

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

# VÝROBA A UŽITÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

učební text a návody pro řešení projektu

doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.

Ing. Vladimír Král, Ph.D.

Ostrava 2012



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Recenze: [doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký](#)

Název: výroba a užití elektrické energie  
Autoři: [Radomír Goňo, Vladimír Král](#)  
Vydání: první, 2012  
Počet stran: 212  
Náklad: 100

Studijní materiály pro studijní obor [Měřicí a řídicí technika fakulty Elektrotechniky a informatiky](#)

Jazyková korektura: nebyla provedena.

**Určeno pro projekt:**

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost

Název: Inovace oboru Měřicí a řídicí technika na FEI, VŠB - TU Ostrava

Číslo: CZ.1.07/2.2.00/15.0113

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© [Radomír Goňo, Vladimír Král](#)

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

## POKYNY KE STUDIU

Pro projektovou výuku oboru Měřicí a řídicí technika jste obdrželi studijní balík obsahující

- integrované skriptum projektové výuky obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovou animací a videem vybraných částí návodů
- harmonogram průběhu projektové výuky
- rozdělení studentů a jejich rolí při řešení projektu s kontakty na tutorý
- kontakt na studijní oddělení

### Prerekvizity

Předmět nemá žádné prerekvizity.

### Cílem projektové výuky

je seznámení se základními pojmy výroby elektrické energie a její přeměny na teplo a světlo. Po prostudování modulu by měl student být schopen vysvětlit základní postupy výpočtů příkladů, tyto aplikovat na složitější problémy a diskutovat dosažené výsledky z oblasti základů elektroenergetiky.

### Pro koho je projektová výuka určena

Projektová výuka je zařazena do bakalářského studia oborů Aplikovaná a komerční elektronika, Biomedicínský technik, Elektroenergetika a Měřicí a řídicí technika studijního programu Elektrotechnika, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

### Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



#### ČAS KE STUDIU: XX HODIN

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia výukových podkladů a návodů projektové výuky či některé kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s popisovanou problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



## VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animaci a video.



## SHRNUTÍ POJMŮ 1.1

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



## Otázky 1.1.

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



## Úlohy k řešení 1.1.

Protože většina teoretických pojmů této projektové výuky má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je postupně popsáno jak aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací.



## KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné zvládnutí projektové výuky s těmito výukovými podklady a návody Vám přejí autoři výukového materiálu

Radomír Goňo a Vladimír Král

## 1. ÚVOD



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat energetickou situaci ČR
- vysvětlit složení ceny elektrické energie



### VÝKLAD

Elektrizační soustava (ES) hraje v naší moderní společnosti velice významnou roli a denně ovlivňuje prakticky každého člověka. ES transformují různé druhy energií na elektrickou a dodávají ji různým typům odběratelů. ES se skládá ze tří hlavních částí: výroba, přenos a distribuce.

Česká energetika prochází v posledních letech výraznými strukturálními změnami. Ty jsou vyvolány jednak pokračující liberalizací domácí energetiky a jednak postupujícím evropským integračním procesem na kontinentu a naším členstvím v Evropské unii. Vedle domácích faktorů vývoje je rozhodování společností stále častěji ovlivňováno právě evropskou legislativou. V současnosti tak žádná společnost nemůže být úspěšná a rentabilní, aniž by komplexně nesledovala své blízké i vzdálenější okolí.

V České republice se ročně vyrobí přibližně 90 TWh elektrické energie. Instalovaný výkon elektráren v ČR je 20 GW. Tepelné elektrárny na fosilní paliva, které tvoří rozhodující část zdrojové základny ES ČR, budou mít i ve středně a dlouhodobém horizontu klíčovou roli při výrobě elektrické energie v ČR. Zároveň ovšem dojde k dožívání části těchto zdrojů v relativně krátkém časovém horizontu. Naopak, lze očekávat nárůst instalovaného výkonu v obnovitelných zdrojích energie (OZE), jejichž podíl na celkové zdrojové základně ČR však bude i nadále poměrně nízký.

S ohledem na předpokládaný růst spotřeby elektrické energie a stagnaci nebo dokonce pokles produkce elektrické energie, ČR reálně hrozí, že v budoucnu bude muset elektřinu importovat. Podle nejnovějších studií nastane přelom z vývozu na dovoz v roce 2018 (kritický scénář), podle referenčního scénáře dochází k posunu maximálně na rok 2020. Pochopitelně je vše závislé na rozvoji výrobních zdrojů v ČR.

Vývoj energetického odvětví probíhá v rámci Státní energetické koncepce (SEK), která definuje realizační nástroje energetické politiky ČR s výhledem do roku 2030. Prioritami jsou nezávislost na cizích zdrojích, bezpečnost zdrojů energie a udržitelný rozvoj. SEK do budoucna počítá s podporou jaderné energetiky a s klíčovou rolí uhlí v energetickém mixu ČR.

ES České republiky je díky své geografické poloze v centru Evropy intenzivně napojena na soustavu UCTE a je provozována s význačnou mezinárodní spoluprací. Prostřednictvím deseti vedení 400 kV a šesti vedení 220 kV je propojena s pěti elektrizačními soustavami v okolních státech (Vattenfall, E.ON, Verbund, SEPS, PSE).

Česká republika patří k mála členským zemím EU, které jsou čistými vývozci elektrické energie. ČR v současné době vyváží přibližně 20 % veškeré produkce elektrické energie. Dlouhodobě směřovala většina vývozu do Německa, s odstupem pak do Rakouska a na Slovensko.

Důsledkem zesíleného boje EU s globálními změnami klimatu a podporou OZE se začínají projevit změny ve struktuře výroby elektrické energie, kdy dochází k:

- útlumu uhelných zdrojů ve střední Evropě,
- útlumu jaderných zdrojů v Německu,
- masivnímu rozvoji větrné energetiky v severní a jihozápadní Evropě,
- rozvoji uhelné energetiky v jihovýchodní Evropě a
- rozvoji zdrojů na zemní plyn.

Kromě obtížnější regulace elektřiny z větrných elektráren (VtE) a nestability dodávek z nich (a z toho plynoucího růstu potřebných rezervních výkonů), zahrnují snahy EU také povinný výkup a zapojení OZE do přenosové soustavy. V důsledku změny struktury služeb, vyvolané podporou OZE, lze též předpokládat snížení dostupnosti stávající výše výkonu pro podpůrné služby.

Podpora OZE v EU (a především VtE v Německu) bude mít za následek zvýšení průtoků přes ČR, a tím vyvolá zvýšené nároky na kapacity sítí pro dálkové přenosy, narůstající požadavky na připojení zdrojů a zvýšení kapacit odběrů. S těmito důsledky se budou muset vyrovnat především provozovatelé přenosové soustavy a distribučních soustav.

### q Právní předpisy EU

Prvním dokumentem energetické legislativy byla Evropská energetická charta, která zahájila systematickou spolupráci v energetice mezi jednotlivými evropskými státy. Přijatá ustanovení se týkají ochrany a podpory investic, volného obchodu, svobodného transitu energií, snižování vlivu energetiky na ŽP, a mechanismu pro řešení sporů mezi státy a investory.

Dalším dokumentem je Bílá kniha, jejímž cílem bylo pomoci přidruženým zemím v přípravě na práci v rámci požadavků vnitřního trhu Evropské unie. Jsou zde uvedena hlavní opatření ve vnitřním trhu, návrhy kroků ke sblížení legislativy a popis nezbytné správní a organizační struktury.

Směrnice Evropského parlamentu a rady 2003/54/ES o společných pravidlech pro vnitřní trh s elektřinou stanoví společná pravidla pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie týkající se organizace a fungování elektroenergetiky, přístupu na trh, kritérií a postupů pro výběrová řízení a udělování povolení, jakož i pravidel pro provozování sítí.

### q Legislativa ČR

Nové právní úpravy v prostředí liberalizovaného trhu si vyžádalo zejména promítnutí směrnic EU do energetické legislativy ČR.

Zákon č. 458/2000 Sb. a pozdější novela zákon č. 670/2004 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). Do právního řádu ČR plně implementoval principy platné v EU pro oblast podnikání a výkonu státní správy v odvětvích elektroenergetiky a plynárenství. Jde zejména o Směrnici č. 96/92/EC, o společných pravidlech vnitřního trhu s elektřinou, Směrnici 2004/8/EC, o prosazování kombinované výroby elektřiny a tepla, založené na poptávce po užitečném teple na vnitřním energetickém trhu, Nařízení EU č. 1228/2003, o

podmínkách pro přístup k sítím pro přes hraniční výměny elektřiny a Dohody k energetické chartě.

EZ upravuje podmínky podnikání, výkon státní správy, regulaci, práva a povinnosti fyzických a právnických osob, zajišťuje harmonizaci české legislativy, zavádí tržní prostředí včetně vymezení Energetického regulačního úřadu (ERÚ) a Operátora trhu s elektřinou (OTE), s cílem dosažení spolehlivé a kvalitní dodávky energie za minimální ceny pro konečné spotřebitele, upravuje postavení a působnost Státní energetické inspekce (SEI), stanovuje sankce a vytváří podmínky k ochraně životního prostředí a k rozvoji energetiky.

V působnosti ERÚ je podpora hospodářské soutěže a ochrana zájmů spotřebitelů s cílem uspokojit všechny přiměřené požadavky na dodávku energie. V ČR je uplatňován model regulovaného přístupu k sítím - každý, kdo splňuje zákonem stanovené podmínky, má právo na přístup k sítím pro realizaci dohodnutých obchodů. Ceny za použití sítí jsou stanoveny ERÚ. ERÚ rovněž uděluje licence na výrobu elektrické energie.

SEI je správním úřadem podřízeným MPO ČR, který, kromě kontroly dodržování ustanovení EZ, kontroluje i dodržování zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií a dodržování zákona o cenách. Za porušení těchto předpisů ukládá pokuty.

#### q Složení ceny elektřiny

Z čeho se vlastně cena elektřiny, kterou platí domácnosti v ČR, konstruuje: Silová elektřina – kolem 35 % tvoří cena, za kterou prodávají vyrobenou elektřinu výrobci (provozovatelé elektráren) a obchodníci. Přenos – téměř 5 % stojí přenos elektřiny vysokonapěťovou soustavou, u nás provozovanou Českou přenosovou a. s. (ČEPS). Distribuce – přibližně 34 % z ceny inkasují distributoři, rozvodné podniky, které vedou elektřinu ke spotřebitelům. (Zde jde o příklad složení ceny pro domácnosti. V případě podniků jsou procenta u vlastní silové elektřiny a distribuce odlišná. Distribuce, tedy „doprava“ elektřiny k podnikům je kratší, a proto je její poměr nižší. U velkých podniků to může být i pod 20 %, úměrně tomu roste podíl vlastní silové elektřiny.) Systémové služby – více než 6 % stojí tzv. podpůrné služby, které musí zajistit ČEPS a výrobci a které znamenají pro spotřebitele jistotu kvality, tj. stálého kmitočtu, udržování záloh pro případ nenadálého výpadku apod. Podpora obnovitelných zdrojů – 1,8 % podporujeme všichni výrobu elektřiny v obnovitelných zdrojích a kogeneraci (společnou výrobu elektřiny a tepla). Decentrální výroba – 0,3 % z ceny je na podporu decentralizované výroby. Operátor trhu – 0,17 % je v ceně zahrnut i náklad na provoz úřadu, který trh s elektřinou řídí. Daně – 18% případně státu ve formě DPH. Platí pravidlo, že zboží je tím dražší, čím větší je po něm poptávka – zjednodušeně je možné říci, že během dne je tedy elektřina na trhu dražší než v noci, ve špičce pracovních dní dražší než o víkendu a v zimě dražší než v létě. Pro spotřebitele existuje systém různých tarifů, který si mohou po dohodě se svým dodavatelem elektřiny vyladit tak, aby co nejlépe vyhovoval např. režimu a vybavení domácnosti.



#### Shrnutí pojmů 1.1.

Elektrizační soustava, energetické zdroje, Státní energetické koncepce, cena elektřiny.



#### Otázky 1.1.

1. Jaká je roční výroba elektrické energie v ČR?
2. Jaký je instalovaný výkon ČR?
3. Z čeho se skládá cena elektrické energie?



## DALŠÍ ZDROJE 1

- [1] ERÚ - Energetický regulační úřad, URL <http://www.eru.cz/>
- [2] Kovačovská, L.: Zásadní otázky rozvoje a provozu elektroenergetiky ČR, konference CPS '08, Bratislava:STU, 2008, 12 s., ISBN 978-80-227-2883-6
- [3] Programové prohlášení vlády <http://www.vlada.cz/scripts/detail.php?id=20840>



## CD-ROM

- **Spotřeba elektrické energie** - animace měření různých spotřebičů
- **Výpočet spotřeby a ceny energie** - program



## 2. TEPELNÉ ELEKTRÁRNY

### 2.1. Princip funkce tepelných elektráren



#### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat Rankine - Clausiuv tepelný oběh
- popsat funkci tepelné elektrárny



#### VÝKLAD

Tepelné elektrárny představují rozsáhlý komplex rozličných zařízení. Úkolem tepelných elektráren je přeměna chemické energie vázané v palivu na elektrickou energii rozváděnou ke spotřebitelům. Tato přeměna není přímá, neboť se uskutečňuje prostřednictvím dalších forem energie. U tepelných elektráren dochází k uvolňování chemické energie paliva ve formě tepla, k akumulaci tepelné energie a přenosu tepelné energie určitým médiem, jímž je obvykle pára daných parametrů, k přeměně tepelné energie nosného média na mechanickou energii a konečně k přeměně mechanické energie na elektrickou. Všechny tyto přeměny energií jsou provázány ztrátami jež ovlivňují celkovou účinnost tepelných elektráren.

Je nezbytné, aby vyrobená elektrická energie splňovala jisté kvalitativní požadavky. Mezi tyto požadavky patří kmitočety, dodržení napěťových hladin, dodání potřebného množství energie. Aby bylo možné tyto požadavky splnit, je nutné parametry vyrobené elektrické energie upravit (transformovat). Děje se tak také proto, že parametry vyrobené elektrické energie nejsou vhodné pro přenos a nesplňují dané napěťové hladiny.

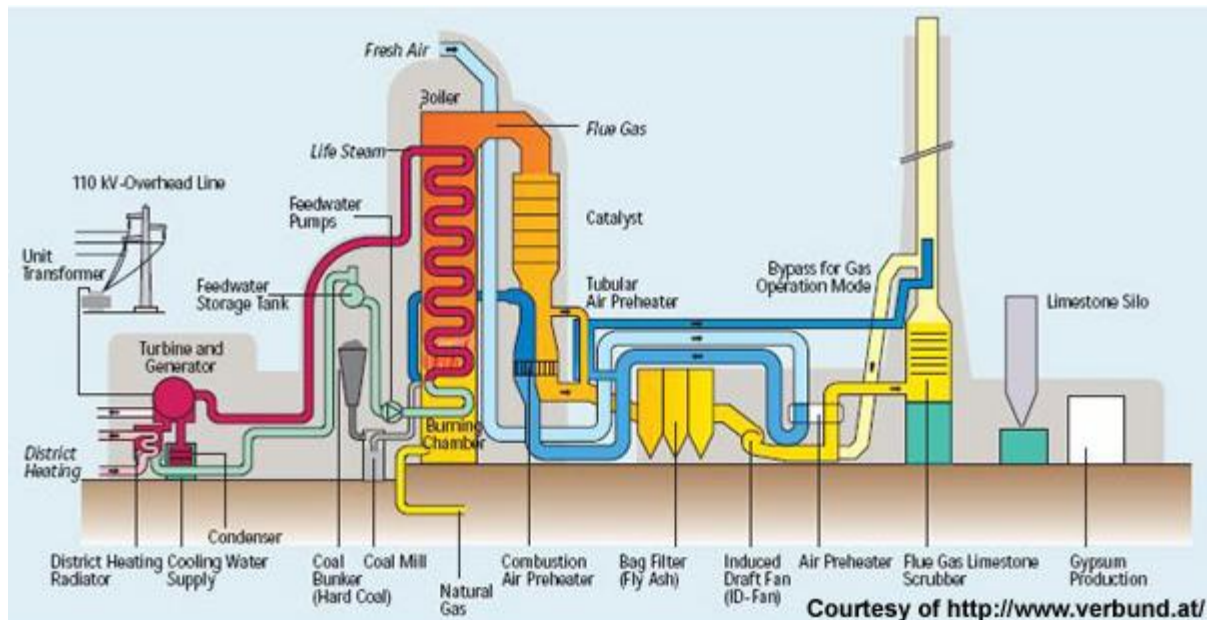
Tepelné elektrárny a teplárny pracují vždy na stejném principu, liší se však spalovaným palivem a způsobem vzniku páry.

Podle užívaného paliva je možné elektrárny rozdělit na uhelné, využívající hlavně hnědé a černé uhlí, na paroplynové, spalující zemní plyn či energoplyn a dieselové spalující naftu. Dieselové elektrárny nejsou elektrárny v pravém smyslu, nýbrž se jedná se o velké dieselagregáty sloužící obvykle jako záložní zdroje. Málo obvyklé jsou pak sluneční tepelné elektrárny.

Uhelné elektrárny mohou být čistě kondenzační, nebo se může jednat o teplárnu, což je obvyklejší případ, protože teplárny mají vyšší účinnost. Elektrárny spalující zemní plyn jsou obvykle paroplynové. Všechny jmenované elektrárny pracují s párou kromě dieselových elektráren. Zde ke vzniku páry nedochází.

#### q Princip funkce

Pro současné tepelné elektrárny je typické blokové uspořádání (Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Příklad blokového uspořádání

Jeden blok vždy obsahuje kotel, turbínu, alternátor, blokový transformátor a odbočkový transformátor. Tato zařízení charakterizují blok elektrárny. Počet bloků je dán výkonem bloků a instalovaným výkonem, na jaký je elektrárna navržena. Každý blok pak dále obsahuje pomocná a obslužná zařízení zajišťující provoz a ochranu bloku a jeho částí.

Základní princip funkce všech tepelných elektráren je shodný. Do kotle každého bloku je přiváděno palivo, které se zde spaluje. Hořením paliva dochází k uvolňování tepla, jež se akumuluje ve vodě protékající kotlem. Z vody se stává pára o potřebné teplotě a tlaku a ta se vede na turbínu. Expandující pára roztáčí turbínu a ta turboalternátor, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Za turboalternátorem následuje blokový transformátor. Ten je vždy zvyšovací, neboť je nutné zvýšit napětovou hladinu z vysokého napětí na velmi vysoké napětí – obvykle 400 kV nebo 110 kV – a snížit proudy z desítek kiloampér na stovky ampér. Takovéto napětí a proudy jsou vhodné k přenosu.

Některé tepelné elektrárny mají rovněž funkci tepláren, protože kromě elektrické energie dodávají tepelnou energii, resp. teplo. To je možné díky odběrovým turbínám. Část páry se z těchto turbín odvádí do kondenzátoru a část páry se z turbíny odebírá a využívá se jako topná pára. Popsaný princip funkce je typický pro elektrárny využívající takzvaný Rankine – Clausiuv oběh.

#### Rankine – Clausiuv oběh

Popisuje cirkulaci a skupenské stavy napájecí vody v tepelném okruhu elektrárny. Je to nejrozšířenější způsob oběhu napájecí vody viz. Obr. 2.2 a Obr. 2.3.

1) V prvním kroku dochází k čerpání upravené demineralizované napájecí vody oběhovým čerpadlem a ohřevu vody z teploty  $T_1$  na teplotu  $T_2$ . Teplota  $T_1$  se pohybuje v okolí  $20^\circ\text{C}$  a normálního atmosférického tlaku, pokud zanedbáme zvýšení tlaku způsobené čerpáním vody napájecím čerpadlem, Teplota  $T_2$  se pohybuje přibližně v okolí  $200^\circ\text{C}$  a tlaku kolem  $1,5\text{MPa}$ . Voda je v kapalném skupenství. Toto přehřátí se provádí z důvodu zvyšování účinnosti elektrárny. Teploty a tlaky napájecí vody se u jednotlivých elektráren liší.

2) Přehřátá napájecí voda vstupuje do kotle, případně jiného generátoru páry. Zde je voda o vysokém tlaku ohřívána až na mez sytosti kdy začne vřít. V další části kotle dochází ke vzniku syté páry a k přehřívání páry na pracovní teplotu. Pára je v kotli pod vysokým

tlakem a teplotou. Tlaky ostré páry se pohybují v rozmezí 15 - 30 MPa, teplota mezi 550 – 700°C. Je nutné aby vyrobená pára neobsahovala kapičky vody, tzn. Pára musí být suchá.

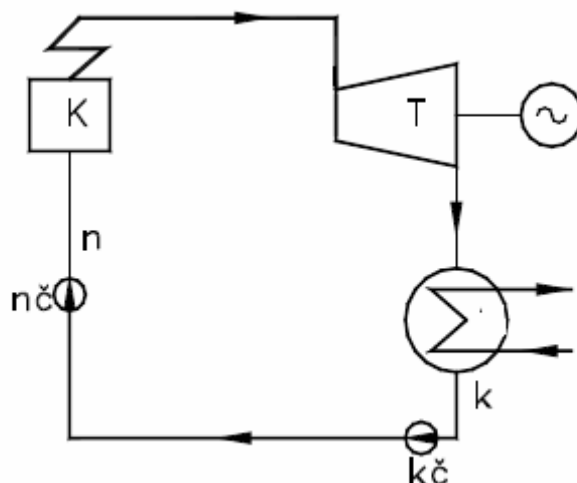
3) Pára z kotle se vede na turbínu kde expanduje a předává svou tepelnou a kinetickou energii. Turbíny velkých výkonů mohou být složeny z několika částí, pak se jedná o vícetělesové turbíny nebo turbínu tvoří jen jeden kus, ale turbína je rozdělena podle pracovního tlaku na vysokotlakou část, středotlakou část a nízkotlakou část. Často se v rámci zvyšování účinnosti využívá přihřívání páry, kdy za vysokotlakou částí turbíny je odběr a pára se vede zpátky do kotle, kde se přihřeje, tím se zvýší její teplota a vede se opět do turbíny na středotlakou část a následně na nízkotlakou.

4) Po průchodu turbínou se část páry může využívat jako topné v případě, že se jedná o teplárnu s odběrovou turbínou, je však nutné upravit teplotu a tlak páry. Pára, která se nevyužívá jako topná, nebo pára z bezodběrové turbíny se přivádí do kondenzátoru. Zde pára mění své skupenství z plynného na kapalné a stává se z ní zase napájecí voda, jež se přivádí do kotle společně s demineralizovanou vodou z vodního zdroje kryjící ztráty páry v oběhu. Tímto je uzavřen celý Rankine – Clausiův oběh.

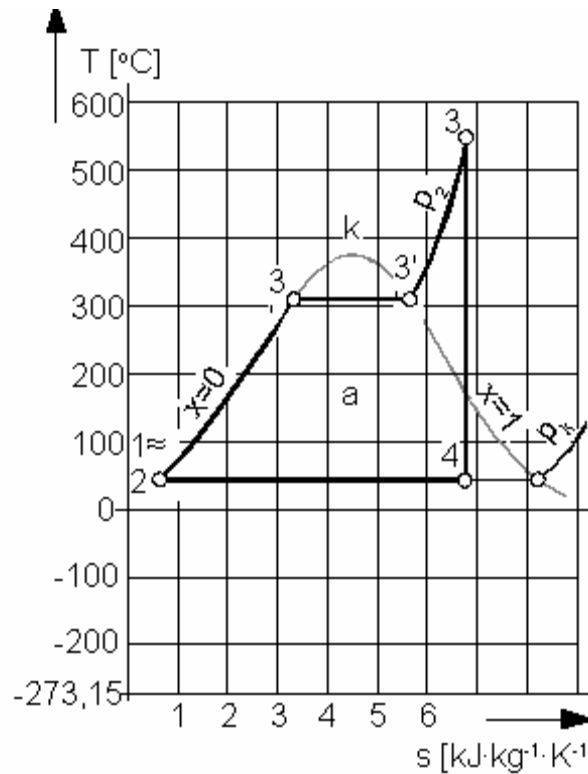
Na účinnost Rankine – Clausiova oběhu působí mnoho vlivů. Je snaha o dosažení co nejvyšší účinnosti a proto se využívá:

- zvyšování teploty páry,
- opakované přihřívání páry,
- regenerační ohřev napájecí vody,
- zvyšování účinnosti jednotlivých komponentů tepelného oběhu,
- snižování protitlaku.

Maximální reálně dosažitelná účinnost Rankine – Clausiova oběhu je omezena hlavně teplotou a tlakem páry. Parametry páry lze zvyšovat jen tak, jak dovolí materiály použité pro konstrukci částí tepelného oběhu. Hlavně kotle, potrubí a turbíny. Tyto materiály musí odolávat velmi vysokým tlakům a teplotám. Pro současné používané materiály platí maximální tlaky do 30 MPa a teploty do 650°C.



**Obr. 2.2: Blokové schéma Rankine – Clausiova oběhu: kč – kondenzátorové čerpadlo, nč - napájecí čerpadlo, n - napájecí potrubí, K - kotel, T - turbína, ~ - turboalternátor, k - kondenzátor**



Obr. 2.3: T-s diagram Rankine – Clausiova oběhu [1]



### Shrnutí pojmů 2.1.

Tepelná elektrárna, Rankine – Clausiuv tepelný oběh, teplárna, kondenzační elektrárna, blokové uspořádání.



### Otázky 2.1.

4. Popište Rankine – Clausiuv tepelný oběh.
5. Jaké jsou pracovní tlaky a teploty páry?
6. Jak zvýšit účinnost Rankine – Clausiuvu tepelného oběhu?

## 2.2. Uhelné elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

2 hodiny



### CÍL:

- Po prostudování tohoto odstavce budete umět
- popsat části uhelných elektráren a jejich funkci



## VÝKLAD

Uhelné tepelné elektrárny jsou nejrozšířenějším typem tepelných elektráren. Primárním spalovaným palivem je černé nebo hnědé uhlí. Některé jsou schopny spalovat také biomasu, koksárenský plyn a topné oleje. Kromě elektřiny také často dodávají teplo. Vzhledem k dlouhé době potřebné k najetí uhelných elektráren tyto pracují ve všech režimech zatížení sítě. Účinnost uhelných elektráren bývá do 35%.

Instalovaný výkon tepelných elektráren v ČR k roku 2010 je přibližně 11,8GW. Tyto elektrárny vyrobily k roku 2010 53580 GWh a zahrnují 80% instalovaného výkonu ČR.

### q Palivo

Černé uhlí se od hnědého liší stářím a výhřevností. Černé uhlí je geologicky starší a má vyšší výhřevnost. Výhřevnost černého uhlí je přibližně 25 MJ/kg. Tato hodnota může být nižší nebo vyšší v závislosti na kvalitě uhlí. Černé uhlí obsahuje více uhlíku a méně popelovin a síry. Nejvyšší černé uhlí se nazývá antracit, je to geologicky nejstarší uhlí s nejvyšší výhřevností. Černé uhlí se těží v hlubinných dolech např. na Karvinsku a Ostravsku.

Hnědé uhlí je geologicky mladší než černé uhlí a má nižší výhřevnost. Výhřevnost hnědého uhlí je 18 MJ/kg, hodnota výhřevnosti opět závisí na kvalitě a druhu hnědého uhlí. Nejmladší hnědé uhlí se nazývá lignit, je nejméně kvalitní. Hnědé uhlí obsahuje méně uhlíku a více popelovin, síry a těkavých látek. Hnědé uhlí je těženo většinou v povrchových lomech v Čechách.

Každá elektrárna má svou zásobu uhlí s níž by vystačila přibližně na měsíc provozu při výpadku dodávek. Jedná se od desítek po stovky tisíc tun uhlí, v závislosti na výkonu elektrárny. Toto uhlí je skladováno ve stejné formě v jaké bylo vytěženo na skládce uhlí. Dodávky uhlí jsou realizovány železniční dopravou.

Surové uhlí je skladováno v zásobnících, které se nazývají bunkry. Bunkrů může být v jedné elektrárně několik. Z bunkrů se surové uhlí dopravuje na váhy a pak do uhelných mlýnů. Uhelné mlýny jsou konstrukčně upraveny podle druhu drceného uhlí, mohou být např. kulové nebo tlukadlové. V mlýnech je uhlí drceno na prášek, případně na hrubší frakci, podle typu hořáků a konstrukce ohniště kotle. Prášek se fouká do zásobníku uhelného prášku tlakovým vzduchem. Skladování drceného uhlí se nazývá mezibunkrování. Mezibunkrování je výhodné z hlediska stálé jakosti paliva promíseného vzduchem. Mezibunkrování hnědouhelného prášku může být rizikové z důvodu vyššího obsahu těkavých látek. Z mezibunkru se pak uhlí dostává do uhelných hořáků, případně vytváří v ohništi kotle fluidní lože. Palivo ve formě uhelného prášku je k hořákům dopravováno tlakovým předehřátým vzduchem, pokud je uhlí ve formě hrubší frakce a vytváří fluidní lože, pak je vzduchem v ohništi kotle jen nadlehčováno. Produktem spalování uhlí jsou struska, popílek a spalné zplodiny obsahující oxidy uhlíku, síry a  $\text{NO}_x$ .

Kromě hnědého a černého uhlí jsou jako palivo užívány zemní plyn, energoplyn, topné oleje, biomasa a netoxické odpady. Netoxické odpady, biomasa a jiné méně kvalitní paliva se obvykle spalují metodou atmosférického nebo tlakového fluidního spalování umožňující dokonalejší spálení paliva. Obvyklejší je však použití těchto metod pro kombinace paliv uhlí – biomasa, uhlí – odpady. Všechna pevná paliva vždy prochází mlýnským okruhem, kde jsou drceny na požadovanou frakci. Plynu se v uhelných elektrárnách užívá hlavně pro najíždění kotlů a zapalování uhelných hořáků, případně pro stabilizaci výkonu kotle.

## q Napájecí voda

Tato voda je základní pro výrobu páry v elektrárně. Je to voda, jež vstupuje do kotle a kryje ztráty páry a kondenzátu v tepelném oběhu. Ztráty vznikají netěsnostmi potrubí, využíváním páry pro vytápění a odluhováním kotlů. Ztráty by neměly přesáhnout 5 % celkové spotřeby páry. Ztráty je nutné doplňovat napájecí vodou ze zdroje napájecí vody.

Jako zdroj napájecí vody je většinou využit vodní tok či uměle vytvořená nádrž. Voda v nádrži je přírodní – obsahuje tedy různé rozpuštěné soli, minerály a různé další látky ve vodě rozptýlené. Takovou vodu je nepřipustné vpustit do kotle. Napájecí voda musí být prostá veškerých příměsí a minerálů. Látky obsažené ve vodě jsou příčinou vzniku kotelního kamene, ten se může usazovat např. v trubkách průtočných kotlů, kde snižuje tepelnou vodivost trubek a může dojít k přehřátí a potrhání potrubí kotle. Surovou napájecí vodu je tedy nutné upravit.

Voda je zbavena hrubých nečistot, filtrováním se odstraňují jemné nečistoty např. písek, koagulaci (čířením) je zbavena rozptýlených organických látek a jako poslední se odstraňují rozpuštěné soli a minerály způsobující tvrdost vody. Tvrdost vody se udává ve stupních tvrdosti, nebo v miligramekvivalentech/litr. Platí, že 1° tvrdosti = 2,8 mgekv/l. Odstranění tvrdosti se provádí v měničích iontů. Je to zařízení, kde působením přírodních nebo umělých plastických hmot dochází k výměně iontů. Tomuto se říká změkčování vody. Mění se např. kationy vápníku a hořčíku za kationy sodíku. Takto upravená voda stačí pro napájení středotlakých kotlů, avšak pro kotle vysokých parametrů (teplota a tlak) a pro kotle průtočné je nutné užít úpravu vody metodou chemické demineralizace.

Ideální by bylo, kdyby do kotle proudila jen čistá H<sub>2</sub>O bez jakýchkoli příměsí, avšak ve vodě vždy nějaké soli zůstanou, ty se po odpaření vody koncentrují v kotli. Soli strhávané párou k turbíně způsobují její zasolení. Aby se tomuto zabránilo, dochází k nepřetržitému odpouštění solemi zahuštěné kotelní vody (odluhování). Přípustný výparek v kotelní vodě určuje hmotnostní obsah soli na litr vody (mg/l) a je dán pro každý kotel provozními předpisy. Je obvykle nižší pro kotle vyšších parametrů. S odluhem je třeba odpouštět takové množství solí, jaké je přiváděno do kotle, tak aby výparek v kotelní vodě nepřekročil povolenou hranici.

Množství odluhu může dosáhnout až 10% objemu napájecí vody. S odluhem se odvádí značné množství tepla, jež se získává zpět v expandérech. V nich se z odluhu stává pára a ta se odvádí zpět do tepelného oběhu, Neexpandovaný odluh o teplotách 30 - 50 °C se odvádí jako odpad. Napájecí voda a kondenzát se čerpá oběhovými čerpadly. Tato čerpadla jsou jedny z nejdůležitějších zařízení, jejich bezporuchovým provozem je podmíněna výroba elektřiny v elektrárně. Napájecí čerpadla jsou obzvláště významná pro kotle s malým vodním obsahem a proto ke každému kotli náleží minimálně 2 napájecí čerpadla. Čerpání napájecí vody provádí jedno z čerpadel, druhé představuje zálohu pro případ poruchy prvního čerpadla. Každé z čerpadel musí mít takový výkon, aby bylo schopné přečerpat potřebné množství napájecí vody při maximálním výkonu kotle. Ke kotli mohou náležet i více než dvě čerpadla. Pokud se jedná o čerpadla poháněná elektromotorem, pak výkony těchto pohonů jsou v řádu jednotek až desítek MW v závislosti na množství vody, které je nutné přečerpat. Elektropohon a čerpadlo tvoří tzv. elektronapáječku. Používají se také turbonapáječky, kdy je pohon čerpadla realizován pomocí parní turbíny. Čerpadlo má buď svou vlastní turbínu, nebo je spojeno s hřídelí hlavní blokované turbíny. Velké elektrárny, například elektrárna Dětmarovice, obsahují jak elektronapáječky, tak turbonapáječky. Na elektronapáječky připadá přibližně 4 - 6 % vlastní spotřeby elektrárny. Užívají se odstředivá čerpadla.

## q Regenerační ohřev

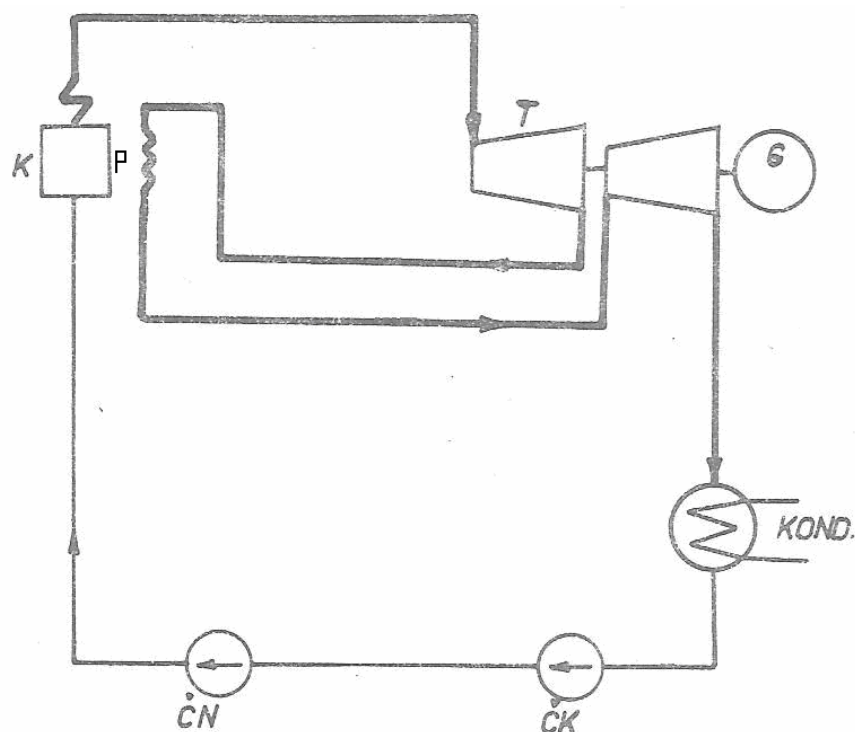
Jedná se o přehřívání napájecí vody vstupující do kotle. Využití regeneračního ohřevu zvyšuje celkovou účinnost elektrárny, protože se část tepla expandované páry vrací s ohřátou vodou zpět do kotle. Voda se přehřívá v ohřívácích parou odebíranou z turbíny na teploty kolem 250 °C. Voda po ohřevu je stále v kapalném skupenství v důsledku vysokého

tlaku. Regenerační ohřev má také vliv na množství spotřebovaného paliva, které praktikováním tohoto ohřevu klesá. Význam ohřevu roste se zvyšující se teplotou páry v kotli, kdy užitím ohřevu klesá množství tepla nutné k ohřátí vody na bod varu. V praxi se používá následující uspořádání regeneračních oběhů:

- s povrchovými ohříváky – zde pára odebíraná z turbíny proudí mezi trubkami ohříváku, ve kterých proudí kondenzát, tlak kondenzátu musí být vyšší, než tlak ohřívací páry,
- se směšovacími ohříváky – odebíraná pára se mísí s napájecí vodou a tím ji odevzdává své teplo, mají také funkci odplyňováků, zbavují napájecí vodu plynů způsobujících korozi kotle tj. kyslík, oxid uhličitý,
- kombinovaný – užívá se kombinace povrchových a směšovacích ohříváků.

Při volbě počtu ohřívacích stupňů se vychází z potřebného množství napájecí vody a požadované teploty. Ohřátí napájecí vody na potřebnou teplotu se neprovádí v jednom ohříváku, ale je vhodné využít více stupňů, čímž dojde ke zvýšení tepelných spádů. Počet stupňů je prakticky omezen hospodárností jednotlivých ohřevů.

Regeneračním ohřevem prochází také pára proudící turbínou (Obr. 2.4). Přihřívání páry probíhá v kotli a má za následek snížení vlhkosti páry a zvýšení účinnosti. Vlhkost páry v poslední nízkotlaké části turbíny působí erozivně na lopatky turbíny, proto dochází k odběru páry z vysokotlaké části turbíny, přihřívá páru až na hodnoty vstupní páry a vedení páry na středotlakou a nízkotlakou část turbíny. Vlhkost páry by neměla překročit 15%.



Obr. 2.4: Schéma regeneračního ohřevu páry: K – kotel, T - turbína, P- přihřívák páry, G – generátor, KOND - kondenzátor, ČK – kondenzátní čerpadlo, ČN - napájecí čerpadlo

## q Kotel

V kotli dochází ke spalování paliva, k přeměně napájecí vody na páru žadáných parametrů pro turbínu a k regeneračnímu přihřívání páry. Výkon kotle se udává v tunách páry za hodinu. Obvykle se jedná o desítky až stovky tun páry za hodinu. Kotle je možné

rozdělit podle druhu spalovaného paliva, podle způsobu průtoku napájecí vody a podle parametrů ostré páry.

Dělení kotlů podle paliva:

- tuhá paliva (hnědé a černé uhlí, biomasa, odpady),
- kapalná paliva (mazut, topné oleje),
- plynná paliva (zemní plyn, energoplyn).

Většina kotlů spalujících tuhá paliva je schopna spalovat také kapalná i plynná paliva. Hořáky kotlů musí však být k tomuto uzpůsobeny.

Dělení kotlů podle průtoku napájecí vody:

- s přirozenou cirkulací (Obr. 2.5),
- s nucenou cirkulací,
- průtočné (Obr. 2.6).

U kotlů s přirozenou cirkulací proudí napájecí voda vlivem proudění. Ohřátá voda a pára se liší hustotou od relativně studené napájecí vody, proto ohřátá voda a pára stoupají vzhůru, kdežto kondenzát s napájecí vodou se vrací zavodňovacími trubkami. Intenzita cirkulace závisí na poměru světlostí stoupacích trubek k světlosti trubek zavodňovacích, na výškovém rozdílu mezi horním válcem a sběrnými komorami a na provozním tlaku v kotli. Horní válec obvykle obsahuje odlučovací zařízení zabraňující zasolení turbíny. Kotle s přirozenou cirkulací se používají do tlaku 16 MPa. Při vyšších tlacích může dojít vlivem náhlého zvýšení výkonu ke vzniku páry v zavodňovacím potrubí a tím k zastavení proudění.

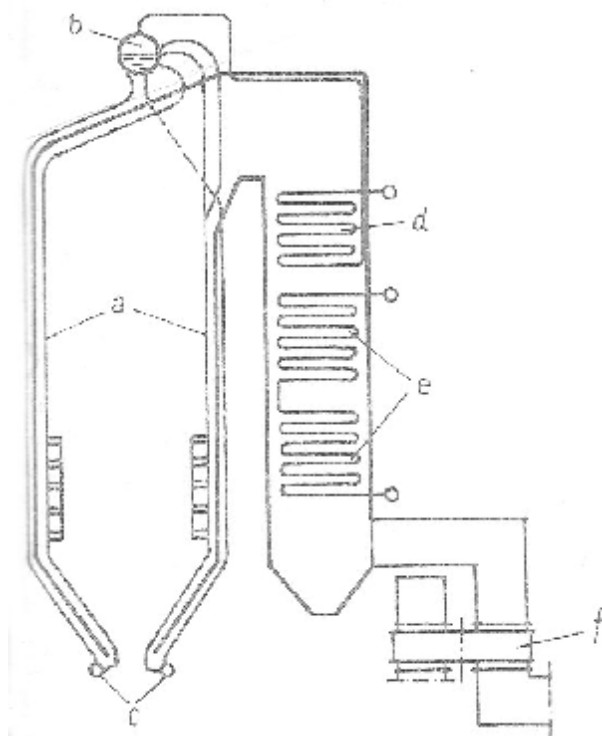
Pro kotle s nucenou cirkulací je typické cirkulační čerpadlo. Tyto kotle opět obsahují válec, jež tvoří zásobník napájecí vody a páry. Z válce je voda čerpána do výparného systému kotle a vzniklá pára se přivádí zpět do válce nebo do sběrné komory. Zde se odlučuje pára a pokračuje do přehříváku. Obvyklé tlaky pro tento typ kotlů jsou 13 – 18 MPa. Mezi výhody těchto kotlů patří krátké najížděcí doby a prostorové přizpůsobení konstrukce kotle. Nevýhodou je zvýšení vlastní spotřeby o napájení cirkulačního čerpadla.

Použití průtočných kotlů je typické při snaze o co nejvyšší tlak ostré páry. Výparný pochod průtočného kotle probíhá postupně buď v jedné trubce, nebo v systému paralelně řazených trubek. Tyto kotle jsou obzvláště citlivé na kvalitu napájecí vody, protože neobsahují horní válec, v němž by docházelo k odlučování solí. Pracovní tlaky těchto kotlů jsou od 20 MPa výše.

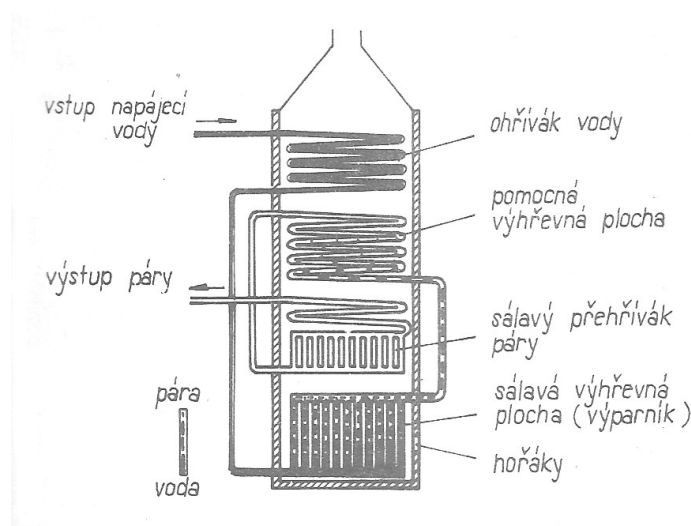
Na celkovou konstrukci kotle mají vliv především druh spalovaného paliva a požadované parametry páry. Kotle pracují při vysokých tlacích, moderní kritické kotle nad 23 MPa, a při teplotách páry nad 550 °C, teplota v ohništi kotle bývá kolem 1500°C. Tento fakt si žádá použití vhodných žáruvzdorných ocelí. Právě materiály vhodné pro konstrukce jednotlivých částí kotle jsou největším problémem bránícím v dosahování co nejvyšších parametrů páry a tím co nejvyšší účinnosti.

S palivem se do kotle vhání také přehřátý vzduch. Pro průběh spalování je důležitý především kyslík. Pomocí regulace množství vzduchu je možné ovlivnit složení kotelních spalin, zejména je možné ovlivnit množství  $\text{NO}_x$ .





**Obr. 2.5: Schéma kotle s přirozenou cirkulací a – spalovací komora s varnými trubkami, b - horní válec, c - sběrné komory, d - přehřívák páry, e - ohřívák napájecí vody (ekonomizér), f - ohřívák vzduchu**



**Obr. 2.6: Schéma průtočného kotle**

## q Turbína

Parní turbína je zařízení ve kterém se energie akumulovaná v páře mění na energii mechanickou. Pára zde expanduje a otáčí turbínou. Množství mechanické práce vytvořené turbínou odpovídá rozdílu entalpií páry vstupující do turbíny a páry z turbíny vystupující. Entalpie stejně jako teplota páry při průchodu turbínou klesají. Turbína je dále spojena spojkou s turboalternátorem a tvoří jeho pohon. Na hřídeli turbíny může být připojena také turbonapáječka. Mechanická účinnost turbín je okolo 95 %.

Každá parní turbína obsahuje základní části, kterými jsou hřídel turbíny, oběžná kola, lopatky a dýzy. V dýze turbíny získává pára výtakovou rychlost a kinetickou energii. Dochází

zde k expanzi. Pára prochází mezi lopatkami a předává jim svou kinetickou energii, přičemž se stále snižuje teplota páry a hodnota entalpie společně s tlakem. Lopatky jsou ukotveny v oběžných kolech a přeměňují kinetickou energii páry na mechanickou energii. Ta se předává pomocí hřídele turboalternátoru. Průměr oběžných kol a velikost lopatek se liší podle hodnoty tlaku. Je obvyklé, že se turbíny dělí na vysokotlakou, středotlakou a nízkotlakou část. Čím nižší je tlak páry tím větší musí být lopatky a průměr oběžného kola. Pro účinnost a životnost turbíny je významná suchost páry. Přítomnost vlhkosti v páře snižuje účinnost a způsobuje erozi lopatek.

Vlhkost se odstraňuje přihříváním páry, to způsobuje i jisté zvýšení účinnosti. Rovněž je nežádoucí přítomnost solí v páře aby nedošlo k zasolení turbíny. Soli se odstraňují odpuštěním odluhu.

Současnou snahu o co nejvyšší parametry páry brzdí materiály použitelné pro konstrukci turbín a kotlů. Turbíny stejně jako kotle pracují s vysokými teplotami a tlaky, dále na ně působí vibrace a rotor turbíny musí odolávat velkým odstředivým silám. Podle konstrukce rozlišujeme parní turbíny na rovnotlaké, přetlakové a protitlaké.

V rovnotlakých turbínách probíhá přeměna energie páry na energii kinetickou jen v dýze a pára prochází lopatkami za stálého tlaku.

V přetlakových turbínách pára expanduje jak v dýze tak mezi lopatkami a tlak páry při prostupu turbínou není konstantní, ale klesá. Tlak, teplota a entalpie páry na vstupu do turbíny jsou tedy větší než na výstupu. Celkový tepelný spád turbíny se skládá ze spádu v dýze a v lopatkách. Přetlakovost turbíny je poměr tepelného spádu na lopatkách k celkovému spádu. Tepelné spády se pohybují okolo 1200 - 1500 kJ/kg.

Celkový tepelný spád se rozděluje mezi stupně turbíny. Tepelný spád jednoho stupně je dán teplotou páry, např: pro teploty kolem 500°C je užíván spád 42 – 50 kJ/kg pro rovnotlaké turbíny a pro přetlakové 17 – 25 kJ/kg. V částech turbín s nižším tlakem mohou být hodnoty spádu 88 – 105 kJ/kg pro přetlakové.

Konstrukcí turbíny s větším počtem tlakových nebo rychlostních stupňů dojde ke snížení otáček turbíny a tím ke snížení sil namáhajících části turbíny. Při použití tlakových stupňů se celá turbína skládá z jednotlivých turbín zapojených za sebou na společném hřídeli. Na tomto hřídeli jsou oběžná kola s oběžnými lopatkami. Pára je vedena přes ventil do dýzových komor. Tlakové stupně se užívají pro rovnotlaké i pro přetlakové turbíny.

## q Kondenzátor

Kondenzátor tepelné elektrárny slouží ke skupenské přeměně páry vycházející z turbíny zpět na vodu čerpanou zpátky do kotle. V kondenzátoru se uzavírá Rankine – Clausiův oběh, zároveň zde dochází k největším ztrátám energie, protože zbytková tepelná energie páry je bez užitku předávána chladicí vodě a odváděna do chladících věží. Kondenzátory jsou typické pro kondenzační elektrárny. Kondenzátor výrazně ovlivňuje množství páry potřebné pro turbínu.

Kondenzátory lze rozdělit na 2 základní typy – směšovací a povrchové. Směšovací kondenzátory obsahují směs vody a páry. Obě skupenství jsou zde pohromadě. V povrchových kondenzátorech nedochází ke kontaktu vody a páry. Pára z turbíny zde proudí v trubkách a mezi těmito trubkami proudí chladicí voda. V kondenzátorech se udržuje vysoké vakuum. Tlak obvykle nepřesahuje 6 kPa, tzn. 94% vakuum, většinou je však vakuum ještě vyšší. V praxi se užívá tlaku 3 – 5 kPa. Hodnota vakua má značný vliv na snížení měrné spotřeby páry, kdy zvýšení vakua o 1% může znamenat snížení spotřeby páry 2 %. Hodnoty vakua závisí na chladícím povrchu kondenzátoru, na množství chladicí vody vztažené pro 1 kg páry a na vstupní teplotě chladicí vody. Zvýšením těchto parametrů dojde ke zvýšení vakua. Vstupní teplotu vody většinou nelze ovlivnit, bývá přibližně rovna okolní venkovní

teplotě, avšak je možné zvýšit chladicí plochu kondenzátoru, nebo zvýšit průtok chladicí vody.

Zvětšení chladicí plochy je spojenou s většími rozměry kondenzátoru, tím se kondenzátor prodražuje. Zvýšení průtoku chladicí vody vyžaduje vyšší výkon čerpadel a tím zvýšení vlastní spotřeby elektrárny. V důsledku poklesu konečného tlaku (růstu hodnoty vakua) dochází k růstu měrného objemu páry a tím je potřeba zvětšit rozměry koncového dílu turbíny.

Zkondenzovaná pára se čerpá kondenzátním čerpadlem společně s napájecí vodou zpět do kotle. Teplota kondenzátu se pohybuje okolo 30°C. Chladicí voda prochází kondenzátorem a pokračuje do chladících věží. Zde se rozprašuje, ochlazuje a čerpá zpět do chladicího okruhu. Část chladicí vody unikne ve formě páry z věží přirozeným odpařováním, proto se chladicí voda neustále doplňuje. I z této vody musí být odstraněny soli a příměsi aby nedocházelo k zanášení potrubí. Chladicí voda je v chladicím okruhu přítomna jen v kapalném skupenství, protože rozdíl teplot vstupní a výstupní chladicí vody bývá jen 10°C. Množství chladicí vody potřebné k ochlazení příslušného množství páry se nazývá chladicí poměr.

Množství chladicí vody bývá 50 – 60 násobek množství páry vstupující do kondenzátoru voda je čerpána obvykle z vodního zdroje, do něž se opět vrací, v případě nedostatečné kapacity vodního zdroje se praktikuje cirkulační chlazení, kdy se voda z bazénů chladících věží čerpá zpět do chladicího systému a ze zdroje jsou kryty pouze ztráty chladicí vody. Chladicí věže mohou mít přirozený tah, nebo umělý. Umělý tah umožňují ventilátory.

## q Spalinový okruh

Produktem spalování uhlí jsou jak pevné tak plynné exhalace. Pevné exhalace jako struska a popílek jsou užívány pro výrobu stavebních materiálů, stejně tak při odsiřování vzniká jako vedlejší produkt energosádrovec rovněž užívaný ve stavebnictví. Mezi plynné exhalace patří emise  $SO_x$  a  $NO_x$  tedy oxidy síry a dusíku, které je povinností ze spalin odstraňovat. Spalováním kapalných paliv se výrazně redukuje množství pevných spalinových produktů, stále však zůstávají emise  $SO_x$  a  $NO_x$ . Zemní plyn představuje nejčistší palivo pro konvenční tepelné elektrárny.

Struska představuje nejhrubší frakci pevných spalin. Odstraňování strusky probíhá přímo v kotli a to buď usazováním strusky na dně kotle a následným splavováním vodou, vzniká tak granulovaná struska, nebo periodickou výtavbou strusky a opět splavením vodou. Vytavení strusky se provádí obvykle jednou za den ve výtavných kotlích. Vytavená struska je splavována vodou skrz splachovací potrubí do drtiče strusky. Zde se ztuhlá struska rozdrťí a vodou je dopravena do usazovací jímky. Voda je z jímky čerpána zpět a usazená struska se distribuuje pro stavební účely.

Popílek je drobná pevná frakce. Popílek se neusazuje, naopak je unášen plynnými exhalacemi a musí se proto filtrovat z kouřových plynů. Pro odstranění popílku se užívají primárně cyklonové odlučovače a elektrofiltry.

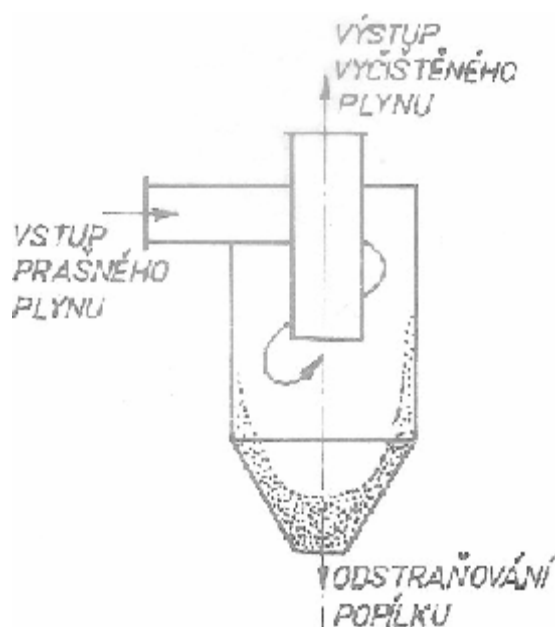
Cyklonové odlučovače (Obr. 2.7) slouží k mechanickému odstranění nejhrubšího popílku. Do vstupu cyklonu je vháněn prašný spalinový plyn a popílek odstředivou silou naráží na stěny odlučovače, po kterých se šroubovitě pohybuje, ztrácí rychlost a usazuje se ve sběrači. Účinnost cyklonu je závislá na objemu spalinového plynu, jenž cyklonem prochází a může kolísat v závislosti na změně výkonu kotle a tím na změně objemu kotelních zplodin. Aby se takovému kolísání předešlo, užívají se multicyklony. Účinnost cyklonových odlučovačů je 60 – 80%.

Elektrofiltr (Obr. 2.8) pracuje na principu vytvoření elektrostatického pole okolo usazovací elektrody. Elektrofiltry (elektrostatické odlučovače) následují po cyklonech a dochází zde k odstranění jemného popílku, který prošel cyklony. Základní části elektrofiltrů jsou výbojová

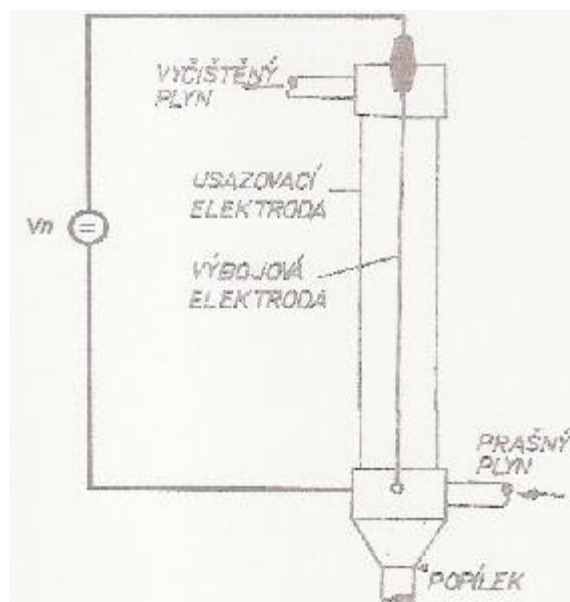
elektroda, usazovací elektroda a zásobník popílku. Usazovací elektrody jsou ve formě sít z drátu, stejně tak výbojové elektrody tvoří drát aby byl umožněn průchod spalin skrz elektrody. Obě elektrody jsou připojeny na zdroj vysokého napětí 50 – 70 kV. Na výbojové elektrodě vzniká výboj korónou a na usazovací elektrodě se usazuje popílek vlivem elektrostatického pole vzniklého mezi elektrodami. Usazený popílek se pravidelně oklepává z elektrod do zásobníku. Účinnost elektrofiltrů je až 98%.

Emise  $\text{NO}_x$  je možné regulovat množstvím spalovacího vzduchu a regulací teploty ohniště. Dnes se pro redukci emisí  $\text{NO}_x$  užívá systému  $\text{DENO}_x$ , kdy se do ohniště kotle vstříkuje čpavek.

Emise  $\text{SO}_x$  se eliminují systémem  $\text{DESO}_x$ . Jedná se o reakci oxidů síry obsažených ve spalinách s vápennou vodou. Výsledným produktem reakce je energosádrovec.



Obr. 2.7: Cyklonový odlučovač



Obr. 2.8: Elektrostatický odlučovač



## Shrnutí pojmů 2.2.

Výhřevnost paliva, napájecí voda, regenerační ohřev, kotel, turbína, kondenzátor, odlučovače.



## Otázky 2.2.

7. Jaká je výhřevnost černého uhlí?
8. Jak se upravuje napájecí voda?
9. Nakreslete schéma regeneračního ohřevu páry.
10. Rozdělte kotle podle průtoku napájecí vody.
11. Z čeho se skládá turbína?
12. Jaký je tlak v kondenzátorech?
13. Jak se odstraňuje popílek?
14. Jak se reguluje množství  $\text{NO}_x$ ?
15. Co je produktem odsiřování?

## 2.3. Plynové a paroplynové elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat části plynových a paroplynových elektráren a jejich funkci



### VÝKLAD

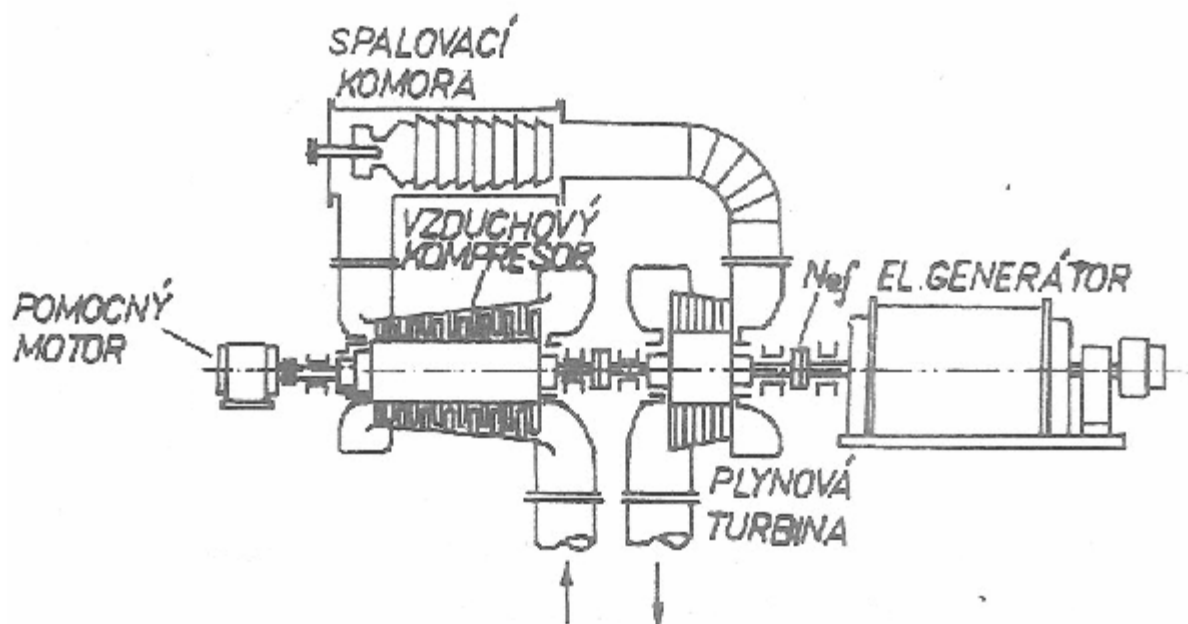
Paroplynové elektrárny patří k novějším typům tepelných elektráren. Budují se obvykle v paroplynové koncepci, kdy se v plynové spalovací turbíně spaluje směs plynu a vzduchu a vzniklé žhavé spaliny se použijí k výrobě páry pro parní turbínu. Jak za spalovací, tak za parní turbínou je umístěn turbogenerátor, tím se výrazně zvýší účinnost v důsledku většího využití vzniklého tepla. Pokud v elektrárně není instalovaná parní turbína, je spalné teplo používáno pro teplárenské účely. Palivem plynových elektráren je zemní plyn. Elektrárny používající spalovací turbíny mohou užívat také kapalná paliva.

Pohon generátorů v plynových elektrárnách zajišťují primárně spalovací plynové turbíny. Jako generátory se užívají turboalternátory, stejně jako u parních elektráren. V plynových

spalovacích turbínách vzniká obrovské množství tepla. Toto teplo se následně využívá pro výrobu páry pro parní turbíny, nebo slouží pro teplotenské účely. Využití tepla spalovací turbíny zvyšuje účinnost elektrárny. Tepelná a elektrická účinnost paroplynových cyklů bývá nad 50 %.

Mezi hlavní výhody paroplynových elektráren patří velice krátká najížděcí doba, mohou být spuštěny prakticky okamžitě, protože není potřeba generovat teplotnosné medium (páru). Výstavba plynových elektráren je méně nákladná a provoz je nesrovnatelně čistší než u elektráren na tuhá a kapalná paliva. Velmi nízká je vlastní spotřeba, většinou do 2 %, neboť není nutné napájet velké pohony jako například uhelné mlýny a čerpadla. Paroplynové elektrárny je možné snadněji a přesněji regulovat a také více automatizovat. Riziko může představovat výbušnost zemního plynu ve směsi se vzduchem.

Komplex paroplynové elektrárny se skládá z přívodu paliva (obvykle zemního plynu), ze soustrojí tvořeného najížděcím motorem, kompresorem, spalovací komorou, spalovací turbínou a generátorem (Obr. 2.9). Po tomto soustrojí následuje spalínový kotel, a soustrojí parní turbína, generátor.



Obr. 2.9: Schéma soustrojí spalovací turbíny

#### q Zemní plyn

Zemní plyn je obvykle přiváděn dálkovými plynovody. V místě spotřeby jsou stanice upravující tlak a čistotu plynu na provozní parametry. Dále je plyn přiváděn do spalovací komory. Zde se mísí s tlakovým vzduchem dodávaným kompresorem.

#### q Kompresor

Kompresor je uložen na společné hřídeli s turbínou, najížděcím motorem a generátorem. Na vstupu kompresoru je nasáván atmosférický vzduch a z výstupu, jenž vede do spalovací komory proudí zahřátý tlakový vzduch. Kompresor představuje největší mechanickou zátěž pro plynovou turbínu, může spotřebovat až 70% výkonu plynové turbíny.

Důležitým parametrem kompresoru je kompresní poměr. Ten je dán konstrukcí kompresoru. Dále je důležitý poměr teplot vzduchu před vstupem do turbíny k teplotě před vstupem do kompresoru. Poměr teplot určuje termodynamické vlastnosti oběhu. Tyto poměry se vzájemně ovlivňují, rovněž výrazně ovlivňují celkovou účinnost soustrojí.

### q Spalovací komora

Spalovací komora je statické zařízení a dochází zde k přeměně chemické energie paliva na tepelnou. Směs plynu a vzduchu se zde spaluje za stálého tlaku, čímž je dán stálý tlak a objem spalin. Teplota ve spalovací komoře dosahuje 1500 °C, proto palivová směs obsahuje značný přebytek vzduchu, způsobující ochlazení spalin přibližně na 600 - 800 °C. Konstrukce spalovací komory vyžaduje odolné žáruvzdorné oceli. Ve spalovací komoře mohou být spalována také kapalná paliva, spaliny se však musí před vstupem do turbíny vyčistit.

### q Spalovací turbína

Pracovním médiem spalovací turbíny je směs spalin a vzduchu, vstupující ze spalovací komory do turbíny, kde dochází k expanzi a snižování tlaku a teploty směsi. Spalovací turbína může pracovat buď v otevřeném cyklu, kdy se spaliny po expanzi v turbíně odvádějí rovnou do komína, nebo se mohou využít pro parní cyklus. Tohoto se užívá v paroplynových elektrárnách. Žhavá směs spalin a vzduchu prochází spalinovým kotlem a až následně vstupuje do komína. Využití spalin a parního cyklu zvyšuje účinnost elektrárny i její instalovaný výkon, protože elektřinu vyrábí jak generátor na hřídeli spalovací turbíny, tak generátor poháněný parní turbínou.

### q Spalinový kotel

Spalinový kotel má prakticky shodnou konstrukci, po stránce cirkulace vody, jako kotle v uhelných elektrárnách. Neobsahují však žádné hořáky a nedochází zde k hoření paliva. Fungují jako výměníky, ve kterých spaliny předávají svou tepelnou energii napájecí vodě, z níž vzniká pára. Spalinové kotle pracují s tlaky a teplotami na úrovni podkritických kotlů uhelných elektráren. Tepelný cyklus páry je shodný s parním cyklem v uhelných elektrárnách.

Při najíždění paroplynové elektrárny se uplatní najížděcí motor. Ten přebírá úlohu turbíny a roztáčí celé soustrojí, hlavně pak kompresor, který by jinak nemohl generovat tlakový vzduch. Najížděcí doby paroplynových elektráren jsou do 20 minut, v případě turbín s otevřeným cyklem v řádech minut. Celkovou účinnost soustrojí spalovací turbíny ovlivňuje poměr teplot vzduchu, kompresní poměr a účinnost kompresoru a turbíny. Účinnost parního cyklu je možné ovlivnit stejnými prostředky jako v případě uhelných elektráren.



### Shrnutí pojmů 2.3.

Zemní plyn, kompresor, spalovací komora, spalovací turbína, spalinový kotel.



### Otázky 2.3.

1. Z čeho se skládají paroplynové elektrárny?
2. Co ovlivňuje celkovou účinnost soustrojí paroplynové elektrárny?

## 2.4. Dieselové elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina

**CÍL:**

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat části dieselových elektráren a jejich funkci

**VÝKLAD**

Dieselové elektrárny, zvané také dieselagregáty mají primární funkci jako záložní zdroje elektrické energie. Výkony dieselagregátů jsou od jednotek kilowatt po jednotky megawatt. Použití dieselagregátů jako zdrojů silové elektrické energie, jako tomu je v případě uhelných a paroplynových elektráren, by bylo velmi neekonomické. Jsou však často používány v těchto elektrárnách jako záložní zdroje, pokrývající vlastní spotřebu elektrárny a umožňující najetí elektrárny bez cizí výkonové pomoci. Jako záložní zdroje elektřiny se užívají také v průmyslu a zdravotnictví. Výhodou dieselagregátů je jejich jednoduchá konstrukce – jedná se jen o dieselový motor spojený s generátorem. Najetí dieselagregátu je prakticky okamžité, najížděcí doba tedy nemá smysl. V případě dlouhodobého provozu vyžaduje údržbu jen motor.

**q Funkce dieselových elektráren**

Jako ve všech tepelných elektrárnách i zde dochází ke spalování paliva. Jako palivo slouží nafta. Výhřevnost nafty je přibližně 42MJ / kg. Nafta je spalována v dieselovém motoru, s motorem je na společné hřídeli rotor generátoru. Generátor dieselagregátu bývá vícepólový, což snižuje otáčky motoru potřebné pro zachování síťového kmitočtu 50Hz. Obvykle se používají 4 pólové generátory. Výstupem generátoru je trojfázová soustava 3 x 230 / 400V. Jako buzení rotoru se obvykle uplatňují permanentní magnety.

Dieselové motory bývají 4 a více válcové. Motory velkých dieselagregátů jsou až 16 válcové. Funkce vznětového motoru spočívá ve vstřikování nafty do válce, v němž došlo ke kompresi vzduchu pístem na 3 - 4 MPa. Pístem stlačený vzduch se zahřeje na 600 – 800 °C. Následně je do prostoru mezi pístem a horní úvratí tlakem jemně rozprášena nafta. Ta se vlivem horkého vzduchu vznítí a rychle shoří. Dochází k prudkému zvýšení tlaku ve válci, působením žhavých spalin. Dochází k expanzi spalin a pohybu pístu směrem k dolní úvratí. To je moment kdy dojde k přeměně chemické energie paliva na mechanickou. Dále následuje výfuk spalin, pak opětovná komprese vzduchu a cyklus se opakuje. Písty motoru jsou uloženy na klikovém hřídeli, který přenáší mechanickou energii na rotor generátoru. Součástí motoru je startér napájený z akumulátoru. Součástí motoru je také palivová nádrž s objemem ve stovkách litrů nafty. Spotřeba nafty u největších dieselagregátů může přesáhnout 500 litrů za hodinu.

**Shrnutí pojmů 2.4.**

Vznětový motor, nafta, komprese, vstřikování.

**Otázky 2.4.**

3. Jak funguje vznětový motor?



## 2.5. Současné trendy



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- moderní elektrárenské trendy a předpoklady pro rozšíření tepelných elektráren



### VÝKLAD

Na rozšíření tepelných elektráren jak v ČR tak ve světě bude mít hlavní vliv vzrůstající velikost spotřeby elektrické energie. Tepelné elektrárny představují nejmohutnější a nejspolehlivější výrobní zdroj. Pokud bude světová spotřeba elektřiny nadále narůstat, bude možné tento trend kompenzovat jedině výstavbou tepelných elektráren, ať již konvenčních či jaderných, protože je možné postavit je teoreticky kdekoliv, na rozdíl od vodních elektráren, které se stavějí jen na vhodných vodních tocích a také proto, že výkon tepelných elektráren není závislý na počasí, případně na ročním období, jak je tomu u větrných a slunečních elektráren. Největším současným trendem je ekologizace a zvyšování účinnosti elektráren. Pro nově stavěné tepelné elektrárny, je typické použití kritických a nadkritických bloků, kogenerace a užívání čistých uhelných technologií jako jsou atmosférické fluidní spalování, tlakové fluidní spalování, a tlakové fluidní zplyňování. V případě starších elektráren je prováděna modernizace, takzvaný retrofit, všech sekcí výroby elektřiny. Pro splnění emisních limitů je výhodná výstavba elektráren s paroplynovým cyklem, kdy palivem nemusí být jen zemní plyn, tedy fosilní palivo, ale také energoplyn vzniklý zplyňováním uhlí, biomasy a jiných paliv. Dochází také k rozvoji vodíkové energetiky.

#### q Kritické a nadkritické elektrárenské bloky

Kritické a nadkritické elektrárenské bloky dosahují vyšších účinností než bloky s podkritickými parametry páry. Parametry páry jednotlivých druhů bloků jsou rozděleny v tabulce dělení kotlů podle parametrů páry. Vysoké parametry páry kritických a nadkritických bloků si žádají použití moderních materiálů při konstrukci kotlů, potrubí a parních turbín. Ty musí odolávat až dvojnásobným tlakům, a vyšším teplotám než v případě podkritických bloků. Vhodnými konstrukčními materiály se jeví oceli legované wolframem a slitiny na bázi niklu. Použití moderních typů elektrárenských bloků zvyšuje účinnost výroby elektrické energie.

#### q Atmosférické fluidní spalování AFBC

Atmosférické fluidní spalování AFBC (atmospheric fluid bed combustion) je výhodné z důvodu účinnějšího předávání tepla napájecí vodě, produkuje méně plynných exhalací a umožňuje spalování méně kvalitních paliv s nižší výhřevností.

Toto spalování probíhá v kotli za atmosférického tlaku. Vznik fluidní vrstvy je umožněn speciálním roštem umístěným v ohništi kotle. Na tento rošt se přivádí palivo ve formě zrn do

6 mm a skrz rošt je vháněn primární vzduch způsobující vznos paliva. Principem fluidního spalování je dosažení stavu, kdy je palivo, vlivem vhánění primárního vzduchu pod rošt, vynášeno do určité výšky nad tento rošt a zde vytváří tzv. fluidní vrstvu, kde dochází ke spalování paliva, aniž by klesalo zpět na rošt. Paliva pro fluidní spalování mohou být kapalná nebo tuhá. Z tuhých paliv to mohou být černé a hnědé uhlí, rašelina, biomasa a netoxické odpady.

Fluidní vrstva sestává z inertu a sorbentu. Inert, tedy inertní složka, je označení pro látky upravující vlastnosti fluidní vrstvy. Těmito vlastnostmi jsou měrná hmotnost a hustota. Jako inerty se užívají písek, štěrky a keramika. Sorbent představuje látku zajišťující odsíření již ve fluidní vrstvě v kotli. Používaným sorbentem je obvyklé vápenec. Inert, sorbent i palivo jsou do kotle dodávány nepřetržitě. Všechny složky jsou mleté, jedná se však o mnohem hrubší frakci než v případě ohnišť s práškovými hořáky.

Na výstupu spalin z kotle je umístěn cyklónový odlučovač vracející větší nedokonale spálené části paliva zpět do spalovacího prostoru. Odlučovač tak zvyšuje účinnost spalování a umožňuje použití méně kvalitních paliv. Toto opatření se užívá i u tlakového fluidního spalování.

Vznik oxidů dusíků z primárního vzduchu je omezen spalovacími teplotami v rozmezí 800 - 950 °C.

#### q Tlakové fluidní spalování PFBC

Tlakové fluidní spalování PFBC (pressurized fluid bed combustion) se liší od atmosférického zvýšeným tlakem na hodnotu do 1,6 MPa. Účinnost výroby elektrické energie je o 6-8% vyšší než u atmosférického fluidního spalování. Celková účinnost dosahuje 44%. Princip tlakového fluidního spalování a vhodná použitelná paliva jsou stejná jako u fluidního spalování atmosférického. Shodný je rovněž princip odsíření spalin. Kotel pro PFBC je však velikostně výrazně menší, při stejném výkonu, než kotel pro AFBC, jelikož spalování při PFBC probíhá v mnohem menším prostoru. Celý kotel je navíc umístěn v tlakové nádobě. Množství plynných emisí je přibližně srovnatelné s atmosférickým fluidním spalováním. Množství NO<sub>x</sub> a dalších oxidů dusíku závisí na provozní teplotě a tlaku. Kotel PFBC kombinuje parogenerátor a zplyňovač. Je tedy vhodný pro použití v paroplynovém cyklu. Tlakové fluidní spalování je náročné na řízení a regulaci. Jistou nevýhodou obou druhů spalování představují chemicky nestabilní pevné produkty spalování nevhodné pro zpracování ve stavebnictví. Tyto produkty je nutné zkládkovat.

Výhody obou typů spalování jsou:

- možnost spalovat nekvalitní paliva,
- vysoká účinnost spalování spojená s recirkulací popela,
- lepší přenos tepla s fluidní vrstvy k teplonosnému mediu,
- nízká koncentrace SO<sub>x</sub> a NO<sub>x</sub> ve spalných plynech,
- vhodnost k provozu v paroplynovém cyklu.

Nevýhody obou typů spalování jsou:

- vysoké nároky na řízení spalovacího procesu
- složitá doprava paliva a odsun popela ze spalovacího prostoru.

#### q Tlakové fluidní zplyňování IGCC

Tlakové fluidní zplyňování IGCC a zplyňování obecně představuje procesy, při kterých je z prvotní suroviny získáván plyn sloužící jako palivo. Výhřevnost plynu je přibližně 5MJ/m<sup>3</sup>. Zplyňují se obvykle pevná, méně kvalitní paliva jako hnědé uhlí, lignit a biomasa. Je však

možné zplyňovat také kapalná paliva. Proces zplyňování probíhá buď při atmosférickém tlaku, či jako tlakové zplyňování při tlaku do 2,5 MPa ve zplyňovacích generátorech. Zde zplyňovaná surovina tvoří pevné lože nebo fluidní vrstvu. Do generátoru se přivádí směs zplyňované drcené suroviny, páry, vodíku a omezené množství kyslíku. V generátorech následně dochází k částečné oxidaci prvotní suroviny a ke vzniku směsného plynu obsahujícího převážně oxid uhelnatý a vodík. Oxidační reakce probíhají za teplot od 500 - 1500 °C podle způsobu zplyňování. Vzniklý plyn se zbaví SO<sub>x</sub>, množství NO<sub>x</sub> se koriguje obsahem páry a kyslíku ve směsi. Vyčištěný plyn je obvykle používán jako palivo pro kombinované paroplynové cykly, je tedy výhodné aby zplyňovací generátory byly součástí paroplynových elektráren.

## ¶ Paroplynové elektrárny

Paroplynové elektrárny se v současnosti dostávají do popředí zájmu pro svou vyšší účinnost výroby elektřiny, dosahující nad 50 % , nízkou vlastní spotřebu a pro menší ekologické zatížení prostředí. Je v nich také možno provozovat kombinovanou výrobu tepla a elektřiny. Další možností zvýšení účinnosti paroplynových elektráren je použití katalytického parního reformování na parní turbíně, kdy dochází k zušlechťování palivového plynu. Toto opatření má za následek navýšení účinnosti až na 56 %. Dále dochází k vyvíjení materiálů spalovacích komor, jež by snášely co nejvyšší teploty, čímž narůstá termická účinnost zařízení. S tímto je však spojen zvýšený vznik NO<sub>x</sub> a CO. Emise NO<sub>x</sub> a CO jsou omezovány řízením spalovacího procesu a přebytkem vzduchu ve spalovací komoře.

Současná koncepce plynových spalovacích turbín vede ke strojům s výkony v řádech stovek MW. Mezi požadavky patří také spolehlivost a jednoduchost. Uznávaným moderním provedením je turbína se spalovací komorou nevystupující z obrysu stroje. Takzvaná spalovací komora leteckého typu. Na rozšíření paroplynových elektráren budou mít vliv také limity těžby uhlí. Tyto limity stanoví množství uhlí, jež je možno vytěžit a jsou stanoveny z důvodu zabránění větších škod na životním prostředí, než je nezbytně nutné. Paroplynové elektrárny k funkci uhlí nepotřebují, na rozdíl od klasických uhelných elektráren. Nebudou-li limity těžby uvolněny, dojde k útlumu uhelných elektráren a k jejich nahrazení paroplynovými.



## Shrnutí pojmů 2.5.

Kritické a nadkritické elektrárenské bloky, fluidní spalování, paroplynové elektrárny.



## Otázky 2.5.

1. Co je pro nově stavěné tepelné elektrárny typické?
2. Co je to retrofit?
3. Čemu jsou vystaveny materiály nadkritických bloků?



## DALŠÍ ZDROJE 2

- [1] <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>
- [2] KOLCUN, Michal, Vladimír CHLADNÝ, Marián MEŠTER, Roman CIMBALA, Ján TKÁČ, Marek HVIŽDOŠ a Josef RUSNÁK. Elektrárne. Vydání 1. Košice:

Technická univerzita v Košiciach, 2006. ISBN 80-8073-704-5.

- [3] B. DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠTASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK, Zbyněk BRETTSCHEIDER. Jaderné a klasické elektrárny. Vydání I. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [4] C. KOLAT, Pavel, Václav ROUBÍČEK, Jaroslav KOZACZKA a Zbyněk BRETTSCHEIDER. Pokročilé energetické technologie - účinnost oběhu, emise a ekonomická analýza. Srovnávací studie. Vydání I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1658-6.



## CD-ROM

- **Paroplynový cyklus** - animace popisující funkci
- **Technologie výroby elektrické energie v tepelné elektrárně** - animace
- **Ekologie** - animace popisující technologie odstraňující nebezpečné látky
- **Výpočet tepelné bilance elektrárny** - program
- **Účinnost teplárny** - program

## 3. JADERNÉ ELEKTRÁRNY

### 3.1. Základní pojmy z jaderné fyziky



#### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní pojmy z jaderné fyziky
- popsat princip jaderné elektrárny



#### VÝKLAD

Jaderná energie dnes přispívá zhruba 17 % ke světové výrobě elektřiny. Pro výrobu elektřiny se jaderná energie využívá v 31 zemích. V současnosti je v provozu asi 440 jaderných energetických bloků, které vyrábějí ročně 2 300 TWh elektřiny. V procesu výstavby je dalších 40 bloků a podle scénáře mezinárodní atomové agentury IAEA je možno počítat s trvalým růstem. Jedním z nejdůležitějších přínosů využití jaderné energie při výrobě elektrické energie je snížení emisí oxidu uhličitého, který přispívá velkou mírou ke skleníkovému efektu. V roce 1996 byla celosvětová produkce CO<sub>2</sub> 22 700 Mt. Jaderná energetika snižuje tuto hodnotu v současné době o více jak 700 Mt CO<sub>2</sub> ročně. Kromě toho, výroba elektřiny z jádra přispívá k omezení dalších škodlivých atmosférických emisí a to nejen plynů, jako např. oxidu siřičitého, oxidu dusíku apod., ale i pevných látek a radioaktivních prvků obsažených v palivu.

Jaderná energie je čistá – neprodukuje CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ani popílek, nespotřebovává kyslík. Jaderná energie je kompaktní – vyrábí stabilně za každého počasí. Jaderná energie spotřebovává minimum paliva – jeden gram uranu vydá tolik energie, co tuna uhlí či ropy. Navíc je dobře zvládnutá recyklace. Jaderná energie je cenově stabilní – cena jaderného paliva nepodléhá náhlým cenovým výkyvům. Jaderná energie produkuje minimum odpadů – přibližně milionkrát méně, než odpadu ze spalování ropy, uhlí či zemního plynu. Odpad se může navíc znovu použít. Jaderná energie je levná – vysoké investiční náklady, nízké provozní náklady a dlouhá životnost. Jaderná energie je zodpovědná – jako jediný zdroj energie započítává do nákladů svého produktu i poplatky za budoucí likvidaci odpadu a zařízení. Jaderná energie je bezpečná – dvě havárie za více jak půl století provozu jaderných elektráren s bilancí 4 000 životů. Jaderné elektrárny (JE) snižují znečištění ovzduší, malé množství paliva - malé nároky na dopravu - umístění blízko spotřeby - zlepšení přenosových poměrů.

Tepelná energie v JE na rozdíl od klasických tepelných elektráren, kde se získává spalováním, může být uvolněna v průběhu jaderné reakce dvěma způsoby:

- Štěpením atomů některých těžkých prvků (U, Pu) - štěpná reakce.

- Spojováním - syntézou některých lehkých prvků (atomů těžkého vodíku) za extrémně vysoké teploty - termonukleární reakce.

Dalším rozdílem je problém jaderné bezpečnosti a doprava a uskladnění jaderného paliva (bazén 6 - 7 let, mezisklad 20 - 30 let, trvalé úložiště).

- Atom - částice skládající se z kladně nabitého jádra a záporně nabitých elektronů, které obíhají okolo, takže atom jako celek je neutrální. Atom má průměr řádově 10<sup>-10</sup> m.

- Jádro atomu - je centrální částí atomu centrální část atomu o rozměrech řádově 10<sup>-14</sup> m, která v sobě soustřeďuje téměř veškerou hmotnost celého atomu. Skládá se z kladně nabitých protonů (Z) a neutrálních neutronů (N), jež jsou společně označovány pojmem nukleon ( $A = Z + N$ ). Tyto částice k sobě poutají silné přitažlivé jaderné síly.

- Elektronový obal - obsahuje elektrony v různých vrstvách (sférách). Počet elektronů v poslední vrstvě určuje chemické vlastnosti prvků.

- Elektron - (e) je částice elektronového obalu o hmotnosti 0,00062 mu nesoucí elektrický náboj -1,609 • 10<sup>-19</sup> C.

- Neutron - (n) je částice atomového jádra bez elektrického náboje o hmotnosti 1,00897 mu (1,6747 • 10<sup>-27</sup> kg).

- Proton - (p) je kladně nabitá částice atomového jádra o hmotnosti 1,00751 mu (1,6729 • 10<sup>-27</sup> kg). Počet protonů v jádře se rovná počtu elektronů v elektronovém obalu, takže atom je navenek neutrální.

- Nukleony - částice obsažené v jádře tj. p i n.

- Atomové (protonové) číslo Z - udává počet protonů p v jádře atomu.

- Hmotnostní číslo A - udává počet nukleonů (součet protonů a neutronů) v jádře a zároveň je nejbližším celým číslem atomové hmotnosti. Počet neutronů v atomovém jádře je  $A - Z$ .

- Nuklid - soubor stejných atomů, které mají jednoznačně určený stejný počet protonů a neutronů. Nuklidy téhož prvku, jejichž atomy mají stejný počet protonů, ale různý počet neutronů se nazývají izotopy.

- Izotopy - atomy téhož prvku, které mají stejná atomová čísla Z, ale různá hmotnostní A. Např. vodík 1H1 - lehký vodík (protium), 1H2 - těžký vodík (deuterium, D), 1H3 – (tritium, T); uran 92U238, 92U235, 92U234.

- Aktivita radioaktivní látky - je veličina určená počtem radioaktivních přeměn probíhajících v látce za jednotku času. Dojde-li v látce k 1 přeměně za 1 sekundu, má aktivitu 1 Becquerel (Bq). Vzhledem k tomu, že tato jednotka je velmi malá, v praxi se můžeme setkat spíše s jednotkami (kBq, MBq, GBq, atd.).

- Radioaktivita - je vlastnost některých atomů samovolně se rozpadat (přeměňovat) na atomy jednodušší, při současném vysílání elektromagnetické záření či částic.

- Ionizující záření – tento pojem zahrnuje záření vysílaná radioaktivními látkami, rentgenové záření (paprsky X), záření vzniklé v urychlovačích částic či neutronové záření. Ionizující se nazývá proto, že při průchodu hmotou ionizuje okolní atomy, a to buď přímo, je-li záření tvořeno elektricky nabitými částicemi, tak nepřímo, jde-li o částice neutrální. Zdroje ionizujícího záření jsou buď přirozené či umělé.

- Radionuklid - je nestabilní nuklid podléhající samovolné radioaktivní přeměně.

- Radioizotop - je nestabilní izotop prvku podléhající samovolné radioaktivní přeměně.

- Radioaktivní zářič – je látka (pevná, kapalná či plynná), která je radioaktivní, tedy téměř všechny látky. Radioaktivní zářiče jsou charakterizovány jejich aktivitou. Dělíme je na otevřené a uzavřené, dle vyzařování do svého okolí.
- Značení atomů - např.  ${}^{92}\text{U}^{238}$ , ZUA.
- Atomová jednotka hmotnosti (a.h.j.)  $m_u$  - je rovna  $1/16$  hmotnosti hlavního izotopu uhlíku  $\text{C}^{16}$  ( $m_u = 1,66044 \cdot 10^{-27}$  kg).

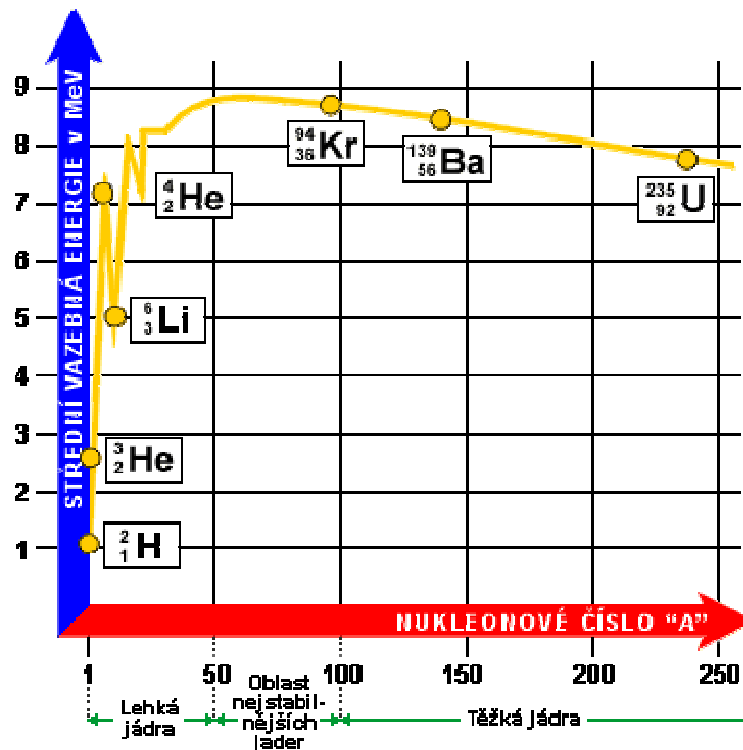
### q Vazebná energie

Přesná měření na hmotnostních spektrografech ukázala, že hmotnost atomových jader není rovna součtu hmotností všech p a n. Je vždy menší o hmotnostní defekt (schodek). Při vzniku jádra z volných nukleonů působí mezi nimi přitažlivé jaderné síly a při jejich přibližování konají práci, která se projeví úbytkem celkové energie soustavy nukleonů. Při rozdělení jádra musíme stejnou energii dodat. Velikost energie potřebné k rozdělení nukleonů je vazebná energie E a je úměrná hmotnostnímu defektu  $\Delta m$  podle Einsteinova vzorce:

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

kde c je rychlost světla jako konstanta ekvivalence hmotnosti a energie.

Pro možnost využití aspoň části vazebné energie jader není rozhodující celková vazebná energie, ale především vazebná energie, připadající na jeden nukleon. Při uvolňování energie jadernou syntézou se slučují jádra s malou energií, štěpení se uplatní u jader s velkou energií.



Obr. 3.1: Závislost průměrné vazebné energie nukleonů na počtu nukleonů



### Shrnutí pojmů 3.1.

Jaderná fyzika, štěpení, slučování jader, vazebná energie.



### Otázky 3.1.

4. Jak může být uvolněna energie v průběhu jaderné reakce?
5. Nakreslete závislost průměrné vazebné energie nukleonů na počtu nukleonů.

## 3.2. Jaderná reakce



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

- Po prostudování tohoto odstavce budete umět
- definovat základní princip jaderné reakce



### VÝKLAD

#### q Štěpení atomových jader uranu - uvolněná energie

Při štěpné reakci jádra atomu se uvolní v průměru dva až tři neutrony, které mohou vyvolat rozštěpení dalšího jádra. Tak vzniká štěpná "řetězová" reakce.

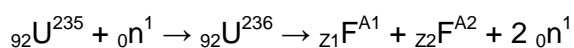
K vyvolání reakce jader s jinými jádry či částicemi musí být energie částic dopadajících na jádro terčové látky dostatečně velká k překonání Coulombových sil mezi částicí a nukleony v jádře.

Vyvolání reakcí:

- Bombardování různých látek lehkými jádry tj. protony, neutrony nebo částicemi  $\alpha$  urychlenými v cyklotronech, pokusně i  $e$ ,  $\gamma$  a  $x$ .
- Zvýšení teploty na 107 - 108 °C - částice mají dostatečnou energii k překonání vzájemného elektrostatického odpuzování. Termonukleární reakce probíhající v nitru stálíc a je zdrojem jejich ohromné energie.

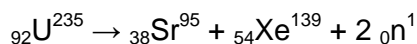
Prakticky se v jaderných reaktorech ale používá jen interakce neutronu s atomovými jádry. Neutron nemá elektrický náboj a proto nemusí při přibližování k atomovému jádru překonávat odpudivé elektrostatické síly a mohou se tak používat i neutrony s malou kinetickou energií.

Neutron předá jádru atomu energii a jádro přejde do excitovaného stavu - jádro má elipsoidní tvar a začne pulsovat, pokud je energie dostatečně velká, poruší se pevnost jádra, zvětšení Coulombovských sil, dojde k rozštěpení jádra - uvolní se  $2,5 \pm 0,1$  neutronu a částice záření.



např.





Poměrná atomová hmotnost Sr, Xe a 2 n je 235,918 mu, z toho vyplývá hmotnostní defekt  $\Delta m = 236,133 - 235,918 = 0,215$  mu.

Energie při rozštěpení 1 jádra uranu:

$$E = 931,48 \cdot \Delta m = 931,48 \cdot 0,215 = 200 \text{ MeV}$$

K rozštěpení 1 jádra U je třeba o 200 MeV menší energii než k rozdělení jader obou vzniklých štěpných zplodin.

Při štěpení se 2 - 3 n vyzáří okamžitě, ale asi 0,75 % se zpožděním několika min. Tyto zpožděné n mají energii 0,5 MeV.

Energie uvolněná štěpením:

- kinetická energie lehkého odštěpku	100 MeV
- kinetická energie těžkého odštěpku	70 MeV
- energie štěpných neutronů	5 MeV
- energie okamžitého záření $\gamma$	5 MeV
- energie radioaktivního záření odštěpků $\beta$ a $\gamma$	12 MeV
- energie neutrin	8 MeV

---

celkem 200 MeV

Kinetická energie odštěpků se projevuje jako teplo, energie záření  $\gamma$  se rychle rozptýlí a energie částic  $\beta$  ze štěpných zplodin postupně uvolňuje v průběhu jejich radioaktivního rozpadu. Energie neutrin nemůže být využita.

Počet atomů v 1 kg  $\text{U}^{235}$ :

$$N_{235} = \frac{6,0225 \cdot 10^{26}}{235} = \frac{1}{m_{235}} = \frac{1}{235 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}} = 2,563 \cdot 10^{24} \text{ (atomů} \cdot \text{kg}^{-1}\text{)}$$

Při rozštěpení 1 kg  $\text{U}^{235}$  se uvolní energie:

$$E = 2,563 \cdot 10^{24} \cdot 200 \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} = 8,21 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

$$E = 22,81 \cdot 10^6 \text{ kWh}$$

Při štěpení 1 kg za 24 h se vyvine tepelný výkon:

$$1 \text{ kg } \text{U}^{235}: P_d = \frac{22,81 \cdot 10^6}{24} = 950 \cdot 10^3 \text{ kW} \cong 1000 \text{ MW}$$

Přibližně z 1 g  $\text{U}^{235}$  můžeme dostat 1 MWd (megawattden).

Asi 10 - 20 % neutronů se pohltí bez štěpení, takže z 1 g  $\text{U}^{235}$  dostaneme 0,8 - 0,85 MWd a nebo k výrobě 1 MWd je potřeba 1,2 - 1,25 g  $\text{U}^{235}$ .

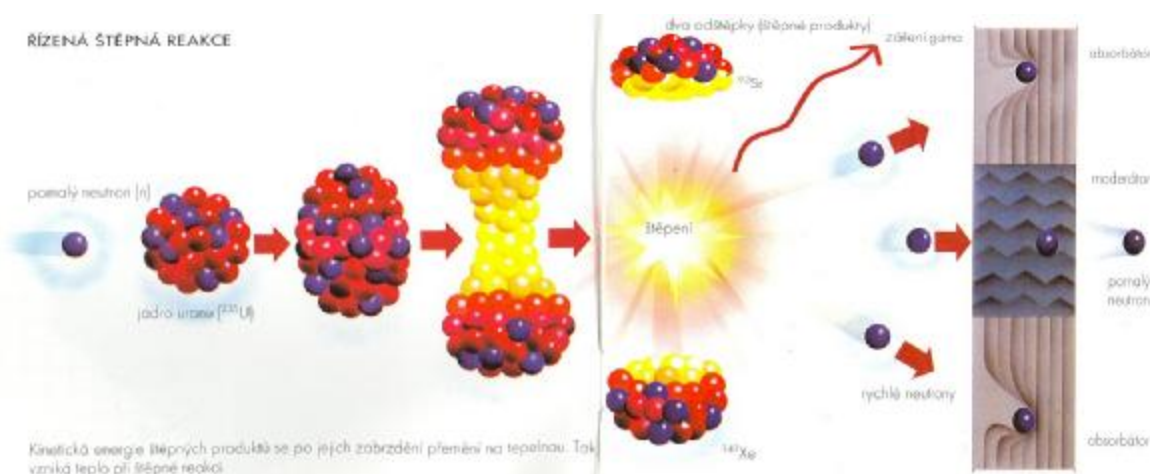
## q Řízená řetězová reakce

V palivu jaderného reaktoru, jímž bývá oxid uraničitý, směs oxidů uranu a plutonia nebo plutonium, probíhá štěpná reakce. Jádro atomu štěpitelného prvku (uranu, thoria, plutonia) se může po nárazu letícího neutronu za příznivých okolností rozštěpit. Vzniknou dvě nová jádra štěpné produkty a dva až tři nové neutrony. Štěpné produkty mají velmi vysokou kinetickou energii, narážejí do okolních jader a ohřívají tak prostředí. Tím vzniká vysoká teplota, kterou můžeme energeticky využít. Nové neutrony letí dál a mohou štěpit další jádra. Rozběhne se řetězová reakce, základ jaderné energetiky.

Izotop uranu 235 se i v přírodě samovolně štěpí na dvě lehčí jádra a jeden nebo více volných neutronů. Neutrony ze samovolného štěpení by však v reaktoru nestačily spustit řetězovou reakci. K nastartování reaktoru se používá vnější neutronový zdroj. Neutron má vysokou energii. Pravděpodobnost, že při svém letu rozštěpí jádro izotopu uranu 235 je malá, spíše se při srážce s ním jen odrazí, jako by se odrazil míček od zdi. Neutron se od jader odráží, aniž by jim předal část své velké energie, pouze mění směr letu. Aby mohl jádra štěpit, musíme ho zpomalit. Nejlépe se neutron zpomalí srážkou s jádrem, které je přibližně stejně velké, tedy např. s jádrem atomu vodíku, které tvoří jediný proton. Látce, která zpomaluje neutrony, se říká moderátor.

Rychlý neutron se změnil na pomalý neutron. Ten opět naráží na jádro uranu 235. Tentokrát se už ale neodrazí. S vysokou pravděpodobností jádro rozštěpí nastává řetězová štěpná reakce. Aby se reakce nemohla rozvíjet živelně a nekontrolovaně, je v reaktoru absorbátor, který přebytečné neutrony pohlcuje.

Štěpným materiálem v palivu v tzv. pomalých reaktorech, které jsou na světě nejrozšířenější, je izotop uranu 235. Pro tento izotop je totiž charakteristický růst pravděpodobnosti štěpení s poklesem rychlosti (energie) neutronů.



Obr. 3.2: Řízená štěpná reakce

#### q Regulace výkonu reaktoru

Tok neutronů a výkon reaktoru se reguluje malou změnou multiplikačního součinitele, tedy změnou bilance neutronů. Toho můžeme dosáhnout těmito základními způsoby:

- změnou množství paliva v aktivní zóně (homogenní reaktory),
- změnou množství absorbující látky v aktivní zóně,
- změnou úniku neutronů přemístěním části reflektoru,
- změnou množství moderátoru v aktivní zóně.

Ve všech těchto případech je rovnováha rázu dynamického a musí být udržována plynulou regulací pomocí servopohonu na základě měření toku neutronů v ionizačních komorách. K regulaci výkonu reaktoru se používá tří skupin regulačních tyčí:

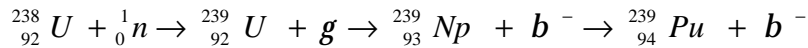
1) Regulační (řídící) tyče slouží k najíždění, odstavení a udržení konstantního výkonu reaktoru (kompenzují také vliv teplotního součinitele).

2) Kompenzační tyče kompenzují zápornou reaktivitu vzniklou vyhoříváním paliva, otravou reaktoru a roztruskováním.

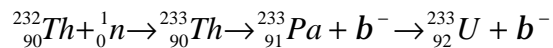
3) Havarijní tyče, které automaticky zasahují v případě náhlého zvýšení reaktoru a při ostatních poruchách reaktoru.

### q Reprodukce jaderného paliva

Reaktor může být kromě zdroje tepelné energie také zdrojem nové štěpitelné látky, tedy regeneračním reaktorem. V tepelném reaktoru s  $U^{235}$  a  $U^{238}$  se spaluje jaderné palivo  $U^{235}$  a přitom pohlcováním neutronů v  $U^{238}$  vzniká plutonium  $Pu^{239}$  podle rovnice:



Podobně v reaktoru s  $U^{235}$  a  $Th^{232}$  při spalování  $U^{235}$  a pohlcování neutronů v thoriu vzniká nové jaderné palivo  $U^{233}$  podle rovnice:



### Shrnutí pojmů 3.2.

Štěpení atomových jader uranu - uvolněná energie, řízená řetězová reakce, regulace výkonu reaktoru, reprodukce jaderného paliva.



### Otázky 3.2.

1. Napište rovnici štěpení uranu  $U^{235}$ .
2. Kolik energie se uvolní štěpením 1 jádra uranu?
3. Kolik energie se uvolní štěpením 1 g  $U^{235}$ ?

## 3.3. Popis jaderné elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat funkci základních částí jaderné elektrárny



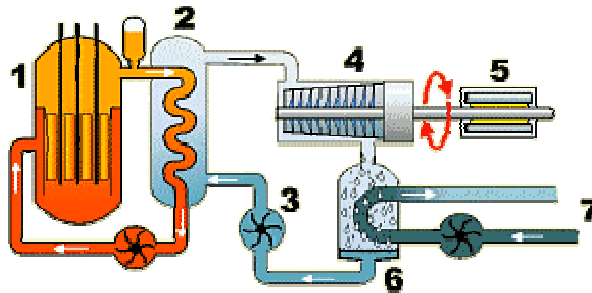
### VÝKLAD

Jaderné elektrárny jsou v zásadě elektrárny tepelné, teplo potřebné pro přeměnu vody na páru však v nich nezískáváme spalováním paliva, ale jaderným štěpením. Počínaje turbínou pohánějící generátor je jaderná elektrárna vlastně stejná jako klasická elektrárna uhelná. Jediný rozdíl - ovšem zásadní - je ve zdroji tepla.

Primární (první) okruh slouží k přenosu tepelné energie z aktivní zóny do parogenerátoru.

V parním generátoru se předává teplo sekundárnímu (druhému) okruhu. Jedná se o uzavřený systém, který brání úniku radioaktivity vně tohoto systému. Primární okruh tvoří reaktor, potrubní systémy k cirkulaci vody, parogenerátor, kompenzátor objemu a cirkulační čerpadla.

Sekundární (druhý) okruh slouží k transportu páry a k přeměně její vnitřní energie na točivý pohyb turbíny. Základní části sekundárního okruhu tvoří: sekundární část parogenerátoru, potrubní systémy sekundárního okruhu, turbogenerátor, kondenzátor a čerpadla. Jde, stejně jako u primárního okruhu, o uzavřený systém bránící případnému úniku radioaktivity.



Obr. 3.3: Schéma jaderné elektrárny - 1. Reaktor, 2. Parogenerátor, 3. Čerpadlo, 4. Turbína, 5. Generátor, 6. Kondenzátor, 7. Přívod a odvod chladicí vody

#### q Účinnost jaderné elektrárny

Vzhledem k tomu, že cena paliva není tak jako u klasických elektráren podstatnou složkou v ceně za vyrobenou kWh, není měrná spotřeba paliva základním ukazatelem hospodárnosti JE. Všeobecně rozeznáváme hrubou účinnost (brutto), tedy účinnost přeměny tepla na elektrickou energii a čistou účinnost (netto), do které je zahrnuta i vlastní spotřeba v JE. Vlastní spotřeba JE činí 15 - 20 % celkového elektrického výkonu (hlavní podíl mají oběhová čerpadla). Čistá účinnost JE se pohybuje mezi 25 - 33 %. Spotřeba paliva závisí také na hloubce vyhoření palivových článků.

#### q Jaderné reaktory

V jaderném reaktoru dochází k uvolnění jaderné energie a její přeměně na energii tepelnou. Zdrojem energie je kontrolovaná štěpná řetězová reakce v jaderném palivu. Jaderné reakce probíhající v reaktoru jsou zároveň zdrojem radioaktivního záření.

Střední hodnota energie neutronů uvolněných při štěpení je cca 2 MeV. Jsou to rychlé neutrony a k jejich přeměně na tepelné (pomalé) je potřebné snížit jejich rychlost, k čemuž slouží moderátor. Jako moderátor se využívají materiály s malou atomovou hmotností a s malou schopností absorpce neutronů. Vícenásobnými srážkami neutronů s částicemi moderátoru se energie rychlých neutronů sníží na hodnotu tepelných neutronů. Z energetického hlediska je jaderný reaktor generátorem tepla, které se uvolňuje při řetězové štěpné anebo termojaderné reakci.

Aby reaktor úspěšně fungoval, musíme do něho dát palivo, moderátor, absorbátor a chladivo, které bude odvádět teplo vzniklé při štěpení jader. Podle druhu a konfigurace (sestavení) těchto komponent se reaktory rozdělují na mnoho různých typů.

Palivo bývá tvořeno palivovými proutky. Malé tabletky paliva se poskládají na sebe, čímž vytvoří proutek o průměru asi 9 mm. Svazek těchto proutků tvoří palivovou kazetu. U reaktoru typu VVER 1000 se například v šestibokých palivových kazetách vkládá do reaktoru přes 47 tisíc proutků, v každé kazetě je jich 317. Část reaktoru, do které se vkládá palivo a kde také probíhá štěpná reakce, se nazývá aktivní zóna. Palivové proutky jsou chráněné povlakem ze speciální slitiny, nejčastěji na bázi zirkonia, která zaručí předání tepla z paliva

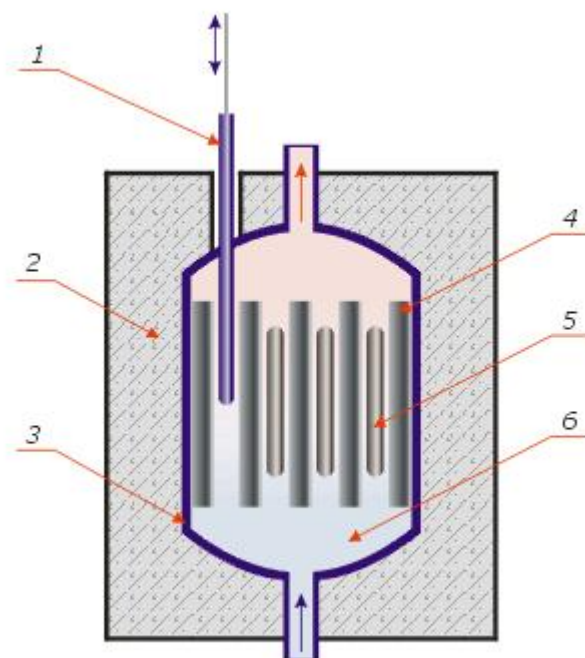
chladivu a zároveň nepropustí radioaktivní štěpné produkty. U některých typů reaktorů je palivo ve formě koulí, které se volně spouští do aktivní zóny.

Moderátorem bývá u reaktoru, kde štěpení obstarávají pomalé neutrony, nejčastěji voda, ale také grafit nebo těžká voda ( $D_2O$ ). U reaktorů, které pracují na bázi rychlých neutronů (tj. štěpitelným izotopem je uran 238 nebo plutonium), moderátor chybí.

Absorbátor se do aktivní zóny vkládá také ve formě tyčí, podobně jako palivo. Palivové kazety někdy mívají dvě části - v dolní je palivo, v horní absorbátor. Výkon reaktoru se pak reguluje výškou vytažení nebo zasunutí kazet do aktivní zóny. Pro případ okamžitého zastavení výkonu reaktoru jsou připraveny havarijní tyče. V nich bývá mnohem vyšší koncentrace absorbátoru než v tyčích regulačních.

Havarijní tyče jsou vysunuty nahoru nad aktivní zónu, kde drží pomocí elektromagnetů. V případě potřeby havarijní signál vypne elektromagnety a tyče spadnou volným pádem do aktivní zóny, čímž štěpnou reakci zastaví. U některých reaktorů se dokonce tyče do aktivní zóny vstřelují, takže jejich zásah je ještě rychlejší.

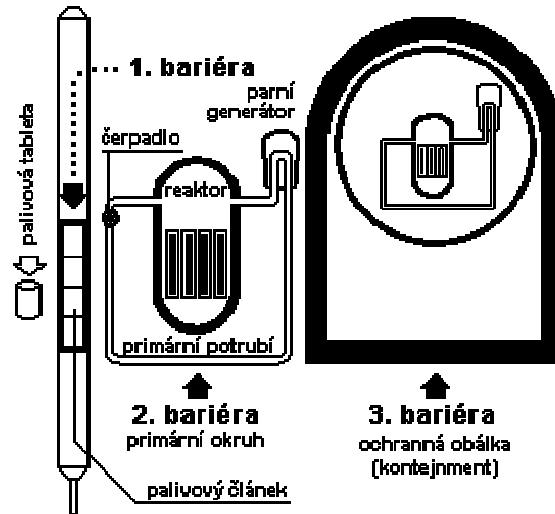
Chladivem je médium, které odvádí teplo. Při štěpení jader odletují nová jádra (štěpné úlomky), narážejí do okolních jader a svou kinetickou energii tak způsobují zahřívání okolí. Teplonosné médium odvádí toto teplo tam, kde ho můžeme využít. Štěpící se materiál je potřeba neustále ochlazovat, aby nedošlo k roztavení povlaku na palivovém proutku a úniku štěpných produktů. Jako chladivo se nejlépe osvědčuje obyčejná voda, těžká voda, oxid uhličitý, helium, sodík a některé soli nebo slitiny. Reaktory mívají jeden nebo více chladicích okruhů.



**Obr. 3.4: Základní části jaderného reaktoru (1 – řídicí a ochranné tyče, 2 - biologická ochrana, 3 – tepelná ochrana, 4 -moderátor, 5 – palivové články, 6 – chladicí médium)**

#### q Kontejnment

Kontejnment - ochranný obal ze železobetonu kolem reaktoru a primárního okruhu. Kontejnment zabraňuje "volnému" šíření radioaktivních látek do okolí při haváriích s poškozením primárního okruhu.



Obr. 3.5: Ochranné bariéry

### q Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu - je jedna z důležitých komponent primárního okruhu jaderné elektrárny. Změna výkonu reaktoru je doprovázena přechodnou nebo trvalou změnou střední teploty chladiva a v uzavřeném okruhu i změnou tlaku chladiva. Velké změny tlaku jsou z hlediska spolehlivého provozu jaderné elektrárny nežádoucí a proto se pro jejich omezení používá kompenzátor objemu, což je nejčastěji samostatná nádoba s uzavřeným pomocným objemem a s plynovým nebo parním polštářem nad hladinou chladiva.

### q Třídění jaderných reaktorů

Typy reaktorů se rozlišují různou kombinací:

- paliva - uran 235, uran 233 a plutonium 239
- chladiva - voda, těžká voda, oxid uhličitý, hélium a sodík
- moderátoru - voda, těžká voda, grafit a nebo bez moderátoru

Tepelné reaktory - štěpení jaderného paliva především tepelnými neutrony (do 1eV).

Rychlé reaktory - štěpení jaderného paliva především rychlými neutrony (nad 0,1 MeV), vzniká nový štěpitelný materiál - množinové reaktory.

Označení typu	Plný význam anglicky	Český pojem
AGR	Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	pokročilý plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
BWR	Boiling Light Water Cooled and Moderated Reactor	varný, lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
FBR	Fast Breeder Reactor	rychlý množivý reaktor
GCR	Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	plynem chlazený, grafitem moderovaný reaktor
HTGR	High Temperature, Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor	vysokoteplotní, plynem chlazený a moderovaný reaktor
HWGCR	Heavy Water Cooled, Graphite Moderated Reactor	těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
LWGR	Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor	lehkou vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor
PHWR	Pressurized Heavy Water Moderated and Cooled Reactor	tlakovou těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
PWR	Pressurized Light Water Moderated and Cooled Reactor	tlakovou lehkou vodou chlazený a moderovaný reaktor
SGHWR	Steam Generating Heavy Water Reactor	varný těžkovodní reaktor

Obr. 3.6: Označení jednotlivých typů reaktorů



### Shrnutí pojmů 3.3.

Účinnost JE, jaderné reaktory, kontejnment, kompenzátor objemu, třídění JR.



### Otázky 3.3.

1. Jaká je vlastní spotřeba JE?
2. Nakreslete základní části jaderného reaktoru.
3. Co je kontejnment?
4. K čemu slouží kompenzátor objemu?



### DALŠÍ ZDROJE 3

- [1] Brauner J., Šindler Z.: Elektrická část elektráren, VŠB Ostrava 1987  
 [2] Dočekal A., Bouček S.: Elektrárny II, ČVUT Praha 1995  
 [3] Barabas K.: Jaderné elektrárny, ČVUT v Praze, 1985



### CD-ROM

- **Detekce intenzity záření** - animace popisující měření a ochranu před zářením



## 4. VODNÍ ELEKTRÁRNY

### 4.1. Základní pojmy



#### ČAS KE STUDIU:

2 hodiny



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat jednotlivé části elektrárny
- popsat funkci vodní elektrárny



#### VÝKLAD

Vodní elektrárna představuje technologické zařízení na výrobu elektrické energie. Zařízení dokáže přeměnit potenciál vodní energie na jiný potenciál, konkrétně elektrickou energii. Vodní elektrárna se všemi příslušnými komponenty dohromady tvoří vodní dílo ve smyslu platných právních předpisů.

Hlavní část elektrárny tvoří turbína, ke které přitéká voda přívodním kanálem a turbínu roztočí. Turbína je pomocí společné hřídele spřažena s generátorem elektrické energie. Generátor společně s turbínou vytváří celek nazývaný hydroalternátor. Voda proudící přívodním kanálem představuje energii, kterou hydroalternátor mění na základě elektromagnetické indukce na elektrickou energii. Ve smyslu jde o kruhovou smyčku otáčející se v magnetickém poli, ve které se indukuje střídavé elektrické napětí. Vyrobená elektrická energie se dále transformuje na požadovanou hodnotu napětí a odvádí do míst spotřeby.

Proudící vodní energii můžeme přeměnit na jiný druh energie. Podle způsobu využívání energie následně rozlišujeme typy vodních strojů. Energie vody představuje dvě fyzikální veličiny a to proudění - energie pohybová, kinetická a tlak - energie potenciální, tlaková. Při přeměně na elektrickou energii využíváme proudění a tlak samostatně, nebo současně.

#### □ Potenciální (tlaková) energie

Vzniká získáním rozdílů potenciálů vodní hladiny, kdy z vyšší hladiny proudící voda přechází vhodným přivaděčem do potenciálu s nižší hladinou. Výškový rozdíl horní a spodní hladiny potom vytváří tlak, který se využívá ve strojích, kterým říkáme přetlakové - reakční. Patří zde turbíny typu Kaplanova, Francisova...

- polohová

$$E_h = m \cdot g \cdot H \quad (4.1)$$

kde E – energie (J), m – hmotnost vody (kg), g – gravitační zrychlení (m.s<sup>-2</sup>), H – výškový rozdíl (spád) (m).

- tlaková

$$E_p = m \cdot \frac{p}{\rho} \quad (4.2)$$

kde E – energie (J), m – hmotnost vody (kg), p – tlak (Pa),  $\rho$  – hustota vody ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

#### q Kinetická energie

Je ve vodních tocích dána rychlostí proudění. Energii využívají rotační vodní stroje založené na rovnosti tlaků, tzv. rovnotlaké stroje. Z vodních strojů jsou to hlavně vodní kola, turbíny typu Bánkiho a Peltonova

$$E_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.3)$$

kde E – energie (J), m – hmotnost vody (kg), v – rychlost vody ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

#### q Hlavní objekty vodního díla

Účelem vodního díla je soustředění vodní energie dané lokality. Vodní dílo se skládá z mnoha stavebních objektů, staveb, technologických, strojních a elektro-technických zařízení.

- Horní a dolní nádrž - u říčních vodních elektráren obě nádrže tvoří přehrada nebo jez. Nádrže obsahují regulační propustná zařízení, např. jezová tělesa pro přepouštění a vypouštění velkých vod, ledů a naplavenin. U akumulčních elektráren je horní nádrž propojena s dolní nádrží přivaděčem, ten je zhotoven pomocí tlakového potrubí.
- Vzdouvací zařízení - je tvořeno hrázemi nebo jezy. Slouží ke vzduť vodní hladiny a usměrnění vody do přivaděče.
- Hráze - vyznačují se větší výškou vzduť vodní hladiny, plochou zaplavovaného území a větším objemem zadržené vody oproti jezu. Samotné vybudování hráze je z ekologických a ekonomických hledisek velmi nákladnou investicí. Využití již stávajících hrází je mnohdy výhodné, dají se například použít jako regulace vodního toku.
- Jezy (nazývaný též splav) - slouží k vzduť vodní hladiny v říčním korytě. Obvykle je převážná část hlavního průtoku zachována a jen určitá část vody se odebírá mimo hlavní řečiště, dojde tedy navíc k zajištění volného průchodu řečištěm vodním živočichům. Jezy mají oproti hrázím nižší výšku vzduť a podstatně menší objem zadržené vody. Pro výstavbu malých vodních elektráren na řece s nižším průtokem je jez většinou nutnou podmínkou.
- Přivaděcí zařízení - koncentrují spád do místa instalace vodní turbíny, jejich úkol je tedy přivést vodu k turbíně. Tvoří je beztlakový přivaděč (budují se převážně výkopem, např. náhon, kanál či štola) nebo tlakový přivaděč tvořený obvykle šachtou, štolou (realizují se většinou ocelovým potrubím).
- Česle - zabraňují vnikání hrubých a jemných nečistot do turbíny, které z okolí přinesla voda, jsou tedy důležitou součástí vodního díla. Nejčastěji se za sebou umísťují česle dvoje, pro hrubé a jemné naplaveniny. Zhotovují se z ocelové pásoviny tvaru mříže a často jsou vybaveny automatickým čištěním.
- Odpadní kanály - vracejí vodu do původního koryta.
- Objekt vlastní vodní elektrárny - zahrnuje především strojovnu s hydraulickými a elektrickými stroji, turbínu a generátor, které jsou většinou na společném hřídeli. Hlavní stroje v sobě zahrnují např. bezpečnostní uzávěry, regulátory, kompresory,

čerpací agregáty, jeřáby atd. Součástí objektu je hlavní provozní budova, rozvodna vysokého napětí, kompresorovna a tzv. „Velín“. Velín se skládá s řídicí, regulační, měřicí a kontrolní techniky.

- Provozní a bezpečnostní zařízení - zahrnující zařízení pro bezpečný a plynulý provoz. Jde o čisticí stroje na čištění česlic, uzávěry a jejich mechanismy včetně potrubí, synchronní a zavzdušňovací ventily, šachtu vyčerpání vody a vyrovnávací komory. Komory slouží ke zlepšení regulace výkyvů vodních tlaků vyvolaných při náhlém uzavření potrubí nebo náhlém odstavení turbíny a zabraňuje postupu tlakových vln při vzniku hydraulického rázu dále do horní části přívodního potrubí..
- Speciální objekty a zařízení - zahrnují plavební komory a zařízení na splavování dřeva, rybovody, jalové výpusti s uzávěry, aj.

#### q **Objem stálého zadržení (stálá zásoba; Vst)**

Nejnižší stav (napuštění) vodní hladiny v nádrži, při tomto stavu nelze dále odebírat vodu z vodní nádrže.

#### q **Užitný obsah (objem; Vu)**

Objem vodní nádrže mezi stálou zásobou a nejvyšším provozním stavem, tedy nejvyšší provozní stav hladiny.

#### q **Retenční obsah (objem; Vr)**

Objem vodní nádrže nad užitným obsahem sloužící k zachycení povodňových vln.

#### q **Energetický ekvivalent (Eo)**

Hodnota akumulované elektrické energie v užitném obsahu.

#### q **Spád**

Představuje výškový rozdíl horní a dolní vodní hladiny. Rozlišujeme dva druhy spádu:

- Hrubý, celkový spád H<sub>b</sub> (brutto) - Celkový spád daný rozdílem horní a spodní hladiny bezprostředně pod výpustí vodního díla. Lze určit nivelačním přístrojem. Pro hrubé odhady jej můžeme stanovit z mapových podkladů.
- Užitný (čistý) spád H (netto) - Dostaneme odečteme-li od hrubého spádu hydraulické ztráty, které vznikají těsně před turbínou, za turbínou, v přivaděči a v odpadním kanále.

#### q **Průtok**

Udává celkové množství objemu vody, které proteče za daný čas daným profilem vodního toku, udává se v m<sup>3</sup>/s. Průtok lze odhadnout, vypočítat nebo přesně zjistit pomocí údajů Českého hydrometeorologického ústavu, nebo správy povodí. Nevýznamnější pro využití energie vody jsou tzv. M-denní průtoky, jenž udávají zaručený průtok vody řekou po určitý počet dnů. Výsledné hodnoty jsou obvykle uvedeny po 30 dnech v roce.

#### q **Hltnost turbíny**

Maximální průtok turbínou pro daný spád.

### q Výkon vodní elektrárny

$$P = g \cdot r \cdot Q \cdot h \cdot H \quad (4.4)$$

kde  $P$  - výkon (W),  $\rho$  - měrná hmotnost vody (1 000 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  - tíhové zrychlení (9,81 m/s<sup>2</sup>),  $Q$  - průtok vodní turbínou (m<sup>3</sup>/s),  $H$  - čistý spád (m),  $\eta$  - účinnost

### q Energetický ekvivalent objemu akumulční nádrže

Potenciální energii užitého objemu vodní nádrže.

$$E = g \cdot r \cdot V_U \cdot h \cdot H \quad (4.5)$$

kde  $V_U$  - užitečný objem nádrže (m<sup>3</sup>).



### Shrnutí pojmů 4.1.

Kinetická energie, potenciální energie, hráz, jez, česle, hltnost turbíny, energetický ekvivalent, užitečný obsah.



### Otázky 4.1.

5. Jak dělíme potenciální energii?
6. Jaký je rozdíl mezi hrází a jezem?
7. K čemu slouží česle?
8. Co je to hltnost turbíny?
9. Napište vzorec pro výpočet výkonu vodní elektrárny.
10. Napište vzorec pro výpočet energetického ekvivalentu.

## 4.2. Dělení vodních elektráren



### ČAS KE STUDIU:

2 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

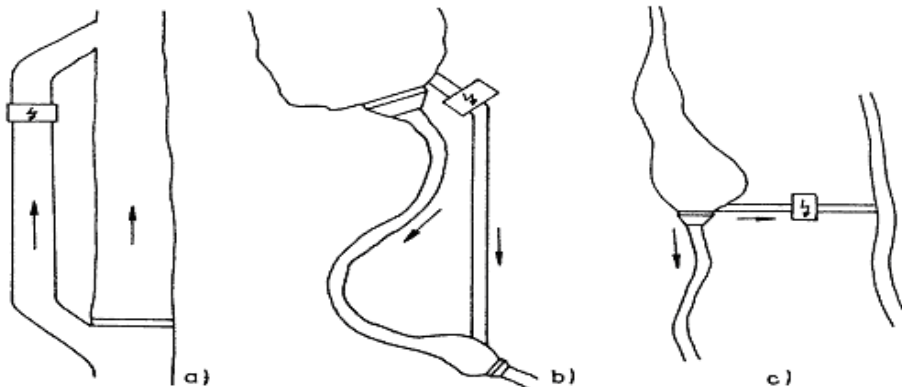
- rozdělit vodní elektrárny podle jednotlivých kritérií.
- základní typy vodních elektráren.
- popsat funkci vodní elektrárny



## VÝKLAD

### q Podle využití energie vodního toku

- říční – vodní elektrárna je umístěna přímo na korytě řeky, voda koryto řeky neopustí a proudí ihned přes elektrárnu.
- derivační – k vodní elektrárně je voda přiváděna z uměle vytvořeného kanálu, který se vybuduje vedle původního koryta. Průtok derivačním kanálem zajišťují vzdouvací zařízení a stavidla, které část vody nechají proudit v původním korytě. Derivační elektrárny nenarušují vodní tok tak, jako říční elektrárny.



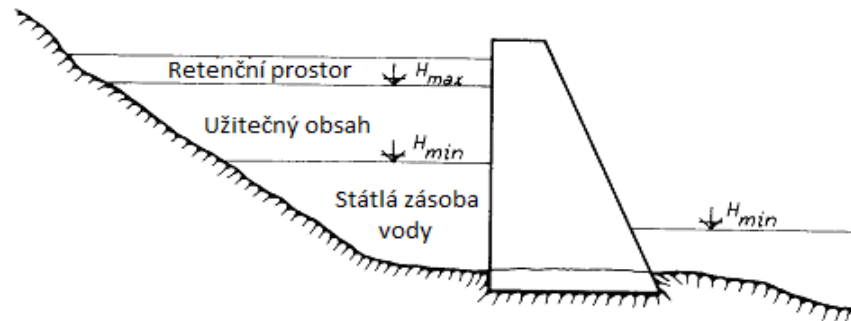
Obr. 4.1: Schéma derivačních vodních elektráren; a) Otevřený kanál; b) Tlakový kanál; c) Štolní

### q Podle velikosti spádu

- nízkotlaké – spád menší než 20 m, jsou postaveny většinou na splavu. V elektrárně jsou instalovány nejčastěji Kaplanovy turbíny,
- středotlaké – spád v rozmezí 20 až 100 m. V elektrárně jsou instalovány většinou Francisovy turbíny, méně Kaplanovy turbíny,
- vysokotlaké – spád v rozmezí 100 až 200 m. Tyto elektrárny jsou osazeny buď některým typům Francisovy turbíny nebo Peltonovy turbínou.

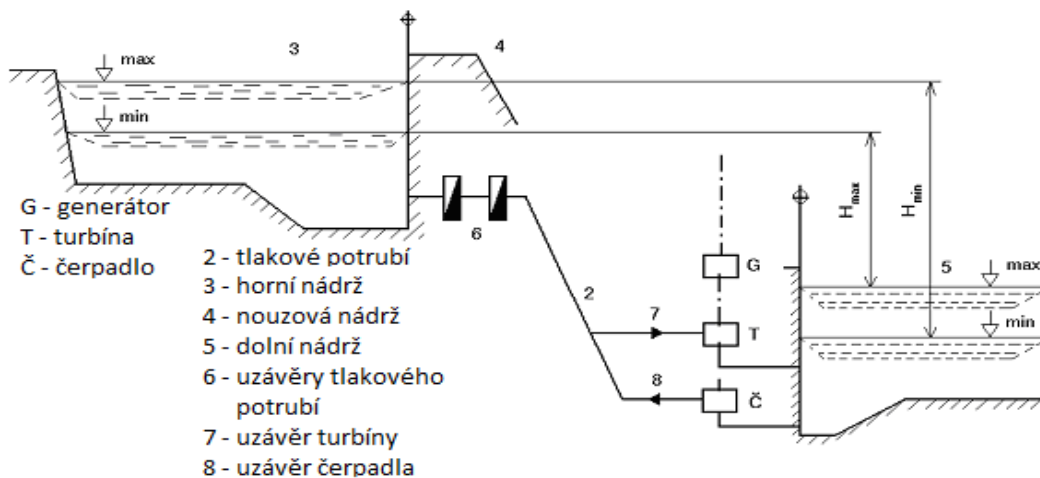
### q Podle způsobu provozu a akumulace energie:

- průtočné vodní elektrárny - nemají prostor k akumulaci vody. Budují na vhodných místech, které disponují stálým a velkým průtokem. Pracují většinou do základní části denního diagramu zatížení.
- akumuláční elektrárny s přirozenou akumulací vody - disponují prostorem ke stále zásobě vody díky hrází vybudované na vodním toku. Je nutné zajistit stály průtok, aby nedošlo k celkovému vyčerpání vody. Pracují jako špičkové nebo pološpičkové vodní elektrárny.



Obr. 4.2: Části vodního obsahu akumulární nádrže

- akumulační elektrárny s umělou akumulací vody = přečerpávací vodní elektrárny - PVE v době sníženého zatížení elektrizační soustavy uměle akumulují levnou noční energii z tepelných a zejména jaderných elektráren přečerpáváním vody z dolní nádrže do horní akumulární nádrže. Zásoby vodní energie v horní nádrži jsou využívány na výrobu elektřiny během energetické špičky.



Obr. 4.3: Řez uspořádáním přečerpávací vodní elektrárny

#### q Podle instalovaného výkonu

- velké vodní elektrárny nad 200 MW
- střední vodní elektrárny od 10 MW do 200 MW
- malé vodní elektrárny do 10 MW, průmyslové nad 1 MW, minielektrárny (drobné elektrárny) do 1 MW, mikrozdroje do 100 kW, domácí do 35 kW

#### q Podle režimu zatížení

- základní VE - jedná se o průtočné VE, které pracují po celý den (až 16 h) na krytí základní části denního diagramu zatížení,
- pološpičkové VE - pracují jako průtočné a krátkodobě jako špičkové (v dovoleném rozsahu soustředěného průtoku ve svých HN) v pološpičkové části DDZ,
- špičkové VE - pracují na krytí špičkové části.

#### q AKUMULAČNÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Disponují prostorem ke stále zásobě vody. Pro jejich funkci je nezbytně nutná hráz nebo jez vybudované na vodním toku ve vhodně položeném zeměpisném místě. Díky množství

zadržené vody můžeme dostat střední až vysoké spády a také vyšší výkony. Přehradní hráze jsou obvykle budovány do maximální výšky 100 m, mohou však dosahovat i výšky nad 300 m. V horských oblastech mezi údolím se budují tzv. údolní nádrže a umožňují instalovat vodní elektrárny ve výhodném položení. Voda je do strojovny přiváděna vysokotlakým potrubím. Vlivem vysokého spádu se vytváří vysoký přetlak až 200 Bar (20 MPa). Výkon se neodvíjí od průtoku řeky, je však nutné zajistit relativně stály průtok, aby nedošlo k celkovému vyčerpání vody. Ve strojovně pohání voda turbíny, které pohánějí generátory a vyrábějí elektrický proud.

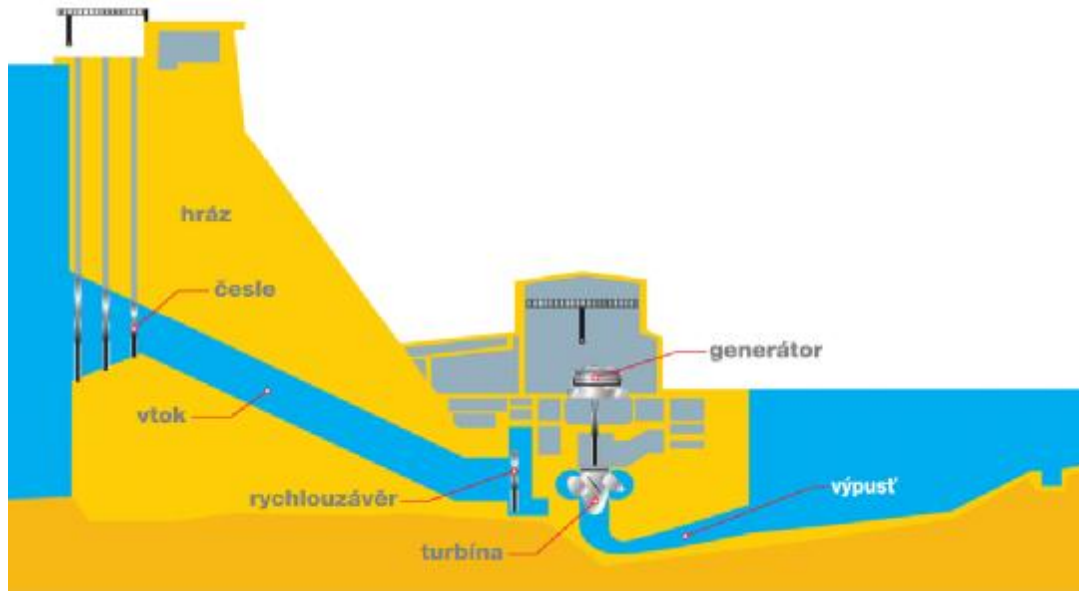
Akumulační VE představují důležitou roli nejen ve výrobě elektrické energie, spojují v sobě více úloh najednou. Mnohdy slouží pro přilehlé okolí jako zdroj pitné, technologické, nebo závlahové vody. Stabilizují průtoky vody v říčním korytě pod hrází a chrání před povodněmi, někdy také podporují plavební možnosti toku. Břehy hrází lze využít jako rekreační místo.

**Hráz** - u velkých vodních děl jde o technicky složitou stavbu protkanou sítí kontrolních chodeb. Musí se zajistit proti přelití spodními výpustěmi a horními přelivovými koryty, které zároveň umožní průběžně upravovat výšku hladiny v nádrži. Hráze lze vybudovat dvěma způsoby:

- sypané hráze – Buduje se postupným navážením materiálu, přičemž za pomoci stavebních strojů se postupně udusává a prolévá betonem. Je postavena z kusů kamenů a rozdrčených materiálů (písek, štěrk...) na zpevnění hráze. Pro dostatečnou odolnost proti tlaku akumulované vody musí být hráz dostatečně objemná. Sypaná hráz je jedna z nejpoužívanějších v České republice a je použita u elektráren např. Lipno, Slezská Harta, Dalešice (nejvyšší hráz v Česku a druhá největší sypaná hráz v Evropě).
- klenbové – proti tlaku vody odolává poměrně tenká, vyklenutá železobetonová konstrukce Železobetonová klenbová hráz vodního díla Vrchlice je jediná hráz tohoto typu na území České republiky, ta ovšem neslouží jako vodní elektrárna. Beton je výhodný pro svou vlastnost: s delším časem a velkým tlakem se jeho pevnost neustále navyšuje.

Hráz musí být opatřena spodními výpustěmi a horními přelivovými hranami, které zabraňují přelití vodní hladiny při velkém přítoku vody. Tyto opatření také umožňují průběžně upravovat výšku vodní hladiny. Pod hráz se zároveň buduje speciální nádrž tzv. vývařiště, které slouží k pohlcení odcházející vody z nádrže a zároveň slouží jako energetický tlumič. Odtékající voda z turbíny je energeticky bohatá a dosahuje často velkých rychlostí, proto se v tomto vývařišti voda zklidní a dále postupuje do řečiště bez dalších škodlivých následků.

Umístění vlastní elektrárny je různé. Zásadou ovšem zůstává, využít zadržanou vodu s maximální účinností. Záleží na tvaru terénu, výškových a spádových možnostech a na množství vody, které je k dispozici.



Obr. 4.4: Princip akumulační vodní elektrárny

#### q PRŮTOČNÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY

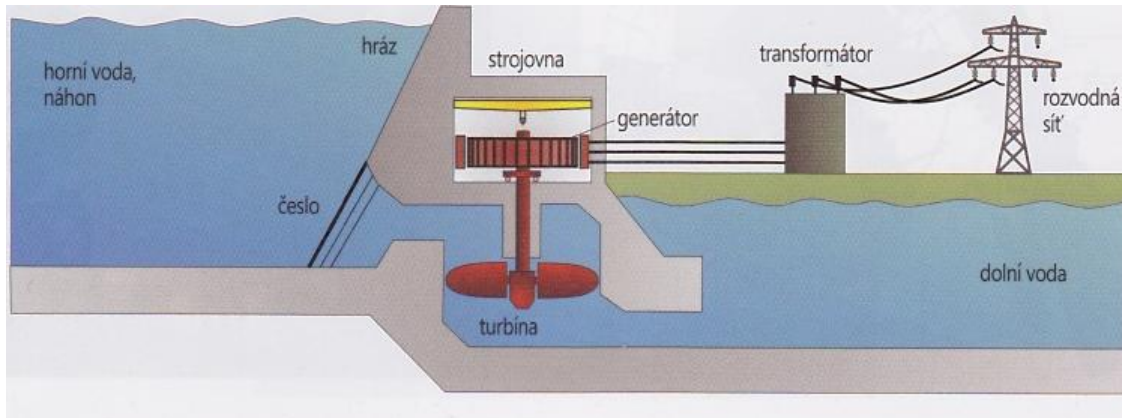
Místa s velkým průtokem a velkým výškovým rozdílem jsou ideální pro vybudování průtočné elektrárny. Pro funkčnost elektrárny je potřeba menší hráz nebo jez, ty vytvoří vzdutí, tím se přímo vytvoří rozdíl výšky hladiny před a za elektrárnou. Na vzdouvacím stupni voda teče na turbínu a ta pohání generátor. Elektrárna pracuje bez akumulace, přesněji „doba naplnění nádrže kumulací vodního průtoku je prakticky zanedbatelná a využívá pouze momentální množství vody protékající řečištěm“.

Vlastní vzdutí zajistí množství vody, na něž je elektrárna dimenzována, aby se hltlost turbíny blížila k maximu. Je – li průtok vyšší, než maximální hltlost turbíny, zbylá voda protékající jalově přes jez. Pro co neefektivnější využití průtoku se větší elektrárny konstruují s více turbínami a voda pohání několik turbín běžících paralelně. Nastane-li nízký stav vody, vysadí se některé turbíny. Toto opatření zabraňuje poklesu účinnosti turbín při částečném provozu.

Průtočné vodní elektrárny nedosahují velkých výkonů, protože spád není příliš velký, dosahuje jen několika metrů, z tohoto důvodu mají výkon do 100 MW. Nevýhodou je špatná regulace výkonu, protože se v řece nedá proud vody snížit a mohou do sítě dodávat pouze tzv. hodinový proud. Přebytečné množství vody se musí nechat nevyužitě protéct elektrárnou.

Elektrárny mohou představovat překážku pro lodě i vodní živočichy z důvodu přítomnosti jezů a přehrad. Obvykle se proto musí vybudovat plavební komora pro lodě k překonání výškového rozdílu a komůrkový rybí přechod pro vodní živočichy. Průtočné vodní elektrárny pracují v základní části denního diagramu zatížení.





Obr. 4.5: Princip průtočné vodní elektrárny

## q PŘEČERPÁVAJÍCÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Představují nezastupitelnou roli mezi zdroji v elektrizační soustavě. V současné době nedokážeme elektrickou energii ve velké míře skladovat, proto musí elektrizační soustava v určitém okamžiku dodávat tolik energie, kolik zrovna činí poptávka. Přečerpávající vodní elektrárny proto vznikly na krytí a regulaci aktuální spotřeby elektrické energie. Tento typ regulace spotřeby sítě můžeme chápat jako dočasné uložení elektrické energie. Náklady na stavbu elektrárny jsou značně vysoké, ale i přesto se pohybuje návratnost této investice okolo 7-mi let provozu. (např.: návratnost PVE Dlouhé Stráně činila cca 6 let). I přes danou skutečnost drahé investice mají proti jiným typům elektráren mnoho výhod.

Pro funkci elektrárny je nutné předem vybudovat dvě nádrže se vzájemným výškovým rozdílem podle požadovaného výkonu. Výškový rozdíl hladin by měl být co největší, pro dosažení velkého spádu a výkonů. Pro výstavbu potřebují velmi příznivé geografické podmínky. Je nutný přirozený přítok vody, jenž vyúsťuje do spodní nebo horní nádrže podle dané lokality. Mohou však existovat tzv. čistě přečerpávající přehrady, které nemají přirozený přítok vody. Elektrárna plní hlavní základní funkce:

- Statická funkce (tzv. akumulátor)

Nastává, když potřebujeme dodávat elektrickou energii do sítě nebo naopak spotřebovat přebytek elektrické energie v síti. Při generátorovém režimu turbína odebírá energii vodě a alternátor dodává energii přes transformátor do sítě. Voda přitéká z horní nádrže tlakovým potrubím k turbíně a následně odtéká do nádrže spodní. Při reverzním, čerpadlovém režimu elektrárna odebírá energii ze sítě, elektrický stroj pracuje jako elektromotor pohánějící turbínu, která čerpá vodu ze spodní nádrže do horní. Tento režim se používá při přebytku elektrické energie v síti. Tento okruh nazýváme malý přečerpávací cyklus PVE. Využívá se rozdílu v ceně elektrické energie, která je v době špičky přibližně čtyřikrát dražší než v době nízké spotřeby.

- Dynamická funkce (tzv. krytí rychlých výkyvů)

Schopnost elektrárny plnit funkci rezervního výkonného zdroje systému.

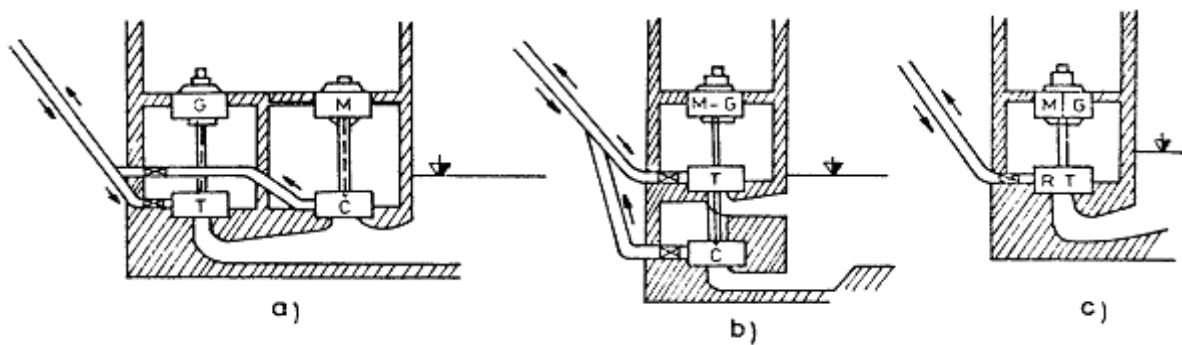
- Regulační funkce

Elektrárna se podílí na regulaci napětí v síti.

### Dělení dle strojového uspořádání:

- Čtyřstrojové uspořádání, je tvořeno soustrojími turbína-alternátor a elektrický motor s čerpadlem. Toto řešení je historicky nejstarší.

- Třístrojové uspořádání, je tvořeno motorgenerátorem, turbínou a akumulčním čerpadlem.
- Dvoustrojové uspořádání je tvořeno motorgenerátor s reverzní turbínou. Soustrojí může vzhledem k elektrizační soustavě pracovat buď jako zdroj, spotřebič nebo synchronní kompenzátor pro dodávku či odběr jalové energie. Předností dvoustrojového uspořádání jsou především nižší investice.

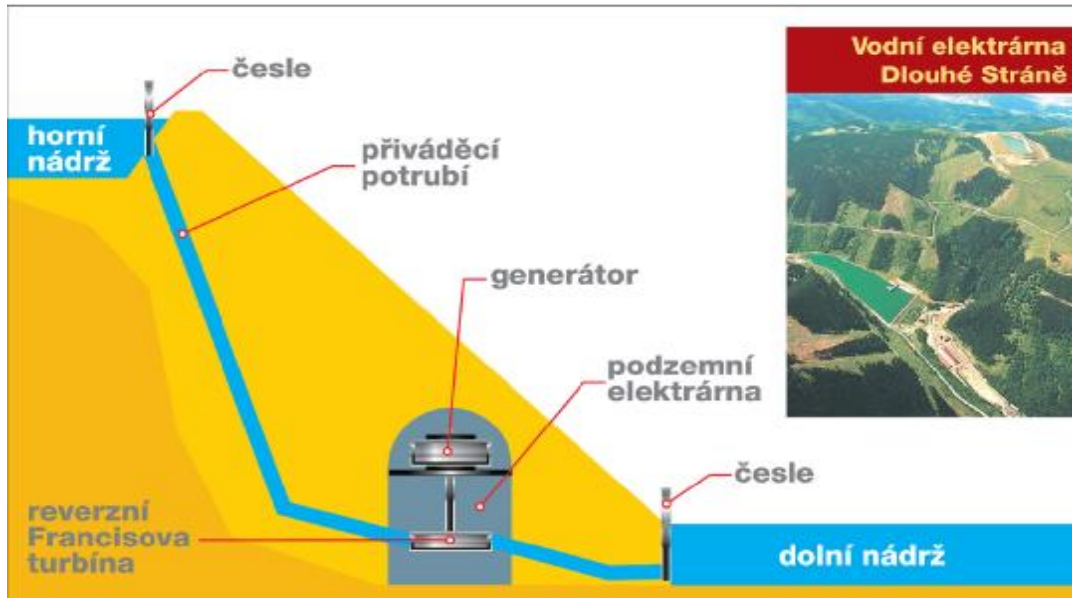


**Obr. 4.6: Uspořádání strojů v PVE**

Všechny tři přečerpávací vodní elektrárny nacházející se na území ČR (PVE Dlouhé Stráně, PVE Dalešice a PVE Štěchovice II o celkovém instalovaném výkonu 1 145 MW) jsou provedeny v tomto uspořádání. Moderní a nově vybudované elektrárny vykazují účinnost malého cyklu mezi 70 – 80 %.

Účinnosti malého cyklu rozumíme bez uvažovaných ztrát přenosem energie k zákazníkovi a ztrát od zdroje k čerpadlu. Motorický chod spotřebuje velké množství energie, zpětně lze díky generátorickému chodu získat přibližně 70 % elektrické energie (z vynaložené 1,3 kWh dostaneme 1 kWh). Navzdory vzniklých ztrát tohoto principu, jsou tyto elektrárny ekonomicky velmi atraktivní. Právě při čerpání do horní nádrže využívají levnou energii v době přebytu elektrické energie (např. v noci). V době špičky, kdy vznikne v síti potřeba většího množství energie (ranní hodiny), dochází ke zpětné dodávce do sítě. Vyrobena energie se zpětně dodává do sítě za výrazně vyšší ceny. Přečerpávací vodní elektrárny dostaly svého působení hlavně v posledních letech, kdy výkon dodávaný do sítě z větrných a fotovoltaických elektráren značně kolísá a je nutné ho regulovat, tuto úlohu regulace přečerpávací elektrárny mohou zastat.

Výhodou elektráren je velmi rychlý rozběh a spuštění turbíny. Okamžité plné najetí elektrárny a samotná dodávka elektrické energie do soustavy obvykle trvá jen několik minut.



Obr. 4.7: Princip přečerpávací vodní elektrárny



### Shrnutí pojmů 4.2.

Akumulační vodní elektrárna, průtočná vodní elektrárna, přečerpávací vodní elektrárna.



### Otázky 4.2.

11. Vymenujte základní typy vodních elektráren.
12. Co znamená pojem statická a dynamická funkce u PVE?
13. Jaké strojové uspořádání PVE je dnes nejčastější?

## 4.3. Vodní turbíny



### ČAS KE STUDIU:

2 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat základní typy turbín
- pro dané podmínky vybrat vhodnou turbínu
- pochopíte princip funkce turbín



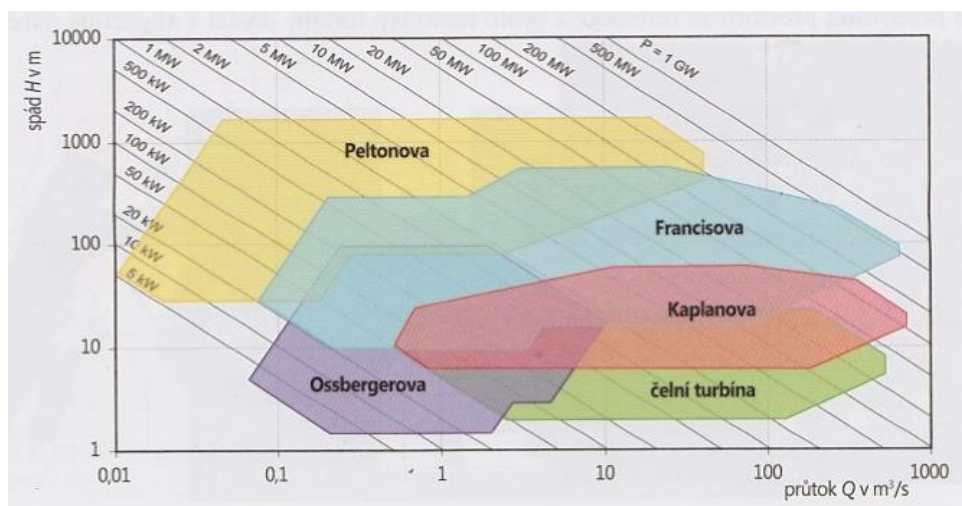
### VÝKLAD

Pro neefektivnější využití daných podmínek elektrárny, je nejdůležitější výběr vhodné turbíny. Vodní turbíny jsou technicky nejdokonalejší mechanické motory vůbec, dosahují až 95 % účinnosti. Česká republika využívá nejčastěji turbíny reakčního typu, konkrétně Francisova nebo Kaplanova turbína, které se používají v bohaté paletě modifikací a pro dané podmínky českých řek jsou nejvyužitelnější.

Vodní turbíny jsou jádrem celé vodní elektrárny, jedná se o točivý mechanický stroj, sloužící k přeměně energie proudící vody na energii elektrickou pomocí odebrání energie vody.

Průkopníkem a zakladatel podkladů teorie turbín byl fyzik švýcarského původu Leonhard Euler 18 století. Z poznatků švýcarského fyzika vycházel francouzský technik Benoit Fourneyron, který sestrojil první přetlakovou vodní turbínu v roce 1827. O dvacet let později se úspěšně zdařilo sestavení Francoisovy turbíny, která pracuje opět na přetlakovém systému. V roce 1880 sestrojil jednoduchou turbínu američan Lester Pelton. Turbína pracovala na principu rovnosti tlaku, jde tedy o rovnotlakou turbínu zvanou peltonova V roce 1918 se poprvé vyrobila rychloběžná kaplanova turbína, kterou zkonstruoval Viktor Kaplan. Uvedené tři typy turbín představují dnes hlavní předpoklad přeměny vodní energie.

Současné vodní turbíny mají málo společného s historickými vodními koly. Výběr typu turbíny závisí na specifikacích místa instalace vodní elektrárny. Důležitými parametry pro výběr je spád vody a množství jejího průtoku, podle těchto parametrů se volí optimální turbína.



Obr. 4.8: H-Q diagram, zobrazující oblast optimálního využití různých vodních turbín

#### Hlavní dělení

- akční turbíny – využívají pouze kinetickou energii vody, turbíny jsou rovnotlaké. Voda je na turbínu přiváděná z určité výšky, můžeme si celý systém představit jako typ náhonu na vodní mlýnské kolo.
- reakční turbíny – využívají kinetickou tak i tlakovou energii vody. Turbíny jsou zásadně přetlakové, využívají rozdílného tlaku kapaliny před turbínou a za turbínou. Voda je před turbínou určitého tlaku, vstoupí do turbíny, turbínu roztočí a postupně při průchodu dále se tlak vody snižuje. Výsledný tlak je vyšší před turbínou.

#### Vedlejší dělení

- radiální,
- axiální.

**Podle celkové konstrukce:**

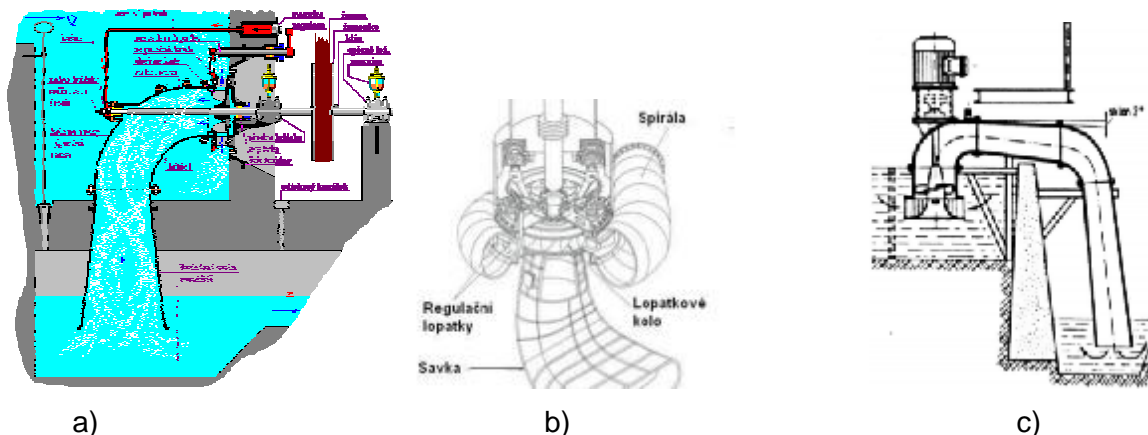
- Peltonova turbína
- Francisova turbína
- Kaplanova turbína
- Bánkiho turbína

**Pro malé vodní elektrárny**

- Francis - kašnová – horizontální (s mokrou sávkou, se suchou sávkou), vertikální (spirálová)
- Kaplanova – horizontální, vertikální, násosková , přímoproud
- Bánkiho ( moderní Ossbergerova turbína )
- Peltonova

Dnes Francisova není pro MVE příliš účinná, náhrada vesměs kaplanovou turbínou.

Uvedené typy turbín jsou základní, samozřejmě existují různé modifikace a řešení.



Obr. 4.9: Příklady turbín pro MVE: a) kašnová s mokrou sávkou, b) kašnová spirálová, c) násosková

**q Peltonova turbína**

Peltonova turbína je tangenciální rovnotlakou turbínou dosahující až 95% účinnost. Turbína má po obvodu misky, ke kterým je tečně z trysek (tzv. dýz) přiváděná voda. Voda nedopadá na turbínu tedy po celém obvodu, ale vstupuje do turbíny pouze v některých částech. Dýza je zařízení kruhového průřezu sloužící k omezení průtoků kapalin, její průběh se plynule mění. Vtoková hrana je zaoblená a výtoková hrana je ostrá. Z dýzy již kruhovým potrubím proudí voda k lopatkám lžičkovitého tvaru. Potrubí může být rozvedeno do více částí a voda tak dopadá na více lopatek současně. Lopatky jsou nastaveny kolmo na směr toku vody a tak dojde k jejímu otočení vlivem tlaku. Kruhový pohyb turbíny se přímo předává na hřídel alternátoru, který vyrábí elektrickou energii. Peltonova turbína je neefektivnější v případě vysokého tlaku přivodní vody. Jelikož voda proudí k lopatkám turbíny přes dýzu, je možno provést její optimální regulaci průtoku a tím měnit působící tlak na turbínu. Regulace průtoku vody probíhá změnou výtokového průřezu dýzy zasouváním regulační jehly, kterou ovládá servomotor. Pro potřebu rychlého snížení výkonu turbíny je možno přiváděcí potrubí odklonit a zajistit, aby voda nedopadala na lopatky turbíny. Otáčející se turbína je přímo spojena s rotorem alternátoru.

Z H-Q diagramu vyplývá, že peltonovy turbíny se používají pro vysoký spád vody a malý průtok. Vyrábějí se v mnoha velikostech, nejmenší turbíny měří jen několik desítek centimetrů, používají se pro malé vodní elektrárny s velkým spádem. V energetice se využívá vertikální uložení, přičemž výkon dosahuje až 200 MW. Rozsah použití je od 15 m až po 1800 m.

#### q Francisova turbína

Francisova turbína je podtypem vodní turbíny, vyvinuté James B. Francisem. Jedná se o přetlakovou turbínu zdokonalenou z vodního kola o celkové účinnosti 90%.

Francisova turbína má dvě varianty podle uložení hřídele:

- Vertikální
- Horizontální

Francisova turbína je založena na přetlakovém principu, tedy kapalina během své cesty potrubím předává energii turbíně, díky změně tlaku. Před turbínou se nachází zúžující se přívod s vysokým tlakem vody a za turbínou je kuželovitě rozšiřující se sávka s nízkým tlakem, ze které již voda s minimem energie (rychlosti) vytéká. Vedle turbíny se instalují rozváděcí lopatky řízené regulátorem, které jsou umístěny po celém obvodu potrubí a slouží pro směřování toku vody na rotor turbíny. Rotující voda pod tlakem přispívá k efektivitě turbíny. Proudící voda nasměrovaná rozváděcími lopatkami vstupuje do oběžného kola turbíny. V oběžném kole dopadá na zakřivené mezilopátkové kanály, mění směr i rychlost a postupně předává svou rotační rychlost i tlak rotoru.

Důležité je zde zmínit kavitační jev: „Kavitace vzniká při poklesu tlaku v kapalině, přičemž vznikne imploze (opak exploze, těleso nebo hmota se zborstí do vlastního objemu). Tenhle pokles tlaku bývá způsoben lokálním zvýšením rychlosti (tzv. hydrodynamická kavitace). Kavitace je zpočátku vyplněna vakuem, později do ní mohou pronikat plyny z okolní kapaliny. Když zmizí podtlak, který kavitaci vytvořil, její bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál. Vzniká například na lopatkách vodních šroubů, turbín na čerpadlech a dalších zařízeních, která se velkou rychlostí pohybují v kapalině. Kavitace způsobuje hluk, snižuje účinnost strojů a může způsobit jejich poškození. Na vznik kavitace má vliv především velikost podtlaku, soudružnost (povrchové napětí) kapaliny a teplota (čím je nižší, tím je menší kavitace).“



**Obr. 4.10: Kavitace na oběžném kole Francisovy turbíny**

Francisova turbína patří mezi nejpoužívanější. Turbinu je totiž možno použít pro střední a větší průtoky i spády. Francisovy turbíny jsou časté zejména u přečerpávacích elektráren.

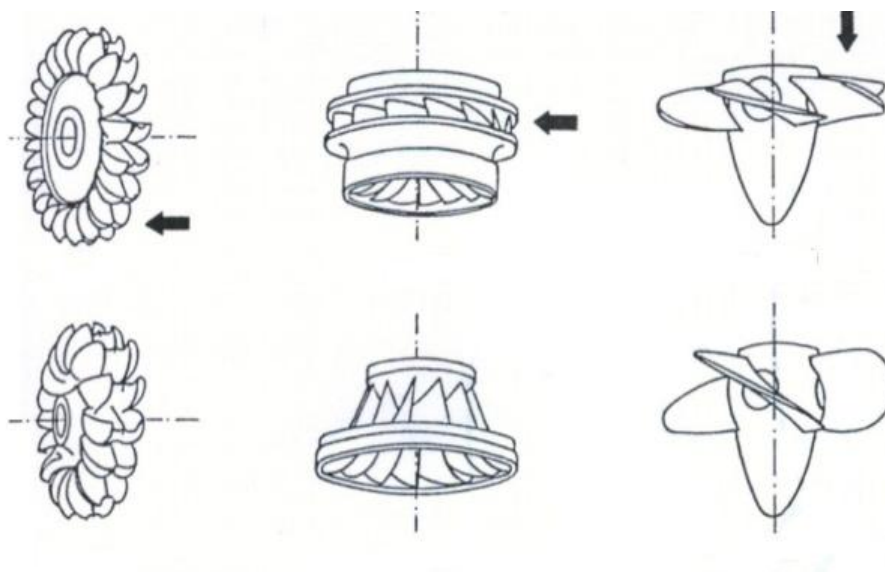
Například největší naše přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně používá dvě Francisovy turbíny o výkonu 325 MW.

#### q Kaplanova turbína

Turbínu vynalezl profesor brněnské techniky Viktor Kaplan (rakouský občan). Od Francisovy turbíny se liší menším počtem lopatek a tvarem oběžného kola.

Kaplanova turbína je přetlaková axiální turbína. Opět musí k funkci využívat rozvaděcí lopatky. Největší předností turbíny je především její možnost dobře regulovat náklon lopatek oběžného i rozvaděcího kola. Turbína disponuje třemi až osmi nastavitelnými lopatky a vypadá jako velký lodní šroub, který pohání protékající voda.

Často se používá v místech, kde není možné zajistit vyšší spády a průtoky, díky možnosti velmi dobré regulace. Obecně se používá především při velkých průtocích a malých spádech, které nejsou konstantní. Turbína lze osadit i do malých strojoven, má malou stavební výšku. Nevýhodou turbín s dvojitou regulací je značná mechanická složitost, díky tomu je cena vysoká a je třeba uvažovat i vyšší náklady na údržbu. Proto je nutno zvážit instalaci této turbíny spíše pro výhodné hydroenergetické potenciály. Tato turbína stala nejvýznamnějším typem turbíny užívaným ve velkých vodních elektrárnách po celém světě.



Obr. 4.11: Zleva: Peltonova turbína, Francisova turbína, Kaplanova turbína



#### Shrnutí pojmů 4.3.

Peltonova turbína, Francisova turbína, Kaplanova turbína, kavitace.



#### Otázky 4.3.

1. Vyjmenujte základní typy turbín.
2. Která turbína je vhodná pro velké spády?

#### 4.4. Současné trendy VE



## ČAS KE STUDIU:

1 hodina



## CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- odhadnout vývoj vodních elektráren.
- vyjmenovat nové typy vodních elektráren



## VÝKLAD

Současný trend vývoje vodních elektráren se především zaměřuje na rozšiřování MVE a jejich rekonstrukci. Tímto krokem lze docílit výrazného zvýšení kapacity a zásobovat tak několik tisíc domácností. Elektrárny se díky rozvoji elektroniky mohou pochlubit automatickým řízením a dálkovým ovládáním. Lokality na výstavbu velkých VE jsou v podstatě pro ČR vyčerpány nebo je jejich nákladnost na realizaci značně vysoká. V roce 2011 vyšla studie ministerstva průmyslu a obchodu, že Česká republika má v plánu postavit další přečerpávací elektrárnu, je vybráno celkem 6 vhodných lokalit. Výstavba se však pohybuje v rozmezí desítek miliard Kč a měla by být hrazena ze soukromých fondů investorů, jelikož skupina ČEZ výstavbu neplánuje. Mělo by se jednat o moderní elektrárnu k regulaci výkonu, jelikož stále počte počet připojených obnovitelných zdrojů do distribuční sítě.

Ve světě je mnoho vhodných lokalit také vyčerpáno a proto se objevuje spousta studií na nové i upravené principy stávajících VE (např. využití horských pramenů, elektrárna na principu vodního víru) pro jejich maximální účinnost. Velký rozvoj je v Číně, kde se schválilo v roce 2006 postavit nejméně 13 nových elektráren o celkovém výkonu 20 GW. V dnešní době se začíná objevovat spousta studií o využití vodárenství pro MVE o výkonu do 1 kW, nové turbíny a využití VE na principu větrných elektrárnách v přímořských oblastech či hlubokých řekách. Objevují se projekty na realizaci v méně výhodných lokalitách. Navíc rozvoj MVE přispívá ke stabilitě soustavy, jelikož dodávku není nutno daleko dopravovat a nevznikají velké ztráty. Jedním z příkladů využití i méně vhodnou lokalitu realizovali v Kanadě, projektanti využili horského průtoku řeky, svedli ji nehostinnou krajinou pomocí potrubí do údolí, kde roztáčejí dvě vodní turbíny.

### q Vírová turbína

Turbína byla vyvinuta vědeckým týmem v roce 2000, její celkovou problematiku a konstrukci se podařilo plně vyladit v roce 2001. Jedná se o nový typ řešení vrtulové vodní turbíny s dvouloupatkovým oběžným kolem bez rozvaděče. V důsledku se jedná o úpravu Kaplanovy turbíny, která má ovšem vyšší otáčky a mnohdy nepotřebuje převody. Absence rozváděcích regulačních kruhů, jenž jsou náročné na výrobu a používá se u Kaplanovy turbíny, vedla k velkému snížení pořizovací ceny, což podporuje budoucí rozvoj MVE. Turbína je projektovaná pro velmi nízké spády 1-3 m a velké průtoky. První studie proběhly v roce 2000 při spádu 2,5 m, turbína vykázala účinnost 86 %. Při vyšších spádech již tato účinnost klesá.

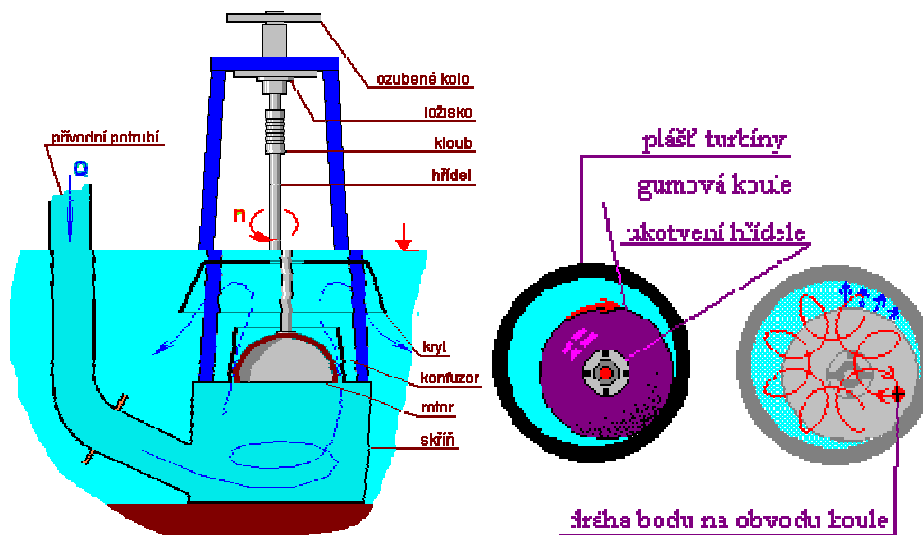




Obr. 4.12: Vířová turbína

#### q Vodní motor SETUR:

Jedná se o vertikální bezlopatkový vodní motor vynalezený v ČR. Pracuje na principu odvalování rotačního tělesa ve výtokovém konfuzoru. Může využívat jako pracovní médium vodu nebo plyny. Princip funkce tohoto odvalovacího tekutinového motoru se značně liší od ostatních turbín. Funkce je založená na tzv. hydrodynamickém paradoxu. To je jev, který způsobuje, že koule (nebo jiné zakřivené těleso) je přitahováno ke stěně tím více, čím rychleji mezi ním a stěnou proudí kapalina. Koule je zavěšena pružně a tangenciálně vstupující voda způsobí rotaci koule. Vlivem celkového proudění kapaliny nabírá koule rotaci a postupně se pohybuje po celém obvodu. Využití nachází v dosud nevyužívaném hydrodynamickém principu, např. vodovody a kanalizace až po menší přehradní nádrže. Účinnost podle provedení od 40 až do 75 % pro nejrůznější spády od 0,6 m do 20 m při průtoku od 4 – 500 litru/s. Výkon motoru se pohybuje od 0,075 – 7 kW.



Obr. 4.13: Vlevo: princip funkce vodního motoru SETUR , Vpravo: pohyb rotoru

#### q Vířová elektrárna

Rakouský vynález ve fázi prototypu. Spád 0,5 – 2 m, výkon 0,2 – 160 kW



Obr. 4.14: Vlevo: vírová elektrárna , Vpravo: Zotlöterer turbína

#### q Využití MVE ve Vodárenství

Významnou příležitostí je výstavba MVE vodárenskými společnostmi a využití hydroenergetického potenciálu přiváděné vody. Proto některé z vodárenských společností v ČR přistoupily k využívání této energie a vybudovaly MVE na přiváděcích vody do úpravnen nebo vodojemů.

Nejjednodušší soustrojí sestává z asynchronního generátoru a upraveného vhodného čerpadla pracujícího v turbínovém režimu.

V ČR se nachází cca 30 MVE ve vodárenských soustavách a celkem vyrobí cca 25 GWh. Součtový instalovaný výkon těchto MVE je cca 8 MW. Ekonomická návratnost je okolo 4 let, navíc MVE Napomáhá provzdušnění a mísení činidel na úpravu vody.



#### Shrnutí pojmů 4.4.

Vírová turbína, turbína Setur, vírová elektrárna.



#### Otázky 4.4.

1. Ze kterého typu turbíny vychází konstrukce vírové turbíny?



#### DALŠÍ ZDROJE 4

- [1] Holata, Miroslav. Malé vodní elektrárny - projektování a provoz. Academika, 2002, 271str. ISBN: 80-200-0828-4
- [2] MOTLÍK, J. a kol. Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice: studie analyzuje současný stav a předpoklady rozvoje v dlouhodobějším horizontu. Praha: ČEZ, 2007. 183 s.
- [3] ČEZ. Princip fungování vodní elektrárny [online].[cit. 2011-10-14]. Dostupný z: <<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/flash-model-jak-funguje-vodni-elektrarna.html>>
- [4] Vodní turbíny [online].[cit. 2011-10-16]. Dostupný z: <<http://vodniturbiny.cz/index.php?linkid=00>>
- [5] BRAUNER, V., KRBEČEK, P. Francisova turbína. [online].[cit. 2011-10-16]. Dostupný z: <<http://www.fs.cvut.cz/stretech/2009/pdf/1067.pdf>>
- [6] Vodní turbíny [online].[cit. 2011-10-16]. Dostupný z: <<http://www.vodni->

elektrarny.cz>

[7] ABECEDA MALÝCH VODNÍCH POHONŮ. Turbína Setur [online].[cit. 2012-3-30]. Dostupný z: <<http://mve.energetika.cz/jineturbiny/setur.htm>>



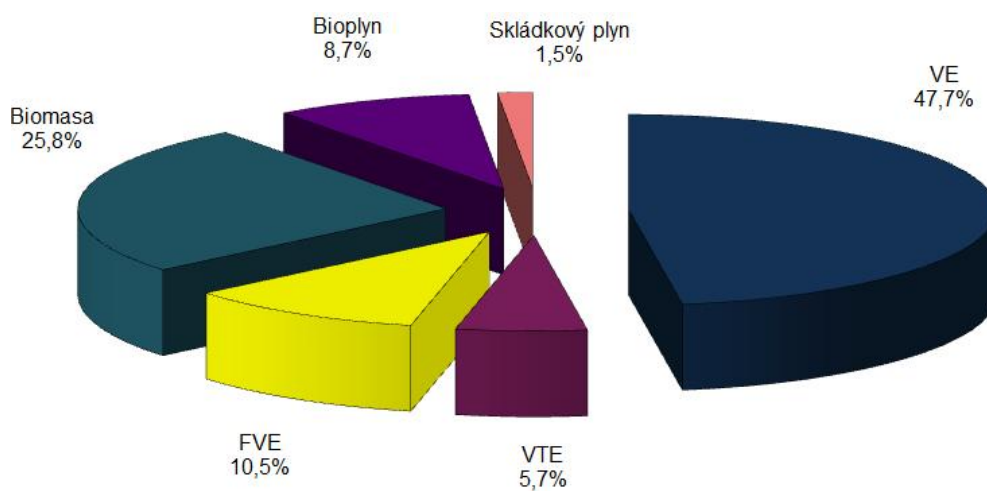
## CD-ROM

- **Účinnost vodní elektrárny** - program na výpočet účinnosti
- **Účinnost přečerpávací vodní elektrárny** - program na výpočet účinnosti







## 5. NETRADIČNÍ ZDROJE

Podíl obnovitelných zdrojů energie (OZE) na spotřebě elektřiny brutto v ČR

- Tuzemská spotřeba elektřiny brutto ČR v roce 2010 = 70 961,7 GWh
- Podíl OZE na tuzemské spotřebě brutto = 8,24 %



Obr. 5.1: Členění využití jednotlivých OZE v ČR

	Výhody	Nevýhody	Omezení
<b>Biomasa</b> 	Spalování cíleně pěstované biomasy nezvyšuje emise CO <sub>2</sub> do ovzduší; možnost využití biomasy pro výrobu biopaliv.	Emise NO <sub>x</sub> do ovzduší v průběhu spalování; využívání zemědělské plochy pro pěstování biomasy.	Potřeba zemědělské plochy pro produkci biomasy, v důsledku čehož dochází k degradaci orné půdy; vznik monokultur.
<b>Vodní energie</b> 	Žádné emise CO <sub>2</sub> do ovzduší; nulová produkce odpadu; schopnost rychle se připojit k síti.	Vysoké investiční náklady; environmentální dopady – poškození biodiverzity; proměnlivé hodiny provozu.	Dostupnost vhodně situovaného vodního zdroje; energie oceánu vyžaduje pobřežní infrastrukturu; investice do rozvodné sítě.
<b>Odpady</b> 	Přímé spalování nebo produkce bioplynu (využitelného i jako biopalivo v dopravě); řešení problému s likvidací odpadu.	Emise skleníkových a nebezpečných plynů do ovzduší; nebezpečí obtěžování okolí zápachem.	Umístění blízko místa, kde je produkován odpad, nebo v blízkosti skládky.
<b>Vítr</b> 	Žádné emise CO <sub>2</sub> do ovzduší; nulová produkce odpadu během provozu zařízení.	Vysoké investiční náklady; potenciální hluk; přerušovaná výroba energie.	Vyžaduje spec. intenzitu větru; vysoké investice do rozvodné sítě; nutná dostupnost místa stavby pro těžkou techniku.
<b>Slunce</b> 	Žádné emise CO <sub>2</sub> do ovzduší; nulová produkce odpadu během provozu zařízení; nízké provozní náklady.	Použité články jsou nebezpečný odpad; závislost na době a intenzitě slunečního svitu.	Vhodná lokalita a orientace vůči slunci; investice do rozvodné sítě.
<b>Geotermální energie</b> 	Žádné emise CO <sub>2</sub> do ovzduší; nulová produkce odpadu během provozu zařízení; kontinuální dodávky energie.	Vysoké instalační náklady; možný únik toxických vulkanických plynů.	Nejvyšší efektivnost v geologicky vhodných oblastech.

Obr. 5.2: Výhody a nevýhody OZE

## 5.1. Větrné elektrárny



**ČAS KE STUDIU:**

1 hodina



**CÍL:**

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat jednotlivé části elektrárny
- popsat funkci větrné elektrárny



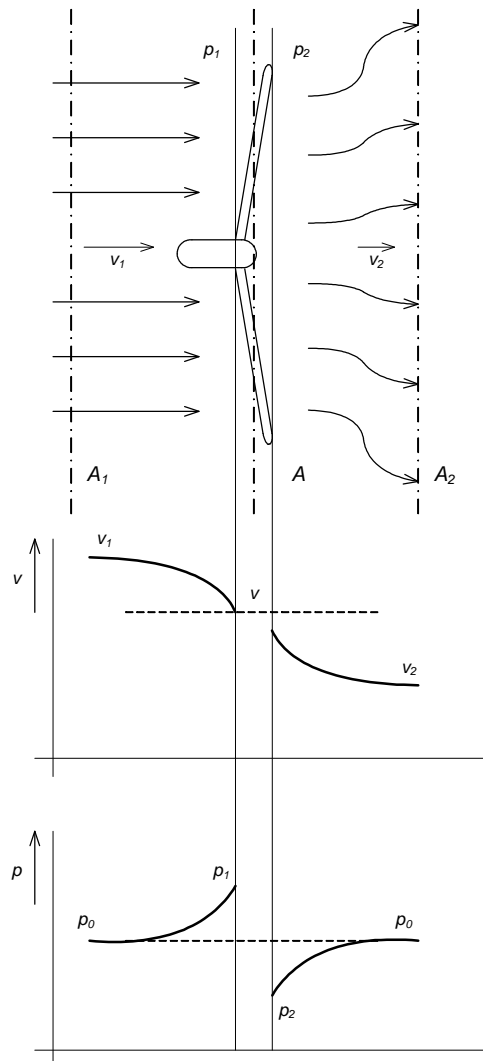
## VÝKLAD

Vítr vzniká vlivem nerovnoměrného ohřevu zemského povrchu slunečním zářením. Od ohřátého povrchu se ohřívá přilehlá vrstva vzduchu a teplý vzduch má tendenci stoupat vzhůru. Celý děj je silně ovlivněn rotací Země a střídáním dne a noci, což má za důsledek vznik tlakových rozdílů v zemské atmosféře. Vyrovnáním tlakových rozdílů vzniká vítr, který vane vždy od tlakové výše k tlakové níži. Kolem tlakové níže na severní polokouli jde spinální pohyb proti směru hodinových ručiček, u tlakové výše ve směru hodinových ručiček. Na jižní polokouli je smysl rotace u tlakové výše a níže opačný.

Výsledná rovnice pro výkon větru:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$$

kde  $v$  představuje rychlost vzduchu a  $\rho$  jeho hustotu.



Obr. 5.3: Tlak vzduchu a rychlost větru při průchodu turbínou

#### q Rozdělení větrných motorů

Větrné motory jsou zařízení, které se používají k přeměně kinetické energie větru na mechanickou energii. Ve větrných elektrárnách se nejprve kinetická energie větru přeměňuje v mechanickou energii, která je následně transformována v elektrickou energii. Rozdělení větrných elektráren může být provedeno podle mnoha různých hledisek, ale základní dělení je provedeno podle aerodynamického principu funkce větrného motoru, a to na:

- motory odporové
- motory vztlkové

Další rozdělení větrných motorů může být provedeno podle uložení osy rotace (horizontální a vertikální), podle instalovaného výkonu a podle rychlostního součinitele na pomaluběžné a rychloběžné.

Pro axiální sílu  $F_a$  působící na listy větrného motoru a pro výkon větru  $P$  můžeme napsat rovnice:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2) \cdot (v_1 + v_2)$$

#### q Zařízení větrných elektráren

Pro výrobu elektrické energie se ve větrných elektrárnách používají asynchronní a synchronní generátory.

Asynchronní generátor je v porovnání se synchronním jednodušší a finančně méně náročný a z hlediska provozu je spolehlivější. Nevýhodou asynchronního generátoru je malé rozpětí otáček. Naopak výhodou asynchronního generátoru je jeho jednoduchý rozběh, připojení na síť a regulace výkonu.

Synchronní generátor může být provozován pouze při synchronních otáčkách větrné turbíny. Aby bylo možné synchronní generátor provozovat v širším rozmezí otáček, je potřeba vyrobenou elektrickou energii usměrnit a následně opět s využitím střídače převést na frekvenci sítě.

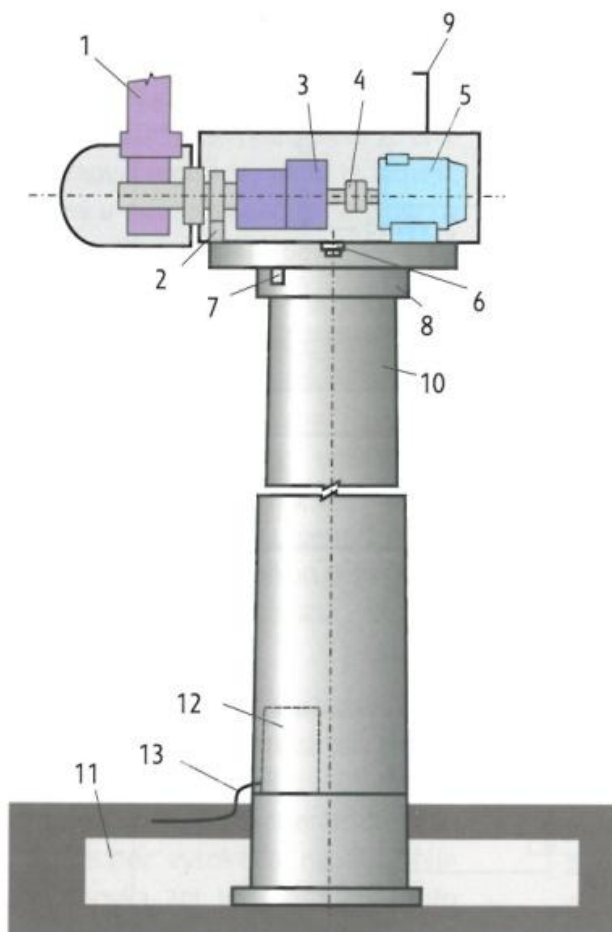
Typická konstrukce větrné elektrárny je zobrazena na obrázku Obr. 5.4. Větrná elektrárna se skládá z následujících základních částí: 1 – větrný motor s rotorovou hlavou, 2 – brzda rotoru, 3 – převodovka, 4 – spojka, 5 – generátor, 6 – servopohon pro natáčení strojovny, 7 – brzda strojovny, 8 – ložiska, 9 – senzor pro snímání rychlosti a směru větru, 10 – tubus elektrárny (stožár), 11 – betonový základ elektrárny, 12 – elektrorozvaděče silnoprůběhu zařízení a řídicího obvodu, 13 - elektrická přípojka.

#### q Regulace větrných motorů

Pevné lopatky – natáčení rotoru do 90° oproti směru větru, klapky, vysouvatelné výstupky, oddělené konce listů otáčející se při překročení stanovené rychlosti kolem radiální osy listu a nebo natáčivé listy

Brzdy - hydraulické a nebo malé listy na konci velkých





Obr. 5.4: Konstrukce větrné elektrárny



### Shrnutí pojmů 5.1.

Větrné motory, výkon větru, zařízení VtE.



### Otázky 5.1.

1. Nakreslete, jak se chová tlak vzduchu a rychlost větru při průchodu turbínou?
2. Na čem závisí výkon větrného motoru?
3. Z jakých hlavních částí se skládá větrná elektrárna?

## 5.2. Fotovoltaické elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



## CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat jednotlivé části elektrárny
- popsat funkci fotovoltaické elektrárny

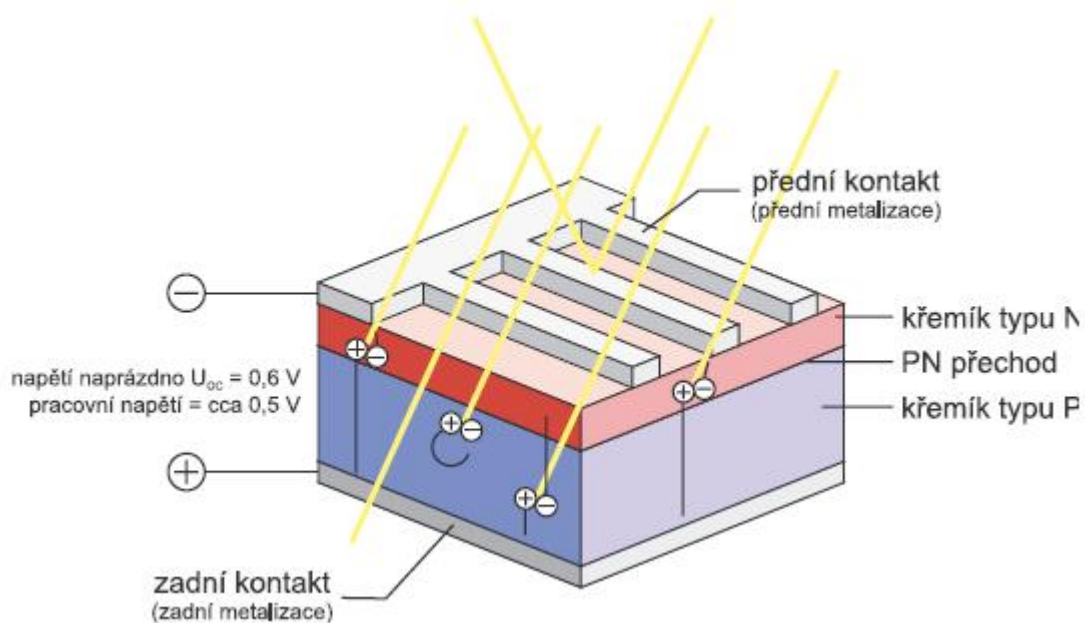


## VÝKLAD

### q Základní princip FV článku

Základním principem FV článku je fotoelektrický jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření látkou. Absorpce je způsobena interakcí světla (fotony) s částicemi hmoty (elektrony a jádry).

Pro funkci FV článku je zásadní, aby foton ze slunečního záření uvolnil v látce elektron a vznikl pár elektron – díra. V kovech ovšem dojde k jejich okamžité rekombinaci, které je potřeba zabránit a vzniklý náboj tedy odvézt z článku. Pro tento účel se využívá polovodičů, ve kterých jsou elektrony a díry separovány vnitřním elektrickým polem PN přechodu.



Obr. 5.5: Struktura fotovoltaického článku

### q Materiály pro FV

Nejvyužívanějším materiálem pro výrobu fotovoltaických článků je křemík (Si). Vzhledem k šířce zakázaného pásu je u křemíku možno dosáhnout velmi vysoké účinnosti generace volných nosičů dopadajícím slunečním zářením. Zároveň u křemíku, jako základního materiálu pro mikroelektroniku, se podařilo velmi dobře zvládnout všechny technologické operace potřebné k vytváření struktur.

Objemové materiály	Tenkvrstvé technologie	Alternativní technologie
Monokrystalický křemík	Amorfní křemík	Polymerní vrstvy
Multikrystalický křemík	Mikrokrystalický křemík	Články s fotocitlivým barvivem
Polykrystalické plátky Si	CdTe a CdS	
	CuInSe – CIS	
	Amorfní SiGe	
	InGaN	

**Obr. 5.6: Materiály pro fotovoltaické články**

Solární nanočlánky - materiály sestavované z jednotlivých atomů desetkrát zlepšují schopnost solárních článků využívat světlo.

#### q Vlivy na funkci solárních panelů

Pro zvýšení účinnosti FV elektrárny je při návrhu nutno uvažovat následující vlivy:

- Směrová orientace (optimální azimut  $180 \pm 10^\circ$ )
- Úhel sklonu FV panelů (celoročně  $45^\circ$ , při možnosti přenastavení  $-60^\circ$  pro zimní provoz,  $35^\circ$  pro letní provoz)
- Vlastní konstrukce FV panelů („barva“ článků, texturace povrchu)
- Kvalita návrhu a provedení FV systému (profesionální zkušenosti s instalacemi)
- Umístění v terénu (stínění okolními objekty či stromy)
- Znečištění FV systému
- Umístění v rámci ČR (zanedbatelné rozdíly mezi instalacemi v ČR)



#### Shrnutí pojmů 5.2.

Fotoelektrický jev, materiály pro fotovoltaiku, vlivy na funkci FvE.



#### Otázky 5.2.

1. Vysvětlete princip fotoelektrického jevu.
2. Jaký je základní materiál pro výrobu FV článků?
3. Jaké vlivy působí na funkci FvE?

### 5.3. Využití biomasy



#### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



## CÍL:

- Po prostudování tohoto odstavce budete umět
- popsat možnosti využití biomasy



## VÝKLAD

Biomasa neodmyslitelně patří mezi obnovitelné zdroje energie. Biomasu můžeme popsat jako přeměněnou sluneční energii, zachycenou rostlinami a uloženou ve formě chemické energie. Dalo by se říci, že v případě hospodárného využívání půdy bude biomasa k dispozici neustále. Její velkou předností je její minimální vliv na množství CO<sub>2</sub> v ovzduší při jejím spalování.

Biomasa je CO<sub>2</sub> neutrální palivo – tzn. při racionálním využívání jsou emise tohoto hlavního skleníkového plynu rovny jeho spotřebě v nově narůstajících biomase; také emise ostatních znečišťujících prvků jsou při efektivním spalování standardizovaných biopaliv nižší než u nejčastěji používaných fosilních paliv.

Základním producentem biomasy jsou rostliny, které jsou schopné využitím světelné energie zachycené v zeleném barvivu – chlorofylu – produkovat sacharidy a následně bílkoviny. Ty jsou základním „stavebním kamenem“ všech živých organismů – biomasy. Tato reakce je syntézou atmosférického CO<sub>2</sub> a vody za pomoci energie slunečního záření (fotosyntéza).

Teoreticky všechny formy biomasy je možno využít pro produkci energie, protože základním stavebním prvkem živé hmoty je uhlík a uhlíková vazba, která obsahuje energii.

### q Výhody:

- uzavřený oběh CO<sub>2</sub>,
- bezpečná přeprava a skladování,
- kladná energetická bilance (energie vynaložená na získání biomasy je nižší než ta která se uvolňuje při jeho energetickém zhodnocení),
- OZE pochází z regionu,
- fosilní paliva drahá - finance do jiných zemí,
- nižší závislost na fosilních palivech,
- zemědělci a lesníci biomasu produkují, ale i umí energeticky využívat (lokální úroveň) - zvýšení pracovních míst (rozvoj regionu).

### q Biomasa z hlediska vzniku

#### 1. zbytková biomasa ze zemědělství

- rostlinné sklizňové zbytky zemědělské prvovýroby, zejména sláma obilná a řepková
- organické zbytky zemědělské výroby, zejména chlévská mrva
- organické nebo rostlinné zbytky ze zpracovatelského průmyslu, zejména mlékárenského a potravinářského (např. rostlinné obaly olejnatých semen - slunečnice, tuky)

## 2. zbytková biomasa z lesnictví

- těžební odpad z lesního hospodaření (např. z prořezávek, probírek, z mýtní těžby)
- spalitelný odpad z pilařské výroby, dřezozpracujícího a papírenského průmyslu

## 3. Biomasa energetických plodin 1. generace

- řepka a palma olejná, pšenice a kukuřice (olej, bioetanol)
- žitovec (na pelety)

## 4. Biomasa energetických plodin 2. generace (tzv. ligno-celulózní plodiny)

- dřeviny: např. topoly, vrby, eukalyptus
- nedřevnaté rostliny: energetický šťovík, ozdobnice, proso dvojřadé aj.

termo-chemická přeměna	pyrolýza (produkce plynu, oleje)
	zplyňování (produkce plynu)
bio-chemická bio-chemická	fermentace, alkoholové kvašení (produkce etanolu)
	anaerobní vyhnívání, metanové kvašení (produkce bioplynu)
mechanicko-chemická přeměna	lisování olejů (produkce kapalných paliv, oleje)
	esterifikace surových bio-olejů (výroba bionafty a přírodních maziv)
	štípání, drcení, lisování, peletace, mletí (výroba pevných paliv)

Obr. 5.7: Využití biomasy v energetice

#### q Spalování, zplyňování biomasy

- Ze suché biomasy se působením vysokých teplot uvolňují hořlavé plynné složky, tzv. dřevoplyn
- Se vzduchem - prosté spalování
- Bez přístupu vzduchu – odvod do spalovacího prostoru, část tepla použito na zplyňování další biomasy

Výhodou je snadná regulace výkonu, nižší emise, vyšší účinnost

Biomasa je velmi složitě palivo, protože podíl částí zplyňovaných při spalování je velmi vysoký (u dřeva je 70 %, u slámy 80 %). Vzniklé plyny mají různé spalovací teploty. Proto se také stává, že ve skutečnosti hoří jenom část paliva. Podmínkou dokonalého spalování je vysoká teplota, účinné směřování se vzduchem a dostatek prostoru pro to, aby všechny plyny dobře shořely a nestávalo se, že budou hořet až v komíně.

#### q Výhřevnost biomasy

Výhřevnost biomasy kolísá podle druhu dřeva, rostliny a s vlhkostí, na kterou jsou tato paliva citlivější

Obsah energie v 1 kg dřeva s nulovým obsahem vody je asi 5,2 kWh. Při zbytkovém obsahu vody 20 % hmotnosti suchého dřeva, se při spalovacím procesu část energie spotřebuje na vypaření vody, bude energetickým obsah 4,3 - 4,5 kWh na 1 kg dřeva.

## q Bioplyn

Bioplyn vzniká při rozkladu organických látek (hnůj, zelené rostliny, kal z čističek) v uzavřených nádržích bez přístupu kyslíku.

Ze zemědělských odpadů se v největší míře energeticky využívá kejda, případně i slamatý hnůj, sláma, zbytky travin, stonky kukuřice, bramborová nať a další.

Tímto způsobem je možné zpracovávat také slámu, piliny a jiný odpad, proces je však pomalejší.

V bioplynovém zařízení se biomasa zahřívá na provozní teplotu ve vzduchotěsném reaktoru. Obvyklá teplota je pro mezofilní bakterie 37 až 43 °C, pro termofilní 50 až 60 °C. Princip vyvíjení bioplynu je velmi jednoduchý, protože je však nutné dodržovat bezpečnostní normy, zařízení se stávají složitými a tudíž dražšími.

## q Fermentace biomasy

Fermentací roztoků cukrů je možné vyprodukovat ethanol (ethylalkohol). Vhodnými materiály jsou cukrová řepa, obilí, kukuřice, ovoce nebo brambory. Cukry mohou být vyrobeny i ze zeleniny nebo celulózy. Teoreticky lze z 1 kg cukru získat 0,65 l čistého ethanolu, který je vysoce hodnotným kapalným palivem pro spalovací motory (přednost - ekologická čistota a antidekonační vlastnosti, nedostatek - schopnost vázat vodu a působit korozi motoru. V USA probíhají výzkumy výroby ethanolu z celulózy pomocí speciálně vyšlechtěných mikroorganismů. Ethanol lze pak získat ze dřeva nebo trávy.



### Shrnutí pojmů 5.3.

Biomasa, spalování, zplyňování, výhřevnost biomasy, bioplyn, fermentace.



### Otázky 5.3.

1. Co je to biomasa?.
2. Jaké jsou výhody využití biomasy?
3. Jaká je přibližná výhřevnost dřeva?

## 5.4. Palivové články



### ČAS KE STUDIU:

1 hodina



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat funkci palivového článku
- vyjmenovat jednotlivé části elektrárny

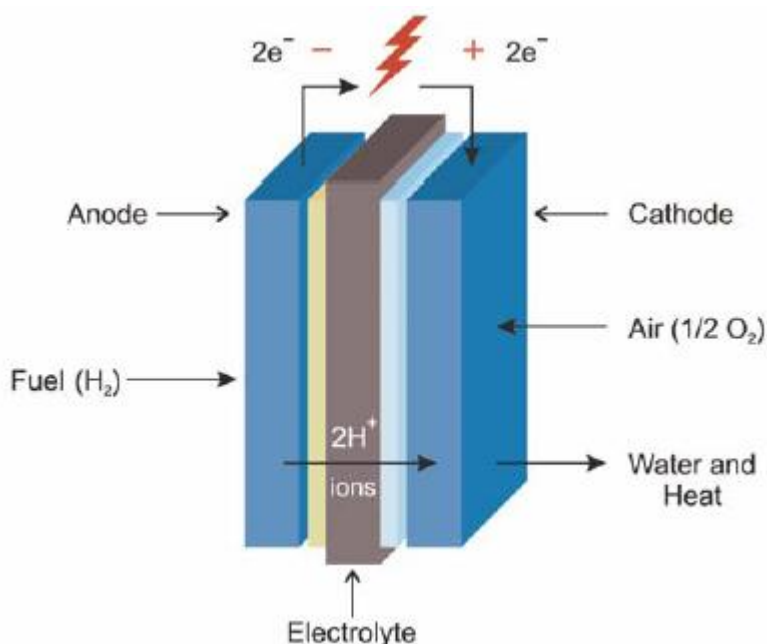


## VÝKLAD

### q Základní princip palivového článku

Palivový článek je galvanický článek, který vyrábí elektřinu z energie uvolňované při chemické reakci kontinuálně přiváděného paliva s oxidačním činidlem. Obvykle se tímto pojmem míní kyslíko-vodíkový palivový článek. Vyrábějí elektřinu přímo, a proto by měly být účinnější, jednodušší a spolehlivější.

Palivový článek se skládá ze dvou elektrod, které jsou odděleny membránou nebo elektrolytem. K anodě je přiváděno palivo, které je zde oxidováno. Ke katodě je přiváděno oxidační činidlo, které se zde redukuje. Elektrody - kovy nebo uhlíkové nanotrubičky, potaženy katalyzátorem (vyšší účinnost). Elektrolyt - kyseliny nebo zásady, keramiky nebo membrány. Elektrické napětí je okolo 1,23 V a závisí na typu paliva a kvalitě článku, zařazuje se více článků do série.

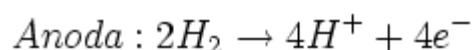


Obr. 5.8: Složení palivového článku

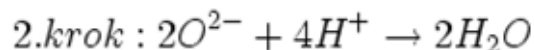
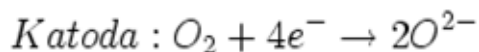
### q Reakce

Palivo (například H) je na anodě katalyticky přeměněno na kationty ( $H^+$ ). Uvolněné elektrony jsou vychytány anodou a vytváří elektrický proud, který teče přes elektrický spotřebič ke katodě. Na katodě se oxidační činidlo (většinou O) redukuje na anionty ( $O_2^-$ ), a ty pak reagují s  $H^+$  ionty na vodu.

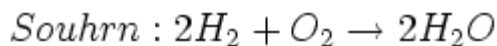
Oxidace / odevzdání elektronu



Redukce / přijmutí elektronu



Redoxní reakce



Typ palivového článku	Druh elektrolytu	Provozní teplota, [°C]	Napětí naprázdno, [V DC]	Použitá paliva
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Hydroxid draselný (KOH)	65 - 220	1,1 - 1,2	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	50 - 100	1,1	H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> /vzduch
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Kyselina fosforečná	150 - 210	1,1	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík + vzduch
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Vysokoteplotní sloučenina uhlíkových solí CO <sub>3</sub> (Sodík, Hořčík)	650	0,7 - 1,0	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík + vzduch
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Sloučeniny pevných keramik (Vápník, Zirkonium)	800 - 1000	0,8 - 1,0	H <sub>2</sub> /plyn bohatý na vodík + vzduch
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	Proton Exchange Membrane (Nafion, Gore)	130	1,1	Methanol/Ethanol + O <sub>2</sub> /Vzduch

Obr. 5.9: Typy palivových článků

#### q Výhody palivových článků

- bez znečišťujících látek,
- vyšší termodynamická účinnost,
- pracují při nízkých provozních teplotách,
- kogenerační aplikace,
- nízká úroveň hluku,
- jednoduchá konstrukce.

#### q Nevýhody palivových článků

- obtížně se vyrábí a uskládňuje,
- požadují relativně čisté palivo,
- velmi drahé,
- PEM FC nesmí vyschnout,
- odstranění zbytkové vody.





### Shrnutí pojmů 5.4.

Palivový článek, reakce, oxidace, redukce.



### Otázky 5.4.

1. Popište princip palivového článku.
2. Napište chemické reakce, které probíhají na elektrodách.



### DALŠÍ ZDROJE 5

- [1] Obnovitelné zdroje elektrické energie ČVUT Praha 2011, ISBN 978-80-01-04937-2
- [2] Kaminský, J., Vrtek, M., Obnovitelné a alternativní zdroje energie, Interní učební texty – skriptum, 2002, VŠB Ostrava
- [3] Janíček, F. a kolektiv autorů, Obnovitelné zdroje energie 1 – Technologie pro udržitelnou budoucnost, STU FEI Bratislava, 2007, ISBN: 978-80-969777-0-3



### CD-ROM

- **Výpočet účinnosti FV článku** - program
- **Výpočet návratnosti větrné elektrárny** - program
- **Fotovoltaický panel** - animace z měření na panelu
- **Návrh fotovoltaické elektrárny** - animace s popisem částí FV elektrárny
- **Vznik vztlakové síly** - animace

## 6. ELEKTRICKÁ ČÁST ELEKTRÁREN

### 6.1. Alternátory



#### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat typy alternátorů, jejich konstrukční prvky a parametry
- vysvětlit problematiku provozu alternátorů
- vyjmenovat typy a vysvětlit principy alternátorových ochran popsat funkci



#### VÝKLAD

Ve většině elektráren slouží ke generování elektrické energie synchronní alternátory, pouze u vodních a větrných elektráren malých výkonů se k tomuto účelu někdy používá asynchronních generátorů (a to jak s kotvou nakrátko, tak s kotvou vinutou). Alternátory se vyrábí v širokém rozsahu výkonů i výstupních napětí.

#### q Důležité parametry alternátorů

- Otáčky:

Synchronní otáčky alternátoru  $n_s$  jsou závislé na počtu pólových dvojic  $p$  stroje a kmitočtu sítě  $f$ , do které pracuje.

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (\text{Hz}; -; \text{ot} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (6.1)$$

Otáčky lze také vyjádřit pomocí úhlové rychlosti  $\omega$ :

$$\omega = \frac{2 \cdot p \cdot n_s}{60} \quad (\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (6.2)$$

Mechanický výkon na hřídeli stroje PM vypočteme vynásobením točivého momentu  $M$  a úhlové rychlosti  $\omega$ .

$$P_M = M \cdot \omega \quad (\text{N} \cdot \text{m}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}; \text{W}) \quad (6.3)$$

- Účinník:

Účinnost stroje lze měnit změnou buzení. U velkých strojů dosahuje hodnot 0,85 až 0,95. Volba účinnosti závisí na umístění stroje a jeho úloze v elektrizační soustavě. S klesajícím účinností rovněž roste cena alternátoru. U alternátoru v ostrovním režimu je jeho účinnost dán skladbou spotřebičů, které napájí.

- Zkratový poměr - je poměr statorového proudu nakrátko  $I_{KO}$  k jmenovitému proudu statoru  $I_N$  při buzení odpovídajícím jmenovitému napětí stroje. Lze jej také vyjádřit jako převrácenou hodnotu synchronní reaktance.

$$n = \frac{I_{KO}}{I_N} \quad (A; A; -) \quad (6.4)$$

Velikost tohoto parametru ovlivňuje celou řadu vlastností stroje. S klesajícím poměrem roste vliv reakce kotvy a tím dochází ke změnám svorkového napětí (stroj je tzv. měkký). Z hlediska statické stability stroje je žádoucí, aby byl zkratový poměr stroje co největší. S rostoucím zkratovým poměrem ovšem roste také hmotnost a tím i cena stroje. Obecně platí, že čím nižší je zkratový poměr, tím větší jsou požadavky na dynamické vlastnosti regulátoru buzení.

- Reaktance:

Při dodávkách energie do sítě se u alternátoru projevuje jeho impedance, která závisí na provozním stavu stroje a jeho konstrukci. Jelikož je činný odpor vinutí oproti jeho reaktanci malý, většinou jej neuvažujeme. Hovoříme proto pouze o reaktanci stroje. Hodnoty jednotlivých reaktancí lze vyjádřit buďto v absolutních, nebo poměrových hodnotách. Jejich měření se zabývá norma ČSN IEC 34-4.

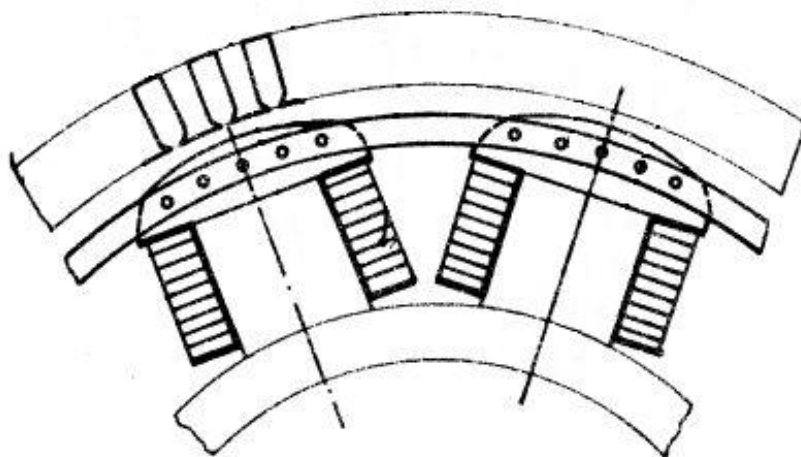
Parametr		Turbo- alternátory	Hydro- alternátory
Synchronní reaktance podélná	$X_d$	- 1,2 -3	0,7 -1,4
Synchronní reaktance příčná	$X_q$	- 1,1 -2,2	0,45-0,9
Přechodná reaktance podélná	$X'_d$	- 0,15-0,3	0,2 -0,4
Rázová reaktance podélná	$X''_d$	- 0,09-0,3	0,15-0,35
Rázová reaktance příčná	$X''_q$	- 0,1 -0,25	0,15-0,7
Přechodná časová konstanta naprázdno	$T'_{do}$	■ 2 -10	3 -10
Nulová reaktance	$X_0$	- 0,02-0,15	0,03-0,15
Zpětná reaktance	$X_T$	- 0,09-0,3	0,12-0,4
Přechodná časová konstanta nakrátko	$T'_d$	■ 0,6 -1,5	0,8 -2,5
Rázová časová konstanta nakrátko	$T''_d$	■ 0,02-0,08	0,04-0,1
Časová konst. stejnosměrné složky	$T_a$	■ 0,05-0,5	0,1 -0,4

Obr. 6.1: Přehled poměrových reaktancí turboalternátorů

## q Hydroalternátor

Na rozdíl od parních turbín je u turbín vodních problematické dosáhnout vysokých otáček. Používají se proto mnohopólové stroje s vyniklými póly, tzv. hydroalternátory. Ty mají jmenovité otáčky v řádech desítek až stovek za minutu. Uložení soustrojí je nejčastěji vertikální, ale zejména u elektráren malých výkonů může být i šikmé nebo horizontální. Chlazení stroje je jednodušší než u turboalternátoru díky větší ploše rotoru a mezerám mezi vyniklými póly. Rotory velkých strojů jsou chlazeny vzduchem, stator může být chlazen vodou.

Budící vinutí je tvořeno cívkami, které jsou uloženy na jádrech jednotlivých pólů. V pólových nástavcích pak může být umístěno tlumící vinutí ve formě tyčí.



Obr. 6.2: Část rotoru a statoru hydroalternátoru

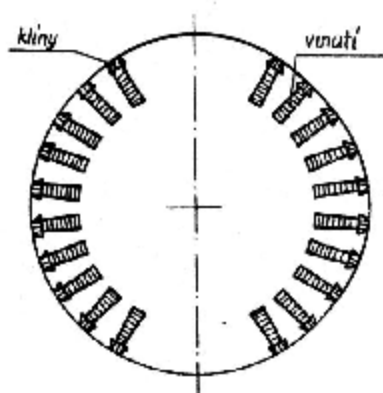


Obr. 6.3: Stator a rotor hydroalternátoru (VE Štěchovice)

#### q Turboalternátor

Turboalternátory v parních a jaderných elektrárnách jsou stroje s hladkým rotorem, nejčastěji dvoupólové (tj. 3000ot/min pro 50Hz). Parní turbína má totiž nejvyšší účinnost při otáčkách v řádech tisíců za minutu. Pouze u strojů velmi velkých výkonů se využívá čtyřpólového rotoru, vzhledem k jeho omezené mechanické pevnosti.

Na rotoru turboalternátoru jsou drážky, ve kterých je uloženo budící vinutí. Vinutí je v drážkách zajištěno klíny z nemagnetických materiálů, které mohou zároveň plnit funkci tlumiče (amortizéru). Vzhledem k vysokým otáčkám rotoru na něj působí značné odstředivé síly, proto je žádoucí, aby byl průměr rotoru co možná nejmenší. S klesajícím průměrem rotoru ale roste jeho délka, což celou situaci komplikuje - čím je rotor delší, tím větší vibrace vznikají při provozu stroje. Navíc vzniká riziko jeho prověšení. Proto jsou soustrojí velkých výkonů vybavena elektromotorem, který jím v době odstávky neustále otáčí a eliminuje tak riziko prohnutí hřídele.



Obr. 6.4: Průřez rotorem turboalternátoru

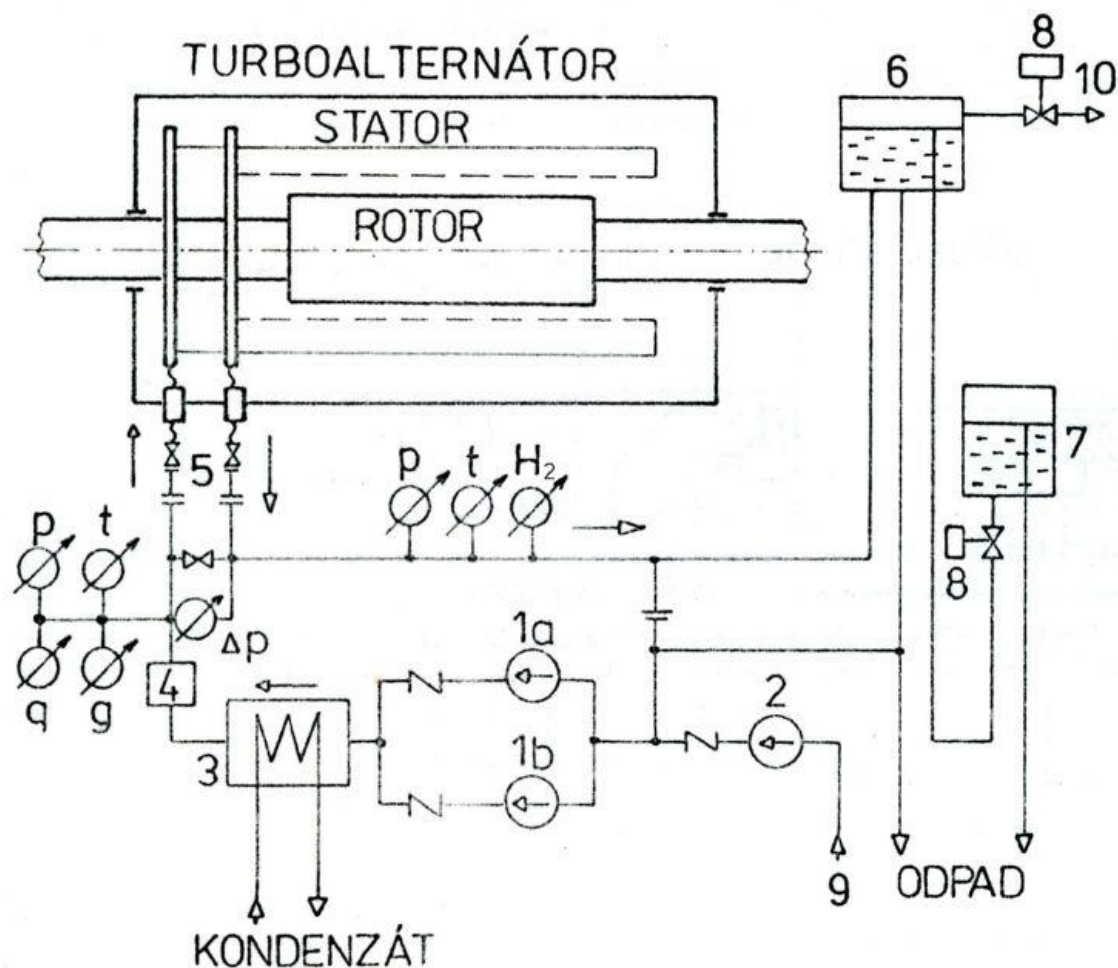


Obr. 6.5: Stator turboalternátoru a jeho budiče (elektrárna Dětmarovice)

## q Chlazení

I když je účinnost alternátorů značná (až 99%), vyvíjí se v nich velké množství tepla, které je nutno odvést. Také je žádoucí udržovat teplotu vinutí konstantní a tím zamezit jeho mechanickým pnutím, které zkracuje životnost izolace. U strojů malých výkonů je dostačující chlazení vzduchem, odpadní teplo se ale nedá nijak využít a navíc hrozí riziko požáru stroje při havárii. Chlazení strojů velkých výkonů je proto realizováno jinými médii – nejčastěji vodíkem, vodou, nebo kombinací obojího.

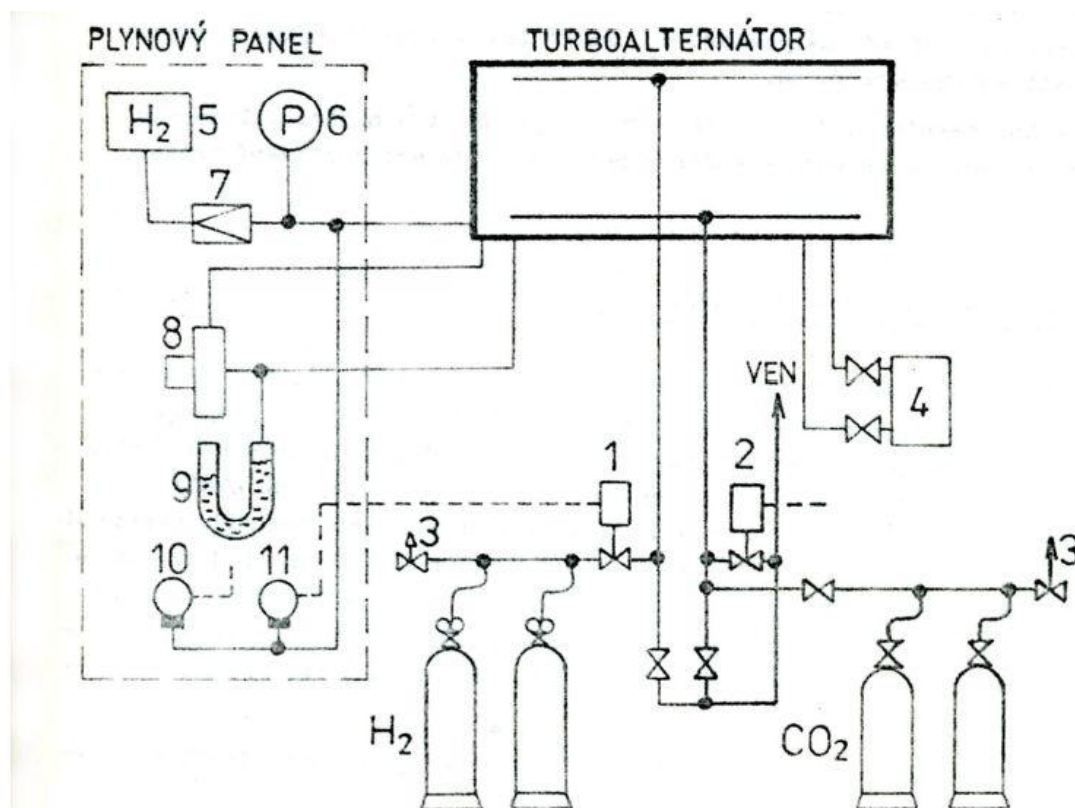
Statorové vinutí je nejčastěji chlazeno vodou (např. napájecí vodou pomocí výměníku). Voda protéká buďto dutými vodiči, nebo speciálními vložkami ve vinutí. Také může být chlazen i magnetický obvod stroje axiálními kanály. Výhodou vody je její nehořlavost, nízká viskozita a rovněž nepůsobí chemicky na materiál izolace.



- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 1 – pracovní a záložní čerpadlo                            | 6 – vyrovnávací nádoba             |
| 2 – podávací čerpadlo                                      | 7 – sifon (přepad)                 |
| 3 – chladič  | 8 – automatické uzavírání          |
| 4 – mechanický filtr                                       | 9 – čistá voda z filtrační stanice |
| 5 – vyjímatelní vložky při měření izolačního stavu statoru | 10 – vývod k vývěvě pro odplynění  |

**Obr. 6.6: Vodní chlazení turboalternátoru**

Rotor bývá chlazen vodíkem. Oproti vzduchu má větší tepelnou kapacitu, díky jeho malé hustotě jsou i menší ventilační ztráty. Vodíková atmosféra také chrání rotor před případným požárem při havárii a zamezuje oxidaci izolace ozónem. Alternátor je umístěn ve vzduchotěsném krytu a vývody hřídelí jsou osazeny olejovými ucpávkami. Oběh vodíku zajišťuje kompresor, který může být poháněn samotnou turbínou. Při prvotním plnění musí být obal alternátoru nejdříve napuštěn inertním plynem, aby se zamezilo vzniku třaskavé směsi. Tlak vodíku je vyšší než tlak chladicí vody statoru – při případné netěsnosti tak dochází k pronikání vodíku do chladicí vody, kde jej lze poměrně snadno detekovat. Odpadní teplo je možné pomocí výměníku dodat do napájecí vody.



- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1, 2 – přepouštěcí ventily               | 7 – regulátor konstantního průtoku  |
| 3 – pojistný ventil                      | 8 – měřící ventilátor               |
| 4 – vysoušeč vodíku se silikagelem       | 9 – měření čistoty plynů při plnění |
| 5 – analyzátor vodíku dle tep. vodivosti | 10 – signalizace tlaku              |
| 6 – měření tlaku                         | 11 – automatické připouštění vodíku |

Obr. 6.7: Vodíkové chlazení turboalternátoru

#### q Tlumící vinutí (amortizér)

Jedná se o rotorové vinutí trvale spojeno nakrátko. Při ustáleném synchronním chodu se nijak neuplatní, jelikož je vzájemná rychlost rotoru a magnetického pole statoru nulová. Při změnách pracovního bodu se ale do něj začnou indukovat proudy a vzniklé elektromagnetické síly a pole ovlivňují vlastnosti stroje. Použití tlumícího vinutí přináší celou řadu výhod: zmenšuje oteplení rotoru při nesymetrické zátěži, chrání budicí obvod proti přepětím a proudovým rázům, omezuje kývání rotoru a zlepšuje statickou i dynamickou stabilitu. Rovněž zmenšuje přepětí, vzniklé při nesymetrickém zkratu na nepostížené fázi. Je-li tlumící vinutí patřičně dimenzováno, lze jej použít k rozběhu soustrojí. Jeho nevýhodou je ovšem vyšší cena stroje a větší namáhání pólových nástavců, navíc zvětšuje proudové rázy při zkratech.

Samotné vinutí lze realizovat několika způsoby. Mohou to být ploché vodiče, umístěné v každé drážce pod zajišťovacím klínem. Jako tlumič se dají použít i samotné zajišťovací klíny, pokud jejich čela vhodně propojíme. U hydroalternátorů je tlumící vinutí tvořeno tyčemi v pólových nástavcích, případně samotnými pólovými nástavci (jsou-li z plného materiálu).

#### q Vývody alternátoru

Vývody alternátorů mohou být provedeny několika způsoby. U strojů malých výkonů se používá kabelů, případně pásových vodičů. U strojů velkých výkonů je však třeba brát v

potaz síly, působící na vodiče při zkratu. Proto se používá zapouzdřených vodičů, izolovaných plynem SF<sub>6</sub>.

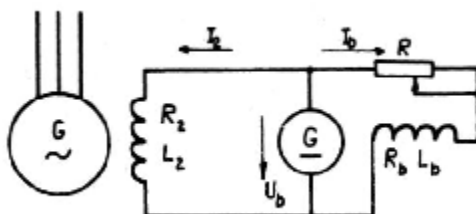
Použití zapouzdřených vodičů přináší celou řadu výhod. Jednotlivé fáze jsou od sebe bezpečně odděleny, čímž se zamezí případnému mezifázovému zkratu. Rovněž se redukuje magnetické pole v okolí vodičů, takže se neindukují vířivé proudy do okolních kovových konstrukcí. Ztráty, vzniklé indukovaním vířivých proudů do tělesa pouzdra, lze omezit vhodným pospojováním a zemněním.

#### q Buzení alternátoru

Budící vinutí alternátoru je napájeno z budiče stejnosměrným proudem. Velikost budícího proudu ovlivňuje množství vyrobené jalové energie a tím i účinník stroje (výkon budiče je zhruba 0,5% výkonu alternátoru). Parametry budiče významně ovlivňují stabilitu alternátoru, a proto jsou na budiče kladeny značné nároky. Budič musí být spolehlivý, musí umožňovat rychlou změnu budícího proudu a mít vysoký strop buzení (v případě havarijního stavu sítě bývá zapotřebí alternátor skokově přibudit).

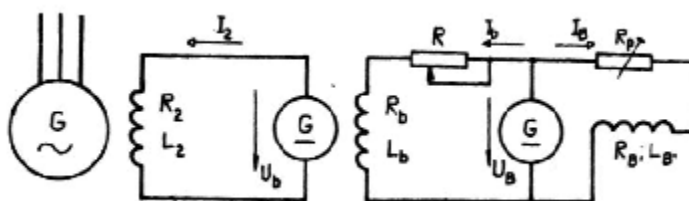
Buzení může být provedeno jako přímé nebo nepřímé. U přímého buzení je rotační budič umístěn na společné hřídeli s alternátorem. Při buzení nepřímém je rotační budič poháněn vlastním motorem, případně je budič realizován statickým zdrojem. Nejčastěji se používá buzení přímé, nepřímé buzení se používá většinou jen jako záloha při poruše přímého budiče.

- Derivační budič - je tvořen derivačním dynamem, které je umístěno na společné hřídeli s alternátorem. Tento systém se využívá pouze u alternátorů malých výkonů, jelikož není schopen zajistit plynulou regulaci napětí alternátoru při nízkých hodnotách budícího proudu.



Obr. 6.8: Derivační budič

- Pomocný budič - Alternátor je umístěn na společné hřídeli s hlavním a pomocným budičem. Pomocný budič nabuzuje hlavní budič, který napájí buzení alternátoru. Toto uspořádání má sice menší provozní spolehlivost, umožňuje ale plynulou regulaci v širokém rozsahu.

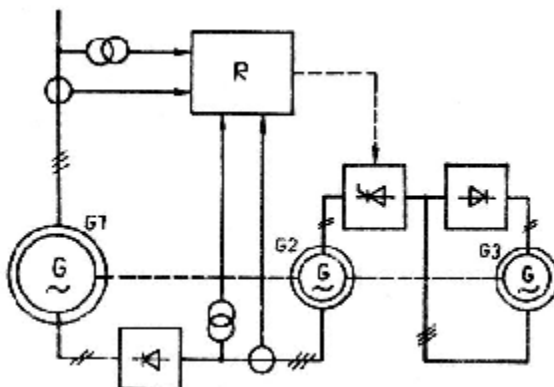


Obr. 6.9: Pomocný budič

- Budiče s výkonovými diodami - Tento systém je tvořen střídavým budičem a pomocným střídavým budičem, které jsou na společné hřídeli s alternátorem. Pomocný budič napájí přes řízený usměrňovač hlavní budič, který pomocí

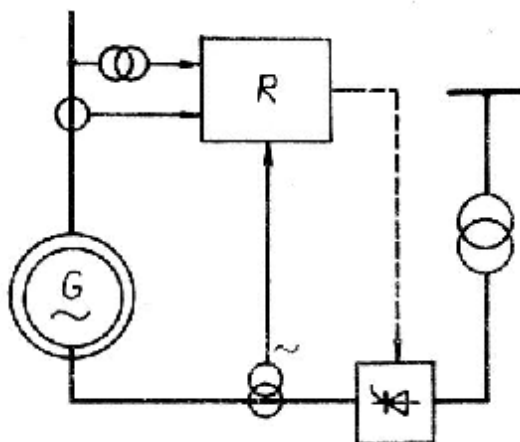


výkonových diod napájí buzení alternátoru. Buzení je regulováno řízeným usměrňovačem mezi pomocným a hlavním budičem. Výhodou tohoto systému je možnost použití střídavých budičů, které jsou spolehlivější (nemají komutátor) a méně náročné na údržbu.



Obr. 6.10: Budič s výkonovými diodami

- Budiče s výkonovými tyristory - Alternátor je buzen přes řízený usměrňovač z budiče, umístěného na společné hřídeli, nebo z externího zdroje. Tento systém má vynikající dynamické vlastnosti a umožňuje také rychlé odbuzení alternátoru bez použití odbuzovače. Napájení tyristorů je zajištěno buďto dalším rotačním budičem, nebo externím zdrojem.



Obr. 6.11: Budič s výkonovými tyristory

#### q Odbuzení alternátoru

Odbuzovače se používají během havarijních stavů, při kterých nelze alternátor odpojit od místa poruchy (zkraty na svorkách a vývodech alternátoru, poruchy blokových transformátorů, vnitřní zkraty alternátoru atd.). Při těchto poruchách nelze jednoduše odpojit buzení, jelikož by se vzniklým přepětím mohla poškodit izolace budicího vinutí. Úkolem odbuzovače je co nejrychleji zmařit energii rotoru, aby se zamezilo škodám na zařízení. V některých případech může plnit funkci odbuzovače samotný budič (umožňuje-li inverzní chod). Odbuzení považujeme za ukončené, klesne-li svorkové napětí alternátoru pod 500V.

- Odbuzovač s tlumícím odporem - K budicímu vinutí alternátoru je paralelně připojen tzv. tlumící odpor, ve kterém se energie rotoru zmaří na teplo (velikost tohoto je jeden až tři násobek odporu budicího vinutí). Přepínač nejprve spojí kontakty 1 a 2 nakrátko (aby se zamezilo přerušení proudu a tím vzniku přepětí v budícím vinutí) a poté se

trvale přepne na kontakt č.1. Současně dochází i k odbuzení budiče pomocí odporu  $R_h$ , aby se zamezilo jeho zbytečnému namáhání. Těchto odbuzovačů se používá u alternátorů o výkonech do 100MW.

- Odbuzovač se zhášecí komorou - Tento odbuzovač je tvořen zhášecí komorou, která je zapojena do série s budícím vinutím a při normálním provozu je přemostěna kontakty č. 1 a 2. Při odbuzování dojde k rozpojení kontaktů (nejdříve se rozpojí hlavní kontakty č.1, poté opalovací kontakty č.2) a mezi opalovacími kontakty začne hořet elektrický oblouk, který je následně vtažen do zhášecí komory. Energie budícího vinutí je ve zhášecí komoře zmařena na teplo. Při poklesu budícího proudu na nulu oblouk zhasne. Odbuzování probíhá zhruba 4 krát rychleji než při použití odbuzovače s tlumícím odporem.
- Přepólování budiče - Při tomto odbuzování přepólujeme zdroj budícího napětí. Je ovšem nutné průběžně měřit svorkové napětí alternátoru, aby mohlo dojít k včasnému odpojení budiče (jinak by budícím vinutím začal protékat proud opačné polarity). Samotná realizace přepólování závisí na provedení budiče. Napájíme-li budící vinutí řízeným usměrňovačem, docílíme přepólování vhodným řízením tyristorů (invertorový chod).

#### q Fázování alternátoru

Přifázováním alternátoru rozumíme jeho připojení ke vnější síti. V praxi používáme dvou způsobů fázování.

- Synchronní - Tento typ fázování je nejčastější, jelikož při něm nedochází k velkým proudovým a mechanickým rázům. Časové je ovšem náročné a vyžaduje složitou automatiku. Aby došlo k úspěšnému připojení stroje k síti, je zapotřebí splnit několik podmínek. Alternátor musí mít stejný sled fází jako síť, do které jej chceme připojit. Rozdíl napětí musí být do 5% (při havarijních stavech je přípustná odchylka až 20%), rozdíl fáze do 12% a rozdíl kmitočtu menší než 0,1%. Proudový náraz je při rozdílu napětí jalového charakteru, při rozdílu fází má činný charakter. Synchronní fázování bylo v minulosti prováděno ručně, pomocí tří žárovek. Tyto žárovky přemostovaly kontakty jednotlivých fází alternátorového vypínače a blikaly proto dvojnásobkem rozdílového kmitočtu alternátoru a sítě. Zhasnutí žárovek signalizovalo minimální rozdíl napětí mezi alternátorem a sítí (tzv. fázování "na tmou"), což je vhodný okamžik k přifázování. V moderních elektrárnách je fázování realizováno pomocí automatických systémů.
- Asynchronní - Využívá se zejména v havarijních situacích, při kterých kolísá napětí a kmitočet v síti. V těchto případech je totiž doba synchronního fázování neúměrně dlouhá, navíc hrozí riziko neúspěšného přifázování vlivem měnících se parametrů sítě. Odbuzený stroj se roztočí na otáčky blízké synchronním, přifázuje a poté se skokově přibudí. Rotor se sám vtáhne do synchronismu. Při tomto druhu synchronizace vzniká vždy proudový náraz jalového charakteru. Tento způsob synchronizace se nejlépe provádí u strojů s tlumícím vinutím.

#### q Mimořádné provozní stavy alternátoru

- Asynchronní chod:

K asynchronnímu chodu alternátoru dochází při ztrátě buzení stroje, kdy budící proud a magnetický tok rotoru začne exponenciálně klesat k nule (není-li budící obvod přerušen). Alternátor přestává být "bržděn" sítí, zátěžný úhel překročí hodnotu  $90^\circ$  a stroj vypadne ze synchronismu. Rotor přejde do nadsynchronních otáček a stroj začne odebírat ze sítě jalovou energii, což se může projevit lokálním poklesem napětí. Alternátor se v tomto režimu chová jako asynchronní generátor a do rotoru se indukují proudy o skluzovém kmitočtu (u

turboalternátorů je skluz v rozmezí 0,2 – 0,7%, u hydroalternátorů 3 – 5%). Stroj je stále schopen dodávat činný výkon do sítě, vznikají ovšem lokální oteplení v tělese rotoru. V případě přerušení budicího obvodu navíc vznikají v budícím vinutí nebezpečná přepětí. Rovněž vzroste statorový proud vlivem magnetizačního proudu, který roste se zvyšujícím se zkratovým číslem stroje. Turboalternátory lze proto provozovat trvale v tomto stavu pouze při výkonu 30%, nebo při polovičním výkonu po dobu deseti minut. U hydroalternátorů se asynchronní chod pro jejich velký skluz nedoporučuje.

- Nesymetrické zatížení:

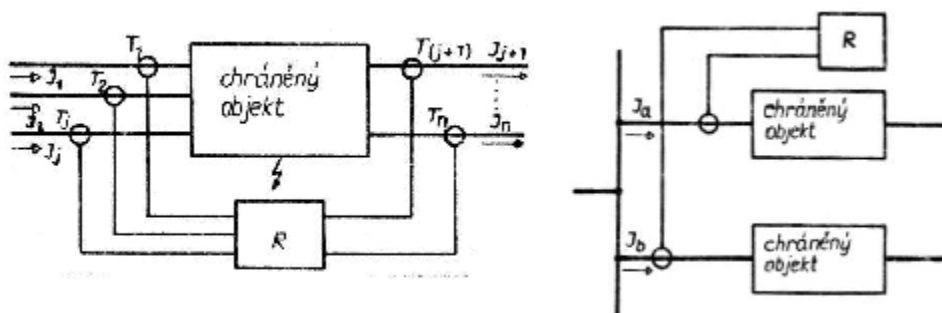
Při nesymetrickém zatížení vzniká zpětná složka proudu o dvojnásobné frekvenci sítě. Zpětná složka indukuje do tělesa rotoru proudy, které způsobují jeho lokální zahřívání. Tyto proudy navíc vytváří elektromagnetické síly, které zvyšují vibrace při provozu. Z těchto důvodů nesmí být rozdíl proudů v jednotlivých fázích u turboalternátorů větší než 10%, u hydroalternátorů 20%.

### q Ochrany alternátoru

Jelikož je alternátor velmi drahé zařízení, je zapotřebí jej patřičně chránit proti poruchám a mimořádným provozním stavům a zamezit tak jeho poškození či zkrácení životnosti. Alternátor je také třeba odpojit, pokud jeho chod narušuje stabilitu elektrizační soustavy. Proto je alternátor vybaven systémem ochran.

- Rozdílová ochrana:

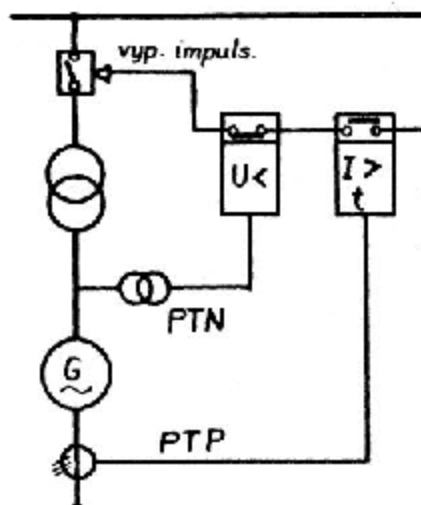
Jedná se o ochranu s vynikající selektivitou, která najde uplatnění hlavně při detekci vnitřních zkratů. Tyto ochrany dále dělíme na podélné a příčné. Podélná ochrana porovnává vstup a výstup objektu, příčná ochrana porovnává vstupy (případně výstupy) dvou totožných objektů. Pokud rozdíl měřených veličin překročí nastavenou hodnotu, dojde k vybavení ochrany. Příčné ochrany se používají jako ochrany paralelních větví statorového vinutí, podélné u blokových transformátorů a transformátorů vlastní spotřeby.



Obr. 6.12: Rozdílová ochrana

- Nadproudová zkratová ochrana:

Tato ochrana chrání alternátor před zkratem a zároveň funguje jako záloha rozdílové ochrany. Bývá doplněna podpětiovým článkem, aby se zamezilo falešnému spínání ochrany. Při zkratu sepne nadproudový článek a spustí se časový strojek (kvůli zajištění selektivity). Po uplynutí nastavené doby dojde k vybavení ochrany.



Obr. 6.13: Nadproudová zkratová ochrana

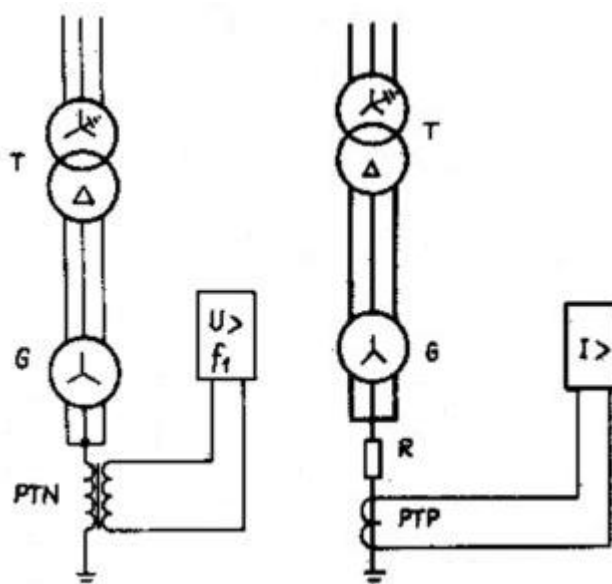
- Impedanční (distanční) ochrana:

Tato ochrana měří impedanci zkratové smyčky a chrání tak alternátor před zkratem. Na rozdíl od nadproudové zkratové ochrany má lepší selektivitu, jelikož její působení nezávisí na velikosti zkratového proudu a může tak pracovat bez časového zpoždění.

- Zemní ochrana statoru alternátoru:

Chrání stator alternátoru před zemním spojením. Zemní spojení musí být včas detekováno, aby se zamezilo poškození stroje zemním proudem (dochází také k jeho nesymetrickému zatížení). Zapojení ochrany se liší podle způsobu připojení alternátoru v síti.

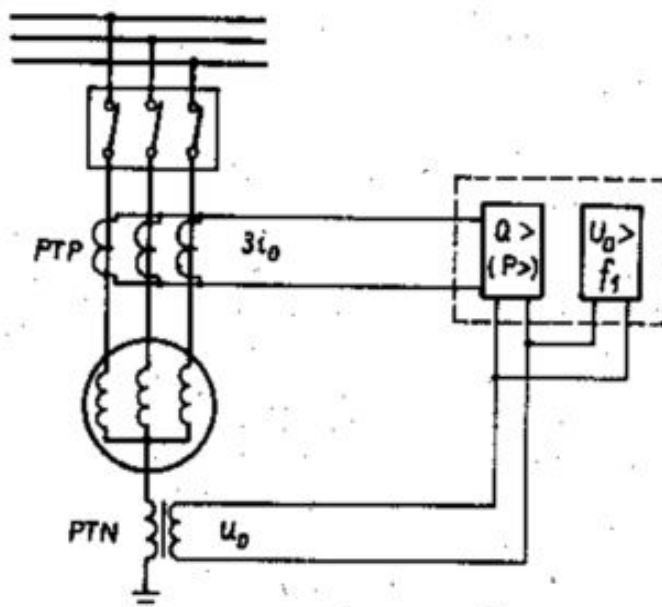
Pokud pracuje alternátor v jednom bloku s transformátorem, ochrana vyhodnocuje napětí mezi uzlem stroje a zemí, případně proud tekoucí z uzlu do země. Takto lze detekovat zemní spojení v rozsahu 95% vinutí.



Obr. 6.14: Zemní ochrana statoru při blokovém uspořádání

Pracuje-li alternátor do přípojníc, je nejprve nutné provést výpočty zemních kapacitních proudů alternátoru a sítě. V takovémto případě je ochrana vybavena jalovým článkem, který

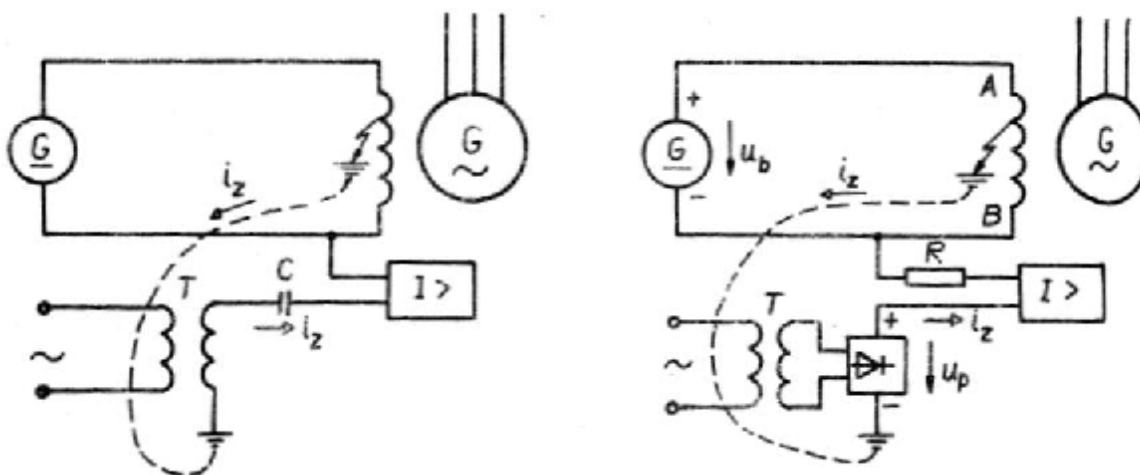
určuje směr toku kapacitního proudu a tím dokáže určit, zda-li došlo k zemnímu spojení v síti, nebo v alternátoru.



Obr. 6.15: Zemní ochrana statoru, alternátor pracuje do přípojnic

- Zemní ochrana rotoru alternátoru:

K zemnímu spojení rotoru alternátoru dochází při poškození izolace budícího vinutí a jeho spojení s tělesem rotoru. Pokud dojde ke spojení pouze v jednom místě (tzv. jednoduché spojení), je stroj stále možno provozovat. Dojde-li ovšem ke druhému spojení, vznikne zkrat části budícího obvodu a může dojít k těžké havárii alternátoru. Tato ochrana alternátor neodstavuje, pouze signalizuje vznik spojení. K indikaci zemního spojení se používá metod střídavé a stejnosměrné superpozice. V obou případech ochrana obsahuje proudový článek zaznamenávající nárůst proudu, ke kterému dojde při zemním spojení.



Obr. 6.16: Zemní ochrana rotoru

- Ochrana proti proudovému přetížení:

Chrání alternátor před nadměrným oteplením, které by způsobilo urychlené stárnutí izolace. Používají se časově zpožděné nezávislé proudové ochrany.

- Ochrana proti nadpětí:

Chrání alternátor při náhlém odlehčení zátěže, selhání regulátoru napětí a při protočení turbíny. Napětí je měřeno pomocí měřícího transformátoru a ochrana průběžně vyhodnocuje jeho velikost.

- Ochrana proti zpětnému toku výkonu (wattmetrická):

Tato ochrana odpojí alternátor v případě, kdy dojde k toku ze sítě do stroje (alternátor přejde na motorický chod). Ochrana je časově zpožděná, aby se zamezilo jejímu vybavení při kolísání výkonu.

- Ochrana proti nesymetrii:

Pomocí měřících transformátorů proudu v každé fázi průběžně vyhodnocuje zpětnou složku proudu a odpojí alternátor, pokud by došlo k jeho nedovolenému oteplení.

- Ochrana proti ztrátě buzení:

Tato ochrana zajišťuje snížení výkonu soustrojí při ztrátě buzení a jeho přechodu do asynchronního chodu. Po nastavené době (pokud buzení není obnoveno) alternátor odpojí.

- Ochrana proti podsynchronním otáčkám:

Blokuje regulátor napětí stroje do doby, než dosáhne jmenovitých otáček. Tím zamezuje nárůstu budícího proudu stroje a zabráňuje tak přesycení magnetických obvodů.

- Ochrana proti ložiskovým proudům:

Jelikož není magnetické pole alternátoru dokonale souměrné, dochází při jeho provozu ke vzniku napětí mezi hřídelí rotoru a statorem stroje. Aby se zamezilo toku proudu přes ložiska, jsou ložiskové pánve izolovány. Tato ochrana tedy kontroluje izolaci ložiskových pánví. Je tvořena měřícím transformátorem proudu, jehož středem prochází hřídel rotoru alternátoru. Pokud dojde k toku proudu přes ložiska, ochrana vybaví.

- Ochrana proti samobuzení:

K samobuzení stroje může dojít, pracuje-li alternátor do kapacitní zátěže (např. dlouhé vedení naprázdno). Samobuzení se projeví vzrůstem svorkového napětí stroje. Tato ochrana je tvořena přepětovým článkem, který je blokován minimálním proudem buzení.



### Shrnutí pojmů 6.1.

Turboalternátor, hydroalternátor, budiče, odbuzovače, fázování, alternátorové ochrany.



### Otázky 6.1.

1. Jaké jsou základní typy alternátorů?
2. Jaké jsou možnosti chlazení alternátorů?
3. Jak lze budít alternátor?
4. Vyjmenujte alternátorové ochrany.

## 6.2. Transformátory



## ČAS KE STUDIU:

1 hodina



## CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vyjmenovat typy a vysvětlit principy transformátorových ochran
- popsat provedení transformátorů



## VÝKLAD

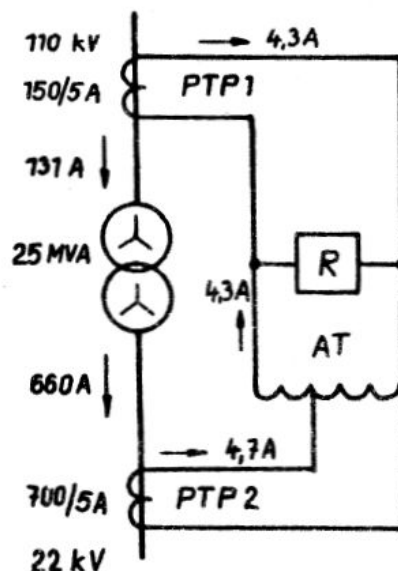
V každé elektrárně je použito několik druhů transformátorů, které se liší svým účelem a tím i vlastním provedením. Pomocí transformátorů se vyvádí výkon alternátorů do sítě, pokrývá se jimi vlastní spotřeba a transformují napětí pro vlastní spotřebu na patřičné napěťové hladiny.

### ¶ Ochrany transformátoru

Transformátory je třeba stejně jako ostatní zařízení chránit před poruchovými stavy. Poruchy transformátorů můžeme dělit na průchozí (nastávají vlivem připojené zátěže) a vnitřní (poruchy transformátoru samotného). Při poruše se může transformátor začít nebezpečně zahřívat, což vede ke zkrácení životnosti nebo až k destrukci některých jeho částí. Nebezpečné jsou také výboje uvnitř samotného transformátoru, případně silové projevy poruchových proudů. Proto transformátory vybavujeme systémem ochran, které jej v případě překročení nastavených parametrů odpojí a zamezí tak jeho poškození.

- Rozdílová ochrana:

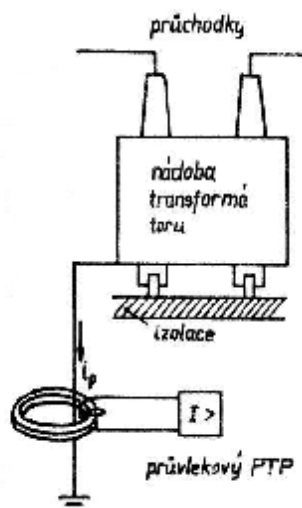
Chrání transformátor před vnitřními poruchami. Realizace této ochrany je složitější než u jiných objektů, jelikož vstupem a výstupem transformátoru tečou rozdílné proudy. Využívá se proto měřících transformátorů proudu s různými převodovými poměry. Je také třeba uvažovat fázové posuvy mezi proudy a náraz magnetizačního proudu při zapnutí transformátoru. Proto se do obvodů vkládají pomocné transformátory, případně se snižuje citlivost rozdílových relé.



Obr. 6.17: Rozdílová ochrana transformátoru

- Nádobová ochrana:

Tato ochrana vybavuje při přeskočení napětí na průchodkách transformátoru, nebo při spojení vinutí s jeho kostrou. Transformátor je umístěn izolovaně od země, zemnicí vodič prochází proudovým transformátorem. Dojde – li k výskytu napětí na kostře transformátoru, začne zemnicím vodičem protékat proud a ochrana vybaví.



Obr. 6.18: Nádobová ochrana transformátoru

- Nadproudová ochrana:

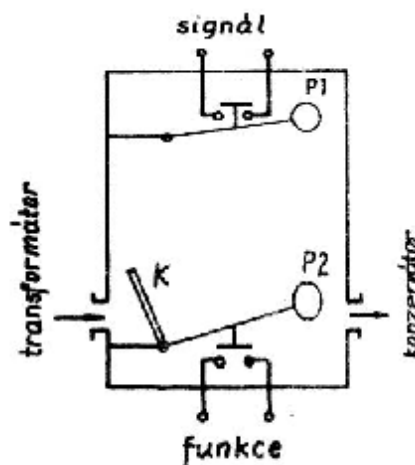
Používají se stejné prostředky jako u chránění jiných objektů. Běžná je trojfázová, časově zpožděná nadproudová ochrana. Pokud je zapotřebí ochranu znečitlivět vůči vzdáleným zkratům, využijeme podpětového blokování.

- Plynové relé:

Tato ochrana nalezne své uplatnění u transformátorů s olejovým chlazením. Průvodním jevem některých poruch transformátoru je totiž výron plynů z chladicího oleje. Ochrana je umístěna mezi víkem transformátoru a konzervátorem a je vybavena dvěma plováky. Plovák P1 reaguje na pomalé vyvíjení plynů (např. při přetížení), plovák P2 reaguje na pokles



hladiny oleje (např. při zkratech, netěsnosti nádoby apod.). Plovák P2 může být vybaven klapkou, která urychluje funkci ochrany při zkratech (olej začne proudit z nádoby do konzervátoru). Při sepnutí plováku P1 dojde pouze k signalizaci poruchy, plovák P2 způsobí okamžité vybavení ochrany.



Obr. 6.19: Nádobová ochrana transformátoru

#### q Hlavní transformátory

Hlavní transformátory slouží k vyvedení výkonu elektrárny, pokud alternátor nepracuje přímo do sítě. Transformují napětí alternátoru na napěťovou hladinu vhodnou pro přenos, mohou být také vybaveny odbočkou pro napájení vlastní spotřeby elektrárny (pokud není vlastní spotřeba kryta odbočkou ze svorek alternátoru). U jednotek velkých výkonů bývá použito dvou paralelních transformátorů, je také možný chod několika alternátorů do jednoho transformátoru. V případě blokového provedení elektrárny hovoříme o tzv. blokových transformátorech.

Výkon transformátoru je určen výkonem alternátoru, ke kterému je připojen (je ovšem třeba počítat s možným krátkodobým přetížením). Pokud je vlastní spotřeba elektrárny (případně bloku) pokryta ze svorek alternátoru, volí se výkon nižší o vlastní spotřebu. Transformátor je buďto třífázový, nebo je tvořen třemi jednofázovými jednotkami. Použití jednofázových transformátorů má své výhody – jsou jednodušší na výrobu a přepravu, levněji se také realizuje případná záloha (jako záložní stačí pouze jeden jednofázový transformátor na celou elektrárnu, kterým se v případě poruchy nahradí postižená jednotka). Nevýhodou je ovšem vyšší cena. Chlazení je olejové, přičemž může být umístěno mimo samotný transformátor. Cirkulace oleje je přirozená, nebo nucená.

Primární vinutí bývá téměř vždy zapojeno do trojúhelníka, jelikož tak lze celkem snadno snížit obsah třetí harmonické a zároveň lépe rozložit zatížení na jednotlivé fáze (zejména při nesouměrných zkratech). Rovněž i proudy jsou při zapojení do trojúhelníka nižší, což umožňuje použít vodiče menšího průřezu. Pokud se počítá s pokrytím vlastní spotřeby při rozběhu bloku z tohoto transformátoru, je mezi primárem a alternátorem zapojen alternátorový vypínač. Je – li vlastní spotřeba při rozběhu bloku kryta z jiného transformátoru, je alternátor připojen přímo na transformátor a vypínač se nachází až na jeho sekundární straně.

Sekundární vinutí je zapojeno do hvězdy, uzemnění uzlu může být připojeno přes odpojovač z důvodu různých zkoušek a měření. Napětí nakrátko je závislé na samotné konstrukci transformátoru a běžně bývá do 15%. Sekundár může být vybaven odbočkami, kterými lze upravit převodový poměr (případně je proveden jako autotransformátor), zejména pokud je připojen současně na více napěťových hladin.

## q Odbočkové transformátory

Tyto transformátory zajišťují vlastní spotřebu elektrárny. Mohou být napájeny přímo z alternátoru, nebo z vnější sítě. V některých případech musí pokrývat spotřebu elektrárny také při jejím rozběhu. Většinou bývají zálohovány. Sekundární vinutí těchto transformátorů může být zdvojeno kvůli omezení zkratových proudů. Izolace vinutí je většinou litá z důvodů větší spolehlivosti a nevybušnosti, zejména u starších zařízení se ale lze setkat s transformátory s olejovým chlazením.



### Shrnutí pojmů 6.2.

Transformátorové ochrany, hlavní transformátory, odbočkové transformátory.



### Otázky 6.2.

1. Vyjmenujte transformátorové ochrany.
2. Jak jsou chlazeny hlavní transformátory?.

## 6.3. Vlastní spotřeba elektrárny



### ČAS KE STUDIU:

20 minut



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat jednotlivá provedení zajištění vlastní spotřeby elektrárny, vyjmenovat jejich výhody a nevýhody popsat funkci



### VÝKLAD

Vlastní spotřebu elektrárny lze zajistit několika způsoby, které se od sebe liší jak spolehlivostí, tak investičními náklady. Provedení zajištění vlastní spotřeby elektrárny je také závislé na jejím hlavním elektrickém schématu. Zvláštní skupinou jsou pak elektrárny jaderné, ve kterých je zapotřebí zajistit napájení určitých částí za každých okolností, aby se zamezilo poškození zařízení nebo jaderné havárii.

Přepínání mezi jednotlivými zdroji se provádí buďto jejich krátkodobým paralelním spojením, nebo prostým přepnutím (v tom případě dojde ale ke krátkodobému výpadku napájení).

### q Pracovní zdroje

Pracovní zdroj kryje dodávku pro vlastní spotřebu při normálním provozu. V tomto stavu můžeme vlastní spotřebu pokrýt z různých zdrojů.

- Napojení na vnější síť:

Historicky zřejmě nejstarší provedení. Vlastní spotřeba elektrárny je plně kryta z vnější sítě. Investiční náklady jsou nízké, při výpadku vnější sítě je však znemožněn provoz elektrárny.

- Pomocný alternátor:

V tomto případě je vlastní spotřeba elektrárny kryta samostatným alternátorem, který je umístěn na společné hřídeli s hlavním alternátorem, nebo je poháněn samostatnou turbínou. Toto řešení se vyznačuje velkou spolehlivostí, je však investičně a provozně nákladné.

- Napojení na hlavní alternátor:

Jedná se o nejčastější řešení zejména u elektráren v blokovém provedení. Vlastní spotřeba je kryta odbočkou z hlavního alternátoru. Je – li napětí alternátoru shodné s napětím sítě vlastní spotřeby, je spojení přímé, případně přes reaktor. Jsou - li napětí odlišná, je do odbočky vložen transformátor. Výhodou je poměrně vysoká spolehlivost vzhledem k investičním a provozním nákladům.

### q Záložní zdroje

Záložní zdroj kryje dodávku pro vlastní spotřebu v případě výpadku pracovního zdroje. Jako záložní zdroj se zpravidla volí síťová rozvodna. V případě výpadku dojde k samočinnému přepnutí a napájení převezme automaticky záložní zdroj.

Jaderné elektrárny jsou z důvodu bezpečnosti napájeny z více stran, v případě úplného výpadku vnějšího napájení plní funkci záložních zdrojů dieslové generátory a akumulátorové baterie.

### q Najížděcí a doběhové zdroje

Tyto zdroje pokrývají vlastní spotřebu elektrárny při uvádění výroby do chodu a při jejím odstavení. Stejně jako v předchozím případě plní většinou tuto funkci síťová rozvodna, u jaderných elektráren se doběhové zdroje zálohují zdroji záložními (z důvodu bezpečného dochlazení aktivní zóny reaktoru).



### Shrnutí pojmů 6.3.

Pracovní zdroje, záložní zdroje, najížděcí a doběhové zdroje.



### Otázky 6.3.

1. Při jakém provozu kryje dodávku pro vlastní spotřebu pracovní zdroj?
2. K čemu slouží najížděcí a doběhové zdroje?.

## 6.4. Trendy v elektročásti

**ČAS KE STUDIU:**

30 minut

**CÍL:**

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vysvětlit princip bezkontaktního buzení
- popsát powerformer

**VÝKLAD**

Současné trendy v elektrárněnictví směřují ke zvyšování účinnosti a spolehlivosti zdrojů. Elektrická část elektrárny má (na rozdíl od té neelektrické) vysokou účinnost, která už prakticky dosáhla svých mezí. Další zvyšování účinnosti je tedy závislé zejména na výkumech nových materiálů pro konstrukci magnetických obvodů alternátorů a transformátorů a také na vývoji supravodivých materiálů.

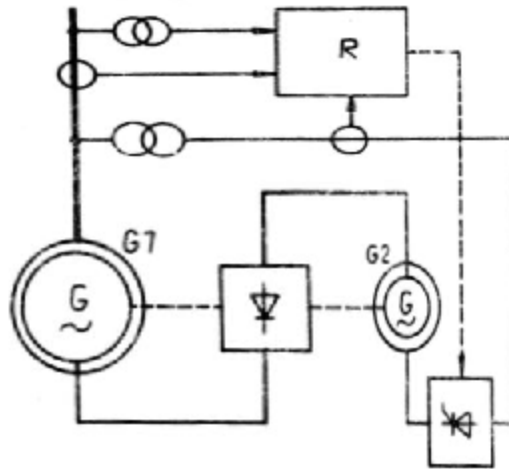
Spolehlivost zdrojů se zvyšuje zaváděním nových bezdemontážních diagnostických metod, které dokážou detekovat vznikající poruchu dříve, než dojde k jejímu vlivu na chod stroje, nebo případné havárii. To umožňuje lépe využít doby odstávky k údržbě stroje a celkově zlepšuje využití instalovaného výkonu, čímž se zkrátí doba návratnosti investice do jeho stavby.

#### ▣ **Bezkontaktní buzení alternátorů**

Přenos elektrické energie mezi rotujícími a stojícími částmi soustrojí je nejčastěji realizován kluznými kontakty. Kluzný kontakt je tvořen uhlíkovým blokem (tzv. kartáč), který dosedá na kroužek či komutátor, umístěný na hřídeli soustrojí. Při provozu dochází k opotřebení jak uhlíku, tak kroužku či komutátoru a je proto nutné kluzné kontakty průběžně kontrolovat. Navíc může docházet k jejich jiskření (odskokem uhlíku, přeskoky mezi lamelami komutátoru), které je zdrojem VF rušení a snižuje jeho životnost. Jelikož se jedná o velmi poruchovou část, můžeme zvýšit spolehlivost soustrojí tzv. bezkontaktním buzením.

- Bezkartáčové budiče s výkonovými diodami:

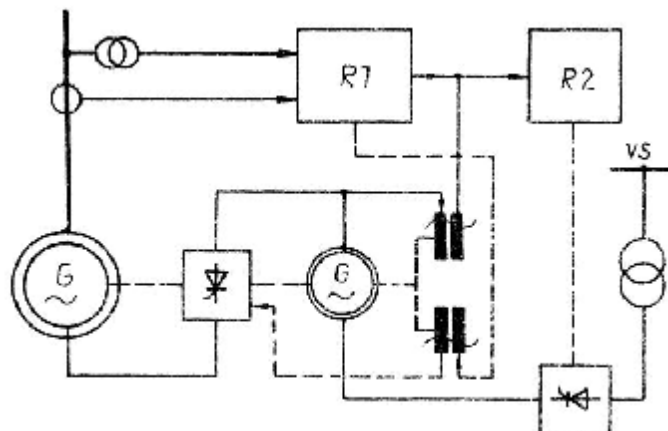
Budící soustava je tvořena střídavým budičem v tzv. inverzním provedení (pracovní vinutí je na rotoru), umístěném na společné hřídeli s alternátorem. Usměrnění budícího proudu je realizováno diodami, umístěnými na hřídeli soustrojí. Tento systém se používá u strojů malých výkonů, jelikož má špatnou dynamiku a pomalé odbuzení.



Obr. 6.20: Bezkartáčový budič s výkonovými diodami

- Bezkartáčové budiče s výkonovými tyristory:

Budící soustava je tvořena střídavým budičem, umístěným na společné hřídeli s alternátorem. Budič napájí budící vinutí alternátoru pomocí tyristorů, umístěného na hřídeli soustrojí. Jednotlivé gate tyristorů jsou napájeny pomocí speciálního rotačního převodníku. Napájení statoru budiče je také realizováno pomocí řízeného usměrňovače s tyristory. Tento systém má vynikající dynamické vlastnosti a velmi rychlé odbuzení. Vzhledem k vysoké ceně se však uplatňují pouze u alternátorů velkých výkonů.



Obr. 6.21: Bezkartáčový budič s výkonovými tyristory

#### q Powerformer

Jedná se o vysokonapěťový generátor vyvinutý firmou ABB, který má vysokou účinnost. Na rozdíl od běžných alternátorů je vinutí tohoto stroje tvořeno vysokonapěťovými kabely. To zvyšuje spolehlivost stroje a umožňuje jeho provoz až do napětí 400kV. Tím odpadá nutnost použít k vyvedení výkonu transformátoru, který je investičně velmi nákladný, zvyšuje poruchovost a snižuje jeho účinnost elektrárny.

Statorové vinutí stroje je tvořeno speciálními vysokonapěťovými kabely, které jsou izolovány polyetylenem. Izolace je kroková (s rostoucím počtem závitů se zesiluje) a je z obou stran doplněna o polovodivou vrstvu, přičemž ta vnější je přímo spojena se zemním potenciálem. Kabel má koaxiální uspořádání, díky němuž je jeho elektrické pole více homogenní než u vodičů obdélníkových průřezů.



## Shrnutí pojmů 6.4.

Bezkontaktní buzení, powerformer.



## Otázky 6.4.

1. Vymenujte výhody a nevýhody bezkontaktního buzení.
2. Popište princip powerformera.



## DALŠÍ ZDROJE 6

- [1] BRAUNER Jiří, ŠINDLER Zdeněk: Elektrická část elektráren, VŠB-TU Ostrava 1987
- [2] DVORSKÝ Emil, HEJTMÁNKOVÁ Pavla: Elektrárny, Západočeská univerzita 1997, ISBN: 80-7082-523-5
- [3] DOČEKAL Antonín, BOUČEK Stanislav: Elektrárny II, ČVUT Praha 1995
- [4] MATOUŠEK Antonín: Ekologie v elektroenergetice, VUT Brno 2000
- [5] ONDRÁŠEK Milan: Elektrárny II, VUT Brno
- [6] BERAN Miloš: Elektrická zařízení tepelných elektráren, VŠSE Praha 1988
- [7] MĚŘIČKA Jiří, HAMATA Václav, VOŽENÍLEK Petr: Elektrické stroje, ČVUT Praha 2000, ISBN: 80-01-02109-2
- [8] BENDA Břetislav: Výzkum parametrů tlumícího vinutí synchronního alternátoru, Elektrotechnický obzor 10/1960
- [9] KOLCUN Michal a kol.: Elektrárne, Technická univerzita v Košiciach 2006, ISBN: 80-8073-704-5
- [10] MIŠÁK Stanislav, KREJČÍ Petr, PROKOP Lukáš, SIKORA Tadeusz: Větrné elektrárny s asynchronními generátory v sítích VN, Elektorevue 2008/47, ISSN: 1213-1539



## CD-ROM

- **Elektro část** - animace popisující jednotlivé elektro části tepelné elektrárny

## 7. ELEKTROTEPELNÁ TECHNIKA

### 7.1. Základy sdílení tepla



#### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní pojmy v elektrotepelné technice
- popsat a vysvětlit přenos tepla vedením, prouděním a sáláním
- vyřešit jednoduché příklady na přestup tepla



#### VÝKLAD

#### q Pojmy, symboly, veličiny, jednotky

- **Termodynamická (TD) soustava** je vymezená část prostoru se svou látkovou náplní. Vně ní je její okolí. Soustava je od svého okolí oddělena hranicemi, ať již skutečnými, nebo smyšlenými. Vlastnosti této hranice určují její charakter z hlediska:
  - § propustnosti látky:
    - otevřená hranice – může přes ní přecházet energie i látka,
    - uzavřená hranice – oběma směry může přecházet pouze energie, ne látka,
  - § propustnosti energie:
    - neizolovaná hranice umožňuje přestup tepla i mechanické práce,
    - izolovaná hranice neumožňuje přestup tepla a mechanické práce mezi soustavou a jejím okolím,
  - § stejnorodosti:
    - homogenní – vlastnosti soustavy jsou ve všech částech stejné,
    - nehomogenní – vlastnosti soustavy se v některých částech mění skokově.
- **Termodynamické proměnné** jsou vhodně zvolené funkce (veličiny), které vyjadřují vlastnosti TD soustavy a její vzájemnou interakci s okolím.
- **Termodynamický děj** vyjadřuje změny, ke kterým dochází v soustavě a nebo na její hranici s okolím. Je to posloupnost stavů soustavy, při kterých se TD proměnné mění v prostoru a čase.
- **Termodynamická rovnováha** je stav soustavy, kdy TD proměnné nezávisí ani na místě v soustavě, ani na čase. Tento stav nastává u izolované a uzavřené soustavy po uplynutí určitého času. Úplná termodynamická rovnováha je rovnováha tepelná, mechanická, chemická.

- **Energie** je TD proměnná vyjadřující schopnost soustavy vykonávat práci. Z fyzikální podstaty je třeba rozlišovat vnější a vnitřní energii.
- **Vnější energie** souvisí s pohybem a polohou soustavy v poli vnějších sil. Představuje energii kinetickou.
- **Vnitřní energie** souvisí s vnitřním stavem soustavy a mikrofyzikálními pohyby v ní. Vnitřní energie soustavy se rovná celkové energii, kterou jí musíme dodat, aby přešla z jednoho stavu do druhého.
- **Tepl** je TD proměnná, kterou vyjadřujeme přírůstek nebo úbytek vnitřní energie soustavy, pokud tato energie nevykonává práci a pokud v soustavě neprobíhají chemické reakce a změny skupenství. Je to tedy část vnitřní energie soustavy, která se prostřednictvím mikrofyzikálních interakcí může vyměňovat s okolím. Tepl jako forma přenosu energie je vyjádřením působení neusměrněných mikroskopických sil. Není tedy stavovou veličinou, závisí totiž na způsobu vzájemné interakce soustavy s okolím.
- **Práce** je rovněž formou přenosu energie a jednou z forem, jakou je TD soustava ve vzájemné vazbě s okolím. Na rozdíl od tepla práce souvisí s působením makroskopických usměrněných sil (např. tlaku). Podobně jako tepl nezávisí na stavu soustavy, ale na vzájemné interakci s okolím. Proto také není stavovou veličinou. Práce je popisem uspořádaného vratného přenosu, zatímco tepl je popisem přenosu dokonale chaotického.
- **Termodynamická teplota** je stavová TD proměnná, která vyjadřuje tepelný stav soustavy, a je mírou její celkové vnitřní energie. Je to veličina kvantitativní. Dá se změřit prostřednictvím změny jiných fyzikálních vlastností soustavy, jakými jsou objem a tlak.
- **Teplotní rozdíl** - Pokud existuje v TD soustavě rozdíl teplot, pak dochází k výměně energií a k jejich vzájemnému vyrovnávání v podobě přenosu tepla. Každý element soustavy má svou vnitřní energii, tedy teplotu a vytváří tak skalární teplotní pole.
- **Tepelný výkon**  $P$  je tepl  $Q$  za jednotku času  $t$  ( $J \cdot s^{-1} = W$ ), je roven tepelnému toku  $F$ . Je to veličina skalární.

$$P = \frac{Q}{t} \quad (7.1)$$

- **Hustota tepelného toku**  $q$  má směr daný normálou a vyjadřuje množství energie procházející daným průřezem za určitý čas. Jednotkou je  $W \cdot m^{-2}$ .

$$q = \frac{dP}{dS} \quad (7.2)$$

- **Měrná tepelná kapacita**  $c$  ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) je tepelná kapacita jednoho kilogramu látky.

## q Kalorimetrické výpočty

Kalorimetrické výpočty patří k základním úlohám tepelné techniky. Typ materiálu určuje, jaké množství tepla je nutné dodat 1 kg látky, aby se ohřála o 1 teplotní stupeň. Schopnost látky akumulovat tepl určuje měrná tepelná kapacita  $c$ . Jedná se zpravidla o konstantu v určitém teplotním intervalu. Tab. 7.1 uvádí hodnoty této veličiny pro nejběžnější látky a materiály.



Látka	$c$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Látka	$c$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
voda	4187	železo	450
vzduch (°C)	1003	měď	383
ethanol	2460	zinek	385
led	2090	hliník	896
olej	2000	cín	227
suché dřevo (°C)	1450	olovo	129
kyslík	917	zlato	129
křemík	703	platina	133

Tab. 7.1: Měrná tepelná kapacita látek a materiálů

Základní otázkou kalorimetrického výpočtu je, jaké množství tepla je zapotřebí pro ohřátí (ochlazení) látky o hmotnosti  $m$  při teplotním rozdílu  $\Delta T$ . Kalorimetrická rovnice pak má tvar

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (7.3)$$

Přeměna elektrické energie na tepelnou probíhá s účinností  $h$ . Celkově dodaná energie pak závisí na elektrickém příkonu zařízení a na čase. Pro elektrickou energii platí vztah:

$$Q_e = P \cdot t \quad (7.4)$$

kde  $P$  je příkon (W),  $t$  je čas (s).

Sloučením obou rovnic a zahrnutím účinnosti dostaneme výsledný vztah pro rovnováhu tepelné a elektrické energie:

$$m \cdot c \cdot \Delta T = P \cdot h \cdot t \quad (7.5)$$

Vztahy mezi nejběžněji používanými jednotkami uvádí následující tabulka.

Jednotka	J	Wh	cal
J	1	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,239
Wh	3600	1	860
cal	4,186	$1,163 \cdot 10^{-3}$	1

Tab. 7.2: Vztahy mezi jednotkami

## q Přenos energie a přenos tepla

Při využití tepla jak pro průmyslové aplikace, tak pro potřeby vytápění, se jeho šíření řídí podle obecného principu šíření energie, tedy z místa s větší hustotou energie k místu s menší hustotou energie. Objemová hustota energie (J·m<sup>-3</sup>) je množství energie  $W$  příslušející jednotce objemu prostředí, tedy

$$w = \frac{dW}{dV} \quad (7.6)$$

Intenzitu přenosu energie pak vyjadřuje tepelný tok  $P$  (výkon)

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad (7.7)$$

Hustota tepelného toku  $\mathbf{q}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) se uvažuje jako průchod daného tepelného výkonu plochou  $S = 1 \text{ m}^2$ .

$$\mathbf{q} = \frac{dP}{dS} = \frac{d^2Q}{dS \cdot dt} \quad (7.8)$$

Přenos energie (tepla) prostředím je realizován pomocí nosičů energie. Jsou to částice, které se v daném prostředí vyskytují, ale mají vyšší energii než částice v jejich blízkosti, nebo se do daného prostředí dostanou z okolí. Z toho důvodu jsou druh, rychlost a způsob pohybu částic odlišené a závisí na typu prostředí. Může se jednat o elementární částice (elektrony, atomy), ale i elektromagnetické vlny, které přenášejí energii pomocí fotonů.

Existují dva konkrétní způsoby přemístování částic (nosičů energie) a závisí na koncentraci látkových částic v daném prostředí. První způsob se uplatňuje zejména v prostředích s vysokou koncentrací částic (pevné nebo kapalné skupenství). Pak částice, které se pohybují proti gradientu hustoty energie, jsou v neustálém kontaktu s ostatními částicemi prostředí. Jedná se tedy o přirozený přenos tepla s míst s vyšší tepelnou koncentrací do míst s koncentrací nižší. Energie je odevzdávána prostřednictvím neustálých srážek mezi částicemi.

Druhý a odlišný způsob přenosu energie se uskutečňuje v prostředí s nízkým obsahem částic. Přemístování nosičů energie probíhá zářením. To může mít například formu světla. Tyto principy popisují přenos tepla prostředím a jsou pro ně odvozeny tyto tři způsoby přenosu tepla [11]:

- vedení tepla (kondukce),
- proudění tepla (konvekce),
- sálání tepla (záření, radiace).

#### q Přenos tepla vedením

Uvnitř pevných těles nebo v jejich těsném dotyku dochází k přenosu tepla vedením. Teplo, podobně jako magnetická nebo elektrická energie, vytváří kolem sebe tzv. tepelné pole. Tepelné pole je množina okamžitých teplot všech bodů zkoumané části prostoru a je polem skalárním. Z hlediska prostoru může být jedno, dvou, nebo třírozměrné, z hlediska času stacionární nebo nestacionární. Obecně je teplota funkcí souřadnic a času.

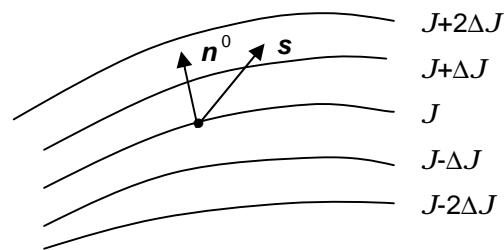
$$J = J(x, y, z, t) \quad (7.9)$$

Platí-li

$$\frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (7.10)$$

pak se jedná o pole stacionární – teplota se v čase nemění. Při výpočtu tepelných ztrát a tepelné pohody prostředí se předpokládá ustálený stav, tj. řeší se případ stacionárního teplotního pole.

Spojnice míst se stejnou hladinou tepelné energie (stejnou teplotou) se nazývají izotermy (Obr. 7.1), resp. izotermické plochy. Pokud jsou vlastnosti materiálu z hlediska vedení tepla ve všech směrech stejné, jde o prostředí izotropní.


**Obr. 7.1: Izotermy**

Největší změny teploty nastávají ve směru normály k izotermické ploše. Limitní hodnotou teplotního spádu je gradient teploty.

$$\text{grad } J = \lim_{n \rightarrow 0} \frac{\Delta J}{\Delta n} \mathbf{n}^0 \quad (7.11)$$

Je to vektor kolmý k izotermické ploše. Množina teplotních gradientů tvoří vektorové pole. Existence pole (je-li nenulové) znamená, že v prostoru dochází k šíření tepla.

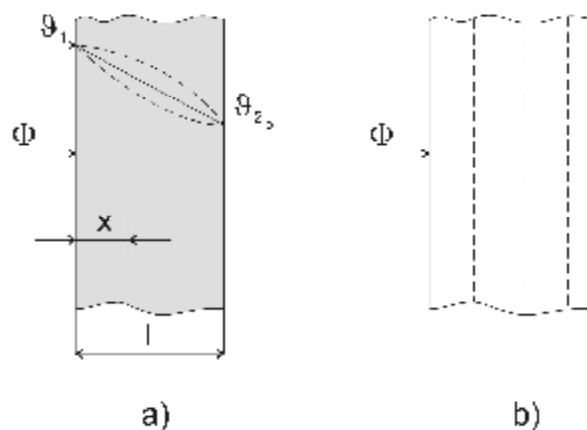
#### q Vedení tepla rovinnou stěnou

Tepelný tok  $\Phi$  (W) procházející homogenní rovinnou stěnou o tloušťce  $l$ , ploše  $S$ , součiniteli tepelné vodivosti materiálu  $\lambda$  a rozdílu povrchových teplot  $J_1 - J_2$  (Obr. 7.2 a) je

$$\Phi = \frac{\lambda}{l} \cdot S \cdot (J_1 - J_2) \quad (7.12)$$

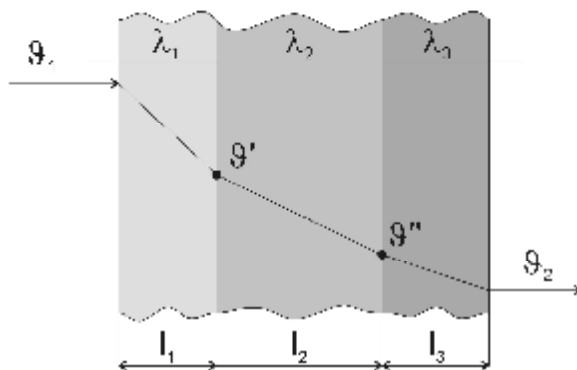
Teplota  $J$  se zmenšuje lineárně se vzdáleností  $x$  z hodnoty  $J_1$  na levém rozhraní na teplotu  $J_2$  na pravém rozhraní (rovnice 2.17). Čárkovanou čarou na Obr. 7.2 a nad lineárním průběhem je zobrazen skutečný průběh pro keramické materiály, pod lineárním průběhem pro čisté kovy. Na Obr. 7.2 b jsou čárkovaně vyznačeny izotermické plochy.

$$J = \frac{J_1 - J_2}{l} \cdot x + J_1 \quad (7.13)$$


**Obr. 7.2: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou**

Je-li stěna složena z několika různě silných vrstev materiálů s rozdílnou tepelnou vodivostí (Obr. 7.3), pak tepelný tok touto konstrukcí je

$$\Phi = \frac{S \cdot (J_1 - J_2)}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n}} \quad (7.14)$$



**Obr. 7.3: Vedení tepla složenou rovinnou stěnou**

U složené rovinné stěny pro teplotu na rozhraní vrstev platí vztahy:

$$J' = J_1 - \frac{\Phi \cdot l_1}{I_1 \cdot S} \quad (7.15)$$

$$J'' = J_2 + \frac{\Phi \cdot l_2}{I_2 \cdot S} \quad (7.16)$$

#### q Vedení tepla válcovou stěnou

Při vedení tepla z vnitřního povrchu tlustostěnné válcové trubky k vnějšímu povrchu (Obr. 7.4) se při vzrůstajícím průměru zvětšuje také plocha, kterou teplo prochází. Průběh teplot v závislosti na poloměru má proto tvar logaritmické křivky. Pro tepelný tok platí vztah

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (J_1 - J_2)}{\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (7.17)$$

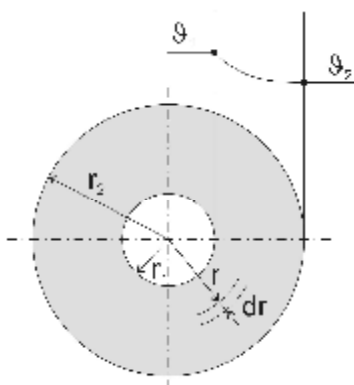
Pro složenou válcovou stěnu (Obr. 7.4) pak obdobně platí vztah

$$\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (J_1 - J_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \cdot \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad (7.18)$$

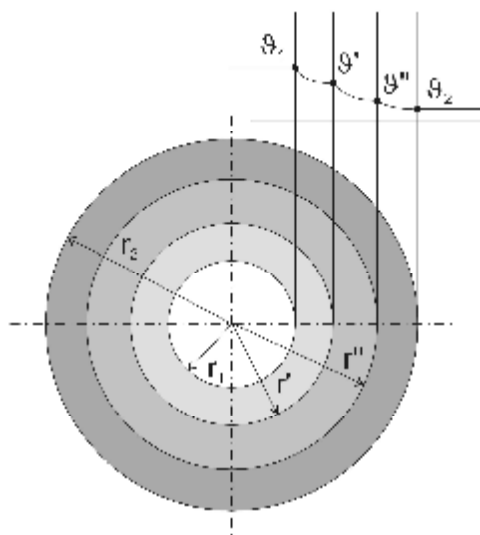
Teploty na rozhraní vrstev pak vypočteme podle

$$J' = J_1 - \frac{\Phi}{p \cdot l} \cdot \frac{1}{2 \cdot I_1} \cdot \ln \frac{d'}{d_1} \quad (7.19)$$

$$J'' = J_2 - \frac{\Phi}{p \cdot l} \cdot \frac{1}{2 \cdot I_3} \cdot \ln \frac{d_2}{d''}$$



Obr. 7.4: Vedení tepla válcovou stěnou



Obr. 7.5: Vedení tepla složenou válcovou stěnou

Tabulka Tab. 7.3 udává tepelné vodivosti vybraných materiálů.

Druh materiálu (látky)	Tepelná vodivost $\lambda$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
vzduch	0,025 (při 20°C)
voda	0,6 (při 20°C)
led	2,2
tepelné izolanty	0,03 – 0,1
dřevo	0,1 - 0,5
stavební materiály	0,2 – 1,2
kámen	15 – 3,5
čisté kovy	50 – 400
slitiny	10 – 200

Tab. 7.3: Tepelné vodivosti vybraných materiálů

### q Přenos tepla prouděním

Proudění je takový způsob přenosu tepla, který je vázán na přenos hmoty o určité vnitřní energii z jednoho místa na druhé. Z makroskopického pohledu se nejedná o přenos tepla, ale o přenos hmoty, na kterou je teplo vázané. Tento pohyb je iniciován buď gradientem teploty, nebo také vnějším působením (např. ventilátorem). Rozlišují se tedy dvě možnosti:

- přirozená konvekce,
- nucená konvekce.

Při obtékání povrchu pevného prostředí o teplotě  $T_p$  a proudící tekutinou o teplotě  $T_i$  platí pro hustotu tepelného toku rovnice

$$\mathbf{q}_k = a \cdot (T_p - T_i) = a \cdot \Delta T \quad (7.20)$$

To znamená, že hustota tepelného toku prouděním je přímo dána teplotním rozdílem mezi povrchem a tekutinou. Velikost hustoty tepelného toku ovlivňuje součinitel přestupu tepla  $a$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Ten je závislý na tlaku, teplotě a rychlosti proudění tekutiny, na druhu proudění (laminární nebo turbulentní) a na fyzikálních vlastnostech kapaliny (hustotě, měrné tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a viskozitě) a dále na tvaru, rozměrech a drsnosti obtékaného tělesa. Následující tabulka uvádí hodnoty tohoto součinitele pro některé známé případy.

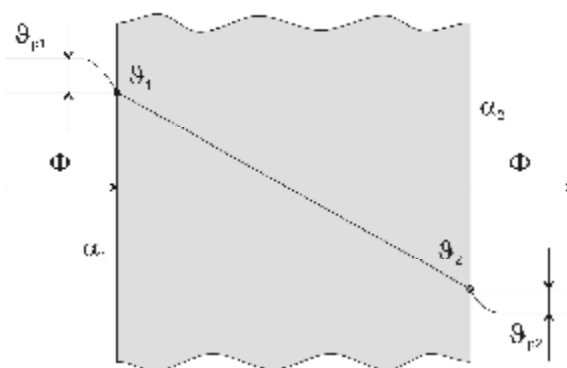
	$a_{\min}$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )	$a_{\max}$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
klidný vzduch	12,5	125
proudící vzduch	40	2100
proudící kapalina	8400	21000
vroucí kapalina	16800	25100
kondenzující páry	29000	50000

**Tab. 7.4: Hodnoty součinitele přestupu tepla [12]**

Přenos tepla prouděním patří k nejobtížnějším výpočtovým problémům v tepelné technice. Zabývá se jím mnoho odborné literatury. V důležitých případech je nejlépe, určíme-li součinitel přestupu tepla  $a$  sami měřením na modelu co nejvíce odpovídajícím našemu případu při použití uvedených vztahů v nichž se  $\alpha$  vyskytuje. Při přestupu tepla prouděním (Obr. 7.6) platí Newtonův zákon:

$$\Phi = a_1 \cdot (J_{p1} - J_1) \cdot S \quad (7.21)$$

$$\Phi = a_2 \cdot (J_2 - J_{p2}) \cdot S \quad (7.22)$$



**Obr. 7.6: Přenos tepla prouděním**

Mezi teplotou prostředí a teplotou povrchu je i v ustáleném stavu teplotní rozdíl daný tím, že na povrchu stěny lpí vždy tenká vrstva plynu nebo kapaliny, která se neúčastní proudění. Touto vrstvou prochází tepelný tok pouze vedením, a protože tepelná vodivost plynů a kapalin je malá, nastává zde teplotní skok.

## q Přenos tepla sáláním

Přenos tepla sáláním se liší od vedení a proudění jiným mechanismem přenosu. Přenos energie, respektive tepla, se děje pomocí elektromagnetických vln v celém rozsahu vlnových délek. Elektromagnetické vlnění je vytvářeno každým neprůzračným tělesem o teplotě větší než 0 K a zároveň okolní záření pohlcuje.

Záření lze rozložit na jednotlivé složky, kterým odpovídají jednotlivé vlnové délky, a můžeme tak získat vyzařované spektrum.

Na těleso rovněž dopadá tepelný tok od ostatních těles v prostoru. K ohřevu tělesa pochopitelně dochází, přijímá-li ze svého okolí více energie než samo vyzařuje a naopak. Množství vyzařované energie je úměrné ploše aktivního povrchu tělesa a čtvrté mocnině jeho termodynamické teploty. Je rovněž závislé na charakteru povrchu tělesa. Tok energie dopadající na těleso lze rozdělit na tři části:

- A - pohlcený tok (A je poměrná pohltivost – absorpce),
- B – odražený tok (B je poměrná odrazivost - reflexe),
- C - prostupující tok (C je poměrná propustnost).

Musí platit

$$A + B + C = 1 \quad (7.23)$$

Lze definovat tyto extrémy:

A = 1 .....absolutně černý povrch (celá energie tepelného toku je tělesem pohlcena),

B = 1 .....absolutně bílý povrch (veškerá energie je tělesem odražena),

C = 1 .....průzračné (průteplivé) prostředí - dvouatomové plyny a vzduch,

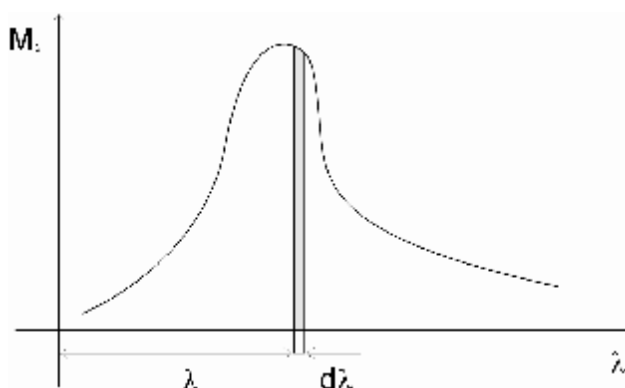
C = 0 .....tepelně neprůzračné prostředí - např. kovy.

Tyto koeficienty mohou být závislé na frekvenci elektromagnetické vlny, proto je možné definovat jejich spektrální hodnoty, a pro všechny vlnové délky musí platit

$$A_\lambda + B_\lambda + C_\lambda = 1 \quad (7.24)$$

## q Zákony sálání

Přenos tepla sáláním (zářením) se řídí fyzikálními zákony. Povrch zahřátého absolutně černého tělesa vyzařuje souvislé spektrum záření o různých vlnových délkách ().



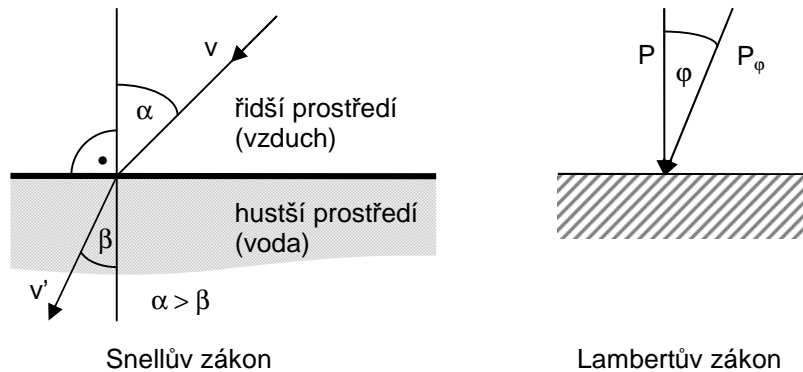
Obr. 7.7: Průběh spektrální zářivosti v závislosti na vlnové délce

q **Snellův zákon**

Snellův zákon vyjadřuje charakter šíření záření při přechodu z jednoho prostředí do druhého (Obr. 7.8). Pro směr šíření platí vztah

$$\frac{\sin a}{\sin b} = \frac{v}{v'} = n \quad (7.25)$$

kde  $n$  je index lomu,  $v$  a  $v'$  jsou rychlosti šíření v daných prostředích.



**Obr. 7.8: Šíření záření na přechodu dvou prostředí [14]**

q **Zákon Lambertův**

Zákon Lambertův říká, že výkonově se uplatňuje pouze kolmá složka záření.

$$P = P_j \cdot \cos j \quad (7.26)$$

kde  $j$  je úhel dopadu záření,  $P_j$  je energie ve směru úhlu  $j$ .

q **Zákon Stefan-Boltzmannův**

Zákon Stefan-Boltzmannův popisuje celkovou intenzitu záření absolutně černého tělesa. Tento zákon říká, že intenzita vyzařování  $M$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) roste se čtvrtou mocninou termodynamické teploty zářícího tělesa

$$M = s \cdot T^4 \quad (7.27)$$

kde  $s$  je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ ,  $T$  je termodynamická teplota v K.

q **Zákon Planckův**

Zákon Planckův popisuje závislost spektrální intenzity záření  $M_l$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ) absolutně černého tělesa na jeho povrchové teplotě

$$M_l = f(T, l) = \frac{C_1}{l^5 \left( e^{\frac{C_2}{l \cdot T}} - 1 \right)} \quad (7.28)$$

kde  $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ .



Rovnice (7.28) udává vyzářený výkon z 1 m<sup>2</sup> plochy pouze pro 1 vlnovou délku  $\lambda$ . Celkový vyzářený výkon bude sumou pro všechny vlnové délky, tedy pro  $\lambda = 0$  do  $\lambda = \infty$ .

$$M(T) = \int_0^{\infty} M(T, \lambda) \cdot d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \cdot d\lambda \quad (7.29)$$

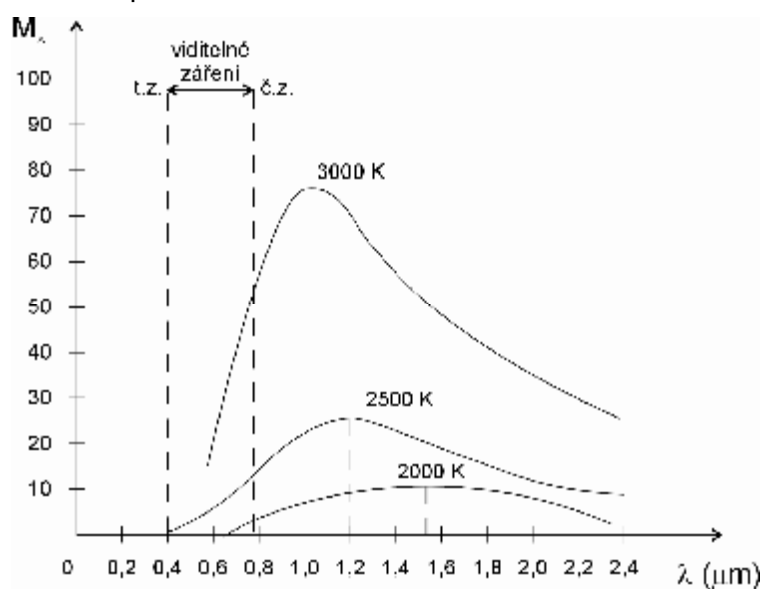
Integrací a dosazením konstant dostaneme vztah

$$M(T) = \sigma \cdot T^4 \quad (7.30)$$

což je vztah vyjadřující Stefan-Boltzmannův zákon - viz. rovnice (7.27).

### q Zákon Wienův

Spektrální intenzita záření  $M_\lambda$  je za dané teploty nejintenzivnější pro vlnovou délku  $\lambda_m$ , která je nepřímo úměrná této teplotě  $T$ . Z toho vyplývá, že těleso vyzařuje svým povrchem při nízké teplotě pouze dlouhovlnné (infračervené) záření. S rostoucí teplotou tedy nejen stoupá zářivost tělesa, ale maximum vyzařovaného spektra se rovněž posouvá ke kratším vlnovým délkám – Wienův posunovací zákon.



Obr. 7.9: Wienův posunovací zákon

$$\lambda_m = \frac{2892}{T} \quad (7.31)$$

Lidské oko je přizpůsobeno slunečnímu záření, které má maximum v oblasti barvy žlutozelené, odpovídající vlnové délce  $\lambda = 500$  nm. Dosazením této hodnoty do Wienova zákona dostaneme teplotu slunečního povrchu

$$T = \frac{2892}{0,5} = 5784 \text{ K} \quad (7.32)$$

### q Zákon Kirchhoffův

Zákon Kirchhoffův platí pro spektrální i úhrnnou zářivost šedých těles ve vztahu k tělesům s absolutně černým povrchem.

Poměr úhrnné zářivosti a relativní pohltivosti šedého tělesa je závislý pouze na absolutní teplotě tělesa  $T$  a nezávisí na barvě povrchu. Můžeme tedy napsat Kirchhoffův zákon pro záření také v této podobě – pro spektrální zářivost:

$$\frac{M_{\lambda s}}{A_{\lambda s}} = f(T) = \frac{M_{\lambda c}}{A_{\lambda c}} = M_{\lambda c} \quad (7.33)$$

$$\frac{M_{I s}}{A_{I s}} = f(T, I) = M_{I c} \quad (7.34)$$

kde  $M_s$ ,  $M_c$  ( $M_{I s}$ ,  $M_{I c}$ ) jsou úhrnné (spektrální) zářivosti šedého a černého povrchu a  $A_s$ ,  $A_c$  ( $A_{I s}$ ,  $A_{I c}$ ) jsou relativní (spektrální) pohltivost šedého a černého povrchu.

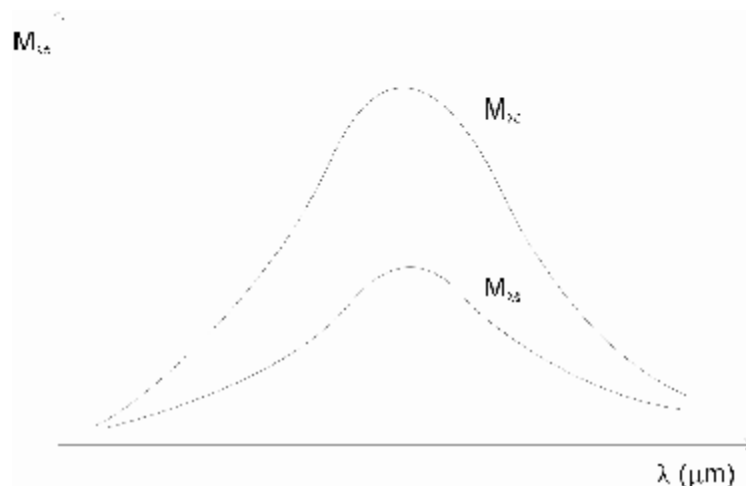
Z křivek na Obr. 7.9 vidíme, že absolutně černý povrch vyzařuje plynulé spektrum zářivosti, nepřerušované mezerami. Pro většinu skutečných, tj. fyzikálně šedých povrchů, je křivka spektrální zářivosti rovněž nepřerušovaná a je podobná křivce černého tělesa (Obr. 7.10). Můžeme tedy napsat:

$$\frac{M_{I s}}{M_{I c}} = \text{konst.} = e \quad (7.35)$$

Nebo jinak:

$$A_s = \frac{M_s}{M_c} = \frac{e \cdot s_c \cdot T^4}{s_c \cdot T^4} = e \quad (7.36)$$

Můžeme tedy říci, že poměrná pohltivost  $A_s$  je číselně rovna stupni černosti  $e$  uvažovaného povrchu.



Obr. 7.10: Spektrální zářivost pro černý a šedý povrch

Informativní hodnoty emisivity jsou v následující tabulce.

Materiál	Emisivita $e$ (-)
absolutně černé těleso	1
saze, grafit	0,95
zoxidovaná ocel	0,85-0,95
zoxidovaná měď	0,7
cihla pálená	0,9
cihla šamotová	0,8
zoxidovaný hliník	0,3
lesklý hliník	0,1
leštěná ocel	0,29
leštěný nikl	0,07
leštěné stříbro	0,02
voda, led (hladký povrch)	0,96
sklo	0,94

Tab. 7.5: Hodnoty emisivity [12]

#### q Vzájemné ozařování povrchů těles

Těleso o ploše  $S$  vyzařuje sálavý tok

$$\Phi = M \cdot S = s \cdot T^4 \cdot S \quad (7.37)$$

Budeme uvažovat dvě tělesa o plochách  $S_1$ ,  $S_2$ , termodynamických teplotách povrchů  $T_1$ ,  $T_2$  a o emisivitách  $e_1$  a  $e_2$ . Pak pro sálavý tepelný tok v ustáleném stavu platí pro

- případ dvou rovnoběžných, stejně velkých ploch, kdy  $S_1 = S_2 = S$

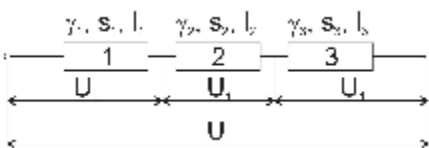
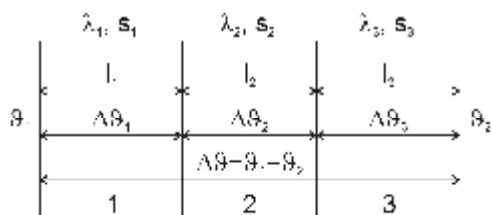
$$\Phi = \frac{S \cdot s_\varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \quad (7.38)$$

- případ dvou těles, kdy jedno zcela prostorově obklopuje druhé, tedy  $S_1 \ll S_2$

$$\Phi = \frac{S_1 \cdot s_\varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{S_1}{S_2} \cdot \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right)} \quad (7.39)$$

#### q Analogie mezi teplotním a elektrickým polem

Analogie podstatně usnadňuje výpočty šíření tepla v jednodušších soustavách a v ustáleném stavu. Stacionární proudové pole a stacionární teplotní pole jsou nevírová, nezřídlová, proto platí Laplaceova věta. V Tab. 7.6 jsou uvedeny příklady analogie mezi polem elektrickým a teplotním.

Pole elektrické	Pole teplotní
<b>Potenciál</b> Nulový potenciál je v nekonečnu skalární veličina, jednotka (V)	<b>Termodynamická teplota</b> Absolutní nula = -273,15 °C Skalární veličina, jednotka (K)
<b>Napětí</b> $U = V_1 - V_2$ (V)	<b>Teplotní rozdíl</b> $\Delta T = T_1 - T_2$ (K)
<b>Konduktivita</b> $\gamma$ (S·m <sup>-1</sup> )	<b>Teplná vodivost</b> $l$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
<b>Rezistivita</b> $r = \frac{1}{g}$ (Ω·m)	<b>Měrný tepelný odpor</b> $\frac{1}{l}$ (m·K·W <sup>-1</sup> )
<b>Elektrická vodivost</b> $G = \frac{g \cdot S}{l}$ (S)	<b>Teplná vodivost</b> $G = \frac{l \cdot S}{l}$ (W·K <sup>-1</sup> )
<b>Elektrický odpor</b> $R = \frac{l}{g \cdot S} = \frac{r \cdot l}{S}$ (Ω)	<b>Tepelný odpor</b> $R = \frac{l}{l \cdot S}$ (K·W <sup>-1</sup> )
<b>Elektrický proud</b> $I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$ (A)	<b>Tepelný tok</b> $\Phi = \int_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S}$ (W)
<b>Odpory v sérii</b>  $R = R_1 + R_2 + R_3$	<b>Vedení tepla složenou stěnou</b>  $R = R_1 + R_2 + R_3$

Tab. 7.6: Příklady elektrotepelné analogie [13]



### Shrnutí pojmů 7.1.

Teplota, teplota, tepelný tok, gradient teploty, hustota tepelného toku, tepelný výkon, izoterma, vedení tepla, proudění, sálání, součinitel přestupu tepla, úhrnná zářivost, spektrální zářivost, relativní pohltivost, absolutně černé těleso, emisivita.



### Otázky 7.1.

3. Definujte pojmy teplo, teplota, měrná tepelná kapacita tělesa.
4. Vysvětlete pojmy stacionární teplotní pole a izotropní prostředí.
5. U jakých těles dochází k přenosu tepla vedením, vysvětlete princip.
6. Co vyjadřuje součinitel přestupu tepla vedením  $l$ ? Uveďte jednotku.
7. Vysvětlete, co je součinitel přestupu tepla prouděním  $a$ , na čem je závislý, jeho jednotku.

8. Vysvětlete pojem teplotní skok při proudění.
9. Uveďte příklady těles absolutně černého, absolutně bílého, průzračného.
10. Vyjmenujte zákony, které platí při přenosu tepla sáláním.
11. Co je posunovací zákon, vysvětlete.
12. Vysvětlete pojmy úhrnná a spektrální zářivost, napište vztahy.
13. Vysvětlete pojem emisivita povchu  $\epsilon$ .

## 7.2. Elektrotepelná zařízení odporová



### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete

- znát princip přímého a nepřímého odporového ohřevu
- schopni popsat užití odporového ohřevu v praxi
- znát konstrukční prvky elektrických odporových pecí
- moci navrhnout potřebný výkon odporové pece



### VÝKLAD

#### □ Přímý odporový ohřev

V zařízeních pro přímý odporový ohřev vzniká teplo přímým průchodem proudu elektricky vodivou pevnou vsázkou nebo elektricky vodivou kapalinou – elektrolytem obklopujícím vsázkou. Teoretické základy přímého odporového ohřevu jsou jednoduché (Jouleův zákon). Prochází-li vodičem o odporu  $R$  po dobu  $t$  proud  $I$ , vzniká ve vodiči teplo  $Q$ .

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t = P \cdot t \quad (7.40)$$

Odpor vodiče o délce  $l$  (m) a průřezu  $s$  (mm<sup>2</sup>) je

$$R = \frac{r \cdot l}{s} \quad (7.41)$$

kde  $r$  je rezistivita materiálu. Tato je u většiny materiálů závislá na teplotě. Při oteplení o  $\Delta T$  je

$$R_J = R \cdot (1 + a \cdot \Delta T) \quad (7.42)$$

kde  $a$  je teplotní činitel odporu, který je pro většinu kovů kladný, pro keramické materiály záporný a je silně závislý na teplotě.

Výpočty a projektování těchto zařízení nejsou snadné. Zde se projevují obtíže související s nelineární závislostí fyzikálních vlastností vsázky či elektrolytu na teplotě. Jde zejména o rezistivitu, měrnou tepelnou kapacitu a také o tepelnou vodivost. Tyto veličiny ovlivňují tepelnou bilanci ohřevu, kterou lze vyjádřit vztahem

$$Q = Q_u + Q_z \quad (7.43)$$

kde  $Q$  je teplo vzniklé průchodem proudu,  $Q_u$  je užitečné teplo potřebné k ohřevu vsázky a  $Q_z$  jsou tepelné ztráty. Uvedená tepelná bilance tvoří základ k určení potřebného výkonu:

$$P \approx \frac{dQ}{dt} \quad (7.44)$$

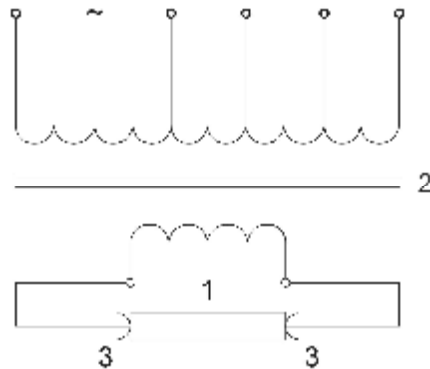
Ten závisí na časovém průběhu ohřevu vsázky. Celkový odebíraný výkon  $P_c$  elektrotepelného zařízení se zvětšuje o tepelné ztráty způsobené vsázecím zařízením, ochlazováním vsázky, o výkon potřebný pro pohon mechanismů a o ztráty příslušného transformátoru.

Podle vzniku tepla lze zařízení pro přímý odporový ohřev dělit na dva základní typy:

- zařízení pro ohřev pevné vsázky,
- zařízení pro ohřev tekuté vsázky.

#### q Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů, pásů apod.

Princip odporového ohřevu je schematicky znázorněn na Obr. 7.11. Délka ohřívané tyče musí být nejméně 10krát delší než její průměr, aby byl ohřev dostatečně rovnoměrný po celé délce. Do tyče 1 konstantního průřezu je z regulačního transformátoru 2 zaváděn kontakty 3 velký proud. Ohřev je velmi rychlý a účinný.

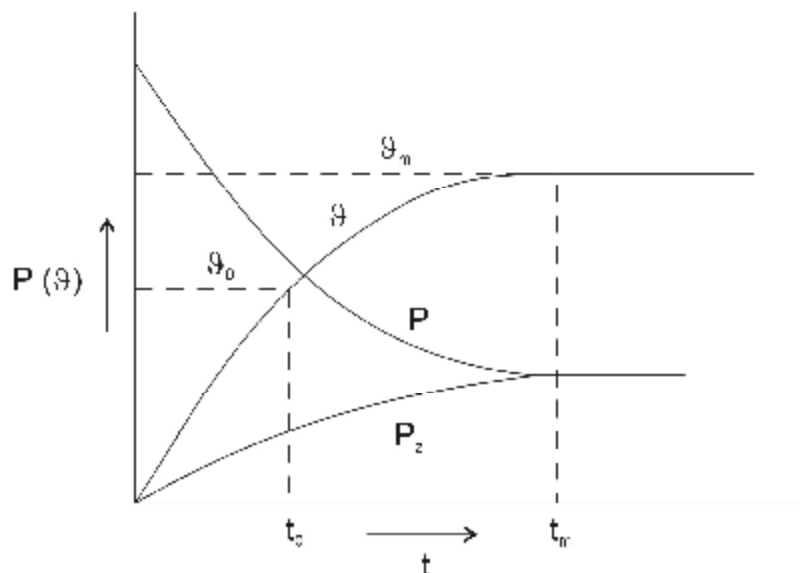


**Obr. 7.11: Ohřev dlouhých kovových tyčí, drátů a pásů**

Optimální poměry nastávají, jestliže se činný odpor tyče rovná impedanci celého přívodního vedení. Tomu se blíží studená měděná tyč. Odpor oceli však stoupá až 7krát při ohřátí z 20 °C na 1200 °C. Aby impedanční přizpůsobení bylo přijatelné, zvyšujeme během ohřevu napětí na tyči souhlasně s růstem odporu přepínáním odboček na vstupním vinutí transformátoru. Konce tyčí musí být pokud možno čisté, kontakty bývají měděné, chlazené vodou a jsou k ohřívané tyči přitlačovány pneumaticky nebo hydraulicky.

Ohřev přímým průchodem proudu se výhodně aplikuje při výkonech do 100 kW a ve zvláště vhodných případech. U jednofázového zařízení nad 500 kW je nutno použít symetrizační zařízení.

Průběhy příkonu, teploty a ztrát při přímém odporovém ohřevu ocelové tyče bez přepínání napětí jsou na Obr. 7.12. Příkon klesá podle růstu odporu tyče s teplotou, tepelné ztráty rostou. Rovná-li se příkon ztrátám, dosáhla teplota své mezní hodnoty. Teplota ohřevu musí být menší než mezní.



Obr. 7.12: Průběhy příkonu, teploty a ztrát [15]

Účinnost  $\cos \varphi$  je u přímého odporového ohřevu nízký, je to proto, že se výrazně uplatňuje reaktance přívodů ke kontaktům u vysokých proudů. Zapínáním a vypínáním transformátoru při ohřevu dochází ke kolísání napětí v síti. U zařízení jednofázového nad 500 kW je nutno použít symetrizačního zařízení.

Při přímém ohřevu ocelových feromagnetických tyčí střídavým proudem se uplatňuje značně povrchový jev. Největší teplo (86,4 %) vzniká přibližně v tzv. hloubce vniku  $a$ . Lze ji určit podle vztahu

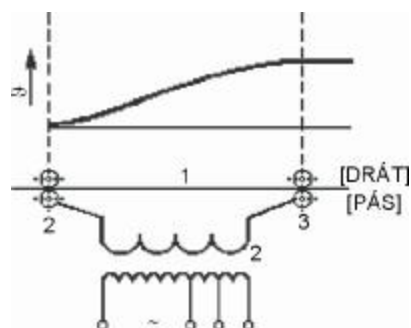
$$a = \sqrt{\frac{2 \cdot r}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (7.45)$$

kde  $\rho$  je rezistivita tyče,  $\omega$  je úhlová rychlost,  $\mu_0$  je permeabilita vakua a  $\mu_r$  je relativní permeabilita.

Pro běžnou konstrukční ocel (magnetickou) do teploty 768 °C (Curierův bod – ztráta feromagnetismu) je hloubka vniku  $a$  při frekvenci 50 Hz řádově v jednotkách mm. Nad teplotu 768 °C je  $\rho$  asi 7krát větší a hloubka vniku je asi 70 mm.

Zařízení pro průběžný ohřev drátu nebo pásu je znázorněno schematicky na Obr. 7.13. Drát nebo pás 1 je do proudového obvodu výstupní strany transformátoru 2 připojen kladkami 3 (nebo grafitovými bloky).

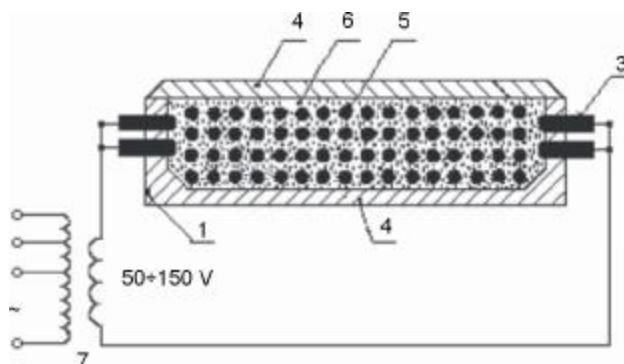
Konečné teploty ohřevu lze docílit změnou napětí mezi kladkami, změnou jejich vzájemné vzdálenosti, změnou protahovací rychlosti drátu. Popsaný ohřev se používá např. pro měkké žíhání měděných drátů a pásů před izolací pláštěm, pro ohřev ocelových tyčí pro kování, pro ohýbání, kalení drátů do předpjatého betonu apod.



Obr. 7.13: Zařízení pro průběžný ohřev

#### q Pece na výrobu grafitu a karbidu křemíku

Grafit a karbid křemíku (karborundum) se vyrábějí v Achesonových pecích (Obr. 7.14). Grafit se vyrábí z uhlíku tzv. grafitizace – chemickým procesem probíhající při teplotě kolem 2500 °C, při němž se amorfní uhlík strukturálně mění v grafit s vynikajícími fyzikálními, chemickými i mechanickými vlastnostmi.



Obr. 7.14: Grafitační pec Achesonova

Na Obr. 7.14 je 1 dno pece, 2 čelní stěna, 3 jsou grafitové bloky, 4 víko pece, 5 vsázka, 6 zásypová směs a 7 napájecí transformátor.

Pece mají délku až 20 m s hmotností vsázky 50 t i více. Příkon transformátorů až do 10 MVA. Napájecí napětí je regulováno v rozsahu 50 V až 150 V. Tyto pece mají malý  $\cos\varphi$  (kolem 0,5) a zatěžují napájecí síť nerovnoměrně. Proto u pecí s velkými výkony se používá symetrizační zařízení. Při napájení stejnosměrným proudem odpadá kompenzace i symetrizace a regulace výkonu je snazší.

Spotřeba elektrické energie na výrobu 1 kg grafitu se podle velikosti pece a druhu výrobků pohybuje od 4 kWh do 6 kWh, na 1 kg karbidu křemíku asi 8 kWh. Ohřev trvá 2 až 4 dny, po vypnutí pec chladne 10 až 14 dnů, pak se vsázka z pece vyjme.

#### q Termická elektrolýza

Elektrolyt se zahřívá přímým průchodem stejnosměrného proudu za současně probíhající elektrolýzy nebo rafinace. Nejrozšířenější termickou elektrolýzou je elektrolýtická výroba hliníku, používá se také k výrobě sodíku a hořčíku.

Hliník se vyrábí z bauxitu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), který má tavicí teplotu asi 2050 °C. Rozpuštěním bauxitu v roztaveném kryolitu (fluorid hlinito-sodný) lze však elektrolýzou již při 950 °C získávat hliník, což je technicky mnohem výhodnější.

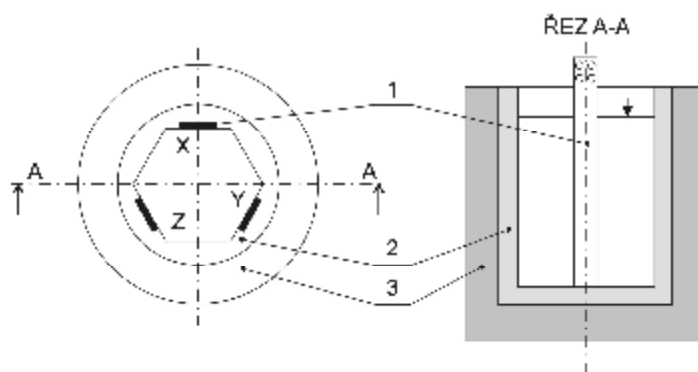
Na výrobu 1 kg je spotřeba elektrické energie podle velikosti a technického stavu zařízení 16 kWh až 22 kWh.



### q Elektrodové solné lázně

Solné lázně se používají zejména k ohřevu ocelových součástí ke kalení, např. kuliček nebo kroužků do kuličkových ložisek. Používají se i pro tepelné zpracování barevných kovů nebo slitin při teplotách až 1 400 °C. Dělí se na dva základní typy:

- Proud prochází nejen elektrolytem, ale i vsázkou ponořenou v elektrolytu, příkon závisí na vsázce. Na Obr. 7.15 jsou 1 elektrody, 2 keramický kelímeček a 3 jeho tepelná izolace.
- Vsázka se vkládá do soli v místě, kde není elektrické pole a vsázkou proud neprochází, příkon na vsázce nezávisí.



Obr. 7.15: Solná lázeň 1. typu

Elektrody mají velké stykové plochy, aby se zabránilo nadměrnému místnímu přehřátí. Teplo vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou solí. Používané soli jsou v tuhém stavu nevodivé. Proto je nutno použít přídatný odporový topný článek, který nataví tenkou vrstvu soli a pak se odpojí. Další ohřev nastává průchodem proudu touto vrstvou. Při ohřevu soli klesá její odpor, takže je potřebný k napájení transformátor s možností regulace sekundárního napětí v rozsahu 4 až 24 V. Podle pracovní teploty solné lázně se volí směs soli, která nejlépe vyhovuje.

Složení směsi (%)	Pracovní teplota (°C)
55 KNO + 45 NaNO <sub>3</sub>	230 ÷ 480
28 NaCl + 72 CaCl	550 ÷ 870
50 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 50 KCl	600 ÷ 820
65 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + 35 NaCl	650 ÷ 880
20 KCl + 80 BaCl <sub>2</sub>	850 ÷ 1350

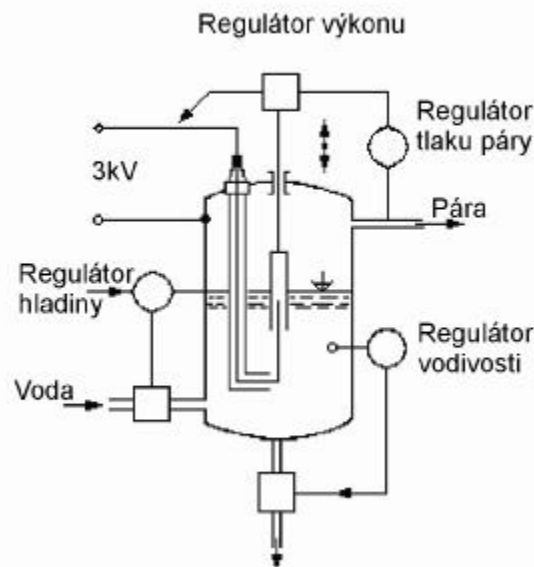
Tab. 7.7: Chemické složení některých používaných solí a rozsah použití

Hlavní výhodou solných lázní je rychlý, přesný a rovnoměrný ohřev vsázky bez přístupu vzduchu. Rychlost ohřevu je dána velkou hodnotou součinitele přestupu tepla prouděním mezi elektrolytem a tuhou vsázkou. Solné lázně musí splňovat přísné bezpečnostní provozní předpisy, např. odtah a čištění uvolňujících se zplodin z roztavených solí.

### q Elektrodotový ohřev vody

Pro přípravu horké vody a výrobu páry se využívá tepla vzniklého přímým průchodem proudu ohřívanou vodou. Proud se přivádí elektrodami grafitovými (pro malé příkony) nebo kovovými (pro příkony velké). Používá se střídavý proud pro zamezení vývinu výbušných plynů a koroze. Hustota proudu povrchem elektrody se volí do  $1,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , většinou kolem  $0,5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Elektrická vodivost vody závisí na jejím složení a zejména na její teplotě.

Používá se mnoho různých konstrukcí elektrodotových kotlů. Konstruuji se nejen pro napětí 231 V a 400 V, ale také pro napětí vysoká až do 30 kV. Průtokové kotle na ohřev vody se staví od výkonu několika kilowattů až do několika megawattů. Často se voda ohřívá nočním proudem jako akumulací médium pro vytápění i technologie v průmyslu papírenském, textilním, potravinářském apod. Například pro vaření se používají obvykle elektrodotové kotle na výrobu páry (Obr. 7.16), která se rozvádí do varných kotlů a vrací se zpět jako kondenzát. K průmyslové výrobě horké vody a páry se stavějí kotle s výkonem až 60 MW při provozním napětí 30 kV a přetlaku až 4 MPa.



**Obr. 7.16: Jednofázový elektrodotový kotel**

Výkon elektrodotového zařízení při daném napětí lze regulovat těmito způsoby:

- úpravou vodivosti vody,
- plochou elektrod – zakrýváním izolačními návleky (porcelánové nebo kře-menné trubky), zkracováním, prodlužováním,
- přibližováním a oddalováním elektrod,
- rozdělením elektrod na skupiny, které se různě spínají a přepojují,
- mechanickým zanořováním a vynořováním elektrod z vody,
- změnou výšky hladiny vody v kotli pomocí čerpadla při pevných elektro-dách zavěšených shora,
- změnou počtu trysek u tzv. trykových elektrodotových vysokonapětových kotlů.

### q Nepřímý odporový ohřev

V zařízeních s nepřímým odporovým ohřevem vzniká teplo v topných člancích umístěných přímo v pecním prostoru. Do vsázky se pak teplo přenáší převážně sáláním

topných článků a vyzdívky, prouděním atmosféry v pecním prostoru, popřípadě i vedením. Elektrická odporová zařízení s nepřímým ohřevem, tzv. odporové pece, je možné dělit podle několika hledisek (např. podle ČSN IEC 60050-841).

Podle teploty na pece:

- nízkoteplotní do 600 °C,
- středoteplotní od 600 °C do 1100 °C,
- vysokoteplotní nad 1100 °C.

Podle atmosféry v pecním prostoru na pece:

- s normální atmosférou (vzduch),
- s řízenou atmosférou (např. pro nauhličování, nitridaci, pro zamezení oxidace),
- pracující s vakuem – vakuové pece.

Podle použití v provozu na pece:

- pro tepelné zpracování kovů,
- pro tavení kovů,
- pro tavení skla,
- pro chlazení skla,
- pro laboratoře, pro domácnosti,
- s infračerveným ohřevem atd.

Podle toho, zda se vsázka při ohřevu nepohybuje nebo se pohybuje, na pece:

- se stabilní – nepohybující se vsázkou, s provozem přerušovaným,
- se vsázkou procházející pecí – pece průběžné, s pohyblivým dnem, s provozem nepřerušovaným.

Toto poslední kritérium je pro rozdělení pecí rozhodující, a proto se v dalším podle tohoto způsobu budeme řídit.

#### ▣ **Odporové pece se stabilní vsázkou**

Nejběžnější pece, v nichž se vsázka během ohřevu nepohybuje, jsou pece: komorové, vozové, šachtové, pokloповé (zvonové), elevátorové a kelímkové tavicí.

##### **Komorové pece**

Komorové pece patří k nejstarším typům elektrických odporových pecí. Jsou velmi univerzální, proto hojně používané. Topné články jsou umístěné obvykle na bocích, někdy v podlaze, v zadní stěně a ve dveřích, také na stropě. Komorové pece se staví až do teplot 1100 °C s topnými články kovovými, do teplot 1400 °C s články z karbidu křemíku (SiC) nebo z jiných materiálů (tzv. cermetů).

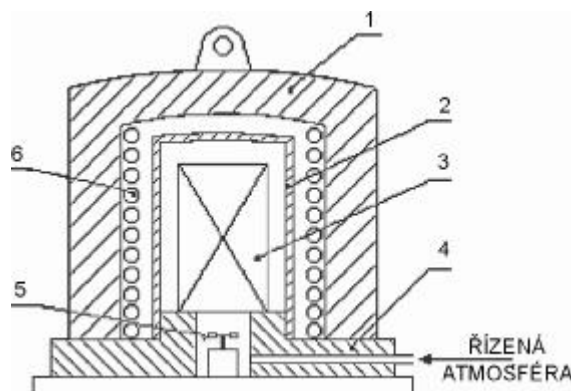
##### **Šachtové (hlubinné) pece**

Šachtové pece mají svislou osu a kruhový nebo čtvercový průřez. Pece jsou někdy 10 m až 20 m hluboké, nazývají se hlubinné a jsou obvykle zapuštěny pod podlahu. Pro dosažení větší rychlosti ohřevu a rovnoměrného rozložení teploty v peci se někdy do dna či víka instalují ventilátory pro oběh atmosféry v peci.

Šachtové pece nejsou tak univerzální jako pece komorové nebo vozové, ale snadno se utěsňují a izolují proti ztrátám tepla.

### Pokloповé (zvonové) pece

Pokloповá pec (Obr. 7.17) má dobře tepelně izolovaný topný poklop 1 (zvon) kruhového nebo čtvercového průřezu a má na svém vnitřním povrchu topné vinutí 6. Poklop se nasazuje jeřábem na pracovní plošinu 4, na kterou byla umístěná vsázka 3. Vsázka je krytá žáruvzdornou muflí 2 (poklopem) proti přímému sálání topných článků, a tím i proti lokálnímu přehřátí. Pod vsázkou je umístěn ventilátor 5. Pec má několik pracovních plošin a muflí. Pokloповé pece se staví do výkonů několika set kilowattů.



Obr. 7.17: Pokloповá pec

### Elevátorové pece

Elevátorové pece patří k největším odporovým pecím se stabilní vsázkou. Pece pracují s dobrou účinností, konstruují se pro teploty do 1000 °C až 1200 °C s výkony 500 kW až 2 000 kW. Elevátorové pece jsou vhodné pro vsázku velkých rozměrů a velké hmotnosti (desítky tun). Velkou jejich výhodou je, že mohou být vřazeny do průběžné výrobní linky, neboť vůz se vsázkou po ohřevu pokračuje dále ve směru příjezdu k peci.

### Kelímkové pece tavicí a tavicí vany

Konstruují se pro tavení kovů nebo slitin s nižším bodem tání (Sn, Pb, Al, Zn atd.). Kolem kovového nebo keramického kelímku je topné vinutí. Vně topení je tepelná izolace a kostra pece. Obvykle jsou tyto pece sklopné, aby se dal roztavený kov vylít.

Tavicí vany jsou různých konstrukcí, mají např. na vnější straně vany topné vinutí s tepelnou izolací, nejsou sklopné (pro pozinkování, pocínování, alitaci atd.). Pro přetavování (egalizaci) hliníku mají topení ve stropě a při odlévání se naklápějí po otočných kladkách.

### q Odporové pece průběžné

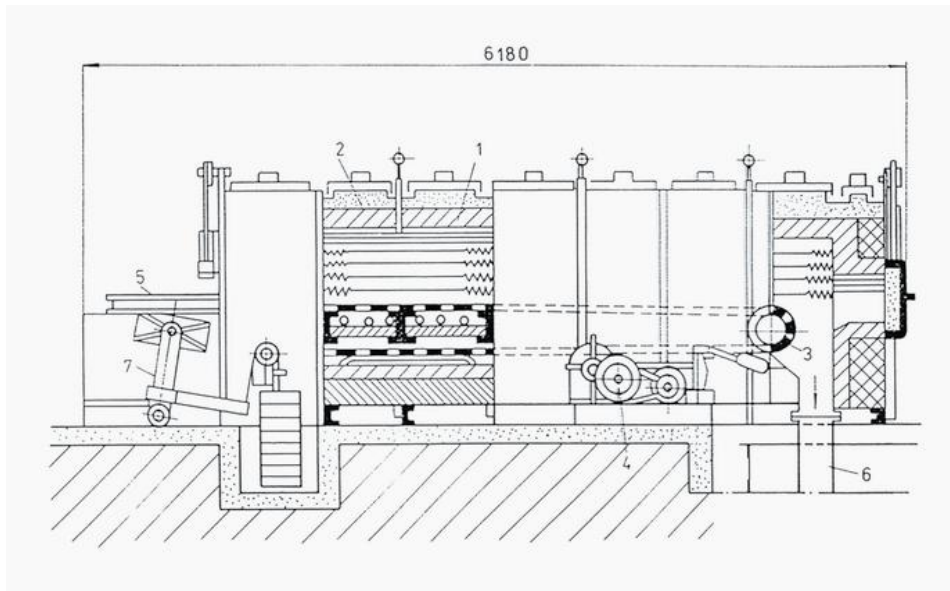
Používají se tam, kde je předepsáno tepelné zpracování pro větší počet výrobků. Průběžných pecí, které jsou většinou dimenzovány na nižší teploty, se staví celá řada různých druhů. V těchto pecích lze podle technologického procesu provádět předepsaný ohřev, výdrž a ochlazování. Obecně mají pece více teplotních pásem, která jsou samostatně napájena a regulována. V případě pomalého ochlazování vsazených částí je k peci připojena ochlazovací komora, která podle požadované rychlosti ochlazování je vybavena buď tepelnou izolací, nebo vodním chlazením.

Několik průběžných pecí může tvořit jeden zcela mechanizovaný a automatizovaný celek. Většinou se spojují kalící a popouštěcí pece s kalíci lázněmi, čistícími a sušícími zařízeními.

Pece jsou konstruované pro trvalý provoz. Podle druhu mechanismu k dopravě vsázky se nejčastěji používají pece: pásové a řetězové, válečkové, narážecí, střásací, krokové, protahovací, bubnové a karuselové.

### Pásové pece

Vsázka u pásové pece (Obr. 7.18) se vkládá ručně nebo pomocí speciální automatiky přes podávací stůl 5 na dopravní pás 3 procházející pecí. Pás je pro lehké součásti zhotoven z kovového pletiva, pro těžké součásti z ražených desek, které jsou vzájemně propojeny pomocí čepů a spojek. Napínán je pomocí zařízení 7, 4 je pohon pásu. Na konci pece je materiál odebírán z prostoru 6. Topné články 2 NiCr se umísťují většinou na stropě a dně, pod horní úroveň pásu. Pracovní prostor pece obklopuje žáruvzdorná vyzdívka 1. Pásové pece jsou určeny pro tepelné zpracování menších součástí do teploty 900°C.



Obr. 7.18: Pásová pec

### Válečkové pece

Staví se pro teploty do 900°C. Válečková dráha prochází celou pecí a je složena ze žáruvzdorných válečků, s osou kolmou ke směru pohybu, s ložisky vně pece po obou stranách. Vsázka se klade přímo na válečky nebo na podložky tak, aby byla dobře unášena. Při konstrukci se musí respektovat tepelná roztažnost válečků a vyzdívky pece.

### Narážecí pece

Pracovní teplota narážecí pece je do 1000 °C.

### Střásací pece

Střásací pece jsou určeny k ohřevu drobné kusové vsázky na teploty do 900 °C.

### Krokové pece

Krokové pece se staví pro ohřev velkých výkovků a odlitků na střední a vysoké teploty. Krokový mechanismus je mimo pracovní prostor pece. Při pohybu vpřed se vsázka pozdvihne a posune. Při pohybu vzad mechanismus klesne a připraví se na další krok vpřed, je poháněn hydraulicky nebo elektromotorem.

### Protahovací pece

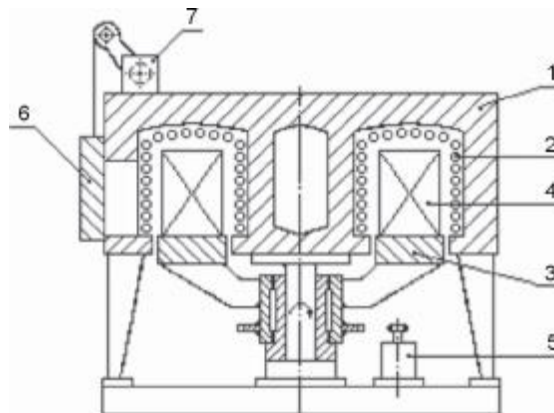
Protahovací pece se konstruuje se pro ohřev drátů a pásů zejména z barevných kovů (i z oceli), které se pecí protahují. Dosahuje se rovnoměrného prohřátí. Pro velké výkony jsou pece se svislým pohybem drátů v několika smyčkách (výroba smaltovaných drátů).

### Bubnové pece

Buben bubnové pece se zhotovuje z drahého žáruvzdorného materiálu, je tepelně i mechanicky značně namáhán, má omezenou životnost. V peci se dosahuje přesné a rovnoměrné teploty. Tyto pece se hodí k tepelnému zpracování (kalení, žíhání apod.) podložek, šroubů, menších ložiskových kroužků a kuliček, ale také ke štěpení slídy.

### Karuselové (rotační) pece

Karuselové pece se konstruuje se pro nejvyšší teploty, protože mechanismy pece jsou zcela mimo prostor s pracovní teplotou. Řez pecí je na Obr. 7.19. Vlastní pecní těleso 1 je rotační, s topnými články 2. Podlaha pece 3 je otočná a klade se na ni vsázka 4. Otáčení zajišťuje elektromotor 5. Vsázka se vkládá do pece otvorem s dveřmi 6 a po jedné otočce se z výstupního otvoru s dveřmi vedle vstupu vyjímá. Dveře se uzavírají zařízením 7. Doba ohřevu vsázky se mění v závislosti na změně rychlosti otáčení podlahy.



Obr. 7.19: Karuselová pec

### q Materiály a součásti elektrických odporových pecí s nepřímým ohřevem

Klasická odporová pec s nepřímým ohřevem je tvořena těmito základními částmi:

- žáruvzdorná vyzdívka,
- tepelná izolace,
- skříň pece,
- topné články,
- podávací mechanismy a jejich pohony.

Kromě toho mohou být pece vybaveny zařízeními pro výrobu ochranné atmosféry nebo vakua. Všechny pece jsou vybaveny přístroji pro měření a regulaci teploty.

Žáruvzdorná vyzdívka ohraničuje uvnitř pece pracovní prostor. Musí při pracovní teplotě dostatečně odolávat žáru, musí být dostatečně pevná, chemicky stabilní. V odporových pecích užíváme nejčastěji šamotové díly, složené z 38 % až 44 % oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , zbytek je oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ .

Materiály pro tepelnou izolaci mají přirozenou nebo umělou poréznost (magnezit, struska, oxid hlinitý, skleněná vata).

Skříň a konstrukce se obvykle zhotovují z ocelového plechu a ocelových profilů. Některé součásti se vyrábějí z litiny a ocelolitiny. Tyto součásti pracují při normální teplotě a nejsou na ně kladeny žádné speciální požadavky.

Na materiály pro topné články jsou kladeny vysoké nároky, měly by mít tyto vlastnosti:

- odolnost proti žáru při pracovní teplotě článku,
- velkou mechanickou pevnost zatepla,
- odolnost proti chemickým vlivům atmosfér v pecích a keramiky, s níž se stýkají
- velkou rezistivitu pro možnost použití větších průřezů a přiměřených délek vodičů a pro umožnění přímého připojení k síti,
- malý teplotní součinitel odporu, který zajistí malý rozdíl mezi odporem článku zastudena a zatepla,
- stálost rezistivity po celou dobu životnosti článku,
- malou tepelnou roztažnost,
- dobrou zpracovatelnost do různých tvarů.

Uvedené požadavky jsou velmi náročné. V praxi se daří splnit současně jen některé, popř. pro dosažení maximální životnosti se volí kompromisní řešení.

Materiály pro topné články se dělí do dvou základních skupin:

- materiály kovové,
- materiály nekovové.

#### ☐ Materiály pro topné články kovové

Mezi kovové materiály patří slitiny Ni, Cr, Fe, Al nemagnetické a magnetické, čisté kovy, ocel a speciální slitiny.

##### **Austenitické slitiny**

Austenitické slitiny jsou nemagnetické, tzv. chromniklové. Pro topné články se používá slitina Ni+Cr, a slitina Ni+Cr+Fe. Tyto slitiny jsou nejjakostnější, mají dobrou žárovzdornost, odolávají častým zapnutím a vypnutím. Dobře se svařují a tvarují. Mají velkou rezistivitu a malý teplotní součinitel odporu, nestárnou, jsou stálé.

##### **Feritické slitiny**

Feritické slitiny jsou magnetické slitiny Cr+Al+Fe bez niklu, vysoce žárovzdorné s větší rezistivitou než skupina předešlá. Patří sem slitiny s obchodními názvy: Kanthal, Alsichrom, Alkrothal, Chromal, Aluchrom, Thermal aj. Rezistivity drátů z těchto slitin jsou kolem 1,4  $\mu\Omega\cdot m$  při 20 °C a mění se s teplotou velmi málo. Tyto materiály jsou použitelné pro pracovní teploty až do 1375 °C.

##### **Čisté kovy**

Čisté kovy jsou drahé, těžkotavitelné, např. platina, wolfram a molybden. Používají se pro topné články laboratorních nebo jiných speciálních pecí, kde se požaduje značně vysoká teplota.

Platina neoxiduje, ale intenzívně se nauhličuje, nemůže se použít v redukční atmosféře. Protože se její odpor mění značně s teplotou, způsobí zapnutí za studeného stavu velký proudový náraz.

Wolfram je velmi křehký. Topné články jsou obvykle ve tvaru trubky, jejíž vnitřní prostor je přímo pracovním prostorem. Přívody proudu se chladí vodou. Wolframové topné články pracují ve vakuu nebo v ochranné atmosféře až do 2600 °C.

Molybden se používá pro teploty 1400 °C až 2000 °C. Vyžaduje ochrannou atmosféru (např. páry lihu nebo vodík), ve vakuu se při teplotě 1650 °C rozprašuje.

### Ocel a speciální odporové slitiny

Ocelový drát lze použít až do 900 °C, avšak jen ve vodíkové atmosféře. V normální atmosféře jen do 400 °C. Je levný, používá se v sušících pecích.

Konstantan (56% Cu + 44% Ni) a Nikelin (65% Cu + 34% Ni + 1% Fe) jsou speciální slitiny, jejichž odpor se téměř s teplotou nemění. Používají se hlavně v měřicí a regulační technice. Dají se však také použít pro topné články do malých spotřebičů a pro nízké teploty.

### ☐ Materiály pro topné články nekovové

Pracovní teploty kovových topných článků dosahují nejvýše 1 375 °C, proto se hledaly materiály, které při stejných základních vlastnostech jako u kovových mohou pracovat v normální atmosféře při teplotách vyšších.

#### Karbid křemíku (SiC)

Karbid křemíku je nejčastěji používaný nekovový materiál pro topné články s obchodními názvy Silit, Globar, Crusilir, Cesiwid aj. Rezistivita je značně vyšší než u kovových materiálů (0,6-3,0 mΩ·m), což umožňuje topné články zhotovovat např. ve tvaru tyčí se zesílenými konci. Průměry tyčí jsou 1,2 až 5 cm, délky od 8 do 200 cm.

Použitelnost topných SiC článků je až do teploty 1500 °C. Teplotní součinitel odporu je asi do 800 °C záporný, nad 800 °C kladný. Doba životnosti topných článků je od 3000 do 10000 pracovních hodin.

#### Cermetové články

Jsou vyráběny práškovou metalurgií. Základním materiálem je směs molybdenitu křemičitanů ( $\text{MoSiO}_2$ ) s oxidem křemičitým ( $\text{SiO}_2$ ). Články jsou nejčastěji ve tvaru U (vlásky). Mohou být také ve tvaru tyčí, trubek.

Pracovní teploty článků jsou 1600 °C až 1700 °C. Žáruvzdornost způsobuje ochranná vrstva  $\text{SiO}_2$  vznikající na povrchu článku za provozu. Cermetové články jsou křehké, nesnášejí otřesy. Jsou odolné proti atmosféře oxidační, dusíkové, argonové a z CO. Škodí jim síra a chlor. Rezistivita se mění značně s teplotou (při 20 °C je  $\rho=0,25 \mu\Omega\cdot\text{m}$ , při 1600 °C je  $\rho = 3,5 \mu\Omega\cdot\text{m}$ ), proto se připojují přes regulační transformátory.

#### Uhlíkové a grafitové topné články

Základní suroviny a výroba grafitu byly popsány v čl. • . Topné články se vyrábějí ve tvaru tyčí, trubek aj. Pracovní teploty jsou až do 2000 °C ve vakuu nebo řízené atmosféře, zabraňující oxidaci. Při normální atmosféře nastává oxidace u uhlíkových článků zhruba od 400 °C, u grafitových zhruba od 600 °C. Rezistivita uhlíku s rostoucí teplotou klesá, např. při teplotě 1400 °C asi na 67 % z plné hodnoty při 0 °C. U grafitu ze 100 % při 0 °C s rostoucí teplotou rezistivita nejprve klesá, při teplotě kolem 400 °C je asi 77 % a potom opět roste. Při 1400 °C je rezistivita asi 96 % původní hodnoty.

### ☐ Základní použití odporových pecí v průmyslu a ve strojírenství

Základní oblasti použití elektrických odporových pecí v průmyslu je tepelné zpracování. Jde o procesy, při nichž jsou kovové předměty v tuhém stavu podrobeny určitým změnám



teploty k dosažení požadovaných vlastností materiálu. Jde zejména o zvýšení hranice pevnosti a namáhání při zachování tvaru tepelně zpracovávaného předmětu. Je-li tento děj ovlivněn chemickým účinkem prostředí, jde o zpracování chemicko-tepelné.

V odporových pecích se pro tepelné zpracování, zejména strojírenských součástí ocelových, ale i z barevných kovů a jejich slitin, používají tyto procesy ČSN EN 10052:

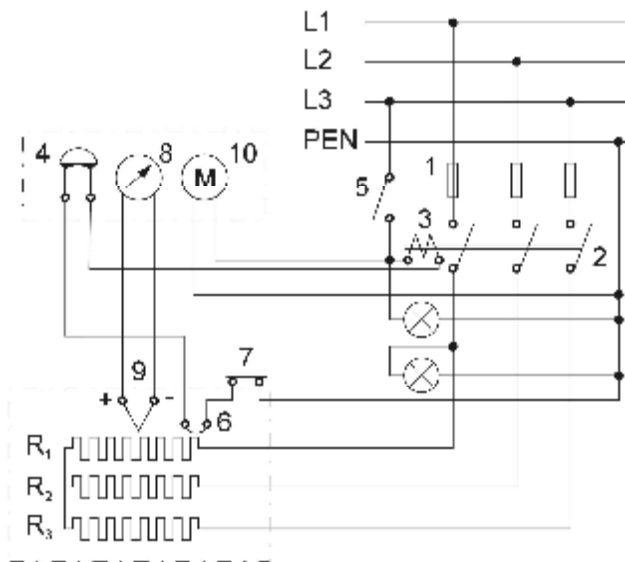
- **Žihání** snižuje tvrdost, zlepšuje obrobiteľnosť, snižuje vnitřní pnutí a způsobuje dosažení žádoucí mikrostruktury. Ocelové součásti se ohřejí na teplotu 700 °C (u mosazi až 800 °C, niklu 960 °C až 1200 °C), 2 hodiny setrvávají na této teplotě a potom pomalu chladnou. Druhy žihání jsou např. lesklé, normalizační, izotermické, rekrystalizační atd.
- **Kalení** zvyšuje tvrdost ocelových součástí, které se ohřejí nad překrystalizační teplotu a potom se rychle ochladí ponořením do vody nebo oleje. Mezi druhy kalení patří např. termální, izotermické, přerušované, povrchové atd.
- **Popouštění** následuje obvykle po kalení. Zakalené ocelové předměty jsou sice velmi tvrdé, ale zároveň i velmi křehké, proto se dále tepelně zpracují popouštěním. Ohřejí se na teploty od 150 °C do 600 °C, po prodlevě na popouštěcí teplotě pomalu chladnou.
- **Cementování** způsobuje velkou tvrdost povrchové vrstvy ocelových součástí při zachování houževnatosti jádra. Cementování je nasycování povrchu ocelového předmětu uhlíkem v tuhém, kapalném a především plynném prostředí při teplotě asi 900 °C.
- **Nitridování** zvyšuje odolnost povrchové vrstvy ocelových součástí proti otěru. Nitridování je nasycování povrchu ocelových součástí dusíkem v plynném nebo kapalném prostředí při teplotách 470 °C až 580 °C.
- **Zušlechťování** ocelových výrobků. Zušlechťováním se dosahuje velké pevnosti, tvrdosti a houževnatosti. Před posledním mechanickým opracováním se provede žihání, následuje zakalení do oleje nebo vody a potom popouštění s prodlevou a následným řízeným ochlazováním.

Elektrické odporové pece mají použití při tepelném zpracování výrobků ze skla. Automatické linky tepelného zpracování polotovárů a výrobků se rozšiřují do nejrůznějších oblastí výroby včetně průmyslu textilního, potravinářského atd.

## q Zapojení a regulace elektrických odporových pecí

Nejběžnější způsob elektrického zapojení odporové pece je uveden na Obr. 7.20.

Elektrická odporová pec, zapojená podle Obr. 7.20, je připojena k trojfázové síti s nulovým vodičem prostřednictvím stykače 2. Jištění je provedeno pojistkami 1. Topná vinutí pece představují odpory o stejné hodnotě  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Pec zapneme vypínačem 5. Sepnutím tohoto vypínače uzavřeme pomocný spínací obvod, složený z těchto prvků: cívka stykače 3, ruťový spínač automatického regulátoru teploty 4, pojistkový topný drátek v peci 6, dveřní kontakt 7. Chod pece je signalizován rozsvícením červeného světla. Současně také startuje motorek automatického regulátoru teploty 10. Po nabuzení spínací cívky 3 sepne stykač 2 a připojí topné články k síti. Termočlánek 9 dodává napětí pro přístroj ukazující teplotu v peci. Při dosažení požadované teploty se překlápí ruťový spínač automatického regulátoru teploty 4, v ovládacím obvodu je přerušen proud a stykač 2 odepne topné články od sítě. Ve schématu Obr. 7.20. je možná regulace teploty v peci pouze vypínáním a zapínáním celého příkonu.



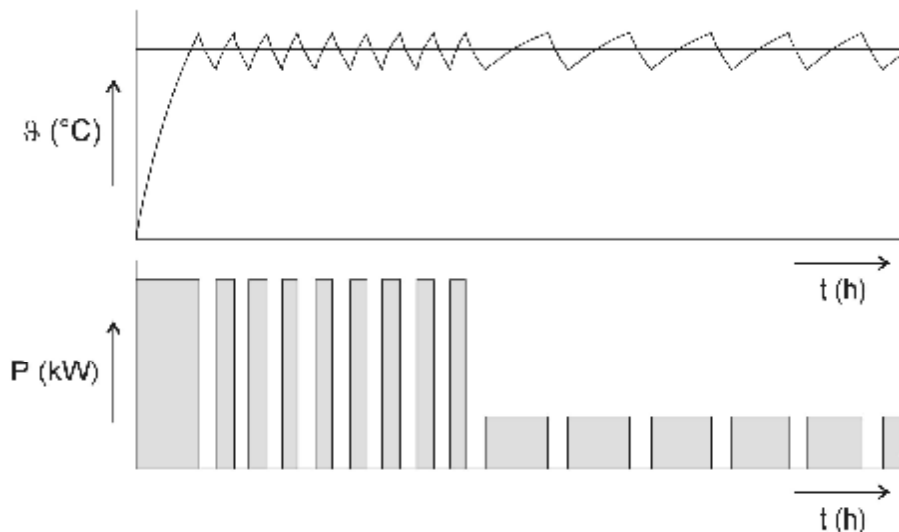
Obr. 7.20: Zapojení odporové pece

#### q Automatická regulace teploty v odporových pecích

Úkolem regulace teploty elektrické pece je trvale a přesně udržovat požadovanou teplotu pracovního prostoru, nebo reagovat na změny podle předem stanoveného programu. V průmyslu se užívá regulace skoková nebo plynulá.

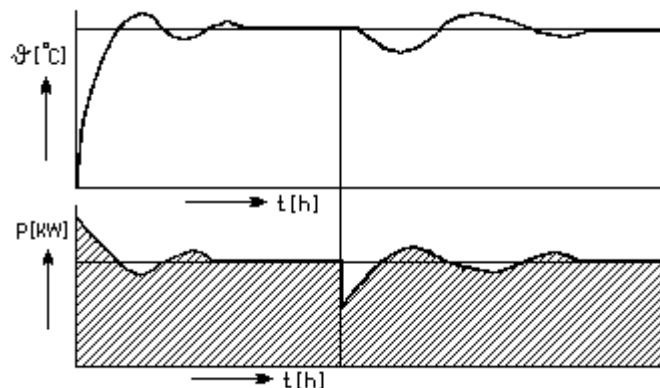
Skoková regulace se dosáhne nejjednodušeji vypínáním a zapínáním celého příkonu pece. Dále můžeme využít přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník, nebo přepínání skupin odporových článků. Průběh teploty a příkonu u odporové pece při jednopólové a dvoupólové skokové regulaci je zobrazen na Obr. 7.21.

V první části Obr. 7.21 je znázorněna jednopólová regulace zapnuto, vypnuto. V druhé části obrázku je uvedena dvoupólová regulace teploty a příkonu při použití přepínání odporových sekcí hvězda-trojúhelník.



Obr. 7.21: Průběh teploty a příkonu u odporové pece při jednopólové a dvoupólové skokové regulaci

Využitím této plynulé regulace dochází u odporové pece k výraznému zrovnoměření teplotního průběhu, jak je zobrazeno na Obr. 7.22.



Obr. 7.22: Plynulá regulace odporové pece

#### q Výpočty odporových elektrotepelných zařízení pro nepřímý odporový ohřev

#### q Základy návrhu a výpočtu odporových pecí

- Pro správné stanovení druhu pece pro požadovaný způsob tepelného zpracování vsázky jsou rozhodující zejména tato hlediska:
- technologické požadavky na tepelné zpracování vsázky,
- druh vsázky a její velikost,
- hmotnost vsázky ke zpracování za jednotku času,
- průběh teplotního režimu, maximální teplota (rychlost ohřevu, konečná teplota, doba výdrže na určité teplotě, rychlost ochlazování apod.),
- rovnoměrnost a přesnost dodržení teploty,
- přirozená či řízená atmosféra v peci,
- přetržitý nebo nepřetržitý provoz,
- prostor, který je k dispozici,
- cena pece.

Pro výrobu kusovou nebo malosériovou zvolíme pec nebo skupinu pecí se stabilní vsázkou, pro výrobu hromadnou jsou výhodnější pece průběžné nebo celé automatické průběžné pecní linky.

Návrh pece vyžaduje mnoho technických kompromisů, zkušeností i ekonomických úvah. Obvykle se pro daný účel podle zkušeností nebo orientačním výpočtem určí předběžné základní parametry pece (velikost, mechanizace, příkon a další). Potom se pec přibližně navrhne konstrukčně včetně volby tepelných izolací, jejich tloušťek atd. Tento první přibližný návrh se kontroluje již výpočty podrobnějšími. Provedou se v něm příslušné korekce, nakreslí se návrh další, zpřesněný. Tento druhý návrh se opět výpočtově, daleko podrobněji kontroluje. Kontrolují se zejména základní rozměry pece z hlediska dané výrobní technologie, pro kterou je pec určena, tepelná izolace a tepelné ztráty, příkon, účinnost, průběhy teplot, výrobnost a další.

### q Výpočet celkového příkonu pece

Pro zpracovaný základní konstrukční návrh pece při známé teplotě nebo rozdělení teplot v peci vypočítáme ztrátový výkon  $P_z$  pece v ustáleném stavu.

Ztrátový výkon je určen ztrátami:

- jednotlivými stěnami pece,
- netěsnostmi (např. dveří a vozu u pecí s nepohyblivou vsázkou),
- na vstupu a výstupu u průběžných pecí,
- při otevírání a zavírání dveří,
- vynášením tepla dopravními mechanismy u průběžných pecí (pásky, řetězy aj.),
- pro ohřev muflí, palet, podložek apod.

Ztrátový výkon je možné rozdělit na ztrátový výkon naprázdno  $P_{z0}$  (nezávisí na chodu pece se vsázkou) a na ztráty  $P_{zv}$  související s chodem pece se vsázkou.

Platí

$$P_z = P_{z0} + P_{zv} \quad (7.46)$$

$P_{z0}$  souvisí s prvními třemi body uvedenými výše.  $P_{zv}$  s druhými třemi. Výpočet  $P_{z0}$  a  $P_{zv}$  provádíme podle obecných zákonitostí šíření tepla v ustáleném stavu a podle měrné tepelné kapacity, teploty a hmotnosti u ztrát paletami, muflemi, podložkami apod.

### Užitečný výkon

K ohřátí vsázky s hmotností  $m$ , měrnou kapacitou  $c$ , z teploty  $J_0$  na teplotu  $J_k$  je zapotřebí energie

$$W_u = \int_{J_0}^{J_k} c \cdot m \cdot dJ \quad (7.47)$$

Zavedeme-li střední měrnou tepelnou kapacitu  $c_{av}$ , zjednoduší se vztah (3.13.) na tvar

$$W_u = c_{av} \cdot m \cdot (J_k - J_0) \quad (7.48)$$

Pokud je v zadání uvedena doba ohřevu  $t_{ohř}$ , vyšel by užitečný příkon

$$P_u = \frac{W_u}{t_{ohř}} \quad (7.49)$$

a teoretický potřebný příkon pece by byl dán vztahem

$$P_p = P_z + P_u \quad (7.50)$$

Protože musíme počítat s určitou nepřesností výpočtu, s rezervou na pokles napětí v síti, se stárnutím topných článků, se vzrůstem ztrát pece apod., volíme určitý bezpečnostní činitel  $k_b = 1,2$  až  $1,7$ . Pak příkon pece je dán rovnicí (7.51). V praxi však většinou dobu ohřevu vsázky  $t_{ohř}$ , neznáme a musíme ji vypočítat.

$$P_p = k_b \cdot (P_z + P_u) \quad (7.51)$$



### Shrnutí pojmů 7.2.

Odporový ohřev přímý a nepřímý, solná lázeň, termická elektrolýza, elektrodový kotel, odporová pec, topný článek, hlouba vniku, regulace teploty.



### Otázky 7.2.

1. Vysvětlete princip přímého odporového ohřevu.
2. K ohřevu jakých materiálů lze přímý odporový ohřev použít, co musí být splněno? Nakreslete schéma.
3. Nakreslete průběhy příkonu, ztrát a teploty při přímém odporovém ohřevu.
4. Vysvětlete princip elektrodové ohřevu vody.
5. Jak lze regulovat výkon elektrodového kotle?
6. Popište princip přenosu tepla do vsázky při nepřímém odporovém ohřevu.
7. Podle jakých hledisek dělíme odporové pece?
8. Které základní části tvoří odporovou pec?
9. K jakému tepelnému zpracování materiálů lze odporové pece použít?
10. Vysvětlete a nakreslete průběh skokové regulace teploty odporové pece.
11. Vysvětlete a nakreslete průběh spojitě regulace teploty odporové pece.

## 7.3. Elektrotepelná zařízení oblouková



### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete

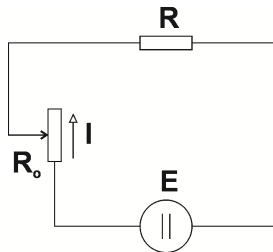
- znát princip vzniku stejnosměrného a střídavého oblouku
- umět popsat jednotlivé typy elektrických obloukových a jejich části
- rozumět optimalizaci taveb podle pracovních charakteristik



### VÝKLAD

### q Vznik stejnosměrného oblouku v elektrickém poli

Vznik elektrického oblouku si vysvětlíme na jednoduchém případě elektrického obvodu napájeného ss zdrojem napětí  $E$ , obsahujícího regulační odpor  $R$  a proměnlivý odpor oblouku  $R_o$  (Obr. 7.23).



**Obr. 7.23: Příklad elektrického obvodu napájeného stejnosměrným zdrojem**

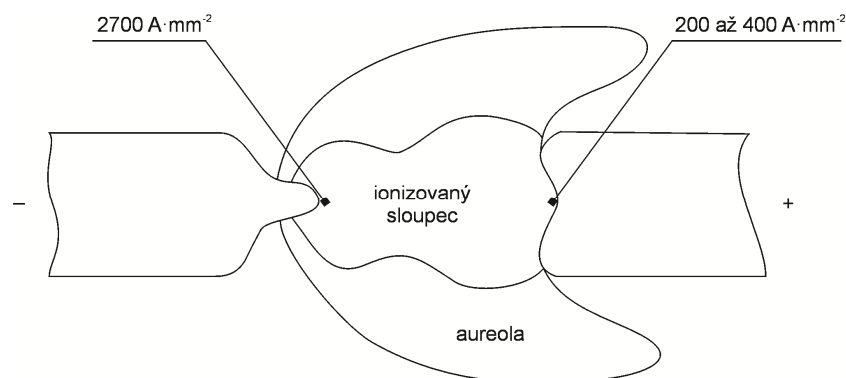
Oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami. Katoda je zapojena na záporný pól zdroje, anoda na kladný pól. Jestliže přiblížíme obě elektrody ke vzájemnému dotyku, pak obvodem bude protékat proud  $I$ , daný veličinami obvodu  $E$ ,  $R$ . Tyto veličiny stanovíme tak, aby proud protékající obvodem byl větší než 0,5 A.

Jestliže oddálíme elektrody od sebe, pak při přerušení vzájemného kontaktu začne mezi nimi vznikat vodivá cesta díky ionizaci prostředí mezi oběma elektrodami. Vodivými prvky mezi elektrodami jsou ionizované páry materiálu obou elektrod a vzduchu. Vzniká elektrický oblouk.

Proud obvodu se zmenšuje při narůstajícím odporu oblouku  $R_o$ . Odpor elektrického oblouku  $R_o$  se vyznačuje velikou nelineárností a závisí na charakteru oblouku a rychle se mění v rozmezí od nuly až po nekonečno.

Obloukový výboj sestává z ionizovaného sloupce, kterým protéká proud a okolních plynů (aureoly) o vysoké teplotě. Délka oblouku pak ohraničuje elektrody, katodu a anodu (Obr. 7.24).

Při dalším hoření oblouku se katoda tvaruje do kužele, zatímco u anody se projevuje v její střední části prohloubení. Bezprostředně ke katodě přiléhá katodová oblast vodivého výboje. Délka této oblasti je nepatrná, asi  $10^{-5}$  cm a nezávisí na délce oblouku. V této katodové oblasti probíhají procesy ionizace na elementární částice.



**Obr. 7.24: Elektrický oblouk**

Uprostřed katodové oblasti se nachází tzv. **katodová skvrna**. Hustota proudu v katodové skvrně ( $2700 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) je značně větší než v okolních oblastech povrchu katody. Na katodovou oblast pak navazuje sloupec, tvořící nejdelší část vodivé cesty mezi elektrodami. Skládá se z ionizovaného sloupce obsahujícího ionizované částice, které umožňují průchod proudu mezi elektrodami. V tomto ionizovaném sloupci se transformuje základní část elektrické energie v tepelnou.

Na tento ionizovaný sloupec navazuje anodová část oblouku. Její délka je rovněž nepatrná a nezávisí na délce oblouku. Podle výzkumů byly laboratorně stanoveny hustoty proudu katodové skvrny v rozmezí  $2700 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$  až  $2900 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$  a anodové skvrny v rozmezí  $200 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$  až  $400 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}$ .

Velmi důležitou oblastí oblouku je právě oblast katody, ze které jsou elektrony působením termoelektrické emise dopravovány k anodě.

### q Charakteristiky stejnosměrného oblouku

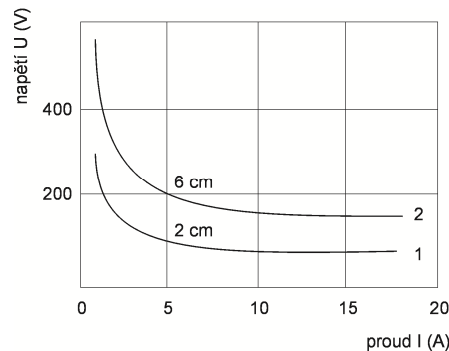
Vzájemné vztahy mezi základními vlastnostmi elektrického výboje nazýváme charakteristikou oblouku. Základní charakteristikou oblouku je voltampérová charakteristika.

Nejznámější z empirických vztahů vyjadřujících elektrické vlastnosti stejnosměrného (ss) oblouku je Ayrtonové formule

$$U = a + b + l + \frac{c}{I} + \frac{d \cdot l}{I} \quad (7.52)$$

kde  $a$  (V),  $b$  ( $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$ ),  $c$  (W),  $d$  ( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) jsou konstanty závislé na materiálu elektrod,  $l$  je délka oblouku,  $U$  je napětí na oblouku a  $I$  intenzita proudu.

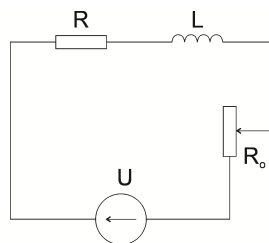
Podle vztahu Ayrtonové jsou zkonstruovány (Obr. 7.25) dvě voltampérové charakteristiky ss oblouku. Vidíme, že při zvětšení proudu se asymptoticky přibližují k ustálené hodnotě napětí. Křivka č. 1 platí pro délku oblouku 2 cm, křivka č. 2 pro délku oblouku 6 cm.



Obr. 7.25: Voltampérové charakteristiky ss oblouku

### q Charakteristiky střídavého oblouku

K odvození charakteristik střídavého oblouku použijeme náhradní schéma elektrického obvodu s obloukem podle Obr. 7.26.



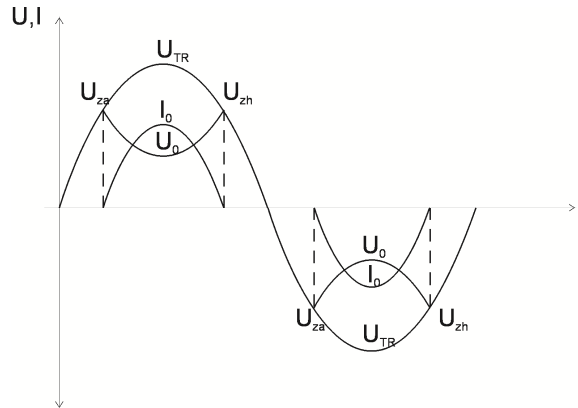
Obr. 7.26: Náhradní schéma elektrického obvodu s obloukem

V obvodu jsou zastoupeny prvky střídavého zdroje  $U$ , činné odpory obvodu  $R$  a  $R_0$  a indukčnost obvodu  $L$ .

Budeme-li zvyšovat napětí zdroje při konstantní vzdálenosti elektrod, pak při určité hodnotě napětí dojde k průrazu a mezi elektrodami začne protékat elektrický proud prostřednictvím oblouku.

Při periodické, sinusové změně napětí nastávají v hoření oblouku nucené přestávky, a to v tom období, kdy napětí na oblouku bude pod hodnotou  $U_{\min}$ .

Na Obr. 7.27 je znázorněn průběh napětí a proudu v obvodu, který obsahuje jen ohmický odpor bez indukčnosti.



**Obr. 7.27: Průběh napětí a proudu v obvodu**

Jakmile napětí transformátoru  $U_{TR}$  dosáhne zápalnou hodnotu oblouku  $U_{za}$ , začne obvodem protékat proud, který poteče tak dlouho, dokud napětí transformátoru neklesne pod zhášecí napětí  $U_{zh}$ . Zhášecí napětí bývá o něco nižší než napětí zápalné. Tento proces se opakuje při každé půlvině. Napětí oblouku má přitom sedlo způsobené zápornou charakteristikou oblouku.

### Stabilizace střídavého oblouku fázovým posunutím

Zapojíme-li do obvodu oblouku sériově indukčnost, nastává nejen fázový posuv mezi napětím a proudem, ale i prodloužení hoření oblouku vlivem indukčnosti tlumivky.

Výpočtem je možno dokázat, že k trvalému hoření oblouku je nutný minimální fázový posuv  $\cos\varphi = 0,85$ . Na Obr. 7.28 je znázorněn idealizovaný průběh napětí a proudu při  $\cos\varphi = 0,85$ . Napětí na oblouku je obdélkové. Toto je charakteristické pro oblouky s velmi vysokými proudy, kde prakticky již nedochází ke změně napětí v závislosti na proudu.

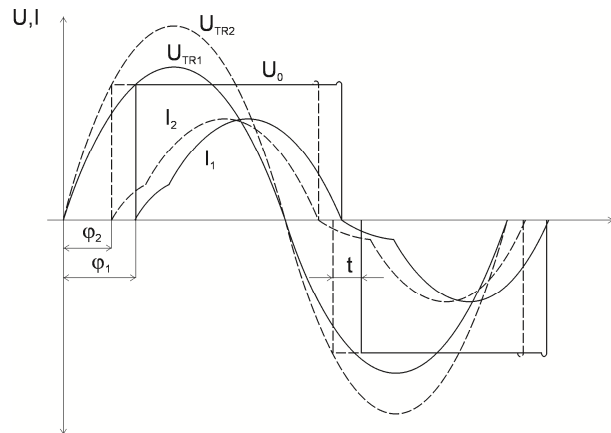
### Stabilizace střídavého oblouku zvýšením napětí na transformátoru

Stabilizace střídavého oblouku zvýšením napětí na transformátoru je znázorněno na Obr. 7.28 čárkovaně.

U průmyslových elektrických obloukových pecí nastává kromě změny proudu i změna elektrody. Jestliže v první půlperiodě tvoří katodu uhlíková elektroda, pak v druhé půlperiodě přebírá tuto úlohu tavený materiál. Tento materiál má oproti uhlíkové elektrodě rozdílné elektrické i tepelné vlastnosti. To se projevuje zejména na začátku tavby, pokud je vsázka poměrně studená a katodová skvrna v průběhu první půlperrody se rychle ochlazuje vlivem dobré tepelné vodivosti kovu. Výsledek je pak ten, že v půlperiodě, kdy elektrodu (katodu) tvoří uhlíková elektroda, protéká obvodem větší proud než v druhé půlperiodě, kdy se polarita obrátí.

Studená vsázka pece vyžaduje vlivem horší emisní schopnosti vyšší napětí při menších proudech oblouku. Nerovnoměrnost emise vyvolává silné výkyvy. Dokonce někdy dochází i k přerušení oblouku. To je nutno odstranit novým zkratováním obvodu a následným oddálením elektrod.



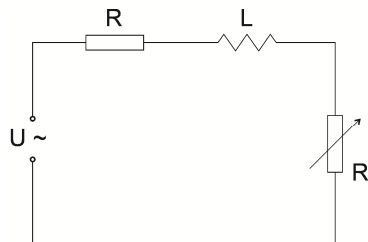


Obr. 7.28: Stabilizace střídavého oblouku

### q Teoretické základy elektrických obloukových pecí

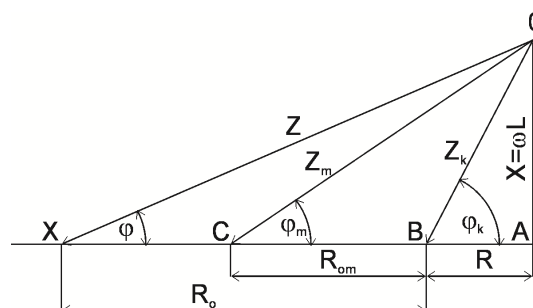
Proudový obvod elektrické obloukové pece sestává z konstantního ohmického a induktivního odporu, daného vlastnostmi vodivého materiálu a geometrickým tvarem přívodů a okolních součástí elektrické obloukové pece. Tyto součásti ovlivňují především hodnotu jalových ztrát, a tím i úbytku napětí na svorkách elektrod.

Dále je v proudovém obvodu zastoupen odpor oblouku, který si můžeme nahradit proměnlivým ohmickým odporem (Obr. 7.29).



Obr. 7.29: Příklad elektrického obvodu

Fiktivní odpor oblouku  $R_0$  je hodnota proměnlivá. Tuto hodnotu dostaneme, jestliže dělíme napětí na oblouku proudem obvodu pece. Může se měnit od nuly, kdy elektrody jsou ve zkratu až do nekonečna, kdy obvod je přerušovaný a oblouk nehoří. Poměry v peci se dají dobře znázornit vektorovým diagramem na Obr. 7.30.



Obr. 7.30: Vektorový diagram

Z diagramu na Obr. 7.30 vychází **impedance nakrátko**. Impedance nakrátko určuje proud pece nakrátko. Pracovní bod se pohybuje po přímce BX v závislosti na velikosti odporu oblouku. Odpor pece pak určuje i okamžitou hodnotu impedance pece, kde  $Z_m$  je impedance pro maximální výkon pece.

$$Z = \sqrt{(R + R_o)^2 + (w \cdot L)^2} \quad (7.53)$$

Ve vztahu (7.53) je  $R_o$  proměnlivá hodnota odporu oblouku. Z vektorového diagramu je možno určit i účinník pece.

Pro hodnotu  $\cos \varphi_k$  (nakrátko -  $R_o = 0$ ) platí

$$\cos j_k = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (w \cdot L)^2}} \quad (7.54)$$

Pro libovolný pracovní bod označený  $X$  platí:

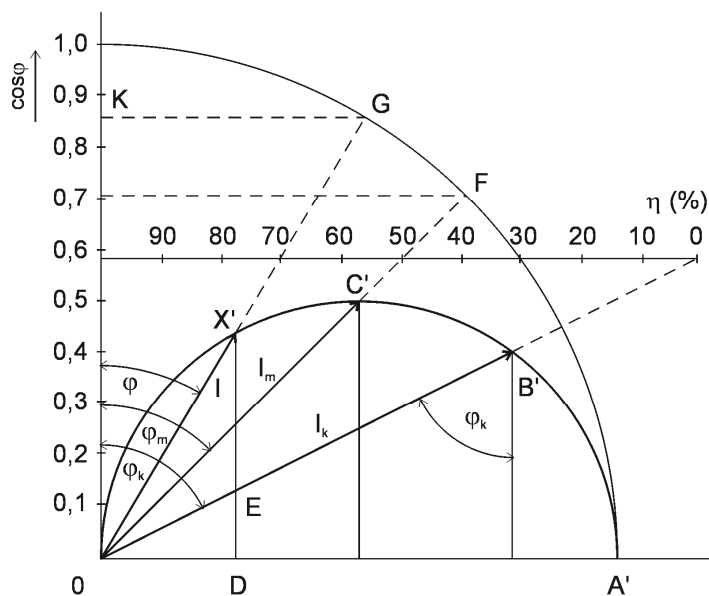
$$\cos j = \frac{R + R_o}{\sqrt{(R + R_o)^2 + (w \cdot L)^2}} \quad (7.55)$$

Proud oblouku je nepřímo úměrný proměnlivé hodnotě impedance  $Z$ .

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R + R_o)^2 + (w \cdot L)^2}} \quad (7.56)$$

Předpokládáme, že při provozních zkratech pracují magnetické materiály obvodu (tlumivka, cívky transformátoru, vodiče, konstrukce) v přímé části magnetizační charakteristiky. Jednotlivé reaktance  $X$  nezávisí tedy na procházejícím proudu. Stejně tak i konstantní část činných odporů  $R$  (kromě odporu oblouku) nezávisí na procházejícím proudu. Za tohoto předpokladu se budou koncové body vektorů proudu pro různé hodnoty odporu oblouku  $R_o$  pohybovat po kružnici.

Na Obr. 7.31 je kružnice s vyznačenými body  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $X'$ ,  $O'$ . Tyto jednotlivé body jsou ekvivalentní převrácené hodnotě impedance  $Z$ , která se mění závisle na hodnotě odporu oblouku.



Obr. 7.31: Kruhový diagram

Bodu A na Obr. 7.30 odpovídá bod A' na kružnici (Obr. 7.31). Úsečce  $OB = Z_K$  (Obr. 7.30) odpovídá úsečka  $OB'$ , vyjadřující proud nakrátko. Úsečce  $OC$  (Obr. 7.30) odpovídá úsečka  $OC'$  (Obr. 7.31) je to bod pro maximální výkon pece. Úsečce  $OX$  (Obr. 7.30) tj. libovolný proud oblouku, odpovídá úsečka  $OX'$  v kruhovém diagramu.

Konverguje-li odpor oblouku  $R_o$  k nekonečnu, dostáváme se při přerušení oblouku do bodu  $O'$  na kruhovém diagramu. Vyneseme-li vektor napětí  $U$  kolmo na průměr kružnice,  $OA'$ , pak úhly  $\varphi_K$ , a  $\varphi$  jsou fázovými posuvy mezi napětím a okamžitým proudem pece. Na svislou osu si můžeme vynést měřítko pro hodnoty účinnosti pece  $\cos\varphi$ .

Průsečík prodlouženého vektoru proudu s kružnicí  $AFG$ , jejíž poloměr je průměrem kruhového diagramu, udává na svislici (ose  $y$ ) hodnotu  $\cos\varphi$ , se kterým pec pracuje při daném proudu.

Účinnost  $\eta$  pro jednotlivé proudy pece dostáváme jako průsečík prodloužených vektorů těchto proudů s úsečkou účinnosti. Úsečku účinnosti zkonstruujeme prodloužením vektoru proudu nakrátko  $I_K$  a rovnoměrným rozdělením kolmice z některého bodu tohoto vektoru  $I_K$  na svislou osu  $y$ .

Zmenšením proudu se nepříznivě ovlivňuje stabilita elektrického oblouku. Kritériem pro posouzení této stability je poměr

$$\frac{I}{I_K} = \frac{\text{proud pece pracovní}}{\text{proud pece nakrátko}} \quad (7.57)$$

Zvýšením proudu se zvětší tento poměr  $I / I_K$  za cenu snížení teoretické elektrické účinnosti pece.

Z hlediska zpětných vlivů na síť jsou tyto více tlumeny při menším rozdílu, tedy blíží-li se vektor proudu na kruhovém diagramu k bodu  $B'$  (Obr. 6.14), odpovídajícímu proudu nakrátko  $I_K$ .

Na kruhovém diagramu pak rozlišujeme tři základní oblasti:

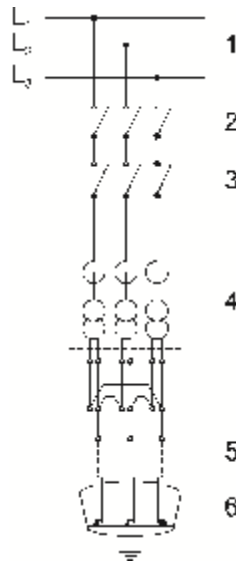
- oblast nestabilního chodu – úsek  $O'X'$  – dlouhý oblouk
- oblast optimálního chodu – úsek  $X'C'$
- oblast zaručeně stabilního chodu – úsek  $C'B'$  – krátký oblouk

#### q Zařízení trojfázových obloukových pecí

Elektrické zařízení se podílí podstatnou částí na pořizovacích nákladech elektrických obloukových pecí a značně ovlivňuje jejich chod. Jednotlivé části elektrického zařízení obloukových pecí si můžeme rozdělit nejlépe podle jejich funkce:

- Silnoproudý elektrický obvod
- Obvod automatické regulace pohybu elektrod
- Měřicí přístroje, ochrany, blokování a signalizace
- Řídicí počítač

Nejdůležitější skupinu tvoří silnoproudý obvod. Představuje převážnou část hodnoty elektrického zařízení pece a má podstatný vliv na chod pece. Druhou podstatnou částí je obvod automatické regulace pohybu elektrod. Úkolem silového obvodu je přivést elektrickou energii do pracovního prostoru pece a přeměnit ji na teplo. Silový obvod trojfázové obloukové pece je schematicky znázorněn na Obr. 7.32.



**Obr. 7.32: Silový obvod trojfázové obloukové pece**

Popis silového obvodu trojfázové elektrické obloukové pece (Obr. 7.32):

1 - Napájecí síť; 2 - Odpojovač; 3 - Vysokonapěťový výkonový vypínač; 4 - Pecní transformátor a tlumivky; 5 - Krátká síť; 6 – Elektrody

#### q Napájecí síť vysokého napětí

Z hlediska energetiky jsou elektrické obloukové pece jedním z největších odběratelů elektrické energie, soustředěné do jednoho bodu elektrické rozvodné sítě hutního závodu. Napájecí síť vn elektrických obloukových pecí je zatěžována nepravidelně proměnlivými špičkami proudů, které se pohybují od nulových hodnot při přerušení oblouku až po trojnásobek jmenovitého proudu při zkratu elektrod s taveninou. Toto nepravidelné kolísání proudů způsobuje na příslušných impedancích napájecí sítě kolísání napětí, které nepříznivě ovlivňuje ostatní elektrická zařízení, napájená z téže soustavy. Navíc způsobuje toto kolísání snížení elektrického výkonu předávaného obloukem do taveniny.

Velmi citlivé na toto proměnlivé kolísání napětí jsou zejména rentgenová zařízení, televizory, systémy přenosu dat. Proto požadavky na napájecí síť vysokého napětí elektrických obloukových pecí jsou přesně vymezeny a dány především výkonem pecního transformátoru a způsobem tavení.

Důležitým činitelem pro posouzení napájecí sítě vn elektrických obloukových pecí je zkratový výkon v místě zapojení pecí na energetický systém. Především je nutno oddělit systém napájení elektrických obloukových pecí od spotřebičů, zejména těch, které jsou citlivé na změny napětí.

V některých případech však nemůžeme toto oddělení provést. Jde především o menší ocelářské závody napájené vysokým napětím 22 kV a nižším, kde na společných přípojnicích jsou zapojeni ještě další odběratelé. V těchto případech je nutno provést výpočet, zda zkratový výkon v místě napojení elektrické obloukové pece zaručuje udržení rušivých účinků na síť v přijatelných mezích.

#### q Odpojovač

Odpojovač slouží pouze k odpojení celého elektrického zařízení obloukové pece od přívodů vysokého napětí při opravách nebo revizi zařízení. Jinak nemá přímý vliv na elektrické obloukové pece, a proto se jím dále nebudeme podrobněji zabývat.

## q Vysokonapěťový výkonový vypínač

Úkolem vysokonapěťového vypínače je spínat a rozpojovat silový obvod na počátku a konci tavby, během tavby, při nebezpečném přetížení transformátoru a v havarijních případech. Výkonové vypínače jsou vysoce namáhány. Často se jimi provádí 60 až 70 sepnutí během 24 hodin. Na jejich plynulé a bezporuchové práci závisí funkce celého elektrického zařízení pece. Tak např. nevypnutí déle trvajících zkratů mezi elektrodou a taveninou může mít za následek vážné poškození nebo i zničení elektrického zařízení vlivem účinků zkratových proudů. Nejčastěji používanými typy jsou tlakovzdušné vakuové SF<sub>6</sub> vypínače.

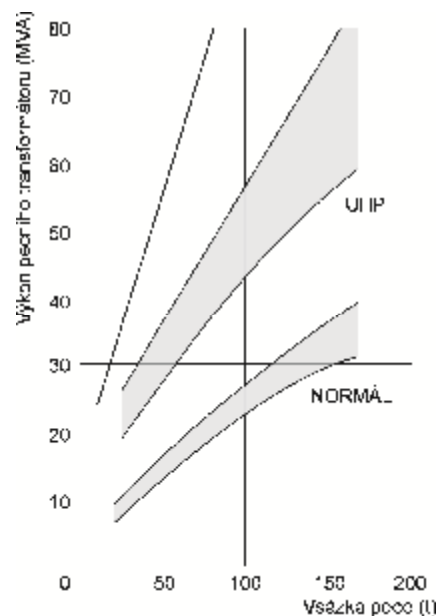
## q Pecní transformátor

Výkonem pecního transformátoru je omezen příkon tepla do pece a tím i výkon pece. Projevuje se to zejména v etapě natavování vsázky, kdy doba trvání tohoto procesu závisí především na množství dodaného tepla. Volba výkonu pecního transformátoru se provádí podle velikostí vsázky pece a zvoleného provozního režimu (Obr. 7.33).

Pecní transformátory u elektrických obloukových pecí se značně liší od normálních silových transformátorů, jelikož pracují se značně proměnlivým zatížením při častých zkratech. Specifickým rysem je poměrně nízké sekundární napětí a vysoký sekundární proud. Poněvadž požadavky na množství energie přiváděné do pece v průběhu tavby se značně mění, musí umožňovat transformátor regulaci sekundárního napětí v širokých mezích.

Regulace napětí na sekundární straně by byla velmi obtížná pro vysoké hodnoty sekundárních proudů (10 až 60 kA) u běžných pecí středního výkonu. Proto se provádí změnou počtu závitů primárního vinutí. Přepínání primárního vinutí v zapojení z trojúhelníka do hvězdy je umožněno zdvojnásobením počtu napěťových stupňů. U většiny našich stávajících obloukových pecí se používají transformátory s přepínáním napěťových stupňů při vypnutém výkonovém vypínači, modernější také pod zatížením.

Zvolený režim tavení s velmi vysokou produktivitou (UHP) se vyznačuje krátkým obloukem. Poměr výkonů pecních transformátorů pro režim UHP a normální režim je 2,1 až 2,4 (Obr. 7.33.)



Obr. 7.33: Poměr výkonů pecních transformátorů pro režim UHP a normální režim

## q Tlumivky

Tlumivky, které jsou zapojeny v napájecí síti mezi výkonovým vypínačem a pecním transformátorem, mají za úkol omezit hodnotu zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou. Nacházejí se ve společné nádobě s transformátorem a mohou mít několik stupňů reaktance. Tlumivka bývá obvykle zařazena při spojení primáru transformátoru do trojúhelníka, tedy při vyšších stupních napětí. Při přepnutí do hvězdy pak dojde k vyřazení tlumivky. Ideální stav by byl v případě plynulého ovládní reaktance tlumivky.

Zápornou stránkou tlumivek u elektrických obloukových pecí je zhoršení celkové účinnosti elektrických obloukových pecí. S nižším stupněm reaktance nebo s úplně vyřazenou tlumivkou se pracuje zejména v druhé části natavování, tj. v údobí, kdy oblouk je kratší, stabilnější a kdy zkraty jsou méně časté. Práce s nižší reaktancí tlumivky umožňuje zvýšit výkon elektrického oblouku, a tím urychlit natavení při současném snížení spotřeby energie. K tomu je ovšem nutné, aby bylo možno ovládat jak přepínání stupňů reaktance tlumivky, tak i její úplné vyřazení.

## q Krátká cesta

Krátkou cestou nazýváme elektrické vedení od vývodů sekundárního vinutí pecního transformátoru do pracovního prostoru pece. Konstrukce krátké cesty se mohou svým provedením u jednotlivých pecí lišit. Vždy však můžeme rozdělit tuto krátkou cestu na následující části:

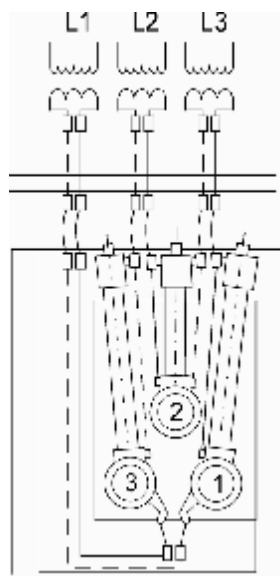
- pásovou část
- ohebná lana
- vodiče ramen držáků elektrod
- držáky elektrod
- elektrody a spojky

Krátkou cestou protékají velké proudy, takže i když odpory v krátké cestě jsou nepatrné, řádově  $10^{-3} \Omega$ , jsou ztráty ve vedení značné. Při proudu  $10^4$  A činí úbytek napětí na odporu  $10^{-3} \Omega$  10 V. Za jednu hodinu tak ztrácíme 100 kWh energie. Ještě výraznější vliv na úbytek napětí má reaktance krátké cesty. Ta sice nezpůsobuje bezprostředně ztráty energie, avšak snižuje podstatně napětí na samotném elektrickém oblouku a tím snižuje i výkon přiváděný do pracovního prostoru pece.

Na reaktanci jednotlivých fází má vliv nejen délka jejich vodičů, ale i jejich vzájemná poloha a poloha okolních ocelových konstrukcí hal a jeřábů. Nerovnoměrné rozdělení výkonů v jednotlivých fázích má nepříznivý vliv na práci pece a životnost vyzdívky. Nejvýhodnějším opatřením pro zmenšení nesymetrie je provedení bifilárního vedení krátké cesty (Obr. 7.34).

Podmínkou provedení bifilárního spojení jsou vhodné vývody sekundárního vinutí pecního transformátoru dosažitelné mimo vlastní transformátor. Dokonalé vyrovnání indukčnosti lze provést však jen při bifilárním spojení až po elektrody a při spojení vývodů sekundárního vinutí transformátoru až na elektrodách.

V menších rudnotermických a ocelářských pecích asi do výkonu 15 MVA je krátká cesta provedena pásovinou s přívodem ohebnými lany v paralelním svazkovém uspořádání. Pro větší obloukové pece se provádí krátká cesta z měděných trubek, chlazených průtokem vody.



Obr. 7.34: Bifilární provedení krátké cesty

#### q Elektrody

Elektrody, uzavírající část elektrického zařízení, jsou velmi důležitým článkem elektrických obvodů elektrických obloukových pecí. Tepelné ztráty v elektrodách, jakož i cena spotřebovaných elektrod, tvoří značnou část provozních nákladů.

Hlavní požadavky na elektrody jsou:

- Dobrá elektrická vodivost
- Vysoká mechanická pevnost
- Vysoká oxidační teplota
- Malý obsah popele a síry

K obloukovému ohřevu se prakticky používají tři druhy elektrod:

- Elektrody uhlíkové
- Elektrody grafitové
- Elektrody násypné (Söderbergovy)

#### q Primární a sekundární metalurgie

V současné době používají elektroocelárny technologický systém s následujícími agregáty (v daném pořadí):

- EOP (elektrická oblouková pec)
- LF pec (pánvová pec)
- Vakuování

Systém moderní ocelárny je charakterizován mohutným objemem toku materiálu, kdy se vstupní materiál (šrot a přísady kusové nebo sypké) transformuje na kontiltní slitky. Kromě těchto slitků se vytváří odpad, a to struska a nežádoucí příměsi. Transformace probíhá v postupném předávání materiálu EOP - LF - Vakuování. V praxi samozřejmě nemusí být použity všechny agregáty, ale vždy se začíná v EOP.

### EOP - Elektrická oblouková pec - Obr. 7.35 (nístějová pec)

- představuje tzv. primární metalurgii
- pecní agregát slouží k výrobě tekuté „surové“ oceli
- energii k výrobě dodáváme převážně elektrickým obloukem, ale můžeme pomoci kyslíkovými hořáky nebo spalováním uhlíku

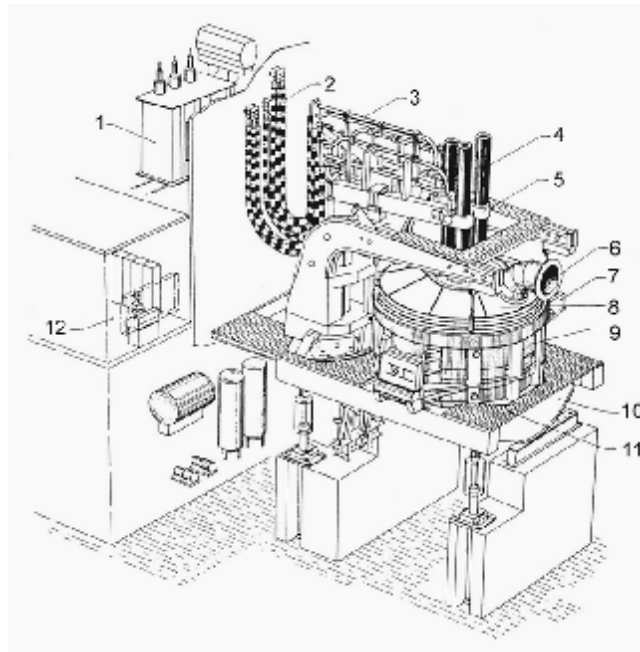
### LF pec - pánvová pec

- patří k zařízením tzv. sekundární metalurgie
- toto zařízení udržuje, respektive zvyšuje teplotu tekuté oceli v odlévací pánvi
- slouží také k definitivnímu legování, odpíchnutí od pánve (přidávání legur)

### Vakuování

- další ze zařízení tzv. sekundární metalurgie
- zařízení slouží k zlepšení kvality vyráběné oceli
- zbavuje se definitivně zbytků nežádoucích plynů

Klasická elektrická oblouková pec je ukázaná na Obr. 7.35



**Obr. 7.35: Trojfázová elektrická oblouková pec [16]**

Popis trojfázové elektrické obloukové pece Obr. 7.35:

1 - Pecní transformátor; 2 - Ohebné kabely chlazené vodou; 3 - Horizontální trubkové vodiče chlazené vodou; 4 - Elektrody; 5 - Držáky elektrod; 6 - Odvod plynů z pecního prostoru; 7 - Odtok oceli při překlopení; 8 - Vodou chlazené víko pece; 9 - Pecní prostor; 10 - Mechanismus naklánění pece; 11 - Montážní plošina; 12 - Řídicí pracoviště.

### ☐ Rozdělení EOP dle používaného oblouku

Elektrické obloukové pece se stavějí nejčastěji přímo na střídavý trojfázový proud. Mají obvykle tři elektrody a oblouk hoří mezi elektrodami a vsázkou. Vsázka nemá většinou



zpětný nulovací vodič, takže se na ni vytvoří určitý střední potenciál, proti kterému hoří jednotlivé oblouky.

### **Pece s přímým obloukem**

U těchto pecí hoří oblouk mezi elektrodou a vsázkou. Někdy se tyto pece nazývají pece se závislým obloukem. Tyto pece se používají především k výrobě oceli a litin. Jelikož proudový obvod se uzavírá přes taveninu hořením oblouku mezi elektrodou a vsázkou, je přenos tepla do vsázky přímý, což přispívá k větší rychlosti ohřevu taveniny. Snížení doby tavy a tím i snížení doby zahřívání stěn snižuje ztráty a zvyšuje účinnost. Svislé uložení elektrod snižuje možnost ulomení elektrod a poruchovost.

### **Pece s nepřímým obloukem**

Oblouk hoří mezi dvěma elektrodami a teplo se do vsázky dostává výlučně sáláním, proto se tyto pece nazývají pece se sálavým obloukem. Oblouk hořící nezávisle na vsázce se nazývá nezávislý oblouk. Pece se používají k výrobě litiny, bronzu, mědi, feroslitin, karbidů a některých legovaných ocelí. Tyto pece mají však oproti předchozí několik nevýhod, a to především ve větší spotřebě elektrické energie na jednotku vsázky, dále ve vodorovném uložení elektrod, které se často lámou a tím nauhličují lázeň, což není dobré z metalurgického hlediska. Díky nezávislé hořícímu oblouku dochází k většímu opotřebením stěn. Výhodou těchto pecí jsou menší investiční náklady a jednoduchost obsluhy.

### **Pece se zakrytým obloukem**

Zde oblouk opět hoří mezi elektrodami a vsázkou, ale elektrody jsou ponořeny do roztavené strusky a obsypány zavázkou rud a příměsí, oblouk je tedy zcela zakryt. Určitá část proudu prochází mezi elektrodami struskou a zavázkou, které jsou v horkém stavu dobře vodivé. Vzniká tak vlastně zároveň odporový ohřev strusky a zavázky přímým průchodem elektrického proudu, proto se pece nazývají také pece oblouk - odporové. Tento mechanismus se používá především u rudných termických pecí.

## **q Pracovní charakteristiky tavicí obloukové pece na ocel**

Ocelářské obloukové pece mají vanu vyzděnou zásaditou vyzdívkou. Obsah vsázky činí až 100 tun oceli. Elektrické příkony dosahují desítek MW. Optimální provozní režim elektrických obloukových ocelářských pecí závisí na celé řadě technologických faktorů, konstrukci pece, jakosti elektrod, složení vyzdívky, atd.

Hlavním ovlivňujícím faktorem je však správně zvolený elektrický režim pece. Regulací tohoto režimu je možno provádět buď změnou napětí přiváděného na elektrody pece nebo změnou délky oblouku - tedy proudu.

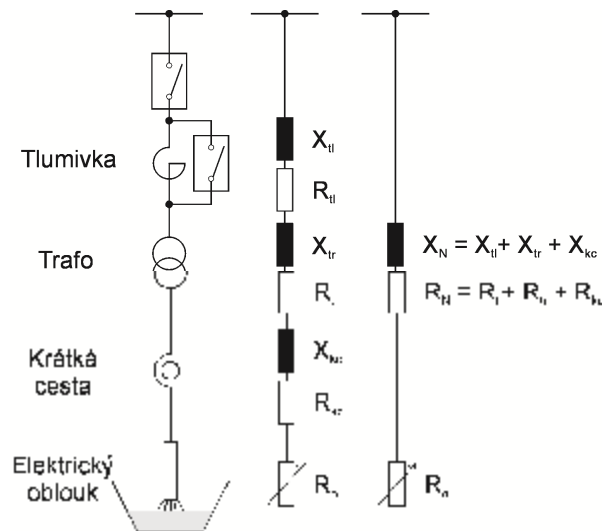
První způsob se používá běžně při jednotlivých etapách tavy v elektrické obloukové peci a má přímou návaznost na metalurgický proces. Druhý způsob je vymezen činností automatické regulace pohybu elektrod, která v daném napěťovém stupni udržuje konstantní, optimální příkon elektrické energie do taveniny.

Pro správné pochopení optimálního chodu elektrické obloukové pece se seznámíme se závislostí hlavních elektrických veličin pecních obvodů, tj. výkonu, účinníku, účinnosti, na nezávisle proměnném proudu.

Elektrické charakteristiky elektrické obloukové pece lze stanovovat buď výpočtem nebo graficky pomocí kruhového diagramu elektrické obloukové pece, případně měřením na konkrétních zařízeních elektrických obloukových pecí.

Vyjáďfeme si silový obvod elektrického zařízení elektrické obloukové pece jednoduchým náhradním schématem podle Obr. 7.36. Jednofázově jsou v sérii zapojeny jednotlivé prvky elektrického zařízení elektrické pece. Postupným zjednodušením dostáváme transformované

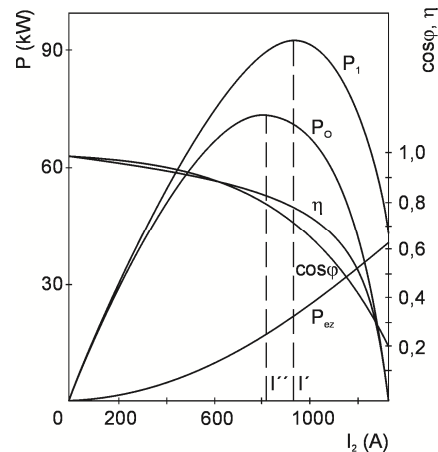
náhradní schéma pro odpory  $R_N$ ,  $X_N$ ,  $R_o$ , vycházíme tak samozřejmě z určitých zjednodušení, která v praxi nelze opominout.



**Obr. 7.36: Náhradní schéma elektrického zařízení obloukové pece**

Napětí sítě je symetrické a nezávislé na zatížení. Impedance jednotlivých fází (vyjma odporu elektrického oblouku) jsou stejné a nezávislé na proudu. Odpor elektrického oblouku je lineární. Proud transformátoru při chodu naprázdno je nulový. Hodnoty náhradních odporů  $X_N$  a  $R_N$  se zpravidla zjišťují při měření nakrátko.

Vlastní elektrické charakteristiky je pak možno sestavit pomocí kruhových diagramů. Příklad teoretických charakteristik je na Obr. 7.37.



**Obr. 7.37: Teoretické pracovní charakteristiky**

Na charakteristikách je možno vyznačit proud odpovídající maximálnímu primárnímu výkonu  $I'$  i maximální proud na oblouku  $I''$ . Tento proud je někdy mylně považován za optimální proud odpovídající největší rychlosti tavení. Avšak určovat optimální hodnotu proudu pouze podle teoretických charakteristik představuje velmi zúžený přístup.

Především uvedené zjednodušující předpoklady nelze v praxi akceptovat. Dále je nutno uvažovat také tepelné ztráty (zvláště ke konci tavení), které jsou větší než ztráty elektrické a ovlivňují tak rychlost tavení a měrnou spotřebu elektrické energie. Tyto tepelné ztráty lze pokládat za konstantní a v podstatě nezávislé na elektrických veličinách. Výkon kompenzující tyto tepelné ztráty se odečítá od výkonu elektrického oblouku. Užitečný výkon se tedy rovná

$$P_{už} = P_1 - P_{ez} - P_{tz} \quad (7.58)$$

kde  $P_{tz}$  je výkon kompenzující tepelné ztráty;  $P_{ez}$  je kompenzující elektrické ztráty.

Energetickou účinnost tavení lze vyjádřit vztahem

$$h_{en} = \frac{P_{už}}{P_1} \cdot 100 \quad (7.59)$$

Měrná spotřeba elektrické energie  $w$  bude rovna

$$w = \frac{W_{už}}{h_{en}} \quad (7.60)$$

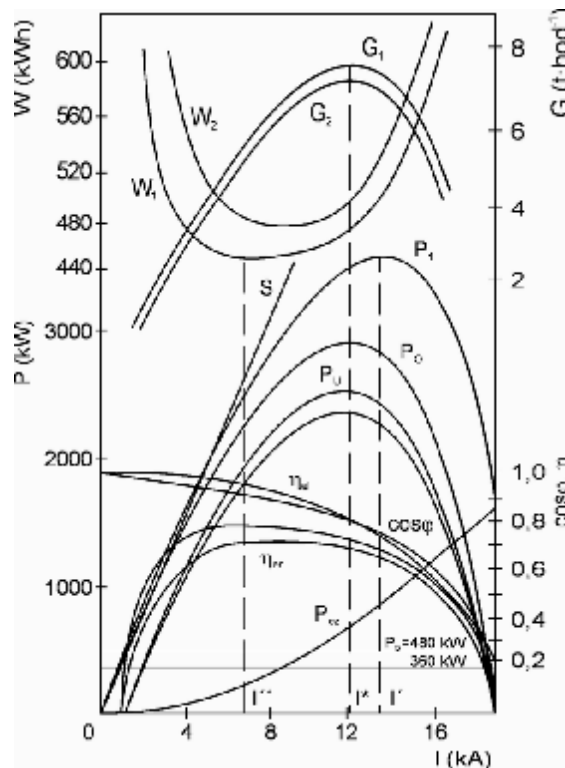
kde  $W_{už}$  je energie spotřebovaná na roztavení jedné tuny bez uvažování ztrát.

Vztah pro rychlost tavení je dán poměrem celkového užitečného výkonu spotřebovaného pouze k roztavení vsázky k příkonu užitečné energie.

$$G = \frac{P_{už}}{W_{už}} \quad (7.61)$$

Podle veličin ve vztazích (7.58) - (7.61) můžeme posuzovat hospodárnost provozu EOP.

Vidíme tedy, že uvažování vlivu tepelných ztrát dovoluje vyjádřit energetickou účinnost, měrnou spotřebu energie a rychlost tavení jako funkci proudu. Na Obr. 7.38 jsou pracovní charakteristiky 10-tunové elektrické obloukové pece pro stupeň napětí 220 V.



Obr. 7.38: Pracovní charakteristiky 10-tunové elektrické obloukové pece pro stupeň napětí 220 V

Z grafu lze zjistit hodnotu proudu  $I''$ , které odpovídá maximální energetická účinnost  $h_{en}$  a minimální měrná spotřeba energie  $w_1, w_2$ . Přitom platí, že  $I'' < I^*$ . To znamená, že režim minimální spotřeby se dosahuje při nižším příkonu než režim maximální rychlosti tavení.

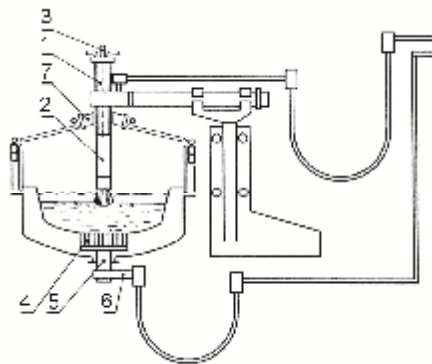
Je možno tedy říci, že uvedenými charakteristickými hodnotami proudů  $I''$  a  $I^*$  je pro daný napěťový stupeň a pro danou hodnotu tepelných ztrát vymezena oblast pracovních režimů.

Mimo tuto oblast je podle teoretických pracovních charakteristik neracionální pracovat. Je možné uvažovat rovněž vliv vyšších tepelných ztrát na jednotlivé závislé proměnné veličiny.

Z grafických závislostí je patrné, že vyšší tepelné ztráty mají za následek snížení rychlosti tavení, zvýšení měrné spotřeby a posunutí jejího minima k vyšším proudovým intenzitám. Poloha maxima rychlosti tavení však výši tepelných ztrát ovlivňována není.

#### q Stejnoseměrné elektrické obloukové pece

Novou technologií v oblasti využití obloukového tepla je stejnosměrné napájení obloukových pecí (Obr. 7.39).



**Obr. 7.39: Schéma stejnosměrné obloukové pece**

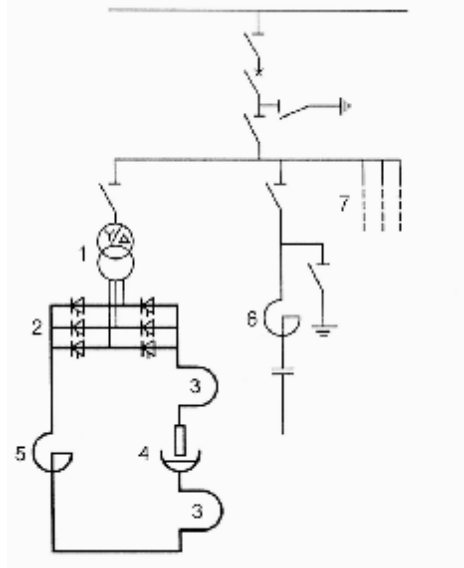
Popis stejnosměrné obloukové pece podle Obr. 7.39:

1 - chlazení elektrody; 2 - grafitová část elektrody; 3 - přívod Ar nebo  $N_2$ ; 4 - vodivé dno (anoda); 5 - dnová elektroda; 6 - obvod napájení stejnosměrným proudem; 7 - keramický uzávěr elektrody.

Mezi transformátor a obloukovou pec je umístěn usměrňovač. Elektrická cesta i vlastní pec se odlišují od tradičního způsobu střídavého napájení. Napájecí zdroj je složen z regulačního transformátoru a vlastního transformátoru s pevným převodem na nízké napětí. Dále je zařazen plně řízený šestipulzní usměrňovač v můstkovém zapojení, který zaručuje dobré využití výkonu transformátoru a vyhovuje dynamickým požadavkům obloukové pece.

Ve stejnosměrné části obvodu napájení pece je tlumivka na stejnosměrný proud. Tato tlumivka omezuje namáhání tyristorů provozními zkraty a napomáhá stabilizaci oblouku.

Zařízení pro kompenzaci účinníku a filtraci vyšších harmonických není u stejnosměrných pecí nutností. Použije se pouze v případě, kdy místní napájecí soustava má nedostatečný zkratový výkon v místě napojení stejnosměrné obloukové pece (Obr. 7.40).



**Obr. 7.40: Schéma elektrického zapojení stejnosměrné obloukové pece [17]**

Popis stejnosměrné obloukové pece podle Obr. 7.40:

1 - regulační transformátor; 2 - šestipulzní můstkový usměrňovač; 3 - krátká cesta napájení; 4 - oblouková pec; 5 - tlumivka; 6 a 7 - filtračně kompenzační zařízení.

Vlastní vana obloukové pece na stejnosměrný proud musí mít vodivé dno a speciální konstrukci pro vyvedení proudu obvodem systémem dnových elektrod. Největší výhodou stejnosměrných obloukových pecí je podstatné snížení spotřeby grafitových elektrod, které dosahuje v některých případech až 50 %. Do 30 tun vsázky se konstruují pece s jednou elektrodou. Tyto pak vykazují menší opotřebení vyzdívek v peci vzhledem k rovnoměrné vzdálenosti elektrody od stěn pece. Další výhodou je odstranění rušivých vlivů na napájecí síť, zejména dynamických odchylek napětí. Hlučnost provozu se snížila ze 110 dB na 90 dB ve srovnání se střídavým napájením. Stejnosměrná oblouková pec se provozuje s dlouhým obloukem, a tedy co nejvyšším stupněm napětí v napájecím transformátoru. Dlouhý oblouk vyžaduje užití pěnové strusky. Elektricky vodivé dno stejnosměrné pece potřebuje provoz s tekutou vsázkou ihned při startu tavení. Proto se ponechává v peci po odlití část tekuté oceli, která umožní spojení obvodu elektrické cesty. Výhodou je možnost rekonstrukce stávajících střídavých obloukových pecí na stejnosměrné se zachováním původního napájecího transformátoru.



### Shrnutí pojmů 7.3.

Elektrický oblouk, elektrická oblouková pec (EOP), vektorový diagram, kruhový diagram, pracovní charakteristiky, primární a sekundární metalurgie.



### Otázky 7.3.

1. Vysvětlete vznik stejnosměrného a střídavého oblouku, nakreslete schémata.
2. Nakreslete tvar anody a katody při delším hoření stejnosměrného oblouku.
3. Nakreslete časový průběh napětí a proudu při střídavém oblouku.
4. Vysvětlete a nakreslete stabilizaci střídavého oblouku indukčností.

5. Vysvětlíte, co je primární a sekundární metalurgie.
6. Jak dělíme EOP dle používaného oblouku? Popište jednotlivé pece.
7. Nakreslete voltampérové charakteristiky stejnosměrného oblouku.
8. Co tvoří silnoproudý obvod EOP?
9. Jaké části má krátká cesta EOP?
10. Co jsou pracovní charakteristiky EOP? Nakreslete.
11. Které veličiny charakterizují chod EOP?

## 7.4. Elektrické teplo indukční



### ČAS KE STUDIU:

2 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete

- znát princip vzniku tepla ve vsázce při indukčním ohřevu
- umět vysvětlit princip ohřevu v kelímkových a kanálkových indukčních pecích
- znát způsob připojení indukčních pecí na napájecí síť



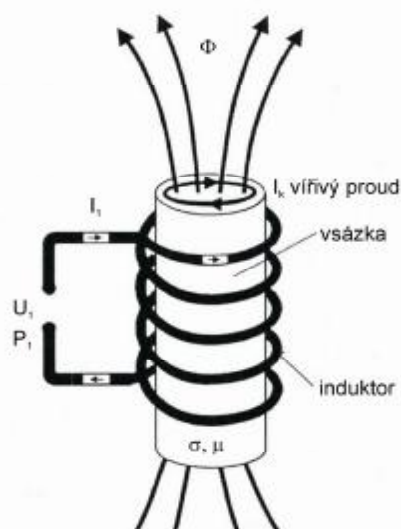
### VÝKLAD

#### ▣ Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Indukční ohřev je možný jen u vsázky elektricky vodivé. Ve vsázce z vodivého materiálu která je vložena do střídavého magnetického pole se indukují vířivé proudy, které ji zahřívají. Často se zjednodušeně přirovnává indukční ohřev k transformátoru, kde sekundární vinutí představuje vsázka a je spojeno nakrátko. Přenos tepla do vsázky se tedy neděje tepelným spádem jako například u zařízení odporových s nepřímým ohřevem. Teplo se přenáší střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce. Vsázka je nejteplejším objektem celé soustavy, přičemž vše ostatní může být chladné. Vznik tepla přímo ve vsázce, která není mechanicky s ničím vázána, patří k největším výhodám indukčního ohřevu.

Indukční ohřev umožňuje nezvykle vysoké měrné příkony do vsázky. Volbou frekvence proudu, který napájí ohřívací vinutí (induktor) a v jehož magnetickém poli je vsázka, můžeme vhodně ovlivnit i rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce.

Každé indukční zařízení sestává vždy z cívky, kterou prochází střídavý proud, ze zdroje a ze vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. Průchodem proudu rovinným zářičem vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné. Průchodem proudu válcovým zářičem vzniká v okolí tohoto zářiče elektromagnetické vlnění válcové. Válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzařuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění.



Obr. 7.41: Princip indukčního zařízení

Umístíme-li souose v cívce válcovou elektricky vodivou vsázku, pak dopadající elektromagnetické vlnění vstupuje do vsázky povrchem a vyvolává indukované proudy, jejichž účinkem se vsázka zahřívá. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Hloubka vniku záření závisí na kmitočtu.

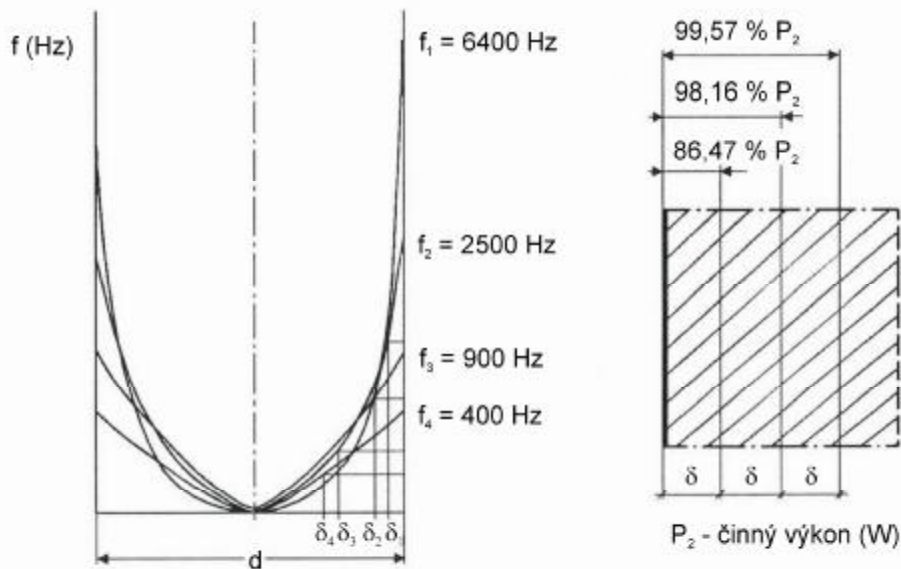
$$d = \sqrt{\frac{2}{w \cdot m \cdot s}} = \sqrt{\frac{2}{2p \cdot f \cdot m \cdot s_r}} \quad (7.62)$$

kde  $\delta$  je hloubka vniku (m),  $f$  je frekvence (Hz),  $\mu$  je permeabilita ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\sigma$  je konduktivita ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu je v Tab. 7.8 a je znázorněna na Obr. 7.42.

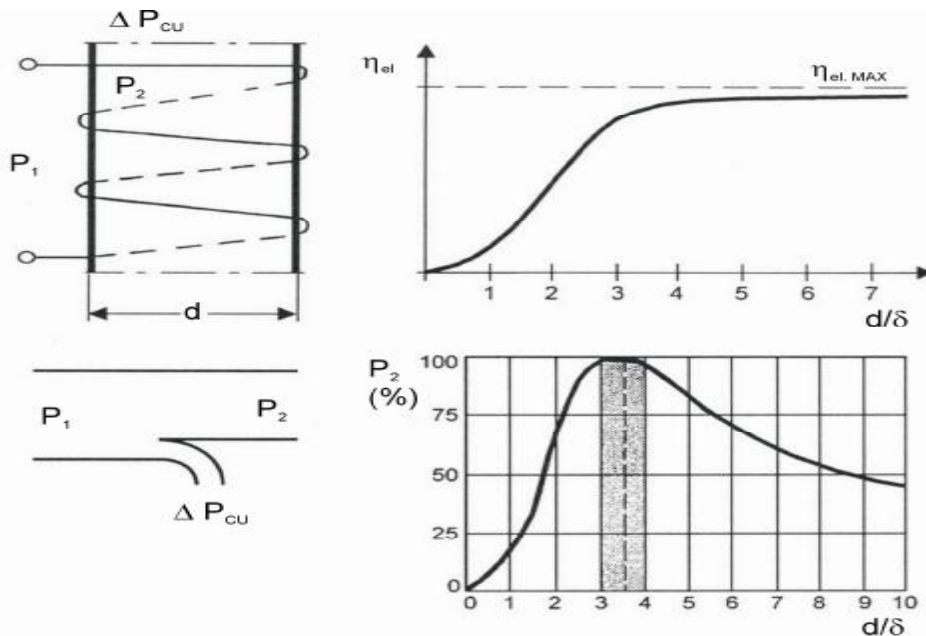
Frekvence (Hz)	Hloubka vniku (mm)					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8	71,2
1000	2,1	7,1	2,7	7	1,8	15,9
10000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5
1000000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5

Tab. 7.8: Závislost hloubky vniku na kmitočtu



Obr. 7.42: Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu

Elektrická účinnost indukčního ohřevu je závislá na poměru  $d/\delta$ . Tedy velikosti průměru, tloušťky vsázky ku hloubce vniku podle Obr. 7.43. Také materiál ohřivaného předmětu a jeho teplota ovlivňuje výslednou účinnost indukčního ohřevu.

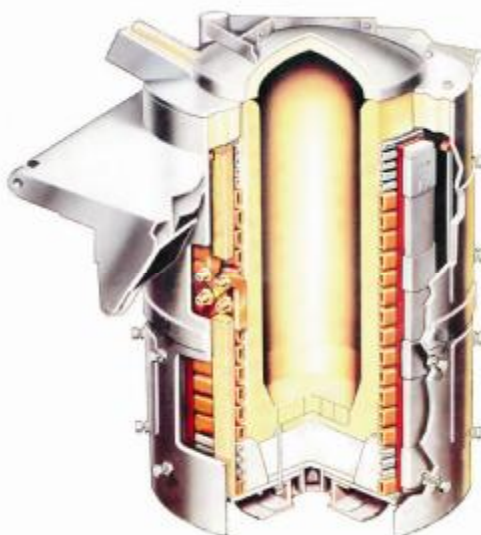


Obr. 7.43: Elektrická účinnost indukčního ohřevu

#### q Indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem

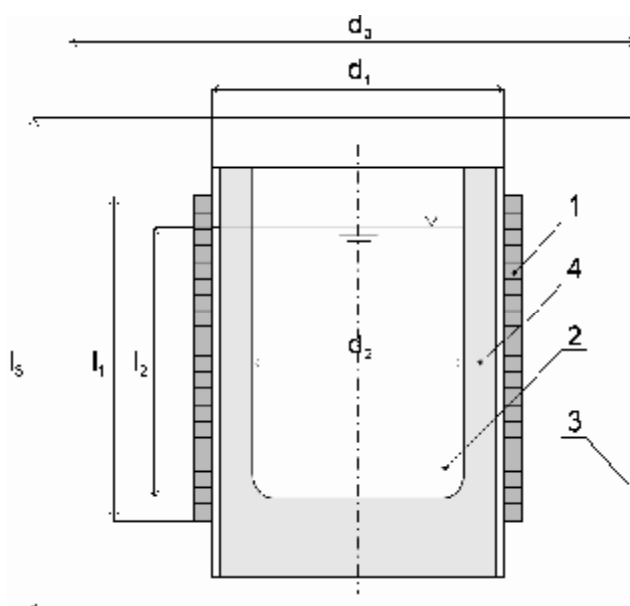
V cínce je umístěn kelímek, který se pěníuje z keramické hmoty. Pec má buď stínící plášť z mědi, nebo ocelový plášť, který na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů (Obr. 7.44). Schematicky je pec tohoto typu vyznačena na Obr. 7.45.





Obr. 7.44: Indukční kelímková pec

### Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm



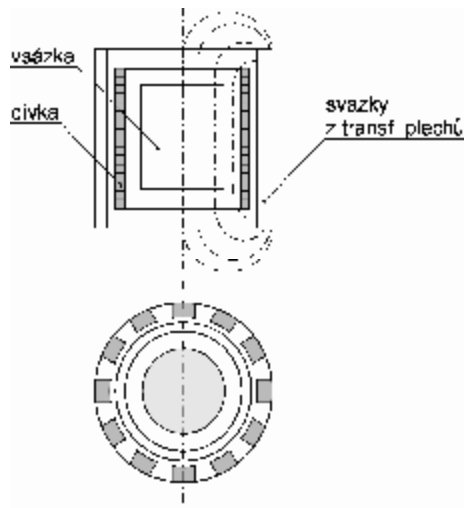
Obr. 7.45: Indukční kelímková pec s vodivým stínícím pláštěm

Keramický kelímek 4 válcového tvaru elektricky nevodivý, obsahující vsázku 2, je ovinut cívkou 1. Cívku vineme zpravidla z měděné trubky obdélníkového průřezu. Cívkou prochází proud zvýšeného kmitočtu (500 až 1000 Hz), příp. proud síťového kmitočtu 50 Hz. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do své dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky, je jí pohlcováno, energie elektromagnetická se mění v tepelnou. Dutinou cívky prochází magnetický tok, který se uzavírá vně cívky. Je třeba učinit vhodné opatření, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší, aby nedocházelo k zahřívání nosných konstrukcí pece. Toho dosáhneme buď tak, že pec opatříme stínícím pláštěm z dobře vodivého materiálu vhodného průměru, nebo umístíme vně cívky jádro ze železných plechů, kterým se magnetický tok uzavírá. Indukční kelímkové pece mají vždy stínění, a to buď jako vodivý stínící plášť, nebo jako jádro z transformátorových plechů vně cívky. Počítáme-li však menší pece, můžeme zanedbat vliv stínění a pec počítáme, jakoby stínění

neměla. Při výpočtu uvažujeme pouze cívku a vsázku, tedy pouze dva na sebe působící elektrické obvody. Výpočet se tím zjednoduší a zkrátí.

### Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky

Je-li indukční kelímková pec opatřena vodivým stínícím pláštěm, sníží se velmi výrazně intenzita magnetického pole vně pláště. Podobného účinku dosáhneme také tak, že vně cívky místo stínícího vodivého pláště dáme železné jádro z většího počtu svazků z transformátorových plechů podle Obr. 7.46. Převážná část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, tj. svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště z kotlového plechu. Zařazením magneticky vodivých svazků se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tok poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost pecní cívky, tj. magnetický tok pro jednotkový proud. Rovněž vzroste vlastní indukčnost a vzájemná indukčnost  $M_{12}$ . Pec se stínícím pláštěm vyžaduje cívku s poněkud vyšším počtem závitů a větší kondenzátorovou baterii než je pec s jádrem. Užitečný výkon je nižší a ztráty v cívce jsou vyšší u pece s pláštěm než u pece s jádrem. Hodnoty pro pec bez stínění jsou zpravidla mezi hodnotami I a III a jsou bližší hodnotám III. Elektrická účinnost je u pece s pláštěm výrazně nižší než u pece s jádrem. Nejdůležitějším výsledkem provedeného porovnání je zjištění, že účinnost pece se železným jádrem je téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým provozem. Provedení indukční kelímkové pece se železným jádrem je proto technicky dokonalejším řešením. Výrobně však tato pec je dražší a dojde-li při provozu k protavení kelímku, je poškození této pece zpravidla horší, případně dojde k úplnému zničení pece.

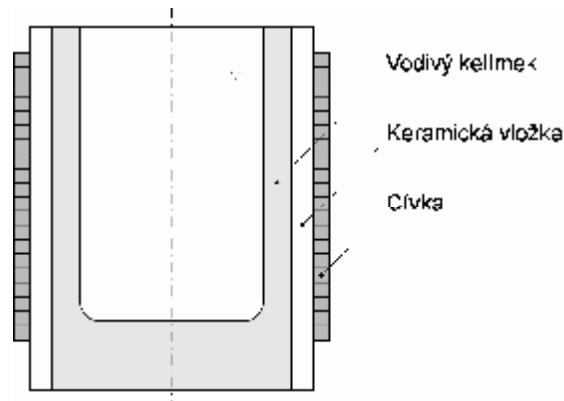


Obr. 7.46: Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky

### q Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

Indukční pec s nevodivým kelímkem má nízkou elektrickou účinnost při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny apod. Elektrická účinnost podstatně stoupne jestliže pec opatříme vodivým kelímkem schematicky podle Obr. 7.47 (pro tavení Al a Cu). Jedná-li se o nižší teploty, jaké přicházejí v úvahu při tavení hliníku a jeho slitin, zhotovuje se kelímek z ocelolitiny. Pro vyšší teploty se používají tzv. grafitové kelímky. Zhotovují se ze směsi šamotu a grafitu. Čím více grafitu, tím je kelímek vodivější. Velká vodivost však není žádoucí. Mezi kelímkem a cívkou je keramická izolační vrstva, která zmenšuje ztrátový tepelný tok ze žhavého kelímku do vodou chlazené cívky. Zavedeme-li do cívky proud, dopadá elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, indukuje proud ve stěně a jeho průchodem

se kelímek zahřívá. Ten potom předává teplo vsázce, vložené do jeho dutiny. Poměry jsou obvykle takové, že ve stěně kelímku se přemění v teplo větší část dopadající elektromagnetické energie, menší část však projde stěnou a zahřívá přímo vsázku. Rozhodující je vzájemný poměr mezi tloušťkou stěny  $\delta_3$  a hloubkou vniku  $d_3$ . Je-li hloubka vniku malá proti tloušťce stěny, pohltí se všechna elektromagnetická energie ve stěně kelímku. Výpočet je stejný jako pro dva sousední válce u pece s nevodivým kelímkem. Při výpočtu považujeme kelímek za vsázku. Není-li však  $d_3 \ll \delta_3$ , projde značná část elektromagnetické energie stěnou kelímku do vsázky.

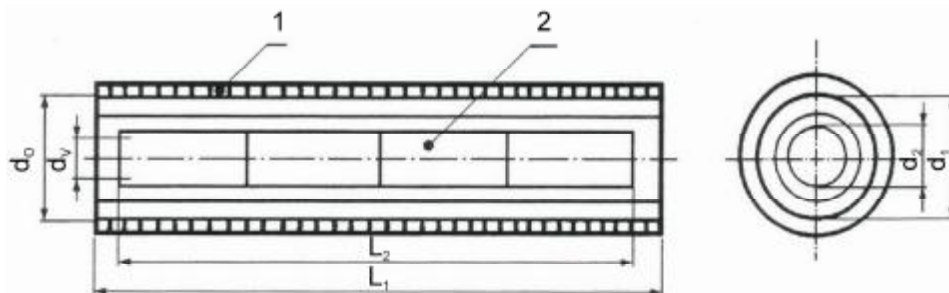


Obr. 7.47: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem

#### q Indukční prohřívací zařízení

V závodech, kde se zhotovují součásti kování nebo lisováním za horka, je důležitým problémem rovnoměrné prohřátí materiálu. Kovové vývalky válcového nebo čtyřhranného tvaru nejčastěji ocelové je třeba ohřát na kovací teplotu (ocel 1150 °C až 1250 °C). Ve starších kovárnách se k prohřívání vývalků používá pece palivových, vytápěných plynem, práškovým uhlím nebo naftou. Rovnoměrné prohřátí v celém průřezu však trvá příliš dlouho a během této doby dochází na povrchu k oxidaci materiálu. Několik procent materiálu se zničí a mimoto vzniklé okuje poškozují při další operaci zápusky a zkracují jejich životnost. Naproti tomu prohřívání v indukční peci trvá velmi krátkou dobu, takže prakticky nenastává oxidace na povrchu. Ekonomické výhody jsou příčinou rychlého zavádění indukčního prohřívání do nově budovaných kováren. Indukční pec (indukční ohříváčka) na vývalky má obvykle válcový tvar, schematicky podle Obr. 7.48.

Hlavní částí indukční ohříváčky je indukční cívka 1 o délce obvykle asi 1 m. Její průměr se volí podle průměru vývalků, které mají být indukčně prohřívány. V induktoru je obvykle větší počet (4 až 7) vývalků téže délky.



Obr. 7.48: Schéma indukčního prohřívání

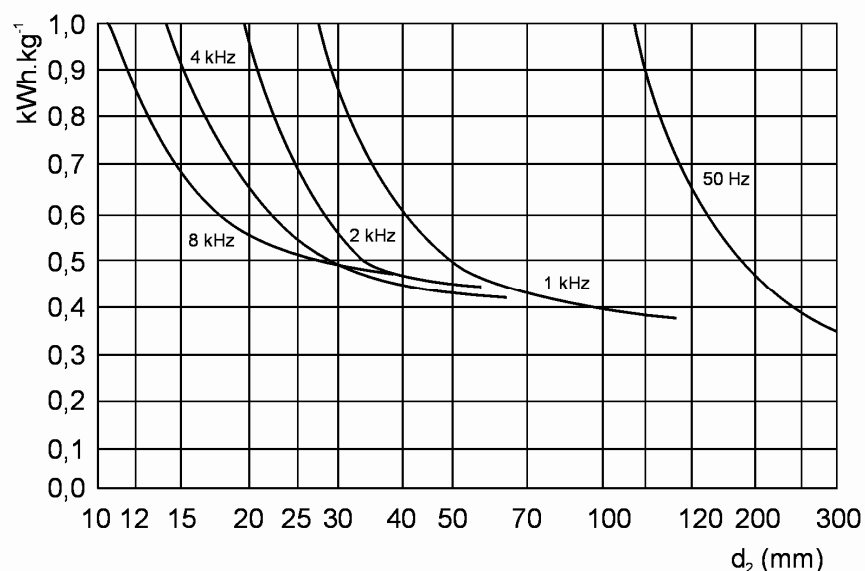
### Volba kmitočtu a doby prohřívání

Rovnoměrné prohřátí nastane tak, že se teplo z povrchové vrstvy, kde vzniká, šíří vedením do nitra vývalku. Z tohoto hlediska je výhodnější, aby vrstva, ve které se teplo vyvíjí, nebyla příliš slabá, což jinými slovy znamená, že kmitočet nesmí být příliš vysoký. Je proto třeba zvolit vhodný kmitočet, a tím i vrstvu, ve které se teplo vyvíjí tak, aby nastalo absorbování energie s dobrou účinností, avšak aby nedocházelo k přehřívání povrchu. Za optimální lze označit takový kmitočet, při kterém je přibližně  $r_2 = (2,5 \text{ až } 3,0) \cdot \delta_2$ . Bereme hloubku vniku pro materiál již prohřátý, tj. magnetický, jde-li o ocel. V praxi se volí kmitočet pro indukční prohřívání oceli v závislosti na průměru vývalků podle Tab. 7.9. Z tabulky vidíme, že každý kmitočet lze použít pro průměry ve značném rozsahu různé.

f (Hz)	50	500	1000	2000	4000	8000
d (mm)	160÷500	80÷280	50÷180	35÷120	22÷70	15÷50

**Tab. 7.9: Volba kmitočtu pro indukční prohřívání oceli**

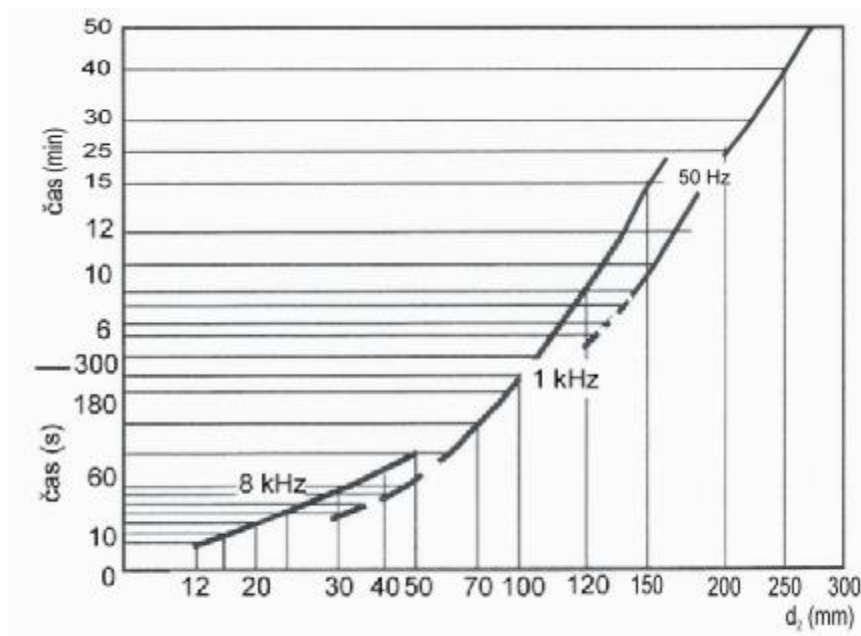
Z grafu uvedeného na Obr. 7.49 je zřejmé, že měrná spotřeba v kWh na prohřátí 1 kg oceli na 1200 °C stoupá, jestliže se blížíme k dolní hranici rozsahu průměrů. Materiál se stává elektromagneticky pružným. Pro průměr  $d_2 = 10,0$  cm oceli je měrná spotřeba energie ze sítě asi  $0,40 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$  při kmitočtu 1000 Hz. Doba  $t$  potřebná k rovnoměrnému prohřátí oceli se obvykle nepočítá a bere se z příslušného diagramu podle Obr. 7.50.



**Obr. 7.49: Graf měrné spotřeby**

Rovnoměrnost prohřátí vývalku je postačující, jestliže ke konci prohřívání procesu není rozdíl teploty na povrchu a v ose větší než 100 °C. Nerovnoměrnost se ještě zmenší během dalších zpravidla několika desítek vteřin, které uplynou mezi koncem prohřívání a kovací operací v lisu. Z Obr. 7.50 můžeme odečíst, že vhodná doba k prohřátí ocelového vývalku o průměru  $d_2 = 100$  mm je asi 7 min, při uvažovaném kmitočtu 1000 Hz. Doba prohřátí se dá zkrátit asi o třetinu v případě tzv. rychloohřevu. Při rychloohřevu je část cívky na začátku induktoru, kterým vstupují studené vývalky, provedena se zhuštěnými závitě. V této části připadá více závitů  $N_{11}$  na 1 cm délky cívky. Tím vzroste intenzita magnetického pole  $H_1 = N_{11} I_1$  ( $\text{A}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) ve vstupní části induktoru, a protože vyvinuté teplo závisí na druhé mocnině  $H_1^2$ , zahřeje se v této části induktoru vložené kusy rychleji na vyšší teplotu a celková

doba prohřívání se zkrátí. Větší rozdíl teploty na povrchu a v ose vývalku se potom vyrovná v dalším průběhu pomalejšího prohřívání [18].



Obr. 7.50: Diagram doby k prohřátí ocelového vývalku

#### □ Indukční zařízení pro povrchový ohřev

Pro povrchové prohřívání předmětů řádově do hloubky 10 mm používáme vysoké frekvence, řádově  $10^4$  až  $10^6$  Hz. V průmyslu se používají indukční prohřívací zařízení, induktry, k těmto technologickým účelům:

- Kalení
- Pájení
- Svařování
- Rafinační přetavování

Hloubka prohřáté vrstvy závisí na frekvenci podle následující Tab. 7.10.

Frekvence $f$ (kHz)	Hloubka vniku $\delta$ (mm) (ocel 1000 °C)	Hloubka ohřáté vrstvy $g = (2 \text{ až } 3) \delta$ (mm)
10	5,00	10 – 15
100	1,60	3,2 – 5
1 000	0,50	1 - 1,5
10 000	0,16	0,3 - 0,5
30 000	0,09	0,2 - 0,3
100 000	0,05	0,1 - 0,15

Tab. 7.10: Hloubka prohřáté vrstvy v závislosti na frekvenci

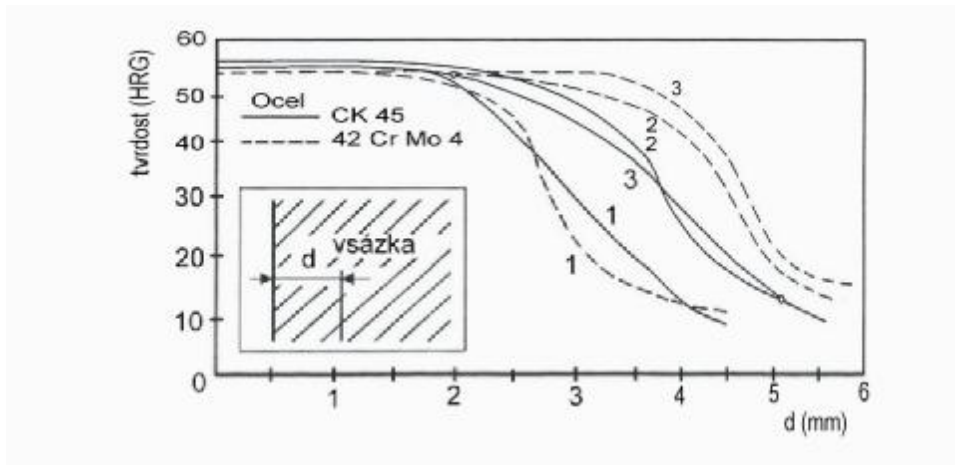
## Kalení

Pro kalení používáme specifický výkon v rozsahu 1 až 20 kW·cm<sup>-2</sup>. Optimální frekvence se vypočítá ze vztahu

$$\frac{0,015}{d^2} < f < \frac{0,25}{d^2} \quad (7.63)$$

kde  $d$  je hloubka zakalení (mm),  $f$  je frekvence (kHz).

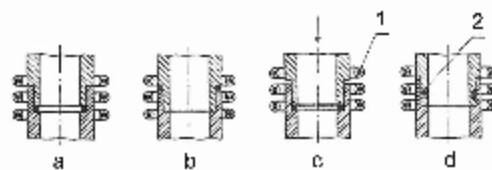
Na Obr. 7.51 a v Tab. 7.10 je možné sledovat hloubku zakalení  $d$  v závislosti na frekvenci a tvrdosti použité oceli. Křivka 1 je pro  $f = 400$  kHz, 2 je pro  $f = 10$  kHz a 3 je pro  $f = 4$  kHz.



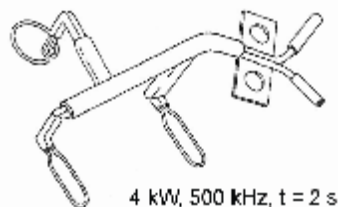
Obr. 7.51: Hloubka zakalení

## Pájení

Při pájení používáme frekvenci v rozsahu 2 kHz až 2,5 MHz. Princip pájení prostřednictvím speciálního induktoru je znázorněn na Obr. 7.52 a Obr. 7.53 speciální induktor pro pájení tří různých tvarů současně. Pájení na měkko využívá pro teploty od 150 do 450 °C výkony 0,5 až 5 kW. Pájení natvrdo využívá pro teploty od 450 do 1 050 °C výkony 3 až 30 kW. Na Obr. 7.53 je 1 induktor, 2 je pájka.



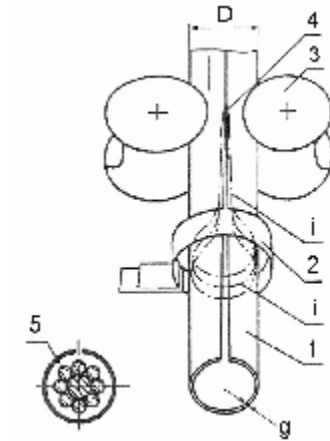
Obr. 7.52: Princip indukčního pájení



Obr. 7.53: Speciální induktor pro pájení tří různých tvarů současně

## Svařování trubek

Princip svařování trubek pomocí posunujícího se induktoru je znázorněn na Obr. 7.54. Používají se zdroje o frekvenci 8 až 500 kHz a výkony 50 až 700 kW podle různé hloubky prohřátí.

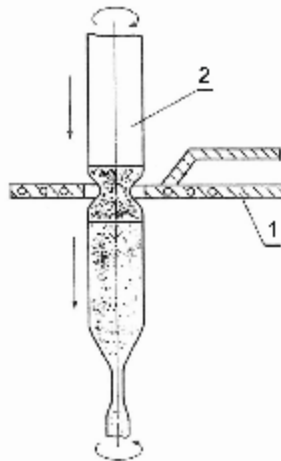


**Obr. 7.54: Princip indukčního svařování trubek**

1 - trubka, 2 - induktor, 3 - kladky, 4 - svar, 5 - magnetické jádro,  $i$  - indukovaný proud,  $v = 15 - 100 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $f = 8 - 500 \text{ kHz}$ ,  $P = 50 - 700 \text{ kW}$ ,  $g = 0,4 - 12 \text{ mm}$ ,  $D = 8 - 500 \text{ mm}$ .

## Rafinační přetavování

Princip rafinačního přetavování je znázorněn na Obr. 7.55, kde 1 je induktor a 2 je vsázka (Si). Používají se zdroje o frekvenci 400 kHz až 5 MHz při výkonech 10 až 50 kW.

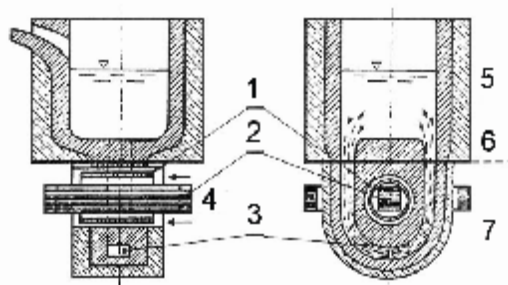


**Obr. 7.55: Princip rafinačního přetavování**

## q Kanálkové indukční pece

### Provedení kanálkové indukční pece

Indukční kanálková pec je v podstatě transformátor s uzavřeným železným jádrem, s primární cívkou připojenou na síť. Kanálek vyplněný roztaveným kovem je sekundární stranou transformátoru. Je to vlastně závit spojený nakrátko Obr. 7.56.



**Obr. 7.56: Kanálková indukční pec**

1-ohřívací cívka chlazená vzduchem (vyznačeno šipkami), 2-jádro z transformátorových plechů plášťového typu, na jehož středním sloupku je ohřívací cívka 1, 3-kanálek, který obepíná ohřívací cívku jako závit nakrátko, 4-chladičí vzduch, 5-vana pece, 6-dělicí spára, 7-induktor.

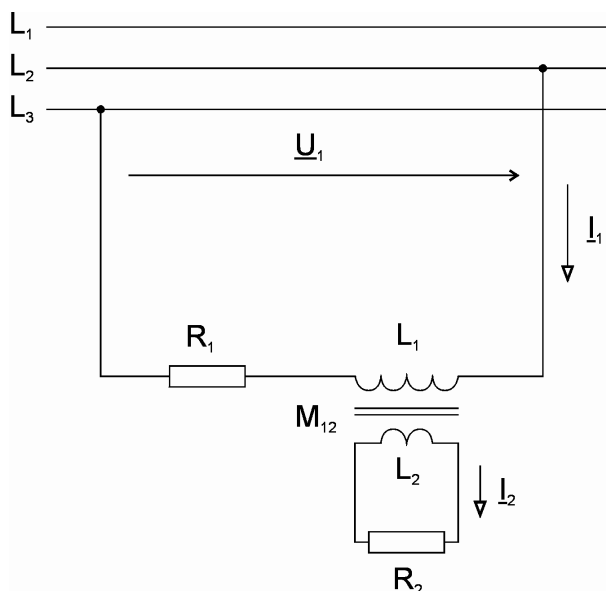
Elektrické indukční kanálkové pece se používají na tavení barevných kovů, zejména mědi a jejích slitin, hliníku a jeho slitin, případně k přehřívání litiny roztavené předtím, například v kuplovně. Při zvyšování příkonu do pece s odkrytým kanálkem se zjistilo, že při překročení jisté kritické hodnoty proudu ve vsázce nastává nežádoucí účinek, tzv. „uskřipovací jev“. Vlivem elektrodynamických sil působících v radiálních rovinách všemi směry kolmo k povrchu tekutého vodiče dojde k přerušování souvislého prstence roztaveného kovu. V tom okamžiku však skončí elektrodynamické působení, prstenec se znovu spojí a jev se opakuje. Vznikají rázy, které znemožňují řádný provoz pece. Částečně se tomuto jevu čelilo vhodnou konstrukcí pecní cívky. Ještě vhodnější se však ukázalo řešení se zakrytým kanálkem zapaštěným do dna pece. Hydrostatický tlak roztaveného kovu do značné míry zabraňuje vzniku uskřipovacího jevu. Při odlévání se v peci ponechá asi třetina vsázky, zaplňující kanálek a dno pece, aby se po zapnutí transformátoru v uzavřeném závitě mohlo vyvíjet teplo. Pec se potom naplní vsázkou, která se taví ponořením do přehřáté lázně u dna pece. U těchto pecí vzniká teplo pouze ve vsázce nalézající se v kanálku. Působením elektrodynamického tlaku je kov z kanálku plynule vytlačován do nístěje a chladnější kov z nístěje vtéká do kanálku. Tím se přenáší teplo z kanálku do celé vsázky v nístěji. Má-li kanálek svislou plochu, napomáhá intenzivnímu pronikání horkého kovu z kanálku i rozdíl teplot, protože teplejší kov je lehčí.

## □ Připojení kanálkových pecí k síti

### **Pec jednofázové**

Jednofázové pece mají zpravidla jeden kanálek. Připojují se na fázové nebo sdružené napětí sítě 3 x 400 V, 50 Hz. Jednofázové pece se vyrábí až do zdánlivého příkonu 150 kVA. V hutí je zpravidla podobných pecí větší počet a jejich prostřídáním připojením k různým fázím se zhruba vyrovnává zatížení ve všech třech fázích. Schematicky je připojení jednofázové indukční pece s jedním kanálkem vyznačeno na Obr. 7.57.

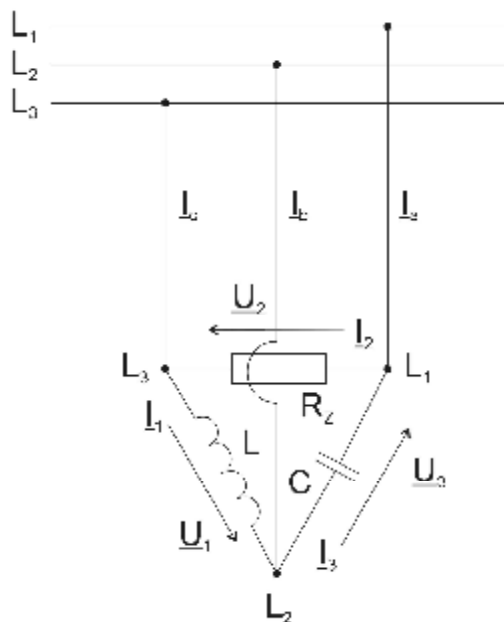




**Obr. 7.57: Připojení jednofázové indukční pece**

Symetrického zatížení trojfázové sítě vyladěnou jednofázovou pecí lze dosáhnout pomocí tzv. symetrizačního zařízení. Je to umělá zátěž, sestávající ze tří větví. V jedné větvi je odpor  $R_z$ , nahrazující vyladěnou indukční pec, ve druhé větvi je indukčnost  $L$  vhodné velikosti a ve třetí větvi je vhodně velká kapacita  $C$ . Tyto tři větve symetrizačního zařízení mohou být zapojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy. V obou případech lze dosáhnout při správném sledu fázi přesně symetrického zatížení všech tří fází při  $\cos\varphi = 1,0$ .

Na Obr. 7.58 je vyznačeno symetrizační zařízení v zapojení do trojúhelníka.



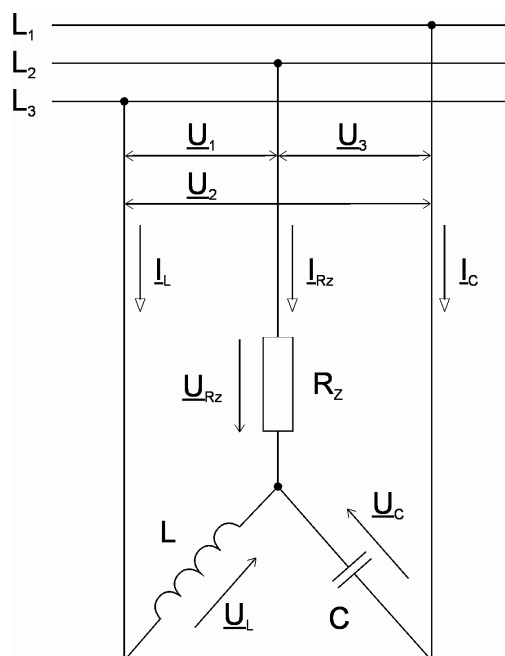
**Obr. 7.58: Symetrizační zařízení zapojené do trojúhelníka**

Pro velikost potřebné indukčnosti  $L$  a kapacity  $C$  platí:

$$L = \frac{\sqrt{3} \cdot R_Z}{\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{3} \cdot R_Z}; \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad (7.64)$$

Při montáži pece se symetrizačním zařízením se vloží do všech tří přívodů ampérmetry. Při správném sledu fází ukazují všechny ampérmetry stejnou výchylku. Při nesprávném sledu fází ukazují ampérmetry ve fázích  $a$  a  $c$  proud vyšší, než ve fázi  $b$ . Přehodíme-li mezi sebou kterékoliv dva přívody, dostaneme správný sled fází.

Zapojení symetrizačního zařízení do hvězdy je na Obr. 7.59.



**Obr. 7.59: Symetrizační zařízení zapojené do hvězdy**

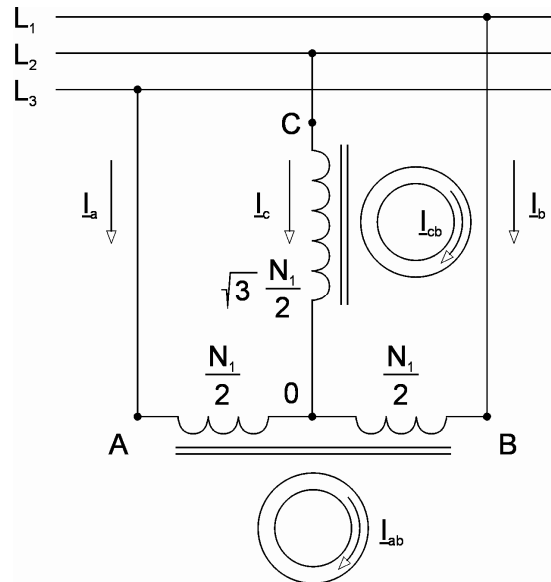
Na peci se objeví zvýšené napětí  $U_R$  rovné trojnásobku fázového napětí, což je u větších pecí výhodné. Pro velikost potřebné indukčnosti  $L$  a kapacity  $C$  platí:

$$L = \frac{R_Z}{\sqrt{3} \cdot \omega}; \quad C = \frac{\sqrt{3}}{\omega \cdot R_Z}; \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} = \sqrt{3} \cdot R_Z \quad (7.65)$$

Porovnáme-li rovnici (7.65) s rovnicí (7.64) vidíme, že při symetrizačním zapojení do hvězdy je potřebná indukčnost 3krát menší a potřebná kapacita 3krát větší než při zapojení do trojúhelníka – v obou případech vztaheno na zatěžovací odpor  $R_Z$ . Protože při zapojení do hvězdy je pro pec stejného příkonu zatěžovací odpor  $R_Z$  3krát větší (napětí na peci je  $3^{1/2}$  krát větší), jsou skutečné hodnoty  $L$  a  $C$  v obou případech přesně stejné.

### Pece dvoufázové

Jsou to indukční pece as dvěma, případně až čtyřmi kanálky, z nichž vždy dva jsou spojeny paralelně a mají pro oba kanálky společný pecní transformátor. Symetrického rozložení na všechny tři fáze sítě dosáhneme buď použitím dvou pecních transformátorů ve Scottově zapojení, nebo lze také užít zvláštního symetrizačního zapojení. Na Obr. 7.60 je pec se dvěma stejnými kanálky ve Scottově zapojení.

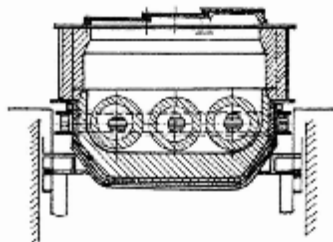


**Obr. 7.60: Scottovo zapojení dvoufázové indukční pece**

Každý z obou kanálků má svůj pecní transformátor, připojený k trojfázové síti. Mezi body A a B na Obr. 7.60 je připojen tzv. „hlavní“ transformátor, který má primární vinutí rozdělené na dvě stejné části. Počet závitů v každé části jsme označili  $N_1/2$ . Mezi třetí fází (bod C) a středem vinutí hlavního transformátoru (bod 0) je připojen „pomocný“ transformátor s počtem závitů  $3^{1/2}/2 \cdot N_1$ . Oba kanálky jsou přesně stejné. Při takovém uspořádání jsou proudy odebírané z jednotlivých fází stejné. Stejně jsou i proudy naindukované v obou kanálcích, a tedy i množství tepla, které se v nich vyvine.

### Pece třífázové

Pece třífázové se třemi, případně se šesti kanálky, z nichž vždy dva jsou paralelně připojeny na společné jádro. Tyto pece mají třífázový pecní transformátor buď v jádrovém nebo plášťovém provedení. Každé ze tří jader nese pecní cívku, kolem které je buď jeden nebo paralelně dva stejné kanálky. Všechny tři cívky jsou připojeny na síť buď v zapojení do trojúhelníka (cívky jsou na sdružené napětí), nebo do hvězdy (cívky jsou na fázové napětí). Zatížení všech tří fází je symetrické, pro zlepšení  $\cos\varphi$  je třeba připojit třífázovou kondenzátorovou baterii. Na Obr. 7.61 je třífázová pec se třemi kanálky a třífázovým transformátorem, určená k tavení barevných kovů. Tato pec symetricky zatěžuje třífázovou síť [19].



**Obr. 7.61: Třífázová pec se třemi kanálky**



## Shrnutí pojmů 7.4.

Indukční ohřev, induktor, vířivé proudy, hloubka vniku, kelímková pec, kanálková pec, symetrizační zařízení.



## Otázky 7.4.

1. Vysvětlete princip vzniku indukčního tepla.
2. Uveďte vztah pro hloubku vniku při indukčním ohřevu.
3. Uveďte základní typy indukčních pecí.
4. Jaký je rozdíl mezi indukční pecí s vodivým a nevodivým kelímkem?
5. Jak se volí kmitočet u indukčních prohřívacích zařízení?
6. K jakým technologickým účelům se používá indukční povrchový ohřev?
7. Jak dělíme indukční kanálkové pece z hlediska připojení k napájecí síti?
8. Vysvětlete podstatu symetrizace při připojení jednofázové indukční kanálkové pece na třífázovou napájecí síť.

## 7.5. Elektrické vytápění



### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce

- pochopíte problematiku tepelné pohody a tepelného stavu prostředí
- budete umět vypočítat tepelné ztráty místností
- budete schopni zvolit vhodný typ elektrického vytápění
- pochopíte význam a základní principy regulace vytápění



### VÝKLAD

#### q Problematika tepelné pohody člověka v místnosti

Hlavním úkolem vytápění je zajistit v uzavřených místnostech příznivé tepelné poměry v chladném zimním období, kdy je venkovní teplota nižší než požadovaná teplota v místnostech a kdy také ostatní povětrnostní vlivy (např. vítr) způsobují ochlazování místností. Jde o zajištění tzv. tepelné pohody.

To znamená, že musí být dosaženo takových tepelných poměrů, aby se člověk cítil příjemně. Tepelnou pohodu člověka ovlivňuje jeho zdravotní stav, stáří, druh činnosti, kterou

vykonává. Pocit dobré tepelné pohody je v podstatě dán rovnováhou tepelného režimu člověka s prostředím, ve kterém se nachází.

Důležitou složkou tepelného režimu člověka je sdílení tepla z povrchu těla do okolí, které se řídí fyzikálními zákony, a lze je proto vyjádřit matematicky. Při látkových přeměnách probíhajících v lidském těle se uvolňuje určité množství tepla, které závisí především na intenzitě fyzické námahy a na hmotnosti člověka. Toto teplo musí být odváděno do okolí. Tepelná rovnováha, tj. stav, při kterém okolí odebírá lidskému tělu tolik tepla, kolik člověk právě produkuje, je proto prvním a nezbytným předpokladem tepelné pohody.

Lidské tělo je ochlazováno vedením, prouděním, sáláním a kromě toho také vypařováním potu a dýcháním. Při malé fyzické námaze je větší část tepla z povrchu těla odváděna prouděním a sáláním – suché ochlazování těla. Dosažení tepelné rovnováhy při suchém ochlazování, bez nadměrného pocení, je druhým předpokladem tepelné pohody člověka.

Jestliže stoupne teplota okolí nad určitou hranici nebo se zvětší produkce tepla při fyzické námaze, nedostačuje suché ochlazování a pro zajištění tepelné rovnováhy se nadbytečné teplo odvádí vypařováním – mokré ochlazování těla.

Podmínku tepelné rovnováhy lze obecně vyjádřit vztahem

$$F_M = F_V + F_D + F_K + F_S \quad (7.66)$$

kde  $F_M$  je tepelný tok vyprodukovaný lidským tělem (W),  $F_V$  je tepelný tok odváděný vypařováním,  $F_D$  je tepelný tok odváděný dýcháním,  $F_K$  je tepelný tok odváděný konvekcí (prouděním),  $F_S$  je tepelný tok odváděný sáláním.

Tepelný tok konvekcí a sáláním prochází nejprve vrstvou oděvu, je jím veden, teprve na vnějším povrchu dochází k přestupu tepla do okolí. Rovnice tepelné rovnováhy pak přejde na tvar

$$F_M = F_V + F_D + F_K + F_S \quad (7.67)$$

kde  $\alpha$  je propustnost oděvu ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $S$  celková plocha povrchu těla ( $\text{m}^2$ ),  $T_h$  teplota povrchu těla (K),  $T_r$  teplota povrchu oděvu (K).

## q Tepelný stav prostředí

O tepelných pocitech člověka v uzavřených místnostech rozhoduje tedy několik faktorů stupeň fyzické námahy (vnitřní produkce tepla  $F_M$ ), tepelně izolační schopnost oděvu (tepelná propustnost  $\alpha$ ), teplota okolního vzduchu  $J_v$ , účinná teplota okolních ploch  $J_p$ , vlhkost okolního vzduchu (relativní vlhkost), rychlost proudění vzduchu.

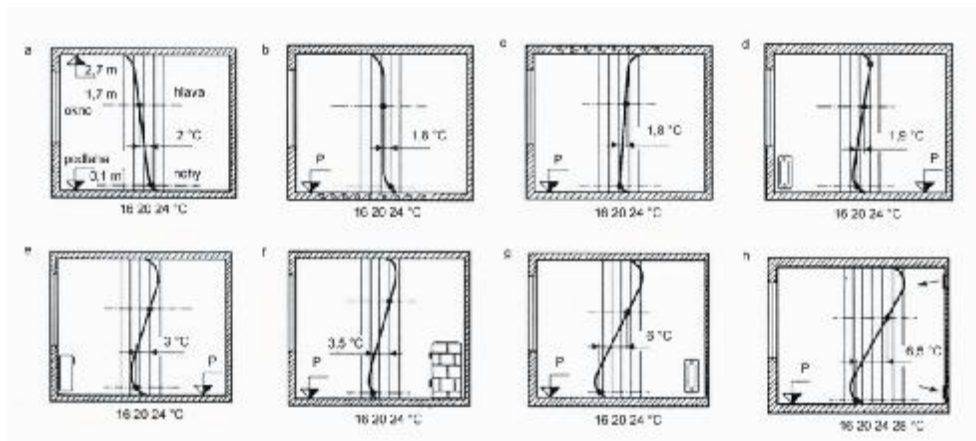
Faktory  $J_v$ ,  $J_p$ , vlhkost a rychlost proudění vzduchu charakterizují tepelný stav prostředí, který se projevuje výsledným tepelným účinkem prostředí na člověka. Většinou se ale snažíme vyjádřit tepelný stav prostředí jedinou, snadno měřitelnou veličinou.

## Teplota vzduchu v místnosti

K posouzení tepelného stavu nám poslouží především teplota vzduchu  $J_v$  měřená v oblasti pobytu člověka. Teplotu vzduchu lze považovat za uspokojivé měřítko tepelného stavu prostředí tam, kde se jedná o prostředí téměř klidného vzduchu a kde se teplota okolních ploch jen nepatrně liší od teploty vzduchu. Za těchto okolností se teplota vzduchu také shoduje s výslednou teplotou  $J_i$ .

Teplota vzduchu  $J_v$  většinou není v celé místnosti stejná, a proto je nutné posuzovat taktéž její místní změnu, nerovnoměrnost. Velice důležitá je především vertikální

nerovnoměrnost teploty vzduchu ve vytápěných místnostech, která vzniká vlivem nesteromického přívodu tepla a nesteromického ochlazování jednotlivých stěn, podlahy a stropů místností. Vertikální rozložení teplot v místnosti při různých způsobech vytápění je znázorněno na Obr. 7.62.



**Obr. 7.62: Vertikální rozložení teplot v místnosti při různých způsobech vytápění**

a-ideální vytápění, b-podlahové vytápění, c-stropní vytápění, d-teplovodní vytápění, e-konvektorové vytápění, f-lokální vytápění kachlovými kamny, g-teplovodní vytápění (radiátor na vnitřní stěně), h-teplovzdušné vytápění.

Z hlediska příjemného pocitu je rozhodující teplota dolní vrstvy vzduchu v místě nohou (ve výšce 0,1 m nad podlahou). Dále nás zajímá teplota vzduchu v úrovni hlavy (ve výšce 1,7 m nad podlahou) a následně pak rozdíl těchto dvou teplot, který má velký vliv na tepelnou pohodu v místnosti.

Ideální vytápění je takové, kdy je teplota v místě nohou přibližně 21 °C a ve výšce hlavy stojícího člověka přibližně 19 °C. Z hlediska tepelné pohody by tedy neměl být rozdíl teplot v místě hlavy a v místě nohou větší než 2,0 °C u stojícího člověka a 1,5 °C u sedícího člověka. Pro jednotlivé způsoby vytápění je příslušný teplotní rozdíl vždy na obrázku vyznačen. Z obrázku je zřejmé, že z hlediska vertikálního rozložení teplot je nejvýhodnější podlahové vytápění.

### Účinná teplota okolních ploch

Aby bylo možné posuzovat výsledný sálavý účinek okolních ploch jednou veličinou, zavádí se tzv. účinná teplota okolních ploch  $J_p$ . Tato teplota je definována jako společná teplota všech okolních ploch, při níž by celkový tepelný tok sáláním mezi povrchem těla a okolními plochami byl stejný jako ve skutečnosti. Pro účinnou teplotu okolních ploch bude v případě, kdy se teploty jednotlivých okolních ploch příliš neliší, platit vztah

$$J_p = \sum_{i=1}^n j_i \cdot J_i \quad (7.68)$$

kde  $\varphi_j$  jsou poměry osálení jednotlivých okolních ploch plochou lidského těla (-) , $J_i$  jsou teploty okolních ploch (°C).

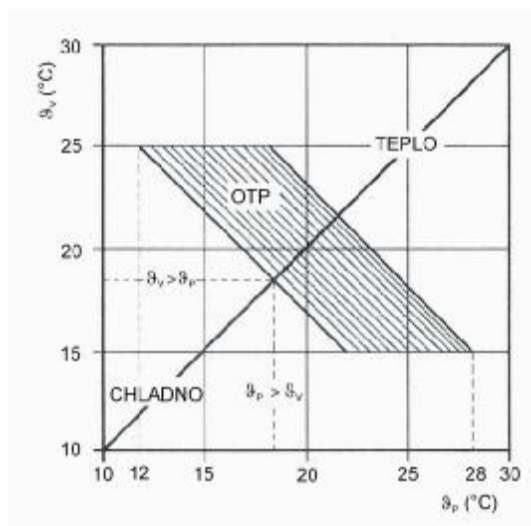
Účinná teplota tedy závisí na teplotách všech okolních ploch a na poměrech osálení, vztahených k ploše lidského těla. V praxi se však od tohoto požadavku upouští a hodnoty se vztahují k elementární kouli, bodu, umístěné obvykle uprostřed objektu.

### Výsledná teplota prostředí místnosti

Vydeme-li ze vztahu pro tepelnou rovnováhu vyjádřenou pomocí tepelných toků k povrchu těla  $S$  a využijeme-li zjednodušení pro součinitele prostupu tepla konvekcí a sáláním  $\alpha_k = \alpha_s$  (při proudění vzduchu rychlostí menší než  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), dostaneme pro výslednou teplotu prostředí, potřebnou pro zajištění tepelné pohody, rovnici ve tvaru

$$J_i = 0,5 \cdot J_v + 0,5 \cdot J_p \quad (7.69)$$

Z toho vyplývá, že tepelná pohoda člověka závisí při dané vnitřní produkci tepla a dané tepelné propustnosti oděvu pouze na teplotě vzduchu a účinné teplotě okolních ploch. Poměr obou teplot  $J_v$  a  $J_p$  však nemůže být zcela libovolný. Předpokládá-li se, že v místnostech, kde se požaduje výsledná teplota  $J_i = 18,5$  až  $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , má být teplota vzduchu  $J_v$  v mezích od  $15$  do  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , může se účinná teplota okolních ploch  $J_p$  měnit v mezích od  $12$  do  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tato „oblast tepelné pohody“ je názorně vyznačena šrafováním na Obr. 7.63 [20].



Obr. 7.63: Oblast tepelné pohody (OTP)

### q Praktický výpočet otopných zařízení

Z hlediska dimenzování otopné soustavy je zapotřebí znát maximální hodnotu tepelných ztrát budovy, tj. množství tepla, které projde z vnitřního prostředí místností o teplotě  $J_i$  do chladnějšího venkovního prostředí s teplotou  $J_e$ . Na tuto nejvyšší hodnotu v roce je nutno otopnou soustavu dimenzovat. Při výpočtu tepelných ztrát se vychází z ČSN 06 0210 výpočet tepelných ztrát budov.

Vhodnost objektu pro elektrické vytápění se posuzuje na základě vypočtených tepelných ztrát a spotřeby tepla na  $1 \text{ m}^2$  obytné plochy. Pro výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění jsou nutné tyto podklady:

- situační plán, ze kterého je zřejmá poloha budovy vzhledem ke světovým stranám, výška a vzdálenost okolních budov, nadmořská výška místa stavby a převládající směr a intenzita větru,
- půdorysy jednotlivých podlaží budovy se všemi hlavními rozměry, včetně rozměrů oken a dveří, nejméně v měřítku 1:100,
- řezy budovou s udáním všech hlavních výšek (světlá a konstrukční výška místností, výška parapetů apod.),

- údaje o materiálech a konstrukci stěn, podlah, stropů a střech pro zjištění nebo výpočet součinitele prostupu tepla,
- údaje o materiálu a konstrukci oken a dveří potřebné k výpočtu tepelné ztráty prostupem a infiltrací,
- údaje o využití jednotlivých místností pro určení vnitřní teploty  $\bullet$  i,
- popis zamýšleného způsobu vytápění jednotlivých místností.

#### q Obecný postup výpočtu tepelných ztrát

Celková tepelná ztráta místnosti  $\Phi_c$  podle ČSN 06 0210 se rovná součtu tepelné ztráty prostupem stěnami  $\Phi_p$  a tepelné ztráty větráním  $\Phi_v$  snižená o trvalé tepelné zisky  $\Phi_z$  [21]

$$F_c = F_p + F_v - F_z \quad (7.70)$$

Tepelná ztráta prostupem stěnami se určuje z tepelné (základní) ztráty připočítáním přírážek podle vztahu

$$F_p = F_o \cdot (1 + p_1 + p_2 + p_3) \quad (7.71)$$

kde  $\Phi_o$  je základní tepelná ztráta prostupem tepla (W),  $p_1$  je přírážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí (-),  $p_2$  přírážka na urychlení zátoku (-) a  $p_3$  přírážka na světovou stranu (-).

Základní tepelná ztráta  $\Phi_o$  je rovna součtu tepelných toků prostupem jednotlivými stěnami ohraničujícími vytápěnou místnost do venkovního prostředí nebo sousedních místností

$$\begin{aligned} \Phi_o &= a_1 \cdot S_1 \cdot (J_i - J_{e1}) + a_2 \cdot S_2 \cdot (J_i - J_{e2}) + \dots \\ &+ a_n \cdot S_n \cdot (J_i - J_{en}) = \sum_{j=1}^n a_j \cdot S_j \cdot (J_i - J_{ej}) \end{aligned} \quad (7.72)$$

kde  $S_j$  je plocha ochlazované stěny ( $m^2$ ),  $a_j$  je součinitel prostupu tepla ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ),  $J_i$  je výpočtová vnitřní teplota ( $^{\circ}C$ ),  $J_{ej}$  je teplota na vnější straně j-té stěny ( $^{\circ}C$ ).

Je-li u některé ze stěn teplota na vnější straně vyšší než teplota ve vytápěné místnosti, má tepelný tok touto stěnou zápornou hodnotu. V tomto případě jde o tepelný zisk  $\Phi_z$ , který zmenšuje základní tepelnou ztrátu  $\Phi_o$ .

V Tab. 7.11 jsou uvedeny hodnoty výpočtové vnitřní teploty  $J_i$  pro různé typy místností.

Druh vytápěné místnosti	Vnitřní teplota $J_i$ ( $^{\circ}C$ )
obývací místnosti, jako obývací pokoj, ložnice, pracovny, dětské pokoje	20
kuchyně	20
koupelny	24
klozety	20
předsíně, chodby	15

**Tab. 7.11: Hodnoty výpočtové vnitřní teploty  $J_i$  pro různé typy místností**



Přirážka na vyrovnání vlivu chladných stěn  $p_1$  umožňuje zvýšení teploty vnitřního vzduchu tak, aby při nižší povrchové teplotě ochlazovaných stěn  $J_p$  bylo ve vytápěné místnosti dosaženo požadované vnitřní teploty  $J_i$ , pro kterou je základní tepelná ztráta počítána. Tato přirážka závisí na průměrném součiniteli prostupu tepla všech stěn místnosti  $\alpha_c$ , který lze vyjádřit vztahem

$$a_c = \frac{F_o}{\sum S \cdot (J_i - J_e)} \quad (7.73)$$

kde  $\sum S$  je celková plocha všech konstrukcí, které ohraničují vytápěnou místnost ( $m^2$ ),  $J_e$  je výpočtová venkovní teplota pro určitou oblast daná normou ( $^{\circ}C$ ).

Přirážku na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí  $p_1$  lze pak stanovit ze vztahu  $p_1 \sim 0,15 \cdot \alpha_c$  nebo přibližně určit z Tab. 7.12.

$\alpha_c$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	do 0,1	0,1 - 0,9	0,9 - 1,5	1,5 - 2,0
$p_1$	0	0,03 - 0,12	0,15 - 0,21	0,25 - 0,30

**Tab. 7.12: Přirážka na vyrovnání vlivu chladných konstrukcí  $p_1$**

S přirážkou na urychlení zátoku  $p_2$  se v bytové výstavbě, nemocnicích apod. počítá jen v případech, kdy ani při nejnižších venkovních teplotách nelze zajistit nepřerušovaný provoz vytápění. Za normálních okolností se s přirážkou  $p_2$  nepočítá. Pro přerušovaný provoz se volí podle doby vytápění takto  $p_2 = 0,1$  při denní době vytápění delší než 16 hodin,  $p_2 = 0,2$  při denní době vytápění kratší než 16 hodin.

O výši přirážky na světovou stranu  $p_3$  rozhoduje poloha nejvíce ochlazované stavební konstrukce místnosti, při více ochlazovaných konstrukcích poloha jejich společného rohu. Hodnoty přirážky  $p_3$  udává Tab. 7.13.

Světová strana	J	JZ	Z	SZ	S	SV	V	JV
$p_3$	-0,05	0	0	0,05	0,1	0,05	0,05	0

**Tab. 7.13: Výše přirážky  $p_3$  podle světové strany**

Tepelná ztráta větráním  $\Phi_v$  vyjadřuje ztrátu tepla způsobenou přirozeným větráním infiltrací nebo při nuceném podtlakovém větrání a vypočte se, podle vztahu

$$F_v = c_v \cdot V_v \cdot (J_i - J_e) \quad (7.74)$$

kde  $c_v$  je objemová tepelná kapacita vzduchu při teplotě  $0^{\circ}C$ ,  $c_v = 1300 J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ ,  $V_v$  je objemový tok větracího vzduchu ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ).

Jak je vidět, výpočet tepelných ztrát budov podle ČSN 06 0210 je poměrně složitý. Pro předběžný odhad tepelných ztrát, při rozhodování o způsobu vytápění, vystačíme s přibližným určením tepelných ztrát dle Tab. 7.14. Tabulka udává tepelné ztráty na  $1 m^3$  vytápěného prostoru. Celková tepelná ztráta budovy je pak rovna součtu tepelných ztrát jednotlivých místností [20].

Způsob ochlazování místností	Tepelné ztráty (W)
Střední místnost (z obou stran vytápěné místnosti):	
a) nad nevytápěným sklepem a shora chráněná vytápěnou místností	34 – 47
b) nad vytápěnou místností a shora též vytápěná místnost	30 - 40
c) nad vytápěnou místností a shora ochlazovaná půdou	37 – 53
Rohová místnost s okny v obou stěnách:	
a) nad nevytápěným sklepem a shora chráněná vytápěnou místností	40 - 58
b) nad vytápěnou místností a shora chráněná vytápěnou místností	35 - 49
c) nad vytápěnou místností a shora ochlazovaná půdou	44 - 65
d) nad nevytápěným sklepem a shora ochlazovaná půdou	47 – 73
Koupelna	40 – 80
Předsíň	15 – 30
Schodiště	18 – 35
Průměrná tepelná ztráta v 1 m <sup>3</sup> vytápěného prostoru rodinného domku	35 – 60

Tab. 7.14: Přibližné určení tepelných ztrát

#### q Výpočet tepelných ztrát - Norma ČSN EN 12831

Norma [22] stanoví postup výpočtu dodávky tepla nutné pro vytápění a dosažení potřebné vnitřní teploty. Novým prvkem je započítání tepelných mostů, naopak v normě není uvažováno s žádnými tepelnými zisky. To může být problémem při výpočtu u nízkoenergetických až pasivních domů.

$$F_i = F_{T,i} + F_{v,i} \quad (7.75)$$

kde  $F_i$  je tepelná ztráta prostupem a větráním (W),  $F_{T,i}$  je navrhována tepelná ztráta prostupem konstrukcí (W),  $F_{v,i}$  je navrhována tepelná ztráta větráním (W).

#### Tepelná ztráta prostupem a tepelné mosty

Navrhována tepelná ztráta prostupem se určí podle vztahu

$$F_{T,i} = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) \cdot (J_{int,i} - J_e) \quad (7.76)$$

kde  $H_{T,ie}$  je tepelná ztráta prostupem přímo do venkovního prostředí ( $W \cdot K^{-1}$ ),  $H_{T,iue}$  je tepelná ztráta prostupem přes nevytápěný prostor ( $W \cdot K^{-1}$ ),  $H_{T,ig}$  je tepelná ztráta prostupem do zeminy ( $W \cdot K^{-1}$ ),  $H_{T,ij}$  je tepelná ztráta prostupem přes prostor vytápěný na výrazně jinou teplotu ( $W \cdot K^{-1}$ ),  $J_{int,i}$  je výpočtová vnitřní teplota ( $^{\circ}C$ ),  $J_e$  je výpočtová venkovní teplota ( $^{\circ}C$ ).

Pojem tepelný most je hlavní novinkou v nové normě a charakterizuje tepelnou ztrátu prostupující stěnou v místě styku dvou různých konstrukcí. Tepelný most je charakterizován lineárním činitelem prostupu tepla ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) a také jeho délkou (m).

$$H_{T,ie} = \sum_k S_k \cdot U_k \cdot e_k + \sum_l Y_l \cdot l_l \cdot e_l \quad (7.77)$$

kde  $S_k$  je plocha stavební části v m<sup>2</sup>,  $e_k$ ,  $e_l$  jsou korekční činitele vystavení povětrnostním vlivům (-),  $U_k$  je součinitel prostupu tepla stavební částí ve  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ,  $l_l$  je délka tepelného

mostu  $v$   $m$ ,  $\psi_i$  je činitel prostupu tepla tepelného mostu ve  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ .

### Tepelné ztráty větráním

Pro určení tepelné ztráty větráním se vychází z rovnice

$$F_{V,i} = H_{V,i} \cdot (J_{int,i} - J_e) \quad (7.78)$$

kde  $V_i$  je výměna vzduchu ve vytápěném prostoru ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ).

Pro určení  $V_i$  je důležitý zejména fakt, jestli se jedná o přirozené nebo nucené větrání. Při přirozeném větrání je dostatečná výměna vzduchu dána infiltrací obvodovým pláštěm budovy a hygienickým množstvím vzduchu, který se musí vyměnit.

$$V_{min,i} = n_{min} \cdot V_i \quad (7.79)$$

kde  $n_{min}$  je minimální intenzita výměny venkovního vzduchu za hodinu ( $h^{-1}$ ),  $V_i$  je objem vytápěné místnosti ( $m^3$ ).

Minimální intenzita výměny vzduchu je pro základní obytnou místnost 0,5 a pro koupelnu 1,5  $h^{-1}$ .

### Navrhovaný tepelný výkon

$$F_{HL,i} = F_{T,i} + F_{V,i} + F_{RH,i} \quad (7.80)$$

kde  $F_{HL,i}$  je navrhovaný tepelný výkon (W),  $F_{T,i}$  je tepelná ztráta prostupem konstrukcí (W),  $F_{V,i}$  je tepelná ztráta větráním (W),  $F_{RH,i}$  je zátopový výkon nutný při přerušovaném vytápění (W).

### Zhodnocení porovnání norem ČSN 06 0210 a ČSN EN 12831

Největší rozdíl v obou normách je tepelná ztráta přestupem konstrukcí, která se zejména odlišuje přítomností a nebo absencí tepelných mostů. Dalším prvkem, který normy rozděluje je u normy ČSN EN 12831 absence tepelných zisků ve výpočtu a to už buď trvalých (přítomnost osob) nebo proměnných (sluneční záření).

Je tedy nutné k výpočtu přistupovat velmi detailně, aby bylo zaručeno správné navržení zdroje tepla pro dodržení optimálního poměru investice k provozním nákladům, protože poddimenzováním se dosáhne úspory investic na úkor vyšších provozních nákladů a naopak.

### ¶ Výpočet topného příkonu

Pro výpočet příkonu tepelného zdroje je rozhodující zvolený způsob elektrického vytápění, režim vytápění na jmenovitou, popřípadě tlumenou teplotu, způsob nuceného větrání. Skutečný instalovaný elektrický příkon topidel smí být vyšší oproti vypočtenému celkovému příkonu maximálně:

- o 20 % pro příkon do 50 kW,
- o 10 % pro příkony vyšší než 50 kW.

Jestliže vychází vypočtený příkon elektrického topidla v intervalu první třetiny rozdílu příkonu typové řady topidla, volí se typ s nižším příkonem. Výpočet topného příkonu má svá specifika pro každý způsob elektrického vytápění. V dalším textu rozebereme způsoby

výpočtu topného příkonu zvlášť pro přímotopné, akumulární a smíšené (hybridní) elektrické topné systémy.

### Přímotopné elektrické vytápění

Příkon konvekčního nebo sálavého topidla  $P_k$  se stanoví ze vztahu

$$P_k = F_c \cdot K \quad (7.81)$$

kde  $P_k$  je příkon konvekčního nebo sálavého topidla (W),  $F_c$  je celková tepelná ztráta objektu (W),  $K$  je koeficient průběhu vytápění, volí se hodnota 1,0 pro nepřerušovaný provoz, 1,1 pro topnou přestávku do 4 hodin, 1,2 u přestávky delší než 4 hodiny, 1,4 při občasném použití.

### Akumulační elektrické vytápění

Při tomto způsobu vytápění se využívá odběr elektrické energie ve vybraných, zpravidla nočních hodinách (nabíjení od 22 do 6 hodin) a ve zdůvodněných případech ve vybraných denních hodinách (dobíjení po 2 hodinách a více). Příkon akumulárního tepelného zdroje lze stanovit z celkové denní potřeby tepla  $F_d$ , jejíž velikost závisí na celkových tepelných hodinových ztrátách  $F_c$ , požadované době vytápění na plnou teplotu  $t_v$  a době tlumeného vytápění  $t_t$ . Do doby vytápění  $t_v$  se zahrnuje i doba náběhu na požadovanou teplotu. Dimenzování elektrického příkonu je stejné pro souvislou i rozloženou nabíjecí dobu  $t_n = 8$  hodin.

Provozní režimy vytápění pro výpočet příkonu zdroje tepla se stanoví z doby plného vytápění  $t_v$  na  $J_i = 20$  °C. Akumulační vytápění se navrhuje pro provozní režim daný dobou  $t_v$  (h) kuchyně 10 h, kuchyně s jídelnou 12 h, obývací pokoje 14 h, dětské pokoje 14 h, ostatní místnosti 12 h. Dimenzování akumulárních topidel se provádí podle vztahu

$$P_a = F_d \cdot k_v \quad (7.82)$$

kde  $P_a$  je příkon akumulárního topidla (kamen) (W),  $k_v$  je součinitel provozu ( $h^{-1}$ ) viz. Tab. 7.15

Topná přestávka $t_s$ (h)	Součinitel provozu $k_v$ ( $h^{-1}$ )		
	Dynamická s ventilátorem III.	Statická s regulační klapkou II.	Statická bez regulační klapky I.
0	0,14	0,18	0,20
2	0,15	0,23	---
4	0,17	0,31	---
6	0,19	(0,50)	---
8	0,22	(1,25)	---

**Tab. 7.15: Hodnota součinitele provozu**

Denní potřeba tepla pak je

$$F_d = F_c \cdot t_v \quad (7.83)$$

Elektrické ústřední akumulární vytápění se navrhuje pro plné vytápění po 12 hodin. Zbývající denní provoz je buď tlumený, nebo přerušovaný. Celková denní potřeba tepla  $F_d$  pro teplovodní systémy se stanoví podle následujícího vzorce

$$F_d = F_{dd} + F_{dn} \quad (7.84)$$

$$F_{dd} = \frac{F_c}{h} \cdot (t_{vd} + t_{td} \cdot f) \quad (7.85)$$

$$F_{dn} = \frac{F_c}{h} \cdot (t_{vn} + t_{tn} \cdot f) \quad (7.86)$$

kde  $F_{dd}$  je potřeba tepla v denní době (Wh),  $F_{dn}$  je potřeba tepla v noční době (Wh),  $t_{vd}$  je požadovaná doba vytápění na plnou teplotu v době denní (h),  $t_{vn}$  je požadovaná doba vytápění na plnou teplotu v době noční (h),  $t_{td}$  je požadovaná doba tlumeného vytápění v době denní (h),  $t_{tn}$  je požadovaná doba tlumeného vytápění v době noční (h),  $f$  je koeficient vlivu stavební konstrukce, považuje se roven 0,3 pro těžkou, 0,4 pro středně těžkou a 0,5 pro lehkou konstrukci,  $\eta$  je účinnost topného zařízení 0,95.

Potřebný příkon se pak stanoví ze vzorce

$$P_a = \frac{F_d}{t_n} \quad (7.87)$$

### Smíšené (hybridní) elektrické vytápění

Smíšené vytápění sestává z akumulární a přímotopné části. Akumulační vytápění odebírá elektřinu nejvýše 8 hodin denně v noční době stanovené dodavatelem elektřiny. Přímotopné vytápění pracuje při nižších venkovních teplotách v denní mimošpičkové době (např. od 11 do 17 hodin).

Smíšené vytápění umožňuje připojit více elektrických vytápěcích zařízení k dosavadní rozvodné síti, neboť soudobost odběru je nižší než u čistě akumulárního vytápění. Důležité je i zmenšení rozměrů zařízení, a tím i snížení pořizovacích nákladů.

Návrh elektrického hybridního topidla se provádí zvlášť pro akumulární a zvlášť pro přímotopnou část.

$$P_h = 0,6 \cdot P_a \quad (7.88)$$

kde  $P_h$  je příkon hybridního topidla (W),  $P_a$  je příkon akumulárního topidla vypočítaný podle vztahu pro akumulární topidla a pro nabíjecí dobu  $T_n = 8$  hodin (W).

Přímotopná část hybridního topidla se stanoví podle vztahu

$$P_{ph} = 0,4 \cdot P_a \quad (7.89)$$

Příkon přímotopné části však musí krýt nejméně 90 % tepelné ztráty místnosti. Ústřední akumulární zdroj tepla pro smíšené vytápění se dimenzuje na 60 % příkonu čistě akumulárního ústředního vytápění s osmihodinovou nabíjecí dobou. Příkon přímotopné části hybridního systému musí být nejméně o 10 % vyšší, než je tepelná ztráta místnosti, a rovná se asi polovině příkonu čistě akumulárního zdroje s osmi hodinami nabíjení.

## q Elektrické vytápěcí systémy

Nerovnoměrnost denního odběru, vyplývající z běžného životního rytmu člověka, vedla ke snaze využít volné elektrárenské kapacity v době mimo špičkové zatížení soustavy. To umožnilo nejprve zavádění akumulčních spotřebičů pro vytápění nebo přípravu teplé užitkové vody, které byly zapínány pouze v noci. Další vývoj však ukázal, že pouze s akumulčním teplem by možnosti elektrizační soustavy byly brzy vyčerpány, a proto dnes elektroenergetika nabízí i přímotopné a hybridní systémy.

## q Akumulační elektrické vytápění

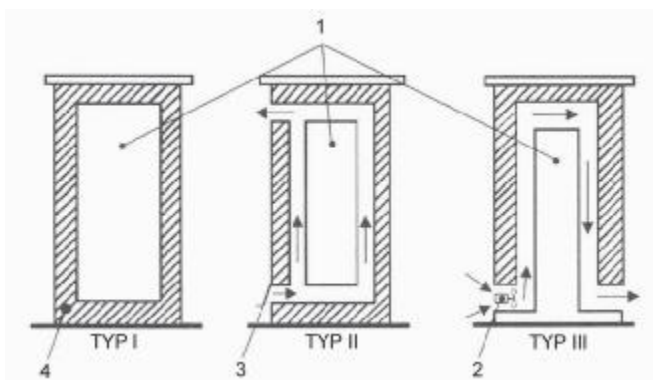
Při tomto způsobu vytápění se využívá odběr elektrické energie ve vybraných, zpravidla nočních hodinách (nabíjení od 22 do 6 hodin) a ve zdůvodněných případech ve vybraných denních hodinách (dobíjení po 2 hodinách a více).

Elektrická energie se přeměňuje na teplo v odporových topných člancích nebo kabelech, které jsou uloženy v akumulčním materiálu. Ten má tvar topidla, kotle nebo je betonovou částí stavební konstrukce, zpravidla podlahy. Vytápění vyžaduje spolehlivou znalost doby vytápění  $t_v$  na výpočtovou vnitřní teplotu  $J_i$ , do které se zahrnuje i doba tzv. náběhu na plnou teplotu a doba tlumeného vytápění  $t_t$ .

Existuje několik možných způsobů elektrického akumulčního vytápění.

### Akumulační topidla

Jako akumulční materiál se užívá zpravidla magnezit a šamot. Podle konstrukčního provedení a způsobu sdílení tepla při vytápění místností (vybíjení topidla) se rozlišují tři typy akumulčních topidel tak, jak jsou znázorněny na Obr. 7.64.



Obr. 7.64: Tři typy akumulčních topidel

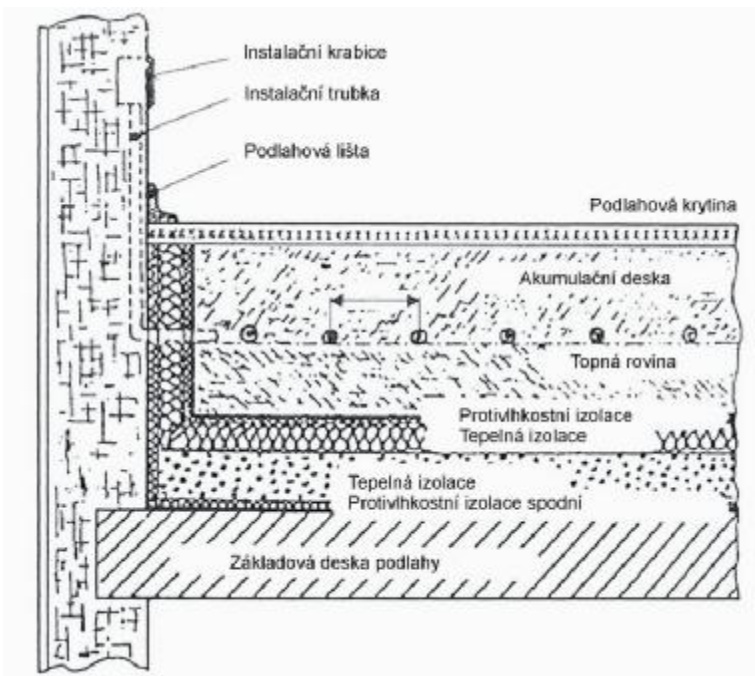
1 - akumulční látka, 2 - ventilátor, 3 - regulační klapka, 4 - tepelná izolace

Ústřední elektrické akumulční vytápění sestává z tradiční teplovodní otopné soustavy – z elektrického, zpravidla odporového zdroje tepla a z vodního akumulátoru. Teplo se z akumulátoru dopravuje do vytápěné místnosti. Potlačuje se tak základní zásada elektrického vytápění, kterou je přivedení energie až do vytápěné místnosti s maximální regulovatelností její přeměny.

Dalším možným typem akumulčního vytápění je tzv. velkoplošné podlahové akumulční vytápění. Zdrojem tepla jsou topné kabely uložené v betonové mazanině podlahové konstrukce. Povrchová teplota podlahy nemá překročit 25 °C. Podmínkou uplatnění vytápění je dlouhá životnost a její garance.

Ryze akumulční soustava elektrického podlahového vytápění, nabíjená výhradně nočním proudem po dobu 8 hodin, je vhodná především pro nové a rekonstruované objekty využívané pouze v dopoledních hodinách, maximálně časných odpoledních hodinách. Pro

celodenně vytápěné místnosti se příliš nehodí. Je charakteristická dobrou spodní tepelnou izolací (kombinace pěnového polystyrénu a minerální vláknité izolace) a zejména velkou tloušťkou akumulární desky (90 až 150 mm). Topná rovina s topnými kabely se umísťuje do spodní poloviny akumulární desky Obr. 7.65.



Obr. 7.65: Akumulační elektrické podlahové vytápění

#### q Přímotopné elektrické vytápění

Skládá se z rozvodu, z přímotopných topidel s topnými tělesy nebo elektrodami a z regulačního obvodu pro zajištění optimálního cyklu vytápění. Podle umístění zdroje tepla a způsobu sdílení tepla můžeme elektrické přímotopné systémy rozdělit takto:

##### Lokální

- konvektory a teplovzdušná topidla,
- elektrické podlahové topné kabely,
- sálavé topné systémy.

##### Centrální

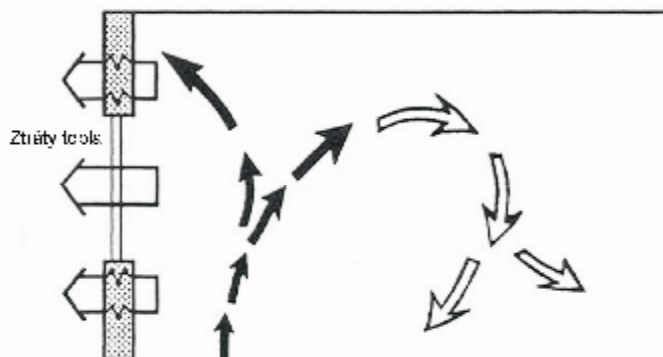
- teplovodní elektrické kotle.

#### Konvekční elektrické vytápění

Konvektory jsou elektrická topidla, která přeměňují veškerou přivedenou elektrickou energii na teplo. Spodní částí přichází do konvektoru studený vzduch z horní části odchází ohřátý vzduch, který pak přirozenou cirkulací vyhřívá celou místnost Obr. 7.66.

Konvekční topidla s přirozenou konvekcí jsou pojízdná, přenosná nebo určená k pevné instalaci na stěnu. Jsou to buď radiátory s ohřívanou náplní, zpravidla olejovou, nebo konvektory s topným odporem. Jde většinou o trubkové topné těleso z nerez oceli s nalisovanými hliníkovými lamelami, upravené pro tichý provoz. Okolní vzduch se ohřívá přirozeným prouděním kolem topného tělesa. Moderní konvektory jsou vybaveny kvalitní regulací s možností centrálního řízení jejich provozu. Konvekční topidla s nucenou konvekcí

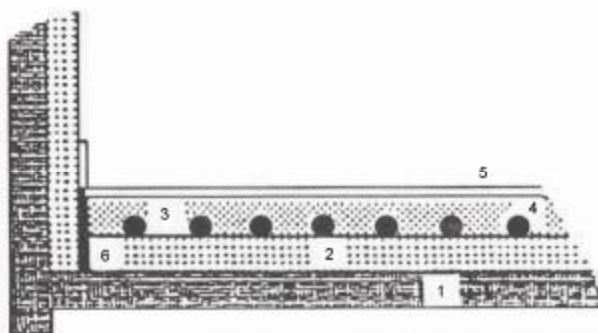
jsou přenosné nebo nástěnné přímotopné spotřebiče, ve kterých je kolem topných odporů vzduch proháněn za pomoci ventilátoru.



Obr. 7.66: Cirkulace vzduchu v místnosti

### Podlahové vytápění topnými kabely

Velkoplošné podlahové systémy, zhotovené zalitím speciálních elektrických topných kabelů do betonové podlahy jsou na Obr. 7.67, jsou oblíbené především pro vysokou účinnost, rovnoměrné rozložení tepla po celé ploše, výborné využití vytápěného prostoru, poměrně snadnou realizaci a vytvoření tepelné pohody při nižší teplotě vzduchu než např. u konvektorů.



Obr. 7.67: Podlahové vytápění topnými kabely

1-podkladový beton, 2-polystyren (asi 40 mm), 3-betonová vrstva (30-50 mm), 4-topné kabely, 5-dlažba, 6-napojení izolace

### Sálavé elektrické vytápění

Zatímco u konvekčního vytápění je tělesem ohříván především vzduch, který předává teplo při proudění po povrchu ohřívajícího předmětu, u sálavého vytápění dochází k přenosu tepla hlavně zářením Obr. 7.67. Každé těleso vyzařuje do svého okolí elektromagnetickou energii. Ze široké škály vlnových délek nás zajímají jen ty, které mohou předměty pohlít a změnit v energii tepelnou.

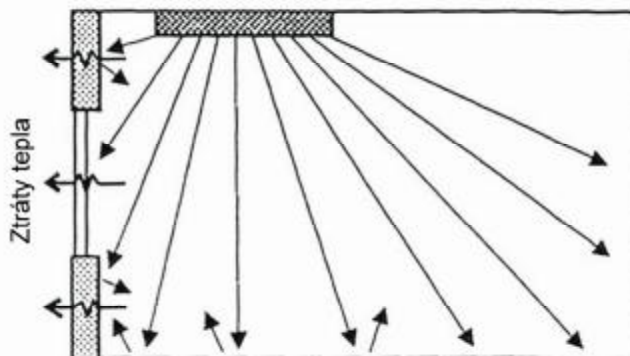
Sálavá topidla mohou být infračervené zářiče, jejichž topné těleso má povrchovou teplotu vyšší než 250 °C a sálání je usměrněno reflektorem ve stanoveném směru.

Nízkoteplotní sálavé vytápění se zabezpečuje sáláním povrchu ploch zahřátých na 25 až 40 °C. Na strop a stěny se zpravidla upevňují speciální fólie nebo panely. V takto vytápěné místnosti je nižší teplota vzduchu a vyšší relativní vlhkost než při vytápění konvekčními otopnými tělesy. Také spotřeba energie je nižší, především z důvodu vytápění na nižší



požadovanou teplotu v místnostech. Úspora energie oproti konvekčnímu vytápění se pohybuje zhruba mezi 18 až 24 %.

Použití sálavých panelů je velmi široké. Jsou určeny pro vytvoření tepelné pohody dílen o světlých výškách do 3,2 m, pro chov ušlechtilých zvířat, temperování skleníků apod. Pro vytápění bytových prostor jsou určeny panely s nižšími jmenovitými příkony.



Obr. 7.68: Sálavé elektrické vytápění

#### Vytápění pomocí teplovodních elektrokotlů

Elektrokotle je možné využít pro vytápění novostaveb, ale jsou taktéž velice vhodné jako náhrada kotlů na pevná paliva v systémech ústředního teplovodního vytápění rodinných domků a řadovek.

Teplovodní elektrokotle – topným médiem je voda, která je ohřívána v uzavřené nádobě, kotli, ze které je pak rozvedena trubkami do radiátorů či podobného zařízení v jednotlivých místnostech. Ohřev vody v kotli je zajišťován buď topnými tělesy založenými na odporovém principu, tedy klasický odporový kotel, nebo pomocí elektrod – elektrodový kotel, ve kterém teplo vzniká průchodem elektrického proudu vodou (elektrolytem) mezi elektrodami.

#### q Smíšené (hybridní) elektrické vytápění

Smíšené vytápění se skládá z akumulární a přímotopné části. Akumulární vytápění odebírá elektřinu nejvýše 8 hodin denně v noční době stanovené dodavatelem elektřiny. Přímotopná část vytápěcího systému pracuje při nižších venkovních teplotách v denní mimošpičkové době. Lze předpokládat, že v budoucích letech najde tento způsob elektrického vytápění mnohem více uživatelů, než tomu bylo doposud.

Smíšené otopné systémy mohou být navrženy takto:

- elektrické hybridní topidlo,
- kombinace ústředního akumulárního vytápění s přímotopnými topidly,
- kombinace velkoplošného podlahového akumulárního vytápění s přímotopnými topidly.

Smíšené vytápění umožňuje připojit více elektrických vytápěcích zařízení k dosavadní rozvodné síti, neboť soudobost odběru je nižší než u čistě akumulárního vytápění. Důležité je i zmenšení rozměrů zařízení, a tím i snížení pořizovacích nákladů.

Ústřední akumulární zdroj tepla pro smíšené vytápění se dimenzuje na 60 % příkonu čistě akumulárního ústředního vytápění s osmihodinovou nabíjecí dobou. Příkon přímotopné části musí být nejméně o 10 % vyšší, než je tepelná ztráta místnosti, a rovná se asi polovině příkonu čistě akumulárního zdroje s osmi hodinami nabíjení.

## q Problematika automatické regulace vytápění

Účelem automatické regulace je udržet samočinně, bez lidského zásahu na žádané hodnotě fyzikální veličinu, která podléhá změnám. Při vytápění místností je touto veličinou zpravidla vnitřní teplota v místnosti. Udržení veličiny na požadované hodnotě lze dosáhnout:

- změřením skutečné hodnoty regulované veličiny (v našem případě teploty),
- porovnáním změřené skutečné hodnoty s požadovanou (nastavenou) hodnotou,
- působením na regulovanou veličinu (teplotu nebo průtok vody) v zájmu zmenšení zjištěného rozdílu.

Pro návrh regulačního zařízení je nutno znát:

- požadavky uživatele,
- základní vlastnosti stavební konstrukce a otopné soustavy,
- platné předpisy.

Požadavky uživatele bytu se obecně vyjadřují hodnotou vnitřní teploty požadovanou v celém domku nebo bytě, popř. v jeho části nebo v jednotlivých místnostech, jejichž způsob užívání je znám. K základním vlastnostem budovy patří znalost velikostí tepelných ztrát vyjádřených tepelnou charakteristikou budovy a znalost akumulčních vlastností konstrukce.

Podle tepelných ztrát objektu se volí druh otopné soustavy. Akumulační vlastnosti ovlivní návrh otopné soustavy s ohledem na výběr regulačního zařízení tak, aby řízení teploty bylo stabilní a přesné. Vlastnosti otopné soustavy umožňují specifikovat:

- potřebný tepelný výkon otopné plochy pro krytí tepelných ztrát,
- dobu reakce otopné soustavy při změně vnitřní teploty, umožňující výběr regulačního zařízení.

Vybrané doby reakce otopné soustavy:

- litinové těleso 20 min až 1 hodina,
- ocelové těleso 10 min až 20 min,
- konvektor 5 min až 10 min,
- velkoplošná podlahová otopná plocha 2 až 5 hodin.

Ve všech otopných soustavách, s výjimkou velkoplošného vytápění, lze využít regulaci podle teplotu vnitřního vzduchu. V některých případech se výkon vytápěcí soustavy řídí podle venkovní teploty. Regulace probíhá podle předem stanovené závislosti výkonu na venkovní teplotě a není řízena hodnotou vnitřní teploty. Proto by regulace podle venkovní teploty měla být doplněna regulací podle vnitřní teploty.

## Regulační obvody

Regulační zařízení se skládá z těchto částí:

- snímač (čidlo), který měří skutečnou hodnotu regulované veličiny, zpravidla teplotu, a přeměňuje ji na takovou fyzikální veličinu (elektrický proud nebo napětí), která se v regulátoru lehce a pohodlně zpracovává,
- regulátor, ve kterém se porovnává skutečná hodnota upravované veličiny (teploty) s požadovanou nastavenou hodnotou, může být vestaven do regulační části nebo snímače,

- regulační část, která uskutečňuje regulaci (např. směšovací ventil s elektrickým pohonem nebo stykač odpínající elektrický topný spotřebič od sítě).

### Uzavřený regulační obvod

V regulačním obvodu se vyskytují tři základní proměnné veličiny: regulovaná, řídicí a poruchová. Regulovaná veličina je vnitřní teplota. Poruchové veličiny ovlivňují regulovanou veličinu (tepelné ztráty, tepelné zisky, vítr).

Regulátor vyhodnocuje skutečnou hodnotu regulované veličiny (žádané hodnoty) a hodnotu řídicí veličiny. Vzniklá regulační odchylka se zpracuje v regulátoru, který vyšle signál ovládající regulační orgán. Změna výkonu tělesa se projeví změnou vnitřní teploty vzduchu a čidlo zaregistruje změněnou teplotní hodnotu. Okruh je uzavřen.

### Uzavřený regulační obvod se zpětnou vazbou

Přidaná zpětná vazba umožňuje předvídat odpověď, a tím zrychlit působení regulace. Snímá se např. teplota přívodní otopné vody (pomocná hodnota) a zavede se do regulátoru. Tento regulační obvod se zpětnou vazbou se uplatní při individuální regulaci teploty vnitřního vzduchu. Pro byty se používají jednoduché a levné způsoby řízení vnitřní teploty prostorovým termostatem se zpětnou vazbou.

### Otevřený regulační obvod

Využívá se především u ústředního vytápění, známe-li dostatečně reakce regulovaného obvodu na změny venkovní teploty, která je hlavní poruchovou veličinou. Pomocnou veličinou je teplota otopné vody. Jde tedy o obvod, který se používá při regulaci podle venkovní teploty. Toto zjednodušení regulačního pochodu je podmíněno znalostí závislosti venkovní teploty a teploty otopné vody pro danou vnitřní teplotu v místnostech budovy. Obvod se používá při ústřední regulaci více místností v jedné budově. Změna každé poruchové veličiny (teplota, vítr, oslunění) je snímána čidlem a získaná informace je předána regulátoru. Regulátor řídí regulační část podle nastavených závislostí poruchových veličin na regulované veličině.

Celý regulační pochod probíhá podle zjištěných závislostí nastavených v regulátoru a přesnost i stabilita regulace závisí na tom, jak přesně byly závislosti stanoveny a nastaveny. Tato regulace se nazývá také regulací **ekvitermní**. Pro danou místnost lze stanovit soustavu tzv. ekvitermních křivek (také „topné křivky“), které popisují vzájemnou závislost teploty topné vody, místnosti a venkovní teploty. Na základě požadované teploty místnosti lze zvolit určitou křivku a podle venkovní teploty regulovat teplotu topné vody.

### Poznámka

V celé kapitole 1 jsou použity doslovné citace, obrázky a tabulky z literatury [23]. V této knize lze nalézt k problematice řešené v této kapitole další informace.



## Shrnutí pojmů 7.5.

Vytápění, tepelná pohoda, tepelný stav prostředí, účinná teplota okolních ploch, tepelné ztráty, přímotopné vytápění, akumulární vytápění, hybridní vytápění, regulace vytápění, ekvitermní regulace.



## Otázky 7.5.

9. Vysvětlete pojem tepelná pohoda.
10. Napište vztah pro tepelnou rovnováhu člověka.
11. Co je tepelný stav prostředí?
12. Nakreslete ideální vertikální rozložení teploty v místnosti.
13. Co je účinná teplota okolních ploch? Uveďte vztah pro výpočet.
14. Napište vztah pro výslednou teplotu prostředí místnosti.
15. Nakreslete, jak vypadá oblast tepelné pohody.
16. Uveďte vztah pro celkovou tepelnou ztrátu místnosti  $Q_c$ .
17. Uveďte základní typy elektrického vytápění.
18. Vyjmenujte možnosti přímotopného elektrického vytápění.
19. Popište možnosti regulace elektrického vytápění.
20. Co jsou ekvitermní křivky?



## DALŠÍ ZDROJE 7

- [11] Novák, P.: Elektrické teplo. Základy a teorie elektrických ohrevů a aplikací. Equilibria, s.r.o, Košice 2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [12] Baxant, P., Drápela, J., Lázničková, I.: Elektrotepelná technika. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně, Brno, 2006
- [13] Hradílek, Z.: Elektrotepelná technika. VŠB – TU Ostrava, Ostrava, 1996
- [14] Rada, J.: Elektrotepelná technika, SNTL, Praha, 1985
- [15] Novák, P.: Elektrické ohřevy, I.část - Odporový ohrev. Mercury-Smékal, Košice 2002, ISBN 80-89061-60-5
- [16] Hering, M.: Podstawy elektrotermii, Warszawa 1998. ISBN 83-204-2319-8
- [17] Hradílek, Z.; Buchta, Z.; Rusek, S.; Gavlas, J.: Elektrotepelná zařízení – INEL Praha 1997, ISBN 80-902333-2-5
- [18] Rada, J.; Hradílek, Z.; Kožený, J.; Novák, P.; Andras, J.: Elektrotepelná technika, SNTL Praha 1985
- [19] Langer, E.; Kožený, J.: Elektrotepelná zařízení indukční, Plzeň VŠSE Skripta 1982
- [20] Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení, Montanex Ostrava 2008, ISBN 978-80-7225-291-6
- [21] ČSN 060210 Výpočet tepelných ztrát budov
- [22] ČSN EN 12831 Výpočet tepelných ztrát budov
- [23] Hradílek, Z., Lázničková, I., Král, V.: Elektrotepelná technika, ČVUT Praha 2011, ISBN 978-80-01-043938-9
- [24] Metaxas, A. C.: Foundations Of Electroheat. 1996. ISBN 0-471-95644-9



## CD-ROM

- **Přímý odporový ohřev** - program pro simulaci ohřevu vsázky
- **Nepřímý odporový ohřev** - program pro simulaci ohřevu vsázky
- **Kruhový diagram** - simulace chodu elektrické obloukové pece

## 8. SVĚTELNÁ TECHNIKA

### 8.1. Základy světelné techniky



#### ČAS KE STUDIU:

4 hodiny



#### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní pojmy světelné techniky
- definovat základní kvantitativní a kvalitativní parametry světelných zdrojů
- vyřešit jednoduché příklady ze světelné techniky



#### VÝKLAD

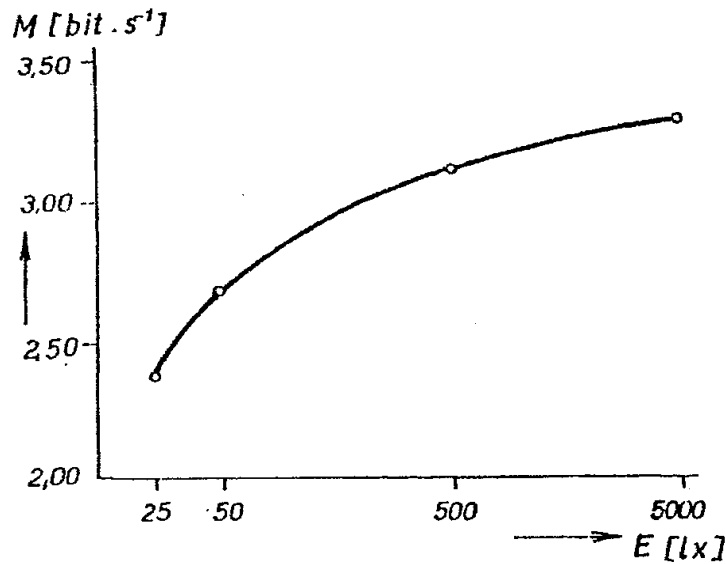
Světlo je elektromagnetické záření, které je schopno prostřednictvím zrakového orgánu vybudit zrakový vjem. Záření lze charakterizovat frekvencí nebo vlnovou délkou. Vlnové délky viditelného záření se nacházejí v rozmezí  $\lambda = 380 \div 780$  nm. Viditelné záření je část optického záření, které v kratších vlnových délkách navazuje na ultrafialové záření a na straně delších vlnových délek přechází v infračervené záření.

Vidění neboli zrakové vnímání je proces poznávání okolního prostředí. Jedná se o proces příjmu zrakové informace rozlišením rozdílu jasů (kontrastu) barev a tvarů. Na základě rozlišení dochází k identifikaci a analýze, což je poznávání předmětů a vztahů mezi nimi a zařazení do našeho vědomí, buď k okamžitému použití pro danou činnost, nebo k uložení do paměti. Cílem vidění je tedy rozpoznávání.

#### Informační výkon

Množství informace získané zrakem a přenášené do mozku člověka je možno charakterizovat informačním výkonem. Jeho velikost stoupá se zvyšujícími se osvětlenostmi a tudíž i jasy pozorovaných objektů.

Informační výkon stoupá se zvyšující se osvětleností, ale jeho nárůst je limitován maximální přenosovou kapacitou informačního kanálu. Na nárůst informačního, resp. zrakového výkonu má proto podstatně větší vliv zvýšení osvětlenosti v oblasti relativně nízkých hladin okolo 50 lx, než zvyšování poměrně vysokých osvětleností v oblasti nad 500 lx. Tyto skutečnosti je třeba mít na zřeteli při navrhování osvětlovacích soustav umělého osvětlení z pohledu maximální efektivity využití spotřebované energie. To znamená, že je nutné mít na zřeteli transformování elektrické energie na množství přenášené informace, nikoliv přímo transformaci elektrické energie na světlo. Křivka závislosti množství přenášeného výkonu totiž ukazuje, že navrhování osvětlovacích soustav na osvětlenosti vyšší než 5 000 lx má smysl pouze v odůvodněných případech (např. operační sály, atd.).



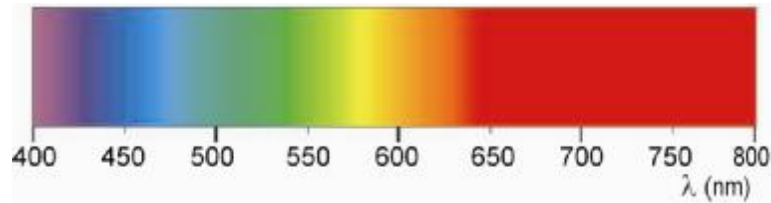
Obr. 8.1: Závislost množství přenesené informace na osvětlenosti

### Podstata světla

Světlo nezpůsobuje jen zrakový vjem, ale také barevný počitek. Barevné vlastnosti primárních světelných zdrojů se označují názvem chromatičnost nebo jsou popsány všeobecným indexem barevného podání  $R_a$ , barevné vlastnosti sekundárních světelných zdrojů se označují názvem kolorita. Záření každé vlnové délky viditelného světla budí barevný počitek. Každému barevnému počitku odpovídá určitá spektrální barva, kterou popisujeme barevným tónem. Složení viditelného světla je popsáno a znázorněno v Tab. 8.1 na Obr. 8.2 [25].

Vlnová délka $\lambda$ (nm)	Barevný tón spektrální barvy
380 ÷ 420	fialová
420 ÷ 440	modrofialová
440 ÷ 460	modrá
460 ÷ 510	modrozelená
510 ÷ 560	zelená
560 ÷ 590	žlutá
590 ÷ 650	oranžová
650 ÷ 780	červená

Tab. 8.1: Barevné tóny viditelného světla



Obr. 8.2: Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření

## q Pojmy, symboly, veličiny, jednotky

### Světelný tok

Světelný tok  $\Phi$  představuje zářivý tok  $\Phi_e$ , který je posuzován ze strany citlivosti lidského oka. Říká nám, kolik světelné energie vyzáří zdroj do svého okolí. Jednotkou světelného toku je lumen (lm). Zářivý tok představuje velikost výkonu, které záření přenáší, vysílá nebo přijímá.

### Svítivost

Svítivost je světelně technická veličina, která popisuje distribuci světelného záření do prostoru. Udává kolik světelného toku vyzáří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je kandela (cd). Kandela patří mezi základní fyzikální jednotky soustavy SI. Od roku 1979 je kandela definována jako svítivost zdroje, jenž vyzáří pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou  $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$  a frekvenci  $540\cdot 10^{12} \text{ Hz}$ . Střední hodnota svítivosti se pak určí ze světelného toku  $\Phi$  vyzářujícím v jednotkovém prostorovém úhlu  $\Omega$ .

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (8.1)$$

kde  $I$  - svítivost (cd);  $d\Phi$  - světelný tok (lm);  $\Omega$  - prostorový úhel, do kterého je světelný tok vyzářován (sr).

Svítivost se určuje pro bodový zdroj, to znamená, že zdroj má zanedbatelné rozměry a vzhledem ke vzdálenosti bodu  $r$ , ke kterému se provádí kontrolní měření.

### Osvětlenost - intenzita osvětlení

Osvětlenost, nebo také intenzita osvětlení, představuje další z odvozených fotometrických veličin. Udává hodnotu světelného toku dopadajícího na jednotkovou plochu ( $1 \text{ m}^2$ )

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (8.2)$$

kde  $E$  - osvětlenost (lx);  $\Phi$  - světelný tok (lm);  $A$  - plocha, na kterou dopadá světelný tok ( $\text{m}^2$ ).

### Světlení

Světlení je fotometrická veličina definující plošnou hustotu světelného toku  $F$ , jenž je vyzářován z plochy  $A$ . Definuje tedy velikost světelného toku vycházejícího z této plochy  $A$ .

$$M = \frac{F}{A} \quad (8.3)$$



kde  $M$  - světlení ( $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $\Phi$  - světelný tok ( $\text{lm}$ );  $A$  - plocha, na kterou dopadá světelný tok ( $\text{m}^2$ ).

### Jas

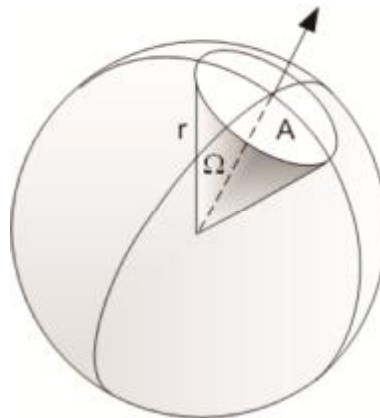
Jas se vypočítá z podílu svítivosti  $I$  a průmětu svítící plochy  $S_p$ , kterou pozorovatel vidí. Pokud plochu vidíme pod určitým úhlem, bude průmět této plochy menší než skutečná plocha.

$$L = \frac{I}{S_p} \quad (8.4)$$

kde  $L$  - jas ( $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ );  $I$  - svítivost ( $\text{cd}$ );  $S_p$  - průmět svítící plochy

### Prostorový úhel

Prostorový úhel je důležitá veličina, která se používá při výpočtech ve světelné technice. Představuje část prostoru, který je vymezen kuželovou plochou, jenž na kouli o poloměru  $r$  vytvoří plochu  $A$ . Vrchol takového kužele je ve středu koule (Obr. 8.3). Velikost prostorového úhlu, pod kterým jde ze středu koule vidět plocha  $A$ , se vypočte ze vztahu (8.5).



Obr. 8.3: Vymezení prostorového úhlu

$$W = \frac{A}{r^2} \quad (8.5)$$

kde  $\Omega$  - prostorový úhel ve steradiánech ( $\text{sr}$ );  $A$  - plocha vytvořená kuželem představující daný prostorový úhel ( $\text{m}^2$ );  $r$  - poloměr ( $\text{m}$ ).

Jednotkou prostorového úhlu je steradián ( $\text{sr}$ ). Maximální hodnotu prostorového úhlu dostaneme tak, že za  $A$  budeme uvažovat povrch celé koule ( $A = 4\cdot\pi\cdot r^2$ ,  $\Omega = 4\cdot\pi$ ).

### Měrný výkon světelných zdrojů

U elektrických světelných zdrojů ověřujeme jaká je úroveň přeměny elektrické energie na světelnou energii. Měrný výkon je dán podílem světelného toku  $\Phi$  a elektrického příkonu  $P$ . Měrný výkon tak určuje, jakou hodnotu světelného toku lze získat z jednoho wattu. Je však nutné dát pozor při výpočtu zdrojů světla, které mají předřadník, jako jsou zářivky nebo výbojky. Zatímco u zdrojů bez předřadníků (klasické žárovky) je udávaný výkon shodný s příkonem světelného zdroje. U světelných zdrojů s předřadníkem je nutno definovat měrný

příkon. Ten je roven měrnému výkonu zvětšenému o výkon spotřebovaný předřadníkem [25], [26].

$$h_p = \frac{F}{P} \quad (8.6)$$

kde  $\eta_p$  - měrný světelný výkon ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ );  $\Phi$  - světelný tok (lm);  $P$  - elektrický příkon (W).

Přehled měrných výkonů různých typů světelných zdrojů je v Tab. 8.2.

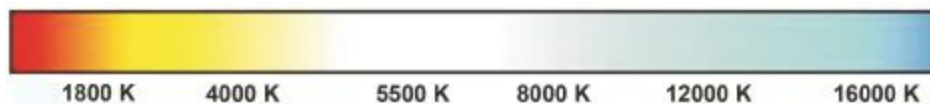
Druh světelného zdroje	Příkon (W)	Měrný výkon ( $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ )
žárovka	15 – 200	6 – 15
halogenová žárovka	10 – 2000	14 – 26
kompaktní zářivka	5 – 60	56 – 88
lineární zářivka T8	10 – 58	65 – 90
lineární zářivka T5	14 – 80	70 – 104
indukční výbojky	50 – 400	70 – 93
rtuťová výbojka	50 – 1 000	50 – 80
vysokotlaká sodíková výbojka	50 – 1 000	88 – 150
halogenidová výbojka	35 – 3 500	94 – 103
nízkotlaká sodíková výbojka	18 – 180	130 – 200
světelné diody	1 – 20	až 140
xenonová výbojka	25 - 10 000	až 95
plazmový světelný zdroj	až 250	až 85

**Tab. 8.2: Přehled měrných výkonů běžně vyráběných světelných zdrojů**

### Teplota chromatičnosti (barevná teplota)

Teplotou chromatičnosti zdroje je označována ekvivalentní teplota tzv. černého Planckova zářiče v Kelvinech (K), při které je spektrální složení záření těchto dvou zdrojů blízké. Zvýší-li se teplota absolutně černého tělesa, zvýší se podíl modré části vyzařovaného spektra a sníží se jeho červený podíl. Například žárovka se spojitým spektrem světla má teplotu chromatičnosti 2700 K, zatímco zářivka se světlem podobným dennímu má teplotu chromatičnosti 6000 K.

Tato veličina má výrazný vliv na vhodnost použití světelného zdroje pro konkrétní zrakové činnosti. Se zvyšující se teplotou chromatičnosti určitého typu světelného zdroje klesá díky křivce spektrální citlivosti lidského oka jeho světelný tok, tedy i měrný světelný výkon a naopak.



**Obr. 8.4: Teplota chromatičnosti**

### Náhradní teplota chromatičnosti $T_c$ (K)

Používáme ji k popisu barevných vlastností světla; u teplotních světelných zdrojů (žárovek) odpovídá teplotě vlákna, u výbojových světelných zdrojů se používá pojem náhradní teplota chromatičnosti, která odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jaký má daný výbojový světelný zdroj. Přehled teplot chromatičnosti pro různé typy světelných zdrojů je v Tab. 8.3.

Druh světelného zdroje	$T_c$ (K)
zářivka studené denní světlo	6 500 a více
zářivka denní světlo	5 400
jasná obloha	6 500
slunce v létě v poledne	5 500
zářivka studená bílá	4 000
slunce při západu	3 500 ÷ 4 000
žárovka, zářivka teple bílá	2 700
plamen svíčky	1 800

**Tab. 8.3: Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti různých zdrojů světla**

U světelných zdrojů rozlišujeme tři základní kategorie barvy světla v závislosti na teplotě chromatičnosti:

- teple bílá < 3 300 K,
- bílá 3 300 ÷ 5 000 K,
- denní > 5 000 K.

I když světelné zdroje mohou mít stejnou barvu světla, mohou vykazovat rozdílné podání barev, které závisí na spektrálním složení světla těchto zdrojů. Tyto vlastnosti popisujeme pomocí indexu podání barev.

#### Všeobecný index podání barev $R_a$ (-)

Každý světelný zdroj by měl podávat svým světelným tokem barvy okolí věrohodně, jak je známe u přirozeného světla nebo od světla žárovek.

Měřítkem pro tuto vlastnost se stává všeobecný index podání barev  $R_a$  daný rozsahem 100 ÷ 0. Index podání barev 100 mají takové světelné zdroje, které zobrazují barvy věrně, to znamená stejně jako světlo denní. Index podání barev 0 mají naopak světelné zdroje, které vyzařují veškerý světelný tok na jedné vlnové délce, tudíž nemůže docházet k rozeznání barev, protože tyto barvy nejsou ve spektru obsaženy. Například pro pracoviště ve vnitřních prostorách s trvalým pobytem osob je předepsán index podání barev vyšší než 80. Obecně platí, že u konkrétních typů světelných zdrojů má zvyšující se index podání barev vliv na snížení světelného toku a tedy měrného světelného výkonu.

#### Životnost světelného zdroje (h)

Životnost světelných zdrojů je velmi důležitým parametrem, který nám říká, jak dlouho vydrží daný světelný zdroj hospodárně svítit. U žárovek je přítom životnost daná mezním stavem – přepálením vlákna. U jiných zdrojů, např. výbojových nebo LED, však s takovou definicí nevystačíme. Během funkčního života zářivky, výbojky nebo LED dochází zákonitě k poklesu světelného toku. Po určitém čase, i když ještě daný zdroj funguje, svítí neekonomicky a vyžaduje výměnu. Rozlišujeme tedy proto dvě definice životnosti:

- Průměrná životnost – průměr životností jednotlivých světelných zdrojů osvětlovací soustavy provozované za předem stanovených podmínek. Doba je daná časem, za který bude svítit přesně polovina ze sledovaného počtu světelných zdrojů, tedy míra výpadků dosáhne 50 %. Během trvání postupně dochází k úbytku funkčních světelných zdrojů, což vyjadřuje křivka mortality (úmrtnosti).
- Užitečná (ekonomická) životnost se definuje vzhledem k postupnému poklesu světelného toku zdrojů během života. Konec užitečného života se dosáhne tehdy,

když světelný tok zdroje bude na úrovni 80 % počáteční hodnoty světelného toku (pro LED se často uvažuje 70 %).

Druh světelného zdroje	Průměrná životnost (h)	Užitečná životnost (h)
obyčejné žárovky	1 000	1 000
halogenové žárovky	2 000 – 3 000	2 000 – 3 000
kompaktní zářivky	15 000	6 000 – 15 000
lineární zářivky	20 000	10 000 – 18 000
vysokotlaké rtuťové výbojky	16 000 – 24 000	10 000 – 20 000
vysokotlaké sodíkové	32 000	20 000
nízkotlaké sodíkové	16 000	16 000
halogenidové výbojky	10 000	4 000
indukční výbojky	60 000	20 000
výkonové LED	50 000 – 100 000	25 000 – 50 000
plazmové světelné zdroje	50 000	50 000
xenonové výbojky	1 000 – 3 000	1 000 – 3 000

Tab. 8.4: Orientační životnosti pro různé typy světelných zdrojů

#### q Světelně technické vlastnosti látek

Světelný tok  $F$ , který dopadá na povrch nějakého tělesa, se od tohoto povrchu částečně odrazí  $F_p$ , částečně projde  $F_\tau$  a část tohoto toku je tělesem pohlcena  $F_a$ . Činitelé odrazu  $r$ , propustnosti  $t$  a pohlcení  $a$  jsou dané vztahy:

$$r = \frac{F_p}{F} \quad (8.7)$$

$$t = \frac{F_\tau}{F} \quad (8.8)$$

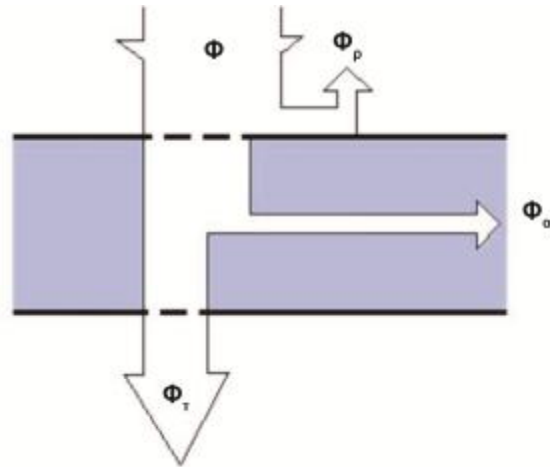
$$a = \frac{F_a}{F} \quad (8.9)$$

Mezi těmito činiteli platí vzájemná souvislost, kterou lze chápat jako zákon o zachování energie (rovnice (8.10), Obr. 8.5).

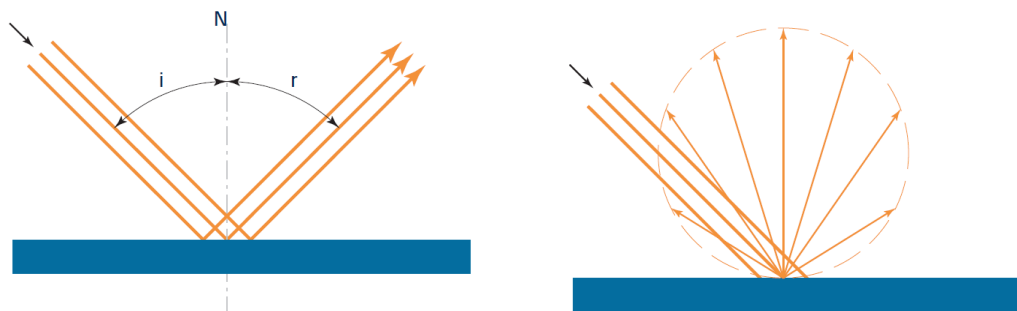
$$r + t + a = 1 \quad (8.10)$$

Rozložení světelného toku odraženého od povrchu určité látky může mít různý charakter. Nejjednodušším případem je tzv. **zrcadlový odraz**, kdy se světelné paprsky od daného povrchu odrážejí pod stejným úhlem, pod kterým na povrch dopadly. Další jednoduchý případ je, když se rozdělí světelný tok odražený od určitého elementu povrchu tak, že jas tohoto elementu uvažované plochy je ve všech směrech stejný. Jde o rovnoměrně rozptýlný neboli **difúzní odraz**. Svítivost takového ideálního rozptylovače je maximální v kolmém směru. Pod jinými úhly se svítivost vypočítá podle kosinového zákona.

$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos g \quad (8.11)$$



**Obr. 8.5: Rozdělení světelného toku v závislosti na činitelích odrazu, prostupu a pohlcení**



**Obr. 8.6: Vlevo ideální (zrcadlový) odraz a vpravo difúzní odraz (Lambertův zářič) [27]**

U difúzních povrchů je důležitá souvislost mezi jejich osvětleností  $E$ , jasem  $L$  a odrazností povrchu  $r$ :

$$p \cdot L = r \cdot E \quad (8.12)$$

Zkoumáme-li prostup světla určitým materiálem, zjišťujeme, že u některých látek čirých nebo dokonale průhledných (např. optická skla, tenké vrstvy vody apod.) dochází k přímému prostupu, kdy látkou prošlé paprsky vycházejí v původním, i když rovnoběžně posunutém směru. Mnohé látky však jimi prošlý světelný tok částečně nebo úplně rozptylují. V případě ideálního rovnoměrně rozptylného prostupu světelných paprsků se rozložení svítivosti řídí také kosinovým zákonem. To znamená, že světelně-technické vlastnosti takového povrchu jsou pak stejné jako vlastnosti povrchu difúzně odrážejícího.

Prakticky ovšem neexistují ani ideální zrcadla, ani ideální rozptylovače. Zrcadla v různém stupni také světlo poněkud rozptylují a naopak matné, mdlé či drsné povrchy používané k rozptýlení světla vykazují určitý zrcadlový účinek.

Odravné a propustné vlastnosti látek mají výrazný vliv na celkový příkon osvětlovacích soustav a to zejména u malých vnitřních prostor, kde vlivem odraznosti povrchů, dochází na základě mnohonásobných odrazů ke zvýšení osvětlenosti na srovnávací rovině.



## Shrnutí pojmů 8.1.

Svítivost, světelný tok, osvětlenost, světlení, jas, prostorový úhel, teplota chromatičnosti, všeobecný index podání barev, životnost světelného zdroje, zrcadlový odraz, difúzní odraz.



## Otázky 8.1.

1. Nakreslete závislost informačního výkonu na osvětlenosti.
2. Jak je definována kandela? Čeho je to jednotka?
3. Jak se vypočte světelný tok, jas?
4. Napište vztahy pro výpočet osvětlenosti a světlení.
5. Co je měrný světelný výkon, jakou má jednotku?
6. Co je prostorový úhel?
7. Vysvětlete pojem teplota chromatičnosti.
8. Co je index podání barev?
9. Vysvětlete pojem životnost světelného zdroje.
10. Vysvětlete, co je zrcadlový odraz a difúzní odraz.

## 8.2. Parametry a vlastnosti svítidel a světelných zdrojů



### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



### CÍL:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní parametry a vlastnosti svítidel
- definovat základní parametry a vlastnosti světelných zdrojů



### VÝKLAD

#### q Svítidla

Svítidla jsou zařízení, která rozdělují, filtrují nebo mění světlo vyzařované jedním nebo více světelnými zdroji a obsahují kromě světelných zdrojů samotných všechny díly nutné pro upevnění a ochranu zdrojů a v případě potřeby pomocné obvody, včetně prostředků pro jejich připojení k síti.

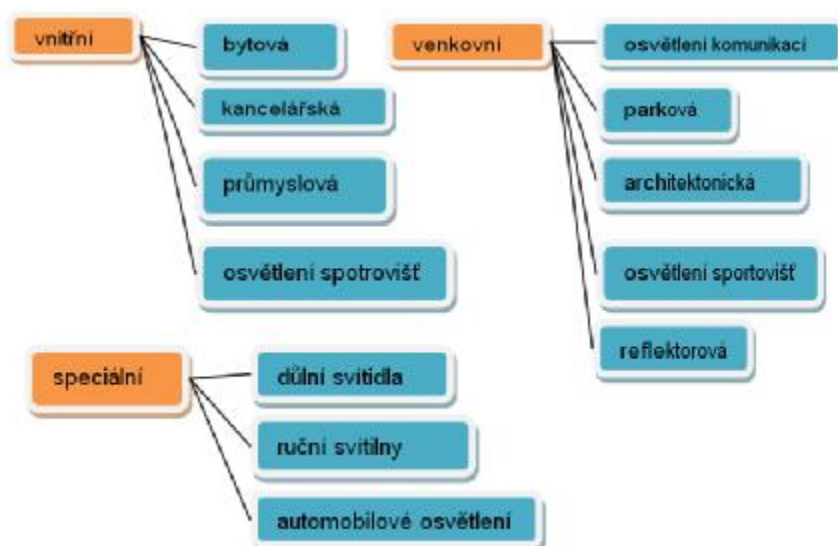
Světelně činné části svítidel slouží ke změně rozložení, usměrnění nebo rozptýlení světelného toku zdrojů, omezení oslnění - omezení jasu svítidla v úhlu, pod kterým může být svítidlo vnímáno pozorovatelem a filtraci – odstranění nežádoucí části spektra vyzařovaného světelným zdrojem.

Konstrukční části svítidla slouží k upevnění zdroje, k upevnění světelně činných částí, k ochraně zdrojů i světelně činných částí před vniknutím cizích předmětů a vody. Svítidla musí splňovat podmínky jednoduché a snadné montáže, jednoduché údržby, dlouhé životnosti a spolehlivosti a z hlediska teploty nesmí být nebezpečná pro své okolí.

### q Druhy a třídění svítidel

Svítidla můžeme třídít podle různých hledisek, např. podle:

- použití a určení - Obr. 8.7,
- typu montáže - Obr. 8.8,
- rozložení světelného toku - Tab. 8.5, Obr. 8.9.



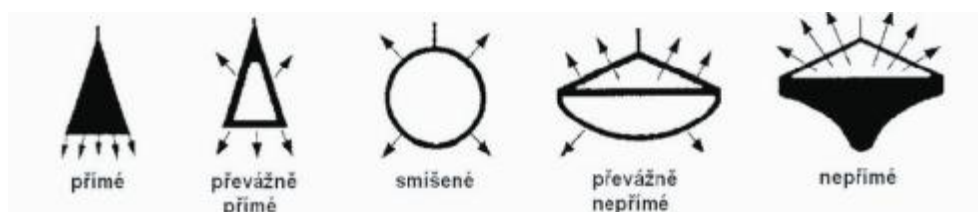
Obr. 8.7: Základní dělení svítidel podle použití a určení



Obr. 8.8: Dělení svítidel podle typu montáže

Třída rozložení světelného toku	Název	$\Phi_{\text{přímý}} / \Phi_{\text{celkový}}$
I	přímé	80 – 100 %
II	převážně přímé	60 – 80 %
III	smíšené	40 – 60 %
IV	převážně nepřímé	20 – 40 %
V	nepřímé	0 – 20 %

Tab. 8.5: Klasifikace svítidel podle rozložení světelného toku



Obr. 8.9: Piktogramy rozložení světelného toku

## q Základní parametry svítidel

### Světelný tok svítidla

Světelný tok svítidla  $\Phi_{SV}$ , který je svítidlem opticky upraven, je dán rozdílem světelného toku všech světelných zdrojů  $\Phi_Z$  umístěných ve svítidle a světelného toku ztraceného  $\Phi_{ZTR}$ , který se ztratil při optickém zpracování.

### Účinnost svítidla

Účinnost svítidla  $h_{SV}$  charakterizuje hospodárnost svítidla a její hodnota je dána poměrem světelného toku svítidla  $\Phi_{SV}$  ke světelnému toku světelných zdrojů  $\Phi_Z$  podle vztahu

$$h_{SV} = \frac{F_{SV}}{F_Z} \quad (8.13)$$

Maximální účinnost by měl z tohoto hlediska mít holý světelný zdroj v objímce. Ten však není možné použít s ohledem na oslnění, nevhodné směřování vyzařovaného světelného toku a nedostatečnou ochranu před vlivy okolí a nebezpečným dotykem. Z hlediska maximálního využití dodávané elektrické energie je třeba dosahovat vysokých hodnot této veličiny. U běžných svítidel se pohybuje účinnost v rozmezí od 0,5 do 0,8. U LED svítidel a vysoce kvalitních světlometů i přes 0,95.

### Jas svítidla

Jas svítidla je definován jako podíl svítivosti v daném směru a velikosti průmětu svítící plochy do roviny kolmé k uvažovanému směru.

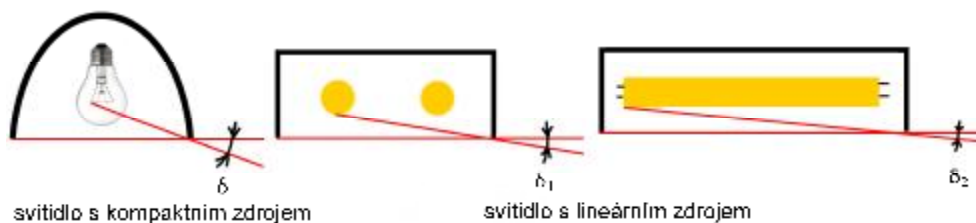
$$L_g = \frac{I_\gamma}{A \cdot \cos g} \quad (8.14)$$

kde  $L_g$  - svítivost svazku světelných paprsků (svítící plochy) (cd);  $A$  - velikost svítící plochy viditelné pozorovatelem ( $m^2$ );  $g$  - úhel, o který je viděná plocha natočena od kolmice k ose pohledu.

### Úhel clonění

Úhel clonění  $\delta$  udává míru zaclonění světelného zdroje svítidlem. Je to nejmenší ostrý úhel mezi vodorovnou rovinou a přímkou spojující okraj svítidla se světelným zdrojem. U čiré žárovky je to její vlákno, u opálové zářivky nebo výbojky je to povrch baňky.




**Obr. 8.10: Úhel clonění u svítidla**

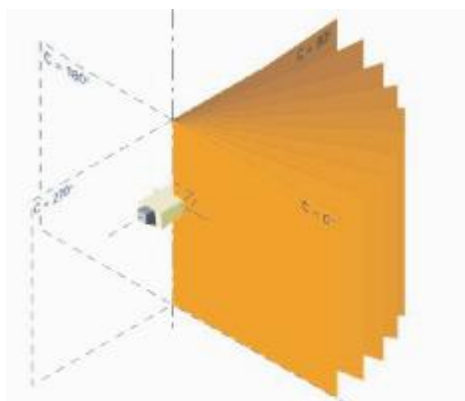
### Křivky svítivosti

Svítivost představuje velikost světelného toku  $F$  vyzářeného do daného orientovaného prostorového úhlu  $W$ . Když je tento úhel velmi malý, mluvíme o svítivosti „v daném směru“. Pro svítidla se udávají křivky svítivosti, což jsou grafy svítivosti v jednotlivých směrech. Svítivost se vypočítá podle vztahu

$$I = \frac{F}{W} \quad (8.15)$$




Křivky svítivosti se dají najít v katalogových listech svítidel a poskytují názornou představu o způsobu šíření světelného toku v prostoru. Z křivek svítivosti lze vyčíst např. úhel clonění, směr maximální svítivosti apod.

Svítivosti se udávají nejčastěji pomocí fotometrického systému C-γ. U svítidel s rotačně symetrickou plochou svítivosti postačí křivka v jedné fotometrické rovině. U zářivkových svítidel se zpravidla udávají dvě křivky, a to v rovinách  $C_0$  a  $C_{90}$ . U venkovních svítidel se z důvodů zábrany oslnění předepisují pro dané stupně oslnění maximální hodnoty svítivosti, a to pro určité směry ve vybraných rovinách v soustavě C-γ. Rozložení svítivosti daného svítidla lze též znázornit pomocí izokandelového diagramu.


**Obr. 8.11: Soustava měřících rovin C-γ (systém A-α, B-β)**

### Třídy ochrany svítidel

Z hlediska elektrické bezpečnosti jsou svítidla klasifikována do následujících tří tříd podle Tab. 8.6.

Třída ochrany I	Označení místa připojení ochranného vodiče ke svorce  , používá se u všech kovových svítidel na nízké napětí
Třída ochrany II	Označení  , ochrana dvojitou nebo zesílenou izolací. Používá se nejen u celoplastových svítidel.
Třída ochrany III	Označení  . Připojení pouze k SELV nebo PELV zdrojům, typicky halogenové žárovky na napětí 12V nebo LED.

**Tab. 8.6: Třídy ochrany svítidel**

#### q Konstrukční prvky svítidel

Konstrukční prvky a materiály používané pro všechny druhy svítidel mají kromě svých vlastních funkcí splňovat ještě další požadavky:

- světelnou stálost,
- teplotní stálost,
- odolnost proti korozi,
- mechanickou pevnost.

**Světelná stálost** je důležitou veličinou, která určuje u mnoha materiálů jejich život. Stálým působením světelného a ultrafialového záření, zesíleného teplem a vlhkostí, dochází k trvalým změnám, např. žloutnutí, vybělení, zkřehnutí, tvoření trhlin nebo praskání.

**Teplotní stálost** konstrukčních prvků má zvláštní význam, protože provozní teploty na svítidle dosahují často hodnot na hranicích přípustnosti. Pokud jsou tyto hodnoty překročeny, dochází k trvalým změnám, např. k deformaci, zkřehnutí, zuhelnění a praskání - tvoření trhlin.

**Odolnost kovů proti korozi** musí být zajištěna účelnou povrchovou ochranou, která také ovlivňuje vzhled a světelně-technické vlastnosti materiálu. Aby bylo vyhověno přípustným podmínkám použití, požadovaným světelně-technickým parametrům a estetickým požadavkům, používají se následující povrchové úpravy: lakování, poniklování, pochromování, emailování, pozinkování, kadmiování, nanášení umělých hmot, leštění a eloxování. U plastů je odolnost proti korozi zaručena a proto nevyžadují dodatečná opatření.

**Mechanická pevnost** je mírou stability konstrukčních prvků, především u plastů a křemenných skel. Vlivem záření, tepla, chladu a vlhkosti se může změnit mechanická pevnost a tím i spolehlivost svítidla.

Konstrukční prvky se dělí na tři skupiny:

- světelně-technické (světelně činné),
- elektrotechnické,
- mechanické.

K používaným odrazovým materiálům světelně činných částí se používají:

- skleněná zrcadla,
- lakované povrchové plochy,
- opálová světlo rozptylující skla,
- plasty nebo tkaniny.

Pro propustné materiály ve světelně činných částech svítidel se používají:

- křemenné sklo (čiré sklo, katedrálové sklo, opálové sklo, matované sklo, refraktorové sklo),
- světlo propouštějící plasty,
- světlo propouštějící tkaniny.

**Světelně činné části** slouží k usměrnění světelného toku jdoucího ze svítidla, tedy k úpravě křivky svítivosti, omezení oslnění a filtraci světelného toku. Na kvalitě optického systému rozhodujícím způsobem závisí parametry celého svítidla, zejména jeho účinnost.

**Elektrotechnické části** svítidel slouží k připojení, upevnění a provozu světelných zdrojů a svítidel. Patří sem: objímky žárovek, vypínače, zásuvky a vidlice, vnitřní vedení vodiče, vnější vedení, připojovací a propojovací svorky, svítidlové krabice, předřadné přístroje, zapalovače a kondenzátory. Jednotlivé části musí odpovídat použitým světelným zdrojům. Použitím jiných světelných zdrojů se mění i připojovací podmínky.

**Mechanické části** svítidel slouží jako ochranné nebo nosné části světelných zdrojů a světelně-technických a elektrotechnických konstrukčních prvků. Podstatné konstrukční díly svítidel, které se počítají k mechanickým konstrukčním prvkům, jsou: ochranná skla, ochranná mříž, nosná konstrukce, zaostřovací zařízení, závěsy, upevňovací části, vidlice, klouby a stojany pro svítidla pro místní osvětlení. Protože jednotlivé díly mají velmi rozdílný význam a jsou různě zatíženy, najdou zde použití různé materiály. Svítidla musí mít potřebnou mechanickou pevnost a musí být odolná vůči korozi, vyhovět předepsaným oteplovacím zkouškám a být elektromagneticky slučitelná.

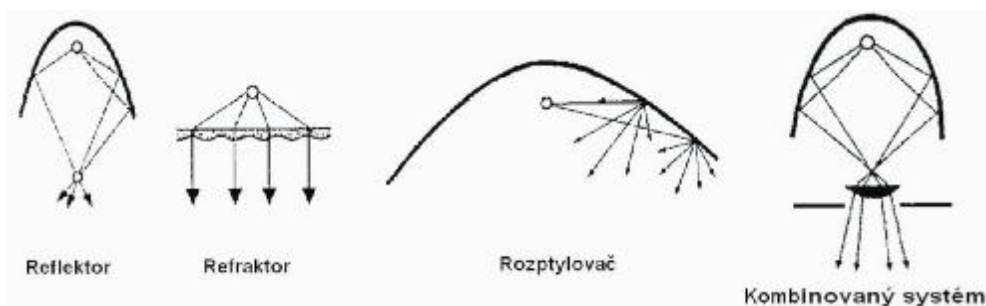
#### Možnosti zvyšování účinnosti svítidel

Účinnost svítidel lze zvyšovat dvěma způsoby:

- zvyšováním účinnosti optických částí,
- snižováním ztrát v elektrických částech.

#### Základní principy usměrnění světelného toku

U většiny svítidel se k usměrnění světelného toku světelných zdrojů používají principy podle Obr. 8.12.



Obr. 8.12: Základní typy světelně aktivních ploch

**Reflektor** mění rozložení světelného toku pomocí převážně zrcadlových odrazů. Pro výrobu reflektorů se používají slitiny hliníku potažené kovy s příměsí stříbra se zrcadlovou povrchovou úpravou. Takovéto reflektory jsou z hlediska dosažení špičkových parametrů svítidel nejlepší volbou protože dosahují účinnosti až 95 %.

**Refraktor** mění rozložení světelného toku podle optického zákona lomu. Refraktory svítidel se vyrábějí nejčastěji ze skla, PMMA (polymetalakrylát), polystyrenu nebo jiných plastů.

**Difuzor (rozptylovač)** rozptyluje světelný tok odrazem nebo prostupem a vyzařuje světelný tok jako rovnoměrně rozptylná plocha; rozlišujeme difuzory s rozptylným odrazem a s rozptylným prostupem.

## q Světelné zdroje

Světelné zdroje jsou základním prvkem osvětlovacích soustav. Z umělých zdrojů světla mají největší význam zdroje napájené elektrickou energií, tedy elektrické světelné zdroje. Na správné volbě světelného zdroje z velké části závisí jak kvalitní a hospodárná bude celá osvětlovací soustava.

Parametry světelných zdrojů lze rozdělit na **kvantitativní** a **kvalitativní**:

- K základním kvantitativním parametrům, které popisují vlastnosti světelných zdrojů, patří světelný tok, příkon a měrný výkon, viz. kapitola 8.1. Kromě nich jsou však důležité i geometrické rozměry, druh použité patice, dovolená provozní poloha světelného zdroje, napětí, provozní teplota zdroje atd.
- Kvalita světelných zdrojů se posuzuje podle životnosti, náhradní teploty chromatičnosti, indexu podání barev a stálosti světelně technických parametrů.

Mezi důležité vlastnosti patří také geometrické rozměry, tvar, hmotnost, distribuce a možnost úpravy světelného toku. Samostatnou kapitolu pak tvoří pořizovací a provozní náklady.

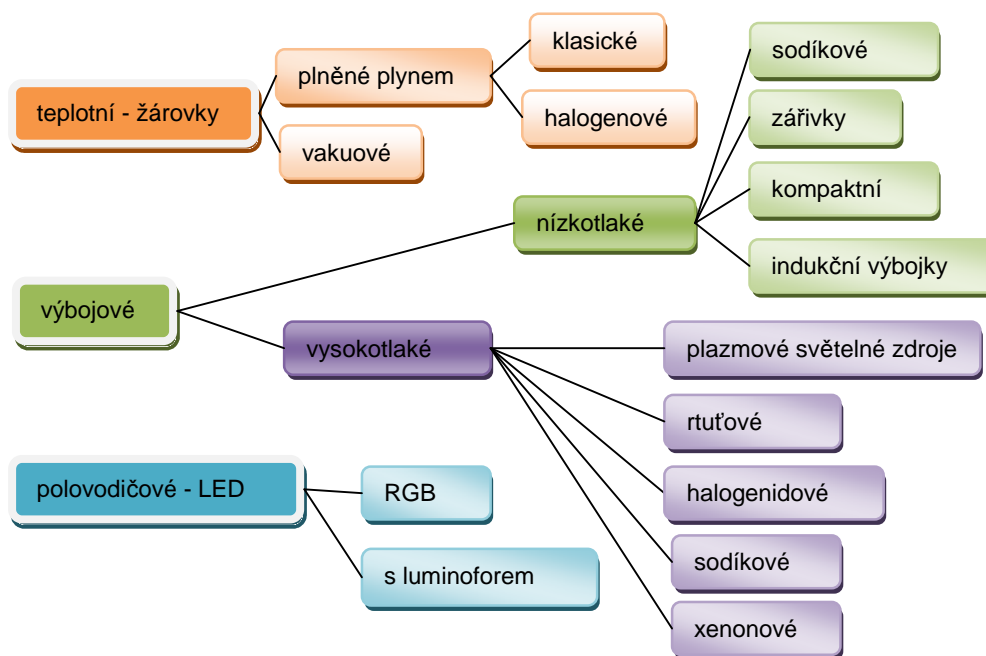
**Stálost světelně technických parametrů** souvisí s provozními vlastnostmi světelných zdrojů. Jedná se o časovou závislost, kterou lze definovat jako rychlou nebo pomalou:

**Rychlými změnami** se rozumí změny parametrů např. světelného toku v závislosti na napájecím napětí o frekvenci 50 Hz. Světelný tok kolísá s dvojnásobnou frekvencí a hloubka kolísání záleží na setrvačných vlastnostech světelného zdroje. Tento jev může vyvolat stroboskopický efekt, který se stává nebezpečnou záležitostí v některých provozech, zejména v provozech s točivými stroji. Mezi další rychlé změny patří také změny světelného toku v závislosti na kolísání efektivní hodnoty napětí. Toto kolísání je způsobeno provozem některých spotřebičů jako jsou např. elektrické obloukové pece. Rušivě ovlivňuje zřakový vjem zejména kolísání světelného toku v oblasti frekvencí 8 – 12 Hz. Na kolísání napětí jsou nejcitlivější žárovky. Mezi rychlé změny se také počítají změny parametrů v souvislosti s náběhem světelného zdroje po zapnutí k napájecí síti. Žárovky nabíhají téměř okamžitě, zatímco parametry výbojových světelných zdrojů se ustalují až po několika minutách.

**Pomalými změnami** se rozumí závislost parametrů světelných zdrojů na statických změnách napětí, což se vyjadřuje pomocí křížových charakteristik. Mezi pomalé změny patří rovněž změny parametrů způsobené stárnutím světelných zdrojů. Během jejich doby života světelný tok klesá. Například u žárovek se sníží po 1000 hod. provozu světelný tok na 90 %. U výbojových zdrojů se požaduje, aby po uplynutí doby života nepoklesl jejich světelný tok pod 70 % jmenovité hodnoty.

Všeobecně můžeme elektrické světelné zdroje rozdělit do tří základních skupin (Obr. 8.13), a to na:

- teplotní (žárovky a halogenové žárovky),
- výbojové (zářivky či výbojky),
- světelné diody (LED).



Obr. 8.13: Elektrické světelné zdroje

V **teplotních světelných zdrojích** dochází průchodem elektrického proudu k zahřátí vodivé látky (kovu) na vysokou teplotu a tato látka vysílá v důsledku tepelného pohybu optické záření.

**Výbojové světelné zdroje** jsou založené na principu elektrických výbojů v plynech a parách různých kovů a využívají přeměnu elektrické energie na kinetickou energii elektronů, která se při srážkách s atomy plynů mění na optické záření.

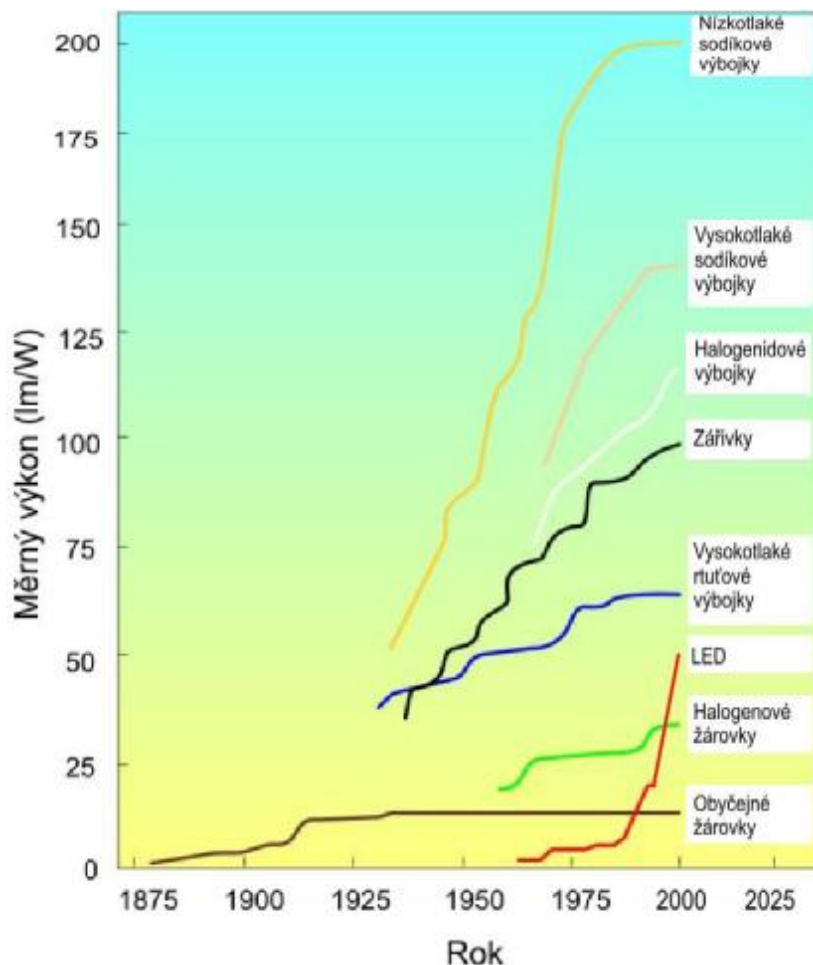
**Světelné diody (LED)** pracují na principu vyzařování energie v podobě fotonů při samovolném návratu elektronů z vybuzeného stavu do základního energetického stavu.

Na Obr. 8.14 jsou uvedeny měrné výkony zdrojů. Tyto závislosti ukazují velice důležitou vlastnost světelných zdrojů, a to míru přeměny spotřebované elektrické energie na vyzářený světelný tok. Pro jednotlivé typy světelných zdrojů jsou uvedeny měrné výkony od doby zavedení do výroby až po dnešní dny.

## Žárovky

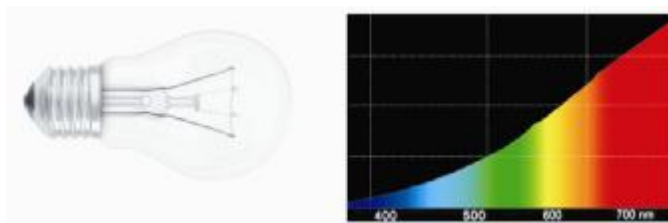
Mezi výhody žárovek patří jejich jednoduchá konstrukce, malé rozměry a hmotnost, jednoduché napájení, nízká cena, okamžitý start, stabilní svícení během celé životnosti, spojitě spektrum, index podání barev  $R_a = 100$ , široká škála příkonů a napětí, nezávislost na teplotě okolí a fakt, že neobsahují látky, které by enormně zatěžovaly životní prostředí. Nevýhody žárovek spočívají v malé životnosti, malém měrném výkonu a výrazné závislosti parametrů na stabilitě napájení – změna napětí o 1 % vyvolá změnu měrného výkonu o 3,6 %.

Odporovým vláknem žárovky vyrobeným z wolframu prochází elektrický proud, vznikají ztráty a elektrická energie se nejprve mění na teplo – vlákno se zahřívá. Vlákno zahřáté na vysokou teplotu se stává zdrojem záření. Z principu žárovek vyplývá, že až 95 % dodané elektrické energie se mění na teplo (odváděné zářením v infračervené oblasti spektra, kondukcí a konvekcí) a jen zbylých 5 % se mění na světelné záření. Ačkoli jsou žárovky značně nevhodné, jsou však stále oblíbené a mají uplatnění hlavně tam, kde se svítí krátce.



**Obr. 8.14: Vývoj měrných výkonů světelných zdrojů**

Žárovky se vyrábějí v různých variantách tvaru baňky (obyčejné, svíčkové, kulové, tvarované, lineární), povrchového zpracování baňky (čiré, matné, opálové, reflektorové, barevné) i velikosti napájecího napětí či typu patice.



**Obr. 8.15: Žárovka a její spektrum**

### Halogenové žárovky

Princip funkce halogenových žárovek je podobný principu obyčejných žárovek. Vylepšením je náplň s příměsí halových prvků (J, Br, Xe) ve vnitřním prostředí baňky. V obyčejné žárovce se postupně ze zahřátého vlákna odpařuje wolfram a usazuje se na vnitřním povrchu baňky. Baňka postupně černá a propouští méně světla. Když se na některém místě vypaří wolfram nad kritickou hranici, příliš tenké vlákno se přepálí.

Vypařování wolframu pomáhá zabraňovat tlak náplně plnicího plynu. Delší životnost je dána i halogenovým cyklem probíhajícím v žárovce. Vypařený wolfram se slučuje s halogenem při nižší teplotě u stěny baňky na halogenid, ten se vlivem teplotního pole

chaoticky vrací zpět na vlákno, kde se vlivem teploty vlákna rozkládá. Wolfram se usazuje na vlákno a halogen se vrací k povrchu baňky a cyklus se opakuje.

Výhody halogenových žárovek oproti klasickým žárovkám:

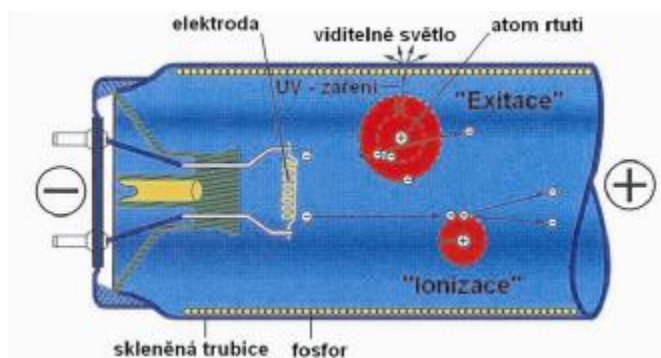
- baňka nečerná a má stabilní světelný tok během celé životnosti,
- vyšší měrný výkon, až 26 lm·W<sup>-1</sup>,
- delší životnost,
- velká odolnost vůči teplotním změnám,
- vyšší teplota chromatičnosti,
- malý průměr baňky (vyšší tlak plynů, menší rychlost odpařování wolframu).

Baňky moderních halogenových žárovek se pokrývají selektivním filtrem (tzv. IRC technologie), který část infračerveného záření vrací zpět na vlákno. Měrný výkon se takto zvyšuje až o 25 %.

V praxi se nejčastěji používají halogenové žárovky na malé napětí, často už jako komplet s malým reflektorem.

### Lineární zářivky

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, které vyzařují hlavně v oblasti ultrafialového záření. Toto se transformuje ve viditelné záření pomocí luminoforu. Princip funkce zářivek je následující. Ve skleněné trubici jsou vlivem elektrického pole mezi elektrodami vybudeny páry rtuť, ve kterých dochází k emisi neviditelného UV záření. Speciální látka, luminofor, nanesený na vnitřním povrchu skleněné trubice, přeměňuje neviditelné UV záření na viditelné světlo. Volbou luminoforu je možné ovlivnit spektrum světla vyzařovaného zářivkou.



Obr. 8.16: Princip funkce zářivek

Jako všechny výbojky se ani zářivky neobejdou bez předřadných přístrojů. Po zapálení výboje je napětí na zářivce nižší než síťové napětí. V případě použití magnetického předřadníku se na tlumivce vytvoří úbytek napětí, který omezí proud tekoucí zářivkou, v případě použití elektronického předřadníku je proud zářivky řízen elektronickými obvody.

Zářivky typu T5 mají průměr trubice 16 mm a jsou kratší než standardní trubice T8 s průměrem 26 mm. Nabízejí vyšší měrný výkon, až 104 lm·W<sup>-1</sup>, a jsou určeny pouze pro provoz s elektronickými předřadníky. Zářivky T5 dosahují úspor oproti zářivkám T8 v následujících oblastech:

- vyšší měrný výkon zářivek T5 s elektronickým předřadníkem,
- vyšší účinnosti svítidel vlivem nižšího odstínění o 40 % štíhlejší zářivky,
- se zářivkami T5 je možné konstruovat subtilnější svítidla, z čehož plynou další materiálové úspory.

Životnost zářivek je silně ovlivněna počtem zapnutí. Nehodí se proto tam, kde dochází k častému zapínání a vypínání. Podle způsobu provozu se mění i doba života zářivek. Při provozu s klasickým předřadníkem se životnost zářivky pohybuje okolo 10 000 h, zatímco při provozu s elektronickým předřadníkem se pohybuje okolo 18 000 h.

Zářivky se vyrábějí v širokém spektru náhradních teplot chromatičnosti od 2 700 do 8 000 K a s indexem podání barev 60 - 98. Existují i speciální zářivky barevné, s prodlouženou servisní životností až 75 000 h nebo s upraveným spektrem pro pěstování rostlin, chov zvířat a další.



Obr. 8.17: Lineární zářivka T8 a její spektrum

### Kompaktní zářivky

Kompaktní zářivky jsou principem shodné s lineárními zářivkami. Jejich trubice jsou však ohnuty nebo zatočeny pro dosažení kompaktnějších rozměrů. Kompaktní zářivky se vyskytují jak s integrovaným elektronickým předřadníkem, tak bez předřadníku (ten je vestavěný ve svítidle). Existují i stmívatelné varianty na napětí 12 V pro provoz v ostrovních systémech nízkého napětí a karavanech. Měrný výkon kompaktních zářivek je nižší (maximálně cca 88  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ) a to kvůli vlastnímu stínění trubic a patice atd.

Na rozdíl od žárovek, u kterých světelný tok dosahuje jmenovité hodnoty téměř okamžitě, zářivky dosahují jmenovité hodnoty až po cca 3 minutách provozu. Zářivky jsou také velmi teplotně závislé, a proto se nehodí pro osvětlování venkovních prostorů.

Elektronický předřadník u kompaktních zářivek zajišťuje:

- okamžitý start bez blikání,
- odolnost proti častému spínání,
- delší životnost,
- odstranění stroboskopického efektu a kolísání světelného toku.

### Indukční výbojky

Indukční výbojky jsou, stejně jako zářivky, nízkotlaké rtuťové výbojky. Na rozdíl od zářivek nemají elektrody a k zapálení a hoření výboje slouží vysokofrekvenční elektromagnetické pole vyrobené cívkou (cívkami). Používají se výhradně s elektronickým předřadníkem.

Výhody indukčních výbojek:

- dlouhá životnost, více než 60 000 h (nedochází k opalování elektrod),
- malý úbytek světelného toku za dobu svícení,
- rychlý náběh světelného toku po zapnutí nebo restartu a na rozdíl od vysokotlakých výbojek možnost okamžitého znovuzápalu,
- vysoký měrný výkon až 93  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ .

Indukční výbojky se používají v prostorech s vysokou náročností výměny světelných zdrojů (osvětlení tunelů, průmyslových hal, mostů apod). Protože jsou rozměry většiny



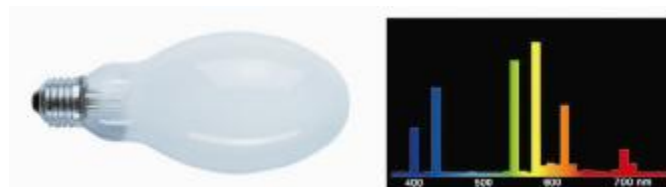
indukčních výbojek relativně velké, je účinnost svítidel měnících prostorové rozložení světelného toku nízká z důvodu pohlcení části světelného toku světelným zdrojem.



**Obr. 8.18: Indukční výbojka Osram Endura (cívky po obvodu) a Philips QL (cívka uvnitř baňky)**

### Vysokotlaké rtuťové výbojky

Viditelné záření vzniká u těchto zdrojů obloukovým výbojem v parách rtuti při tlaku 0,1 MPa ve výbojové trubici z křemenného skla. Vysokotlaké rtuťové výbojky vyzařují přímo ve viditelné oblasti asi 15 % přivedené energie a jejich světlo je modrobílé až modrozelené. Záření UV, hlavně na vlnové délce 365 nm, je nutné pomocí luminoforu transformovat do viditelné oblasti. Hlavní elektrody tvoří wolframový drát pokrytý emisní vrstvou kysličníku barya, stroncia a vápníku.



**Obr. 8.19: Rtuťová výbojka a její spektrum**

Červená složka světla chybí a z tohoto důvodu se nanáší na vnitřní stěnu venkovní baňky ortofosfátový luminofor pro zabezpečení transformace zbylého UV záření do červené oblasti spektra. K ustálení výboje rtuťových výbojek dochází až po 3 - 5 minutách. Po přerušení výboje dojde k opětovnému znovuzapálení až po 7 minutách. Výhodou těchto výbojek je malý pokles světelného toku během života, odolnost proti změnám teploty a otřesům. Životnost je 12 000 až 15 000 h, index podání barev  $R_a = 60$ , měrný výkon 50 až 80  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ . Výbojky se nehodí k osvětlování vnitřních prostorů z důvodu nízkého  $R_a$  a delší doby opětovného znovuzápalu. Z osvětlování průmyslových prostorů, ulic a sportovišť je vytlačily vysokotlaké sodíkové výbojky s vyšším měrným výkonem. De facto jsou již nahrazeny ve všech oblastech jejich použití jinými světelnými zdroji (kvalitnějšími, efektivnějšími) a v nových osvětlovacích soustavách se již nenasazují. V současné době se ještě používají směšové výbojky, světelné zdroje kombinující žárovku s rtuťovou výbojkou, které nepotřebují předřadnou tlumivku.

### Nízkotlaké sodíkové výbojky

U nízkotlakých sodíkových výbojek vzniká primární výboj ve výbojové trubici vyrobené z boritého skla, v plynném argonu a neonu. Výboj má klasickou neonovou barvu. Až po určité době, kdy sodík přejde do plynného skupenství při tlaku sodíkových par 0,5 Pa a teplotě stěny výbojové trubice cca 300°C, se vyzáří monochromatické záření v pásmu vlnových délek 589 a 589,6 nm - ve žluté oblasti spektra. Záření sodíkové výbojky je v blízkosti maxima spektrální citlivosti lidského oka, také proto je její měrný výkon 130 až 200  $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ . V jejím světle není možné rozlišovat barvy ( $R_a = 0$ ), životnost výbojky dosahuje až 24 000 h. Výbojová trubice sodíkových výbojek má kruhový průřez a ohýbá se do tvaru písmena U nebo W. Venkovní baňka tepelně izoluje výbojovou trubici, je jednoduchá a vyčerpaná na vysoké vakuum.



Obr. 8.20: Nízkotlaká sodíková výbojka a její spektrum

Přes značný pokrok a zlepšení jejich užitečných parametrů se jejich použití v důsledku velmi špatného podání barev omezilo na osvětlení silnic a dálnic. V současné době jsou rozšířeny zejména v zemích Beneluxu a ve Velké Británii. V naší republice, až na vzácné výjimky, nenašlo osvětlení nízkotlakými sodíkovými výbojkami velké uplatnění a vzhledem ke stále se zlepšujícím parametrům vysokotlakých sodíkových výbojek se s jejich rozšířením dále nepočítá.

### Vysokotlaké sodíkové výbojky

Výboj v parách sodíku se vyznačuje intenzivním rezonančním dubletem jako u nízkotlaké sodíkové výbojky ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589,0 a 589,6 nm. Těchto vlastností se využívá již od třicátých let při konstrukci nízkotlakých sodíkových výbojek. Se snižováním objemu výbojového prostoru se zvyšuje tlak par sodíku, až při tlaku cca 27 kPa dosahuje maxima a v závislosti na dalších parametrech (složení amalgamu sodíku, druhu a tlaku plnicího plynu, geometrických parametrů hořáku, příkonu výbojky apod.) může dosáhnout hodnoty až  $150 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ . Výbojový prostor u tohoto zdroje musí být vyroben z polykrystalického anebo monokrystalického oxidu hlinitého (syntetický korund). Při rostoucím tlaku par sodíku dochází k výraznému rozšíření spektrálního vyzařování a ke vzniku silného spojitého záření, přičemž zároveň je absorbováno záření rezonanční. Se zvyšujícím se tlakem roste vyzařování v dlouhovlnné části spektra, spektrum záření je bohatší, což má za následek i lepší podání barev osvětlovaných předmětů. Tento druh výboje je využíván u moderních vysokotlakých sodíkových výbojek, které se výrazně prosadily zejména ve veřejném osvětlení.

Sortiment vysokotlakých sodíkových výbojek je velmi široký, příkony se pohybují od 50 do 1 000 W. Index podání barev u těchto zdrojů se pohybuje okolo 25. Výbojka neumožňuje teplý znovuzápal a lze ji rozsvítit až po jejím vychladnutí. Na jmenovitý světelný tok nabíhá až po cca 5 minutách. V oblasti rozsahu venkovních teplot nedochází ke kolísání světelného toku.

Vysokotlaké sodíkové výbojky je nutné provozovat v obvodu s tlumivkou a vhodným zapalovacím zařízením. Při dodržování provozních podmínek (povolené kolísání napětí menší než 5 %, správně dimenzované tlumivky) výbojky předních výrobců dosahují životnosti až 30 000 h. Ukončení života je dáno postupným nárůstem napětí na výboji. Při překročení určitého poměru tohoto napětí vzhledem k napájecímu napětí sítě výboj zhasne. Po vychladnutí se výboj znovu zapálí a celý cyklus se opakuje. Periodické zhasínání výbojek je příznakem konce životnosti a výbojku je nutné vyměnit.



Obr. 8.21: Vysokotlaká sodíková výbojka a její spektrum

Vysokotlaké sodíkové výbojky do osvětlovací praxe přinesly významné úspory elektrické energie, také proto je podíl vysokotlakých sodíkových výbojek ve veřejném osvětlení (VO) dominantní. Vysokotlaké sodíkové výbojky mají ve VO univerzální použití: jsou vhodné pro

osvětlování veškerých komunikací, pěších zón i osvětlování fasád objektů. Určitou nevýhodou těchto zdrojů je horší barevné podání osvětlovaných předmětů. Pro VO se používají sodíkové vysokotlaké výbojky nízkých příkonů, v obcích 50 – 70 W, ve městech do 150 W, na velkých komunikacích 150 - 250 W. Vyšší příkony lze použít na osvětlování fasád budov a vnitřních i venkovních skladovacích ploch bez trvalého pobytu osob (250 – 1 000 W).

### Halogenidové výbojky

Viditelné záření zde vzniká jednak v parách rtuti, ale hlavně zářením produktů halogenidů (90 % záření), to je sloučenin halových prvků např. s galiem, thaliem, sodíkem apod. Toto vede ke zvýšení indexu podání barev až na  $R_a = 90$  a měrného výkonu až na  $130 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ .

V hořáku z křemene nebo keramiky vzniká cyklus podobný regeneračnímu cyklu jako u halogenových žárovek. Venkovní baňka je z borosilikátového skla. Halogenidové výbojky pracují při venkovní teplotě -20 až 60 °C. Životnost těchto výbojek dosahuje až 15 000 h.



Obr. 8.22: Halogenidová výbojka a její spektrum

Halogenidové výbojky vyžadují zapalovač. Výkonová řada začíná na 35 W a končí na 3 500 W, výbojky se vyrábějí s různými tvary baňky a typy patice. Na jmenovité parametry nabíhá výbojka asi za 10 minut, podle velikosti a příkonu. Halogenidové výbojky se přes vysokou cenu začínají prosazovat hlavně tam, kde jsou vysoké požadavky na barevné podání. Halogenidové výbojky menších příkonů se používají při osvětlování výkladů a obchodních prostor, muzeí i výstavních sání. Větší příkony se uplatňují v osvětlování výstavišť, sportovišť, dopravních uzlů a v průmyslu.

### Xenonové výbojky

Xenonové výbojky jsou vysokotlaké výbojky používané dnes hlavně v automobilových světlometech nebo v projekční a osvětlovací technice. Xenonové výbojky potřebují pro zážeh výboje vysokonapěťový impuls (přes 20 kV) Provozní napětí na výboji je u většiny typů výbojek pro automobily cca 85 V / 100 Hz, proto je třeba pro jejich připojení speciální měnič. Výbojky pro osvětlování v osvětlovací technice bývají v trubcovém provedení, mohou mít příkon až 10 kW a jsou chlazeny vzduchem nebo vodou. Náhradní teplota chromatičnosti je nejčastěji v rozmezí 4 000 – 12 000 K a spektrum vyzařování je podobné dennímu světlu, měrný výkon je až  $95 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  a životnost cca 2 500 h.

### Světelné diody – LED

LED se v posledních letech ve stále větší míře využívají ve všech oblastech osvětlovací techniky. Za své rozšíření vděčí především rostoucímu měrnému výkonu. Světelné diody představují elektronický prvek, který generuje světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem. Používá tedy jiný fyzikální princip než žárovky nebo výbojky a má mnoho vlastností, kterými se od předchozích klasických zdrojů světla odlišuje. Polovodičový přechod vyzařuje velmi úzké spektrum. Primární záření je v podstatě monochromatické. LED jsou již dnes vysoce účinný světelný zdroj, který se prosazuje namísto konvenčních světelných zdrojů. Technologie LED má velký potenciál rozvoje do budoucna.

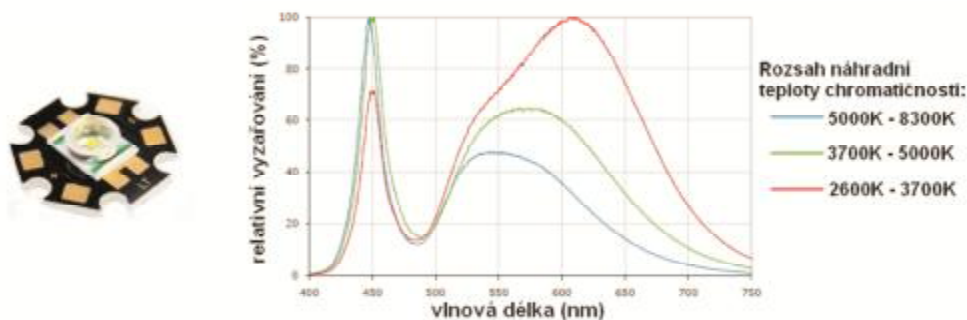
LED diody lze rozdělit do 3 kategorií:

- SMD LED (indikace) – počítače, auta, mobily, orientační osvětlení
- Klasické LED (signalizace) – kontrolky, třetí brzdová světla automobilů, reklama, orientační osvětlení
- Výkonové LED (osvětlování) – dopravní signalizace, iluminace, zábavní průmysl

Generovat bílé světlo pomocí LED je možné principiálně dvěma způsoby:

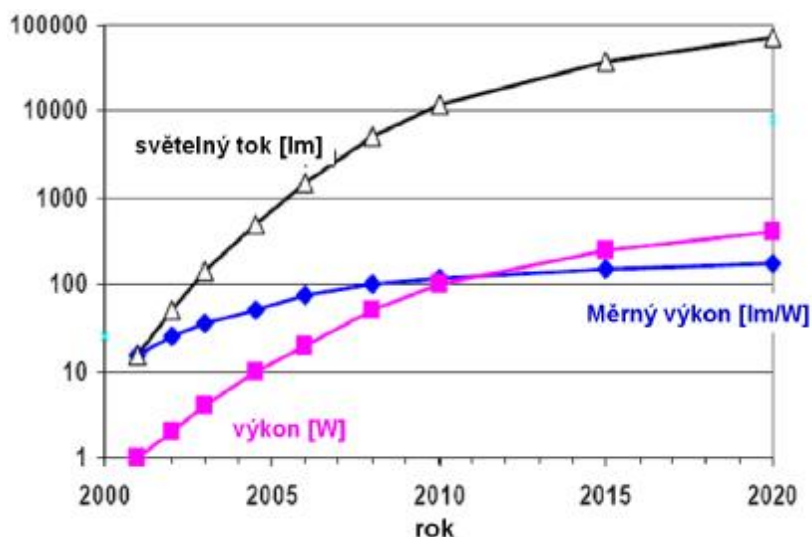
- mísením monochromatických LED – bílé světlo lze získat mísením několika komplementárních vlnových délek určitého výkonového poměru. Mísení lze v závislosti na požadavcích na kvalitu světla. Mísením dvou vlnových délek vznikne dichromatický zdroj. Mísením tří monochromatických LED zářičů (např. RGB), vznikne trichromatický světelný zdroj. Zvyšováním počtu monochromatických složek se zvyšuje kvalita barevného podání výsledného bílého světla.
- konvertorem vlnových délek – při primárním vyzařování na kratší vlnové délce (nejčastěji v modré oblasti) je část světla absorbována v konvertorovém materiálu a znovu vyzařena jako světelné záření s delší vlnovou délkou. Nejpoužívanější konvertory vlnových délek jsou na bázi fosforu.

Typickým představitelem je bílá LED založená na modrém LED čipu (GaInN/GaN) a fosforovém konvertoru. Záření ve viditelné oblasti, které je vyzařováno z polovodiče, je modré barvy. Část světla je distribuována přímo k pozorovateli a část krátkovlnných fotonů je v prostoru zapouzdření (fosforová vrstva) absorbována a znova emitována s delší vlnovou délkou ve žlutém spektru. Vyzařované spektrum se skládá z luminiscence modrého světla a fosforescence světla žlutého. Nastavováním vzájemného poměru luminiscence a fosforescence lze optimalizovat nejen náhradní teplotu chromatičnosti, ale také měrný výkon (se vzrůstající  $T_C$  klesá) a index podání barev (s klesající  $T_C$  roste).



**Obr. 8.23: Bílá LED a typická spektra LED s fosforovým luminoforem**

Na Obr. 8.23 jsou zobrazena typická spektra bílých LED. LED jsou v současnosti stále v procesu vývoje a jejich měrný výkon stále roste. Po ukončení vývoje se očekává, že měrné výkony těchto světelných zdrojů se budou pohybovat až nad oblastí  $200 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$  (Obr. 8.24). Vzhledem k minimálnímu výskytu červené barvy ve vyzařovaném spektru se jako jeden z hlavních problémů LED jeví dosažení vysokého indexu podání barev. Současné technologie ale umožňují dosahování  $R_a$  lepšího než 90.



**Obr. 8.24:** Graf znázorňující předpoklad vývoje parametrů LED diod v horizontu do roku 2020

Největším problémem LED je v současnosti odvod tepla z oblasti PN přechodu. Z tohoto důvodu se pohybují jednotlivé zdroje v oblasti příkonů jednotek wattů. Dalším problémem spojeným s odvodem tepla z PN přechodu je snižování světelného toku a životnosti se zvyšující se teplotou přechodu. Naproti tomu mají LED proti klasickým světelným zdrojům nezanedbatelné výhody v jednodušším směřování a rychlejším náběhu světelného toku, mechanické odolnosti a nezávislosti životnosti na spínání a stmívání. K napájení se používá malé stejnosměrné napětí. LED se kvůli své voltampérové charakteristice řídí proudem.

### Poznámka

V celé kapitole 0 jsou použity doslovné citace, obrázky a tabulky z literatury [28]. V této knize lze nalézt k problematice řešené v této kapitole další informace.



### Shrnutí pojmů 8.2.

Svítidlo, světelný zdroj, úhel clonění, křivky svítivosti, reflektor, refraktor, difuzor.



### Otázky 8.2.

11. Co je účinnost svítidla, v jakém rozmezí se pohybuje?
12. Jak dělíme svítidla podle rozložení jejich světelného toku?
13. Jaké jsou možnosti zvýšení účinnosti svítidel?
14. Vymenujte základní principy usměrnění světelného toku.
15. Vysvětlete princip zvyšování světelného toku halogenové žárovky oproti klasické.
16. Vysvětlete princip vzniku světla v lineární zářivce.
17. Jak se liší kompaktní zářivka od lineární?
18. Vysvětlete funkci elektronického předřadníku kompaktní zářivky, co zajišťuje?
19. Jak vypadá spektrum a měrný výkon nízkotlaké a vysokotlaké sodíkové výbojky?
20. Jaké spektrum vyzařují LED diody?

21. Mohou LED diody vyzařovat v celém viditelném spektru? Vysvětlete.  
22. Co limituje maximální příkon LED svítidel?



## DALŠÍ ZDROJE 8

- [25] Sokanský K. a kol.: Racionalizace v osvětlování venkovních prostor, ČSO RS Ostrava , 2005
- [26] Habel, J. a kol.: Světelná technika a osvětlování. Praha : FCC PUBLIC, 1995. s. 437. ISBN 800-901985-0-3
- [27] Indalux Iluminacion Technica, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002. Dostupné z URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>
- [28] Sokanský, K. a kol.: Světelná technika, ČVUT Praha 2011, ISBN 978-80-01-04941-9
- [29] Pich, J.: Světelná technika v praxi. 1. vydání. Praha : IN-EL, 1999. s. 210. ISBN 80-86230-09-0
- [30] ČSN EN 12665. Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení. 2003
- [31] Sokanský, K. a kol.: Racionalizace v osvětlování kancelářských, školských a bytových prostor. ČSO RS Ostrava, 2004
- [32] Katalog firmy OSRAM, Světelné zdroje, Dostupné z URL: <<http://osram.cz/osram.cz/KATALOG/index.html>>
- [33] Katalog firmy PHILIPS, Světelné zdroje, Dostupné z URL: <<http://www.philips.cz/>>



## CD-ROM

- **Výpočet teploty vlákna žárovky** - z proudu žárovkou a teplotou jasu

## 9. PROJEKT



### ČAS KE STUDIU:

3 hodiny



### CÍL:

Po zpracování tohoto projektu budete umět

- vypočítat cenu spotřebované elektřiny vaší domácností
- navrhnout nejvýhodnějšího dodavatele elektřiny



### VÝKLAD

#### Zadání projektu

Proveďte návrh na dodavatele elektřiny, případně jeho změnu. Vycházejte z Vaší faktury za minulé období. Za úkol máte porovnat:

- a) letošní rok s rokem minulým,
- b) různé dodavatele (minimálně 3),
- c) náklady na elektrickou energii pro případ, že místo stávajícího jednoho tarifu máte vysoký VT a nízký NT tarif. Spotřebu elektrické energie rozdělte v poměru 40 % VT a 60 % NT. Pokud máte dvoutarif již nyní, počítejte, že máte celou spotřebu pouze ve VT.

Pro srovnávací výpočty použijte Cenový kalkulátor ze stránek EŘU:

Kalkulátor plateb za dodávku elektřiny domácnostem (MOO)

[http://www.eru.cz/dias-read\\_article.php?articleId=457](http://www.eru.cz/dias-read_article.php?articleId=457)

Součástí projektu budou tabulky z „Kalkulačky“ EŘU a zhodnocení. Pokud budete odevzdávat projekt v elektronické podobě, tak dokument nazvěte projekt\_vuee\_příjmení a pošlete jej vyučujícímu z části výroba - elektrárny.

Která část výsledné faktury je ovlivněna změnou dodavatele a která vůbec?



### DALŠÍ ZDROJE 9

[34] <http://faktura.eru.cz/>

[35] <http://www.elektrickaenergia.sk/>



## CD-ROM

- **Výběr dodavatele elektřiny** - animace jako návod pro zpracování projektu





## KLÍČ K ŘEŠENÍ

### Použití klíče k řešení

Ke správným odpovědím se lze dostat:

- stisknutím Ctrl + kliknutí na číslo stránky, obrázku, tabulky, rovnice - přejdete na začátek odpovědi na otázku
- otevřením seznamu záložek Shift+Ctrl+F5, vybráním konkrétní otázky v seznamu a stisknutím tlačítka **Přejít na**. Na rozdíl od použití křížového odkazu v předchozím bodu se zároveň vyznačí celá odpověď v textu.



## KLÍČ K ŘEŠENÍ 1.

1. Str. 5
2. Str. 5
3. Str. 7



## KLÍČ K ŘEŠENÍ 2.1.

1. Str. 10
2. Str. 11
3. Str. 11



## KLÍČ K ŘEŠENÍ 2.2.

1. Str. 13
2. Str. 14
3. Str. 15
4. Str. 16
5. Str. 17
6. Str. 18
7. Str. 19
8. Str. 20
9. Str. 20

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 2.3.**

1. Str. 22
2. Str. 23

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 2.4.**

1. Str. 24

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 2.5.**

1. Str. 25
2. Str. 25
3. Str. 25

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 3.1.**

1. Str. 29
2. Str. 31

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 3.2.**

1. Str. 32
2. Str. 33
3. Str. 33

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 3.3.**

1. Str. 36
2. Str. 37
3. Str. 37
4. Str. 38

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 4.1.**

1. Str. 41
2. Str. 42
3. Str. 42
4. Str. 43
5. Str. 44
6. Str. 44

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 4.2.**

1. Str. 45
2. Str. 49
3. Str. 50

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 4.3.**

1. Str. 53
2. Str. 54

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 4.4.**

1. Str. 56

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 5.1.**

1. Str. 63
2. Str. 64
3. Str. 64

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 5.2.**

1. Str. 66
2. Str. 66
3. Str. 67

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 5.3.**

1. Str. 68
2. Str. 68
3. Str. 69

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 5.4.**

1. Str. 71
2. Str. 71

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 6.1.**

1. Str. 75
2. Str. 77
3. Str. 80
4. Str. 83

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 6.2.**

1. Str. 86
2. Str. 89

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 6.3.**

1. Str. 91
2. Str. 91

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 6.4.**

1. Str. 92
2. Str. 93

**KLÍČ K ŘEŠENÍ 7.1.**

1. Str. 96
2. Str. 98
3. Str. 98
4. Str. 108
5. Str. 102
6. Str. 102
7. Str. 107
8. Str. 103
9. Str. 105
10. Str. 104
11. Str. 106



### **KLÍČ K ŘEŠENÍ 7.2.**

1. Str. 109
2. Str. 110
3. Str. 111, Obr. 7.12
4. Str. 114
5. Str. 114
6. Str. 114
7. Str. 115
8. Str. 118
9. Str. 105
10. Str. 122, Obr. 7.21
11. Str. 123, Obr. 7.22



### **KLÍČ K ŘEŠENÍ 7.3.**

1. Str. 126, Str. 128, Obr. 7.23, Obr. 7.26
2. Str. 126, Obr. 7.24

3. Str. 128, Obr. 7.27
4. Str. 128
5. Str. 135
6. Str. 136
7. Str. 127, Obr. 7.25
8. Str. 132, Obr. 7.32
9. Str. 134
10. Str. 137, Obr. 7.37, Obr. 7.38
11. Str. 139, Rovnice (7.58), (7.59), (7.60), (7.61)



#### **KLÍČ K ŘEŠENÍ 7.4.**

1. Str. 142
2. Str. 143, Rovnice (7.62)
3. Str. 144
4. Str. 146
5. Str. 147, Obr. 7.49, Obr. 7.50, Tab. 7.9
6. Str. 147
7. Str. 147
8. Str. 147, Obr. 7.58, Obr. 7.59



#### **KLÍČ K ŘEŠENÍ 7.5.**

1. Str. 147
2. Str. 147, Rovnice (7.66)
3. Str. 147, Obr. 7.62
4. Str. 147
5. Str. 147, Rovnice (7.68)
6. Str. 147, Rovnice (7.69)

7. Str. 147, Obr. 7.63
8. Str. 147, Rovnice (7.70)
9. Str. 147
10. Str. 147
11. Str. 147
12. Str. 147



### KLÍČ K ŘEŠENÍ 8.1.

1. Str. 147
2. Str. 147
3. Str. 147, Str. 147, Rovnice (8.1) a (8.4)
4. Str. 147, Rovnice (8.2) a (8.3)
5. Str. 147, Rovnice (8.6)
6. Str. 147, Obr. 8.3
7. Str. 147, Obr. 8.4
8. Str. 147
9. Str. 147
10. Str. 147, Obr. 8.6



### KLÍČ K ŘEŠENÍ 8.2.

1. Str. 147, Rovnice (8.13)
2. Str. 147, Tab. 8.5
3. Str. 147
4. Str. 147, Obr. 8.12
5. Str. 147
6. Str. 147, Obr. 8.16
7. Str. 147

- 8. Str. 147
- 9. Str. 147, Str. 147, Obr. 8.20, Obr. 8.21
- 10. Str. 147
- 11. Str. 147
- 12. Str. 147





## REJSTŘÍK

**A**

Absolutně bílý povrch, 103  
 Absolutně černý povrch, 103, 106  
 Alternátory, 74  
 Atmosférické fluidní spalování, 26  
 Atom, 30  
 Atomové číslo Z, 30  
 Austenitické slitiny, 120

**B**

Barva světla, 181  
 Bezkontaktní buzení alternátorů, 92  
 Bifilární spojení, 136  
 bílá LED, 199  
 Bioplyn, 70  
 Buzení alternátoru, 80

**C**

Cermetové články, 121

**D**

Dieselové elektrárny, 23  
 Difuzor, 190  
 Doba prohřívání, 149

**E**

Ekvitermní křivka, 173  
 Elektrické vytápění, 158  
   akumulační, 166, 168  
   centrální, 169  
   hybridní, 167  
   konvenční, 169  
   lokální, 169  
   podlahové, 170  
   přímotopné, 166  
   sálavé, 170  
 Elektrický oblouk, 127  
   stabilizace tlumivkou, 130  
   stejnoseměrný, 128  
   střídavý, 129  
 Elektrizací soustava, 5  
 Elektroodový ohřev vody, 115  
 Elektroodových kotel, 115  
 Elektrody, 136  
 Elektrolyt, 113  
 Emisivita, 107  
 Energetický ekvivalent, 43, 44  
 EOP, 137  
   s nepřímým obloukem, 138  
   s přímým obloukem, 138  
   se zakrytým obloukem, 139  
   stejnoseměrné, 141

**F**

Fázování alternátoru, 82  
 Feritické slitiny, 120  
 Fermentace biomasy, 70  
 Fotovoltaické elektrárny, 65  
 Francisova turbína, 54

**H**

Halogenidové výbojky, 197  
 Halogenové žárovky  
   kruhový cyklus, 193  
 Halogenové žárovky, 192  
 Hloubka vniku, 145  
 Hltnost turbíny, 43  
 Hmotnostní číslo A, 30  
 Hustota tepelného toku, 96, 98  
 Hydroalternátor, 75

**I**

Indukčních zařízení, 144  
 Impedance nakrátko, 131  
 Indukční pec  
   kanálková, 153  
   kelímková, 146  
   s vodivým kelímkem, 148  
   s vodivým stínícím pláštěm, 147  
   se železným jádrem, 147  
 Indukční výbojky, 194  
 Indukční zařízení pro povrchový ohřev, 151  
   kalení, 151  
   pájení, 152  
   rafiční přetavování, 153  
   svařování, 152  
 Induktor, 144  
 Informační výkon, 176  
 Izoterma, 99  
 Izotopy, 30

**J**

Jaderné reaktory, 36  
 Jas, 179  
 Jouleův zákon, 110

**K**

Kandela, 178  
 Kaplanova turbína, 55  
 Katodová skvrna, 128  
 Kinetická energie, 42  
 Kompaktní zářivky, 194  
   elektronický předřadník, 194  
 Kompenzátor objemu, 38  
 Kondenzátor, 18  
 Kontejnment, 38

Kotel, 15  
 Krátká cesta, 135  
 Kritické a nadkritické elektrárenské bloky, 25  
 Kruhový diagram, 132

**L**

Legislativa ČR, 6  
 LF pec, 137  
 Lineární zářivky, 193  
 Luminofor, 193

**M**

Materiály pro FV, 66  
 Měrná tepelná kapacita, 96  
 Měrný výkon, 179

**N**

Náhradní teplota chromatičnosti, 180  
 Napájecí voda, 14  
 Neutron, 30  
 Nízkotlaké sodíkové výbojky, 195  
 Nukleony, 30

**O**

Objem stálého zadržení, 43  
 Oblast tepelné pohody, 161  
 Obloukový výboj, 127  
 Odbuzení alternátoru, 81  
 Odpojovač, 134  
 Odporové pece  
   bubnové, 119  
   elevátorové, 117  
   karuselové, 119  
   komorové, 116  
   krokové, 118  
   narážecí, 118  
   pásové, 118  
   pokloповé, 117  
   protahovací, 119  
   průběžné, 117  
   střásací, 118  
   šachtové, 116  
   válcové, 118  
 Odporový ohřev  
   nepřímý, 115  
   přímý, 110  
 Odraz  
   difúzní, 182  
   zrcadlový, 182  
 Ochrany alternátoru, 83  
 Osvětlenost, 178

**P**

Palivo, 13  
 Palivové články, 70  
 Paroplynové elektrárny, 21  
 Pecní transformátor, 134  
 Peltonova turbína, 53  
 Poměrná pohltivost, 107  
 Potenciální energie, 41

Pracovní charakteristiky, 139  
 Právní předpisy EU, 6  
 Prostorový úhel, 179  
 Proudění, 102  
 Průtok, 43  
 Průzračné prostředí, 104  
 Přečerpávající vodní elektrárny, 49

**R**

Radioaktivita, 30  
 Rankine – Clausiuv oběh, 10  
 Reflektor, 189  
 Refraktor, 190  
 Regenerační ohřev, 14  
 Regulace odporových pecí, 122  
   plynulá, 124  
   skoková, 123  
 Regulace výkonu reaktoru, 34  
 Regulace vytápění, 172  
   ekvitermní, 173  
 Regulační obvod, 172  
   otevřený, 173  
   se zpětnou vazbou, 173  
   uzavřený, 173  
 Relativní pohltivost, 106  
 Reprodukce jaderného paliva, 35  
 Retenční obsah, 43  
 Rezistivita, 110

**Ř**

Řízená řetězová reakce, 33

**S**

Sálání, 103, 104  
 Skříň pece, 119  
 Složení ceny elektřiny, 7  
 Solné lázně, 114  
 Součinitel tepelné vodivosti, 99  
 Spád, 43  
 Spalinový okruh, 19  
 Spektrální zářivost, 106  
 Stupeň černosti, 107  
 Světelné diody – LED, 191, 197  
 Světelný tok, 178  
 Světlení, 178  
 Světlo, 176  
 Svítidla, 184  
   druhy, 185  
   elektrické části, 189  
   jas, 186  
   konstrukční prvky, 188  
   křivky svítivosti, 187  
   mechanické části, 189  
   parametry, 186  
   světelně činné části, 189  
   světelný tok, 186  
   třídy ochrany, 187  
   účinnost, 186  
   úhel clonění, 187  
 Svítivost, 178  
 Symetrikační zařízení, 155  
   do hvězdy, 156

do trojúhelníka, 155

## Š

Štěpení atomových jader, 32

## T

Tepelná izolace, 119

Tepelné pohoda, 158

Tepelné rovnováha, 159

Tepelné zpracování, 122

cermetování, 122

kalení, 122

nitridování, 122

popouštění, 122

zušlechťování, 122

žihání, 122

Tepelný most, 164

Tepelný stav prostředí, 159

Tepelný výkon, 96

Teplo, 96

Teplota chromatičnosti, 180

Teplota vzduchu, 159

Teplotní činitel odporu, 111

Teplotní rozdíl, 96

Termická elektrolýza, 113

Termodynamická (TD) soustava, 95

Termodynamická proměnná, 95

Termodynamická rovnováha, 95

Termodynamická teplota, 96

Termodynamický děj, 95

Tlakové fluidní spalování, 26

Tlakové fluidní zplyňování, 27

Tlumivka, 135

Topné články, 119

Transformátory, 86

Turbína, 17

Turboalternátor, 76

## U

Účinná teplota okolních ploch, 160

Úhrnná zářivost, 106

Užitečné teplo, 111

Užitečný výkon, 125

Užitný obsah, 43

## V

Vazebná energie, 31

Vedení tepla, 98

rovinnou stěnou, 99

válcovou stěnou, 101

Vertikální rozložení teplot, 160

Větrné elektrárny, 61

Viditelné záření, 176

Vírová elektrárna, 57

Vírová turbína, 56

Vlastní spotřeba elektrárny, 90

Vodíkové chlazení, 79

Vodní chlazení, 78

Vodní motor SETUR, 57

Vodní turbíny, 51

Všeobecný index podání barev  $R_a$ , 181

Výkon větru, 62

Výkon vodní elektrárny, 44

Výpočet otopných zařízení, 161

Výpočet tepelných ztrát, 162

Výsledná teplota místnosti, 161

Vysokonapěťový výkonový vypínač, 134

Vysokotlaké rtuťové výbojky, 195

Vysokotlaké sodíkové výbojky, 196

Vytápěcí systémy, 168

akumulační, 168

hybridní, 171

přímotopné, 169

Využití biomasy, 67

## X

Xenonové výbojky, 197

## Z

Zákony sálání

Kirchhoffův, 106

Lambertův, 105

Planckův, 105

Snellův, 104

Stefan Boltzmannův, 105

Wienův, 105

Ztráty větráním, 165

## Ž

Žárovky, 191

Žáruvzdorná vyzdívka, 119

Životnost světelného zdroje, 181



## OBSAH

<b>1. ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>2. TEPELNÉ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>9</b>
2.1. PRINCIP FUNKCE TEPELNÝCH ELEKTRÁREN .....	9
2.2. UHELNÉ ELEKTRÁRNY .....	12
2.3. PLYNOVÉ A PAROPLYNOVÉ ELEKTRÁRNY .....	21
2.4. DIESELOVÉ ELEKTRÁRNY .....	23
2.5. SOUČASNÉ TRENDY .....	25
<b>3. JADERNÉ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>29</b>
3.1. ZÁKLADNÍ POJMY Z JADERNÉ FYZIKY .....	29
3.2. JADERNÁ REAKCE .....	32
3.3. POPIS JADERNÉ ELEKTRÁRNY .....	35
<b>4. VODNÍ ELEKTRÁRNY</b> .....	<b>41</b>
4.1. ZÁKLADNÍ POJMY .....	41
4.2. DĚLENÍ VODNÍCH ELEKTRÁREN .....	44
4.3. VODNÍ TURBÍNY .....	51
4.4. SOUČASNÉ TRENDY VE .....	55
<b>5. NETRADIČNÍ ZDROJE</b> .....	<b>60</b>
5.1. VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY .....	61
5.2. FOTOVOLTAICKÉ ELEKTRÁRNY .....	65
5.3. VYUŽITÍ BIOMASY .....	67
5.4. PALIVOVÉ ČLÁNKY .....	70
<b>6. ELEKTRICKÁ ČÁST ELEKTRÁREN</b> .....	<b>74</b>
6.1. ALTERNÁTORY .....	74
6.2. TRANSFORMÁTORY .....	86
6.3. VLASTNÍ SPOTŘEBA ELEKTRÁRNY .....	90
6.4. TRENDY V ELKTROČÁSTI .....	91
<b>7. ELEKTROTEPELNÁ TECHNIKA</b> .....	<b>95</b>
7.1. ZÁKLADY SDÍLENÍ TEPLA .....	95
7.2. ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ ODPOROVÁ .....	109
7.3. ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ OBLOUKOVÁ.....	125
7.4. ELEKTRICKÉ TEPLA INDUKČNÍ.....	142
7.5. ELEKTRICKÉ VYTÁPĚNÍ .....	147
<b>8. SVĚTELNÁ TECHNIKA</b> .....	<b>147</b>
8.1. ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY .....	147
8.2. PARAMETRY A VLASTNOSTI SVÍTIDEL A SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....	147
<b>9. PROJEKT</b> .....	<b>147</b>
KLÍČ K ŘEŠENÍ .....	147
REJSTRÍK .....	147
OBSAH.....	147