VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY

– strana 3 – **Historické poznámky**

– strana 5 – **Vítr**

– strana 7 – **Výkon větrné elektrárny**

- **Úloha 592:** Výpočet ročního využití instalovaného výkonu větrné turbíny

– strana 10 – **Konstrukce větrné elektrárny**

– strana 13 – **Stavba větrné elektrárny**

– strana 16 – **Životní cyklus větrné elektrárny**

– strana 18 – **Život s větrnou energetikou**

– strana 19 – **Odkazy**

– strany 21-24 – **Přílohy**

– **autor:** – ŠKORPÍK, Jiří (LinkedIn.com/in/jiri-skorpik)

– **datum vydání:** – Duben 2023, Březen 2024 (2. vydání)

– **název:** – Větrné elektrárny

– **sborník:** – *https://transformacni-technologie.cz/index.html#**zdroje-energie***

– **provenience:** – Brno (Česká republika)

– **email:** – skorpik.jiri@email.cz

Copyright©Jiří Škorpík, 2023-2024
Všechna práva vyhrazena.

Historické poznámky

*Nejstarší zmínka využití větru (lodní plachta) pochází přibližně z 1000 let př. n. l. [Janoška, 2003]. Větrné mlýny (**Obrázek 215**) se v Evropě objevují poprvé na přelomu 1. a 2. tisíciletí n. l. Od 19. století se větrné turbíny používaly i pro čerpání vody ze studní, a ve 20. století se začaly používat i pro výrobu elektřiny na souši (**Obrázek 1093**), oceánu a dokonce i ledu, při expedicích k zemským pólům a k jiným odlehlým částí světa.*

– **215:** – *Větrný mlýn u Ruprechtova s Halladayvou turbínou*

– **1093:** – *Větrné pole v Březanech u Znojma*

Jedná se o 5 jednotek Vestas V52 každá s instalovaným výkonem 850 kW, výškou sloupu 74 m a průměrem rotoru 52 m.

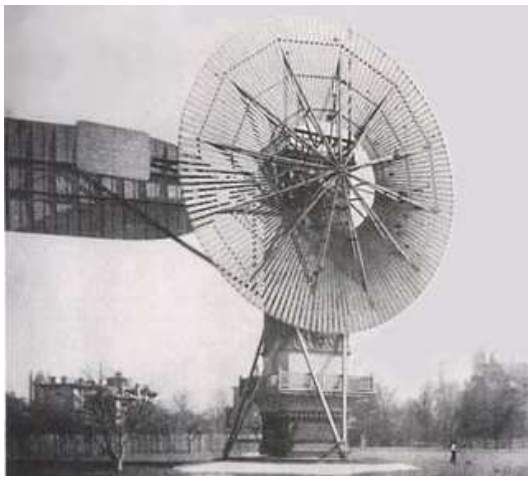
1887: První vědecké experimenty s výrobou elektřiny z větru

Pravděpodobně první pokus vyrábět elektřinu z větru učinil v roce 1887 Skotský profesor James Blyth (1839-1906), když na své zahradě postavil větrnou turbínu poháněnící elektrické dynamo pro dobíjení akumulátoru. Účelem byl výzkum elektřiny a elektrických akumulátorů. Větrná turbína byla konstruována jako klasické mlýnské kolo s plátěnými lopatkami.

1888: První větrná elektrárna určená čistě jen pro výrobu elektřiny

První větrnou elektrárnu určenou pro pohon elektrických zařízení postavil a provozoval od roku 1888 americký vynálezce Charles Francis Brush (1849-1929). Tato elektrárna už byla plně automatizována a s dynamem o výkonu 12 kW. Vyrobená elektřina byla využívána pro pohon elektrických strojů ve vynálezcově laboratoři, **Obrázek 216**.

– **216:** – *Větrná elektrárna Charlese Brushe*



Průměr rotoru: 18 m, počet lopatek: 144 při hmotnosti rotoru 4 tuny.

1885-1908: La Courovy elektrárny s regulací výkonu a počátek teorie aerodynamiky větrných turbín

Prvnímu systematickému výzkumu možností výroby elektřiny pomocí větru se věnoval Dánský profesor Poul La Cour (1846-1908) v letech 1885-1908. La Cour postavil několik experimentálních elektráren a především regulátor výkonu. Vyrobená elektřina sloužila sice k výrobě vodíku pro plynové lampy, ale právě jeho práce byla základem pro formulování teorie větrných turbín [Hau, 2006]. Další vývoj větrných turbín byl spjat s výzkumem jejich aerodynamiky, viz článek Aerodynamika větrných turbín.

1941: Plně automatizovaná velká větrná elektrárna moderního typu

Za přímou předchůdkyni dnešních velkých moderních větrných elektráren lze považovat větrnou elektrárnu Američana Palmera Putnama (1900-1984) vyrobenou společností S. Morgan Smith Company (výrobce vodních turbín) a spuštěnou v roce 1941 v USA. Tato větrná elektrárna byla již plně automatizována a obsahovala i zařízení pro práci v elektrické síti (automatické odpojení od sítě i přifázování), regulaci pomocí natáčení lopatek a otáčení gondoly proti větru [Hau, 2006]. Putnam tak komplexní a přelomovou konstrukci netvořil sám, ale přemluvil ke spolupráci i vědce a techniky z Massachusetts Institute of Technology, mezi nimiž byl skvělý termodynamik Theodore von Kármán (1881-1963), který provedl aerodynamický návrh rotoru.

Současnost: Onshore i Offshore větrné elektrárny

Současné větrné elektrárny, v drtivé většině případů s horizontální osou rotace, jsou složeny ze sloupu, na kterém je umístěna gondola s turbínou, převodovkou i generátorem, viz **Obrázek 1093** (s. 5). Větrné elektrárny umisťované na pevnině se označují v angličtině slovem onshore a elektrárny budované na moři se anglicky označují slovem offshore. Sloupy offshore elektráren mohou být v betonovém základu zapuštěného do dna, přišroubované k příhradové konstrukci pevně stojící na dně, nebo mají plovoucí základ, který je ke dnu ukotven pouze lany (tato varianta umožňuje stavět elektrárny dále od pobřeží ve větších hloubkách [Cejnarová, 2010]), viz **Obrázek 243**.

– **243:** – *Plovoucí větrná elektrárna Hywind Tampen*

Průměr rotoru tohoto typu elektrárny je 167 m při instalovaném výkonu 8 MW. Svislý plovák, ke kterému je sloup připevněn, je ke dnu ukotven lany. Elektrické vedení je vedeno podél jednoho kotevního lana. Zdroj parametrů [Anon., 2020]. Autor obrázku: Kværner

Současné limity větrných elektráren

V současnosti (2020) největší větrné elektrárny stavěné na souši dosahují výšky sloupu kolem 180 m, respektive špice lopatek dosahuje do výše kolem 250 m – elektrárny instalované na moři jsou nižší, ale s větším průměrem rotorů při vyšších výkonech, protože nad oceánem jsou nižší turbulence a vyšší rychlosti větru. Na druhou stranu jsou elektrárny typu offshore daleko od konzumentů elektřiny, proto jsou větrná pole vybavovány transformátorovou plošinou pro převod vyrobené elektřiny na velmi vysoké napětí, nebo dokonce usměrňovači na stejnosměrný proud (HVDC), který má menší ztráty než střídavý.

Vítr

Vítr (proud vzduchu) vzniká v atmosféře z rozdílů tlaků způsobených nerovnoměrným ohříváním povrchu Země. Také je ovlivněn rotací Země (Coriolisova síla, odstředivá síla). Další vliv má (v přízemních výškách) morfologie krajiny, druh rostlin a stavby.

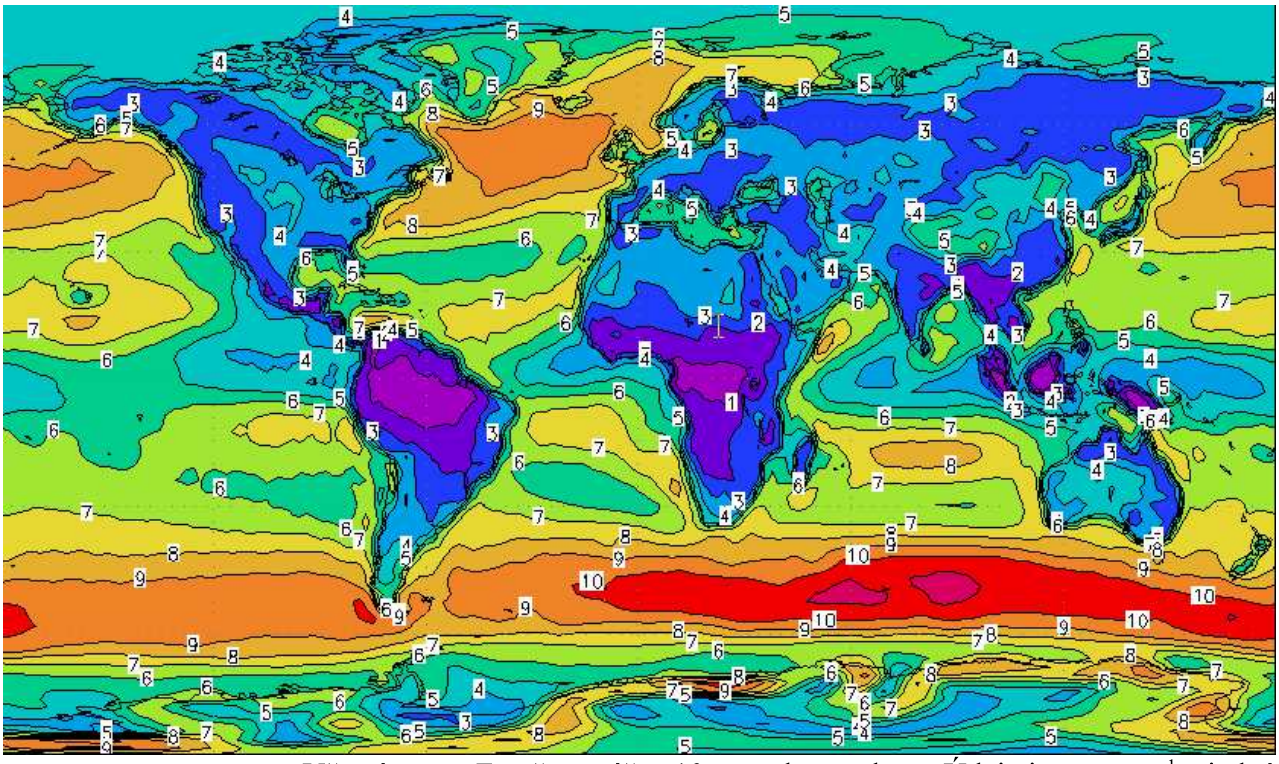
Proměnnost větru během dne i ročních období

Rychlost větru se v dané lokalitě mění i v průběhu dne podle slunečního svitu, který ohřívá vzduch a tím ho uvádí do pohybu, proto k večeru vítr často ustává a dopoledne naopak zesiluje (viz záznamy denní rychlostí větrů z meteorologických stanic) – to samozřejmě platí pro případy, kdy výrazně nepřevažuje vliv kontinentálních tlakových níží a výší. Obecně je více kinetické energie ve větru v létě než v zimě a to asi dvojnásobně.

Větrné mapy

Některá místa na zemském povrchu mají horší větrné podmínky jiná lepší, jak ukazuje mapa rozložení rychlosti větru na **Obrázku 589**, která vznikla z měření prováděné v letech 1976 až 1995 po celém světě (rychlost v některých lokalitách byla dopočítána), a větrná mapa České republiky na **Obrázku 1099**.

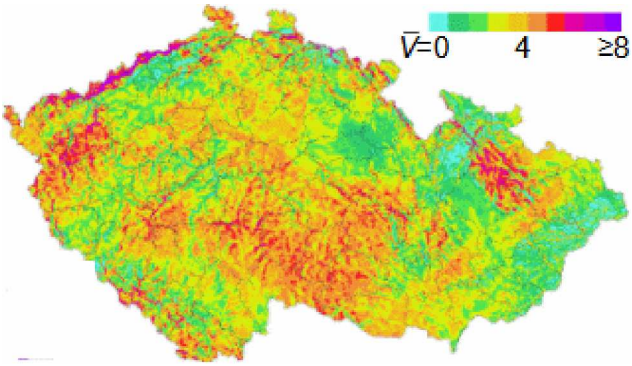
– **589:** –



Větrná mapa Země ve výšce 10 m nad povrchem: Údaje jsou v $m \cdot s^{-1}$ a jedná se o roční průměrné rychlosti větru. Zdroj [Anon., 2010].

– **1099:** –

Větrná mapa ČR ve výšce 10 m nad povrchem (2005)



$\bar{V}$ [$m \cdot s^{-1}$] průměrná hodnota rychlosti větru za rok. Zdroj [Ústav fyziky atmosféry AV ČR].

Výkon větrné elektrárny

Rychlost větru *ve vybrané lokalitě není jediný parametr, na kterém závisí výkon větrné elektrárny, ten je podstatně závislý i na průměru rotoru turbíny. Jestliže chceme předpovědět výkon větrné elektrárny a její* ***roční výrobu elektřiny*** *v dané lokalitě, pak musíme nutně umět předpovědět rychlost větru, rychlostní profil v daném místě a parametry větrné turbíny.*

~ *Výpočet rychlosti větru v požadované výšce nad povrchem*

Výkon větrné elektrárny se počítá z rychlosti větru v ose turbíny, tj. ve výšce této osy. Nejpřesnějším řešením stanovení rychlosti větru v dané lokalitě je měření rychlosti větru v dané výšce (minimálně jeden rok). Pokud je k dispozici měření rychlosti větru na stejném místě ale pro jinou výšku než osa turbíny, pak bude zcela jistě tato rychlost ve výšce osy turbíny jiná. To je dáno tím, že mezi hlavním proudem vzduchu a povrchem země se vytváří mezní vrstva s rychlostním profilem, který lze přibližně vypočítat podle **Rovnice 590** a tříd drsnosti zemského povrchu, které jsou funkcí reliéfu okolní krajiny, viz **Tabulka 591**. Ve vyšších vrstvách může docházet dokonce i k inverzi proudu vzduchu, tj. může se podstatně, téměř skokově, změnit směr i rychlost větru.

– **590:** –

$$V_{z2}=V_{z1}\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{a}$$

a [SI] exponent jehož velikost se odvozuje od reliéfu krajiny – odvozeno od třídy drsnosti zemského povrchu, viz **Tabulka 591**; z_1 [m] výška měření rychlosti V_{z1}; z_2 [m·s^{-1}] požadovaná výška, ve které je rychlost větru V_{z2}; V_{z1} [m·s^{-1}] rychlost větru ve výšce, ve které byla hodnota rychlosti měřena; V_{z2} [m·s^{-1}] rychlost větru v požadované výšce. Zdroj [Crome, 2002].

– **591:** – *Třídy drsnosti krajiny*

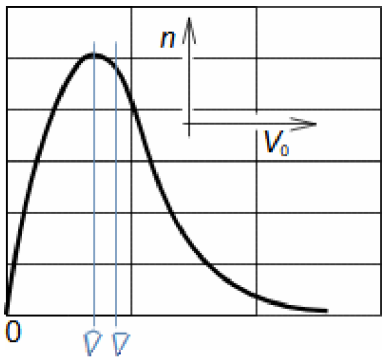
t.d.	charakter krajiny	*a*
0	otevřené pobřeží bez jakýkoliv překážek s větrem směřujícím k pobřeží	0,12
1	otevřená krajina s ojedinělými volně stojícími keři a stromy (pobřeží, prérie)	0,15
2	zemědělská krajina s rozptýlenými budovami a křovinami	0,18
3	uzavřená krajina s porostem stromů, mnoha křovinami a sousedícími budovami	0,24

a [SI]. Zdroj [Crome, 2002].

Četnost rychlostí větru

V každé lokalitě se navíc rychlost větru během jednoho roku mění, proto je výsledkem měření rychlosti větru četnost rychlostí větru, která je na **Obrázku 1100** (s. 8). Konstrukce křivky četnosti na základě naměřených dat je uvedena například v [Ibler et al., 2002, s. 43]. Z křivek četnosti rychlosti větru se pak vychází při stanovování výkonu větrné turbíny v dané lokalitě.

– **1100:** –



n [dny] četnost; $V^{\wedge}$ [m·s^{-1}] modus, což je nejčastěji naměřená hodnota rychlosti větru; V_0 [m·s^{-1}] okamžitá hodnota rychlosti větru.

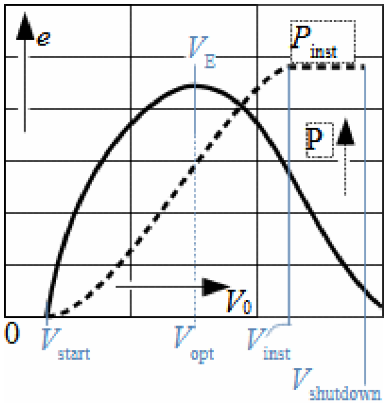
Rayleighovo rozdělení pravděpodobnosti rychlosti větru

Křivka četnosti rychlosti větru je velmi blízká Rayleighovu rozdělení pravděpodobnosti, takže dokážeme-li odhadnout průměrnou hodnotu rychlosti větru, pak lze pomocí vzorců Rayleighova rozdělení odhadnout absolutní četnost rychlosti větru. Tento postup se aplikuje zejména v případech, kdy chybí podrobné dlouhodobé měření rychlosti větru v dané lokalitě, viz **Úloha 592** (s. 9).

Ekonomická rychlost větru

Rychlost větru, při které očekáváme, že elektrárna vyrobí za rok souhrnně nejvíce elektrické energie lze označit za ekonomickou rychlost V_E. Čím bližší jsou si ekonomická rychlost větru V_E a optimální rychlosti větru turbíny V_{opt} (pro tuto rychlost je proveden aerodynamický návrh větrné turbíny), tím vhodnější je tato turbína pro danou lokalitu, viz **Úloha 592** (s. 9). Odtud rozlišujeme výkon větrné elektrárny optimální a jmenovitý neboli instalovaný. Optimální výkon větrné elektrárny odpovídá výkonu, při kterém dosahuje její turbína maximální hodnoty výkonového součinitele. Jmenovitý výkon větrné turbíny je dán především výkonem elektrického generátoru v elektrárně, který je vyšší než je optimální výkon.

– **110:** *Stanovování průměrné roční rychlosti větru a potenciál výroby elektřiny za rok* –

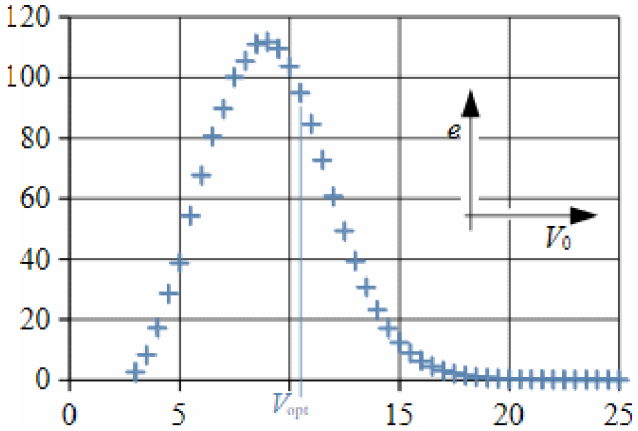


e [kWh] očekávané množství vyrobené energie při dané rychlosti větru za rok; P [W] výkon generátoru při dané rychlosti větru; V_E [m·s^{-1}] ekonomická rychlost větru (rychlost větru, která má největší podíl na výrobě elektřiny za rok); V_{inst} [m·s^{-1}] rychlost větru, při které elektrárna dosahuje instalovaného výkonu P_{inst}; V_{start} [m·s^{-1}] startovací rychlost větru; $V_{shutdown}$ [m·s^{-1}] odstavovací rychlost větru.

~
Roční využití instalovaného výkonu

Množství vyrobené elektřiny za rok získáme sečtením množství elektřiny vyrobené pro jednotlivé rychlosti větru. Tyto hodnoty získáme z výkonové charakteristiky větrné turbíny a četnosti rychlosti větru v dané lokalitě, viz **Úloha 592**. Poměr dodané elektrické energie do sítě za rok ku množství elektrické energie, které by elektrárna za rok vyrobila při maximálním instalovaný výkonu, je parametrem informující o kvalitě výběru větrné turbíny pro tuto lokalitu a nazývá se roční využití instalovaného výkonu větrné elektrárny (capacity coefficient C_f).

– **Úloha 592:** – Spočítejte ekonomickou rychlost větru V_E a roční využití instalovaného výkonu C_f pro větrnou elektrárnu Vestas V52 s turbínou o průměru 52 m. Elektrárna je navržena pro optimální rychlost větru přibližně 10,749 $m \cdot s^{-1}$. Turbína je provozována v lokalitě Znojmo-východ, ve které je průměrná rychlost větru 4 $m \cdot s^{-1}$ ve výšce 10 m. Výška osy turbíny je 74 m. K výpočtu četnosti rychlostí větru použijte Rayleighovo rozdělení pravděpodobnosti. Řešení úlohy je uvedeno v **Příloze 592**.



e [MWh]; *V* [$m \cdot s^{-1}$]

Lokální vlivy na hodnotu ročního využití instalovaného výkonu

Roční využití instalovaného výkonu je ovlivněno i četnosti větru, respektive čím je velikost rychlosti větru stálejší, tím lze lépe výkon elektrárny optimalizovat na tuto rychlost. To lze ovlivnit výškou sloupu turbíny, protože obecně platí, že čím je větší výška sloupu, tím jsou i menší rozdíly v rychlosti větru v oblasti rotoru během roku.

Vliv management elektrárny na hodnotu ročního využití instalovaného výkonu

Roční využití instalovaného výkonu lze zvýšit i kvalitním managementem elektrárny a akumulací elektřiny. V 2013 se začaly testovat větrné elektrárny s řídícím systémem schopným komunikace s dalšími větrnými elektrárnami vzdálenými i několik stovek km a opatřenými akumulací elektrické energie. Tento systém umožňuje predikci výkonu na základě údajů předpovědi počasí a výkonu vzdálených elektráren, od kterých postupuje zesilující/oslabující vítr. Tyto predikce v kombinaci s možnosti krátkodobé akumulace elektrické energie umožňují zvýšit využití instalovaného výkonu větrné elektrárny až o jednotky procent [Anon., 2013]. Díky předpovědím lze dopředu nalézt odbyt vyrobené elektřiny, v opačném případě by se musel výkon větrné elektrárny omezovat.

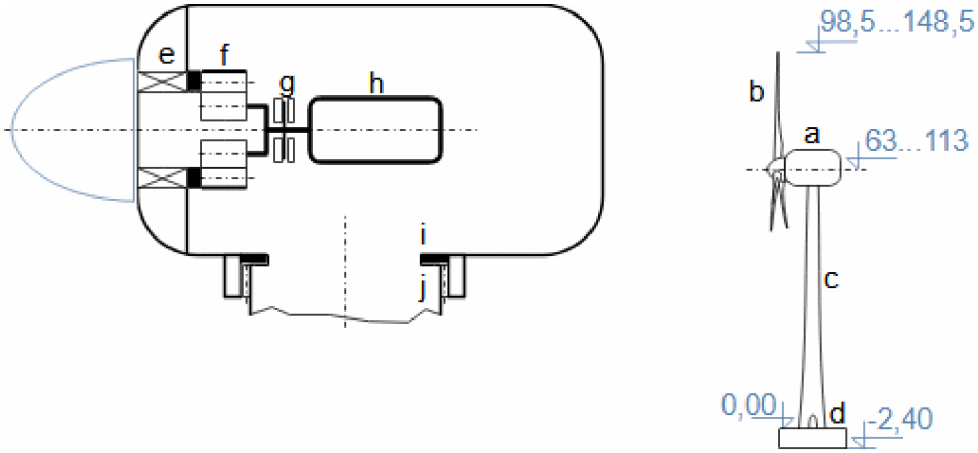
Běžné hodnoty ročního využití instalovaného výkonu

Využití instalovaného výkonu v ČR roce 2015 bylo přibližně 23 %. Přičemž v rámci jednoho roku je využití instalovaného výkonu v zimních měsících poloviční oproti letním měsícům. Nejvyšších hodnot ročního využití instalovaného výkonu mají větrné elektrárny při pobřeží moře, tam lze dosáhnout hodnot přesahujících 50 %.

Konstrukce větrné elektrárny

*Nejmohutnější součást větrné elektrárny je **sloup** a jeho masivní betonový **základ**. Na vrcholu sloupu je **gondola** obsahující **hlavní ložisko**, ve kterém je uložen větrný rotor, převodovku a **elektrický generátor** s příslušenstvím, viz **Obrázek 1094**. V současné době se experimentuje i s **multirotorovými větrnými elektrárnami** a to nejen u malýc výkonů. Skladba větrného rotoru je popsána v článku Aerodynamika větrných turbín.*

– **1094:** – *Obvyklá dispozice hlavních částí moderní větrné elektrárny*



a-gondola; b-turbína; c-sloup; d-základ; e-hlavní ložisko (přírubové); f-převodovka; g-brzda; h-generátor; i-kluzné ložisko kondoly; j-ozubení nátačecího mechanismu gondoly. Čísla na obrázku vpravo jsou v metrech pro ilustraci poměrů jednotlivých rozměrů větrné turbíny.

~ *Sloup větrné elektrárny*

Sloup větrné elektrárny přenáší tíhu celého soustrojí a sílu od větru na základ. Středem sloupu také vede servisní žebřík, schodiště nebo výtah a elektrické vedení do gondoly. Tvar sloupu by měl také splňovat i estetické požadavky v lokalitě.

Konstrukce sloupu

Konstrukce sloupu je nejčastěji tvořena ocelovým dutým kuželem (u malých turbín ocelovým sloupem) případně kombinován se železobetonovým tubusem. Při větších výškách se používají sloupy z příhradové konstrukce z krátkých nosníků. Společnost GE začala v roce 2014 používat kombinaci příhradové konstrukce nosníku potaženého sklolaminátovými pláty pro lepší ochranu konstrukce sloupu před větrem a deštěm a pro chránění přístupové cesty ke gondole [Anon., 2014]. Jednotlivé konstrukce sloupů se od sebe odlišují dobou stavby a její logistikou a také cenou.

~ *Základy*

Základy větrné elektrárny obvykle tvoří betonová deska. U větrné elektrárny s výškou sloupu 75 m se jedná přibližně o rozměry 10x10x5 m (větrný park Březany). O základech elektráren typu offshore je stručně pojednáno již v úvodu článku.

~ *Gondola*

Gondola obsahuje převodovku, spojku, el. generátor a hřídele mezi turbínou a generátorem a další podpůrné vybavení jako jeřáb, chladiče oleje a meteorologická měření. Gondola s celým svým vybavením je uložena na kluzném ložisku s plastickým mazivem, aby se mohla na sloupu natáčet proti větru. Mezi gondolou a sloupem bývá také nainstalováno tlumení, které zabraňuje přenosu vibrací.

~ *Hlavní ložisko*

Hlavní ložisko turbíny, které tvoří spojovací článek mezi rotorem (jeho nábojem) přírubou hřídele převodovky je klíčovou součástí větrné elektrárny. Spolehlivost tohoto ložiska určuje životnost elektrárny. Na **Obrázku 845** je typ ložiska pro větrné turbíny společnosti Schaeffler Technologies AG & Co. KG přírubového typu s řádově metrovými průměry. Otvory v ložisku slouží pro umístěný senzorů teploty, kvality maziva, kontroly předpětí šroubů, kontrola vůlí v ložisku a měření vibrací. Predikce spolehlivosti a trvanlivosti těchto ložisek je jeden z podkladů, pomocí kterých se zákazník rozhoduje o koupi turbíny. Dodávky těchto ložisek představují pro výrobce prestižní záležitost. Investuje se nejen do vývoje, ale i testování ložisek [Anon., 2012a] a to testování, které má co nejlépe predikovat trvanlivost nových typů, u kterých není ještě dostatečné množství dat z provozu. To je velmi důležité při zavádění nových větrných elektráren s většími průměry, aby bylo možné tyto turbíny ihned nasazovat ve větších množství s jistou garancí trvanlivosti.

– **845:** –

Přírubové ložisko pro větrné turbíny typu FAG společnosti Schaeffler

~
Elektrický generátor větrné elektrárny

Napětí na svorkách generátoru větrné turbíny záleží na typu a výkonu. U velmi malých větrných elektráren pracující v ostrovním režimu se jedná většinou o stejnosměrné generátory o napětí 12 až 24 V. U větrných elektráren pro domácnosti to může být až 230 V/fázi. U velkých elektráren napětí často nepřesahuje 1000 V, ale dodávají se generátory pro větrné turbíny o jmenovitém napětí 6,3 kV až 11 kV. Napětí generátoru je transformováno v objektu elektrárny (ve sloupu) na 22 kV nebo vyšší podle místního napětí přenosové soustavy.

Umístění generátoru

Pokud elektrárna neobsahuje převodovku, pak se generátor připevňuje často i mezi turbínu a gondolu. Takto lze pouzdro generátoru lépe zabezpečit proti výměně vzduchu s okolím a zmírnit tak opotřebení generátoru a zmenšit gondolu.

Jalový výkon generátoru pro kompenzaci elektrické sítě

Některé elektrárny mají i funkci regulace jalové elektřiny v přenosové soustavě [Šantín, 2012] – funguje jako rotační kompenzátor jalového výkonu pomocí změn v buzení generátoru. To lze samozřejmě pouze u synchornních generátorů přifázovaných k síti. Další výhodou takových generátorů je, že zvyšují setrvačnost výroby elektrické energie, což je žádaná funkce, protože generátory s frekvenčními měniči ani fotovoltaika setrvačnost nemají.

~
Proč multirotorové větrné elektrárny?

Mimo klasickou konstrukci s jednou gondolou na jednom sloupu se vážně experimentuje i s více menšími rotory na jednom sloupu – tzv. multirotorové větrné elektrárny. S výkonem klasických jednorotorových elektráren totiž rostou i jejich rozměry a hmotnosti součástek. To jednak klade vysoké požadavky na konstrukci (vysoké měrné zatížení, které zvyšuje opotřebení pohyblivých dílů), a jednak na dopravní infrastrukturu. Kdežto v případě multirotorové elektrárny se použije sice více, ale menších součástek (zavádí se sériovost) a dokonce lze uvažovat i menších základech sloupu, na který působí menší páka od axiálních sil rotoru.

Popis multirotorové větrné elektrárny s centrálním sloupem

Na **Obrázku 1225** (s. 13) je prototyp čtyřrotorové větrné elektrárny Vestas. Větrná elektrárna obsahuje čtyři gondoly s vlastním příslušenství a rotorem. Ramena gondol na stejné výškové úrovni jsou propojena a mají společná axiální a radiální ložiska pomocí kterých se mohou otáčet kolem sloupu. Výška sloupu je 60 m, gondoly jsou převzaty z elektráren Vestas V29 s průměrem rotoru 29 m. Celkově instalovaný výkon elektrárny je 4x225 kW, tedy srovnatelný výkon jako jedné elektrárny na **Obrázku 1093** (s. 3).

– **1225:** –

Obrázek [ANON., 2016]

Multirotorové větrné elektrárny s více sloupy

Jako multirotorové se budují i některé plovoucí větrné elektrárny. Většina typů plovoucích elektráren totiž pro stabilizaci používá více jak jeden plovák, obvykle alespoň tři. Některé společnosti tedy místo jedné velké turbíny na takovou plovoucí plošinu instalují více menších turbín.

Cíle výzkumu multirotorových větrných elektráren

Uvedené očekávané výhody multirotových větrných elektráren (snížení měrných nákladů, požadavků na dopravní infrastrukturu při stavbě i oprav a zvýšení spolehlivosti) jsou předmětem výzkumu, stejně tak, jako vliv sloupu u níže položené dvojice na proudění, kde se ukazuje, že je při nízkých rychlostech větru pozitivní [Laan at al., 2019].

Stavba větrné elektrárny

K místu stavby je obvykle nutné přivést elektrické vedení s dostatečnou kapacitou a vybudovat obslužnou komunikaci. Komunikace musí být budována tak, aby po ni mohl projet tahač s lopatkou, jeřáb a betonářské vozy. Následuje stavba základů, sloupu a nakonec vyzvednutí geondoly s generátorem a rotoru s lopatkami, viz ***Obrázek 1102*** *(s. 14).*

– **1102:** –
Stavba větrné elektrárny Enercon

Zdroj: enercon.de.

Podmínky pro práci mobilních jeřábových komplexů

Pro stavbu se vybírá nejméně větrné období v roce, protože mobilní jeřábové komplexy, které jsou pro stavbu nezbytné, lze provozovat pouze do určité rychlosti větru. Toto omezení často prodražuje opravy na větrné elektrárně (taxa za prostoje jeřábu, který je již na místě a nemůže pracovat, blokování dopravy při převozu jeřábu atd.) a prodlužuje jejich dobu.

Metody stavby sloupu

Problém představují i hmotné komponenty sloupu (ten se převáží dělený). V některých případech se přistupuje k odlehčení sloupů za cenu nutnosti jejich "zavětrování" pomocí kotevních lan.

Šplhající jeřábové systémy

Problémy s mobilními jeřábovými komplexy byly podnětem k vývoji tzv. šplhajícího jeřábu. Prototyp takového jeřábu představila společnost Koalalifter v roce 2023, viz **Obrázek 306** (s. 15). Tento jeřáb využívá konstrukci sloupu, po kterém pomocí speciálního upínáku šplhá, přičemž dokáže zvedat břemena výše než je upevněm – takto dokáže přidávat ke stávající konstrukci sloupu další segmenty, po kterých může následně vyšplhat výše.

– **306:** – *Šplhající jeřáb Koalalifter*

Zdroj: koalalifter.com

Vyzvednutí rotoru v celku nebo montáž jednotlivých lopatek postupně na pozici

Při opravě nebo výměně jedné lopatky větrné turbíny se musí demontovat celý rotor turbíny v jednom kuse. Takový úkon je opět velmi citlivý na rychlost větru (rozměrná turbína a nutná přesnost při montáži). Proto v roce 2012 představila společnost AREVA Wind GmbH nový systém (Single blade insttalation-SBI) umožňující montáž rotoru ve výšce po jedné lopatce, viz **Obrázek 892**. Uvedený systém umožňuje montáž lopatky přímo na hřídel gondoly ve výšce v náklonu lopatky až do 330 ° při rychlosti větru do 12 $m \cdot s^{-1}$ [Sharpley, 2012]. Konstruktéři společnosti vyřešili především problém se šikmým zavěšením jedné lopatky během montáže.

– **892:** –

Zařízení na montáž/demontáž větrné turbíny po jedné lopatce

Dělení velmi dlouhých lopatek za účelem její přepravy

Velmi dlouhé lopatky mohou být složeny dokonce ze dvou a více kusů (pro snadnější přepravu a manipulaci ve vnitrozemí), přičemž ta patní část (blíže k ose) je obvykle kovová. Na **Obrázku 217** je montáž rotoru větrné turbíny Enercon e-126 s dělenými lopatkami – Patní části lopatek rotoru se kompletují k hřídeli na zemi a výsledný rotor se zvedá společně. K patní částí lopatek se připevňují druhé poloviny lopatek pomocí šroubů až ve výšce. Průměr rotoru s dělenými lopatkami dosahují až 126 m při instalovaném výkonu 7,58 MW.

– **217:** –

Montáž rotoru větrné turbíny Enercon e-126 s dělenými lopatkami

Doba stavby

Přibližný harmonogram prací od myšlenky k realizaci stavby větrné elektrárny v ČR je v dokumentu Od myšlenky k výstavbě a provozu větrné elektrárny [Anon., 2012b].

Životní cyklus větrné elektrárny

Aktivní doba produkce elektřiny ve větrné elektrárně je omezena její projektovanou životností a v mnoha případech i dobou platnosti povolení k provozu. Jestliže pomineme problémy s povolením, lze na konci této aktivní doby elektrárnu ***renovovat*** *a prodloužit její aktivní dobu produkce nebo* ***recyklovat****. Nová legislativa EÚ umožňuje navíc i tzv.* ***repowering*** *dané lokality.*

~

Renovace větrné elektrárny, zejména jejích lopatek

V drtivé většině případů lze na konci projektované životnosti elektrárny provést její renovaci. Ta spočívá v regeneraci povrchu lopatek, které jsou po 20 letech provozu značně poškozené. Povrch lopatek lze renovovat na pozici, protože jej lze renovovat za studena očištěním stávajících povrchů a nalepením nové vrstvy.

Přemístění elektrárny po její renovaci

Renovaci lze provádět za účelem dalšího fungování elektrárny v dané lokalitě nebo i za účelem přemístění (prodeje) do nové lokality. Takto se v současné době prodávají po renovacích větrné elektrárny budované v západní Evropě v devadesátých letech do východních částí evropy, kde se s větrnou energetikou teprve začíná. V případě nižších rychlostí větru v nové lokalitě lze lopatky dovybavit turbolizátory.

~
Důvody k recyklaci větrné elektrárny

Recyklace větrných elektráren je zcela nový obor, respektive služba, který vznikl z potřeby jednak návratu stanoviště větrných elektráren do původního stavu a jednak likvidace s minimálními odpady. Větrná elektrárna obsahuje velké množství materiálů, viz **Tabulka 593** (jedná se o elektrárnu typu onshore, el. offshore obsahují více vzácných prvků kvůli potřebě zvýšené odolnosti konstrukce v agresivním prostředí oceánu), ale ne pro každý lze nalézt nové využití nebo ho z částí elektrárny efektivně získat. To pro výrobce představuje výzvu, protože mnoho států legislativně vyžaduje, aby určité procento hmotnosti větrné elektrárny bylo recyklovatelné nebo znovuvyužitelné.

– **593:** –
Materiálové složení větrných elektráren

materiál	hm. podíl	materiál	hm. podíl
beton	60-65 %	ocel	30-35 %
kompozitní materiály	2-3 %	elektro komponenty	1 %
měď	1 %	hliník	1 %
PVC	1 %	provozní tekutiny	1 %

Zdroj [Anon., 2015]

Postup recyklace jednotlivých komponent větrné elektrárny

Betonový základ se drtí a drť se dále využívá ve stavebnictví, zejména při stavbě silnic. V případě turbín na moři se základem do dna se uvažuje pouze o odstranění ocelových částí, cca do tří metrů pod hladinou, zbytek v oceánu zůstane. Sloup je běžný ocelový šrot, který se pouze rozřeže na menší díly. Vybavení gondoly se demontuje na původní komponenty, které se recyklují v závodech specializujících se na tyto komponenty. Sklolaminátové lopatky se rozdělí výbuchy na několik dílů na místě, které lze v současnosti spálit v cementárenských pecí a popel se přidává do cementové směsi. Uhlíková vlákna z lopatek se zatím nerecyklují, respektive není pro ně nové využití.

Výzkum nových materiálů lopatek za účelem jejich snadnější recyklace

Největší problém tedy představuje recyklace lopatek. Zde se provádí vývoj nových rozpustných pryskyřic [Herreros, 2023] a dokonce společnost Vestas v roce 2023 oznámila, že vynalezla proces rozložení lopatek vyrobených ze stávajících pryskyřic [Anon., 2023]. Nicméně jiní výrobci se snaží lopatky vyrobit z lépe recyklovatelných materiálů než je sklolaminát s pryskyřicí, například kovů. To jsou ale postupy obvykle technologicky náročnější než výroba lopatek ze sklolaminátu za studena.

~
Princip Repoweringu větrné elektrárny nebo větrného pole

Jestliže se vymění použité části větrné elektrárny s prošlou životností za výkonnější, pak mluvíme o tzv. repoweringu. Repowering využívá pokroku v dostupných typech větrných elektráren, který nastal během aktivní doby produkce původního typu větrné elektrárny. To znamená například, že v lokalitě, kde doposud bylo pět větrných elektráren, které před dvaceti lety představovali špičku nabídky pro dané parametry lokality, tak dnes lze těchto pět větrných elektráren nahradit pouze jednou nebo dvěma se souhrnně stejným výkonem.

Legislativa pro Repowering

Repowering je i legislativním pojmem. Pod pojmem repowering se rozumí automatické získání prodloužení povoleních potřebných pro stavbu a provoz větrné elektrárny. Takže repowering by měl být časově méně náročný na legislativní proces než stavba větrné elektrárny v nové lokalitě.

Život s větrnou energetikou

Větrné elektrárny musí být z principu součásti krajiny, vytváří nové možnosti zaměstnání a způsobem využití se dokonce stávají součástí ekologického a energeticky nezávislého životního stylu.

Rozestup větrných elektráren

Fyzická přítomnost větrné elektrárny ovlivňuje své okolí, jednak se kolem ní snižuje energie větru, a jednak vznikají turbulence. Proto má smysl další turbínu v rámci větrného pole postavit až ve vzdálenosti, kde už bude proud vzduchu, který prošel rotorem turbíny, opět promíchán s okolním a získá zpět ztracenou kinetickou energii. Minimální vzájemné vzdálenosti větrných turbín doporučuje výrobce (obvykle odpovídá 4-7 průměrům rotoru [Al-Shemmeri, T., 2010]) a povolují příslušné úřady. Nicméně z pohledu účinnosti nemusí být klasická mřížky nevýhodnější, viz studie v [Barnabei et al., 2024].

Stroboskopický efekt a hlučnost větrných elektráren

Dalším omezením větrné elektrárny v krajině, tentokrát hygienickým, je stroboskopický efekt otáčejícího se rotoru a především hlučnost elektrárny, což je problém zejména v obydlených oblastech, například ve vzdálenosti 300 m od elektrárny Vestas V52, při výšce sloupu 49 m lze naměřit hlučnost na úrovni 45 až 40,8 dB, tedy podobná hlučnost jako od větru v blízkých korunách stromů. Hlučnost lze snižovat natáčením lopatek (například v režimu den/noc), i když se sníží výkon elektrárny.

Omezení hospodářského i divokého života

Při výběru vhodné lokality by se, mimo její větrnosti, měly zohledňovat tahy velkých ptáků a ochrana přírody obecně, viz pokyny v [Anon., 2011]. V okolí větrné elektrárny může být zaznamenán pokles jiného hospodářského využití krajiny, například zemědělství lesnictví a nebo rybolovu v případě off-shore turbín. Dokonce se chystá v tomto směru i několik zákonů na automatické odškodnění uživatelům okolní krajiny.

Energetická infrastruktura související s provozem větrných elektráren

S rozmístěním větrných elektráren v krajině se přebudovává i energetická infrastruktura. To znamená budování hustších sítí klasického vedení, tak i dálkových jednosměrných vedení HVDC (High-Voltage Direct Current). Bude se jistě rozvíjet i možnosti akumulace elektřiny vyrobené tímto způsobem, protože jejich výrobu lze jen těžko ovlivnit. Je to tedy i výzva pro způsob konzumace elektřiny.

Záchranné systémy v okolí větrných elektráren

Mimo energetické infrastruktury se změny týkají i dalších typů infrastruktur. Již zmíněné cesta pro transport dílu větrných elektráren, které pak dále slouží k obsluze a i příjezdu techniky záchranného systému v případě havárií a požárů. Tyto záchranné systémy musí počítat s prací ve velkých výškách, což klade vyšší nároky na vybavení i výcvik jednotek dříve dislokovaných na venkově, kde nic z toho do té doby nebylo zapotřebí.

Nové obory vznikající v souvislosti s větrnými elektrárnami

Větrná energetika nepředstavuje pouze relativně nový způsob výroby elektřiny ale také mnoho nových oborových příležitostí. Vznikají nové postupy, technologie a společnosti pro stavbu, údržbu, monitoring, řízení i recyklaci větrných elektráren.

Odkazy

AL-SHEMMERI, T., 2010, *Wind turbines*, Bookboon.com, ISBN 978-87-7681-692-6.

ANON., 2010, *The World of Wind Atlases – Wind Atlases of the World*, http://www.windatlas.dk.

ANON., 2011, *Metodický pokyn k vybraným aspektům postupu orgánů ochrany přírody při vydávání souhlasu podle § 12 a případných dalších rozhodnutí dle zákona č. 114/1992 Sb., které souvisí s umísťováním staveb vysokých větrných elektráren*, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha.

ANON., 2012a, Významný mezník ve vývoji větrných elektráren, *Technický týdeník*, 13/2012, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.

ANON., 2012b, *Od myšlenky k výstavbě a provozu větrné elektrárny*, Česká společnost pro větrnou energii, Praha.

ANON., 2013, Obří inteligentní elektrárna, *Technický týdeník*, 7/2013, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.

ANON., 2014. Stožár s unikátním prostorovým rámem, *Technický týdeník*, 8/2014, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.

ANON., 2015, Byznys budoucnosti: recyklace větrných turbín, *Technický týdeník*, 6/2015, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.

ANON., 2016, *Vestas multi-rotor konceptmølle går ind i den afgørende testfase*, https://www.vindenergi.dtu.dk.

ANON., 2020, *Hywind Tampen: the world's first renewable power for offshore oil and gas*, https://www.equinor.com.

ANON., 2023, *Vestas unveils circularity solution to end landfill for turbine blades*, Vestas Wind Systems A/S.

BARNABEI, Valerio, Francesco, ANCORA, Tullio, Carlo, Maria, CONTI, Michela, CASTORRINI, Alessio, DELIBRA, Giovanni, CORSINI, Alessandro, RISPOLI, Franco, 2024, A Multi Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Design In Deep Water Seas, *Journal Fluids Engineering*, https://doi.org/10.1115/1.4067365.

CEJNAROVÁ, A., 2010, Jak zkrotit vítr z moře, *Technický týdeník*, 11/2010, Business Media CZ, Praha, ISSN 0040-1064.

CROME, Horst, 2002, *Technika využití energie větru*, HEL, Ostrava, ISBN 80-86167-19-4.

HAU, Erich, 2006, *Wind Turbines – fundamentals, technologies, Applications, Economics*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN-10-3-540-24240-6.

HERREROS, Esther, 2023, *Behind the scenes of the onshore RecyclableBlade project*, Siemens Gamesa Renewable Energy, Madrid.

IBLER, Zbyněk, KARTÁK, Jan, MERTLOVÁ, Jiřina, IBLER, Zbyněk ml., 2002, *Technický průvodce energetika-1. díl*, BEN-technická literatura, Praha, ISBN 80-7300-026-1.

JANOŠKA, Martin, 2003, *Větrné mlýny v Čechách, na Moravě a ve Slezku*, Libri, Praha, ISBN 80-7277-153-1.

Maarten van der LAAN, M. P., ANDERSEN, S. J., Ramos GARCÍA, N., ANGELOU, N., PIRRUNG, G. R., OTT, S., SJÖHOLM, M., SØRENSEN, K. H., Vianna NETO, J. X., KELLY, M., MIKKELSEN, T. K., LARSEN, G. C., 2019, Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator, *Wind Energy Science*, 4, 251–271, https://doi.org/10.5194/wes-4-251-2019.

ŠANTÍN, Vlastimil, 2012, *Simulace jevů způsobených připojováním a provozem větrných elektráren a farem*, Západočeská univerzita v Plzni Fakulta elektrotechnická, Disertační práce.

SHARPLEY, Nic, 2012, Single blade installation equipment showcased at Husum, *Windpower Engineering*, http://www.windpowerengineering.com.