

Předmět: BPC-OZU
Úloha č. 2 Vodní elektrárna – energie vody

Cíl úlohy

Cílem úlohy je seznámit studenty s principem výroby elektrické energie pomocí vodní turbíny (zdroje mechanické energie) a elektrického generátoru tedy systému zvaného turbogenerátor. Student si prakticky ověří princip výroby elektrické energie pomocí kinetické energie vody, získá představu o nárocích a efektivitě systému.

Základní parametry systému:

Nominální výstupní napětí turbogenerátoru: $U = 12 \text{ V}$

Nominální výstupní výkon turbogenerátoru: $P = 6 \text{ W}$

Kontrolní otázky

Jakou účinností (η) disponuje samotná turbína, samotný generátor a celé systém turbogenerátoru?

Jaký druh a typ vodní turbíny je v úloze použit? Uveďte také její název, výhody, nevýhody, účinnost.

Do jaké výšky h [m] musíme vodu přemístit, aby působila tlakem $p = 6 \text{ bar}$?

Zadání úlohy

1. Změřte a vypočítejte výstupní výkon turbogenerátoru P_G [W] pro různé zátěže. Vypočítejte příkon turbogenerátoru P_T [W] a spočítejte účinnost turbogenerátoru η_T [%] pro různé zátěže.
2. Vypočítejte maximální teoretický možný průtok tryskou (kruhového otvoru) o průměru $d = 2,5 \text{ mm}$, vycházejte z naměřených rozdílů tlaků, tedy atmosferickém tlaku a tlaku vody.
3. Spočítejte kolik elektrické energie vyrobí turbogenerátor použitý v naší úloze za den E [kWh] a odhadněte kolik dní běhu turbogenerátoru je za potřebí abychom vyrobili dostatek energie na pokrytí jednodenní energetické spotřeby průměrné české domácnosti s roční spotřebou elektrické energie $E = 6000 \text{ kWh}$.

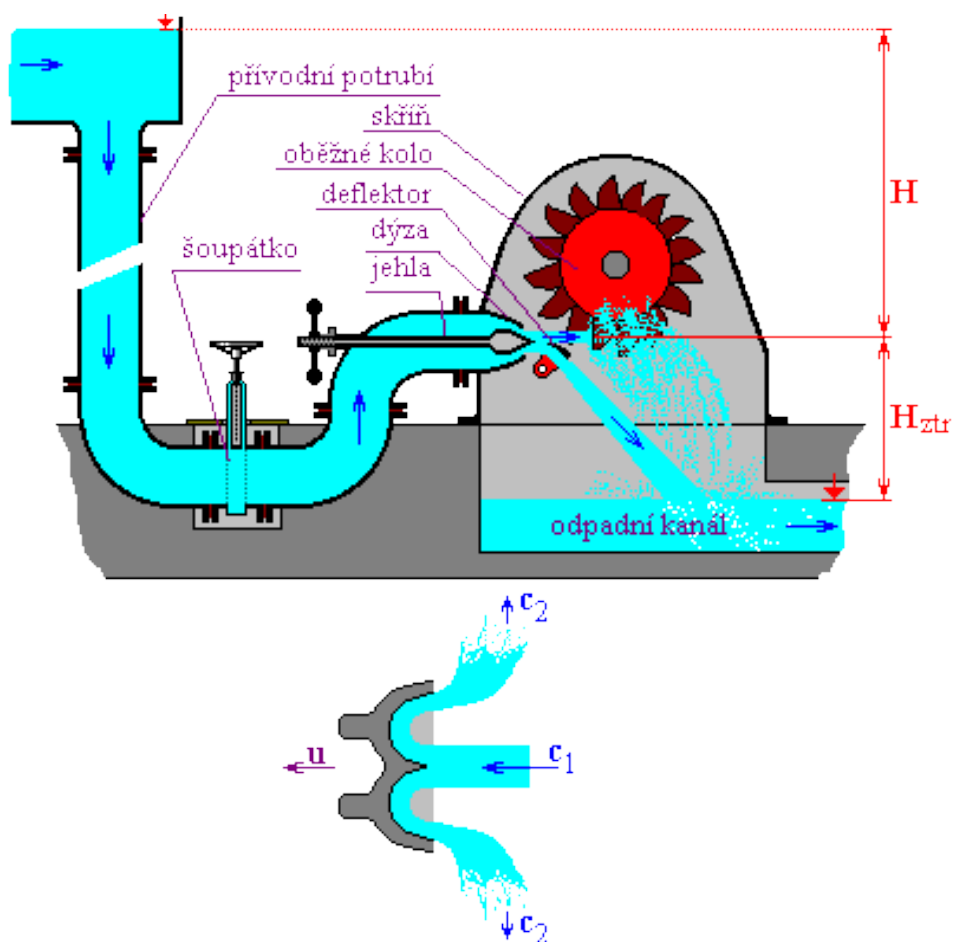
Teoretický rozbor

Výroba elektrické energie pomocí vody se zakládá na přeměně potenciální energie vody (hydrostatický tlak p_H) na kinetickou energii (díky gravitaci). Pomocí vodní turbíny a elektrického generátoru se kinetická energie vody transformuje na mechanickou energii která je následně přeměněna na energii elektrickou. Tato elektrická energie může být následně přeměněna na energii zářivou (o různých vlnových délkách, světelná, infračervená) nebo konvertována a uložena do chemické energie (akumulátory). V laboratorní úloze je použita Peltonova turbína pracující v režimu vysokých tlaků. Peltonova turbína patří do kategorie rovnotlakých turbín s parciálním tangenciálním ostřikem. Účinnost u malé Peltonovy turbíny se pohybuje v rozmezí 80 % až 85 %, u velké turbíny až 95 %. Peltonovy turbíny se používají pro vysoký spád vody a malý průtok. Jsou vyráběny ve všech možných velikostech. Pro použití v

energetice se používá vertikální uložení a výkon až 200 MW. Nejmenší turbíny jsou veliké několik desítek centimetrů a používají se pro malé vodní elektrárny s velkým spádem. Rozsah použití je Peltonových turbín se pohybuje od 15 m až po 1800 m výškového spádu.

Operační princip Peltonovy turbíny

Voda je přiváděna k turbíně potrubím přes trysku o definovaném průměru (dýza). V dýze kruhového průřezu se celý spád vody transformuje na kinetickou energii. Voda vstoupí tangenciálně (tečně) do oběžného kola osazeného lžicovitými lopatkami. Břit uprostřed lopatek rozdělí paprsek na dvě poloviny a lžicovitý tvar lopatky se snaží otočit směr tekoucí vody zpět. Změna směru způsobí předání energie oběžnému kolu. Vzájemným souběhem rychlosti vody tekoucí po lopatce při současném otáčení oběžného kola dojde k tomu, že voda opouští lopatky na vnější straně s minimální zbytkovou rychlostí a volně odchází do obou stran z oběžného kola ven viz Obrázek 1 níže.



Obrázek 1. Náčrt Peltonovy turbíny s detailem lžicové lopatky.

(Zdroj: <http://mve.energetika.cz>)

,kde

H ... značí spád, neboli relativní výšku hladiny vůči ústí přivodní trysky [m]

Základní vstupní parametry vody určující příkon turbogenerátoru jsou hydrostatický tlak p_H [Pa] a průtok Q [m³/s] dle nich je možné spočítat příkon turbogenerátoru P_T pomocí rovnice 1.

$$P_T = 0,65 \cdot g \cdot Q_M \cdot H \cdot \rho \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde

P_T ... příkon turbogenerátoru [W]

g ... konstanta tíhového-gravitačního zrychlení

ρ ... hustota vody

Q_M ... měřený průtok, objem vody za jednotku času [m³/s]

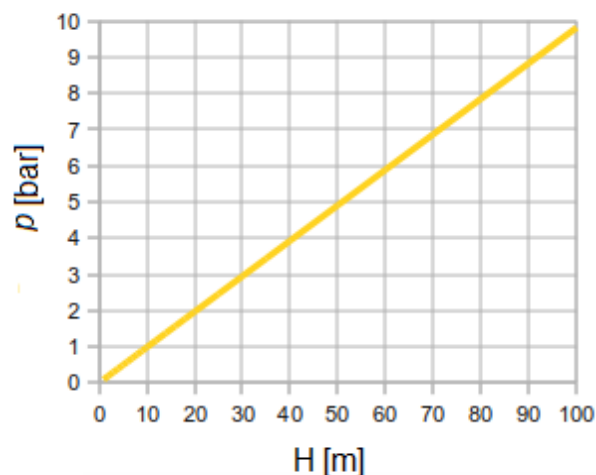
0,65 ... přibližná účinnost použitého turbogenerátoru

Relativní hydrostatický tlak, je tlak který vzniká v kapalině působením její tíhové síly. Na kapalinu, která se nachází v gravitačním poli země, působí gravitační resp. tíhová síla. Hydrostatickým tlakem tlačí kapalina na stěny nádoby nebo na své vlastní části (výše položené vrstvy tlačí svou tíhou na níže položené části kapaliny). Hydrostatický tlak závisí přímo úměrně na hloubce, tedy výšce kapalinového sloupce h [m], hustotě kapaliny ρ [kg.m⁻³] a na gravitačním zrychlení g [m.s⁻²]. Nezáleží na množství (hmotnosti, objemu) kapaliny, ani na tvaru, který kapalina zaujímá. Hydrostatický tlak nutný pro pohon turbíny respektive turbogenerátoru je vytvářen axiálním vícekomorovým čerpadlem o maximálním výtlaku 6 bar viz příloha. Jak je patrné z rovnice 2 a Obrázku 2, velikost hydrostatického tlaku vody přímo závisí na spádu resp. výšce hladiny H .

$$p_H = g \cdot \rho \cdot H \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

,kde

p_H ... hydrostatický tlak [Pa]



Obrázek 2. Závislost hydrostatického tlaku na výšce hladiny vodního sloupce.

Průtok Q vyjadřuje množství vody prošlé za jednotku čas skrz definovanou plochu otvoru trysky turbogenerátoru. Závislost tlaku a rychlosti proudící kapaliny je popsána Bernoulliho rovnicí (3), tato rovnice respektuje zákon zachování energie a který vychází z II. Newtonova pohybového zákona.

Bernoulliho rovnice říká: „Součet kinetické a tlakové potenciální energie kapaliny o jednotkovém objemu je ve všech částech vodorovné trubice stejný”.

Pro náš případ použijeme zjednodušenou Bernoulliho rovnici (4) pro trysku viz Obrázek 3 níže.

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho} = \text{konst.} \quad (3)$$

$$Q_T = S_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2\right)}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4)$$

$$S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \quad [\text{m}^2] \quad (5)$$

,kde

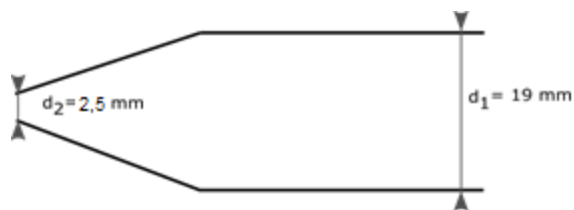
v ... rychlost průtoku tekutiny [m/s]

z ... výška ústí trysky nad hladinou [m]

Q_T ... teoretický průtok [m^3/s případně L/h]

$S_2; S_1$... plošný obsah jednotlivých částí trysky (d_2 a d_1). Musí platit podmínka $S_2 < S_1$.

$p_1 - p_2$ resp. Δp ... hydrostatický tlak – měřeno manometrem (tlakoměrem) umístěným před tryskou



Obrázek 3. Zjednodušený náčrtek vstříkovací trysky turbogenerátoru.

Generovaný elektrický signál je přiváděn k odporové zátěži přičemž procházející proud a úbytek napětí na zátěži tvoří výstupní elektrický výkon. Výstupní elektrický výkon lze vypočítat dle rovnice (6) níže.

$$P_G = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (6)$$

,kde

P_G ... výkon turbogenerátoru [W]

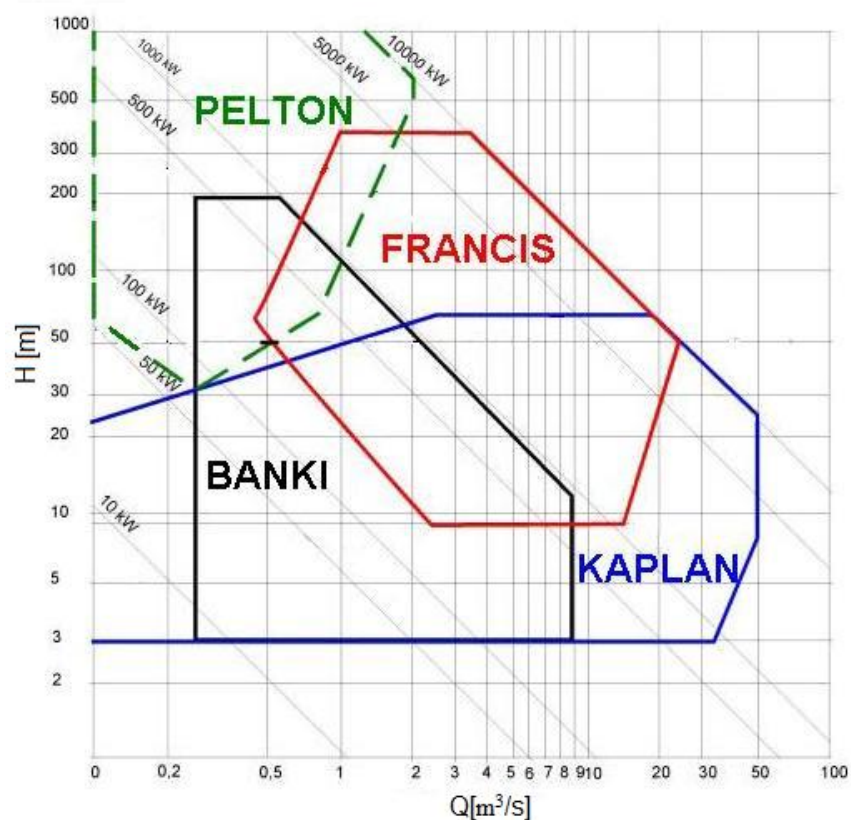
U ... výstupní napětí generátoru [V]

I ... proud zátěží [A]

$\cos \varphi$... účinník, v našem případě se jedná o čistě ohmickou zátěž, tudíž $\cos \varphi = 1$

Důležitým parametrem vodních turbín a obecně turbogenerátorů je jejich účinnost. Účinnost těchto zařízení se pohybuje kolem 80 % až 90 % v závislosti na konkrétním provedení a velikosti. Účinnost turbogenerátoru je výrazně ovlivněna průtokem, se snižujícím průtokem (plněním) klesá. Účinnost lze vyjádřit vztahem (7) níže. Pro dosažení nejvyšší účinnosti je vhodné použít Peltonovu turbínu v aplikacích disponující velkým spádem a menším průtokem jak je znázorněno na Obrázku 4 níže.

$$\eta = \frac{P_G}{P_T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7)$$



Obrázek 4. Diagram znázorňující operační oblast jednotlivých typů turbín v závislosti na spádu a průtoku.

Postup měření

Před započítím měření zkontrolujte zdali je páčka ventilu nádrže ve vodorovné poloze viz Obrázek 5 níže. Po skončení měření vraťte páčku do svislé polohy.

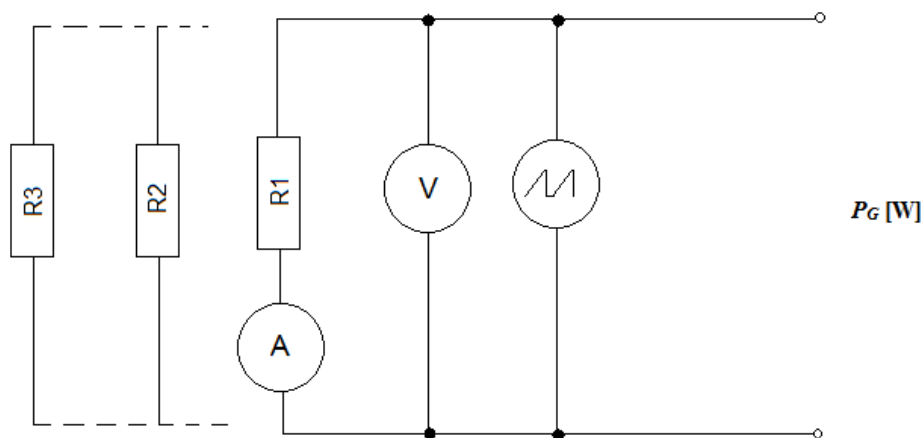


Obrázek 5. Ventil nádrže musí být v poloze „otevřeno“ před spuštěním čerpadla!!

A) Zkontrolujte, zdali je ventil nádrže v poloze „otevřeno“ viz Obrázek 5. Nastavte převod turbogenerátoru za pomoci řemenice spojující vodní turbínu a generátor na nejnižší úroveň. Připojte výstup turbogenerátoru k zátěži a měřicím přístrojům dle schématu na Obrázku 6 níže. Zapněte čerpadlo a několik sekund počkejte na ustálení tlaku v potrubí. Začněte přivádět vodu na Peltonovu turbínu, páčku pro regulaci průtoku nastavte do polohy při níž bude průtok přibližně 300 L/h.

- Odečtěte průtok vody Q [L/h] z průtokoměru a tlak p [bar; kPa] z manometru.
- Pozorujte a přibližně odečítejte proud zátěží I [mA] (přesnou hodnotu proudu vypočtete ze známých hodnot elektrického odporu zátěže a úbytku napětí na zátěži), úbytek napětí na zátěži U [V] a frekvenci generátoru f [Hz].

Páčku pro regulaci průtoku nastavte do polohy maximálního průtoku při níž bude průtok přibližně 600 L/h a postupujte stejně jako v předešlém případě. Po ukončení měření uzavřete přívod vody k turbíně.



Obrázek 6. Schéma zapojení výstupu turbogenerátoru k zátěži a měřícím přístrojům.

- B) Opakujte bod A) pro střední a nejvyšší převod turbogenerátoru. Změřené údaje zpracujete do přehledné tabulky.
- C) Pro daný převod vypočtete (oba průtoky 300 L/h a 600 L/h) příkon turbogenerátoru P_T [W] rovnice (1), výkon turbogenerátoru P_G [W] rovnice (6), teoretický průtok Q_T [L/h] rovnice (4) pouze pro průtok 600 L/h a účinnost η [%] z rovnice (7). Pozor na jednotky a převody mezi jednotkami a veličinami, hydrostatický tlak p měřený manometrem převeďte na spád pomocí rovnice (2).
Hodnoty mezi sebou porovnejte a zhodnoťte.
- D) Pro všechny tři převody změřte voltmetrem maximální generované napětí turbogenerátoru (napětí naprázdno U_{G0}) při maximálním průtoku (600 L/h).
- E) Proveďte výpočty z bodu C) také pro střední a nejvyšší převod turbogenerátoru. Hodnoty mezi sebou porovnejte a zhodnoťte.
- F) Pro střední převod graficky znázorněte (pouze pro maximální průtok 600 L/h) výkon P_G [W] a účinnost η [%] na jednotlivých zátěžích (R_1 , R_2 a R_3).

Příloha

