

Elektroenergetika

(podklady ke státnicím)

Komise: +ELE - 01

Dostupnost této prezentace na webových stránkách:

<http://home.zcu.cz/~laurenc/>

(sekce „Aktuálně“)

Výkon (energetických zařízení)

Jmenovitý (štitkový) výkon P_{jm} - největší výkon, který musí zařízení trvale dávat při dodržení jmenovitých hodnot svých základních parametrů

Maximální výkon P_{max} – nejvyšší výkon, na který lze zařízení trvale nebo krátkodobě přetížit

Optimální (hospodárný) výkon P_{opt} – výkon, při kterém zařízení dosahuje maximální účinnosti

Technické minimum P_{min} – nejmenší zatížení stroje, při němž může být v provozu bez ohrožení zařízení nebo stability provozu (významné zejména u parních kotlů – nemohou být trvale provozovány s nižším zatížením než P_{min} , buď s ohledem na stabilitu proudění vody ve výparníku nebo v důsledku nestabilního hoření paliva)

Výkon (energetických zařízení)

Instalovaný výkon P_i – součet jmenovitých výkonů jednotek v daném objektu na svorkách (započítávají se i jednotky v poruše a jednotky pro krytí vlastní spotřeby)

Dosažitelný výkon P_d – největší trvalý činný výkon, který výrobná může dosáhnout na svorkách při současném provozu všech strojů (může být nižší než instalovaný výkon např. v důsledku opotřebení trvalého rázu)

Pohotový výkon P_{poh} – největší činný výkon, jehož lze v určité době dosáhnout vzhledem k provozním podmínkám (proměnná veličina krátkodobé platnosti - $P_{poh} < P_d$)

Zatížení P – okamžitá hodnota nebo průměrná hodnota v určitém časovém úseku

Výkon (energetických zařízení)

Střední zatížení $P_{stř}$ – průměrná hodnota za sledované období T_o [h], jehož velikost musí být udána (den, rok...)

$$P_{stř} = \frac{1}{T_o} \int_0^{T_o} P(t) dt = \frac{A_{sv}}{T_o} \quad [W] \quad A_{sv} [Wh/T_o] - \text{výroba brutto}$$

Maximální zatížení P_{max} – největší zatížení, které se vyskytlo v určitém období (max. denní, roční...). Buď okamžitá hodnota nebo průměrná hodnota za časový interval

Záložní výkon soustavy P_z – výkon, který musí být v pohotovosti pro krytí plánovaných pravidelných odstávek, nepředvídaných poruch a nepředvídaných zvýšení spotřeby.

Záloha pro regulaci výkonu v ES se obvykle rozděluje:

- *záloha okamžitá (točivá)*; k dispozici v průběhu sekund (částečně zatížené bloky P/P_{jm} do 5 %)
- *záloha minutová (teplá)*; k dispozici v průběhu minut (1-15 min.)
- *záloha hodinová (studená)*; doba do nasazení asi 1 až 5 hod.

Práce (energetických zařízení)

Výroba elektřiny (hrubá, brutto, svorková) A_{sv} , za období T_o

$$A_{sv} = \int_0^{T_o} P(t) dt \quad [\text{např. kWh}/T_o]$$

Vlastní spotřeba elektrárny A_{vs} – množství elektřiny spotřebované elektrárnou v technologickém procesu výroby elektřiny za dané období (bez uvažování ztrát na blokových transformátorech).
Obvykle se vyjadřuje **součinitelem vlastní spotřeby k_{vs}** :

$$k_{vs} = \frac{A_{vs}}{A_{sv}} \cdot 100 \quad [1; \%$$

Orientační hodnoty k_{vs} (%) elektráren:

s roštovými kotli 4 – 6%

s práškovými granulačními kotli 6 – 10%

s fluidními kotli 8 -12%

s paroplynovým cyklem 3 – 5%

Práce (energetických zařízení)

Dodávka elektřiny na prahu elektrárny (čistá, netto) A_{pr}

$$A_{pr} = A_{sv} - A_{vs} = A_{sv} (1 - k_{vs}) = A_{sv} \cdot \eta_{vs} \quad [\text{např. kWh/T}_o]$$

kde η_{vs} [1] je účinnost vlastní spotřeby

$$\eta_{vs} = \frac{A_{sv} - A_{vs}}{A_{sv}} \quad [1]$$

Časové ukazatele

Doba využití instalovaného výkonu T_i [h]

(obvykle za rok, sledované období T_o [h])

$$T_i = \frac{A_{sv}}{P_i} \quad [h/T_o; kWh/T_o; kW] \quad P_i - \text{instalovaný výkon}$$

- má podstatný vliv na výrobní náklady elektřiny, které se s vyšším využitím instalovaného výkonu P_i snižují

Doba využití maximálního zatížení T_{max} [h]

$$T_{max} = \frac{A_{sv}}{P_{max}} = \frac{\int_0^{T_o} P(t) dt}{P_{max}} \leq T_o \quad [h/T_o; kWh/T_o; kW]$$

P_{max} – maximální zatížení

Účinnost energetických zařízení

Základní bilance energetických zařízení

$$\sum P_{vstup} = \sum P_{využ} + \sum P_{ztrac} \quad [W]$$

P_{vstup} - vstupní tok energie (příkon)
 $P_{využ}$ - využitelný tok energie (výkon)
 P_{ztrac} - ztracený výkon

Po vydělení rovnice vstupním příkonem $\sum P_{vstup}$ získáme tvar

$$1 = \eta + \sum \zeta$$

η – účinnost energetického systému
 $\sum \zeta$ – suma poměrných ztrát systému

Energetická náročnost systému

$$n = \frac{P_{vstup}}{P_{využ}} = \frac{1}{\eta} \quad [1]$$

Účinnost energetických zařízení

Ukazatel *energetické náročnosti systému* se používá jako **měrná vstupní energie (tepla) na výrobu jednotky využité energie (elektriny, tepla)**:

$$q = \frac{P_{tep}}{P_{el}} \quad [1]$$

$$q = \frac{P_{tep} \cdot 3600}{P_{el}} \quad [\text{kJ/kWh}]$$

(při teoretických rozborech)

(v technické praxi)

P_{tep} – tepelný příkon [kJ], P_{el} – elektrické zatížení [kJ = kWh/3600]

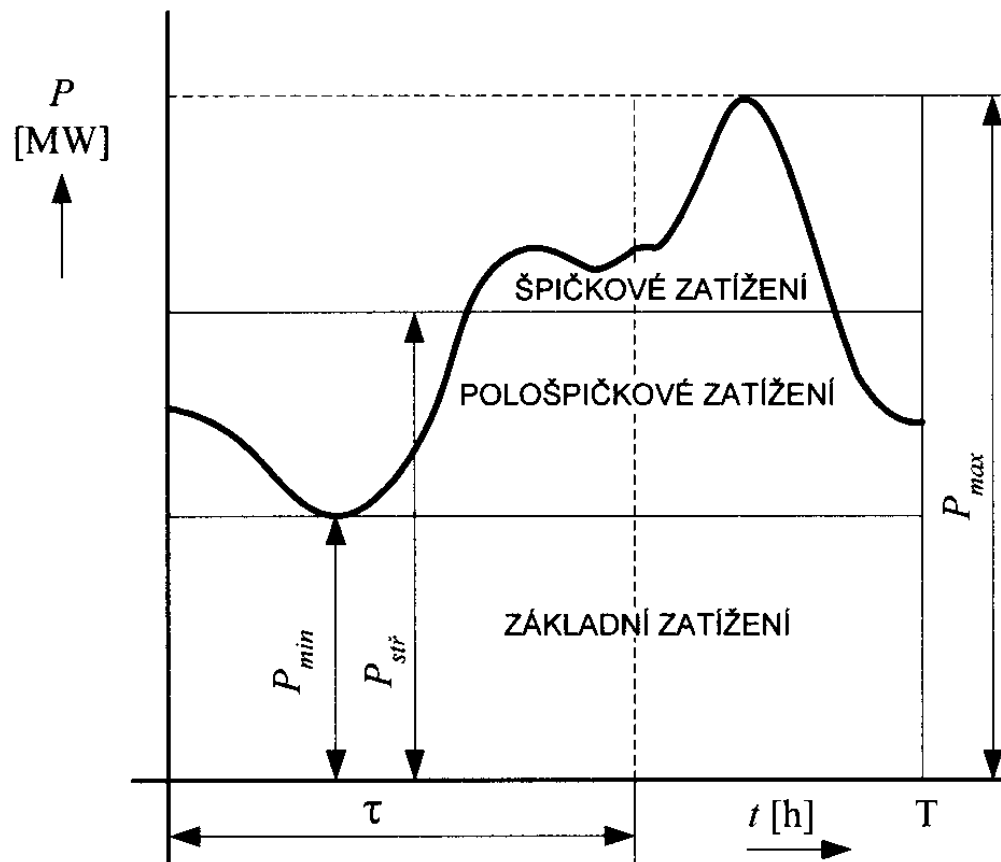
- může být definována buď jako okamžitá hodnota poměru tepelného příkonu ku elektrickému zatížení nebo jako poměr tepelné energie dodané do systému ku odevzdané práci za určitou dobu.

Měrná spotřeba tepla ukazuje relativní spotřebu primárního paliva a je jedním z důležitých ukazatelů technické úrovně energetické výroby.

Diagramy zatížení

- **Diagramy zatížení** udávají informace o změnách zatížení jednotlivých spotřebitelů a výkonech elektráren i celé elektrizační soustavy
- **Diagram zatížení elektrárny** se sestavuje podle požadavků na výkon elektrárny při uvažování ztrát v elektrických vedeních, transformátorech a vlastní spotřebě elektrické energie elektrárny
- **Diagram zatížení elektrizační soustavy** je součtem diagramů výkonů jednotlivých elektráren, který je upraven o předávané výkony po mezisystémových vedeních

Denní diagram zatížení

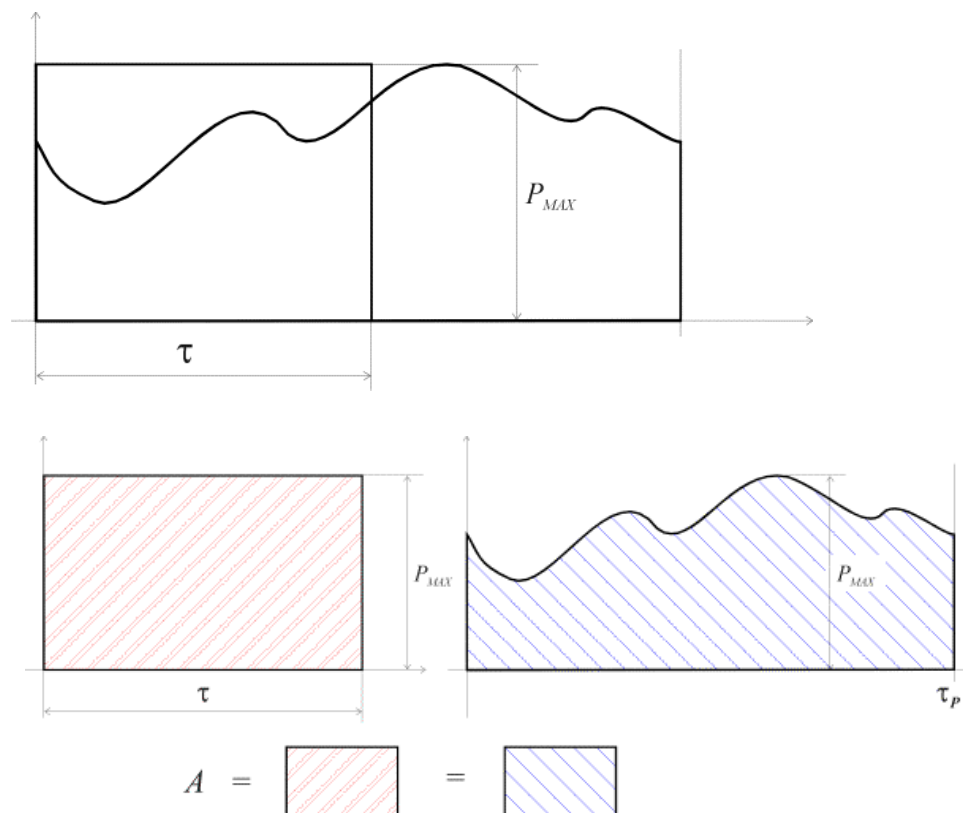


- grafické znázornění změn výkonu na čase

Doba využití maxima τ - doba po kterou bychom vyráběli (odebírali) elektrickou energii při konstantním výkonu rovném maximu diagramu zatížení tak, abychom vyrobili (odebrali) stejné množství energie, jako kdybychom vyráběli (odebírali) podle diagramu zatížení.

$$\tau \cdot P_{MAX} = \int_0^T P(t) dt = A = \sum_i P_i t_i$$

(pozn.: v předchozích vztazích doba využití maxima τ označena jako T_{max})

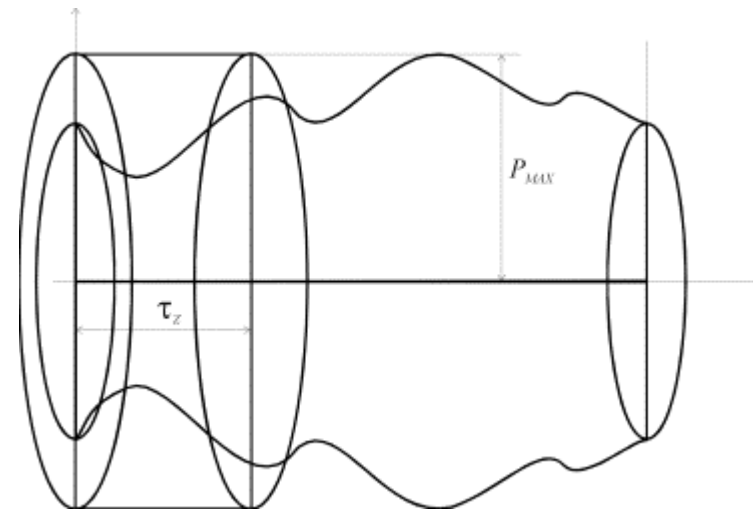


Doba plných ztrát τ_z - doba po kterou bychom vyráběli (odebírali) elektrickou energii při konstantním výkonu rovném maximu diagramu zatížení tak, že bychom měli stejné Jouleovy ztráty energie (ΔP_J), jako kdybychom vyráběli (odebírali) podle diagramu zatížení.

$$\tau_z \cdot P_{MAX}^2 = \int_0^T P(t)^2 dt = \sum_i P_i^2 t_i$$

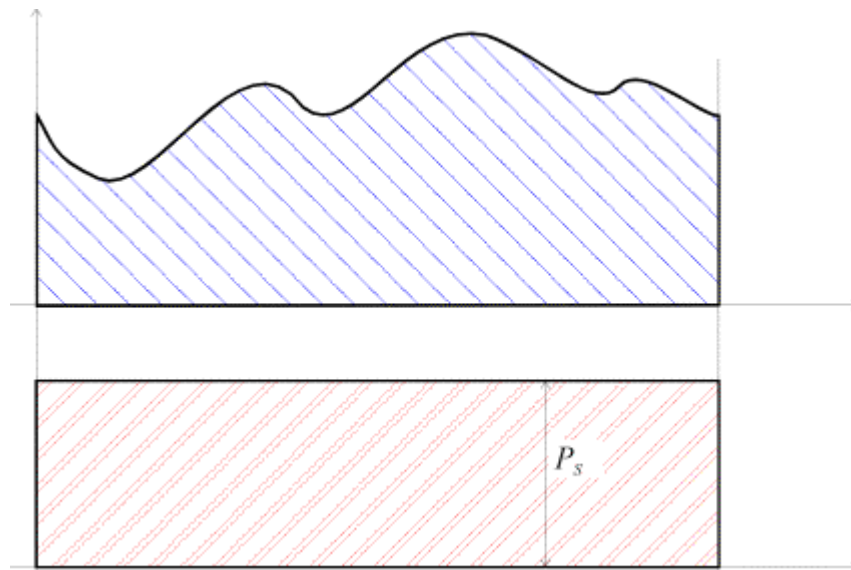
$$|U| = konst., \quad P \approx U \cdot I \Rightarrow P \approx I \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int_0^T P(t)^2 dt \approx R \int_0^T i(t)^2 dt = \Delta P_J$$



Střední výkon - průměrná hodnota výkonu vyráběné (odebírané) elektrické energie za dobu provozu ($\tau_p=T$).

$$P_S \cdot \tau_P = \int_0^T P(t) dt = A = \sum_i P_i t_i = \tau \cdot P_{MAX}$$



Energetická náročnost - poměr doby plných ztrát a doby využití maxima
 T_z/T

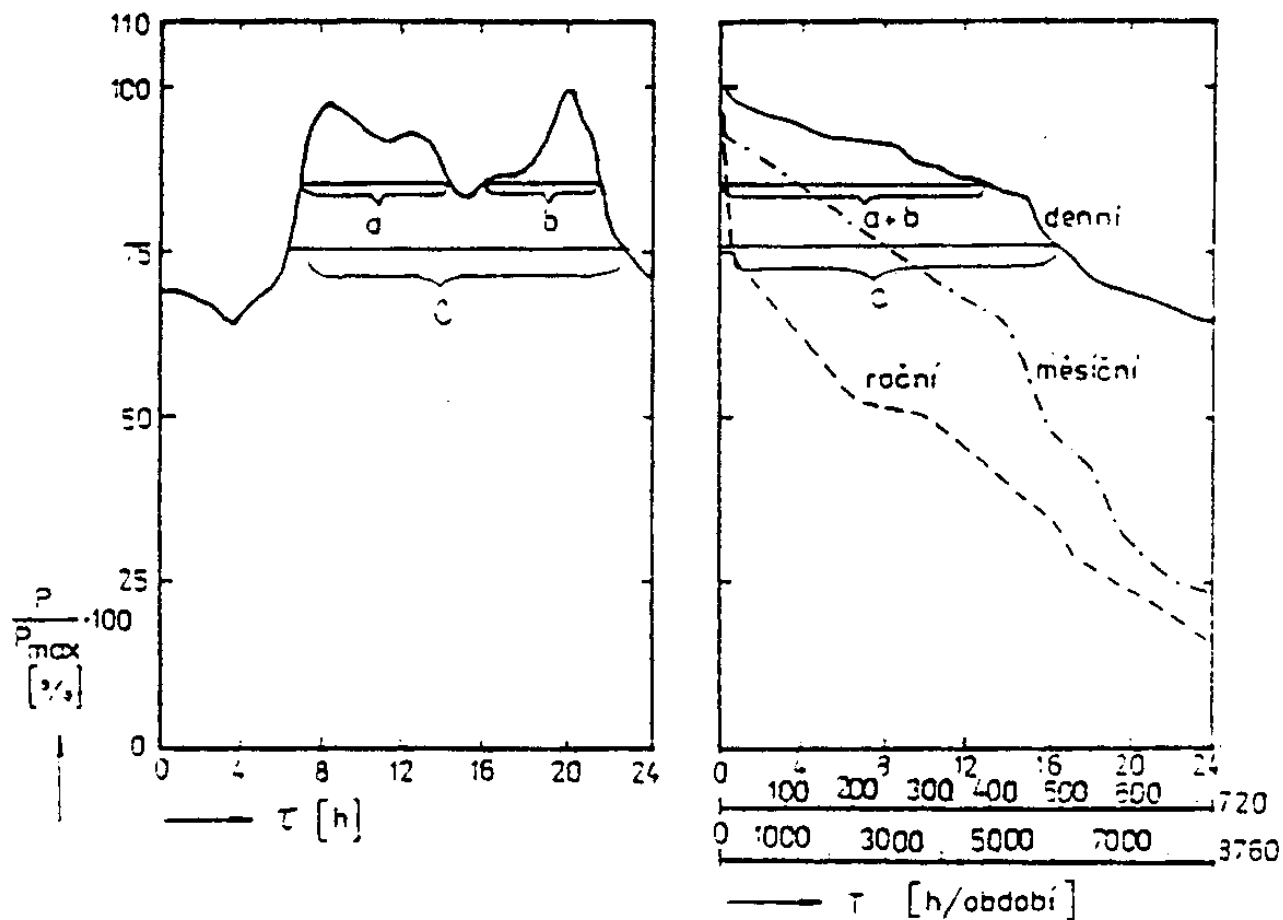
$$0 < T_z \leq T \leq T = T_p \rightarrow 0 < T_z / T \leq 1$$

Pokrývání diagramu zatížení – strategie a taktika volby elektrárenských bloků při výrobě elektrické energie

Volíme obvykle dle schopnosti a ekonomické náročnosti regulace bloky v pořadí (od špatně regulovatelných levných k dobře regulovatelným a drahým):

1. jaderné
2. průtočné vodní (větrné, sluneční a další nekonvenční)
3. klasické tepelné
4. přečerpávací a akumulární vodní

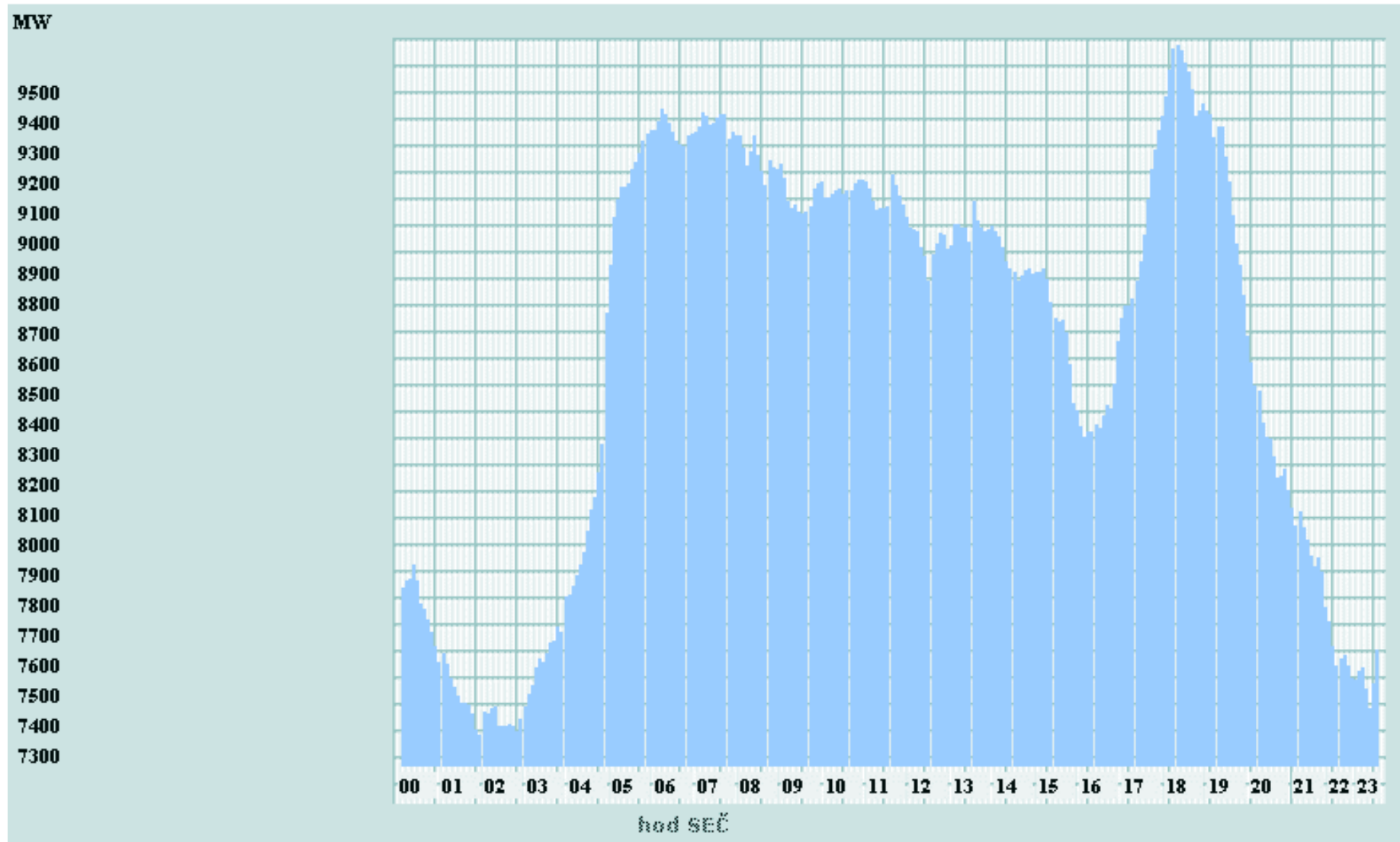
Diagram trvání zatížení



- ukazuje jak dlouho zatížení určité velikosti v daném časovém období trvalo
- konstruuje se z diagramu zatížení (zatížení P se obvykle vztahuje k maximálnímu zatížení P/P_{max})
- vhodný pro projektové účely a zpracování technicko-ekonomických studií

Denní diagramu zatížení

Provoz
Graf dne 28.03.2007



maximum: 9447 MW v 19:05:00hod
minimum: 7399 MW v 01:55:00hod

Dle druhu produktů se člení tepelné energetické výroby na

- **Elektrárny** (kondenzační) – vyrábí elektřinu
- **Teplárny** (parní, plynové, paroplynové) – dodávají elektřinu a teplo
– KOGENERACE (kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie)
- **Výtopny** – vyrábí jen tepelnou energii

Dle funkce v ES lze dělit elektrárny na

- základní
- pološpičkové
- špičkové
- samostatné (nespolupracují s ES)

Otázky

Vysvětlete pojem „instalovaný výkon“ energetických zařízení

Vysvětlete pojem „vlastní spotřeba elektrárny“ (součinitel vlastní spotřeby).

Vysvětlete pojem „doba využití maximálního zatížení (maxima)“

Vysvětlete pojem „doba plných ztrát“

Vysvětlete pojem „střední výkon (zatížení)“

Popište diagram zatížení elektrizační soustavy

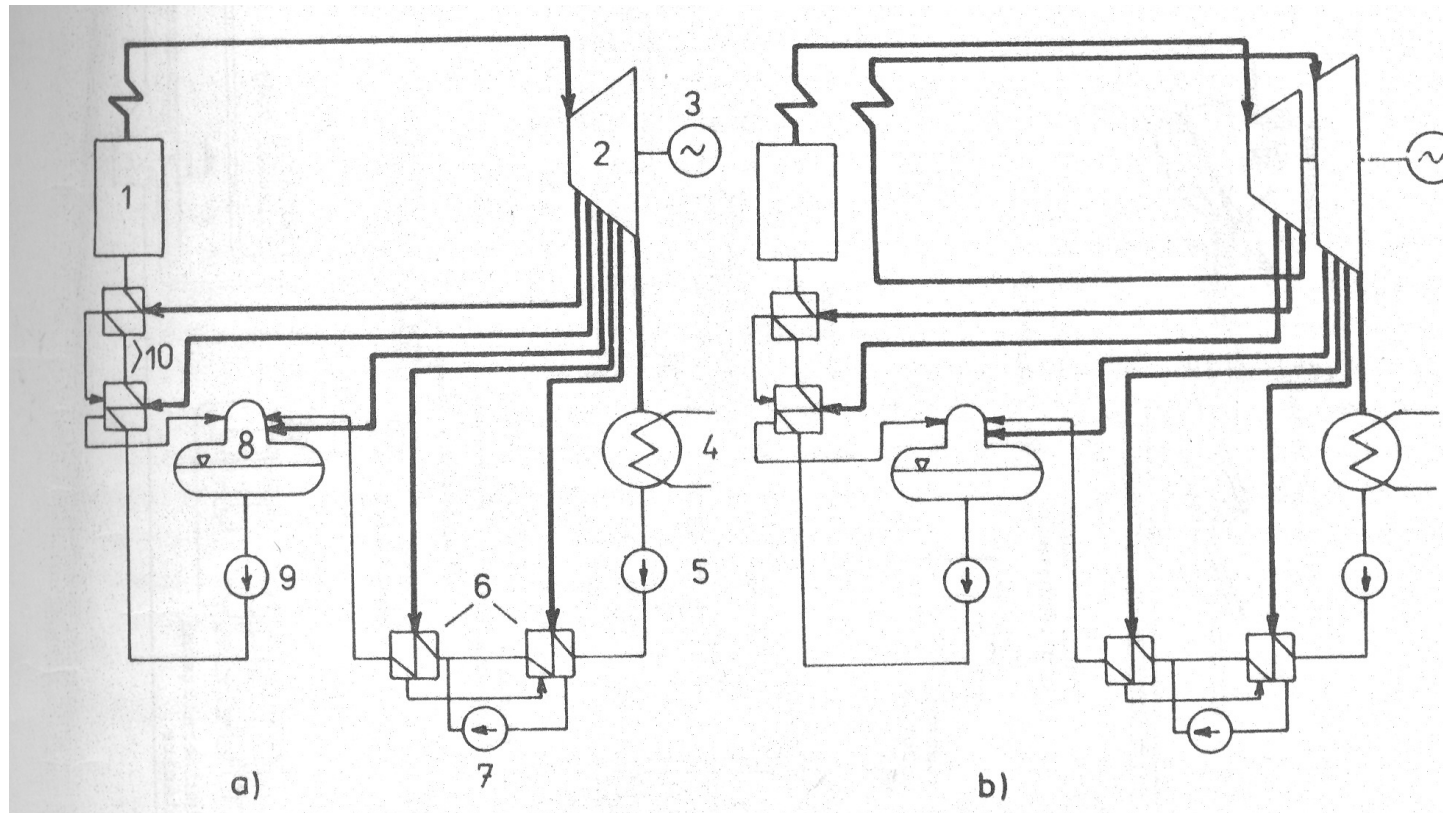
Popište způsob (strategii) pokrývání diagramu zatížení elektrizační soustavy

Popište jak vypadá a na základě čeho se konstruuje diagram trvání zatížení

Uveďte na jaké typy se dělí elektrárny z hlediska pokrývání diagramu zatížení elektrizační soustavy. - základní, pološpičkové a špičkové

Uveďte jak se dělí energetické výroby z hlediska jejich výsledného produktu přeměny energie. - elektrárny (kondenzační), teplárny - kogenerace (parní, plynové, paroplynové), výtopy

Základní principiální schéma tepelné elektrárny



a) základní schéma tepelné elektrárny : 1 – kotel, 2 – turbína, 3 – generátor, 4 – kondenzátor, 5 – kondenzátní čerpadlo, 6 – nízkotlaké regenerativní ohříváky (NTO), 7 – čerpadlo, 8 – napájecí nádrž vody, 9 – napájecí čerpadlo, 10 – vysokotlaké reg. ohříváky (VTO)

b) tepelná elektrárna s přehříváním páry

Kotle pro výrobu elektřiny

- s *přirozeným oběhem*, *nuceným oběhem* (oběhové čerpadlo) a *průtočné* (nejčastěji používané – bez oběhu vody ve výparníku a bez bubnu)

Složky kotle (parního generátoru):

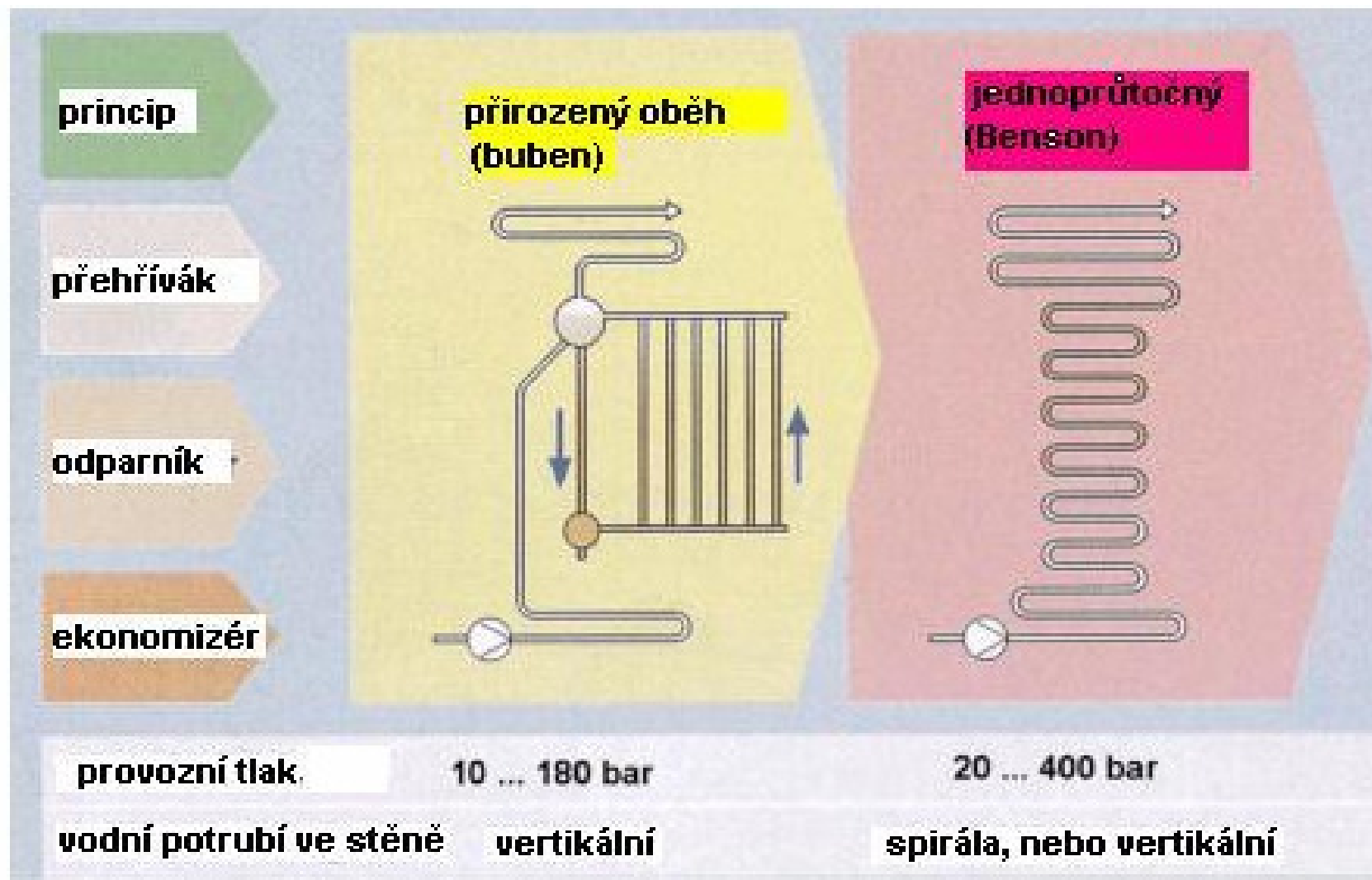
ekonomizér – první výměník tepla umístěný v prostoru nízkoteplotních spalin na výstupu z kotle - ohřev napájecí vody

výparník – odpařuje ohřátou vodu alespoň na nasycenou páru

přehřívák – využívá k výrobě přehřáté páry nejvyšší teploty spalin v prostoru kotle

přihřívák – velká množství páry se v soustavách ohříváků opakovaně ohřívají spalinami, aby se uvolnila další práce a dosáhlo se vyšší účinnosti v následném středotlakém dílu parní turbíny

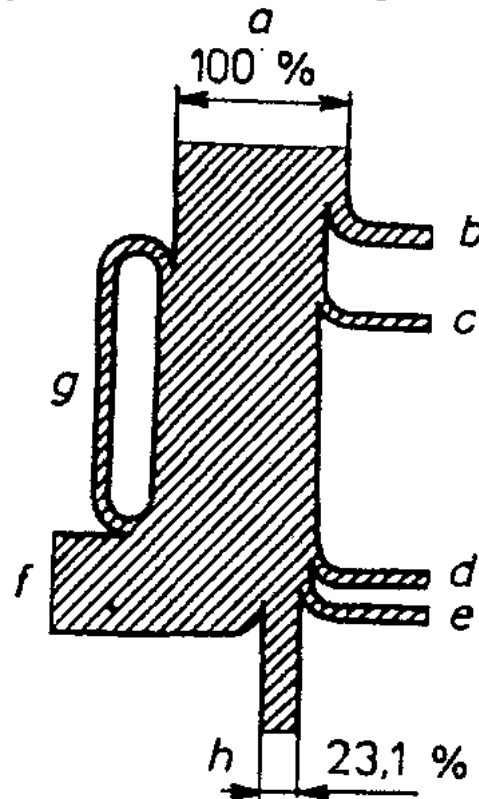
Schematický nákres kotle s přirozeným oběhem a průtočného kotle



Tepelné ztráty z parního generátoru (kotle):

- *ztráty teplem spalin* – závisí na teplotě spalin, na směsi se vzduchem, složení paliva a rozsahu zanesení kotle
- *ztráty chemickým nedopalem* s hořlavinou ve spalinách
- *ztráty mechanickým nedopalem* s hořlavinou v tuhých zbytcích – uhlík v popelu a popílku
- *ztráty teplem přes popel lože a popílek z granulačního kotle a škváru a popílek z výtavného kotle*
- *ztráty vedením a sáláním* – závisí na kvalitě izolace parního generátoru

Diagram ztrát v parní elektrárně



Obr. 453. Sankeyův diagram ztrát v parní elektrárně

a – teplo v palivu; *b* – ztráty v kotelně (14 %); *c* – ztráty v potrubí (0,9 %);
d – mechanické ztráty v turbíně (0,8 %);
e – ztráty v alternátoru (1 %);
f – ztráty v kondenzátoru (60,2 %);
g – teplo kondenzátu (3,2 %); *h* – využitě teplo přeměněné v elektrickou energii

Parní turbíny

-přeměna tepelné energie páry na mechanickou práci

Dělení dle pracovní látky:

- *Parní turbíny na přehřátou páru* – vstupní teplota 400 až 650 °C, celková účinnost výroby elektřiny (včetně parního kotle) je 28-42%
- *Parní turbíny na sytou resp. mokrou páru* – jaderné elektrárny
- *Plynové turbíny* – pracovní látkou jsou spaliny plyných nebo kapalných paliv se vstupní teplotou do turbíny 600 až 1400 °C a výstupní teplotou 450 až 600 °C, účinnost výroby elektřiny 28-38 %

Dělení dle počtu těles:

- *Jednotělesové* turbíny pro menší výkony
- *Vícetělesové* turbíny s částí vysokotlakou, nízkotlakou, popř. středotlakou, pro větší výkony.

Dělení dle tlaku výstupní páry:

- *Turbíny kondenzační* – pára expanduje do vakua na tlak 0,002-0,01 MPa, (60-80 °C). Kondenzační teplo emisní páry je ztraceno a odvádí se do okolí chladícím systémem (chladicí věže - uzavřený chladicí systém, vodní zdroj - otevřený chladicí systém)
- *Turbíny protitlaké* – výstupní tlak je poměrně vysoký (0,11-0,6 MPa) – pára se dá použít pro topné nebo technologické účely (v kondenzátoru není vakuum, funguje jako ohřívák vody na vytápění)

Dělení dle odběrů páry z turbíny:

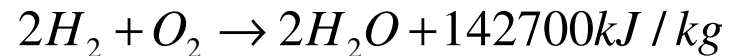
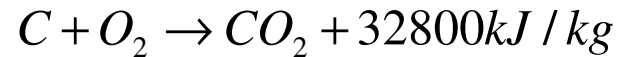
- *Turbína s neregulovanými odběry* – pára se odebírá na několika místech z turbíny a ohřívá napájecí vodu kotle (regenerativní ohřev) – zvětšuje se účinnost tepelného oběhu.
- *Turbína s regulovanými odběry* – pára se odebírá jedním až max. třemi odběry s vhodným tlakem, kterými se dodává teplo spotřebitelům. Odběr páry se reguluje podle požadavků spotřeby.

Princip spalování

Spalování – rychlé chemické spojení kyslíku se spalitelnými složkami paliva

- tři významné chemické prvky schopné spalování – uhlík, vodík, síra (síra má obvykle okrajový význam jako zdroj tepla)

Uhlík a vodík se při spalování spojují s kyslíkem a přecházejí na CO₂ a H₂O dle následujících exotermických reakcí:



Výhřevnost:

Tuhá paliva: hnědé uhlí $Q_N = 8-20$ MJ/kg, černé uhlí $Q_N = 33-38$ MJ/kg

Kapalná paliva: ropa, topné oleje, nafta... $Q_N = 40-45$ MJ/kg

Plynná paliva: zemní plyn $Q_N = 50-60$ MJ/kg

Vodní pára

Termodynamické vlastnosti vody a vodní páry jsou definovány stavovými a tepelnými veličinami.

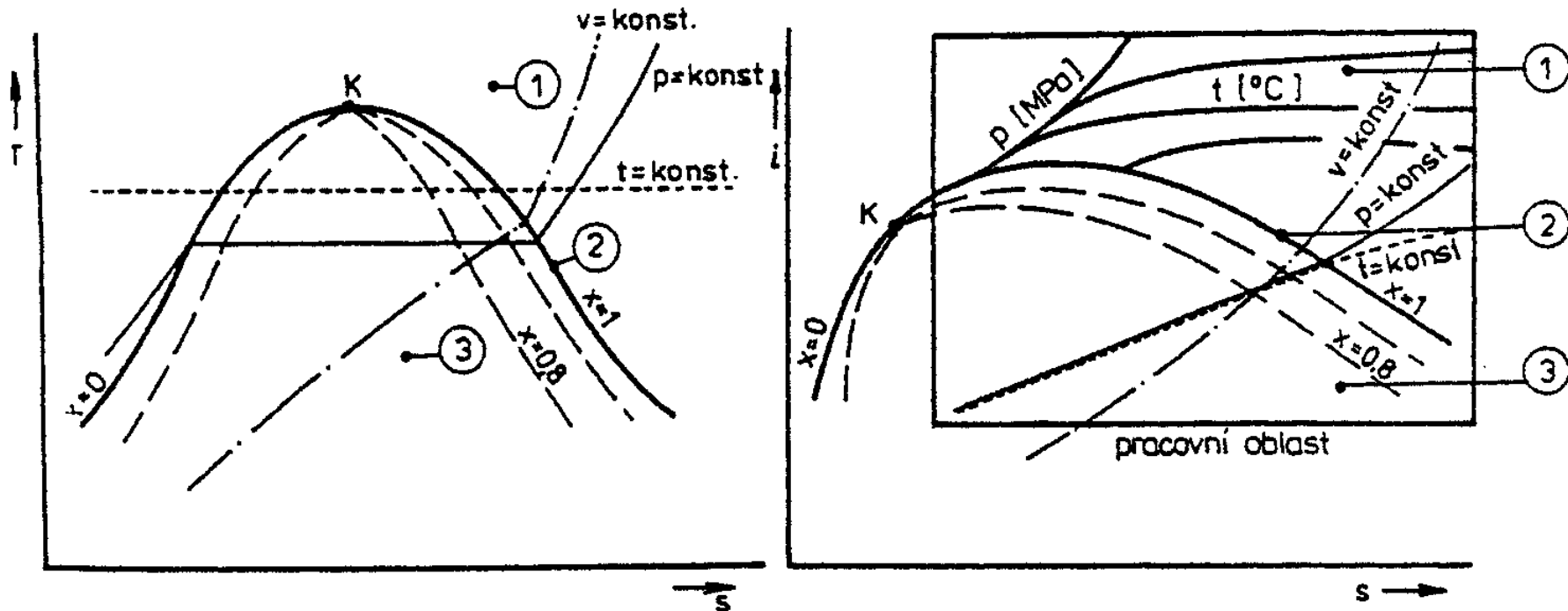
Stavové veličiny

- teplota t (°C) resp. T (K)
- tlak p (MPa)
- měrný objem v (m³/kg) respektive hustota $\rho=1/v$ (kg/m³)
- u mokré páry suchost x (kg/kg) resp. vlhkost $(1-x)$ (kg/kg)

Tepelné veličiny

- měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku c_p (kJ/kg K)
- měrná tepelná kapacita za konstantního objemu c_v (kJ/kg K)
- entalpie i (kJ/kg)
- entropie s (kJ/kg K)
- tepelná vodivost λ (W/m K)

Diagram T-s a i-s



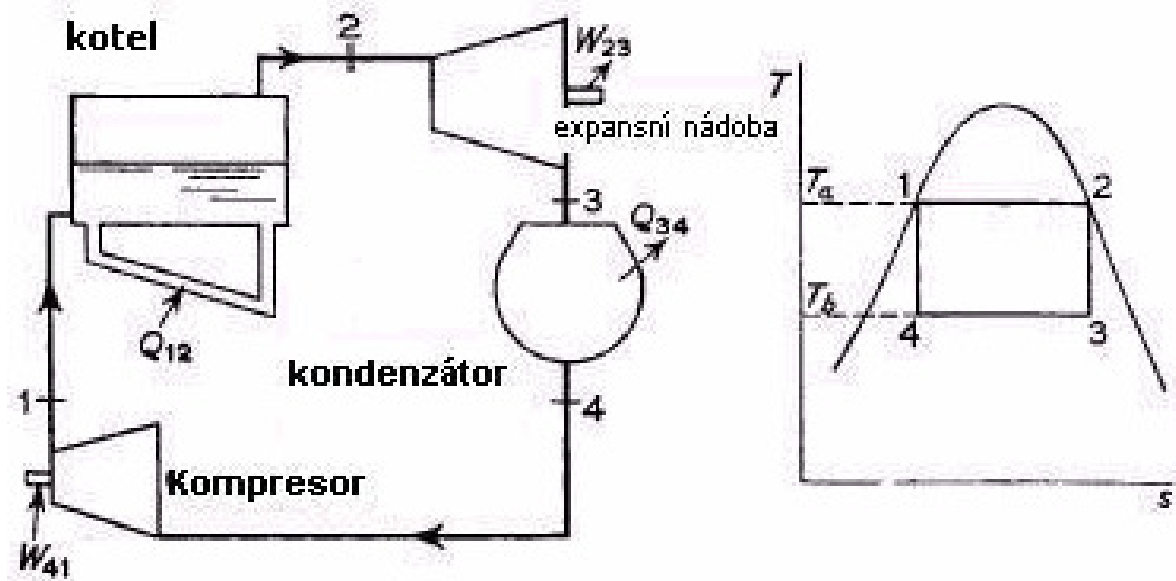
1- oblast přehřáté páry, 2- suchá sytá pára (sytá pára bez vlhkosti), 3- mokrá pára

- levá mezní křivka vyjadřuje stavy vroucí kapaliny ($x=0$)

- pravá mezní křivka platí pro stavy syté páry bez vlhkosti ($x=1$)

K – kritický bod – nejvyšší teplota, kterou může dosáhnout kapalná fáze; při vyšší teplotě existuje látka pouze v plynné fázi

Ideální Carnotův cyklus



(1-2) – izotermické odpaření vody při teplotě ohřevu T_a ($p=\text{konst.}$)

(2-3) – izoentropická expanze páry – vykonává práci v turbíně

(3-4) – částečná kondenzace páry při tep. T_b odvodu tepla ($p=\text{konst.}$)

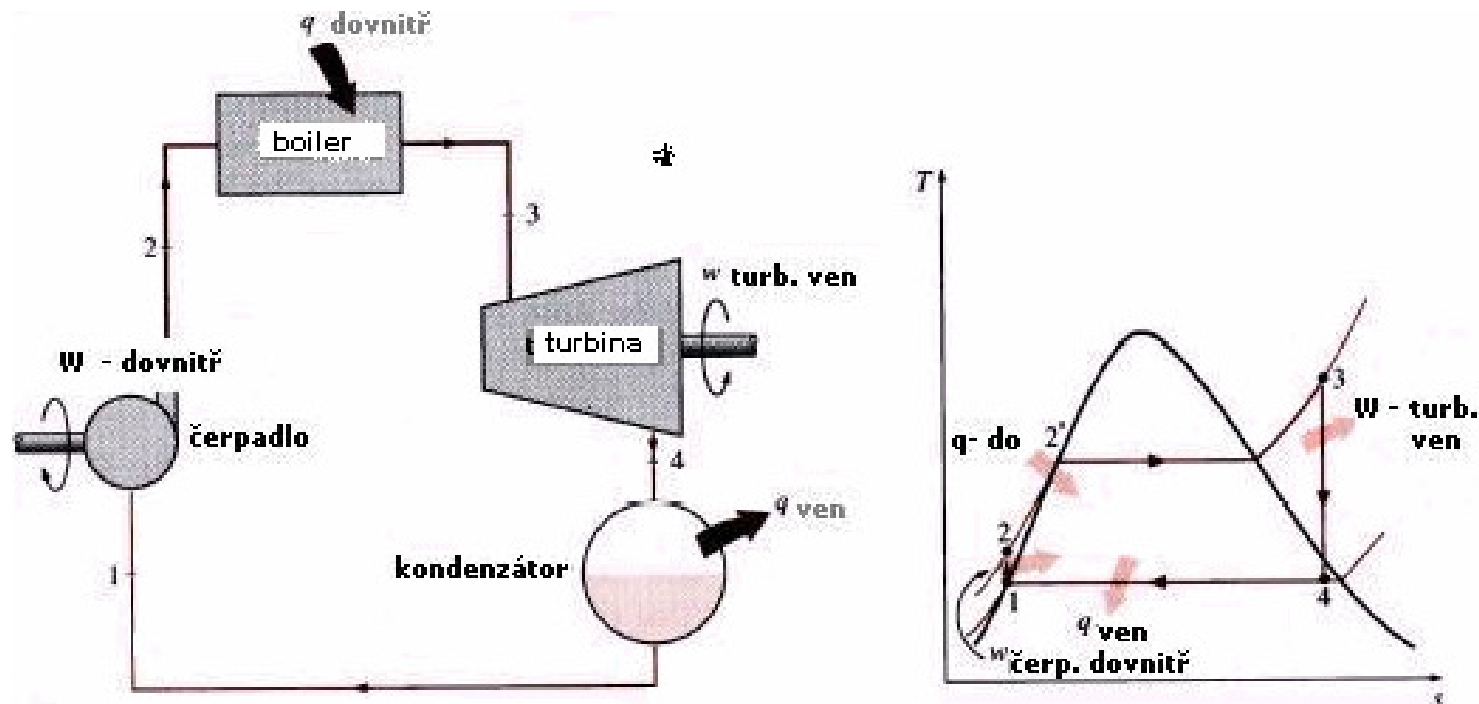
(4-1) – izoentropické stlačení páry kompresorem

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_b}{T_a}$$

- největší tepelná účinnost ze všech ostatních oběhů – nelze prakticky realizovat (bylo by těžké účinně regulovat pochod kondenzace tak, aby se zastavil ve stavu č.4 a potom provádět kompresi velmi mokré páry)

- **tepelná účinnost** se zvyšuje s růstem průměrné teploty, kvůli níž se do systému dodává teplo, nebo s poklesem průměrné teploty, při němž se teplo ze systému odevzdává

Jednoduchý ideální Rankinův cyklus parních elektráren



1-2 Isentropická komprese kapaliny v čerpadle

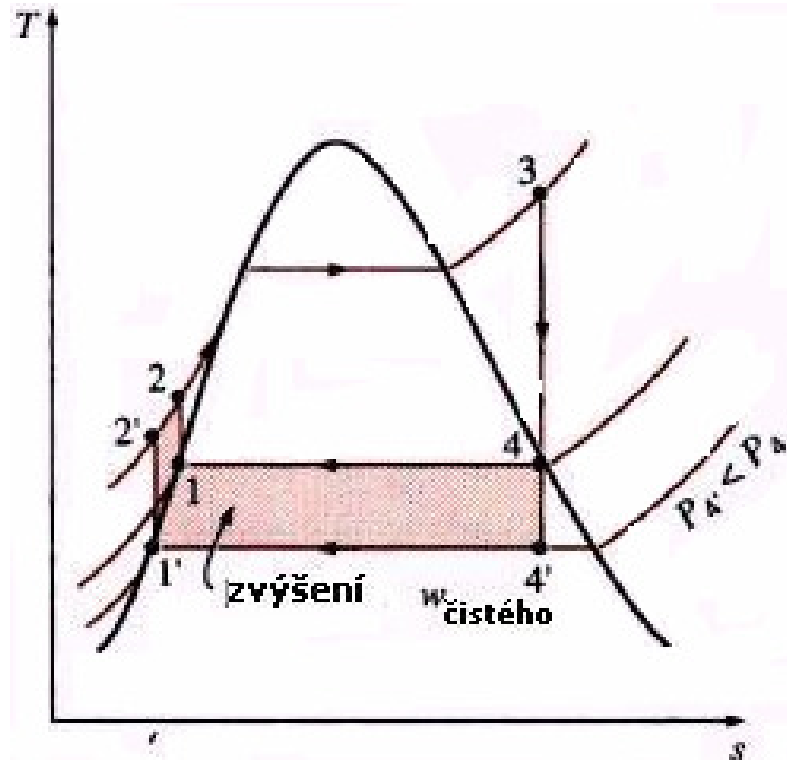
2-3 ohřev na bod varu, izotermické odpařování a přehřátí páry ($p=\text{konst.}$)

3-4 Isentropická expanze v turbině

4-5 kondenzace páry - odvod tepla ($p=\text{konst.}$)

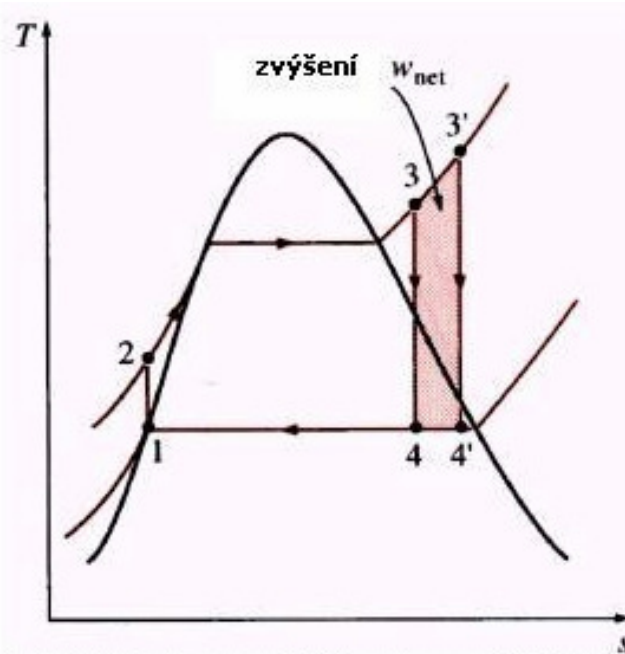
Skutečný cyklus se liší od ideálního jako důsledek tření v kapalině způsobující tlakové ztráty (v kotli, v kondenzátoru) a nežádoucích ztrát tepla z páry do okolí.

Zlepšení tepelné účinnosti Rankinova cyklu: Snížení tlaku kondenzátoru



- vyšrafovaná oblast představuje vzrůst čistého pracovního výkonu
- požadavky na vstupní teplo se zvyšují velmi málo (plocha pod křivkou 2'-2)

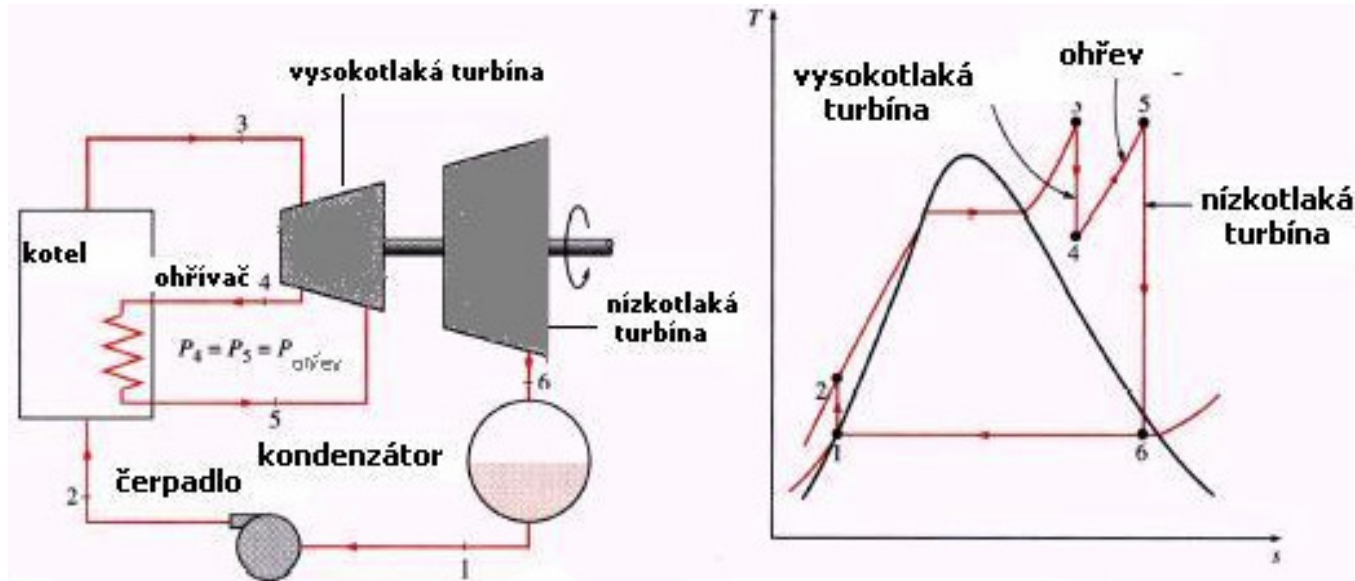
Zlepšení tepelné účinnosti Rankinova cyklu: Přehřátí páry na vysoké teploty



Obr.2.5: Vliv přehřátí páry za vyšších teplot na ideální Rankinův cyklus

- dochází jak ke zvýšení čisté práce, tak tepelného příkonu (oblast pod křivkou 3-3' představuje zvýšení tepelného příkonu)
- celkovým účinkem je však zvýšení tepelné účinnosti, neboť roste průměrná teplota, za které se dodává teplo

Ideální Rankinův cyklus ohřevu



Proces expanze ve dvou etapách:

V první etapě (vysokotlaká turbína) pára expanduje isoentropicky při středním tlaku a vrací se zpět do kotle, kde se ohřeje při konstantním tlaku, obvykle na vstupní teplotu první etapy turbíny.

Ve druhé etapě potom pára expanduje isoentropicky (nízkotlaká turbína) na kondenzátorový tlak. (zlepšení účinnosti cyklu o 4 až 5 % při začlenění jednoho ohřevu)

Regenerace

- regenerace se provádí odběrem páry na různých bodech turbínou, která se využívá k ohřevu napájecí vody v regenerátoru (ohříváči napájecí vody)

- **zlepšuje účinnost cyklu**

- napomáhá k odvzdušňování napájecí vody (odstranění vzduchu pronikajícího do kondenzátoru - omezení rizika koroze v kotli)

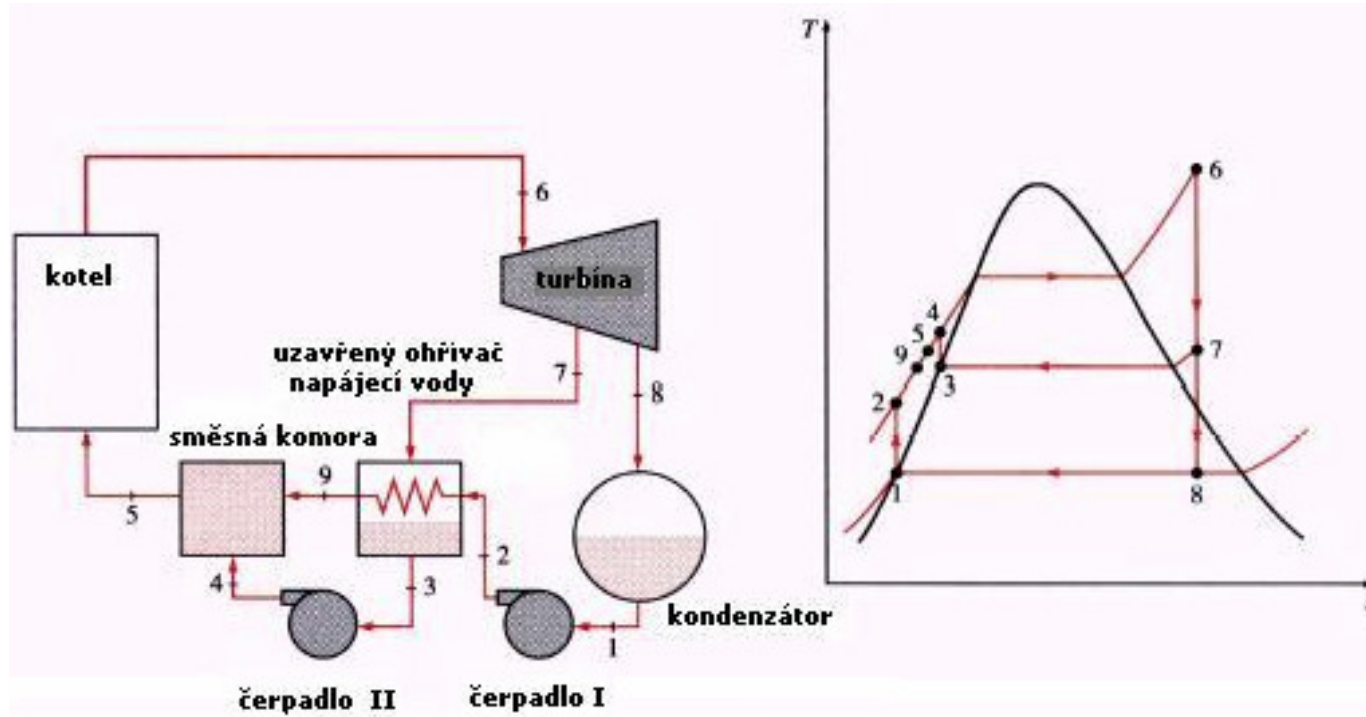
- napomáhá k regulaci velkých průtokových objemů páry v konečných etapách turbíny (v důsledku velkých měrných objemů při nízkých tlacích)

Ohříváč napájecí vody (regenerátor) – výměník tepla

- *otevřený ohříváč* – teplo přechází z páry do napájecí vody mísením dvou proudů tekutin

- *uzavřený ohříváč* – bez mísení

Ideální Rankinův cyklus regenerace s uzavřeným ohřivačem napájecí vody



- v ideálním uzavřeném ohřivači se napájecí voda ohřeje na výstupní teplotu vypouštěné páry (nasycená kapalina při výstupním tlaku)
- kondenzovaná pára se přečerpává (čerpadlo II) do linky napájecí vody nebo přechází do dalšího ohřivače

Otázky

Vyjmenujte základní prvky parního generátoru (kotle) – ekonomizér, výparník, přehřívák, přihřívák

Vyjmenujte jednotlivé složky tepelných ztrát v kotli

Jak velká je přibližně teplota páry na vstupu do turbíny na přehřátou páru?

– 400 až 650 °C

Jaká je přibližně teplota spalin na vstupu do plynové turbíny v porovnání s turbínou na přehřátou páru? – přibližně dvojnásobná (600 až 1400 °C)

V čem spočívá rozdíl mezi turbínou kondenzační a turbínou protitlakou?

Jaký je účel odběru páry u turbín s neregulovanými odběry?

Jaký je účel odběru páry u turbín s regulovanými odběry?

(Popište ideální Carnotův cyklus páry)

Na čem závisí tepelná účinnost ideálního Carnotova cyklu páry?

- na rozdílu dvou teplot T_a a T_b mezi nimiž celý cyklus probíhá – odtud plyne obecně platný poznatek, jak pro ideální cykly, tak pro skutečné cykly: tepelná účinnost se zvyšuje s růstem průměrné teploty při níž se do systému dodává teplo a nebo s poklesem průměrné teploty, při níž se teplo ze systému odevzdává.

Otázky

(Popište ideální Rankinův cyklus ohřevu)

Jak lze zlepšit tepelnou účinnost Rankinova cyklu? – přehřátím páry na vysoké teploty a snížením tlaku v kondenzátoru

Vysvětlete v čem spočívá princip regenerace v parních elektrárnách.

-praktická regenerace v parních elektrárnách se uskutečňuje odběrem páry na různých místech turbínou. Tato pára, která by mohla vykonat více práce další expanzí v turbíně se místo toho využívá k ohřevu napájecí vody. Zařízení, kde se napájecí voda při regeneraci ohřívá, se nazývá regenerátor, nebo ohříváč napájecí vody. Regenerace zlepšuje účinnost cyklu, napomáhá k odvodušňování napájecí vody a napomáhá také k regulaci velkých průtokových objemů páry v konečných etapách turbíny.

Vysvětlete pojem kogenerace.

- obecně je kogenerace výrobou více než jedné formy užitečné energie (jako je provozní teplo a elektrická energie) ze stejného energetického zdroje. Jako energetického cyklu se může v kogeneračním závodě využít jednak cyklu parní turbíny (Rankinova), jednak cyklu plynové turbíny nebo kombinovaného cyklu. Výroba tepla (pro procesní páru nebo rozvody tepla) a elektrické energie zvyšuje účinnost paliva (zžitkování paliva) přibližně na 70 – 90 %.

Jaderné elektrárny

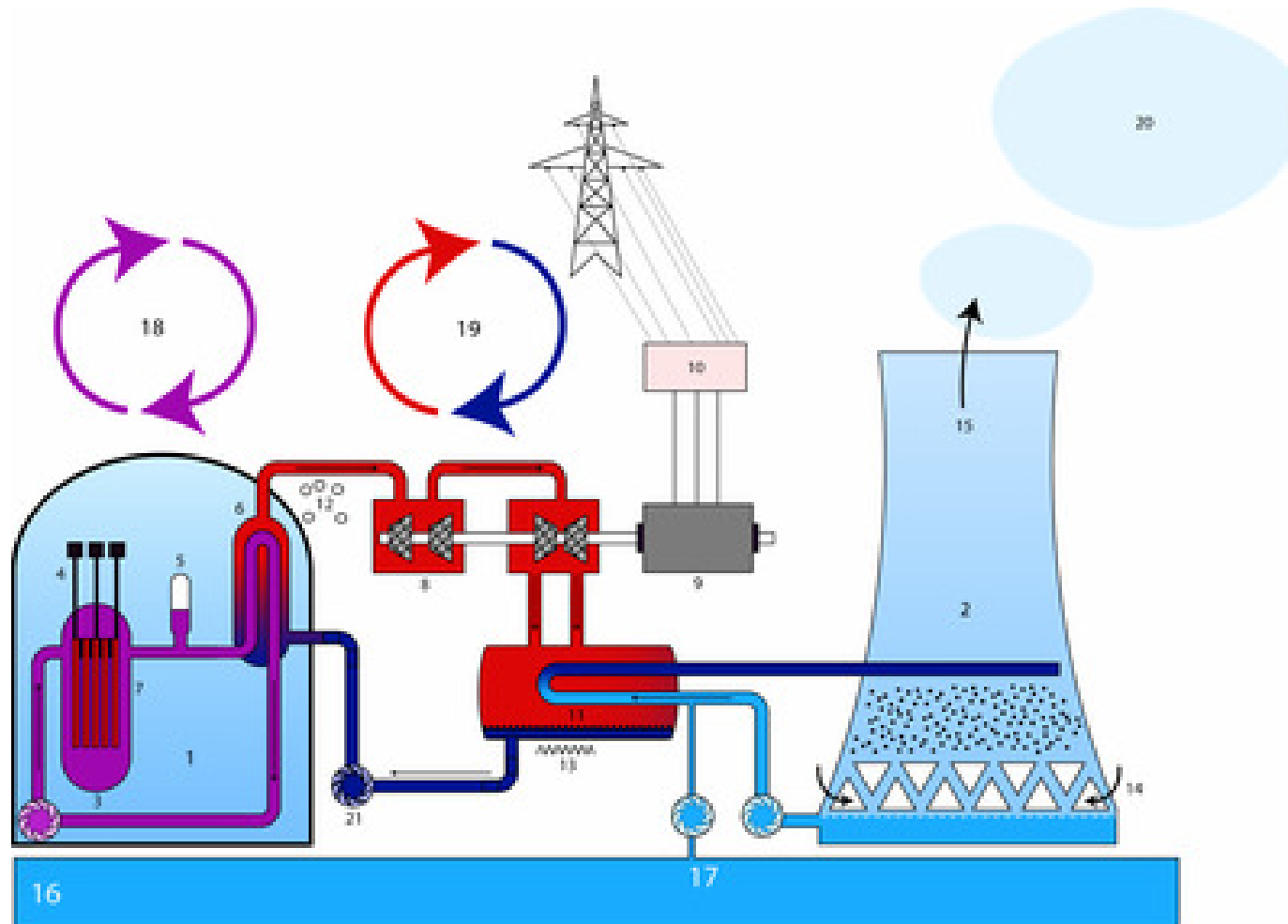


Schéma nejběžnějšího typu jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

1. Reaktorová hala, uzavřená v nepropustném kontejnmentu.
2. Chladicí věž
3. Tlakovodní reaktor
4. Řídící tyče
5. Kompenzátor objemu
6. Parogenerátor. V něm horká voda pod vysokým tlakem vyrábí páru v sekundárním okruhu
8. Turbína - vysokotlaký a nízkotlaký stupeň
9. Elektrický generátor
10. Transformační stanice
11. Kondenzátor sekundárního okruhu
14. Přívod vzduchu do chladicí věže
15. Odvod teplého vzduchu a páry komínovým efektem
16. Oběhové čerpadlo primárního okruhu
17. Napájecí čerpadlo chladicího okruhu
18. Primární okruh (voda pouze kapalná pod vysokým tlakem)
19. Sekundární okruh (červeně značena pára, modře voda)
20. oblaka vzniklá kondenzací vypařené chladicí vody
21. oběhové čerpadlo sekundárního okruhu

Tlakovodní reaktor

**PWR (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor),
VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)**

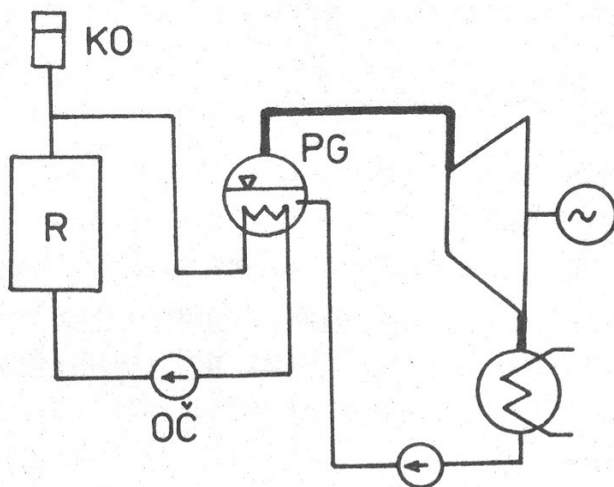
- nejrozšířenější typ (57% všech světových energetických reaktorů)
- **primární a sekundární okruh** – radioaktivní voda proudí pouze v primárním okruhu a v parogenerátoru předává teplo do sekundárního oběhu - vysoká bezpečnost

Palivo: obohacený uran izotopem ^{235}U (obohacení na 3,1% - 4,4%) ve formě tabletek oxidu uraničitého

Moderátor + chladivo: upravená voda

Typické parametry VVER 1000: teplota vody primárního okruhu na vstupu do parogenerátoru kolem $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, velký tlak vody $15,7\text{ MPa}$

Dvouokruhová JE



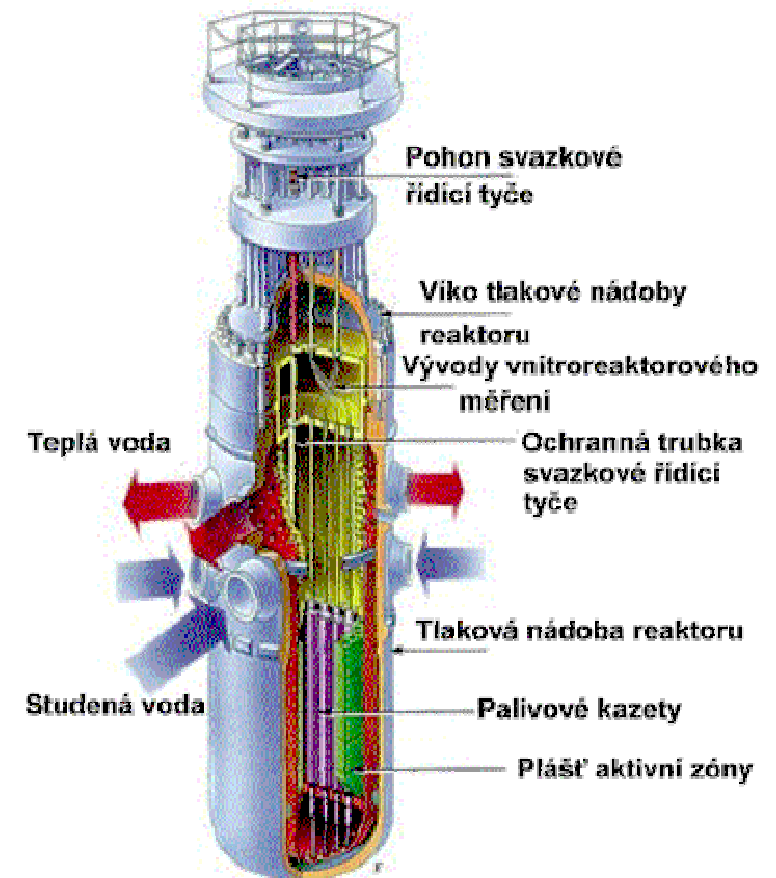
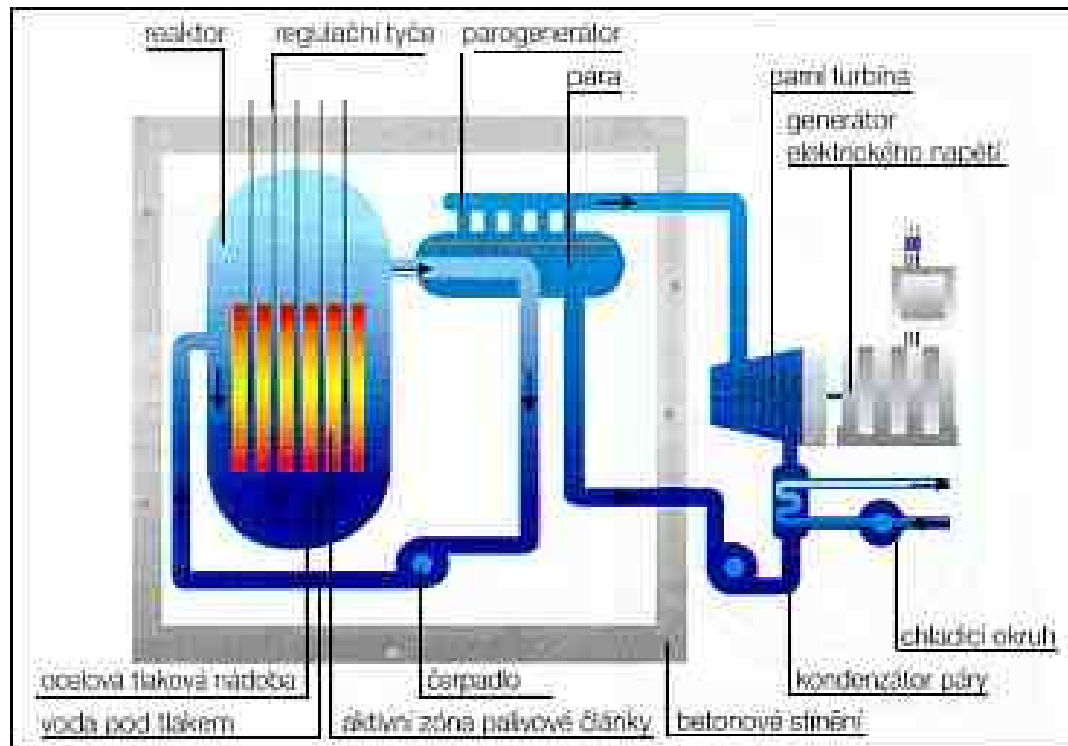
R – tlakovodní reaktor

KO – kompenzátor objemu

PG – parogenerátor

OČ – oběhové čerpadlo

Tlakovodní reaktor PWR (VVER)

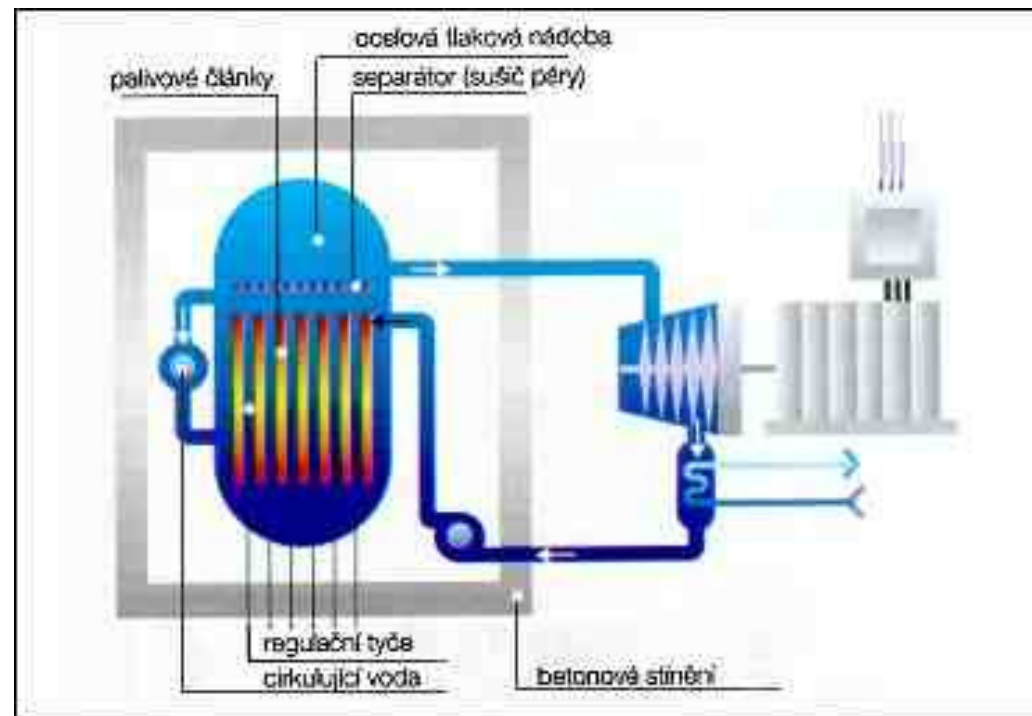
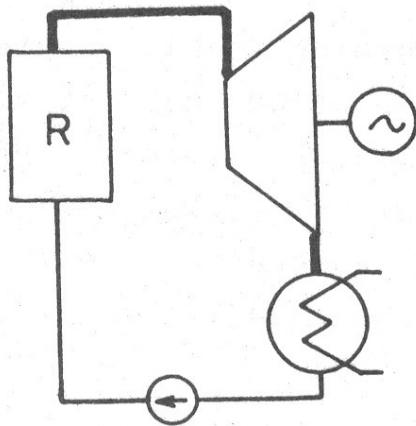


Varný reaktor

BWR (Boiling Water Reactor)

- druhý nejrozšířenější typ (21% všech světových energetických reaktorů)
 - **pouze jeden okruh** – radioaktivní voda proudí přes celý tepelný okruh
- Palivo: mírně (obsah ^{235}U zvýšen na 2,1%-2,6%) obohacený uran ve formě tabletek oxidu uraničitého
- Moderátor + chladivo: upravená voda
- voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě reaktoru a pára je pak vedena přímo k turbíně
- Typické parametry BWR 1000MW: teplota páry na výstupu z rektoru 286 °C, tlak vody 7 MPa*

Jednookruhová JE



Těžkovodní reaktor CANDU

Palivo: přírodní uran

Moderátor + chladivo primárního okruhu: těžká voda D_2O

Typické parametry CANDU 600 MW:

- tlak těžké vody v reaktoru: 9,3 MPa
- teplota těžké vody na výstupu z reaktoru: 305 °C
- aktivní zóna tvaru ležícího válce

Plynem chlazený reaktor Magnox GCR (Gas cooled, Graphite moderated Reactor)

Palivo: přírodní uran (obsah ^{235}U 0,7%) ve formě tyčí pokrytých oxidem magnezia

Moderátor: Grafitové bloky

Chlazení primárního okruhu: oxid uhličitý CO_2 (po ohřátí veden do parogenerátoru)

Typické parametry Magnox 600 MW:

- tlak CO_2 : 2,75 MPa
- teplota CO_2 na výstupu z reaktoru: 400 °C

Reaktor typu RBMK - již se nestaví (Černobyl)

Palivo: slabě obohacený uran ve formě oxidu uraničitého

Moderátor: grafit; Chladivo: voda

- palivové tyče vloženy v kanálech kudy proudí chladící voda
- přímo v kanálech vzniká pára, která po oddělení vlhkosti v separátorech pohání turbínu – jednookruhová elektrárna

Typické parametry RBMK 1000 MW: tlak nasycené páry 6,9MPa, teplota 284 °C

Vysokoteplotní reaktor HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor)

- zatím pouze experimentálně vyvinuty – výborné bezpečnostní parametry
- velmi vysoká teplota na výstupu z reaktoru – využití tepla pro průmyslové procesy

Palivo: vysoce obohacený uran (93% izotopu ^{235}U) ve formě malých kuliček oxidu uraničitého rozptýlených v koulích z grafitu - palivové koule se volně sypou do aktivní zóny

Chladivo: hélium (primární okruh), voda (sekundární okruh)

Typické parametry HTGR 300 MW: tlak hélia 4 MPa, teplota hélia na výstupu z reaktoru 284 °C

Rychlý množivý reaktor FBR (Fast Breeder Reactor)

Palivo: plutonium (směs oxidu plutoničitého a uraničitého)

- vyprodukuje více nového plutoniového paliva, než kolik sám spálí
- bez moderátoru – pracuje s rychlými neutrony

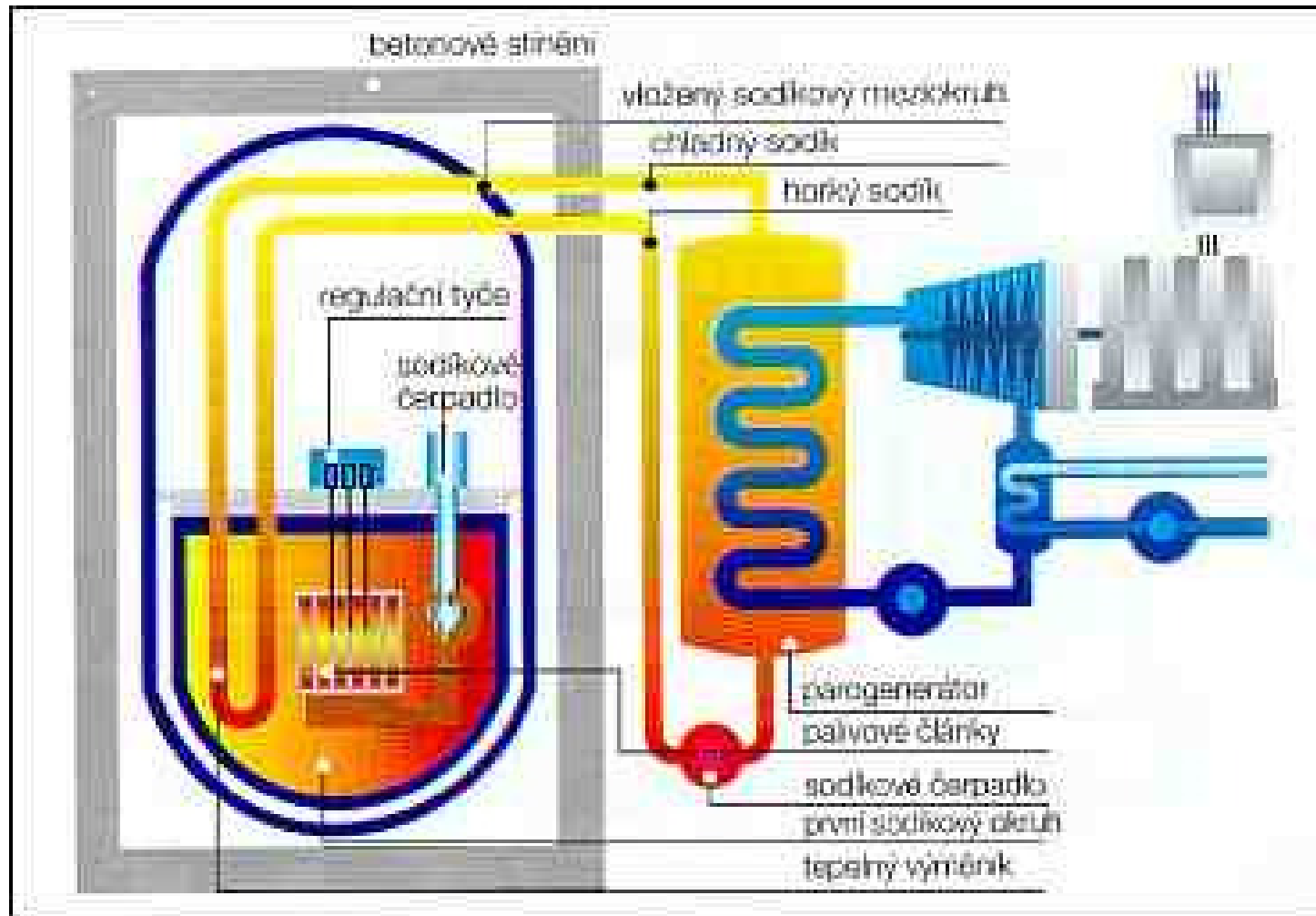
Chladivo: tekutý sodík (primární+sekundární okruh)

- tříokruhová elektrárna
- aktivní zóna potopena v ocelové nádobě naplněné sodíkem

Typické parametry FBR 1300 MW:

- tlak sodíku: 0,25 MPa
- teplota sodíku na výstupu z reaktoru: 620 °C

Rychlý množivý reaktor FBR



JE Dukovany

- roční výroba elektřiny 13 TWh (20% celkové spotřeby ČR)
- čtyři reaktory VVER – Vodou chlazený, Vodou moderovaný Energetický Reaktor
- každý z reaktorů má tepelný výkon 1375 MW a elektrický výkon 440 MW

JE Temelín

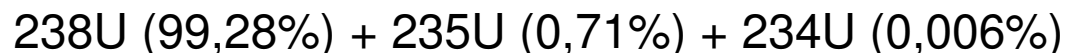
- dva tlakovodní reaktory VVER 1000
- instalovaný výkon 2000 MW

Palivo: oxid uraničitý UO_2 s průměrným obohacením 3,5% o izotop ^{235}U

- dva 1000 MW alternátory generující elektrický proud při napětí 24 kV

Palivo jaderných elektráren

Přírodní uran – vyskytuje se v rudách (smolinec) jako směs tří izotopů:



Obohacený uran – zvýšena koncentrace izotopu **^{235}U** z 0,71% většinou na 2-5%

- používá se nejčastěji jako palivo jaderných elektráren!

Přírodní torium ^{232}Th – pro použití jako palivo se mění na umělý izotop uranu ^{233}U (pohlcením neutronu)

Izotop uranu ^{238}U – dá se použít jako palivo v tzv. těžkovodních reaktorech

Umělý izotop plutonia ^{239}Pu – může také sloužit jako jaderné palivo (vzniká záchytem neutronu v jádře uranu ^{238}U - výroba plutonia se provádí v rychlých množivých reaktorech) – vyšší technologická náročnost

Palivo – tvořeno palivovými proutky (průměr 9mm) poskládanými z tabletek paliva (1 jaderná tableta nahradí 880 Kg černého uhlí). Svazek proutků tvoří palivovou kazetu.

- palivové proutky jsou pokryty povlakem ze speciální slitiny na bázi zirkonia, která zaručí předání tepla z paliva chladivu a zároveň nepropustí radioaktivní štěpné produkty



Moderátor – slouží k zpomalování rychlých neutronů – snižuje tak energii neutronů a tím zlepšuje podmínky pro štěpnou reakci

- nejčastěji se jako moderátor používá *voda, těžká voda* nebo *grafit*

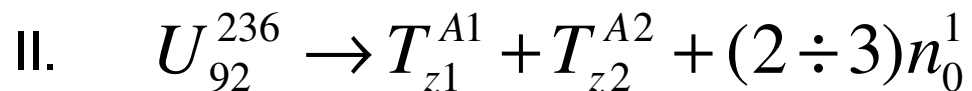
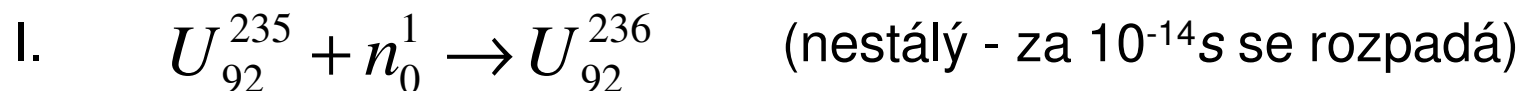
- u reaktorů pracujících na bázi rychlých neutronů moderátor chybí (množivé reaktory)

Chladicí média – odvádí vznikající reakční teplo do tepelného výměníku

-*voda, oxid uhličitý, helium, sodík* a některé soli nebo slitiny

Řetězová štěpná reakce v jaderném reaktoru

Proces štěpení těžkých jader izotopu ^{235}U pomalým (tepelným) neutronem probíhá ve dvou etapách:



T – štěpné trosky (60 typů) – nová jádra

-lehké s hmotovými (atomovými) čísly $A = 80 - 110$

-těžké s hmotovými čísly $A = 125 - 155$

Odlétající nová jádra mají velkou kinetickou energii – ohřívají chladící medium reaktoru. Vzniklé neutrony po zpomalení moderátorem mohou štěpit další jádra uranu – rozvíjí se řetězová štěpná reakce.

Jedna štěpná reakce izotopu ^{235}U odpovídá získání energie 200MeV.

Pro řízenou řetězovou reakci je nutné zachovávat určitý počet účinných (schopných štěpit) neutronů.

Multiplikační faktor K (reaktivita) – poměr počtu neutronů jedné generace k počtu neutronů předešlé generace

$K < 1$ – tzv. *podkritický stav* – reakce vyhasíná - výkon se omezuje

$K = 1$ – tzv. *kritický stav* - **řízená řetězová reakce** – reakce se udržuje na stejné míře, ani se nezrychluje ani neuhasíná – využití v reaktorech – výkon je konstantní (odpovídá tomu určité kritické množství paliva)

$K > 1$ – tzv. *nadkritický stav* – exponenciálně s časem narůstá počet neutronů – výkon se zvyšuje

-tzv. *superkritické štěpení* - nechají se reagovat všechny vzniklé neutrony - **neřízená řetězová reakce** - reakce končí výbuchem (atomová bomba)

Výkon reaktoru – je úměrný toku neutronů.

Regulace reakce - výkonu reaktoru – provádí se malou změnou multiplikačního faktoru K, čehož se dosahuje změnou složení aktivní zóny reaktoru **pomocí regulačních tyčí**.

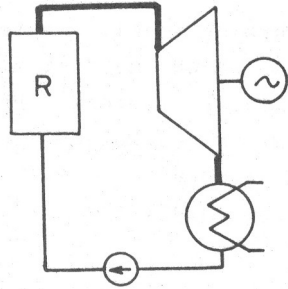
Řídící tyče – slouží k najíždění a odstavování reaktoru a k udržení stálého výkonu. Jsou z materiálu pohlcujícího neutrony (bor *B*, kadmium *Cd*).

Havarijní tyče – automaticky se spouští do aktivní zóny v případě poruchy reaktoru a štěpná reakce se zastaví. Obsahují mnohem větší množství absorbátu než tyče řídící (materiál: bor *B*, kadmium *Cd*)

Kompenzační tyče – slouží ke kompenzaci záporné reaktivity při vyhořívání paliva, kdy štěpné zplodiny s velkou absorpcí pohlcují tepelné neutrony

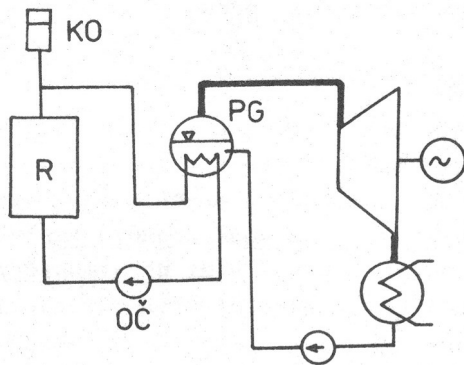
Otázky

Jednookruhová jaderná elektrárna, schéma, typ reaktoru, výhody a nevýhody



- jednookruhová jaderná elektrárna má reaktor typu BRW = varný reaktor
- nevýhodou je, že zde není primární a sekundární okruh, tudíž radioaktivní voda proudí přes celý tepelný okruh
- výhody : menší náklady na výstavbu

Dvouokruhová jaderná elektrárna, schéma, typ reaktoru, výhody a nevýhody



- dvouokruhová jaderná elektrárna má reaktor typu PRW = tlakovodní reaktor
- výhodou je, že zde je primární a sekundární okruh, tudíž radioaktivní voda proudí pouze v primárním okruhu a v parogenerátoru předává teplo do sekundárního oběhu = větší bezpečnost
- nevýhody : vyšší náklady na výstavbu

Otázky:

Jaké dva typy jaderných reaktorů se nejčastěji používají v jaderných elektrárnách?

Jaké palivo se používá nejčastěji v jaderných elektrárnách?

- Obohacený uran izotopem uranu ^{235}U

K čemu slouží v jaderném reaktoru tzv. moderátor?

K čemu slouží v jaderném reaktoru řídicí a havarijní tyče?

Vysvětlete pojem reaktivita (multiplikační faktor K).

- poměr počtu předešlé a nové generace neutronů

- dělí se na podkritický ($K < 1$), kritický ($K = 1$) a nadkritický ($K > 1$)

Jaká reaktivita odpovídá ustálenému stavu reaktoru?

– tzv. kritický stav $K = 1$, konstantní výkon reaktoru

Jaký typ chladiva se používá v jaderných elektrárnách?

Vodní elektrárny

Vodní elektrárny jsou založeny na přeměně potenciální nebo kinetické energie uložené ve vodních tocích v podobě proudění. Velikost získané energie je pak závislá na rychlosti proudění, resp. na spádu toku. Energie toku odpovídá součinu dvou veličin:

- využitelného spádu
- průtoku (průtočné množství vody v daném profilu, který chceme využít)

Kinetickou energii vody je možné využít vodními rovnotlakými stroji, založenými na rotačním principu (vodní kola, Peltonova turbína). Optimální využití vyžaduje, aby obvodová rychlost stroje byla nižší než je rychlost proudění, jinak lopatky pouze ustupují proudu bez možnosti převzetí energie a jakéhokoliv zatížení. Otáčky rovnotlakých strojů jsou pomalé (tlak na lopatky, způsobený poloviční obvodovou rychlostí oproti rychlosti proudění, je po celé cestě předávání energie stejný) a voda vstupuje do turbíny pouze v některých částech jejího obvodu.

Energie potenciální vzniká získáním hladiny vody o větší výšce, z níž voda proudí vhodným přivaděčem do míst s nižší hladinou. Rozdíl těchto dvou výškových potenciálů vytváří tlak, který se využívá v přetlakových (reakčních) strojích (turbíny typu Kaplan, Francis, Reiffenstein). V přetlakové turbíně se část tlaku vody přemění v rychlost pro zajištění požadovaného průtoku, zbylý tlak se při průchodu lopatkou turbíny postupně snižuje a v místě, kde ji opouští, je prakticky využit. Otáčky oběžného kola přetlakové turbíny jsou několikanásobně vyšší než absolutní rychlost proudění.

Rozdělení vodních elektráren dle principu akumulace vodní energie:

- Elektrárny přehradní
- Elektrárny derivační
- Elektrárny přečerpávací
- Elektrárny přílivové

Rozdělení podle ovlivňování toku:

- Elektrárny průtočné - nezadržují vodu
- Elektrárny akumuláční - zadržují/akumulují vodu v nádrži
- Elektrárny smíšené - vyžadují oba výše uvedené systémy

Rozdělení podle spádu (tlaku vody):

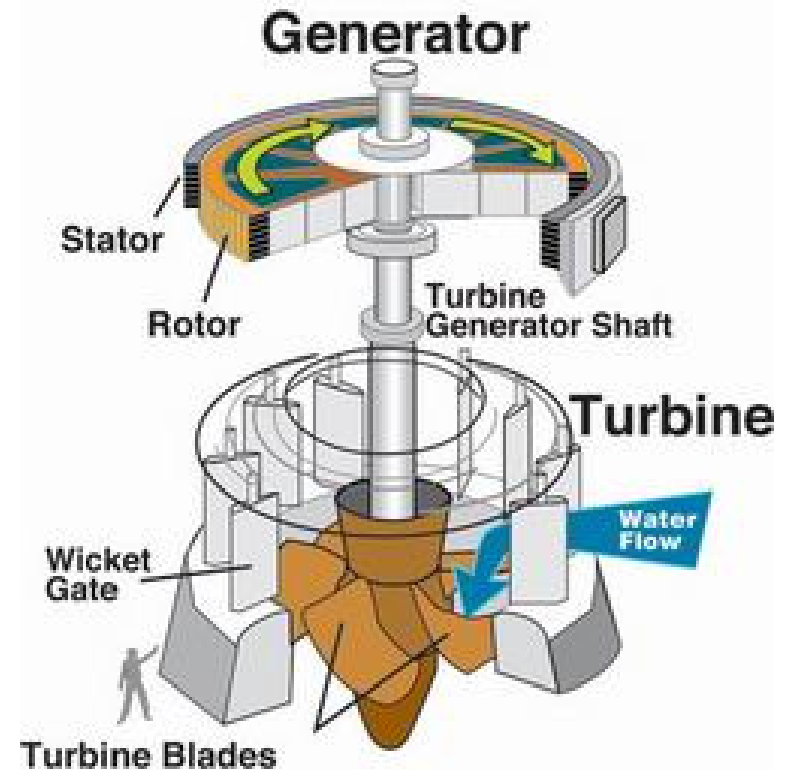
- nízkotlaké - spády do 20 m
- středotlaké - spády do 100 m
- vysokotlaké - spády nad 100 m
- kombinované

Rozdělení podle výkonnosti turbíny:

- Mikroelektrárny nebo také mobilní zdroje - výkony pod 35 kW
- Drobné nebo minielektrárny - výkony od 35 do 100 kW
- Elektrárny malé (MVE) - dále dle výkonu dělí se na:
 - závodní, nebo veřejné (od 100 do 1000 kW)
 - průmyslové (od 1 do 10 MW)
- Elektrárny střední - výkony od 10 MW do 200 MW
- Elektrárny velké - výkony nad 200 MW

Základem vodních elektráren je spojení dvou strojů:

- **turbíny** - provádí převod kinetické nebo potenciální energie vody na rotační pohyb hřídele (Turbine Generator Shaft)
- **generátoru** - převádí rotační pohyb hřídele na elektrickou energii pomocí otáčejícího se rotoru vůči statoru



Turbíny se podle konstrukce a vhodného použití rozlišují:

- podle uspořádání - na vertikální, horizontální, šikmé
- podle způsobu přivádění vody - na přímoproudé, kolenové, kašové, spirální, kotlové
- podle spádu - na nízkotlaké (do 10 m), středotlaké (do 100 m), vysokotlaké (nad 100 m)

Základní terminologie:

- *Průtok turbínou* - Celkové množství protékající turbínou za 1 sekundu. Udává se v (m^3/s).
- *Hltnost turbíny* - Pro konkrétní spád udává vždy maximální průtok turbínou při tomto spádu.
- *Jmenovitá hltnost* - Maximální průtok nebo jmenovitý průtok turbínou při jmenovitém spádu, tj. při spádu, při němž je nejvyšší účinnost.
- *Hltnost při maximálním spádu* - Největší zaručený průtok při max. spádu.
- *Průtoková kapacita* - Největší průtok, který projde všemi turbínami elektrárny.
- *Hrubý spád* - H (brutto) je celkový statický spád mezi dvěma uvažovanými profily úseku řeky, který chceme energeticky využít.
- *Užitný spád* - H (netto) je výškový rozdíl mezi čarami energie těsně před vodním motorem a za ním. Je to hrubý spád, od něhož jsou odečteny hydraulické ztráty v přivaděči a odpadu, které se nezahrnují do účinnosti turbíny.

Mezi základní parametry a z pohledu využití vodní elektrárny patří výkon vodní turbíny. Ten se může stanovit následujícím zjednodušeným vzorcem:

$$**P = Q \cdot H \cdot k**$$

kde je P výkon [kW], Q průtočné množství vody [m^3/s], H spád využitelný turbínou a k je bezrozměrná konstanta uváděná v rozsahu od 6,5 do 8,5 (ovlivňuje účinnost soustrojí a odpovídá technické úrovni použité technologie).

Dělení vodních turbín:

- **dle způsobu přenosu energie:**

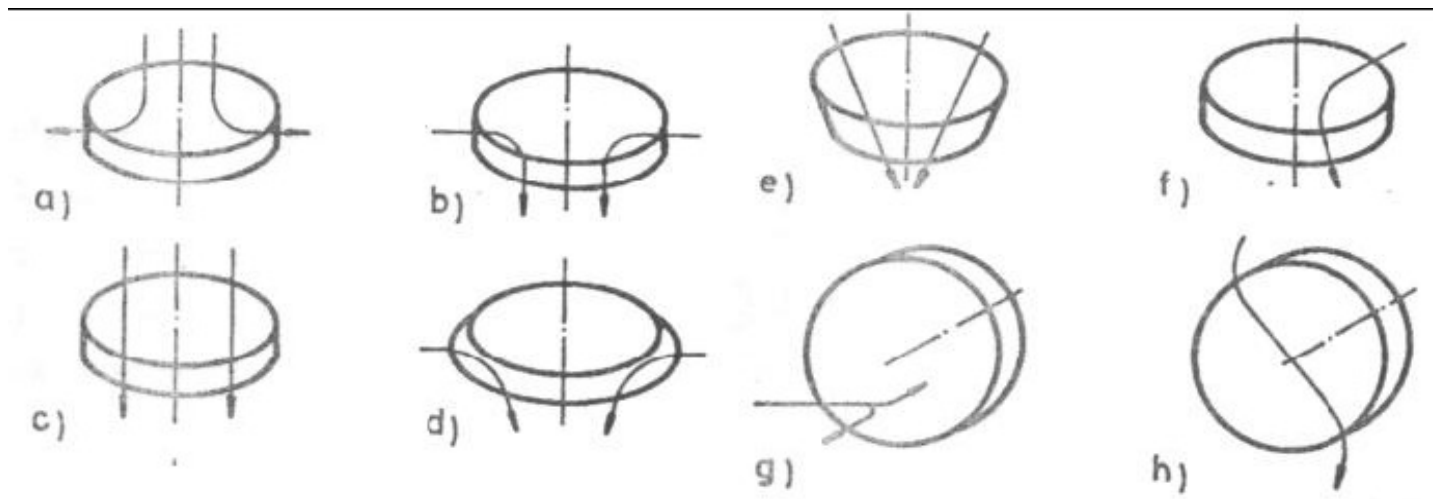
- rovnotlaké (veškerý přetlak přeměněn na rychlost vody ještě před oběžným kolem - tzv. akční)
- přetlakové (částečná přeměna přetlaku ještě v oběžných kolech - tzv. reakční)

- **dle vstupní části:** spirální, kašnová, kotlová, násosková, přímoproudá

- **dle polohy hřídele:** horizontální, vertikální, šikmé (menší přímoproudé)

▪ **dle průtoku oběžným kolem:**

- a) centrifugální (vnitřní vtok, proudění od hřídele) (Fourneyronova)
- b) centripetální (s vnějším vtokem, proudění ke hřídeli)(historická Francisova)
- c) axiální (Kaplanova)
- d) radiálně - axiální (moderní Francisova)
- e) diagonální (Dériazova)
- f) se šikmým průtokem (Turgo)
- g) tangenciální (Peltonova)
- h) s dvojím průtokem (vstup centripetálně, výstup centrifugálně)(Bánkiho)



Mezi základní druhy turbín patří:

Bánkiho turbína – rovnotlaká turbína s dvojnásobným průtokem oběžného kola. Používá se pro spád od 1 do 50 m, ekonomicky výhodná je pro spád od 4 m. Rozsah průtoků je od 50 l/s do několika m³/s.

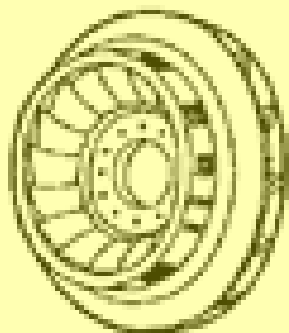
Peltonova turbína – rovnotlaká turbína s využitím pro spády nad 30 m a pro průtoky od 10 l/s.

Francisova turbína – používá se pro velmi nízké spády od 0.8 m a pro velké průtoky - přetlaková, radiálně-axiální, nebo centripetální, regulované rozváděcí lopatky, vhodné pro reversibilní provoz.

Kaplanova turbína – přetlaková výborně regulovatelná turbína - regulované rozváděcí i oběžné lopatky. Její výroba je poměrně náročná. Používá se pro spády od 1 do 20 m , průtoky 0.1 až několik m³/s. Je vhodná pro jezové a malé říční elektrárny.

Reiffesteinova turbína - málo rozšířená přetlaková turbína. Používá se na spádech od 5 do 35 metrů při malých a středních průtocích (přibližně od 100 do 5000 l/s). Typické pro tuto turbínu je, že nemá žádné rozváděcí lopatky. Správné vedení vody do oběžného kola zabezpečuje přímo profil spirály.

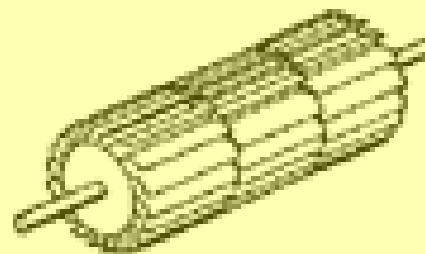
Provedení základních druhů turbín



Francisova



Kaplanova



Bánkiho

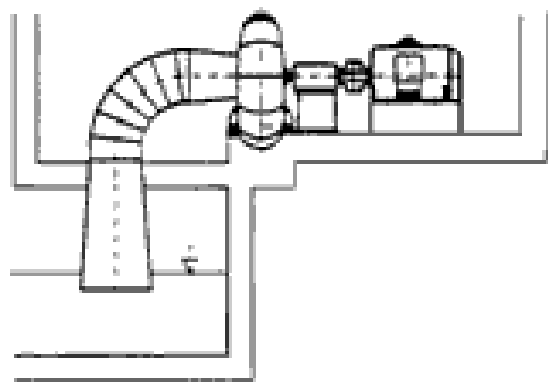


Peltonova

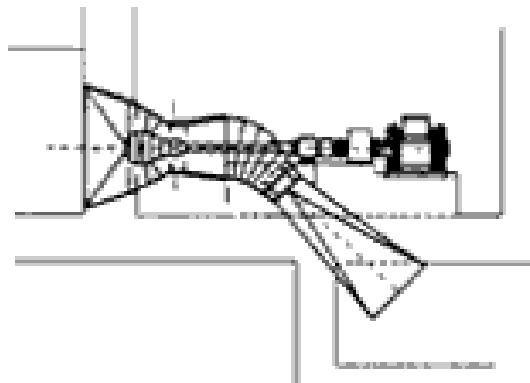
Nejčastěji jsou dnes využívány turbíny *Kaplanovy* a *Francisovy*. Od nich také existují různé typy - varianty, které se liší různou modifikací samotného lopatkového kola turbíny nebo provedením a uspořádáním náhonu, přívodního a odvodního kanálu.

Provedení elektráren se základními druhy turbín

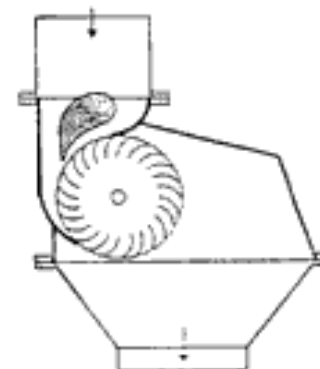
Francisova



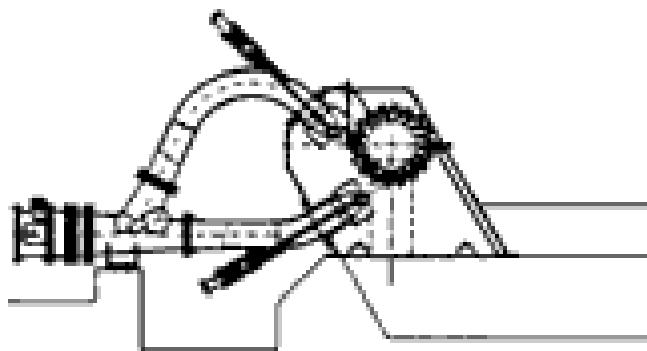
Kaplanova



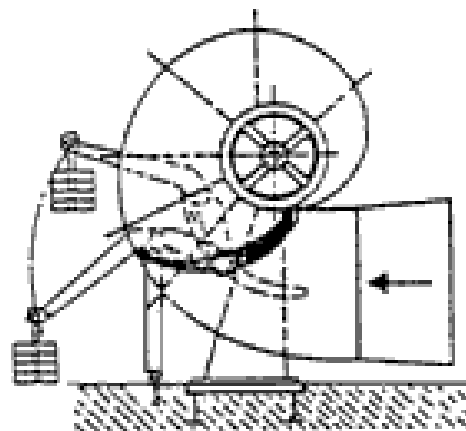
Bánkiho



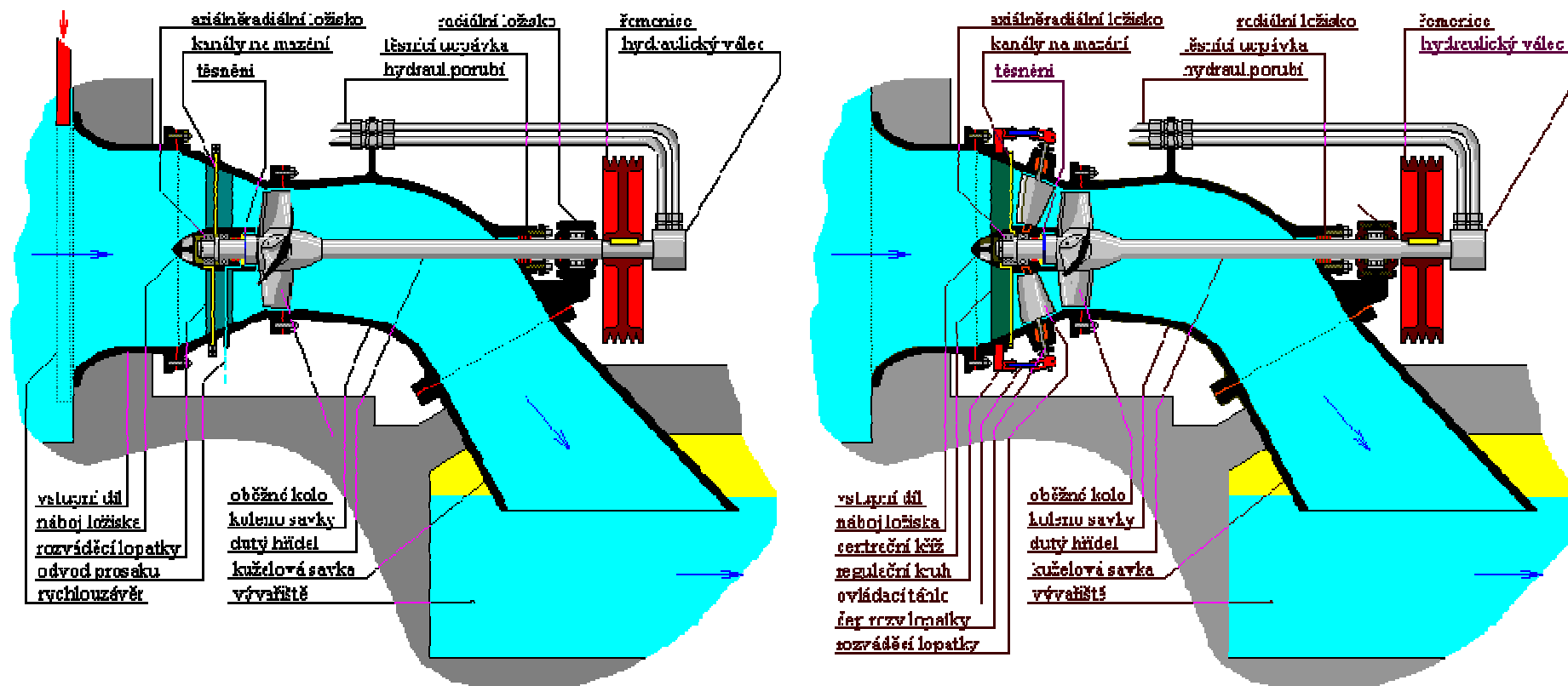
Peltonova



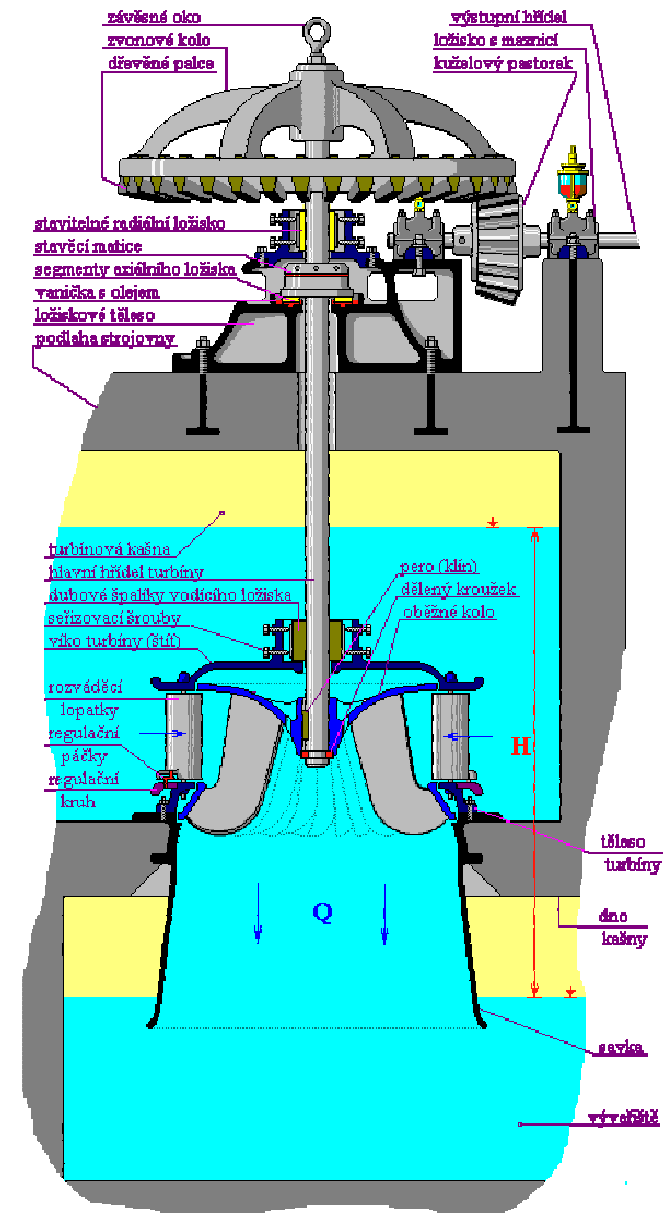
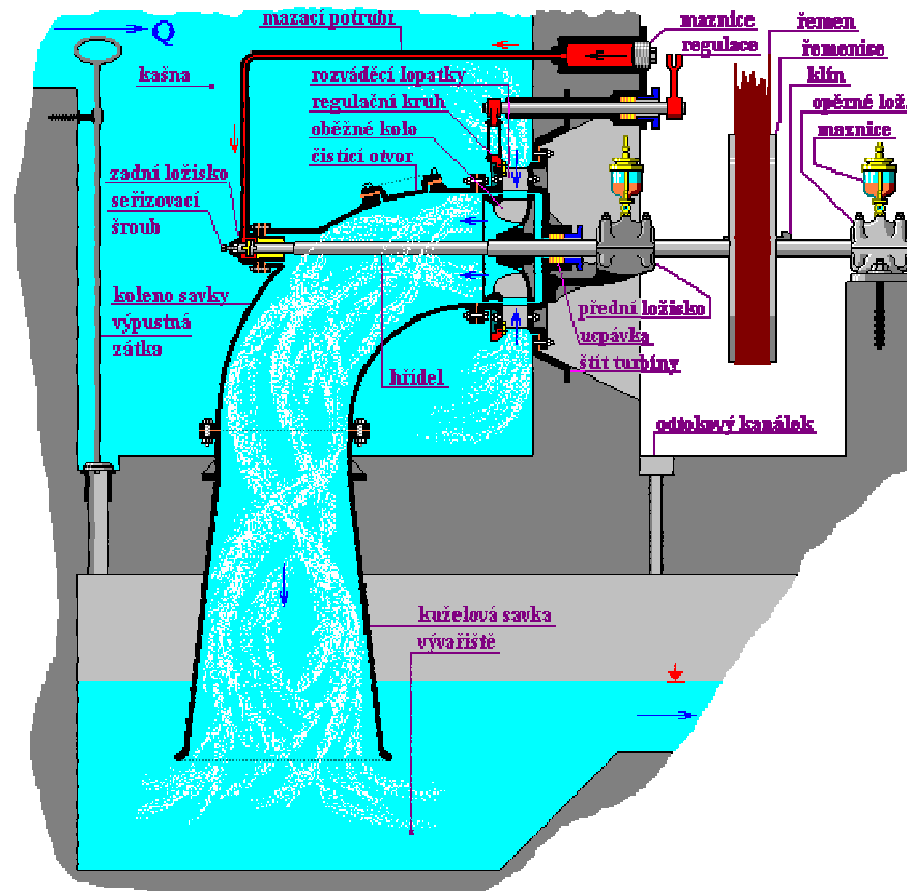
Reiffesteinova



Kaplanovy turbíny: Semi-Kaplan (vlevo) a Kaplan-S (vpravo)



Francisovy turbíny: horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo)



Účinnost turbíny η poměr skutečného výkonu turbíny **P** (měřeného na hřídeli) k teoretickému výkonu: $\eta_t = P/P_0$

- její hodnota u dobře navržených turbín a optimálních hodnot průtoku a spádu se pohybuje v rozmezí: $\eta_t = 0,85$ až $0,94$

V této celkové účinnosti turbíny musí být zahrnuty všechny hydraulické ztráty η_h a objemové ztráty η_v a mechanické ztráty η_m

Mechanický výkon odevzdává turbína generátoru, v němž se tento mění na elektrický. Generátor má vlivem vlastních ztrát účinnost: $\eta_g = 0,85$ až $0,97$

V případě, že generátor není na společné hřídeli s turbínou, přistupují ještě ztráty převodem η_p . Pokud je hřídel společná pak: $\eta_p = 1$

Výkon, který vodní elektrárna dodává do sítě, je ještě ovlivněn transformací na vyšší napětí - účinnost transformátoru: $\eta_{tr} = 0,92$ až $0,98$

Celková účinnost hydroagregátu (vodní turbíny a generátoru) s transformátorem je potom dána vztahem:

$$\eta_c = \eta_h \times \eta_v \times \eta_t \times \eta_m \times \eta_g \times \eta_p \times \eta_{tr}$$

Vodní elektrárny v ČR

Všechny velké vodní elektrárny s výjimkou Dalešic, Mohelna a Dlouhých Strání jsou situovány na toku Vltavy, kde tvoří kaskádový systém - Vltavskou kaskádu. Představují 17% celkového výkonu elektráren v ČR.

Otázka:

Jaký typ turbíny se nejčastěji používá ve vodních elektrárnách?

- Kaplanova – přetlaková – vynikající regulovatelnost (regulované rozváděcí i oběžné lopatky)
- Francisova – přetlaková (regulované rozváděcí lopatky)

Zkratové proudy

Zkrat – vznikne poruchovým spojením fází navzájem, nebo se zemí soustavy s uzemněným uzlem - vznik nežádoucích zkratových proudů

Druhy zkratů:

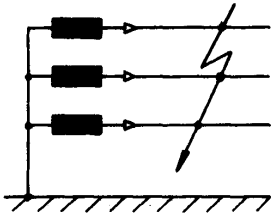
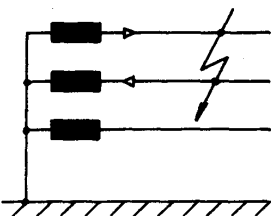
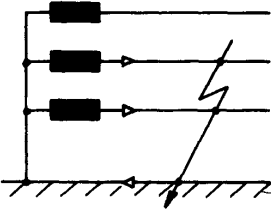

Souměrný zkrat – trojfázový zkrat všech tří fází

Nesouměrné zkraty

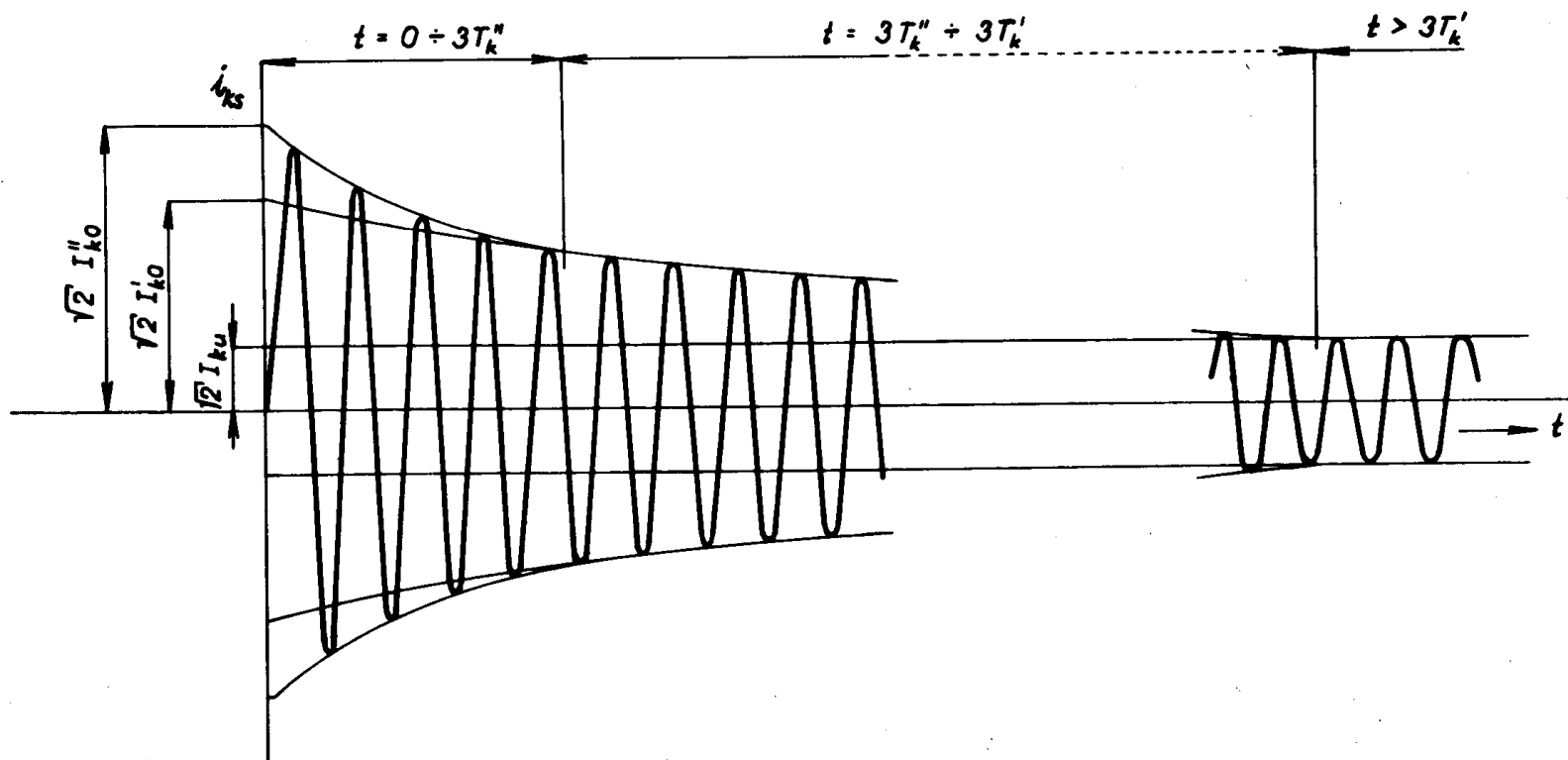
- 1) dvoufázový
- 2) dvoufázový zemní
- 3) jednofázový

Venkovní vedení – trojfázový zkrat není příliš častý

Kabelová vedení – trojfázový zkrat nejčastější

DRUH ZKRATU	SCHÉMA	PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU [%]		
		<i>vn</i>	110 kV	220 kV
TROJFÁZOVÝ		5	0,6	0,9
DVOUFÁZOVÝ		10	4,8	0,6
DVOUFÁZOVÝ ZEMNÍ		20	3,8	5,4
JEDNOFÁZOVÝ		*)	91	93,1
<p>*) V SÍTÍCH <i>vn</i>, KTERÉ SE ZPRAVIDLA PROVOZUJÍ S UZLEM IZOLOVANÝM NEBO NEPŘÍMO UZEMNĚNÝM, SE TATO PORUCHA KVALITATIVNĚ LIŠÍ OD ZKRATU A NAZÝVÁ SE ZEMNÍ SPOJENÍ</p>				

Průběh souměrného zkratového proudu i_{ks} (porucha při sinusovém napětí v maximu a proudu v nule)



I_{ks} – efektivní hodnota součtu **ustálené, přechodné a rázové složky** zkratového proudu

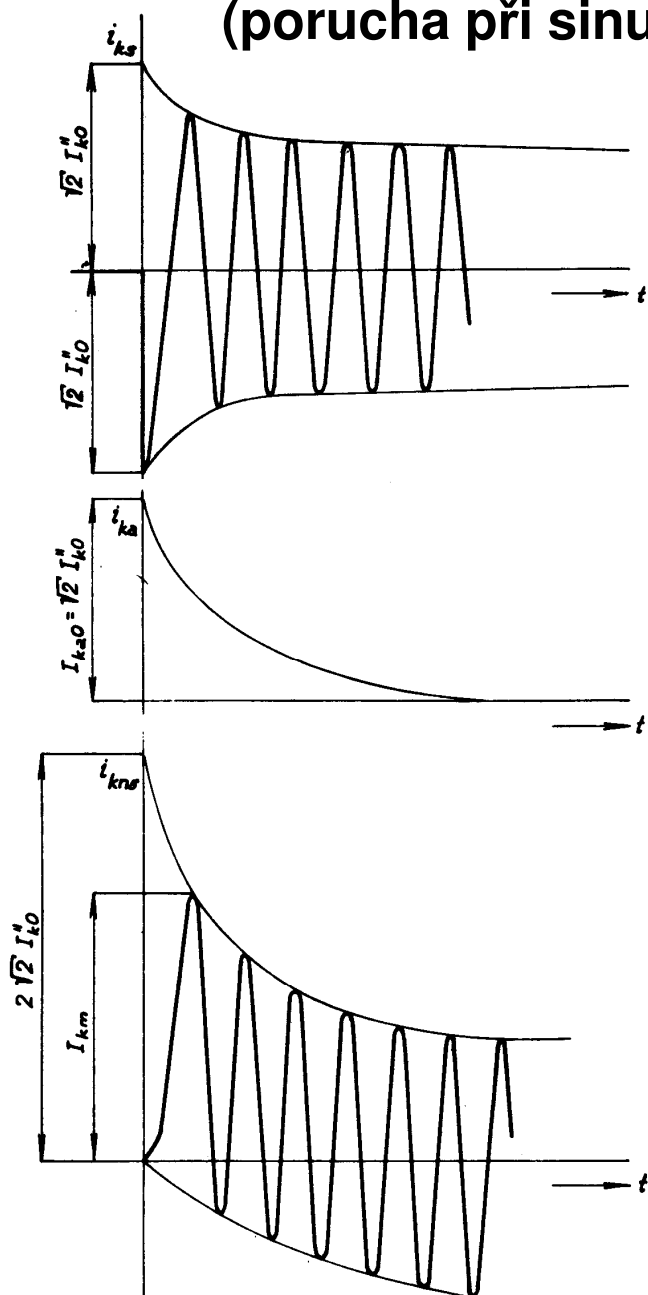
I''_{k0} – počáteční ($t=0$) **rázový** zkratový proud

I'_k0 – počáteční **přechodný** zkratový proud

I_{ku} – **ustálený** zkratový proud

T''_k, T'_k – časové konstanty exponenciálního poklesu rázové a přechodné složky

Průběh nesouměrného zkratového proudu i_{kns} (porucha při sinusovém napětí v nule a proudu v maximu)



OBR. 5 - 4

Zkratový proud zpožděný za napětím o $\pi/2$ by měl začínat ze své maximální hodnoty – fyzikálně není možná skoková změna proudu (obr.5-4) – vytvoří se (další) **stejnoseměrná složka zkrat. proudu** i_{ka}

I_{ka0} – počáteční ($t=0$) stejnosměrná složka (obr.5-5) – její velikost je taková, aby po superpozici se střídavými složkami výsledný zkratový proud začínal z nulové hodnoty (viz. obr. 5-6)

OBR. 5 - 5

i_{kns} – nesouměrný zkratový proud - efektivní hodnota součtu všech čtyř složek (rázové, přechodné, ustálené a stejnosměrné) zkratového proudu

I_{km} – **nárazový proud** – vrcholová hodnota první půlperrody nesouměrného zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce (obr. 5-6) – **určuje dynamické namáhání zařízení (dimenzování)**

OBR. 5 - 6

Výpočet zkratů pomocí poměrných hodnot

Poměrné hodnoty – hodnoty vztažené na předem dohodnutý základ

Zavedeme pojmy:

- vztažný výkon (trojfázový) S_v (MVA)
- vztažné napětí (sdružené) U_v (kV)
- vztažný proud I_v (kA)
- vztažná impedance (reaktance) Z_v (Ω) X_v (Ω)

Vztažné veličiny jsou vzájemně vázány vztahy:

$$S_v = \sqrt{3} U_v I_v \quad (\text{MVA; kV, kA})$$

$$Z_v = \frac{U_{vf}}{I_v} \quad (\Omega; \text{kV, kA})$$

Poměrná impedance:

$$z = Z \frac{S_v}{U_v^2} \quad (- ; \Omega, \text{MVA}, \text{kV})$$

Poměrná reaktance (R=0):

$$x = X \frac{S_v}{U_v^2} \quad (- ; \Omega, \text{MVA}, \text{kV})$$

-zvolíme libovolný vztažný výkon S_v (MVA) a vztažné napětí U_v – volíme napětí v místě zkratu v době, než zkrat vzniknul.

Výsledný počáteční rázový proud:

▪ trojfázový zkrat

$$I''_{k0} = \frac{1}{z_1} I_v \quad (\text{kA}; -, \text{kA})$$

▪ jednofázový zkrat

$$I''_{k0}^{(1)} = \frac{3}{z_1 + z_2 + z_0} I_v \quad (\text{kA}; -, \text{kA})$$

▪ dvoufázový zkrat

$$I''_{k0}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{z_1 + z_2} I_v \quad (\text{kA}; -, \text{kA})$$

z_1, z_2, z_0 – sousledná, zpětná, netočivá impedance

Postup výpočtu pomocí poměrných hodnot:

- 1) Nakreslíme schéma sítě
- 2) Do schématu vyznačíme všechny hodnoty napětí, reaktancí....
- 3) Všechny reaktance (parametry) přepočteme na jednu hladinu napětí v místě zkratu
- 4) Nakreslíme náhradní schéma se všemi reaktancemi
 - trojfázový zkrat - schéma pouze sousledných složek reaktancí
 - dvoufázový zkrat – schéma sousledných a zpětných složek
 - jednofázový zkrat - schéma sousledných, zpětných a netočivých složek
- 5) Provedeme zjednodušení náhradního schématu k místu zkratu
- 6) Vypočteme zkratový proud

Dynamické namáhání zařízení při zkratu

Nárazový zkratový proud I_{km} – je rozhodující pro dynamické (silové) namáhání zařízení a **určuje jeho dimenzování**.

$$I_{km} = K \sqrt{2} I''_{k0} \quad - \text{činitel } K = f(R / X) \text{ respektuje útlum zkratového proudu a udává se graficky nebo tabulkově}$$

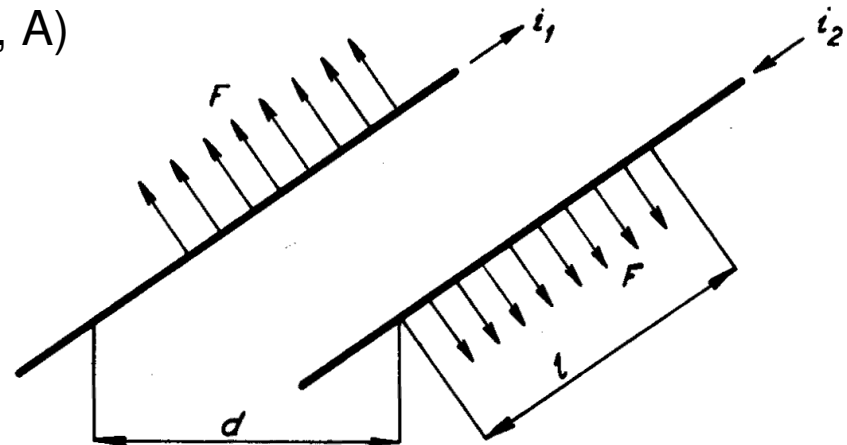
Síla F působící na délce l na dva rovnoběžné, nekonečně dlouhé, tenké vodiče ve vzdálenosti d od sebe protékané proudy i_1, i_2 :

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{l}{d} \cdot i_1 \cdot i_2 \quad (\text{N}; \text{Hm}^{-1}, \text{m/m}, \text{A}, \text{A})$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ (H/m) – permeabilita vakua

pro $i_1 = i_2 = I_{km}$ ($l \gg d$) bude:

$$F = 2 \frac{l}{d} \cdot I_{km}^2 \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}; \text{m/m}, \text{A})$$



OBR. 5 - 16 SÍLY U ROVNOBĚŽNÝCH VODIČŮ

Praktický výpočet síly působící na jednotku délky u rovnoběžných vodičů:

$$F_1 = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \frac{I_{km}^2}{d} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N/m; A, m})$$

k_1 – koeficient tvaru vodiče (u kruhových vodičů $k_1 = 1$)

k_2 - koeficient respektující uspořádání vodičů a fázový posun proudů v jednotlivých vodičích (typ zkratu, krajní nebo prostřední vodič)

Silové účinky jsou nebezpečnější tam, kde jsou vodiče pevně uloženy, například přípojnice (hliníkové tyče) připevněné na izolátorech, mohlo by dojít k ulomení izolátorů.

Zkratové proudy mohou dosahovat velikosti desítek kiloampér, i více a síly pak dosahují značných velikostí.

Tepelné namáhání zařízení při zkratu

Ekvivalentní (oteplovací) zkratový proud I_{ke} - definujeme jej jako stálý proud, který za dobu trvání zkratu t_k vyvine stejné množství tepla, jako časově proměnný zkratový proud $i_k(t)$.

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt}$$

V praxi se ekvivalentní oteplovací proud určuje vztahem:

$$I_{ke} = k_e I_{k0}^{(i)}$$

kde (i) je 3, 2, 1 pro trojfázový, dvoufázový a jednofázový zkrat

$I_{k0}^{(i)}$ – počáteční rázový zkratový proud v okamžiku vzniku zkratu

k_e – koeficient závislý na době trvání zkratu t_k a typu soustavy (vvn, vn, nn)

t_k – doba trvání zkratu – závisí na charakteristice a nastavení ochran (0,05 – 2s)

Otázky:

Vyjmenujte jednotlivé druhy zkratu, které mohou nastat v sítích účinně uzemněných – trojfázový, dvoufázový, dvoufázový zemní, jednofázový

Jaké složky má souměrný (symetrický) zkratový proud ?

- rázová složka zkratového proudu (má sinusový průběh o kmitočtu soustavy a exponenciálně klesá)
- přechodná složka zkratového proudu (má sinusový průběh o kmitočtu soustavy a exponenciálně klesá)
- ustálená složka zkratového proudu (má sinusový průběh stálé amplitudy o kmitočtu soustavy)

Jaké složky má nesouměrný zkratový proud ? – *rázová, přechodná, ustálená a stejnosměrná složka rázového proudu*

Jaký typ zkratu je nejčastější u venkovních vedení (účinně uzemněná soustava)? – jednofázový zkrat

- v sítích **vn** izolovaných nebo kompenzovaných nejčastěji nastává jednofázové **zemní spojení**

Jaký typ zkratu je nejčastější u kabelových vedení ? – trojfázový *zkrat*

Otázky:

Pro co je rozhodující při dimenzování zařízení tzv. nárazový zkratový proud ?

- nárazový zkratový proud je rozhodující pro dynamické (silové) namáhání zařízení a určuje jeho dimenzování

-(velikost nárazového zkratového proudu I_{km} se stanoví ze znalosti počátečního rázového zkratového proudu I''_{k0})

-(nárazový zkratový proud I_{km} je definován jako vrcholová hodnota první půlperrody nesouměrného zkratového proudu při největší možné stejnosměrné složce)

Slovně definujte tzv. ekvivalentní (oteplovací) zkratový proud.

-je definován jako stálý proud, který za dobu trvání zkratu vyvine stejné množství tepla, jako časově proměnný zkratový proud – určuje se při kontrole na tepelné namáhání zařízení při zkratu (dimenzování)

- (velikost ekvivalentního proudu I_{ke} lze prakticky stanovit ze znalosti počátečního rázového zkratového proudu I''_{k0})

Základní kritéria dimenzování vodičů:

- Kontrola na oteplení vodiče – provádí se vždy
- Kontrola velikosti Jouleových ztrát (nesymetrické zatížení)
- Kontrola dynamických účinků zkratového proudu
- Kontrola tepelných účinků zkratového proudu
- Kontrola úbytku velikosti napětí
- Dimenzování vedení s ohledem na hospodárnost
- Dimenzování vedení s ohledem na mechanické namáhání

Kontrola na oteplení vodiče

- vyvinuté teplo ve vodiči na jednotku délky je přímo úměrné odporu jednotkové délky vodiče a druhé mocnině proudu tekoucího vodičem
- teplota vodiče nesmí dlouhodobě překročit určitou hodnotu při které by se zkracovala jeho životnost, popřípadě došlo k okamžitému zničení vodiče
- na oteplení vodiče má vliv hlavně velikost protékajícího proudu, ale je třeba respektovat i teplotu okolí a možnosti odvodu tepla z vodiče, které jsou dány uložením vodiče (např. kabel v zemi se chladí lépe než na vzduchu)
- pro každý typ vodiče a kabelu se udává jejich jmenovitá proudová zatížitelnost I_{NV} , odpovídající přibližně dovoleným proudům na vzduchu pro teplotu vzduchu 30 °C, kterou musíme přepočítat na dovolené proudové zatížení I_{DOV} tak, abychom respektovali způsob uložení vodiče a okolní teplotu

$$I_{DOV} = I_{NV} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_i$$

kde $k_1 \dots k_i$ jsou přepočítací součinitele, respektující snížení zatížení v závislosti na způsobu uložení vodiče, jeho seskupení, okolní teplotě, tepelném odporu půdy atd.

Kontrola na nesymetrické zatížení

Při kontrole na *nesymetrické zatížení* ověřujeme, zdali úhrnné Jouleovy ztráty nepřekračují hodnotu odpovídající *symetrickému dovolenému zatížení*. Při překročení této meze zvyšujeme průřez do té doby, až budou nesymetrické ztráty menší než původní dovolené symetrické.

Symetrické ztráty:

$$P_{sym} = 3RI_{DOV}^2$$

Nesymetrické ztráty:

$$P_{NESYM} = R(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) + R_0 I_0^2$$

Kritérium splnění požadavků:

$$P_{nesym} \leq P_{sym}$$

Dimenzování s ohledem na dovolené úbytky napětí

Při rozvodu elektrické energie vedením (venkovním, kabelovým) dochází k úbytku napětí na vedení a tím i k poklesu napětí na spotřebiči.

- pokles napětí by mohl ovlivnit důležité provozní vlastnosti spotřebiče (např. moment motoru) a proto jsou dovolené úbytky napětí ΔU limitovány a v závislosti na druhu rozvodu (občanský, zemědělský, průmyslový, podzemní, na jeřábech apod.) uváděny v příslušných normách.
- u střídavého rozvodu dochází k úbytku napětí na činném odporu vedení a na jeho reaktanci.
- činný odpor vedení můžeme ovlivnit jeho průřezem
- reaktance vedení je dána prostorovým rozložením vodičů a délkou vedení
- u vedení NN je úbytek na reaktanci zanedbatelný, proto můžeme počítat pouze s úbytkem na činném odporu vedení - **zvláště u kabelů.**

Úbytek napětí na NN vedení při zanedbání reaktance vedení:

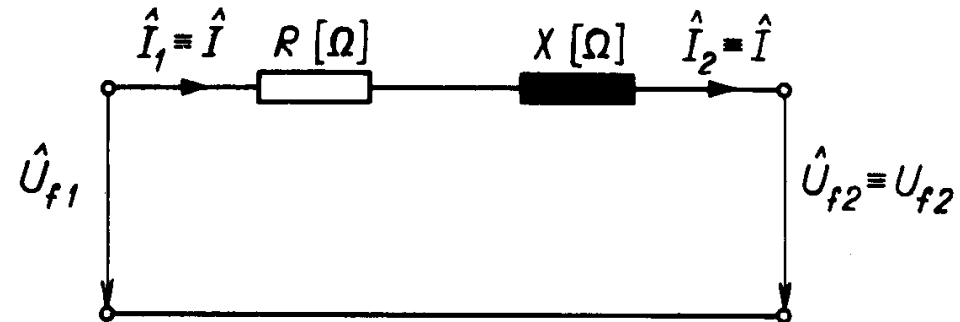
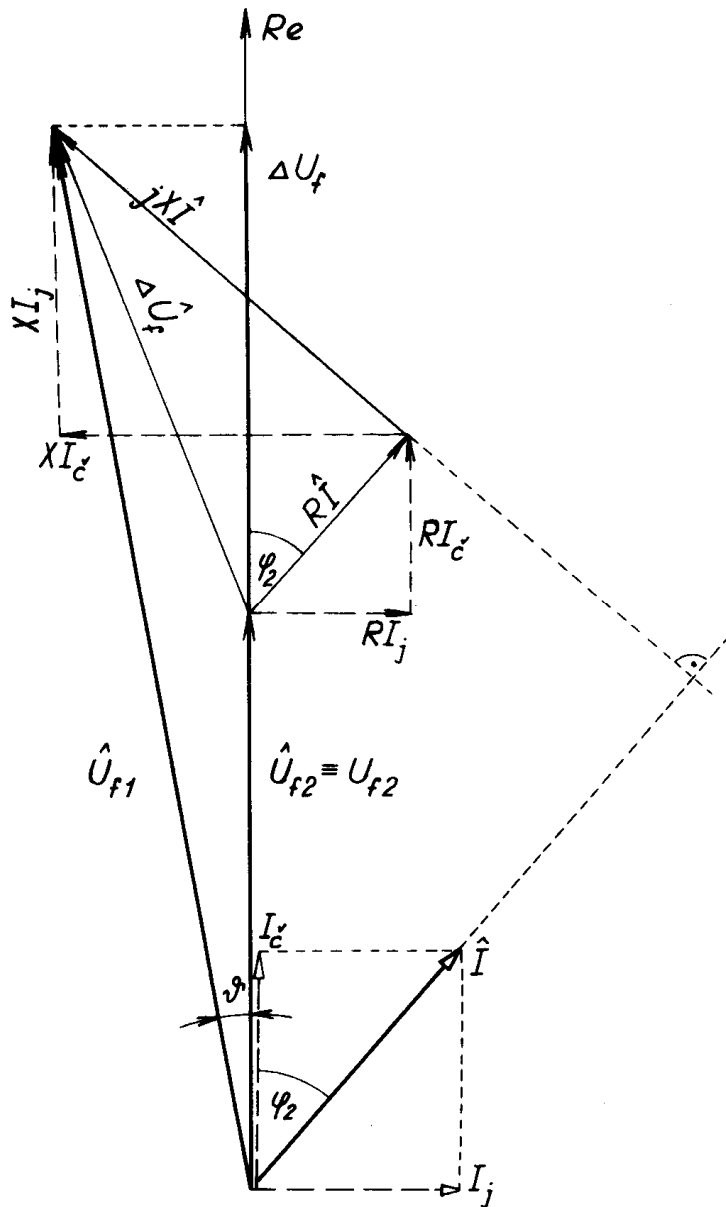
▪ pro jednofázový rozvod $\Delta U = \frac{2 \cdot \rho \cdot l}{A} \cdot \frac{P}{U_f}$ (úbytek na fázovém i nulovém vodiči)

▪ pro trojfázový rozvod $\Delta U = \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot \frac{P}{U_s}$ (úbytek je pouze na fázovém vodiči)

kde:	ΔU [V]	je úbytek fázového napětí
	ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	je rezistivita (měrný odpor) vodiče
	A (mm^2)	je průřez vodiče
	P [W]	je výkon přenášený po vedení
	U_f, U_s [V]	je fázové a sdružené napětí

Průřez vodičů musíme navrhnout takový, aby při nejvyšším předpokládaném zatížení nepřesáhl úbytek napětí hodnotu povolenou normou.

Úbytky napětí – fázorový diagram pro vedení vn s jednou (induktivní) zátěží na konci



Komplexní úbytek napětí:

$$\Delta \hat{U}_f = \hat{Z} \hat{I} = (R + jX)(I_c \mp jI_j) \begin{matrix} \text{induktivní}(-) \\ \text{kapacitní}(+) \end{matrix}$$

$$= RI_c \pm XI_j + j(XI_c \mp RI_j) \begin{matrix} \text{induktivní} \\ \text{kapacitní} \end{matrix}$$

- členy RI_c a XI_j ovlivňují především velikost úbytku napětí ΔU_f (reálná část úbytku)
- členy RI_j a XI_c ovlivňují především úhel mezi fázory U_{f2} a U_{f1} (imaginární část - zanedbáme)

Při obvyklém provozu vedení je úhel mezi fázory napětí U_{f1} a U_{f2} velmi malý (do 3°) – při praktickém výpočtu proto uvažujeme jen reálnou část (imaginární zanedbáme) **úbytku napětí**:

$$\Delta \hat{U}_f \cong \Delta U_f = RI_{\check{c}} + XI_j = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi$$

Rozšíříme pravou stranu rovnice výrazem $3U_f / 3U_f$ a upravíme:

$$\Delta U_f = \frac{RP + XQ}{3U_f} \quad (\text{V; } \Omega, \text{ W, } \Omega, \text{ VAr, V})$$

Procentní úbytek napětí:

$$\Delta u_{\%} = \frac{\Delta U_f}{U_f} \cdot 100 = \frac{RP + XQ}{3U_f^2} \cdot 100$$

$$\Delta u_{\%} = \frac{RP + XQ}{3U^2} \cdot 100$$

- znaménko ve vztazích (+) představuje *induktivní zátěž* (viz. fázorový diagram)
- znaménko (-) by jsme užili v uvedených vztazích pro *kapacitní zátěž*

Dimenzování vedení s ohledem na hospodárnost

Toto kritérium má zajistit, aby celkové investiční a provozní náklady na vedení byly co nejmenší.

Zjednodušeně - čím větší průřez vodičů použijeme, tím bude vedení dražší, ale na druhé straně bude mít menší odpor a menší ztráty za provozu.

Účelem návrhu podle tohoto kritéria je nalézt hospodárný průřez vedení jemuž odpovídá minimum celkových nákladů, při určité předpokládané životnosti vedení a předpokládaném zatížení.

Dimenzování vedení s ohledem na mechanické namáhání

- Vodiče pro elektrický rozvod musí být schopny odolávat mechanickému namáhání, které může nastat při montáži, nebo během provozu (pohyblivé přívody, v pohyblivých prostředcích, vedení na pracovních strojích apod.).
- U vodičů pro vnitřní rozvod dochází k největšímu mechanickému namáhání při montáži, nebo vlivem zkratových proudů (těm je věnováno samostatné kritérium návrhu).
- U vodičů venkovního vedení se přidává navíc namáhání povětrnostními vlivy, zejména námrazou a větrem.
- Průřezy vodičů musíme navrhnout tak, aby z hlediska mechanické pevnosti snesly nejvyšší namáhání, které může v provozu nastat. Normy udávají minimální průřezy pro jednotlivé druhy vedení, místo jejich použití, způsob uložení.

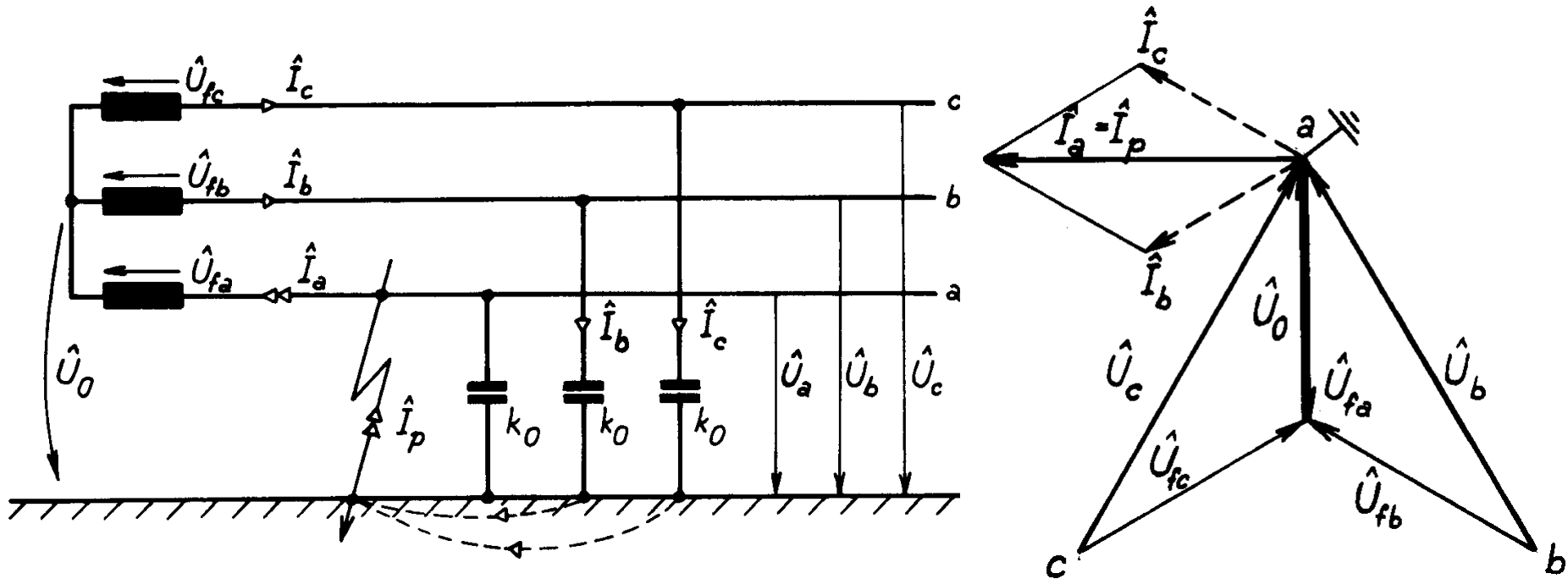
Pro venkovní vedení se většinou používají tzv. Al-Fe lana, což jsou lana s jádrem z ocelových drátů, které zajišťují mechanickou pevnost lana, které je opleteno hliníkovými dráty, které mají lepší elektrickou vodivost. Pro tato vedení je minimální průřez 16 mm².

Otázka:

Uved'te hlediska pro dimenzování průřezu el. vedení

Vodiče dimenzujeme tak, aby jejich provozní teplota nebyla vyšší než dovolená, průřezy vodičů byly v hospodárných mezích, vodiče byly dostatečně mechanicky pevné, úbytek napětí ve vodičích byl ve stanovených mezích a aby vodiče odolávaly tepelným a dynamickým účinkům zkratových proudů.

Zemní spojení v souměrné *vn* síti s izolovaným uzlem



- při bezporuchovém chodu je napětí uzlu proti zemi $U_0 = 0$
- při zemním spojení napětí uzlu stoupne na hodnotu $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$
- napětí nepostižených fází proti zemi stoupnou na hodnotu sdruženou
- **poruchový proud I_p** předbíhá o $\pi/2$ napětí uzlu U_0 a je součtem kapacitních proudů z nepostižených fází

$$\hat{I}_p = -3j\omega k_0 \hat{U}_{fa} = +3j\omega k_0 \hat{U}_0$$

Otázka:

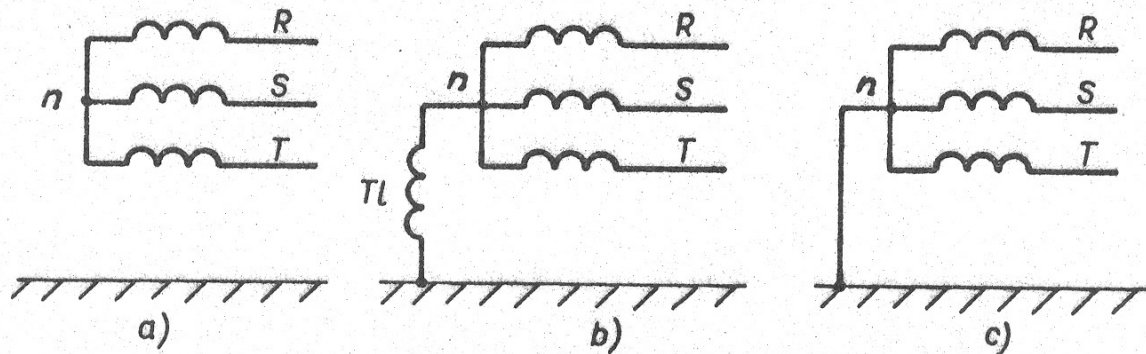
Napět'ové hladiny používané v ČR + způsob uzemnění uzlu sítě

400,220,110 kV = soustava účinně uzemněná

35,22,10,6 kV = soustava izolovaná nebo neúčinně uzemněná

0,5 kV = soustava izolovaná

0,4 kV = soustava účinně uzemněná



Obr. 2.2. Rozvodné soustavy (a - s izolovaným nulovým bodem; b - se zhášecí tlumivkou; c - s uzemněným nulovým bodem)

Otázka:

Rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením

Zemní spojení je porucha, která vzniká v sítích vn provozovaných s izolovaným uzlem nebo s neúčinně uzemněným uzlem, zkrat je porucha vznikající v účinně uzemněných sítích.

Jaké je napětí na zdravých fázích soustavy při jednofázovém zemním spojení (izolovaná soustava)?

- napětí nepostižených fází proti zemi stoupne na hodnotu sdruženého napětí

Jaké je napětí mezi uzlem soustavy a zemí při jednofázovém zemním spojení (izolovaná soustava) ?

- napětí uzlu stoupne na hodnotu záporného fázového napětí postižené fáze

Jaký charakter mají proudy uzavírající se zemí při zemním spojení a jak je lze kompenzovat ?

- poruchový proud uzavírající se zemí je součtem kapacitních proudů z nepostižených fází (kapacitní charakter – proud předbíhá o $\pi/2$ napětí uzlu soustavy U_0)

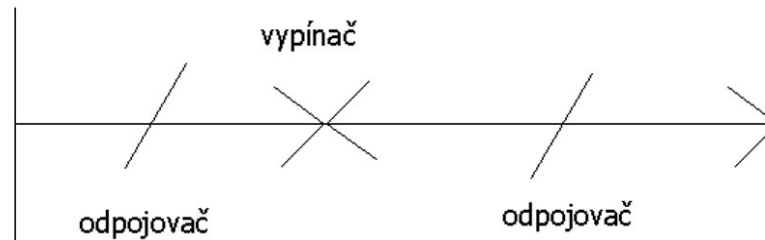
- velikost poruchového zemního proudu je závislá na celkové rozloze sítě připojené k transformátoru

- kompenzace se provádí pomocí regulovatelných zhášecích tlumivek zapojených mezi uzel transformátoru (soustavy) a zem

Otázky:

Jednopolové schéma hlavní odbočky vvn – popis přístrojů v odbočce, postup zapínání a vypínání odbočky

- postup zapínání = nejdříve odpojovače pak zapnout vypínač,
- postup vypínání = vždy nejdřív vypnout vypínač pak odpojovač



Odpojovače:

- nemají žádnou spínací schopnost (malá rychlost kontaktů)
- rozpojují nezátížené (vypnuté) obvody v sérii s vypínačem zajišťují viditelné odpojení pro revize, opravy a práce na zařízení
- musí zajistit, že případné přepětí nepřekoná jejich odpojovací vzdálenost ke druhému kontaktu, ale bude svedeno do země (uzemňovací nože)

Vypínače:

- musí zvládnout všechny druhy zátěží a poruch (jmenovité i zkratové proudy)
- tlakovzdušné, fluorid sírový, olejové, vakuové

Konec