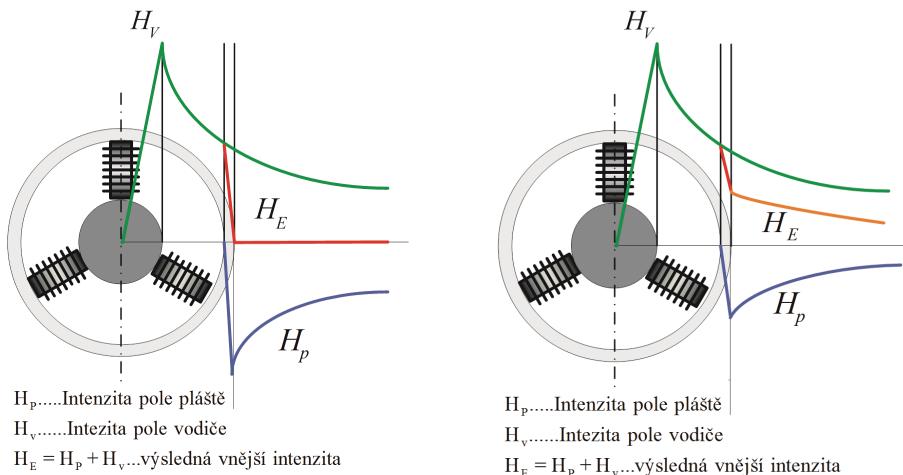
Výhody provedení:

- vyloučení mezifázových zkratů
- vysoká zkratová odolnost
- možnost eliminace vnějšího magnetického pole a tím minimalizace činných ztrát způsobených indukcí do okolních ocelových konstrukcí

- možnost minimalizace elektromagnetického rušení do okolí (zejména signálů automatického řízení)
- izolátory jsou chráněny proti externím vlivům (prach, voda)
- minimalizace údržbových prací
- zvýšení bezpečnosti obsluhy

Soustavu vodič-pouzdro lze analyzovat jako transformátor s měkkou vzduchovou vazbou, při níž se indukují výřivé proudy i proudy podélné stejněho směru s proudem ve vodiči. Výslednou intenzitu magnetického pole si znázorňujeme jako superpozici pole vodiče a pláště. Základem je charakteristika pole kruhového vodiče protékaného proudem s rovnoměrnou proudovou hustotou  $\sigma_i$  (neuvážuje se skinefekt). Podle Hopkinsonova zákona intenzita magnetického pole uvnitř vodiče lineárně narůstá a vně vodiče hyperbolicky klesá. Při superpozici se akceptuje, že okamžité hodnoty proudu ve vodiči a plásti mají obrácený směr.

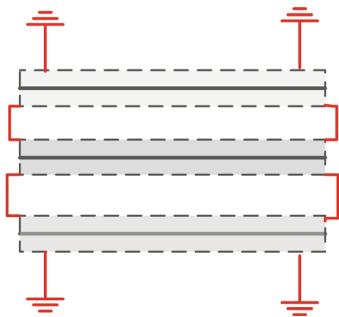
$$H_{\text{vext}} = \frac{I}{2\pi r} \Leftrightarrow r_v \leq r \leq R_v \Rightarrow H_{\text{vint}} = \frac{\sigma_i}{4} r \quad (4.61)$$



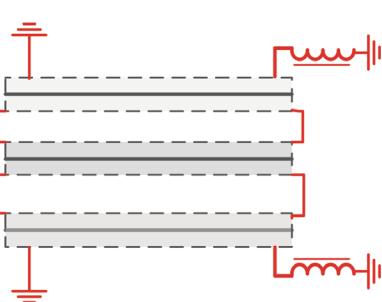
Obr. 4.29: Případ vnějšího pole

Obr. 4.30: Případ vnějšího pole nevykompenzovaného

Obr. 4.29 ukazuje teoretický případ, ve kterém se v pouzdru vytvoří pole přesně kompenzující externí pole vodiče. Praktickou ukázkou je případ, ve kterém proud v pláště nevytvoří pole přesně kompenzující pole vodiče, ale z důvodu měkké vazby a impedance pláště pole menší, takže vně pouzdra existuje pole, jehož velikost je také závislá na způsobu uzemňování pláště.



**Obr. 4.31: Případ oboustranného uzemnění**



**Obr. 4.32: Uzemnění přes indukčností**

Případ uzemnění na obou koncích umožňuje vznik velkého pole v pláště, které může poměrně úspěšně pole vodiče kompenzovat s pozitivními důsledky na přídatné ztráty v okolí.

Případ uzemnění jen na jednom konci neumožňuje vznik většího pole pouzdra a vně pouzdra existuje tedy silnější pole vodiče, menší proudy způsobují ale v pouzdro menší ztráty a tím i oteplení pouzdra. Uzemnění přes tlumivku významně omezuje vnější pole v případě vzniku poruchy, neboť tlumivka se v tomto případě přesytí a schéma konverguje k variantě uzemnění na obou koncích. V jmenovitém chodu má tlumivka velkou indukčnost a neumožňuje vznik větších proudů, takže schéma konverguje k uzemnění na jednom konci.

Použije-li se ve schématu vyvedení výkonu alternátorový vypínač, pak se umisťuje jednofázově do zapouzdřených vývodů. Indikace vypnutí je viditelná za skleněným otvorem ve stavu odpojovače.

## 4.13. Literatura

- [1] Klaus Heuck Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab Elektroenergiesysteme Springer 2007
- [3] Herbert Windisch Termodynamik OldenbourgVerlag Mochen 2008
- [4] Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [5] R.A.Zahoransky. Energietechnik. Wieweg+Teubner 2009
- [6] Juergen Schlabach and Karl-Heinz Rofalski. - Power System Engineering. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [7] P.Kundur. Power System Analysis and Control.Mc.Graw Hill 1999.
- [8] Machowski.Power System Dynamics:Stability and Control. 2008 John Wiley &, Sons,Ltd.
- [9] www.ceps
- [10] Z. Trojánek. Elektrická část elektráren. Skripta ČVUT 1975
- [11] S.Bouček, A.Dočekal. Elektrárny II.Skripta ČVUT 1995

# 5. Informační technologie v elektrárnách

Řídicí systém elektrárny slouží pro řízení jednotlivých technologických procesů, což představuje zajištění těchto úkolů:

- Měření technologických veličin, jejich verifikaci a přenos dat mezi jednotlivými podsystémy.
- Logické řízení, regulace.
- Analýzu mezních a havarijních stavů.
- Vytvoření uživatelského rozhraní mezi operátorem a systémem, které zajiší zadávání a zpracování povelů operátora, vizualizační a signalizační funkci o průběhu procesu, poruchová a událostní hlášení systému.
- Archivaci dat o provozu systému a jejich poskytování do nadřazených informačních sítí.
- Realizaci vyšších řídicích funkcí, které se snaží o optimalizaci a koordinaci procesu.

Z hlediska struktury rozeznáváme centralizované nebo distribuované řídicí systémy.

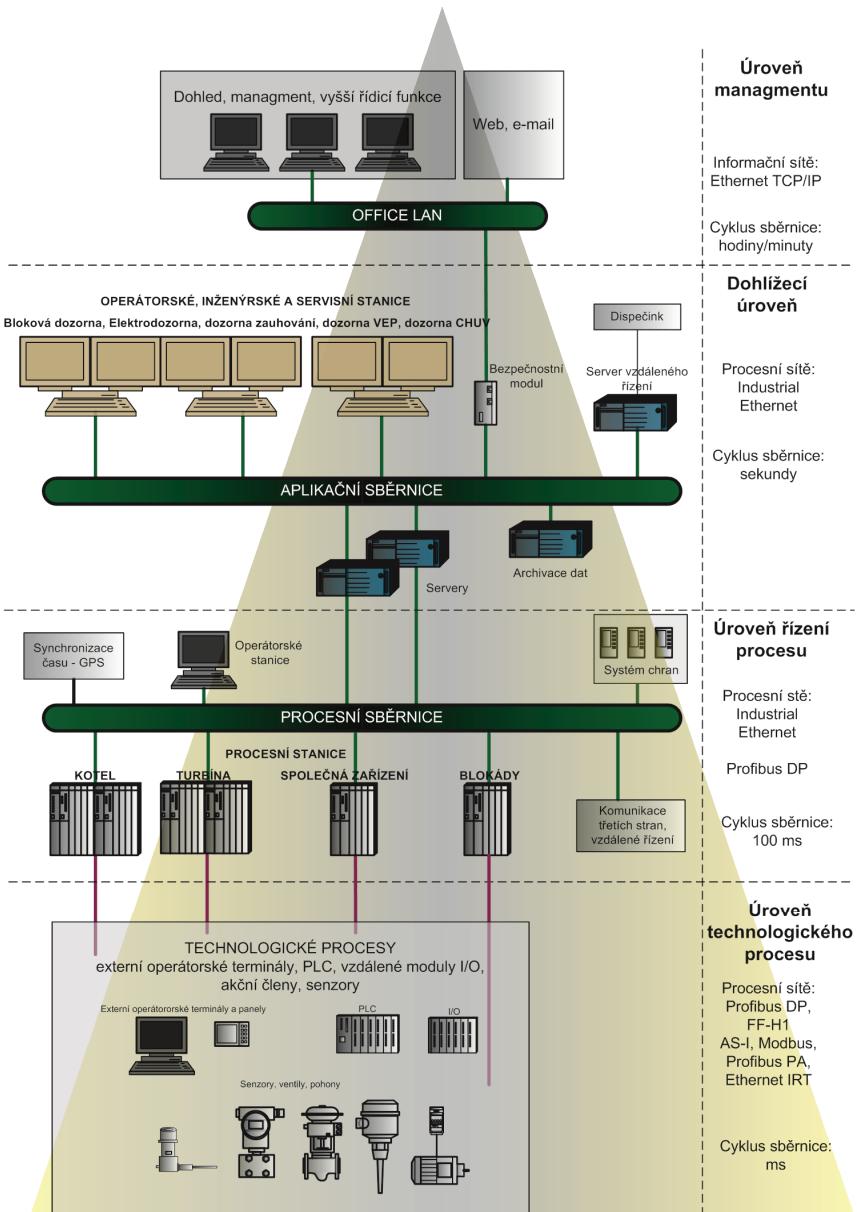
## 5.1. Distribuované řídicí systémy (DCS)

Pro malé systémy s nízkým počtem regulačních smyček, lze použít centralizovaný řídicí systém. Takovýto systém je založen na jedné centrální řídicí jednotce určené pro řízení všech procesů. Tato jednotka je pak přímo propojena se všemi technologickými prvky nutnými pro řízení a předávání dat.

U rozsáhlých systémů velkých elektráren, kde existují stovky regulačních smyček, se používají distribuované řídicí systémy (Distributed Control System - DCS). Oproti centralizovaným systémům obsahují více flexibilní HW a SW, který je snadno modifikovatelný a konfigurovatelný tak, aby bylo možné řídit velké množství regulačních smyček v rozlehlém systému.

DCS představuje strukturu vzájemně propojených podsystémů s připojenými vstupy a výstupy ke snímačům a akčním členům technologie. V rámci DCS existují samostatné procesní stanice, které jsou rozmištěny v blízkosti jednotlivých technologických celků elektrárny (např. kotel, turbína, zauhlování a další). Tyto stanice slouží vždy pro řízení daného celku a mezi sebou jsou navzájem propojeny pomocí tzv. procesní sběrnice, která tvoří páteř DCS systému. K procesní sběrniči jsou pak buď přímo, nebo přes nadřazený aplikativní server připojeny operátorské, inženýrské, servisní, archivační a další stanice určené pro řízení a dohled nad celým systémem. Nad touto strukturou existuje nejvyšší úroveň řízení, která slouží pro rozhodování a řízení ekonomiky celé elektrárny v delším časovém intervalu. Na této úrovni je vzájemná komunikace zajišťována pomocí informačních sítí typu LAN, WAN.

Jedna z možných blokových struktur DCS je zobrazena na obr. 5.1.



Obr. 5.1: Příklad schématu distribuovaného řídicího systému elektrárny

Úrovně řízení v rámci DCS lze rozdělit do 4 skupin:

- 1) Úroveň technologického procesu
- 2) Úroveň řízení procesu
- 3) Dohlížecí (operátorská) úroveň
- 4) Úroveň managementu

V reálných aplikacích mohou některé úrovně splývat nebo neexistují.

Výhodou distribuovaného řízení oproti centralizovanému je, že případná ztráta procesní sběrnice nezpůsobí kompletní ztrátu systémové způsobilosti. Lokální řídicí jednotky mohou samostatně pokračovat v automatizačních operacích nad danými technologickými subsystémy bez ztráty funkce po určité časové období.

Jedním z hlavních cílů použití DCS systému je implementace moderních digitálních algoritmů řízení. Mezi výhody digitálního řízení zejména patří:

- Digitální systémy jsou více flexibilní, tzn. že algoritmy řízení mohou být jednoduše měněny a řídicí konfigurace mohou být modifikovány bez fyzického zásahu do systému.
- Digitální systém je levnější při instalaci a na údržbu.
- Digitální data v elektronických souborech jsou jednodušší ke zpracování.

Název DCS se obecně vžil pro digitální systémy automatizace nepřetržitých, spojitych a rozsáhlých technologických celků, které představují komplexní HW a SW řešení pro řízení všech úrovních subjektu s požadovanou spolehlivostí.

DCS byly zpočátku uzavřené a speciálně vyvýjené systémy pro konkrétní účel, což se také projevovalo na jejich ceně. DCS systémy se začaly vyvíjet 1. generaci v 80. letech minulého století až po současnou 3. generaci, která je charakteristická větší otevřeností a využitím standardních řešení v oblasti HW a SW.

Zpočátku se například na úrovni operátorských stanic používaly výkonné pracovní stanice s grafickými terminály a firemními specializovanými SW produkty. Dnes se na této úrovni přechází k využití klasických PC s OS Windows a s univerzálními programovými balíky pro tvorbu systémů styku s obsluhou (HMI/SCADA) s otevřeným komunikačním rozhraním (Ethernet TCP/IP) a standardním datovým rozhraním OPC. Obdobně dnes existují také standardní řešení pro zpracování a archivaci technologických dat a výpočtu v režimech on-line i off-line.

Třetí generaci DCS systému dále charakterizuje využití inteligentních snímačů, akčních členů a průmyslových sběrnic na úrovni technologického procesu. Využitím těchto prvků lze zpětnovazebné řízení přesunout až na nejnižší úroveň technologického procesu k akčním a měřicím členům.

## 5.2. Distribuované řídicí systémy na bázi PLC

PLC (Programmable Logic Controllers) vznikly v 70. letech dvacátého století a zprvu představovaly digitální programovatelnou náhradu reléových automatik. Během let však zažily bouřlivý rozvoj a navýšení výkonnosti. Z pohledu HW není dnes významný rozdíl mezi systémy s PLC a DCS. Na DCS se však pohlíží jako na komplexní řešení, které je charakterizováno propracovanými systémy operátor-ských rozhraní, zajistění冗余 redundancy, vytváření funkčních bloků a podporou průmyslových sběrnic. PLC je na druhé straně charakterizováno větší otevřeností a díky hromadné produkci nižšími pořizovacími náklady. Dnes se k realizaci některých DCS systémů využívá technických prostředků vyvýjených jako PLC (např. řídicí systém Siemens PCS7 využívá na pozici procesních stanic programovatelné automaty Simatic S7). Existují také tzv. hybridní systémy, kde se kombinují systémy DCS s PLC.

## 5.3. Úrovně řízení v distribuovaném řídicím systému

### 5.3.1. Úroveň technologického procesu

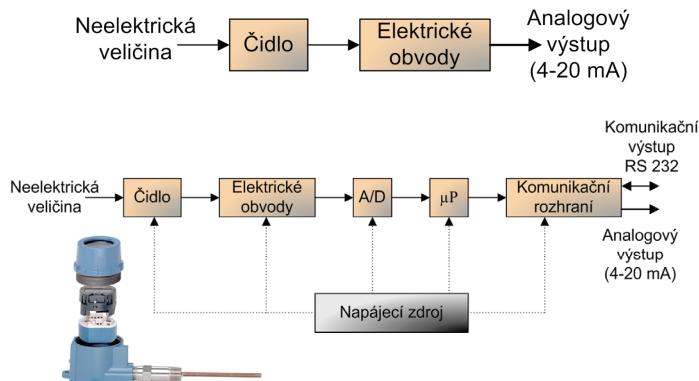
Na této úrovni řízení jsou zastoupeny zařízení sloužící pro sběr dat z technologického procesu a pro výkon řízení technologického procesu, tj. měřicí a akční členy (procesní instrumentace).

Základním prvkem sběru dat ze systému je měřicí řetězec, který se skládá ze senzoru neboli snímače, obvodů pro úpravu signálu, A/D převodníku a mikroprocesoru pro digitální zpracování signálu.

Vstupní část měřicího řetězce tvoří senzor (*obr. 5.2 nahoře*), jehož výstupem je obvykle unifikovaný analogový elektrický signál. Součástí senzoru je čidlo, které představuje citlivou část sledovanou fyzikální veličinu na jinou, nejčastěji elektrickou. Senzory lze rozdělit podle typu měřené veličiny na:

- Analogové senzory sloužící pro měření spojitých veličin (teplota, tlak, průtok, rychlosť, ...). Výstupem senzoru může být normalizovaný proudový signál v rozsahu  $0 \div 20 \text{ mA}$ ,  $4 \div 20 \text{ mA}$  nebo napěťový signál  $\pm 10 \text{ V}$ .
- Binární senzory sloužící pro měření binárních stavů procesu (otevřeno/zavřeno, aktivní/neaktivní, ...). Logická hodnota pak na výstupu odpovídá určité úrovni proudu nebo napětí.
- Inkrementální senzory, které měří přírůstek veličiny pomocí čítání pulsů (množství materiálu na páse).

V současné době se používají také tzv. inteligentní senzory (smart senzor – *obr. 5.2 dole*), které již v sobě zahrnují převod na digitální signál a jeho zpracování pomocí mikroprocesoru. Inteligentní senzor nemusí zahrnovat pouze jedno čidlo, ale mohou zde být čidla pro měření dalších veličin sloužících pro výslednou korekci hlavní měřené veličiny. Inteligentní senzory obsahují komunikační rozhraní, které umožňuje propojovat v rámci sítě. Výhodou tak je, že přenos dat od senzoru k řídicí jednotce subsystému probíhá digitálně po sběrnici a to s již mikroprocesorově zpracovanými a korigovanými naměřenými hodnotami dané veličiny.



Obr. 5.2: Blokové schéma senzoru (nahoře) a inteligentního senzoru (dole)

Akčními členy jsou méně všechny prvky, které jsou určeny k aktivnímu zá-sahu do regulované soustavy technologického procesu na základě zpracované informace. Akční člen mění hodnotu technologické veličiny podle hodnoty výstupu regulátoru.

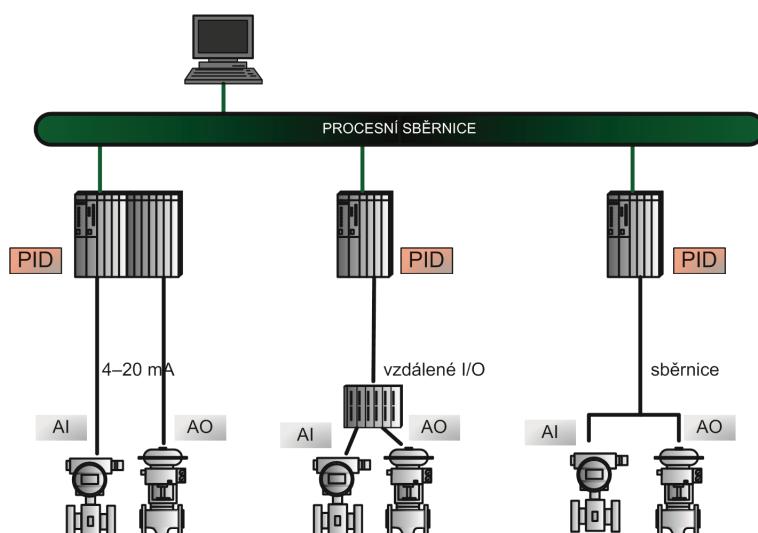
Dnes jsou také akční členy osazovány mikroprocesorovou technikou a před-stavují tak inteligentní prvek s možností komunikace po sběrnici, zpracování dat a implementací řídicích algoritmů.

Akční členy lze rozdělit do dvou kategorií, a to na:

- Spojité akční členy, mezi které patří např. spojité servopohony, frekvenční měniče a jiné spojitě ovládané členy.
- Dvojpolohové akční členy, mezi které patří různá relé, stykače, vypínače, atd.

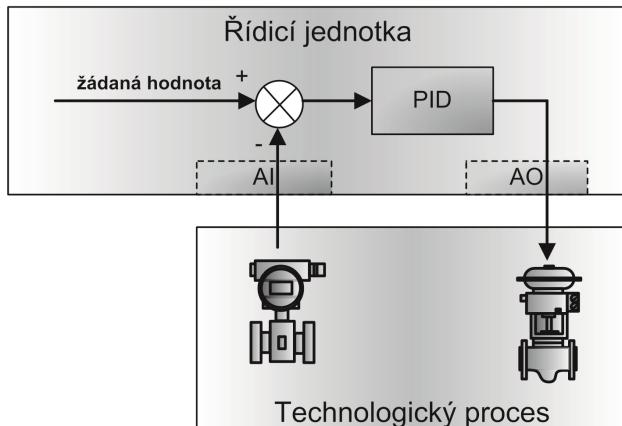
Propojení senzorů a akčních členů s řídící jednotkou procesu může být reali-zováno několika způsoby, viz obr. 5.3:

- Přímé propojení procesní instrumentace s I/O kartami řídící jednotky ana-logovými signály. Toto řešení bylo dříve často používané, jeho nevýhodou je rozsáhlá kabeláž.
- Použití vzdáleného decentralizovaného I/O zařízení příslušně komunikují-cího s řídicím systémem pro připojení vstupních a výstupních signálů, umístěné v bezprostřední blízkosti řízeného technologického zařízení.
- Propojení řídící jednotky a intelligentních snímačů a akčních členů v rámci sběrnice.



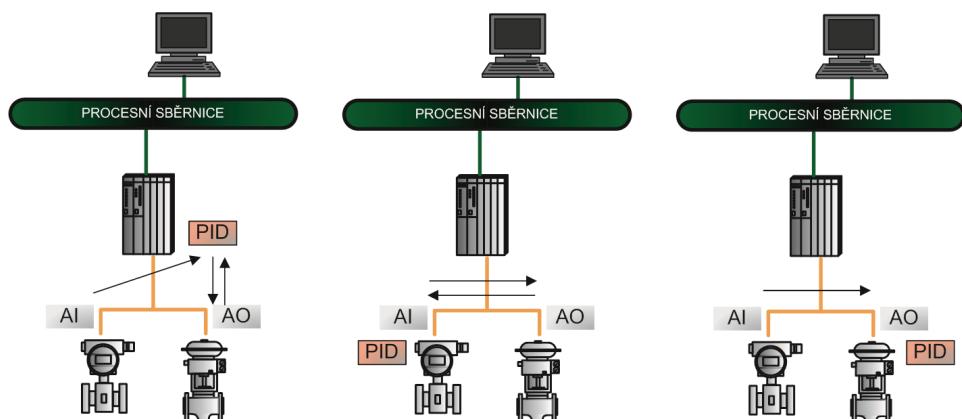
Obr. 5.3: Způsoby propojení senzorů a akčních členů s řídící jednotkou

Akční členy a senzory vytvářejí spolu s PID regulátorem implementovaným v řídicí jednotce regulační zpětnovazebnou smyčku dle obr. 5.4.



Obr. 5.4: Zpětnovazební smyčka řízení s PID regulátorem v řídicí jednotce

S využitím inteligentní procesní instrumentace a sběrnice je dnes možné přenést úlohu zpětnovazebního řízení na nejnižší úroveň do technologického procesu. Řídicí algoritmy jsou vykonávány již v inteligentních snímačích nebo akčních členech začleněných prostřednictvím sběrnice do uzavřené smyčky. To s sebou jednak přináší úsporu kabeláže, ale také zrychlení vykonávání řídicího algoritmu tím, že se omezí počet přenášených dat na sběrnici. Obr. 5.5 ukazuje příklady různých struktur smyček s PID regulátorem, ve které je průtokoměrem řízen regulační ventil. Vidíme, že nejfektivnější je případ umístění PID v rámci regulačního ventilu.



Obr. 5.5: Vliv umístění PID regulátoru v rámci úrovně technolog. procesu

Na této úrovni řízení se používají průmyslové sběrnice typu AS-I, FF, HART, Profibus PA, Profibus DP a další.

### 5.3.2. Úroveň řízení procesu

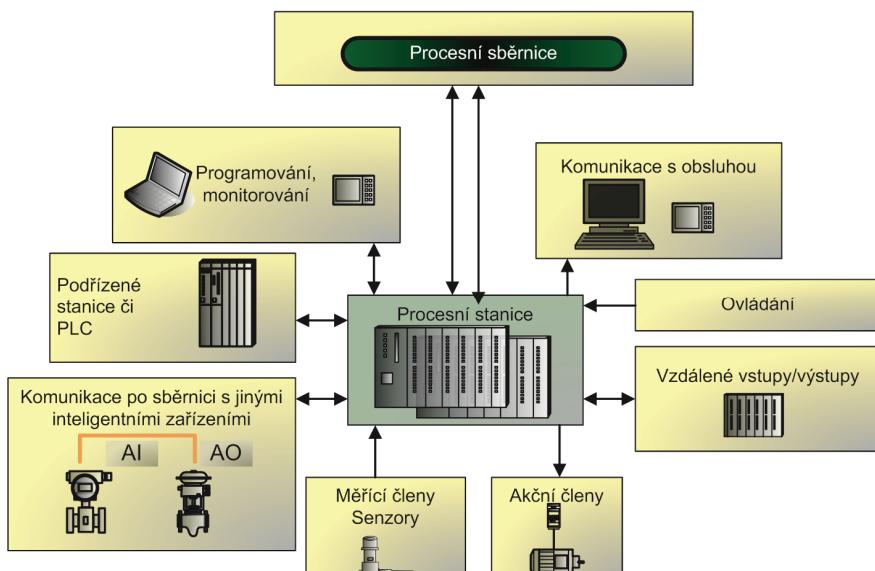
Úroveň řízení procesu charakterizuje procesní sběrnice, v rámci které jsou propojeny jednotlivé procesní stanice a další zařízení. Na tepelné elektrárně mo-

hou být procesními stanicemi řízeny technologické celky jako jsou turbína, kotel, elektro, zauhllování, chemická úprava vody, odsíření, vedlejší elektrárenské procesy a další. Procesní stanice tak vytvářejí samostatně řízené subsystémy.

Procesní stanice jsou vybaveny většinou více procesorovými jednotkami (CPU) z důvodu redundancy. Dále obsahují rozsáhlé jednotky vstupů a výstupů. Pomocí jednotek vstupů získává stanice informace o technologickém procesu z měřicích členů, senzorů. Pomocí jednotek výstupů pak posílá povely k řízení akčních členů. Některé stanice mohou obsahovat inteligentní I/O karty, na kterých jsou již implementovány algoritmy zpětnovazebního řízení, což pak přispívá k odlehčení centrální procesorové jednotky.

Důležitou vlastností procesní stanice je schopnost komunikovat po sběrnici s podřazenými systémy jako jsou vzdálené moduly I/O, inteligentní měřicí a akční členy či jiné stanice nebo PLC. Procesní stanice musí dále obsahovat komunikační rozhraní pro připojení k procesní sběrnici, která zajišťuje komunikaci se souřadnými a nadřazenými systémy, jako jsou jiné procesní stanice či operátorské stanice. Pro procesní sběrnice se využívají průmyslové sítě založené například na průmyslovém ethernetu. Příklad blokového schéma subsystému řízení s procesní stanicí ukazuje obr. 5.6.

Procesní stanice jako systémy pro průmyslové aplikace jsou konstruovány s ohledem na maximální spolehlivost a odolnost proti rušení. Jejich poruchovost bývá zanedbatelná a obvykle je pod úrovni poruchovosti běžných prvků (relé, stykačů, konektorů, svorkovnic, mechanických spínačů, atd.). Systém procesní sběrnice a procesních stanic bývá obvykle redundantní, stejně tak vlastní stanice obsahuje redundantní vnitřní prvky, jako jsou zdvojené CPU, komunikační procesory, I/O moduly a napájecí moduly z důvodu zajištění odpovídající spolehlivosti.

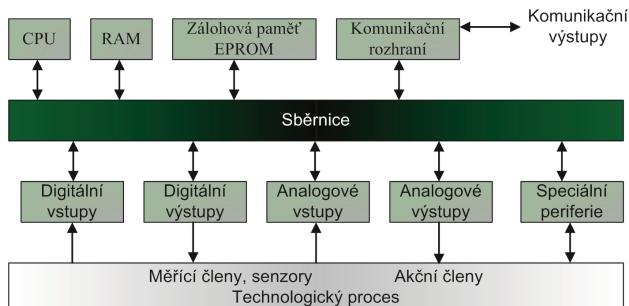


Obr. 5.6: Blokové schéma subsystému s procesní stanicí

Vzhledem k vývoji a výkonnosti PLC je v dnešní době HW struktura PLC a procesní stanice DCS systému obdobná, čemuž odpovídá využívání HW PLC v rámci systémů DCS. Proto rozdíl mezi systémy složenými s PLC a systémy DCS je stále méně dán použitím technických prostředků, ale spíše pohledem na řízení systému buď jako komplexního celku s centrální zprávou provozu, nebo otevřeného systému složeného z jednotlivých více univerzálních částí. Obr. 5.7 ukazuje vnitřní blokovou strukturu programovatelného automatu.

Programovatelný automat tvoří tyto základní prvky:

- Karty binárních vstupů - slouží pro připojení prvků s dvouhodnotovým charakterem signálu např. dvouhodnotové snímače tlaku, teploty, hladiny, dále aktuálního stavu zařízení zapnuto/vypnuto, aktivní/neaktivní, jede/nejede nebo stavu tlačítek, přepínačů, koncových spínačů, atd.
- Karty binárních výstupů - slouží k povelení dvoustavových akčních prvků, např. k buzení cívek relé, stykačů, pneumatických a hydraulických převodníku, k ovládání signálek, atd.
- Karty analogových vstupů – zde se připojují prvky sloužící k měření analogových veličin, např. senzory teploty, tlaku, vlhkosti, hladiny ale i různé inteligentní přístroje s analogovými výstupy.
- Karty analogových výstupů – slouží k ovládání spojitých servopohonů, frekvenčních měničů a jiných spojitev ovládaných akčních členů.
- CPU (Central Processor Unit) – obsahuje mikroprocesor a řadič, které slouží k rychlému vykonávání souboru instrukcí a systémových služeb. Zajišťuje základní komunikační funkce s vlastními i vzdálenými moduly, s nadřízeným systémem a s programovacím zařízením.
- Paměť – obsahuje uživatelské registry, čítače a časovače, komunikační, časové a jiné systémové proměnné. Slouží pro uložení uživatelského programu. Na rozdíl od počítače si PLC při poruše řídicího systému musí pamatovat poslední stav, od něhož po obnovení funkce pokračuje dál v činnosti.
- Komunikační rozhraní – slouží k zajištění komunikace s podsystémy, se souřadnými i nadřízenými systémy, s operátorskými panely a s jinými intelligentními přístroji a jejich sítěmi.



Obr. 5.7: Vnitřní bloková struktura PLC

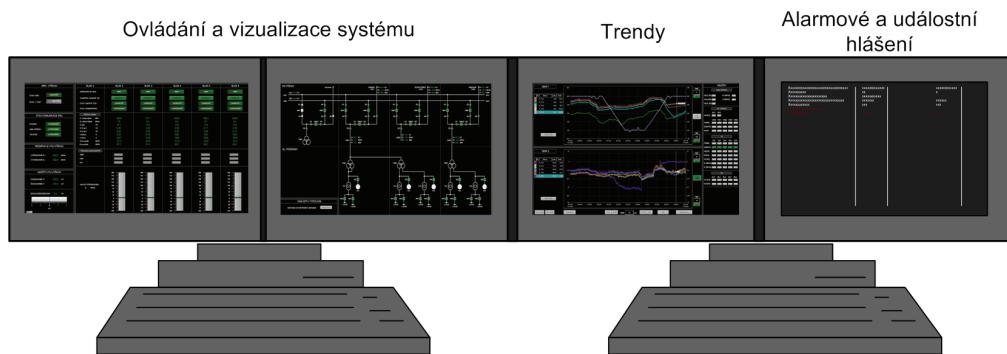
## 5.4. Dohlížecí (operátorská) úroveň

Tato úroveň zajišťuje vizualizaci, řízení, archivaci, servisní dohled a další funkce operátorského řízení celého systému. DCS systémy dříve používaly pro styk s obsluhou výkonné pracovní stanice s grafickými terminály a firemními specializovanými programovými produkty. Dnes se prosazují systémy založené na klasických PC s OS Windows. Pro řízení a vizualizaci technologických procesů v reálném čase se využívá speciální software označovaný SCADA/HMI (Supervisory Control and Data Acquisition / Human Machine Interface). Těchto systémů existuje v současné době celá řada od různých výrobců. Cíle SCADA systémů jsou:

- Vizualizace technologických procesů
- Popis řízeného děje
- Archivace vybraných parametrů řízeného děje
- Sledování a archivace alarmů
- Protokoly o průběhu řízeného děje
- Sledování trendů vybraných parametrů
- Možnost zpětného vyvolání průběhu děje z archívu

Obr. 5.8 ukazuje příklad vizualizace v rámci řídicího systému.

Na této úrovni řízení mohou také být archivační servery a systém údržby, který monitoruje jednotlivé prvky systému z pohledu jejich životnosti a automaticky vyhodnocuje např. servisní prohlídky či výměnu zařízení.



Obr. 5.8: Příklad vizualizace systému

### 5.4.1. Úroveň managementu

V rámci nejvyšší úrovni řízení se přenáší velké objemy dat (MByty) pomocí informačních sítí LAN, WAN. Tyto data slouží pro rozhodování a řízení ekonomiky celé elektrárny v delších časových intervalech. Mohou zde být implementovány vyšší řídicí funkce, které se snaží o optimalizaci a koordinaci procesů.

## 5.5. Komunikace v rámci distribuovaného řídicího systému

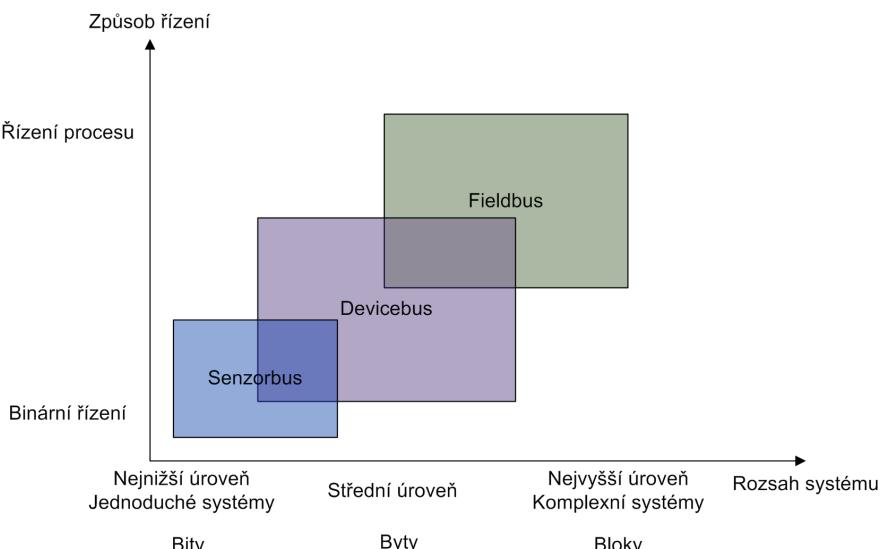
Z předchozího je zřejmé, že na každé úrovni řízení procesu je požadavek na rychlosť prenosu dat a objemu rozdílný. Na nižších úrovňích potřebujeme méně objemný, ale rychlý prenos dat z důvodu řízení procesu v reálném čase. Na vyšších úrovňích je zase naopak nutné přenášet velký objem dat, ale již s delší dobou odezvy. Z tohoto pohledu lze síť v automatizaci rozdělit na:

- Sítě sloužící k prenosu procesních dat – průmyslové (procesní) sítě
- Informační sítě LAN, WAN

### 5.5.1. Sítě pro prenos procesních dat – průmyslové sítě

Průmyslové sítě (sběrnice) se používají k propojení různých typů zařízení na úrovni technologického procesu, úrovni řízení procesu a dohlížecí úrovni, tzn. propojení čidel, akčních prvků, PLC, vizualizace, atd. Průmyslové sběrnice vznikají od 80. let minulého století a vycházejí z koncepce lokálních počítačových sítí. Na průmyslové sběrnice jsou však kladený specifické nároky, jako je nutnost řízení v reálném čase, odolnost proti rušení a spolehlivost prenosu.

Průmyslové sběrnice se dělí podle typu řízení a rozsahu systému do kategorií SenzorBUS, DeviceBUS a FieldBUS, viz obr. 5.9. Jednotlivé kategorie se navzájem překrývají a tak i přiřazení sběrnice dané kategorii není jednoznačné.



Obr. 5.9: Rozdelení průmyslových sběrnic

Na úrovni SenzorBUS se jedná o síť pro komunikaci v reálném čase se senzory a akčními členy (např. AS-I). Sítě používají krátké rámce a jsou velmi rychlé. Na úrovni DeviceBUS se jedná o síť používané na úrovni programovatelných automatů (např. Profibus DP, CAN). Sítě používají delší rámce a umožňují účinně

řídit komplexní procesy v reálném čase. Na úrovni FieldBUS jsou sítě umožňující událostmi řízené služby, objektově orientované přenosy dat a proměnných a funkce pro zprávu sítě (např. Profibus FMP, FIP, Profinet).

V současné době existuje velké množství průmyslových sběrnic od mnoha výrobců a kritériem, podle kterého volit průmyslovou sběrnici, je zejména její použití. Z tohoto hlediska je lze rozdělit na:

- Sběrnice určené pro řízení dynamických procesů v reálném čase (např. Profibus DP)
- Sběrnice určené pro komunikaci s nadřazeným systémem (např. Industrial Ethernet - Profinet)

### 5.5.2. Informační sítě LAN, WAN

LAN (Local Area Network) sítě se používají v rámci vyšších úrovní řízení (dohlížecí úroveň, úroveň managementu) pro přenos většího objemu dat. Jedná se o informační sítě s rozsahem několika km a s minimální přenosovou rychlosťí 1 Mbit/s. Účastníci jsou připojeni přímo a trvale a dovolují sdílení prostředků, jako jsou paměti, tiskárny, atd. Dnes jsou tyto sítě provozovány zejména na základě síťového protokolu TCP/IP a přenosové technologie Ethernet dle IEEE 802.3.

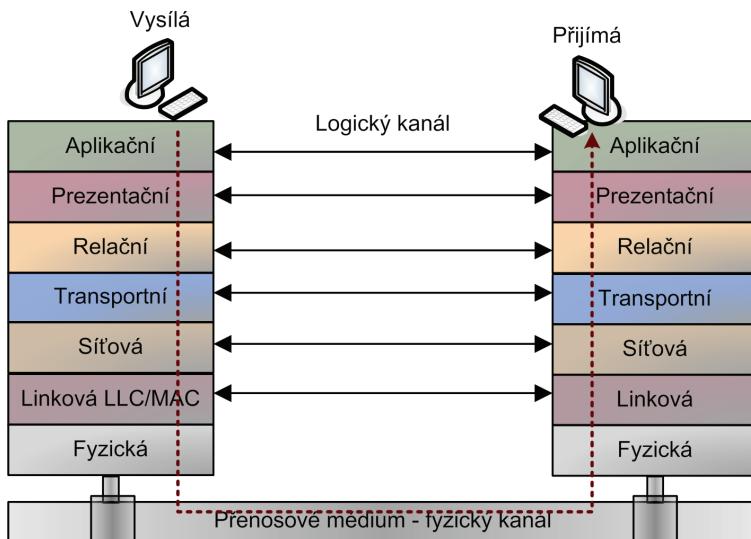
WAN (Wide Area Network) jsou sítě používané na přenos dat na velké vzdálenosti 10x ÷ 100x km s přenosovými rychlosťmi nad 100 Mbit/s využívající přenos po optických vláknech. I zde se do popředí dostává technologie Ethernetu, vzhledem ke své ceně a velké progresi v oblasti přenosových rychlosťí. Dnes jsou již předpoklady pro 100 GBit/s Ethernet.

### 5.5.3. Referenční model ISO/OSI

V rámci snahy o standardizaci komunikace v počítačových sítích vypracovala organizace ISO referenční model pod označením OSI (Open System Interconnection). V roce 1984 byla na základě toho vytvořena mezinárodní norma ISO 7498. Referenční model je sestaven ze sedmi vrstev, které jsou na sobě nezávislé a snadno nahraditelné. Norma nespecifikuje konkrétní realizaci systémů, ale uvádí všeobecné principy sedmivrstvé síťové architektury od fyzického připojení až po přenos dat. Sedm vrstev modelu tvoří:

- Fyzická – zajišťuje fyzický přenos zprávy, definuje přenosové médium, konektory, topologii, kódování atd.
- Linková – uspořádává data z fyzické vrstvy do rámců, stará se o nastavení parametrů přenosu linky, definuje způsob přenášení zpráv v síti a jejich zajištění proti chybám a ztrátě informace.
- Síťová – definuje způsob pohybu datových paketů v síti z hlediska přepojovacích uzelů. Obsahuje funkce, které umožňují překlenout rozdílné vlastnosti technologií v přenosových sítích.
- Transportní – rozklad zpráv do paketů, definuje adresaci zařízení a aplikacích programů v síti.

- Relační – organzuje a synchronizuje dialog mezi spolupracujícími relačními vrstvami obou systémů a řídí výměnu dat mezi nimi.
- Prezentační – transformuje data do přenosové formy, provádí konverzi kódů, kompresi, šifrování dat atd.
- Aplikační – poskytuje přístup aplikací ke komunikačnímu systému, vytváří služby programům komunikujícím prostřednictvím sítě.



Obr. 5.10: Referenční model ISO/OSI

V rámci průmyslových sítí jsou obvykle některé vrstvy spojeny nebo vypuštěny. Obvykle jsou v průmyslových sítích pouze definovány vrstvy **fyzická**, **linková** a **aplikáční**.

#### 5.5.4. Fyzická vrstva

Fyzická vrstva definuje typ přenosového média. Mezi obvyklá média patří:

- Kroucený pár (twisted pair) – pár vzájemně zkroucených vodičů, který může být v provedení stíněném (STP – Shielded Twisted Pair) nebo nestíněném (UTP – Unshielded Twisted Pair). Použití pro přenosové rychlosti do 100 Mbit/s.

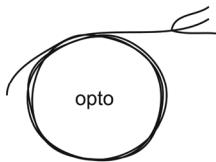


- Koaxiální kabel – skládá se z vnitřního a vnějšího vodiče oddělených dielektrikem. Rušení elektromagnetickým polem je potlačeno stíněním pomocí vnějšího vodiče. Použitelná přenosová rychlosť do 10 Mb/s.

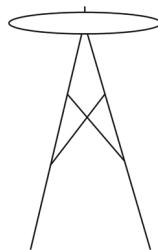


- Optické vlákno – využívá infračervené a viditelné oblasti světelného spektra pro přenos dat. Optická vlákna se dělí na jednovidová a multividová.

Multividová vlákna mají větší průměr jádra, díky čemuž se informace přenáší více vidy a dochází ke zkreslení. Multividová vlákna se dále dělí podle charakteru změny indexu lomu na vlákna se skokovou změnou indexu lomu nebo s proměnou změnou indexu lomu (gradientní vlákna). Multividová vlákna jsou levnější, mají však díky modálnímu rozptylu větší zkreslení signálu a jsou pomalejší oproti jednovidovým. Pro průmyslové aplikace jsou však plně dostačující. Pro multividová vlákna je přenosová rychlosť do 100Mbit/s (2 km), do 10 Gbit/s (500 m) a do 10 Gbit/s (300 m). U jednovidových vláken lze dosáhnout přenosových rychlostí až 26 Tbit/s (50 km). Jednovidová vlákna se používají hlavně v telekomunikacích pro páteřní komunikační síť. Jádra optických vláken mohou být dále plastová (zejména multividová vlákna) nebo skleněná. Velkou výhodou přenosu po optickém vlákně je odolnost proti elektromagnetickému rušení.



- Bezdrátová komunikace – náhrada metalického kabelu nebo optického vlákna bezdrátovým spojem využívající radiový přenos dat. Nevhodné pro aplikace s požadovanou dobou odezvy do 10 ms. Např. bezdrátová komunikační technologie ZigBee (Standard IEEE 802.15.4) využívá frekvenční pásmo 868 MHz, 902 ÷ 928 MHz a 2,4 GHz (pásma ISM – Industrial Scientific Medical) s přenosovou rychlosťí 20, 40 a 250 kbit/s.



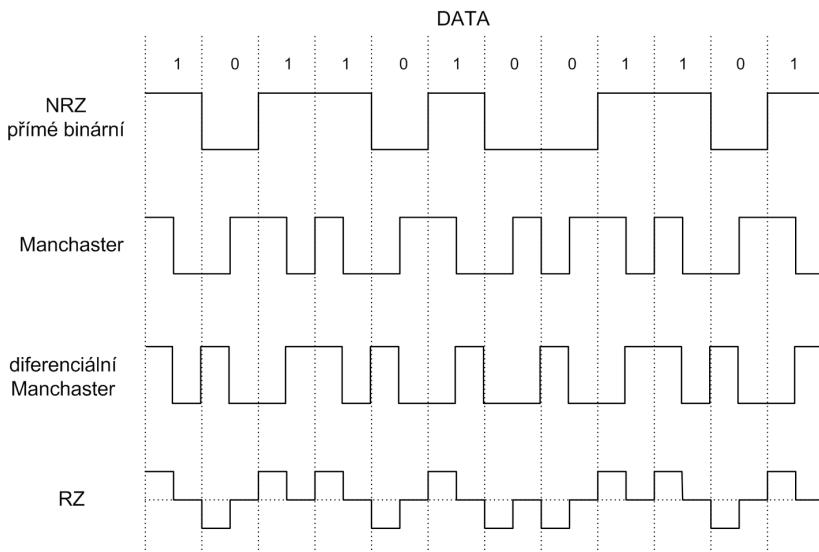
Na úrovni fyzické vrstvy je dále definována interpretace logických úrovní „0“ a „1“ přenášených bitů (úrovňě napětí nebo proudů) a způsob přenosu jednotlivých bitů (kódování). Bity se obvykle přenášejí sériově v čase a každému bitu je vymezen tzv. bitový interval. Přenos bitů může probíhat buď synchronně, nebo asynchronně (aritmeticky).

Při asynchronním znakovém přenosu je na začátku každého znaku vysílán tzv. start bit, který slouží pro synchronizaci hodin na dobu přenosu jednoho znaku. Na konci vysílaného znaku je pak umístěn stopbit. Obr. 5.11 (první nahoře) ukazuje přímé binární kódování užívané pro asynchronní přenos dat, kdy v celém bitovém intervalu je vysílána odpovídající úroveň logického signálu.

Při synchronním přenosu je potřeba udržování synchronizace hodin dlouhoudobě a to buď trvale, nebo alespoň na dobu přenosu různě velkého datového bloku. Nejjednodušším principem je přenos hodinového signálu po speciálním páru vodičů mezi zařízeními. V rozsáhlých aplikacích je toto řešení však velmi nákladné,

a proto se využívá speciálního způsobu kódování, který umožňuje přenos synchronizačního signálu spolu s datovými bity po jednom páru vodičů. Jde o kódování nazývané Manchester nebo diferenciální Manchester.

Kodování Manchester je založeno na principu, že v polovině každého bitového intervalu dojde ke změně hodnoty signálu (bud z „0“ do „1“ nebo z „1“ do „0“). Tato změna pak slouží jako synchronizační signál. Logická hodnota „0“ je pak detekována sestupnou hranou uprostřed bitového intervalu a logická „1“ náběžnou hranou, viz obr. 5.11 (druhý shora). U diferenciálního Manchestera je informace o log „0“ určena přítomností hrany na začátku bitového intervalu (nezáleží na směru – náběžná nebo sestupná). Pokud na začátku intervalu hrana není, je vyhodnocen stav log „1“, a pokud hrana je, pak se vyhodnotí log „0“, viz obr. 5.11 (čtvrtý shora). Dalším způsobem kódování je tzv. RZ (return to zero). Zde se informace o logické úrovni přenáší v první polovině bitového intervalu a v druhé se vrací úroveň na střední hodnotu, viz obr. 5.11 (čtvrtý shora). Při těchto způsobech kódování dochází k dvojnásobným změnám během bitového intervalu.

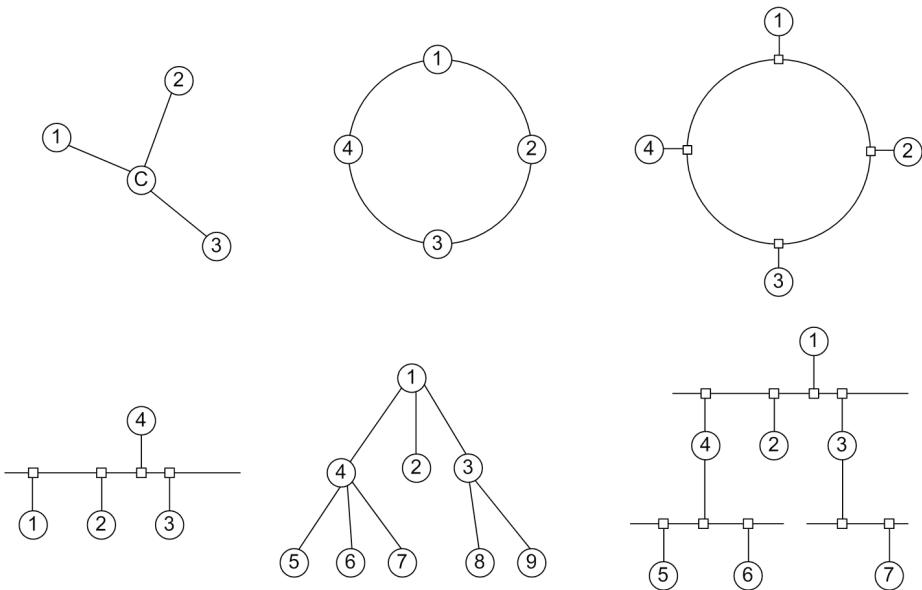


Obr. 5.11: Některé způsoby kódování při přenosu signálu

Dále je fyzickou vrstvou definována topologie sítě, která může být:

- Sběrnicová (BUS)
- Kruhová
- Hvězdicová
- Stromová
- Hybridní – např. víceúrovňová sběrnice

Obr. 5.12 schematicky ukazuje zapojení jednotlivých typů topologie.



Obr. 5.12: Různé topologie sítě

Topologie sítě má své charakteristické rysy, které zohledňují reakci sítě na výpadek stanice nebo části vedení, propustnost sítě (možný vznik kolizí při vysílání více stanic), rozšiřitelnost sítě, náklady na realizaci a rozšiřování sítě, atd. Např. sběrnicová struktura je náchylná na vznik kolizí oproti struktuře kruhové, ale naopak je snadněji rozšiřitelná o další zařízení.

Fyzickou vrstvou jsou dále definovány i další fyzické vlastnosti sběrnice jako vlnový odpor, zakončení, atd.

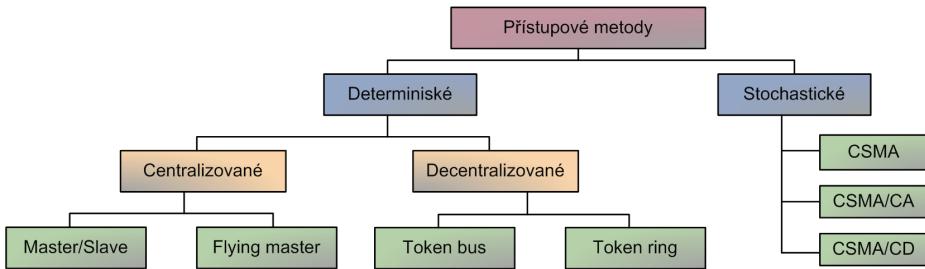
### 5.5.5. Linková vrstva

Původně jednotlivá linková vrstva byla rozdělena na dvě podvrstvy:

- LLC (Logical Link Control) – zajišťuje řízení linkového spoje (synchronizace, spolehlivost – detekce chyb, potvrzování, řízení toku, atd.)
- MAC (Media Acces Control) – zajišťuje přístup ke sdílenému médiu

V rámci podvrstvy MAC se definuje přístup na sběrnici – tzv. přístupová metoda. U sběrnicové struktury vždy vysílá pouze jeden vysílač, proto při větším počtu stanic může být doba čekání na přístup k přenosovému médiu relativně dlouhá. Tento problém řeší různé metody řízení přístupu na sběrnici. Přístup na sběrnici se dělí podle typu použití časového nebo frekvenčního multiplexu. V automatizaci se používá v podstatě pouze časový multiplex, který představuje přidělení komunikačního kanálu jednotlivým zařízením v časovém intervalu. U frekvenčního multiplexu má zařízení přiděleno frekvenční pásmo.

Přístupové metody se dělí na metody náhodného přístupu (stochastické) a definovaného přístupu (deterministické), viz obr. 5.13.



Obr. 5.13: Rozdělení přístupových metod

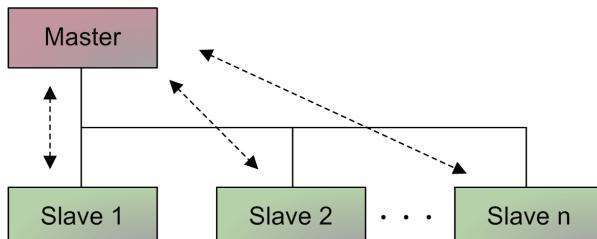
Mezi stochastické přístupové metody patří:

- CSMA – princip přístupu spočívá ve sledování sběrnice a pokud zařízení zjistí, že je volná, začne vysílat. V případě obsazení sběrnice začne vysílat později. Pokud začne vysílat okamžitě po uvolnění linky, jedná se o tzv. persistentní chování, pokud s určitým zpožděním, jedná se o ne-persistentní chování. V případě kolize (současně vysílání více uzlů) tak pokračují ve vysílání a omezují tak přenosovou kapacitu.
- CSMA/CD (Collision Detection) – princip sledování sběrnice je stejný jako u předchozí metody s tím rozdílem, že tyto metody využívají schopnost detekce kolize k ukončení vysílání. V případě kolize tak stanice přestane vysílat a vyšle signál o kolizi ostatním stanicím (jam signál). Vysílání zahájí až po náhodné době.

Obecně metody CSMA nezaručují odvysílání zprávy v konečném čase, což je z pohledu řízení procesu v reálném čase nevhodující. Tyto metody jsou však efektivní v případě nižšího zatížení sběrnice, kdy mají dobré využití přenosové cesty. Metoda CSMA/CD je charakteristická pro Ethernet.

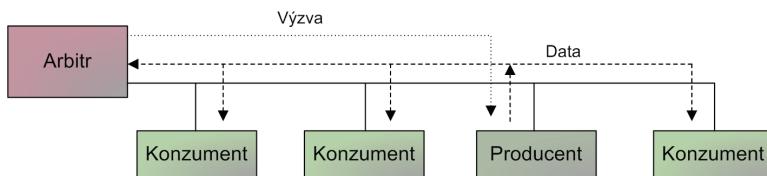
Mezi deterministické přístupové metody patří:

- Master/Slave - na síti existuje jedno zařízení typu Master, které udílí přístupové práva ostatním zařízením typu Slave. Master cyklicky oslovoval zařízení Slave (cyclic polling) a vyzývá je k vysílání dat. Slave smí vyslat zprávu pouze tehdy, když je k tomu vyzván Masterem. Přímý přenos dat mezi zařízení typu Slave není obvykle možný. Přenos dat mezi zařízeními Slave probíhá tak, že Master si vyžádá data o jednoho zařízení (Slave 1) a vzápětí tato data pošle druhému zařízení (Slave 2), viz obr. 5.14.



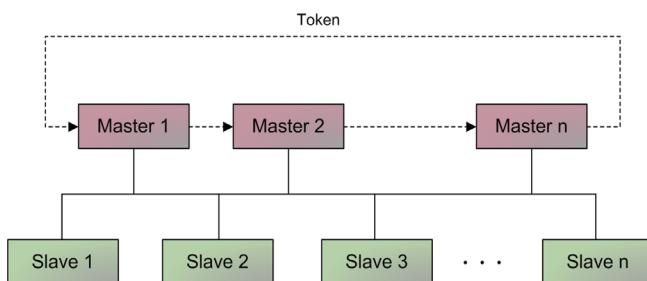
Obr. 5.14: Přístupová metoda - Master/Slave

- Producent/Arbitr/Konzument - komunikace je řízena jednou centrální stanicí (Arbitr). Arbitr posílá výzvu stanici (Producent) k vysílání dat. Producent vyšle data na sběrnici. Všechny stanice na síti mohou data přijmout, rozhodují se na základě identifikátoru zprávy. Odesílatel zprávy obecně nemá informaci o tom, kolik je příjemců zprávy. Na odeslání stejných dat více zařízením je tak nutné vysílání pouze jediné zprávy. Arbitr se může dotazovat cyklicky zájemců o vysílání (cyklicky polling) a může volit různé strategie přidělování dle chování sítě. Žádost o vysílání může poslat i zařízení arbitrovi.

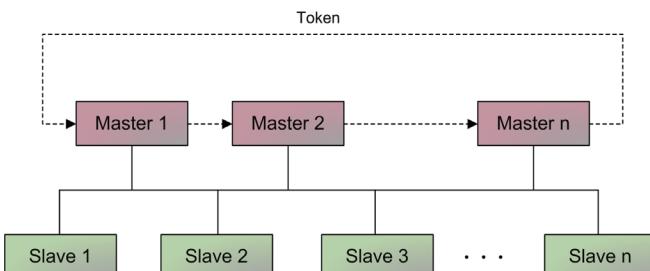


**Obr. 5.15: Přístupová metoda - Producent/Arbitr/Konsument**

- Token Bus - Stanice na síti jsou si rovny (peer to peer). Právo vysílat má ta stanice, která obdrží tzv. token, ostatní stanice přijímají. Token si stanice předávají podle určitých pravidel, např. cyklicky v logickém kruhu (token passing). Doba vysílání jedné stanice je omezena, aby se zabránilo zahlcení sítě. Pokud si každá stanice podrží token na definovanou dobu  $T/n$ , pak lze garantovat odvysílání zprávy do doby  $T$ . Metoda se dá využít při existenci více Masterů, kteří si pak předávají token (využívá např. Profibus DP), viz obr. 5.16 a 5.17.



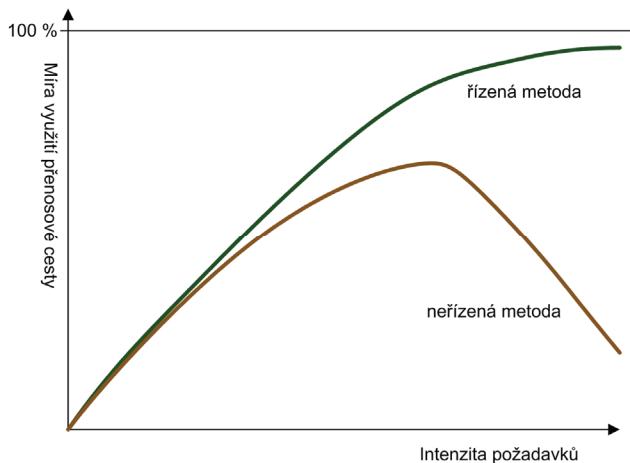
**Obr. 5.16: Přístupová metoda - Token Bus**



**Obr. 5.17: Přístupová metoda - Token Bus v kombinaci s Master/Slave**

- Token Ring - obdobná metoda jako Token Bus, ale s podporou kruhové topologie. Token se předává podle zapojení jednotek ve fyzickém kruhu. Účastník, kterému pověření není určeno, ho pošle dále.

Obr. 5.18 ukazuje rozdíl ve využití přenosové cesty v závislosti na intenzitě žádostí o přístup pro metodu stochastickou (CDMA/CD - Ethernet) a deterministickou (Token ring). Stochastické přístupové metody fungují lépe v menších sítích s nízkým využitím. Řízené metody pak fungují lépe ve větších sítích s větším provozem. U řízených metod je doba odezvy méně závislá na provozu na rozdíl od metod stochastických, kdy při překročení určité limitní hodnoty zátěže roste doba nade všechny meze.



**Obr. 5.18: Využití přenosové cesty v závislosti na typu přístupové metody**

Při přenosu dat může dojít k chybě v přenášených datech. Funkcí linkové vrstvy je proto také detekce chyb, případně oprava poškozených dat.

Toto zajišťují bezpečnostní kódy, které dělíme na dva typy:

- Detekční kódy – umožňují pouze detektovat, že přijatý znak je chybný
- Samoopravné kódy – kromě detekce chyby umožňují i opravu přeneseného znaku, takže jej není nutné přenášet znovu

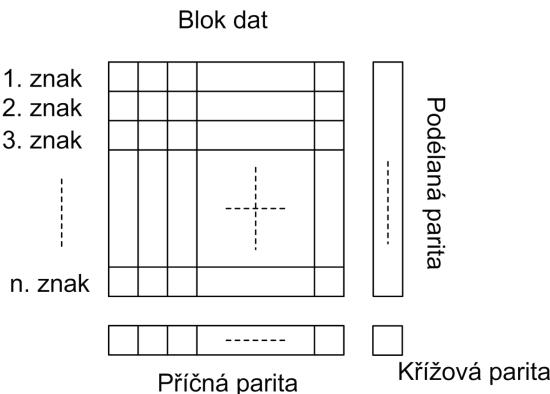
Použití bezpečnostních kódů vždy znamená, že v rámci každého znaku nebo bloku dat přenáší více bitů než je nutné k přenesení dané informace.

K nejjednodušším metodám patří detekce chyb pomocí paritního bitu. Jde o bit, kterým je doplněn přenášený znak nebo blok dat. Jedná-li se o lichou paritu má paritní bit takovou hodnotu, aby součet log „1“ ve znaku byl lichý, pokud jde o sudou paritu, doplňuje se paritní bit takový, aby součet log „1“ ve znaku byl sudý. Tato metoda dokáže detektovat chybu pouze v jednom bytu.

1	0	1	0	1	1	0	1	1	Sudá parita
---	---	---	---	---	---	---	---	---	-------------

**Obr. 5.19: Zabezpečení přenosu - sudá parita**

Efektivnější metodou je detekce chyb pomocí kódu s podélnou a příčnou paritou. Znaky zprávy jsou rozděleny do bloků. Každý znak je zajištěn paritním bitem (podélná parita) a každý sloupec bloku je také zajištěn paritním bitem (příčná parita). Sloupec příčných parit i řádek podélných parit jsou zajištěny další paritou, tzv. křížová parita. Kód dokáže rozlišit chybu až ve 3 bitech.



**Obr. 5.20: Zabezpečení přenosu – podélná a příčná parita**

Dalším detekčním mechanismem dat je použití kontrolního součtu. Jeho podstatou je součet všech znaků bloku v binární reprezentaci v aritmetice modulo  $2^8$  nebo  $2^{16}$ , tj. výsledkem je kontrolní součet o délce jednoho nebo dvou bytů.

K detekci shluků chyb jsou účinné cyklické kódy CRC (Cyclic Redundancy Check). Princip je založen na vlastnostech dělení polynomů. Přenášený blok dat, který představuje koeficienty polynomu, se nejdříve vynásobí stupněm tzv. generujícím polynomem. Tako rozšířený blok dat se vydělí generujícím polynomem. Zbytek po dělení pak tvoří hledaný zabezpečující CRC kód, který se přidá na konec přenášených dat. Příjemací strana pak vezme celá data i s CRC kódem a dělí je generujícím polynomem. Pokud je zbytek po dělení 0, data jsou přenesena bez chyb. Pokud jsou data poškozena, je zbytek po dělení nenulový. CRC kód má obvykle 16 bitů. Pokud příjemce zjistí chybný rámec nebo blok dat, vyžadá si opakování přenosu rámce nebo bloku.

Samoopravné kódy zvětšují redundanci přenášených dat takovým způsobem, aby si příjemce dokázal opravit případné chyby sám. Mezi samoopravné kódy patří např. Hammingův kód, kde se ke každému znaku pomocí určitého algoritmu přidává 5 kontrolních bitů.

Další vlastnosti linkové vrstvy je způsob synchronizace na úrovni rámců. Úkolem je správně rozpoznat, kde rámec končí a kde začíná. Fyzická vrstva přenáší jednotlivé bity a nezná tak žádné hranice rámců. Toto je závislé na způsobu přenosu dat, který může být:

- Znakově orientovaný – přenášená data jsou chápána jako posloupnost znaků o stejném počtu bitů.
- Bitově orientovaný – přenášená data jsou chápána jako posloupnost bitů.

Asynchronní přenos je vždy znakově orientovaný, již fyzická vrstva dokáže rozpoznat začátek a konec každého znaku dle start a stop bitů.

start	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	parita	stop
-------	----	----	----	----	----	----	----	----	--------	------

U synchronního přenosu fyzická vrstva nepozná jednotlivé znaky.

U znakově orientovaného přenosu uvozuje začátek a konec rámce speciální znak STX (Start Of Text), ETX (End Of Text). Jinou možností zjištění konce rámce je údaj o délce rámce obsažený na začátku za znakem STX. Příjemce rozpozná začátek a přečte si délku rámce, kterou odpočítá a sám ukončí.

Problémem zde je rozeznat správně řídicí znaky od dat, a proto se řídicí znaky prefixují znakem DLE. Případný výskyt znaku DLE v datech se řeší jeho zdvojením, viz obr. 5.21. Nevýhodou je, že režie pro zajištění transparence dat, tzn. nutnost vkládání znaků je zde poměrně vysoká.

DLE	STX			DLE	DLE		DLE	ETX
-----	-----	--	--	-----	-----	--	-----	-----

Obr. 5.21: Znakově orientovaný přenos dat

U bitově orientovaných přenosů jsou přenášená data chápána jako posloupnost bitů alespoň pro potřeby detekce začátku a konce rámce. Začátek linkového rámce je indikován speciální posloupností bitů, tzv. křídlovou značkou (flag) začínající obvykle „0“, např. 01100111. Konec může být vymezen opět křídlovou značkou nebo údajem o délce rámce (ten se přenáší hned za úvodní křídlovou značkou). Problém s transparentcí dat se zde řeší vkládáním bitů (bit stuffing). Režie na zajištění transparence metodou vkládání bitů je relativně malá.

10110010101000	011110001010	1010010111001101010
	011110001010	

Obr. 5.22: Bitově orientovaný přenos dat s detekčním okénkem křídlové značky

SDLC (Synchronous Data Link Control) byl první bitově orientovaný protokol, z něhož také vychází protokol HDLC (High-level Data Link Control), který je dnes základem většiny bitově orientovaných protokolů, viz obr. 5.23. Řídicí bity určují druh rámce.

Značka	Adresa	Řídicí bity	Data	CRC	Značka
8 bitů	8/16 bitů	8/16 bitů	0 – 2 <sup>8</sup> –252 znaků	16/32 bitů	8 bitů

Obr. 5.23: HDLC rámec

## 5.5.6. Aplikační vrstva

Účelem této vrstvy je poskytnout aplikacím přístup ke komunikačnímu systému a umožnit tak jejich spolupráci. Mezi příklady aplikací patří: FTP (File Transfer

Protocol), HTTP (Hyper Text Transfer Protocol), Modbus, IMAP (Internet Message Acces Protocol) a mnoho dalších.

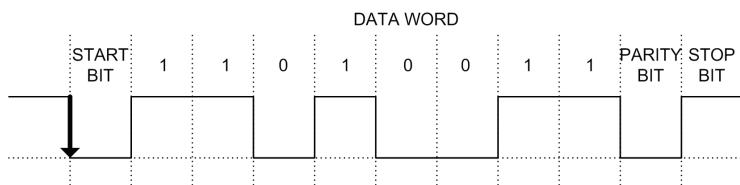
## 5.6. Sériová rozhraní (sběrnice)

Sériová rozhraní RS232, RS422 a RS485 jsou často používaná v průmyslovém prostředí a slouží ke komunikačnímu propojení dvou (RS232) či více zařízení (RS485). Standardy RS232, RS485, RS422 definují pouze, jak přenést sekvenci bitů a nezabývají se již vyššími vrstvami komunikace.

### 5.6.1. Rozhraní RS232

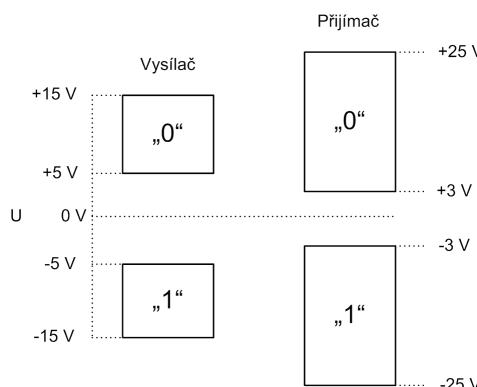
Jedná se o rozhraní, které umožňuje propojení a vzájemnou asynchronní sériovou komunikaci dvou zařízení. V referenčním modelu ISO/OSI představuje pouze fyzickou vrstvu.

Obvykle se přenáší 8 datových bitů doplněných o start bit, stop bit a paritu. Každý přenesený byte konstantní rychlosti je potřeba synchronizovat. K synchronizaci se používá sestupná hrana start bitu, za níž následují posílaná data, viz obr. 5.24.



Obr. 5.24: Struktura přenosového rámce RS232

Logický stav „0/1“ je reprezentován pomocí dvou bipolárních úrovní napětí. Logická „1“ je indikována zápornou úrovní vůči zemi (-3 V až -25 V), zatímco logická „0“ je indikována kladnou úrovní napětí vůči zemi (+3 V až +25 V). Definované rozmezí úrovní napětí vůči zemi pro vysílač a přijímač ukazuje obr. 5.25. Konkrétní velikosti napětí mohou nabývat různých hodnot podle typu zařízení, často se používá úrovňě  $\pm 12$  V.



Obr. 5.25: Definované úrovně napětí pro vyjádření logických stavů RS232

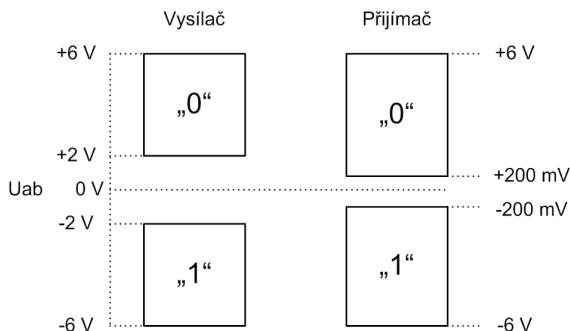
Pro propojení dvou zařízení s rozhraním RS232 v minimální konfiguraci tedy stačí tři vodiče (RxD, TxD, GND). Tyto vodiče mohou být doplněny o další, sloužící k přenosu řídicích signálů (vstupy DCD, DSR, CTS, RI, výstupy DTR, RTS).

Vzhledem k principu přenosu a tím snadné rušitelnosti se tato komunikace používá na maximální vzdálenost cca 30 ÷ 60 m. Je tedy vhodná pro „point to point“ komunikaci lokálních zařízení. Maximální přenosové rychlosti mohou dosahovat 19200 bit/s.

### 5.6.2. Rozhraní (sběrnice) RS485 a RS422

Pro přenos dat na větší vzdálenosti lze použít rozhraní RS422 nebo RS485. Od standardu RS232 se rozhraní RS485 a RS422 liší především jinou definicí napěťových úrovní. Tato rozhraní používají pro každý signál dva vodiče (kroucenou dvojlinku). Logické úrovně jsou reprezentovány rozdílovým napětím mezi oběma vodiči. To je rozdíl oproti RS232, kde jsou úrovně vztaženy k referenční zemi (GND).

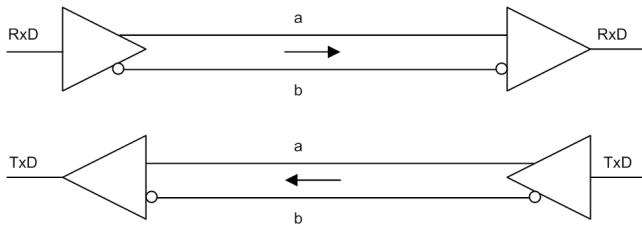
Detecte logického stavu založená na rozdílovém napětí mezi oběma vodiči je výhodná zejména kvůli eliminaci indukovaného rušivého signálu, který se většinou přičítá k oběma vodičům stejně. Přijímač rozlišuje logický stav „1“ při rozdílu napětí menším jak -200 mV. Logický stav „0“ pak při rozdílu napětí větším jak +200 mV. Definované rozmezí rozdílové úrovně napětí pro vysílač a přijímač ukazuje obr. 5.26. Konkrétní úrovně napětí linky RS485 nebo RS422 jsou menší než RS232 a pracují s rozdílovým napětím cca 2 V.



Obr. 5.26: Definované rozdílové úrovně napětí pro vyjádření log. stavů RS485

Přenos na úrovni logických signálů je stejný jako přenos RS232. Jedná se o 8bitový rámc se startbitem, jedním nebo více stopbity a případně i paritním bitem.

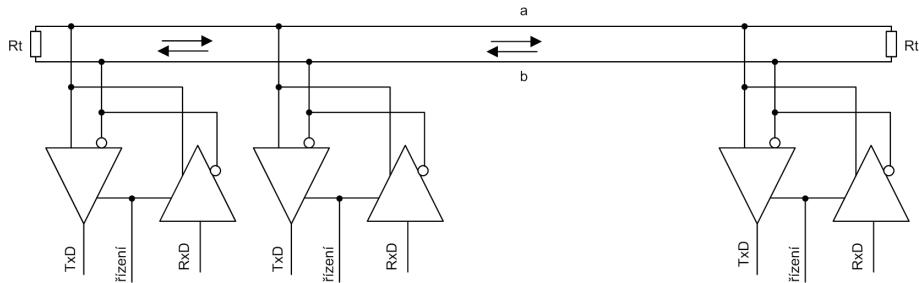
RS422 používá jeden páru vodičů pro signál RxD a druhý pro signál TxD, tzn. že poskytuje plně duplexní přenos. RS422 je určena pro „point to point“ komunikaci obdobně jako RS232 a často se využívá k prodloužení vedení RS232.



Obr. 5.27: Přenos signálů TxD, RxD u RS422, plný duplex

RS485 se používá více pro multpoint komunikaci, což znamená, že na jednom signálovém vedení může být připojeno více zařízení. RS485 existuje ve dvou variantách.

- Nejčastěji používaná dvouvodičová verze. Přenos je poloduplexní, a proto je zde nutné řízení přenosu dat (směru komunikace). Pomocí dvouvodičové linky lze vytvořit komunikační sběrnici, na kterou může být připojeno až 32 zařízení, viz obr. 5.28. Řízení komunikace na sběrnici musí zajistit komunikační protokol, který není součástí standardu RS485 (pozn. Přístupovou metodu na sběrnici definuje linková vrstva).
- Někdy se používá čtyřvodičová verze RS485, která poskytuje plně duplexní (obousměrnou) komunikaci a odpadá tak nutnost řízení směru přenosu dat.



Obr. 5.28: Přenos signálů TxD, RxD u RS485, poloviční duplex

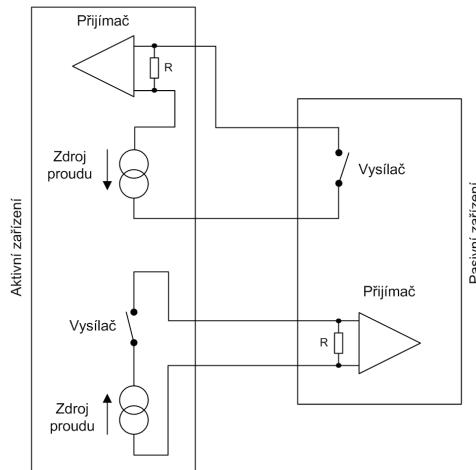
Linky RS422 a RS485 mohou být vedeny až na vzdálenost 1200 m. Maximální přenosové rychlosti mohou dosahovat až 10 Mbit/s.

### 5.6.3. Proudová smyčka

Proudová smyčka patří mezi nejstarší sériová rozhraní používaná v oblasti průmyslové automatizace. Vzhledem k velké odolnosti proti rušení dovoluje přenos na vzdálenosti stovek metrů až jednotek kilometrů.

V praxi se lze setkat se dvěma verzemi proudové smyčky:

- Digitální proudová smyčka – Datový signál je interpretován dvěma proudovými stavami – např. log „0“ odpovídá proud  $0 \div 3$  mA a log „1“ proud  $14 \div 20$  mA. Používaná přenosová rychlosť bývá 19,2 kbit/s.



Obr. 5.29: Proudová smyčka, plný duplex

- Analogová proudová smyčka – Signál ze senzoru je převeden na proud v rozsahu 4 až 20 mA a to tak, že proudu 4 mA odpovídá např. minimální úroveň měřené veličiny a proudu 20 mA pak maximální úroveň měřené veličiny. Takto proudově přenesený signál je pak v přijímači převeden na napěťový a pomocí A/D převodníku dále na digitální signál určený k dalšímu zpracování.

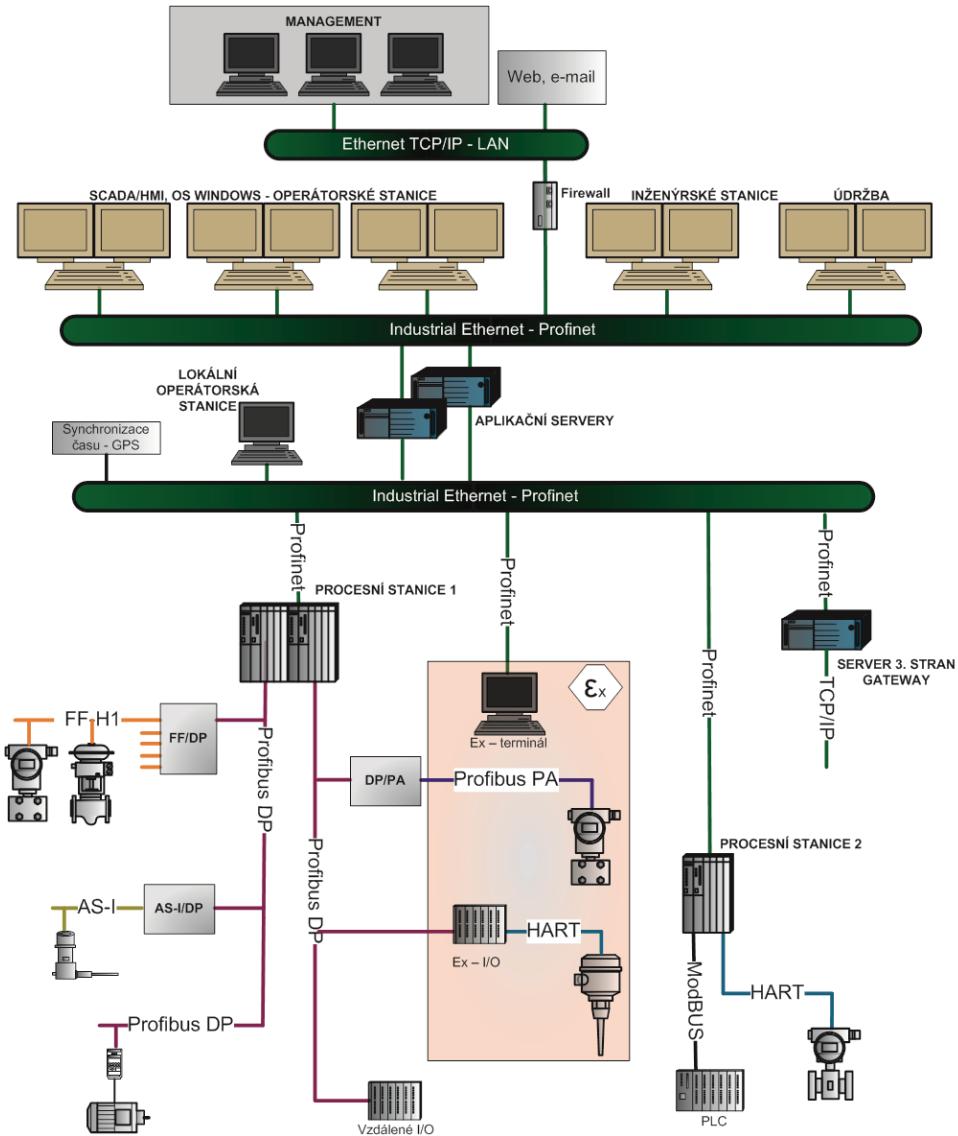
## 5.7. Nejběžnější používané průmyslové sítě (sběrnice)

Vzájemné fyzické propojení více prvků systému zajišťuje sběrnice. Často je pod tímto pojmem označována jak fyzická vrstva (např. RS485 – kroucený dvoudrát), tak vrstva linková. Tvar přenosu dat na sběrnici je specifikován komunikačním rámcem. Po mechanické stránce je sběrnice vybavena konektory uzpůsobenými pro připojení zařízení.

V automatizaci se používá široké množství tzv. průmyslových sběrnic, které definují ve většině případu tři vrstvy modelu ISO/OSI - fyzickou, linkovou a aplikační. Mezi nejznámější průmyslové sběrnice patří:

- Profibus (DP, FMS, PA)
- FF-H1
- BitBus
- ControlNet
- ModBus
- InterBus
- WorldFIP
- LonWorks

- CAN
- HART
- AS-I
- Industrial Ethernet (Profinet)



Obr. 5.30: Použití různých průmyslových sběrnic v rámci distribuovaného systému řízení

## 5.7.1. Profibus

Průmyslová sběrnice Profibus (PROcess Field BUS) je standardizována evropskou normou EN 50170. Historie této sběrnice sahá do počátku 90 let minulého století. Na jejím vzniku se podíleli firmy Bosh, Siemens, Klockner&Müller. Standard Profibus využívá tři vrstvy dle referenčního modelu ISO-OSI – fyzickou, linkovou a aplikační.

V současné době norma definuje tři varianty Profibusu: Profibus DP (Decentralized Peripherals), Profibus FMS (Fieldbus Message Specification) a Profibus PA (Process Automation).

- Profibus DP – jde o rychlou komunikační sběrnici typu Master – Slave. Užívá se zejména pro rychlý přenos signálů z procesu pomocí decentralizovaných periférií a vzdálených IO jednotek. Přenosovým médiem je buď kroucená dvojlinka, nebo optické vlákno s rychlostmi až do 12 Mbit/s.
- Profibus FMS – jedná se o pomalejší komunikaci než předchozí typ (přenosová rychlosť do 500 kbit/s) používanou na vyšší hladině řízení komplexního procesu. Sběrnice více podporuje práci s daty a programy. Přenosové médium je stejné jako u předchozího typu Profibusu.
- Profibus PA – je určen pro řízení procesů na nejnižší úrovni řízení. Charakteristická je implementace v nebezpečných prostředích  $\epsilon_x$ , kde zajišťuje přenos k čidlům a akčním členům. K přenosu využívá proudovou smyčku se stálou rychlosťí komunikace 31,25 kbit/s.

Profibus podporuje následující tři možnosti fyzické vrstvy:

- RS 485 (Profibus DP/FMS), počet účastníků max. 128, telegram délky 11 bitů (8 datových)
- optické vlákno (Profibus DP/FMS) – pomocí převodníků RS485 lze kombinovat optický a metalický rozvod v jedné síti
- proudovou smyčku dle IEC 1158-2 (Profibus PA)

Linková vrstva umožňuje přístupové metody token passing, master-slave nebo hybridní. Pro přenos dat používá Profibus znakově orientované protokoly. Zabezpečení přenosu je u Profibusu FMS a DP iterativním paritním kódem a u Profibusu PA 16 bitovým CRC kódem.

V rámci profibusu FMS existují 4 typy znakově orientovaných datových rámců, viz obr. 5.31.

Rámeček s pevným informačním polem bez datového pole

SD1	DA	SA	FC	FCS	ED
-----	----	----	----	-----	----

Rámeček s pevným informačním polem a datovým polem 8 bytů

SD3	DA	SA	FC	Data - unit	FCS	ED
-----	----	----	----	-------------	-----	----

Rámec s proměnnou délkou informačního pole (Data unit – max. 246 bytů)

SD2	LE	LEr	SD2	DA	SA	FC	Data - unit	FCS	ED
-----	----	-----	-----	----	----	----	-------------	-----	----

Rámec předání tokenu

SD4	DA	SA
-----	----	----

Obr. 5.31: Typy komunikačních rámců Profibus FMS

SD1 .. SD3 (start delimiter) - startovací znak, který také definuje typ rámce

LE, LER (length, repetition of length ) – počet bytů přenášených dat

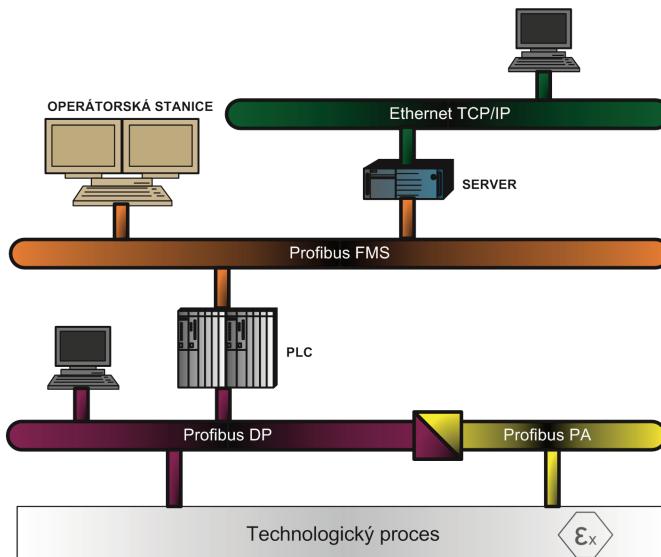
DA (destination address) – cílová adresa

SA (source address) – zdrojová adresa

FC (function code) – kód funkce, který udává, zda jde o výzvu, odpověď nebo zda došlo k chybě

FCS (frame check sequence) – zabezpečovací funkce (partiní kód)

ED (end delimiter) – ukončovací znak



Obr. 5.32: Použití různých variant sběrnice Profibus v rámci DCS

## 5.7.2. MPI (Multi Point Interface)

Jedná se o sběrnici vystavěnou na základě Profibusu, která je zejména určena pro servisní, programovací a datové služby na zařízení. Není určena pro sběr dat z decentrálních periférií. Na síti musí být alespoň jeden Master, který řídí tok dat sítě. Přenosové parametry (vzdálenost, rychlosť, médium) odpovídají sběrnici Profibus DP.

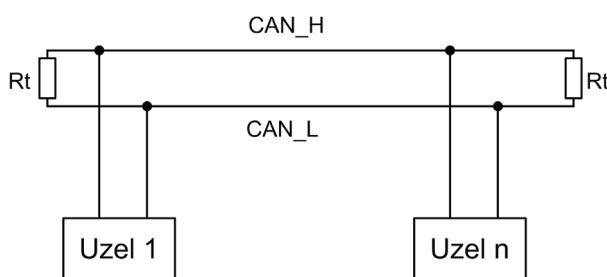
## 5.7.3. CAN

CAN (Controller Area Network) je sériová průmyslová sběrnice, která byla původně vyvinuta firmou Bosch pro automobilový průmysl, kde slouží pro vnitřní komunikační síť senzorů a funkčních jednotek v automobilu. Vzhledem ke své spolehlivosti, vysoké přenosové rychlosti, dostupnosti součástek a nízké ceně se rychle rozšířila do řady průmyslových aplikací.

V současné době má CAN pevné místo mezi průmyslovými sběrnicemi a je definován normou ISO 11898. Tento dokument definuje pouze fyzickou (nepoužívá obvyklé rozhraní RS485) a linkovou vrstvu protokolu podle referenčního modelu ISO/OSI. Nemá definovanou vrstvu aplikační.

CAN tvoří základ pro další průmyslové sběrnice jako je DeviceNet a CANopen, které využívají prvních dvou vrstev komunikačního modelu a definují nad nimi vlastní aplikační objektově orientovanou vrstvu.

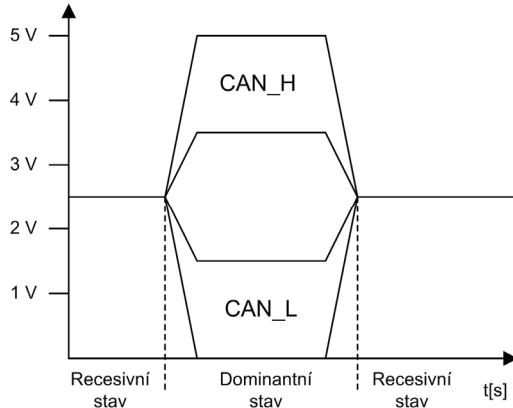
Standard CAN definuje dvě vzájemně komplementární hodnoty bitů na sběrnici - dominant a recessive. Jde o jakýsi zobecnělý ekvivalent logických úrovní, jejichž hodnoty nejsou určeny a skutečná reprezentace záleží na konkrétní realizaci fyzické vrstvy. Pravidla pro stav na sběrnici jsou taková, aby realizovala funkci logického součinu. Vysílá-li všechny uzly sběrnice recessive bit, pak na sběrnici je úroveň recessive. Vysílá-li alespoň jeden uzel dominant bit, je na sběrnici úroveň dominant. Příkladem může být optické vlákno, kde stavu „dominant“ bude odpovídat stav svítí a „recessive“ stav nesvítí.



Obr. 5.33: Struktura sítě CAN

Pro realizaci fyzického přenosového média se nejčastěji používá diferenciální sběrnice definovaná podle normy ISO 11898. Tato norma definuje jednak elektrické vlastnosti vysílacího budiče a přijímače, tak zároveň principy časování, synchronizaci a kódování jednotlivých bitů. Sběrnici tvoří dva vodiče (označované CAN\_H a CAN\_L), kde „dominant“ či „recessive“ úroveň na sběrnici je definována

rozdílovým napětím těchto dvou vodičů. Dle nominálních úrovní uvedených v normě je pro úroveň „recessive“ velikost rozdílového napětí  $V_{diff} = 0$  V a pro úroveň „dominant“  $V_{diff} = 2$  V. Pro eliminaci odrazů na vedení je sběrnice na obou koncích přizpůsobena zakončovacími odpory o velikosti 120  $\Omega$ .



**Obr. 5.34: Úrovň napětí vodičů CAN\_H, CAN\_L ve stavu recessive a dominant**

Ke sběrnici může být teoreticky připojen libovolný počet uzlů, ale prakticky s ohledem na zatížení sběrnice, je počet připojených uzlů podstatně nižší a uvádí se kolem 64 na segment. Rovněž přenosová rychlosť 1 Mbit/s je dosažitelná pouze na krátké vzdálenosti do 40 m a se vzdáleností prudce klesá, takže na 1,2 km činí asi 70 kbit/s. Plyne to z původního posílání sběrnice CAN, která byla určena pro malé vzdálenosti v instalaci automobilů.

Formát datového rámce protokolu CAN je ukázán na obr. 5.35.

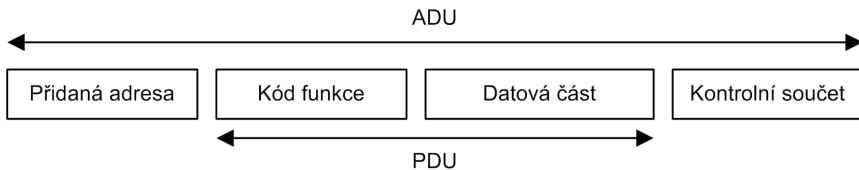
Volná sb.	S O F	Identifikátor zprávy	R T R	R 1	R 0	Délka dat	0 – 8 datových bytů	CRC	E R C	A C K	A C D	Konec rámce	mezera
Volná sb. + zač.		Řezení přístupu na sběrnici				řídící informace	Datová oblast	CRC				Potvrzení + konec zprávy+mezera mezi zprávami	

**Obr. 5.35: Formát datového rámce CAN**

#### 5.7.4. MODBUS

MODBUS je komunikační protokol na úrovni aplikační vrstvy ISO/OSI modelu umožňující komunikaci typu klient-server resp. master - slave mezi zařízeními na různých typech sítí a sběrnic (RS485, Ethernet TCP/IP). Byl vytvořen v roce 1979 firmou MODICON.

MODBUS definuje strukturu protokolu na aplikační úrovni OSI/ISO - PDU (Protocol Data Unit). V závislosti na typu sítě, na které je protokol použit, je PDU rozšířena o další části a tvoří tak zprávu ADU (Application Data Unit).

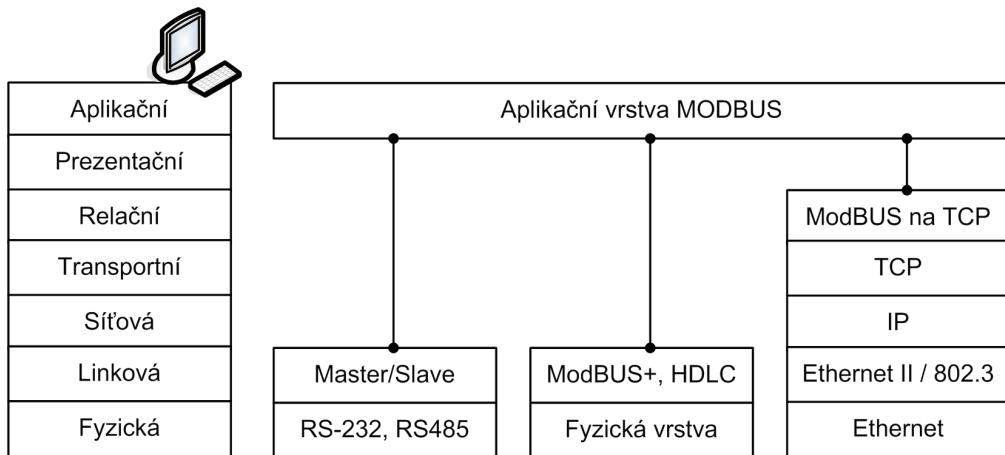


**Obr. 5.36: Základní tvar Modbus zprávy na aplikační úrovni**

Kód funkce v rámci PDU určuje druh akce, která se má s daty vykonat. Obsah datové části zprávy posланé klientem slouží serveru k uskutečnění operace určené kódem funkce. Některým funkcím nemusí být předávána žádná data, v tom případě může datová část ve zprávě zcela chybět. Naopak některé kódy funkcí obsahují i kód podfunkce, který upřesňuje blíže požadovanou operaci. MODBUS protokol definuje tři typy PDU:

- Požadavek (request PDU) – Kód funkce (1 byte), Datová část požadavku (n bytů) – adresa, proměnné, počet proměnných
- Odpověď (response PDU) – Kód funkce (1 byte - kopie z požadavku) - Datová část odpovědi (m bytů) – přečtené
- Záporná odpověď (Exception Response PDU) – 1 byte Kód funkce + 80 h (indikace neúspěchu) - 1 byte Chybový kód (identifikace chyby)

Maximální velikost PDU je 253 bytů. Maximální velikost ADU je 256 bytů. Implementací aplikační vrstvy Modbusu na konkrétní typ sítě byly dále definovány standardy MODBUS na TCP/IP, MODBUS na sériové lince, MODBUS+, viz. obr. 5.37.



**Obr. 5.37: Struktura sítě Modbus dle modelu OSI/ISO**

### 5.7.5. MODBUS Serial Line

MODBUS Serial Line protokol je definován na úrovni fyzické a linkové vrstvy referenčního modelu ISO/OSI. Na fyzické úrovni modelu můžou být použita různá

sériová rozhraní například RS232 nebo RS485 a jejich varianty. MODBUS Serial Line je protokol poskytující komunikaci typu Master/Slave, který umožňuje na linku připojit maximálně jeden Master (řídicí jednotka) a až 247 Slave jednotek (účastnických jednotek). Komunikaci vždy zahajuje Master, Slave nesmí nikdy vysílat data bez pověření Mastera. Master posílá požadavky Slave jednotkám ve dvou režimech:

- Unicast režim – Master adresuje požadavek jedné konkrétní Slave jednotce a ta pošle odpověď.
- Broadcast režim – Master posílá požadavek všem jednotkám, žádná jednotka neodpovídá.

Linková vrstva popisuje mimo komunikace Master/Slave i tzv. přenosový mód (Transmission mode). Ten definuje dva sériové vysílací režimy:

- RTU mód - každý byte ve zprávě obsahuje dva 4bitové hexadecimální znaky. Vysílání je souvislé s mezerou mezi znaky menší než 1,5 znaku. Začátek a konec zprávy je identifikován mezerou delší než 3,5 znaku. V tomto módu je zabezpečení provedeno 16-tibitovým CRC kódem.

Začátek	Adresa	Funkce	Data	CRC	Konec
> 3,5 znaku	8 bitů	8 bitů	N*bitů	16 bitů	> 3,5 znaku

Obr. 5.38: Rámcem zprávy Modbus Serial line RTU

- ASCII mód - každý byte je vyslán jako 2 znaky ASCII. V tomto módu se pro detekci chyby využívá LRC (Longitudinal Redundancy Checking).

Začátek	Adresa	Funkce	Data	LRC	Konec
znak :	2 znaky	2 znaky	0 – 2*252 znaků	2 znaky	2 znaky CR, LF

Obr. 5.39: Rámcem zprávy Modbus Serial line ASCII

## 5.7.6. MODBUS PLUS

Protokol pro linkovou vrstvu OSI vyvinula firma Schneider Automation. Jedná se o otevřený protokol, který definuje komunikaci typu peer-to-peer s výměnou tokenu. Jde tedy o strukturu sítě Token Ring s fyzickým přístupem založeným na přenosové rychlosti 1Mb/s, kdy každá síť podporuje až 64 adresovatelných uzlů (zařízení). Při délce sítě 450 m jich může být až 32. Délku sítě lze prodloužit pomocí opakovače (repeater) až na 1800 m, přičemž minimální délka mezi dvěma uzly je 3 m. Jako fyzického média se využívá stíněného krouceného páru.

## 5.7.7. AS-I

Jedná se o sběrnici používanou na spodní automatizační úrovni. Je vhodná pro síťové spojení binárních snímačů a binárních akčních prvků.

Požívá se zde komunikace typu Master-Slave, k síti je připojeno jedno zařízení Master a ve verzi 2.1 až 62 Slavů. Každý Slave má až 4 binární vstupy a až

4 binární výstupy. Může být tak spojeno až 248 binárních snímačů (vstupů) a 186 akčních binárních prvků (výstupů).

Topologie sítě může být sběrnice, strom, hvězda, kruh. Pro přenos dat se používá nekroucený stíněný dvouvodičový profilovaný kabel, který přenáší jak data, tak napájení 24 Vss. Přenosová rychlosť je 167 kbit/s. Pro 62 stanic typu Slave je cyklus sítě pod 10 ms. Délka sítě je do 100 m (s opakovači do 300 m).

Master zajišťuje inicializaci sítě, identifikaci připojených zařízení, acyklické nastavení parametrů pro všechny Slave, detekci chyb při přenosu dat, cyklické obnovování všech Slave, hledání nových připojených zařízení, přidělování adresy zařízením.

Komunikační rámec tvoří čtyři základní části: výzva Master, pauza Master, odpověď Slave a pauza Slave.

ST	SB	A4	A3	A2	A1	A0	I4	I3	I2	I1	I0	PB	EB	pauza	I3	I2	I1	I0	PB	pauza
Výzva Mastera												pauza Mastera	Odpověď slave				pauza Slave			

Obr. 5.40: Komunikační rámec AS-I

Pro část Master:

ST (start bit) – startovací znak, který také definuje typ rámce

SB – řídicí povel (příkaz nebo výměna dat)

A0 ... A4 – cílová adresa Slave

I0 ... I4 – předávaná informace (data, povel)

PB (parity bit) – bit sudé parity

EB (end bit) – zakončovací bit

Pro část Slave:

ST (start bit) – startovací znak, který také definuje typ rámce

I0 ... I4 – předávaná informace Slave

PB – bit sudé parity

EB (end bit) – zakončovací bit

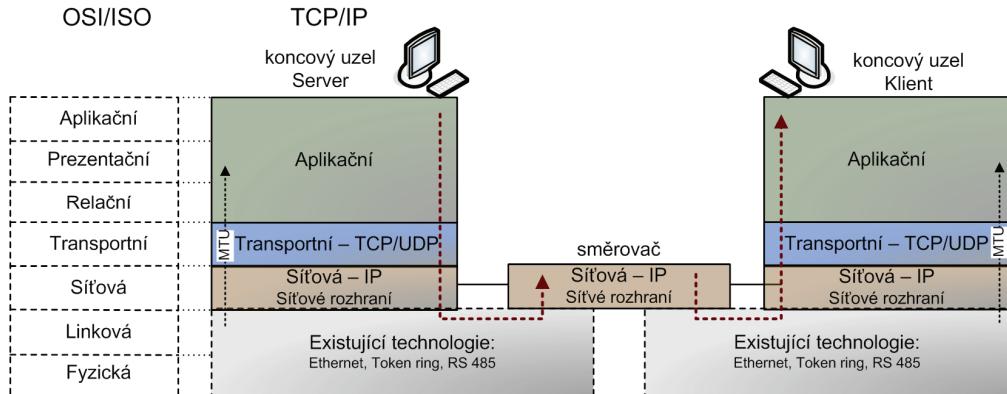
Výhodou je, že běžné připojení snímačů a akčních prvků k IO kartám řízení je nahrazeno tímto systémem. Master ASI je komunikačně propojen s nadřazeným PLC, pro který se chová se jako rozvětvená kabeláž. ASI je komunikačně připojitelný dále na Profibus nebo průmyslový ethernet, CAN-BUS, DeviceNet.

## 5.8. TCP/IP a Ethernet

Ethernet je v informatice souhrnný název nejrozšířenější technologie pro budování sítí typu LAN. Ethernet a jeho síťová rozhraní pracují s takzvanými etherne-tovými rámci, které se používají pro přenos síťových protokolů TCP/IP.

## 5.8.1. Síťový protokol TCP/IP

Architektura síťového protokolu TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) má rozdílnou architekturu a filozofii oproti modelu OSI/ISO.



Obr. 5.41: Architektura síťového protokolu TCP/IP

Záměrem síťového protokolu TCP/IP je umožnění propojení dříve samostatných sítí fungujících na rozdílných linkových technologiích. Filozofií TCP/IP není definování nových přenosových médií a vlastností linkové vrstvy, ale jde mu o využití již stávajících technologií a nad nimi provozování síťového protokolu IP. Protokol IP představuje hlavní prvek architektury TCP/IP a má tyto základní vlastnosti:

- Má všude stejné vlastnosti a všude poskytuje stejné služby
- Má jednotné adresování pomocí virtuální 32bitové IP adresy, která má síťovou část definující síť jako celek a uzlovou část definující uzel v rámci sítě.

TCP/IP předpokládá, že svět je tvořen soustavou dílčích sítí, které jsou mezi sebou propojeny pomocí směrovačů (Gateway, IP Routers). Směrování paketů probíhá nejdříve pomocí síťové části adresy a teprve v rámci sítě podle adresy uzlu. TCP/IP předpokládá dva typy uzlů:

- Hostitelské počítače – jedná se o koncové uzly (servery), různá zařízení (tiskárny). Tyto uzly jsou připojeny jen do jedné IP sítě a mají jen jednu síťovou adresu.
- Směrovače - jsou připojeny nejméně do dvou IP sítí (zajišťují směrování)

Každý uzel má přiřazenou celosvětově unikátní 4bytovou síťovou IP adresu. IP adresa se interpretuje číslem v desítkové soustavě, kdy každému bytu odpovídá jedno desítkové číslo. Čísla se pak při zápisu oddělují tečkou, např. adresa C0 A8 0 5 se interpretuje jako 192.168.0.5.

Naopak IP protocol i ostatní vyšší vrstvy musí respektovat velikost linkového rámce, aby nedocházelo ke zbytečné fragmentaci při přenosech. K tomuto účelu slouží parametr MTU – Maximum Transfer Unit.

Jelikož protocol IP je schopen fungovat nad jakýmkoliv přenosovým mechanismem, vytváří tak jednotné prostředí protokolům vyšších vrstev pro jejich fungování. Transportní vrstva TCP/IP definuje dva protokoly lišící se přístupem k přenosu dat z pohledu spolehlivosti a to TCP a UDP.

- TCP (Transmission Control Protocol) – zajišťuje spojovaný a spolehlivý přenos. Tato metoda se v případě poškození dat postará o nápravu, tzn. vyžádá si nový přenos. S touto metodou je spojena vysoká režie na přenosovou kapacitu, časovou náročnost a dochází tak při ní k neurčitému zpoždění při přenosu. Proto se v automatizaci převážně používá metoda UDP. Dále metoda zajišťuje tzv. spojovaný přenos. Před samotným přenosem dojde k navázání spojení mezi příjemcem a odesílatelem včetně vytvoření trasy přes uzly sítě. Všechna data pak cestují stejnou cestou.
- UDP (User Datagram Protocol) – zajišťuje nespojovaný a nespolehlivý přenos. Tato metoda vyvíjí maximální snahu o korektní přenos dat, ale pokud zjistí, že došlo k chybě, poškození nebo ztrátě dat, nestará se o nápravu (ignoruje špatná data) a pokračuje dál. Metoda předpokládá, že pokud bude náprava zapotřebí, postará se o ni vyšší vrstva. Metoda používá nespojovaný přenos, tzn. že datové pakety jsou přenášeny bez toho, že by se navazovalo jakékoliv spojení s příjemcem. Odesílatel ani nemusí vědět, zda příjemce existuje. Každý paket je přenášen nezávisle a samostatně na ostatních. Metoda je výhodná z pohledu minimální režie, a proto je rychlá a efektivní.

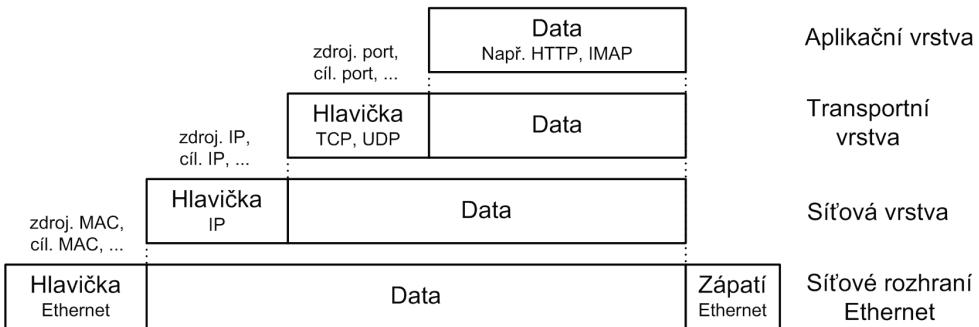
Dalším rozdílem od modelu OSI/ISO je, že TCP/IP nemá samostatné relační a prezenční vrstvy. Filozofie je taková, že prezenční a relační služby budou potřebovat jen některé aplikace, které si je realizují samy. Např. aplikační protokol NFS používá ke své funkci prezenční a relační služby:

- RPC (Remote Procedure Call) pro relační služby
- XDR (eXternal Data Representation) pro prezenční služby

Aplikace v rámci TCP/IP jsou založeny na architektuře Klient-Server. Mezi aplikace TCP/IP patří FTP (přenos souborů), SMTP (elektronická pošta), HTTP (Web), NFS ( sdílení souborů).

Výměna informací mezi vrstvami je přesně definována. Každá vrstva využívá služeb vrstvy nižší a poskytuje své služby vrstvě vyšší. *Obr. 5.42* ukazuje zapouzdření dat v síti TCP/IP v rámci jednotlivých vrstev.

V rámci síťové vrstvy je ještě definována nejnižší vrstva modelu TCP/IP a to vrstva síťového rozhraní, která umožňuje přístup k fyzickému přenosovému médiu. Mezi dnes nejrozšířenější přenosové technologie protokolu TCP/IP na úrovni fyzické a linkové vrstvy dle modelu ISO/OSI patří Ethernet.



Obr. 5.42: Zapouzdření dat v síti TCP/IP

### 5.8.2. Ethernet

První verze Ethernetu byla vyvinuta v roce 1980 firmami DEC, Intel, Xerox jako tzv. DIX Ethernet. DIX Ethernet se dále již příliš nevyvíjel (dnes znám jako Ethernet II). Další vývoj Ethernetu v mírně pozměněné podobě zajišťovala a dodnes zajišťuje pracovní skupina 802.3, která vytváří standardy pro Ethernet pod názvem IEEE 802.3xx. Skupina 802.3 řeší fyzickou a linkovou (pouze část MAC) vrstvu odpovídající modelu OSI/ISO. Existují i další skupiny 802, např. skupina 802.2, která řeší linkovou podvrstvu LLC.

V rámci linkové vrstvy využívá Ethernet tzv. MAC adresy (6 byteů), které jsou pevně zabudovány do jednotlivých adaptérů již při výrobě a jsou celosvětově unikátní. Standardy Ethernetu pak dále definují strukturu MAC rámce, který musí obsahovat adresu příjemce a odesílatele, typ obsahu, zabezpečení, atd. Obecné schéma MAC rámce je ukázáno na obr. 5.43.

Preamble	SFD	MAC adresa cíle	MAC adresa zdroje	Typ paketu/délka	Nákladová část	FCS	Mezera mezi rámci
7 Bytů	1B	6 Bytů	6 Bytů	2 Byty	46 – 1500 Bytů	4 Byty	12 Bytů

Obr. 5.43: Obecné schéma MAC rámce

Preamble – slouží k synchronizaci hodin příjemce, v některých případech má 8 byteů bez SFD

SFD (Start of Frame Delimiter) – označení začátku rámce

Typ paketu/délka – v závislosti na druhu rámce zde může být informace o typu nákladu (tzv. ethertyp) nebo délka rámce (jeho nákladové části)

FCS (Frame Check Sequence) – zabezpečení dat kontrolním součtem

Základním rysem Ethernetu je princip přístupu k přenosovému médiu pomocí přístupové metody CSMA/CD. Tato metoda není deterministická, tzn. nezaručuje žádnému uzlu, že bude moci odvysílat to, co odvysílat chce. Ethernet poskytuje právo vysílat pouze s určitou pravděpodobností, která je vysoká při male zátěži sítě. Proto také jeho použití v automatizaci bez doplňujících funkcí, inovací či opatření není možné.

Nicméně Ethernet patří mezi velmi progresivní komunikační standard, který se stále vyvíjí a výrazně narůstá zejména jeho přenosová rychlosť. Nejnovější varianty již také opouštějí metodu CSMA/CD.

Stručný vývoj přenosových rychlostí Ethernetu:

- 1983 – Ethernet 10 MBit/s (IEEE 802.3)
- 1995 – Fast Ethernet 100 MBit/s (IEEE 802.3u)
- 1998 – Gigabit Ethernet 1000 MBit/s (IEEE 802.3z, IEEE 802.3ab)
- 2003 – Ten Gigabit Ethernet 10 GBit/s (IEEE 802.3ae, IEEE 802.3an)
- 2010 – 40/100 Gigabit Ethernet 40 GBit/s/100Gbit/s (IEEE 802.3ba)
- V současné době vývoj pokračuje dále k terabitové rychlosti

### 5.8.3. Průmyslový Ethernet

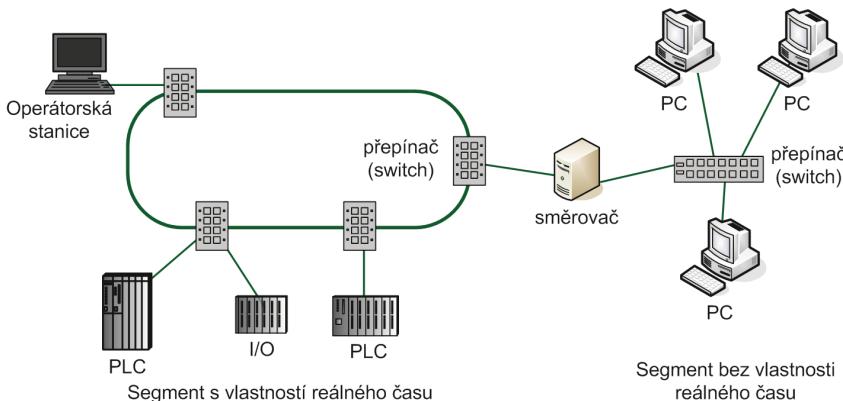
Využití klasického Ethernetu TCP/IP pro použití v automatizaci komplikuje ne-determinismus přístupové metody CSMA/CD. Pro řízení v reálném čase jsou důležité dva aspekty a to:

- Současnost - schopnost korelovaně zpracovávat data z více vstupů v tomtéž časovém horizontu
- Včasnost – striktně požadovaná doba odezvy řídicího systému vzhledem k parametru řízeného procesu

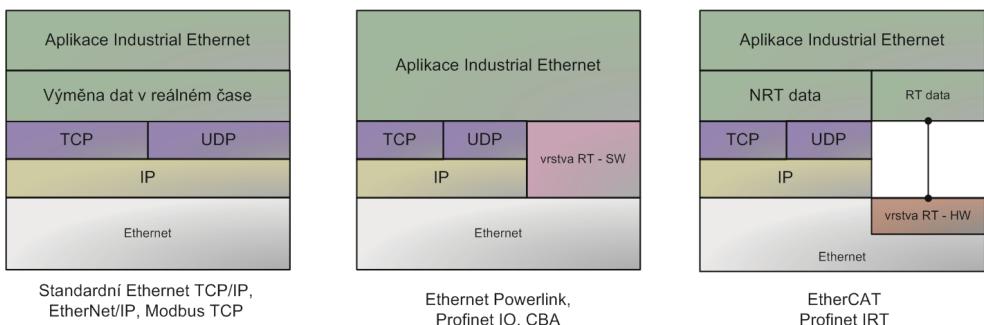
Reálné použití ethernetu v průmyslových aplikacích umožnil až nástup Fast-Ethernetu s přenosovou rychlostí 100 Mbit/s a úpravy topologie sítě. Určitými modifikacemi ethernetu se podařilo dosáhnout vlastností umožňujících řízení v reálném čase. Mezi zmíněné metody modifikace patří:

- Použití přepínačů (switchů), které jsou vybaveny mechanismy ukládání paketů a směrování jen jednomu cílovému účastníkovi
- Rozdelení sítě na segmenty, které jsou časově kritické a časově nekritické. Je efektivní oddělit zprávy vyžadující přenos v reálném čase od ostatních zpráv, které nevyžadují striktně deterministický přenos.
- Vysoká rychlosť přenosu
- Prioritní sloty ve formátu protokolu Ethernetu (802.1p) – pakety označené vyšší prioritou se přenášejí před pakety s nižší prioritou
- Použití UDP místo TCP
- Snížení časového tolerančního pásma protokolem PTP (Precision Time Protokol) - synchronizace účastníků pomocí distribuovaných hodin reálného času

Tyto modifikace klasického Ethernetu daly vznik tzv. průmyslových Ethernetů (Industrial Ethernet). Obr. 5.45 ukazuje tři klasické architektury komunikačních modelů současných variant průmyslových Ethernetů.



Obr. 5.44: Znázornění použití switchů a segmentace sítě



Obr. 5.45: Struktury komunikačních modelů průmyslových Ethernetů

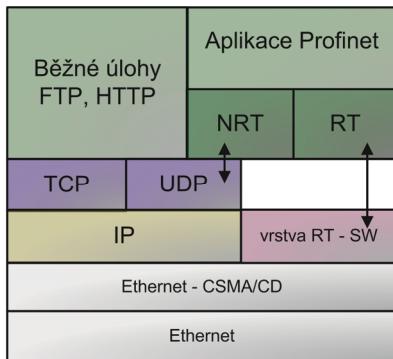
První varianta je založena na klasické struktuře protokolů TCP/UDP/IP, ve které se časově kritická data i časově nekritická data přenášejí stejně. Determinismus se dosahuje prostředky zmíněnými výše.

U druhé a třetí varianty jsou přenášena časově nekritická data standardní cestou TCP/UDP/IP, zatímco časově kritická data obcházejí protokoly TCP/UDP/IP buď SW nebo HW.

#### 5.8.4. Profinet

Profinet je typ průmyslového Ethernetu, který je podporován předními světovými firmami v oblasti automatizace. Profinet má dvě varianty:

- Profinet CBA (Component Based Automation) – určený pro modulární strukturu komunikačního systému z předem připravených komponent
- Profinet I/O (Input/Output) – určený k propojení periferií především v cyklickém režimu komunikace



Obr. 5.46: Struktura Profinetu I/O - RT

Pro přenos dat, které nejsou časově kritická (NRT - Non Real Time), používá Profinet standardní protokol UDP/IP. K adresování uvnitř lokální sítě se využívá MAC adresy, IP adresa se používá ke komunikaci mezi lokálními sítěmi.

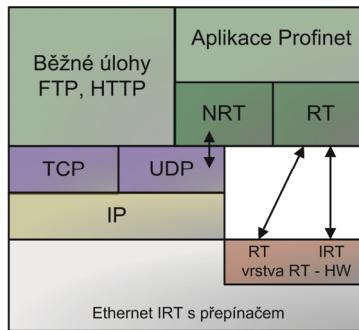
Data určené k řízení v reálném čase (RT) jsou přenášena paralelní cestou obcházející komunikační vrstvy TCP/UDP/IP. Dalšího zvýšení výkonu dosahuje Profinet také díky rychlým přepínačům a oddělením segmentů pracujících v reálném čase od segmentů, které reálný čas nepodporují.

Preamble	SFD	MAC cíle	MAC zdroje	Typ paketu EtherType	VLAN	typ	ID	Uživatelská Data	Počítadlo	Stav dat	Stav	FCS
7 Bytů	1B	6 Bytů	6 Bytů	2 Byt	2 Byt	2 Byt	2 Byt	36 – 1490 Bytů	2 Byt	2 Byt	2 Byt	4 Byt

Obr. 5.47: Struktura rámce RT sítě Profinet

Pokud probíhá komunikace RT uvnitř lokální sítě, používá se pouze etherne-tová vrstva a nepřenáší se tak IP adresa ani požadavky protokolů TCP/UDP. Ve struktuře rámce sítě Profinet je identifikován RT rámec polem EtherType, viz. obr. 5.47. Profinet také využívá určení priority pomocí pole VLAN ve struktuře rámce. Síť s Profinet I/O tak nevyžaduje pro přenos dat v reálném čase s dobou odezvy cca 1 ms speciální HW řešení ethernetovských vrstev.

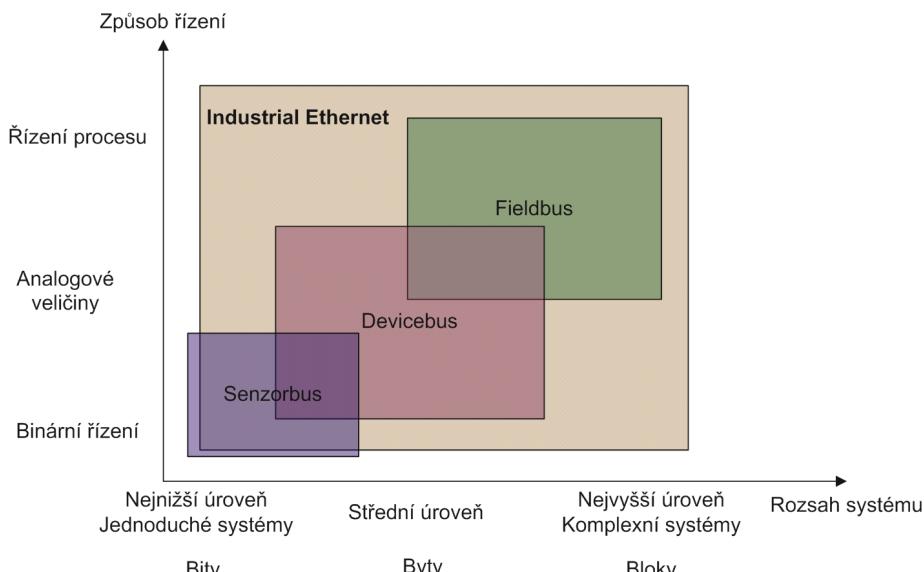
Pokud je vyžadována rychlejší doba odezvy, využívá Profinet tzv. izochronní komunikaci (IRT). Komunikační cyklus je pak rozdělen na fázi IRT a na fázi bez požadavku na deterministický izochronní přenos (RT, TCP/UDP/IP). Režim IRT si nárokuje určitý časový úsek z celkového komunikačního cyklu, ve kterém přizpůsobený přepínač přepíná pouze data IRT na principu bod-bod. Ve fázi IRT přepínač nepřepíná na základě adresy uložené ve zprávě, ale na základě aktuálního času, takže musí být podporována časová synchronizace jednotlivých komunikujících zařízení. V režimu IRT dosahuje síť doby cyklu 250 µs, to však za cenu použití hardwarové realizace ethernetových vrstev. Existují čtyřportové přepínače, které umožňují připojit až čtyři zařízení komunikující v režimu IRT. Komunikační model s vlastní hardwarovou realizací ethernetových vrstev je znázorněn na obr. 5.48.



**Obr. 5.48: Struktura Profinetu IRT**

Využití průmyslového ethernetu se dnes prosazuje hlavně k propojení úrovně řízení procesu a dohlížecí (operátorské) úrovně. Do budoucna však vytváří průmyslový Ethernet velkou konkurenzi průmyslovým sítím (viz obr. 5.49) a to zejména z důvodů, že:

- Je zde kompatibilita s nadřazenými sítěmi LAN (Ethernet TCP/IP)
- Umožňuje již implementaci i na nižších úrovních řízení procesu a práci v reálném čase
- Umožnění sjednocení komunikace na všech úrovních řízení
- Umožňuje levné propojení s PC
- Masové rozšíření Ethernetu a tím nízká cena komponent
- Vysoká a neustále rostoucí rychlosť přenosu



**Obr. 5.49: Industrial Ethernet a průmyslové sběrnice**

## 5.9. Literatura

- [1] Zezulka, F.: Prostředky průmyslové automatizace [online]. Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno, 2002
- [2] Vacátko, J.: Milníky a trendy automatizace technologických procesů [online]. Automa, 2007, č. 2, [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)
- [3] Zezulka, F.: Průmyslový Ethernet IV: Principy průmyslového Ethernetu. Automa, 2007, č. 10, [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)
- [4] Zezulka, F.: Průmyslový Ethernet VIII: Ethernet Powerlink, Profinet. Automa, 2008, č. 5, [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)
- [5] Neuwirth, T.: Modul analogových výstupů s rozhraním Modbus [bakářská práce], Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT Brno, 2009
- [6] Siemens: Řídicí systémy SPPA – T3000 pro energetiku [online]. Automa, 2008, č. 1. [www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)
- [7] Otčenášek, M.: Distribuované řídící systémy a jejich využití v praxi [diplomová práce], VUT Brno, 2008
- [8] Peterka, J.: Počítačové sítě [online]. Přednášky na MFF UK, [www.eearchiv.cz](http://www.eearchiv.cz)

## 6. Budicí systémy generátorů

Vytváří zdroj stejnosměrného proudu pro napájení budicího vinutí synchronního stroje, jehož proud vytváří magnetické pole rotoru. Vazbu mezi mechanickým momentem turbíny na rotoru a momentem elektromagnetického pole statoru zprostředkovává točivé magnetické pole rotoru vznikající otáčením stejnosměrného pole budicího vinutí umístěného na rotoru. Tato vazba je podstatná pro činnost generátoru. Pole budicího vinutí vytváří budicí systém vhodné konfigurace, která vždy obsahuje dvě hlavní části: regulátor a budič.

Základní funkce budicího systému jsou:

- generovat stejnosměrný budicí proud pro napájení budicího vinutí synchronního stroje
- plnit důležité ochranné a řídicí funkce (hlídání mezí budicího proudu, omezovače proudu)

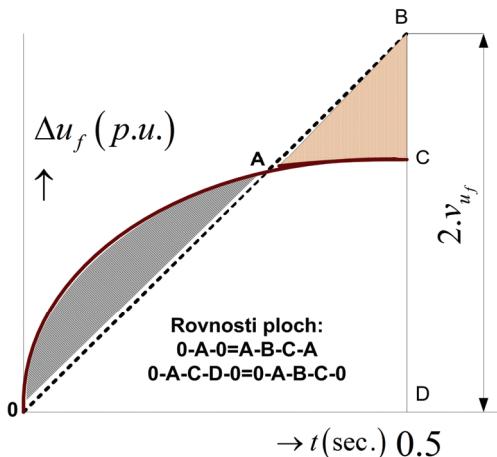
Hlavní složky budicího systému jsou: napájecí zdroje, regulátory, měření, odbozovače.

Hlavní požadavky na budicí systém:

- Provozní spolehlivost lepší než hlavního synchronního stroje
- Spojitá regulace budicího proudu
- Hodnotu poměru  $U_{f\max}/U_{fn} > 1,6$  ( $U_{f\max}$ ...maximální dosažitelná hodnota budicího napětí,  $U_{fn}$ ...budicí napětí pro nominální režim)
- Vysoká hodnota  $v_{u_f} = \frac{1}{2} \int_0^{1/2} \Delta u_f dt$  přechodové charakteristiky změny po-měrného budicího napětí  $u_f$  za  $0,5$  s.  $v_{u_f} > 2$  mají regulátory s rychlou odesvou, hodnoty z rozsahu  $< 0,5 ; 2 >$  patří ke standardu.

Požadavky na regulátory:

- Realizace požadavků primární regulace napětí a rovnoměrného rozdělo-vání jalového výkonu
- Zajištění statické a dynamické stability chodu stroje v ustáleném stavu a poruchách
- Obsluha doplňkových signálů (hlídání mezí podbuzení, systémového stabili-zátoru...)



Obr. 6.1: Znázornění rychlosti buzení

## 6.1. Odbuzovače

Odbuzovač je část budicího systému zajišťující:

- Odpojení budicího systému od napájecího zdroje při odbuzování
- Co nejrychlejší přeměnu elektromagnetické energie budicího vinutí na teplou formu při poruchách, při kterých nelze oddělit generátor od poruchy vypínačem (například poruchy na generátoru nebo blokovém transformátoru)

Požadavky na odbuzovače:

- Vysoká provozní spolehlivost
- Vysoká rychlosť odbuzování
- Dodržení mezí pro přechodná napětí vznikající při odbuzování
- Zajištění reakce na signály ochran a dálkového ovládání

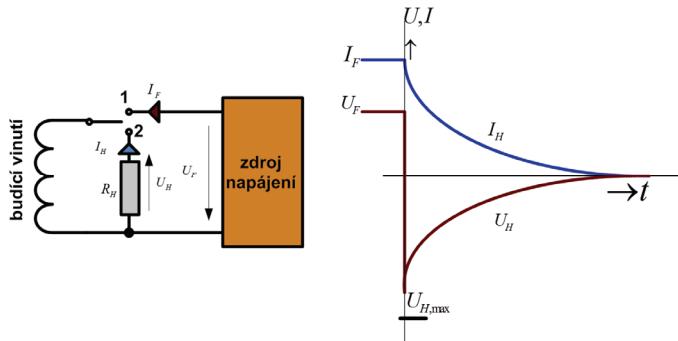
Používají se tři základní principy odbuzování:

- Odbuzovač se zhášecím odporem
- Odbuzovač se zhášecí komorou
- Obrácení polarity napájecího zdroje

### 6.1.1. Odbuzovač se zhášecím odporem

Schéma prezentuje princip přepnutí z provozního napájení, ve kterém je zdrojem budicího proudu napájecí zdroj, na schéma režimu odbuzování, ve kterém je zdrojem energie akumulovaná energie elektromagnetického pole budicího vinutí. Přepnutí odbuzovacího vypínače z polohy 1 do polohy 2 znamená, že budicí vinutí se stává ze spotřebiče zdrojem, který generuje proud odbuzení  $I_H$  vycházející z po-

čáteční hodnoty před odbuzováním (proud na indukčnosti nelze měnit skokem). Napětí na svorkách buzení v procesu odbuzování  $U_H$  má proti chodu jako spotřebič obrácenou polaritu. Aby se dosáhlo co nejkratší doby odbuzení, musí být odbuzovací odpor  $R_H$  co největší, ale takový, aby se nepřekročilo mezní napětí na svorkách dané zhruba hodnotou  $U_{H,\max} \leq 0,7U_{zkuš}$ .

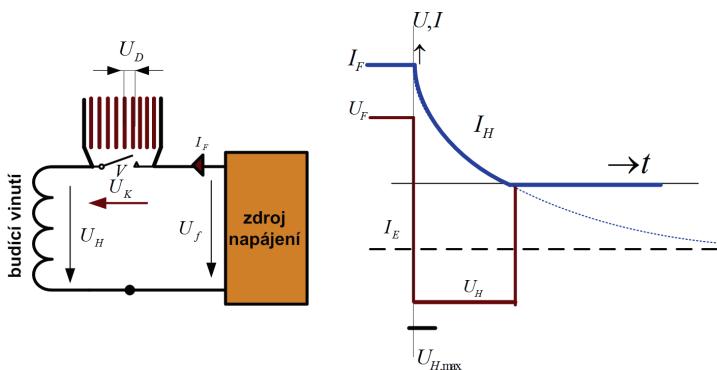


Obr. 6.2: Odbuzovač se zhášecím odporem

### 6.1.2. Odbuzovač se zhášecí komorou

Využívá fyzikálních vlastností krátkého elektrického oblouku konstantní délky ( $2 \div 3$  mm) udržující prakticky konstantní napětí ( $U_D = 25 \div 30$  V) v širokém rozsahu protékajícího proudu. Oblouk vzniklý na opalovacích kontaktech V se při jejich rozpínání vtahuje pomocným magnetickým polem (permanentní magnety) do zhášecí komory tvořené řadou vzájemně izolovaných měděných destiček, jejichž počet zajišťuje nepřekročení napětí  $U_{H,\max}$ . Oblouk je rozdělen na řadu krátkých sériově zapojených oblouků a výsledné napětí na celé komoře zůstává po celý proces (vyjma zhasnutí oblouku) prakticky konstantní a obrácené polarity.

Výsledné napětí na svorkách buzení je tedy konstantní a obrácené polarity. Elektromagnetická energie budiče se mění na tepelnou ohříváním destiček a vzduchu.



Obr. 6.3: Odbuzovač se zhášecí komorou

### 6.1.3. Odbuzení přepólováním zdroje

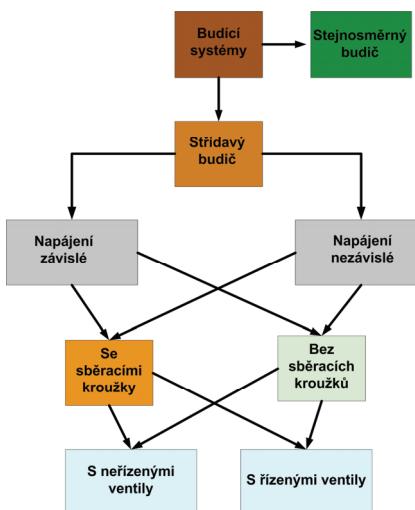
Efektu obrácení polarity napětí na svorkách zdroje se u řízených usměrňovačů dosáhne přechodem do invertorového chodu s podobným průběhem jako u odbozovače se zhášecí komorou.

## 6.2. Budicí obvody

Klasické, ale již překonané, budicí soustavy měly jako napájecí zdroj stejnosměrné dynamo. Toto uspořádání bylo v šedesátých letech minulého století nahrazeno střídavými budiči z důvodu výkonových omezení stejnosměrných dynam prezentovaných v tab. 6.1. Potřebný výkon buzení je až 1 %  $S_n$  u turbostrojů a asi 0.5 % u hydrostrojů.

otáčky (ot/min)	mezní výkon (MW)
3000	0,8
1000	1,2
750	2,5

Tab. 6.1: Mezní výkony stejnosměrných dynam

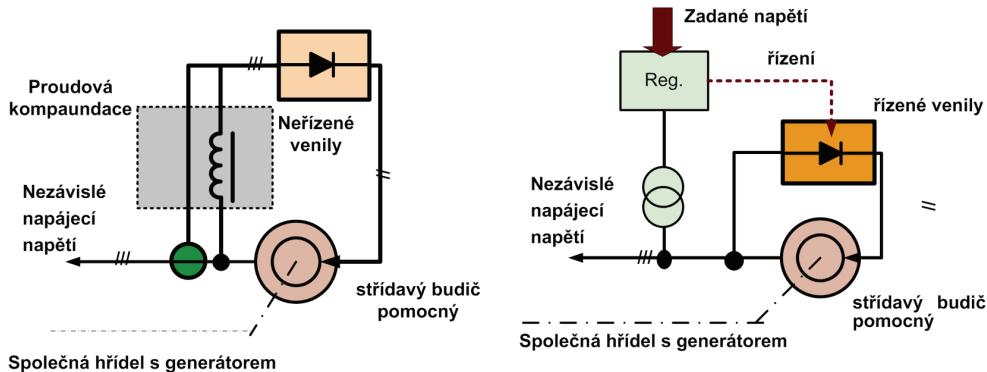


Obr. 6.4: Členění budicích systémů

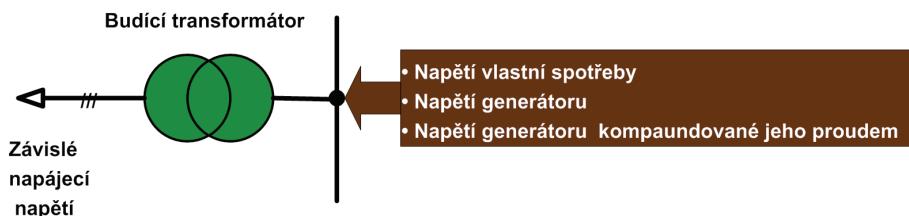
Budicí systémy mohou mít, v závislosti na výkonu generátoru a jeho funkci v energetickém systému, řadu konfigurací. Jejich hlavní členění znázorňuje obr. 6.4.

Přívlastek nezávislé buzení označuje nezávislost buzení na napětí generátoru. Kompaundace buzení označuje proporcionalní závislost složky budicího proudu na proudu statorového vinutí. Tato závislost se dociluje odvozením budicího proudu od proudu generátoru pomocí proudového transformátoru. Závislý budicí systém je napájen ze svorek vlastní spotřeby nebo z výstupu generátoru. Při vzniku externí poruchy, kdy se vyžaduje kvalitní funkce buzení, může dojít k ovlivnění

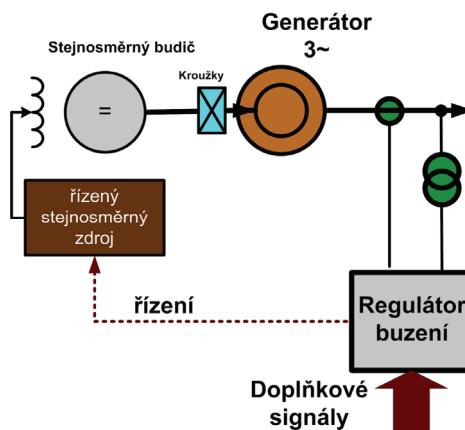
napájecího napětí a tím naopak zhoršení vlastností budicího systému. Nezávislý systém je provozně výhodnější než systém závislý. Příklady konfigurací napájecích zdrojů ukazují obr. 6.5 až 6.7.



Obr. 6.5: Nezávislé napájecí zdroje budicího napětí



Obr. 6.6: Závislé napájecí zdroje budicího napětí



Obr. 6.7: Buzení synchronního stroje stejnosměrným budičem

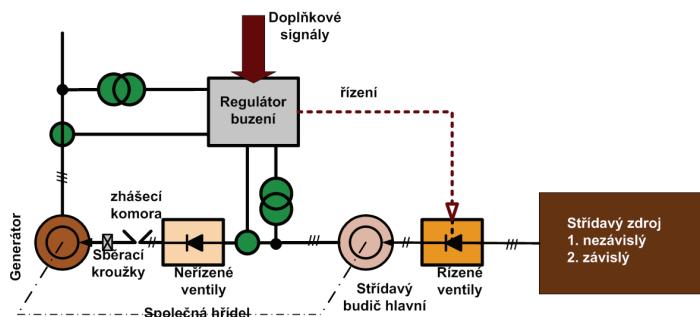
Pro stroje větších výkonů je moderní alternativou použití střídavého budiče. Střídavý budič je pomocný synchronní generátor s různými variantami napájení vlastního budicího vinutí. Transformaci ze střídavého napětí na stejnosměrné realizují řízené a neřízené usměrňovače. Výhodou usměrňovačů s řízenými ventily je

rychlá změna budicího napětí v obou polaritách. Odbuzení je možné provádět přechodem do invertovaného chodu.

Přívlastek statický popisuje situaci, kdy usměrňovač napájející budicí vinutí generátoru, je pevně spojen se statickou částí budicího systému a napájení budicího vinutí je přes kroužky. Rotující usměrňovač je svázán s rotorem stroje a spolu s ním rotuje.

### 6.2.1. Statický systém se střídavým budičem, kroužky a neřízenými ventily

Na společném hřídeli je rotor generátoru, rotor hlavního střídavého budiče (pomocný synchronní generátor) a pomocný střídavý budič. Budicí vinutí generátoru je napájeno přes trojfázovou neřízenou můstkovou soupravu. Budicí vinutí hlavního střídavého budiče je napájeno soupravou řízených ventilů z některého vhodného typu zdroje, na kterém se udržuje konstantní napětí.

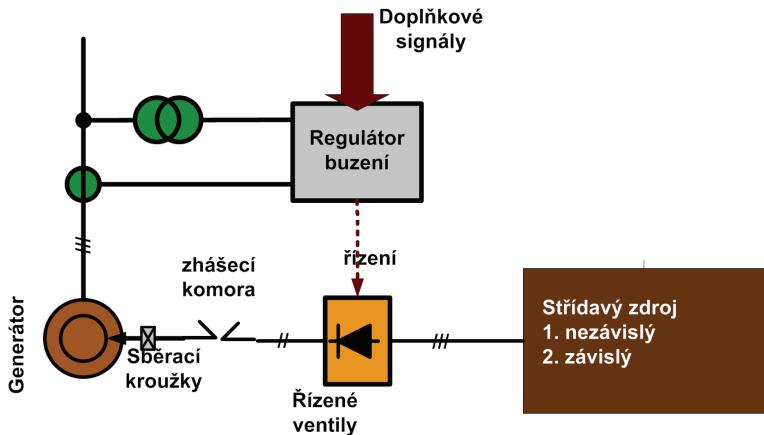


Obr. 6.8: Statický systém se střídavým budičem a neřízenými ventily

Napětí generátoru se reguluje změnou budicího napětí hlavního budiče generovaného soupravou řízených ventilů a ovládanou regulátorem. Regulátor zpracovává pro zvýšení kvality regulace vedle standardních informací o napětí a proudu generátoru také informace o napětí a zatížení budiče. Systém neumožňuje odbuzení změnou polarity a musí se použít odbuzovač například se zhášecí komorou.

### 6.2.2. Statický systém se střídavým budičem, s kroužky a řízenými ventily

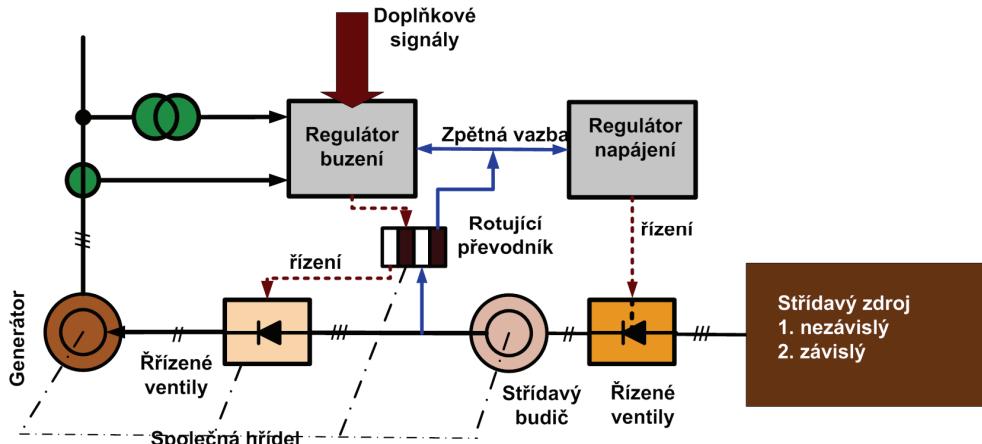
Obr. 6.9 znázorňuje variantu s nezávislým zdrojem konstantního napětí, který doplňuje střídavý generátor s buzením řízeným proudovou kompaundací. Regulátor řídí soupravu řízených ventilů.



Obr. 6.9: Statický budicí systém se střídavým budičem

### **6.2.3. Systém s rotujícími neřízenými ventily, střídavým budičem a bez kroužků**

Systém neobsahuje pohyblivé kontakty, což je docíleno tím, že na hřídeli generátoru je umístěn spolu s budicím vinutím i usměrňovač s napájecím zdrojem. Napájecí zdroj tvoří pomocný střídavý generátor mající stacionární budič a rotující trifázovou kotvu. Napětí generátoru se reguluje buzením statického budiče, což do regulační smyčky zavádí jeho časovou konstantu, která zpomaluje reakci buzení generátoru. Není proto vhodný pro stroje velkého výkonu.

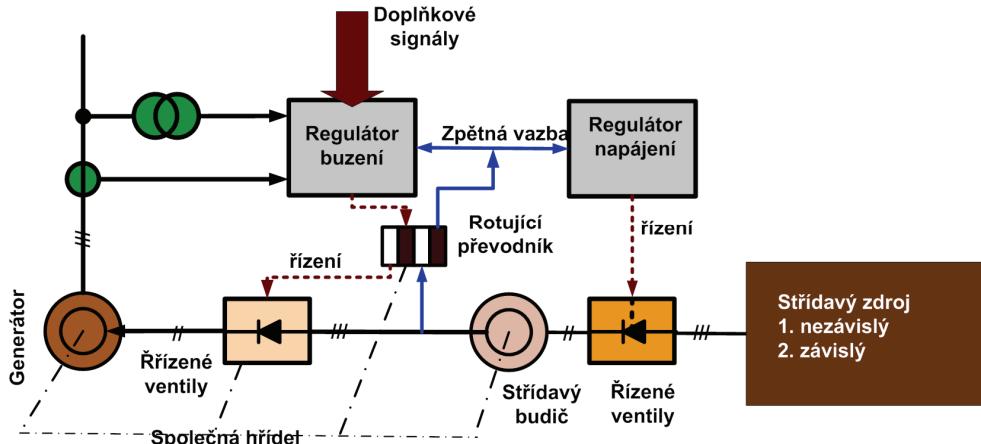


Obr. 6.10: Systém s rotujícími neřízenými ventily, střídavým budičem a bez kroužků

#### 6.2.4. Systém s rotujícími řízenými ventily, střídavým budičem a bez kroužků

Na společném hřídeli je souprava řízených ventilů, rotor střídavého budiče a rotující vícekanálový převodník, který převádí řídicí signály z regulátoru na řízené ventily a zpětnou vazbu o napětí budiče pro regulátory. Odbuzení se provádí invertováním chodu řídicích ventilů.

Výhody systému: vysoká spolehlivost, rychlosť regulace, vysoký strop buzení. Investičně je však nákladnější. Doporučuje se pro generátory vyšších výkonů.

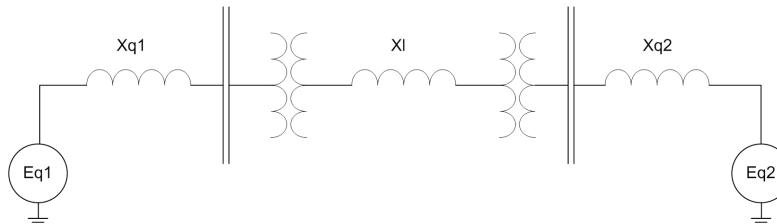


Obr. 6.11: Statický systém se střídavým budičem, bez kroužků a řízenými ventily

#### 6.3. Systémové stabilizátory - PSS

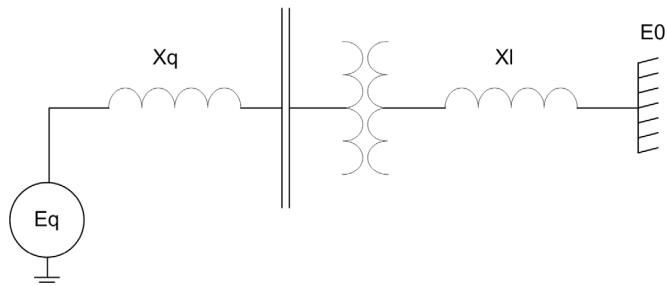
Systémový stabilizátor (Power system stabilizer - PSS) je fázově kompenzační zařízení regulátoru napětí, které má za úkol tlumení oscilací činného výkonu v rámci elektrizační soustavy. Tyto oscilace mohou způsobovat omezení přenosových schopností sítě nebo mohou mít negativní vliv na udržení bezpečného a stabilního provozu sítě. Oscilace lze rozdělit do tří základních skupin:

Systémové oscilace (Inter-Area Oscillation) - představují kývání velkých generátorických oblastí v elektrizační síti vůči sobě. Typicky se vyskytují v rozsahu frekvencí cca  $0,1 \div 0,7$  Hz.



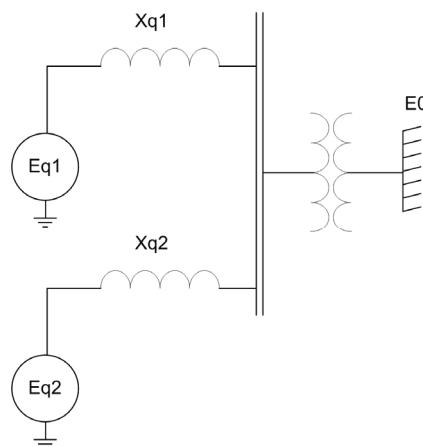
Obr. 6.12: Principiální schéma sítě charakterizující vznik systémových kyvů

Lokální oscilace (Local Mode Oscillation) - představují kývání jednoho nebo více generátorů současně vůči sítí. Frekvence oscilací jsou obvykle v pásmu  $0,7 \div 2$  Hz. Tyto oscilace jsou nejvýraznější u generátorů vybavenými velmi rychlými budicími soupravami (High Initial Response Excitation system), které vytváří v rotoru generátoru značnou složku negativního tlumicího momentu.



Obr. 6.13: Principiální schéma sítě charakterizující vznik lokálních kyvů

Oscilace v rámci jedné lokální generátorické oblasti (Inter-Unit Oscillation) - oscilace vznikají při paralelní práci dvou nebo více strojů jedné elektrárny nebo v rámci blízkých elektráren. Frekvenční pásmo oscilací zde je  $1,5 \div 3$  Hz.



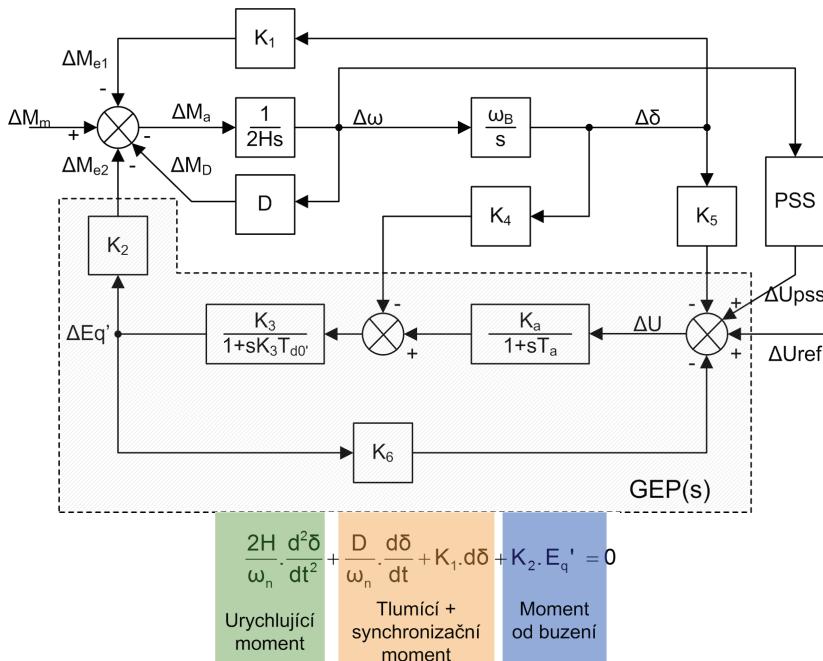
Obr. 6.14: Principiální schéma sítě charakterizující vznik mezi-strojových kmitů

### 6.3.1. Princip PSS

Systémový stabilizátor je součástí regulátoru napětí generátoru, jehož úkolem je vytvořit v rotoru generátoru složku momentu s kladným tlumicím účinkem a to pomocí superponovaného signálu k regulační odchylce regulátoru buzení.

Na obr. 6.15 je schéma jednoduchého linearizovaného dynamického modelu jednostrojového systému s regulátorem napětí pracujícího do sítě. Model vychází z pohybové rovnice uvedené na obr. 6.15 a struktury regulační smyčky napětí ge-

nerátoru. Model platí pro malé odchylinky veličin od rovnovážného stavu a pro konstantní dodávaný mechanický moment na hřídeli.



Obr. 6.15: Linearizovaný dynamický model jednostrojového systému s regulátorem napětí pracující do sítě, pohybová rovnice

Z modelu je vidět, že na rotor působí celkem 4 složky momentu (přesněji odchylinky momentů od rovnovážného stavu):

$\Delta M_D$  ..... tlumící moment převážně vytvářený od indukovaných proudů v tlumicích vinutích (ve fázi s  $\Delta\omega$ )

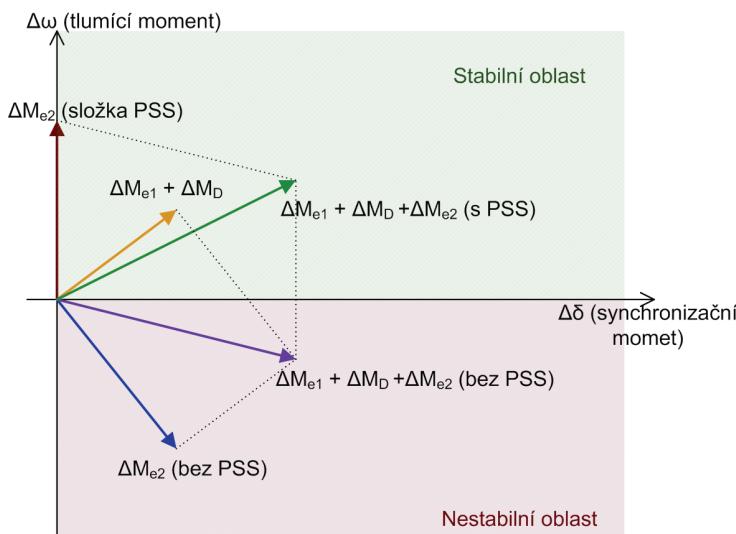
$\Delta M_{e1}$ ..... synchronizační moment (ve fázi s  $\Delta\delta$ )

$\Delta M_m$ ..... mechanický moment (dán turbínou a jejím regulátorem)

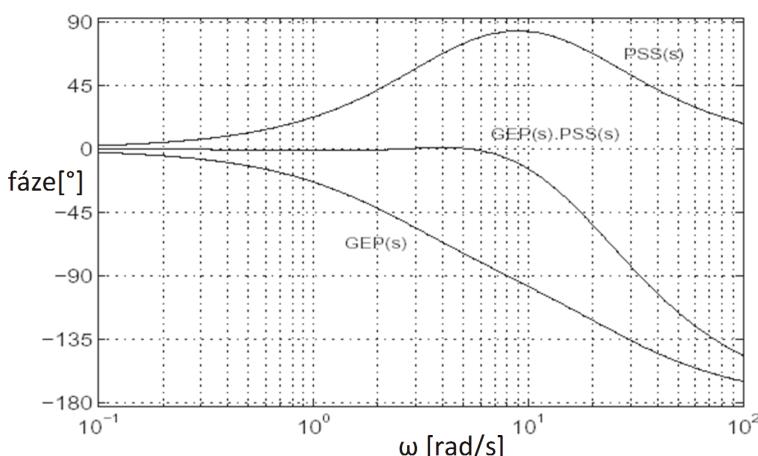
$\Delta M_{e2}$ ..... moment vytvářený vnučeným proudem do budicího vinutí

Jejich součet určuje výsledný akcelerační moment  $\Delta M_a$ . Fázorový diagram složek momentů platný pro velmi rychlé budicí soupravy je zobrazen na obr. 6.16. Žlutě je zobrazen výsledný fázor momentu při konstantním buzení, tzn. bez regulátoru napětí. V tomto případě leží výsledný fázor ve stabilní oblasti. Přidáme-li moment vytvářený budicím proudem od velmi rychlé budicí soupravy (modrý fázor), dostaneme výsledný moment otočený do nestabilní oblasti (fialový fázor). Nyní musíme vytvořit složku momentu s kladným tlumicím účinkem, tj. ve fázi s  $\Delta\omega$  (červený fázor) a to dostatečně velikou, aby se výsledný moment dostal zpět do stabilní oblasti.

Tento požadavek zajišťuje systémový stabilizátor, který injektuje signál do součtového členu regulátoru napětí a přes obvod regulátoru buzení a budicí obvod generátoru vytváří moment v rotoru generátoru. Obvykle je vstupem PSS odchylka otáček  $\Delta\omega$  nebo odchylka činného výkonu  $\Delta P$ . Fázový rozdíl mezi těmito veličinami je  $90^\circ$ . Jelikož musí být, složka momentu od PSS v rotoru generátoru ve fázi s  $\Delta\omega$ , musí PSS vykompenzovat fázové zpoždění od součtového členu regulátoru buzení ke složce momentu  $\Delta M_{e2}$ . Toto fázové zpoždění určuje přenos vyznačený šrafováně na obr. 6.15, který zahrnuje dílčí přenosy BS, budicího obvodu generátoru a parametry soustavy a je označován zkratkou  $GEP(s) = \Delta M_{e2}/\Delta U_{ref}$  (generator + excitation system + power system).



Obr. 6.16: Fázorový diagram složek momentů



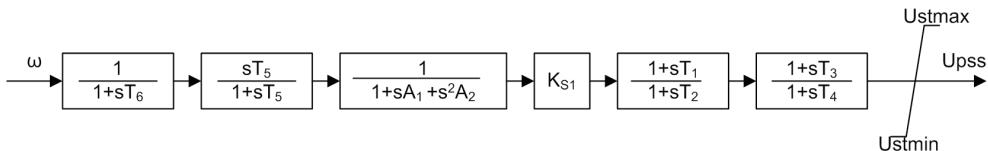
Obr. 6.17: Fázové zpoždění GEP(s), nastavení fázové charakteristiky PSS(s) a výsledné vykompenzování GEP(s), PSS(s)

Obr. 6.17 ukazuje fázové zpoždění GEP ve sledovaném rozsahu kmitočtů a příklad nastavení fázové charakteristiky PSS, která zajišťuje fázový předstih takový, aby výsledné zpoždění od vstupu PSS (tedy od  $\Delta\omega$ ) ke složce momentu  $\Delta M_{e2}$  bylo blízké  $0^\circ$  v požadovaném pásmu frekvencí.

### 6.3.2. Typy PSS

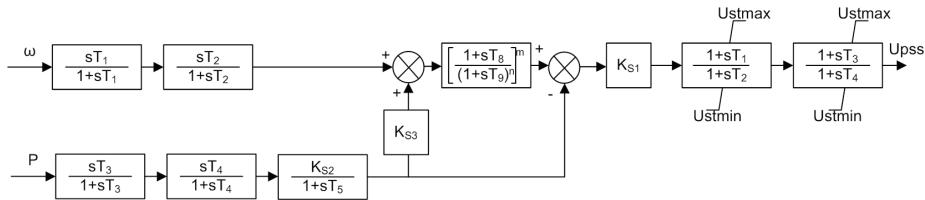
Konstrukční detaily PSS se různí v závislosti na signálu, od kterého se odvozuje stabilizační signál ( $\omega$ ,  $P$ ,  $f$ ,  $I_b$ ) a vnitřní strukturou. Většinu používaných typů PSS lze nalézt včetně modelů ve Std. IEEE 421.5.

PSS1A (jednovstupový, obr. 6.18) - tento PSS odvozuje stabilizační signál od odchylky rotorové rychlosti  $\omega$ . PSS tvoří horní propust sloužící k odstranění ustálené složky signálu, filtr torzních kmitů, dva Lead-Lag členy k zajištění fázové kompenzace PSS a zesílení PSS.



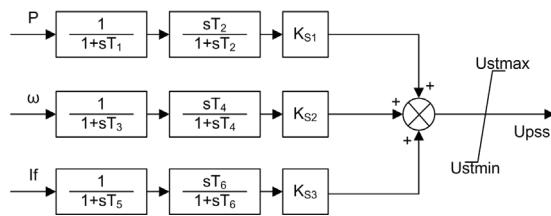
Obr. 6.18: Model PSS1A

PSS2A (dvouvstupový, obr. 6.19) - zdokonalení předcházejícího typu vedlo k návrhu PSS založeného na odvození stabilizačního signálu z integrálu urychlujícího výkonu  $\Delta P_a$ . Jako vstupy jsou použity hodnoty odchylky rotorové rychlosti  $\omega$  a činného výkonu  $P$ . Fázovou kompenzací opět zajišťují dva Lead-Lag členy na výstupu PSS.



Obr. 6.19: Model PSS2A

PSS3B (třívstupový, obr. 6.20) - tento typ PSS využívá pro vytvoření stabilizačního signálu tří vstupních signálů (činný výkon, otáčky, budicí proud). Požadovaná fázová kompenzace se nastavuje změnou zesílení u jednotlivých signálů ( $Ks1$ ,  $Ks2$ ,  $Ks3$ ).



Obr. 6.20: Model PSS3B

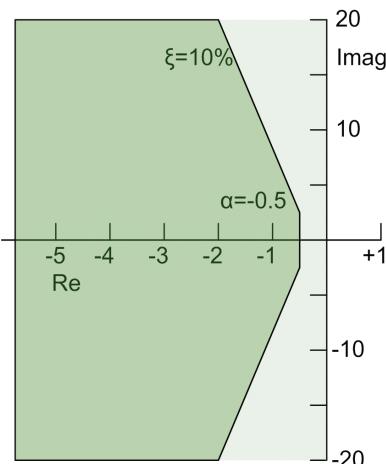
Vývoj v oblasti PSS postupuje dále a objevují se nové typy PSS, mezi které patří adaptivní PSS nebo multipásmové PSS.

### 6.3.3. Metody pro nastavení a ladění PSS

Charakter přenosové funkce  $GEP(s)$  je závislý na velikosti zesílení BS, zatížení generátoru a tvrdosti vnější sítě. Jelikož se provozní podmínky generátoru i sítě průběžně mění, musí nastavení PSS zajistit určitou robustnost.

Většina metod nastavení a ladění PSS je založena na analýze linearizovaného modelu v okolí pracovního bodu. Využívá se vlastnosti geometrické polohy pólů systému v komplexní rovině. Poloha pólů vypovídá nejenom o stabilitě systému, ale i o charakteru regulačního pochodu. Poloha dominantních pólů pak určuje chování systému při přechodném ději a citlivost na určité kmitočty.

Důležitým parametrem při syntéze systému pomocí polohy pólů je relativní tlumení  $\xi$  (poměr reálné a imaginární části pólu). Je vhodným nástrojem pro posouzení rozmístění pólů spojitých systémů. Umožňuje definovat lichoběžníkovou oblast optimálního rozložení pólů, k jejímuž vymezení kromě dvou přímek absolutního tlumení  $\alpha$  patří dvě polopřímky konstantního relativního tlumení  $\xi$  (viz. obr. 6.21).



Obr. 6.21: Definovaná oblast rozložení pólů v komplexní rovině pro požadované relativní tlumení  $\xi$

Optimalizace podle metody relativního tlumení pak spočívá v docílení takového seřízení regulátoru, že všechny dvojice komplexních kořenů leží uvnitř této lichoběžníkové oblasti. Případ robustního nastavení PSS pak představuje, že v této lichoběžníkové oblasti budou ležet všechny kořeny při různých provozních stavech.

Podstatný význam pro analýzu v časové oblasti má převrácená hodnota relativního tlumení, která vyjadřuje počet půlvln přechodové charakteristiky (časová odezva veličiny na skokovou změnu) před dosažením 4 % pásma kmitavé složky odezvy, neboli když obalová exponenciála klesne pod hodnotu přibližně 0,04. V případě PSS se pak definuje praktické kritérium pro ověřování správného nastavení PSS, které stanovuje maximální počet půlvln do zatlumení. Obecně se jako optimální berou 3 půlvlny. Kvalitu regulace lze také posuzovat na průběhu frekvenčních charakteristik.

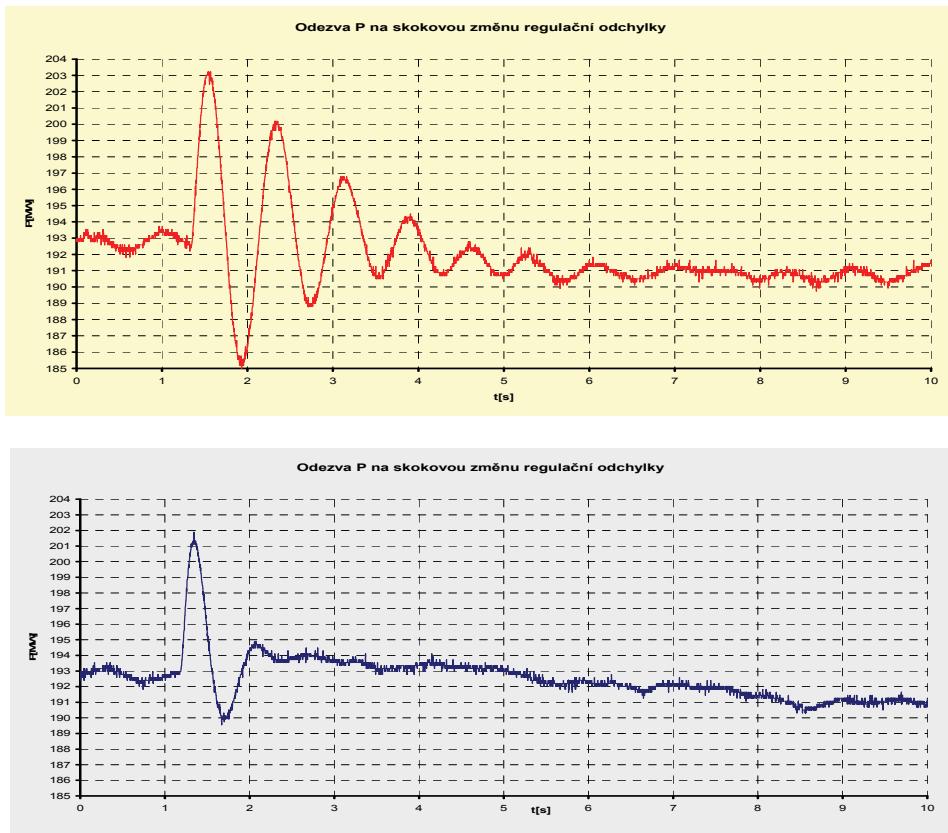
#### 6.3.4. Metody ověřování funkce PSS

Obecně používané měřicí metodiky k ověření PSS jsou dány kodexem PS ČEPS a vycházející ze Std. IEEE 421. Využívají měření v časové a frekvenční oblasti.

V časové oblasti se měří časový průběh veličin jako odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí RB, event. jako odezva na některou změnu v síti. Touto metodou se ověří účinnost tlumení v oblasti lokálních kyvů.

Ve frekvenční oblasti se stanovují frekvenční charakteristiky veličin  $P_g$ ,  $Q_g$ ,  $U_g$  jako odezvy na harmonický signál superponovaný k regulační odchylce regulátoru buzení. Touto metodou lze posoudit vliv tlumení jak v oblasti lokálních kyvů, tak i v oblasti systémových kyvů.

Obr. 6.22 ukazuje srovnání časového průběhu činného výkonu jako odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty napětí při aktivním a neaktivním PSS pro případ velmi rychlé statické budicí soupravy. Z obrázku vidíme velmi účinné tlumení oscilací pomocí PSS.



Obr. 6.22: Srovnání časového průběhu činného výkonu jako odezvy na skokovou změnu žádané hodnoty napětí při aktivním a neaktivním PSS

## 6.4. Literatura

- [1] Klaus Heuck Elektrische Energieversorgung © Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Adolf J. Schwab Elektroenergiesysteme Springer 2007
- [3] P.Kundur. Power System Analysis and Control.Mc.Graw Hill 1999.
- [4] Machowski.Power System Dynamics:Stability and Control. 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] F. Saccomanno.Electric Power System: Analysis and Control.IEEE Press. 2003.
- [6] [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz)
- [7] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)
- [8] Z. Trojánek. Elektrická část elektráren. Skripta ČVUT 1975
- [9] S.Bouček, A.Dočekal. Elektrárny II.Skripta ČVUT 1995

Doc. Ing. Jaroslav Doležal, CSc., doc. Ing. Jiří Šťastný, CSc.,  
Ing. Jan Špetlík, Ph.D., Ing. Stanislav Bouček, Ing. Zbyněk Brettschneider

### **Jaderné a klasické elektrárny**

Vydalo České vysoké učení technické v Praze,

Zikova 1905/4, 166 36 Praha 6

Grafický návrh obálky: Michaela Kubátová Petrová

Vytiskl EUROPRINT, a.s., Pod Kotlářkou 3, 150 00 Praha 5

Počet stran 260

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04936-5