

TRANSFORMACE UHELNÝCH ELEKTRÁREN NA PAROPLYNOVÉ

Ondřej Hlaváček, Tomáš Hlinčík

Ústav plyných a pevných paliv a ochrany ovzduší,
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6,
Ondrej.Hlavacek@vscht.cz

V současné době je nejen v České republice stále větší tlak na snižování emisí oxidu uhličitého a také na ukončení těžby a spalování uhlí. Jednou z cest, jak využít stávající provozy uhelných elektráren, je jejich transformace na paroplynové elektrárny. Ty mají nejen nižší emise a vyšší účinnost než uhelné elektrárny, ale také představují stabilní zdroj elektrické energie v porovnání s větrnými nebo solárními elektrárnami. Článek se zaměřuje na samotný popis a princip paroplynové elektrárny, včetně porovnání jejich výhod oproti uhelným elektrárnám. Dále zmiňuje a porovnává způsoby transformace stávajících uhelných elektráren na paroplynové. V závěru je diskutováno možné rozšíření těchto elektráren v České republice v následujících letech s ohledem na politiku EU ve směru ochrany klimatu.

Klíčová slova: elektrárna; uhlí, plyn, repowering, plynová turbína

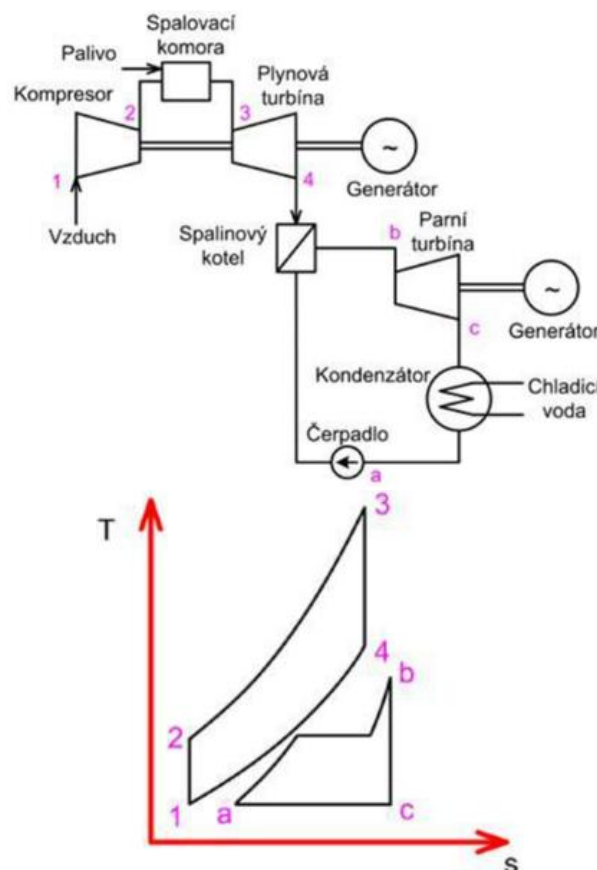
Došlo 07. 07. 2021, přijato 19. 09. 2021

1. Úvod

S postupující změnou klimatu roste tlak na naplnění Pařížské dohody o změně klimatu, tedy snížení nárůstu teploty o 2, respektive 1,5 °C ve srovnání s úrovní před průmyslovou revolucí [1]. Majoritní roli tohoto snížení hrají emise oxidu uhličitého, jejichž velká část je produkována spalováním fosilních paliv. Z tohoto důvodu vyvstal tlak na útlum provozu tepelných elektráren spalujících uhlí, a tedy i hledání nového energetického zdroje. Otázka transformace energetického mixu nejvíce doléhá na země s vlastními těžitelnými zásobami uhlí, jako je Německo, Velká Británie, Polsko nebo Česká republika. V České republice činil v roce 2020 podíl fosilních zdrojů energie 57,65 %, přičemž spalování uhlí tvořilo 46,82 % z celkového energetického mixu [2]. Největší tlak pociťují provozovatelé zejména ze strany EU ETS (Emission Trading System) a stále zvyšujícími cenami emisních povolenek. Komplikace některým z nich přinesly i limity na emise rtuti. To vše se projevuje na ekonomii provozu a je patrná snaha provozovatelů najít alternativu uhlí. Změnu palivového mixu či odstavení uhelných zdrojů již oznámila např. IGCC (Integrated Gasification Combined System) Vřesová či elektrárny Mělník, Dětmárovice a Velké Opatovice [3–6]. Obdobná je situace i v teplárenství. Uhlí komise navíc oznámila konec uhlí v ČR aktuálně do roku 2038. Částečná náhrada těchto energetických zdrojů je spatřována hlavně ve zvyšování kapacit v jaderné energetice, nicméně dalším možným zdrojem je přechod na zemní plyn.

2. Paroplynové elektrárny

Základním principem je paroplynový cyklus. Ten představuje spojení Braytonova a klasického Clausius-Rankinova cyklu. Obr. 1 znázorňuje T-S diagram předřazeného plynového cyklu (body 1–4) a následného Clausius-Rankinova cyklu s přehřátím páry (body a–c).



Obr. 1 Schéma kombinovaného paroplynového cyklu [7]
Fig. 1 Combined Steam-gas cycle scheme [7]

Prakticky celá část Braytonova cyklu se odehrává v plynové turbíně a je rozdělen do 4 fází (viz Obr. 1):

- adiabatická komprese (body 1–2),
- izobarický ohřev plynu (body 2–3),
- adiabatická expanze (body 3–4),
- izobarický odvod tepla (body 4–1).

Vzduch je kompresorem stlačen do spalovací komory, kde dochází ke zmenšení objemu a nárůstu tlaku a teploty (adiabatická komprese). Následuje vstřík paliva, které se okamžitě vznítí (isobarický ohřev plynu) a ideálně adiabaticky expanduje. Spaliny obsahují velkou tepelnou a kinetickou energii, kterou předávají lopatkám na hřídeli. Tato energie je následně použita k pohonu kompresoru a roztáčení rotoru. Spaliny jsou poté odváděny spalínovodem, kde odevzdávají své teplo ve spalínovém kotli parnímu cyklu. Jednotlivá provedení spalínového kotle jsou z hlediska konstrukce odlišná v závislosti na konkrétním zapojení a míře předání tepla páře (od předehřátí napájecí vody až po přehřátí páry).

Braytonův cyklus se v praxi vyskytuje i v jiných modifikacích:

- Uzavřený Braytonův cyklus využívá místo spalovací komory tepelný výměník, kde se plyn zahřívá a zároveň zvyšuje svůj objem. K samotnému pohonu turbíny není zapotřebí spalovací vzduch ani palivo.

- Reverzní Braytonův cyklus je modifikací uzavřeného cyklu, tedy soustavy dvou výměníků. Jeho účelem není generovat elektrickou energii, ale využívá se k chlazení a zkapalňování plynů.

Plynová turbína je tvořena kompresorem, spalovací komorou, turbínou, převodovkou a generátorem, viz obr. 2. Vstup do plynové turbíny je vybaven vzduchovým filtrem a ohřívákem, který zvyšuje její účinnost. Následuje tzv. vstupní skříň, jejímž hlavním úkolem je usměrnit vzduch na lopatky kompresoru. Vstupní skříň je vyrobena z kompozitních materiálů z důvodu snížení hmotnosti a především hlučnosti. Pro snazší údržbu bývá vybavena tlakovými tryskami k omytí nečistot kompresoru [8].

Dle výkonu turbíny obsahuje kompresor volitelný počet článků (stupňů). První stupně lopatek bývají variabilní, s jejich pomocí je regulován výkon turbíny. U konečných součástí kompresoru je uvažováno s rostoucí teplotou, proto jsou tyto části z materiálů s nízkou tepelnou roztažností. Některé typy kompresorů jsou vybaveny i chladicím systémem. Lopatky rotoru jsou vyrobeny z materiálu s vysokou povrchovou hladkostí z důvodu možného opotřebení třením [8].

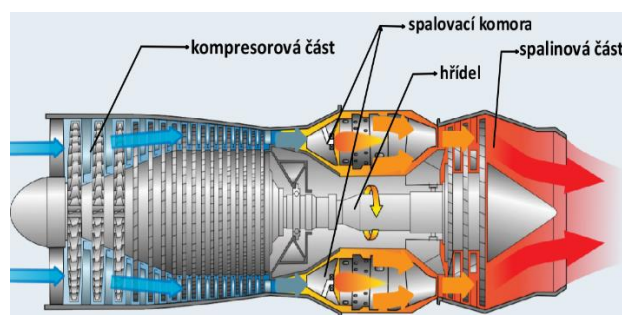
Spalovací komora je vybavena hořákem zajišťujícím přívod paliva a termočlánkem pro kontrolu teploty. Vznícení paliva je dosaženo jiskrovým zapalovačem.

Za spalovací komorou je umístěna turbína, která je propojena s převodovým systémem a následně s generátorem. Turbína se obvykle dělí do několika stupňů, přičemž pro vyšší využití proudění spalin je možné mít lopatky posledního stupně zdvojené. Jednotlivé části výkonnějších turbín jsou kvůli vysokým teplotám chlazeny.

Převodový systém upravuje rychlost hřídele na potřeby generátoru. Skládá se z hnané a hnací hřídele, soustavy ozubených kol, ložisek a armatury olejového hospodářství. Obsahuje také najížděcí motor, který roztáčí turbínu do otáček před zažehnutím paliva při najíždění,

případně pro udržení minimálních otáček při výpadku paliva.

Generátor převádí kinetickou energii na elektrickou. Nejpodstatnější jsou dvě části: stator a rotor. Rotor je přes převodový systém spojený s hřídelí turbíny a pohybem vytváří točivé magnetické pole. Stator je tvořený dvojicemi cívek, které generují elektrický proud. V některých typech zařízení je možné mít dva páry cívek, výsledkem jsou menší otáčky, tedy i menší potřebný výkon. Součástí generátoru jsou rovněž další komponenty jako olejové hospodářství, chladicí systém, ložiska či budicí systém [8].



Obr. 2 Schéma spalovací plynové turbíny [9]

Fig. 2 Combustion gas turbine scheme [9]

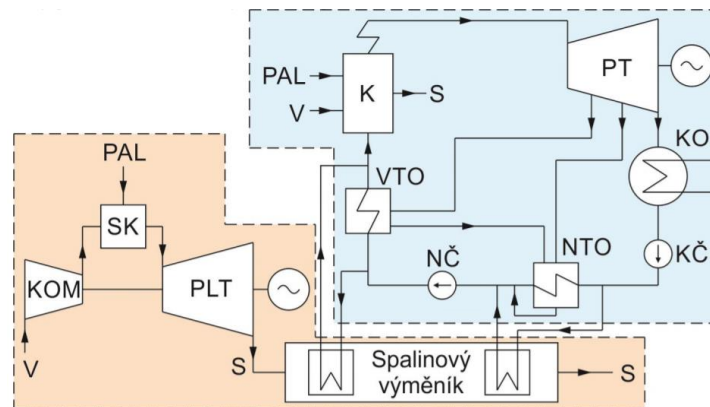
3. Způsoby transformace uhelných zdrojů na paroplynové

Jednou z možností přechodu klasických uhelných zařízení na zemní plyn je tzv. repowering. Repowering ve spojení se zemním plynem je chápán jako doplnění stávající technologie o spalovací plynovou turbínu. Hlavní výhodou repoweringu je prodloužení životnosti technologie, která by skončila společně s uhlím. Další výhody souvisí s aplikací výše zmíněného paroplynového cyklu, např.: zvýšení účinnosti, snížení emisí oxidu uhličitého či vyšší flexibilita k distribuční soustavě.

Plynovou turbínu je možné do technologie zapojit několika způsoby s ohledem na parametry a životnost provozu. Jejich porovnání z hlediska zvýšení účinnosti a výkonu je uvedeno v tab. 1.

3.1. Feedwater repowering

Spaliny z plynové turbíny jsou vedeny do výměníku, kde ohřívají napájecí vodu. Parní a plynový cyklus jsou na sobě nezávislé procesy. Toto řešení je ideální pro špičkové vykrývání odběrů elektrické energie, přičemž parní cyklus je provozován kontinuálně, plynový cyklus najíždí při špičkovém odběru elektrické energie a svými spalinami zvyšuje účinnost a snižuje spotřebu paliva v parním cyklu. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 3. Pro zvýšení účinnosti je možné výměník rozdělit na vysokotlakou a nízkotlakou část a přehřívát jím i část páry v mezipřehřátí [10].



Obr. 3 Schéma Feedwater repoweringu [10]

Fig. 3 Feedwater repowering scheme [10]

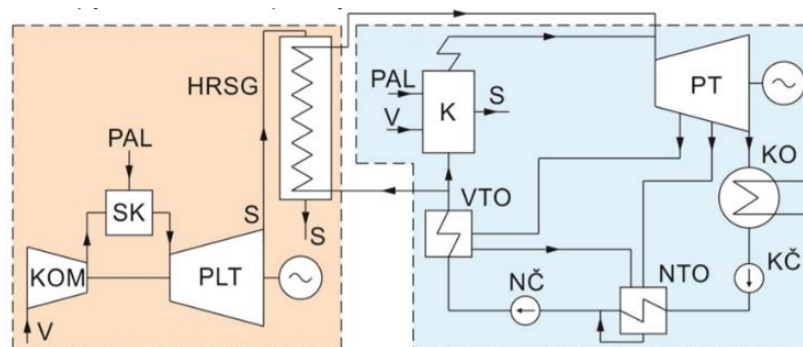
Legenda: V – vzduch; KOM – kompresor; SK – spalinná komora; PAL – palivo; PLT – plynová turbína; S – spaliny; K – kotel; VTO – vysokotlaký ohřívák; NČ – napájecí čerpadlo; NTO – nízkotlaký ohřívák; KČ – čerpadlo kondenzátu; KO – kondenzátor; PT – parní turbína

Legend: V – air; KOM – compressor; SK – combustion chamber; PAL – fuel; PLT – gas turbine; S – flue gas; K – boiler; VTO – high pressure heater; NČ – feed pump; NTO – low pressure heater; KČ – condensate pump; KO – condenser; PT – steam turbine

3.2. Hybrid repowering

Tento druh zapojení se také někdy uvádí pod termíny „supplemental boiler repowering“, „parallel repowering“ nebo „middle pressure repowering“. Stávající technologie je doplněna o plynovou turbínu a samostatný spalinný kotel (Heat Recovery Steam Generator).

Pára, která je v něm generovaná, je využita v již existujícím parním okruhu, viz obr. 4. Takto zapojené bloky lze provozovat odděleně, ale i souběžně v závislosti na provozních parametrech, především hltlosti parní turbíny [10].



Obr. 4 Schéma Hybrid repoweringu [10]

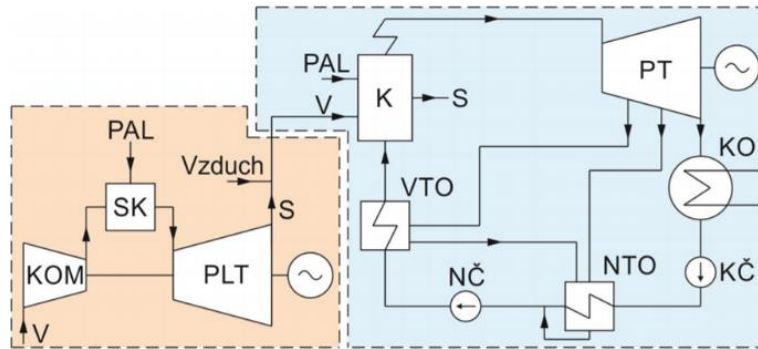
Fig. 4 Hybrid repowering scheme [10]

Legenda jako v případě obr. 3/ Legend as in Fig. 3

3.3. Hot windbox repowering

Známé též pod názvem „Topping“. Spaliny z plynové turbíny jsou vedeny přímo do kotle původní technologie. V praxi se rozlišují dva případy podle množství kyslíku ve spalínách z plynové turbíny. Pokud spaliny obsahují dostatečné množství kyslíku, jsou vedeny do

kotle místo vzduchu. Pokud spaliny neobsahují dostatek kyslíku, jsou nejprve míseny se vzduchem, až následně jsou vedeny do kotle. Zvláště v prvním případě musí být hořáky materiálově přizpůsobeny vyšším teplotám. Výhodou tohoto zapojení je minimální zásah do stávající technologie [11]. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 5.



Obr. 5 Schéma Hot windbox repoweringu [10]

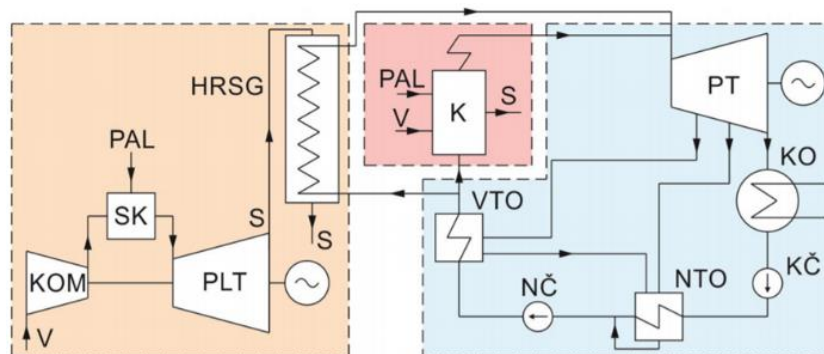
Fig. 5 Hot windbox repowering scheme [10]

Legenda jako v případě obr. 3/ Legend as in Fig. 3

3.4. Full repowering

Jedná se o nejčastěji používanou variantu zapojení, která je velmi podobná Hybrid repowering. Nejčastěji je tato varianta využívána u technologií s končící životností kotle. Nový okruh s plynovou turbínou je tedy dimenzován na parametry schopné poskytnout požadovaný výkon

samostatně, nikoliv ve spojení s parním kotlem, jako je tomu u Hybrid repoweringu. Plynová turbína i kotel jsou zapojeny vedle sebe, přičemž oba tyto systémy jsou napojeny na stejnou parní turbínu. V momentu ukončení provozu kotle se pouze přepojí rozvody napájecí vody do výměníku se spalinami z plynové turbíny [12]. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 6.



Obr. 6 Schéma Full repoweringu [10]

Fig. 6 Full repowering scheme [10]

Legenda jako v případě obr. 3/ Legend as in Fig. 3

3.5. Site repowering

Pod termínem site repowering bývá označována varianta spočívající v demolici stávajícího kotle a nahrazením plynovou turbínou. Na rozdíl od full repowering je zde uvažováno o dostavbě plynové turbíny až po skončení životnosti kotle, podniku se tedy prodlužuje doba, kdy blok negeneruje zisk. [13]

Tabulka 1: Porovnání účinností repoweringu uhelného fluidního cirkulačního kotle s plynovou turbínou [12]

Table 1: Comparison of repowering efficiencies of coal-fired circulating fluidized bed boiler by gas turbine

Repowering	zvýšení účinnosti	Zvýšení výkonu
Feedwater	< 6 %	< 25 %
Hybrid	< 10 %	< 50 %
Hot windbox	< 15 %	< 50 %
Full	< 10 %	< 50 %

4. Závěr

Paroplynové elektrárny představují technologii s vyšší účinností než uhelné elektrárny, včetně těch nadkritických. Existují různé varianty připojení plynové části k parní nejen z hlediska uspořádání, ale i k počtu turbín. Například paroplynová elektrárna Počerady je uspořádána v tzv. režimu „multi-shaft“, kdy spaliny ze dvou plynových turbín (2x284 MW) předávají teplo prostřednictvím dvou spalinových výměníků páře, která napájí jednu turbínu parní (270 MW) [14].

Výhodou paroplynových elektráren je také rychlý nájezd do plného výkonu v řádech desítek minut, který lze využít při vykrývání nedostatků elektrické energie v distribuční síti.

Jelikož je zemní plyn uvažován jako palivo pro plynovou turbínu, spaliny neobsahují či mají řádově nižší emise sírných látek, rtuti a prachových částic. I vlivem vyšší účinnosti bloku jsou emise oxidu uhličitého nižší s porovnáním s klasickými uhelnými bloky.

Větší rozšíření paroplynových bloků v ČR bude ovlivňovat nejen cena zemního plynu, ale i uhelná politika ČR a EU, především cena emisních povolenek. V případě cen emisních povolenek EU ETS je v posledních letech zvyšující se trend. Bohužel lze předpokládat, že s nárůstem cen emisních povolenek dolehnou ekonomické problémy i na provozovatele zdrojů na zemní plyn. Podle dlouhodobějších predikcí se počítá s rozšířením plynových zdrojů ve střední Evropě do roku 2040 a s jejich následným pozdějším útlumem. Evropská komise se opakovaně striktně vyjádřila v neprospěch vyjmutí zemního plynu z EU ETS. Jedním z možných řešení může být nákup zásob bioplynu, který však svou kapacitou nenahradí zemní plyn [15].

Predikce cen zemního plynu není pro provozovatele příznivá, v následujících letech se očekává mírný růst. Zmírnění růstu ceny zemního plynu mohou představovat investice do infrastruktury LNG zejména v evropských přístavech, které by otevřely cestu na trh plynu ze zámořských destinací, především ze země jihovýchodní Asie [15–16].

Uhelné zdroje lze technicky přetransformovat na zdroje paroplynové, kdy lze využít stávající technologii parního cyklu. Lze zvolit i repowering takový, kdy je možné provozovat plynový i uhelný zdroj současně. Z ekonomické a technologické náročnosti je uplatnění repoweringu možné zejména pro teplárenské technologie, v případě velkých uhelných elektráren a za předpokladu zachování jejich stávajících parametrů reálně připadá v úvahu pouze varianta site repowering, tedy úplná náhrada spalovacího zařízení.

Z hlediska financí dávají jednotliví provozovatelé v transformaci svých uhelných zdrojů stále častěji přednost spalování limitovaného množství biomasy, což je méně investičně náročné. Jistotu paroplynových zdrojů nepřidává ani stoupající trend ceny emisních povolenek a opakované prohlášení EU o nevyjmutí zemního plynu z EU ETS. Provozovatelé tak musí doufat v podporu státu. Jako jednou z budoucích nadějí se může jevit tzv. Modernizační fond.

Literatura

1. UNFCCC, Pařížská dohoda, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>, staženo 29.6.2021.
2. OTE,a.s. Národní energetický mix, <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>, staženo 29.6.2021.
3. SUAS,a.s. Zastavení plynárenské technologie ve Vřesové, <https://www.suas.cz/10-suas/aktuality/939-zastaveni-plynarenske-technologie-ve-vresove>, staženo 29.6.2021.
4. Česká tisková kancelář, Elektrárna Opatovice pokračuje v přípravě výstavby velké spalovny odpadu, <https://oenergetice.cz/teplo/elektrarna-opatovice-pokracuje-v-priprave-vystavby-velke-spalovny-odpadu>, staženo 29.6.2021.
5. ČEZ, a.s. Dětmarovice končí s uhlím, <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/cez-v-detmarovicich-konci-s-uhlim-teplo-pro-okolni-mesta-bude-vyrabet-z-plynu-140687>, staženo 29.6.2021.
6. ČEZ, a.s. ZEVO Mělník, <https://www.cez.cz/cs/zevo/zevo-melnik.html>, staženo 29.6.2021.
7. Ibler Z., Karták J. Mertlová J.: Technický průvodce energetika, BEN – technická literatura, Praha 2002
8. Lindback M.: System Description: Gas Turbine, Siemens Sweden, Finspang 2006.
9. Testo, s.r.o.: Ovlivňující faktory a parametry měření plynových turbín a jejich význam pro optimalizaci efektivity a emisí, Testo Whitepaper, Praha 2018.
10. Adeli J., Nikenjaji M., Toghraie D.: Full repowering of an existing fossil fuel steam power plant in terms of energy, exergy, and environment for efficiency improvement and sustainable development, Environment, Development and Sustainability 22, 2020, 5965.
11. Yilmazoglu M.Z., Durmaz A.: Hot windbox repowering of coal-fired thermal power plants, Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences 37, 2013, 33
12. Schenk H., Ehren G.: International Gas Turbine Congress, Tokyo, 2.-7.November. 2003, Proceedings of the International Gas Turbine Congress 2003, 102
13. ČEZ, a.s. Paroplynový cyklus Počerady, <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/plynove-a-paroplynove-elektrarny/plynove-elektrarny-cez-paroplynovy-cyklus-pocerady>, staženo 29.6.2021
14. Hanzlík V., Javůrek V., Smeets B., Svoboda D.: Klimaticky neutrální Česko, McKinsey & Company, Praha 2020
15. Melling A.J.: Natural gas pricing and its future: Europe as the battleground, Carnegie Endowment, Washington D.C. 2010
16. KU Leuven Energy Institute, Pricing of energy, https://set.kuleuven.be/ei/images/EI_fact-sheet4_eng.pdf, staženo 29.6.2021

Summary

Transformation of coal-fired power plants on steam-gas power plants

Ondřej Hlaváček, Tomáš Hlinčík

Currently in the EU there are bigger tendencies to reduce emissions of carbon dioxide and phasing out of coal mining and combustion. There are some possibilities to transform current coal-fired power plant to steam-gas one. The advantages of steam-gas power plant are lower amount of emissions and higher efficiency unlike coal-fired one and stability of energy production unlike wind and solar one.

The article focuses on principle, description and advantages of steam-gas power plant. It also mentions and compares methods of transformation current coal-fired power plant to steam-gas one. Finally, the possible expansion of these power plant in the Czech Republic is discussed, with regard to economic aspects and EU climate change policy.