

Vaclav Smil

Energie

Průvodce pro začátečníky

≡ KNIHA ZLIN

Copyright © 2006, Vaclav Smil

The moral rights of the author have been asserted

Translation © Pavel Kaas, 2017

ISBN ???

1

Energie v naší mysli: pojmy a měřítka

Slovo energie je stejně jako mnoho dalších abstraktních pojmů (počínaje hypotézou a konče sófrosyné) řeckou složeninou. Aristotelés (384–322 př. n. l.) vytvořil tento pojem ve své *Metafyzice* spojením $\epsilon\nu$ (v) a $\acute{\epsilon}\rho\gamma\omicron$ (práce) do termínu $\epsilon\nu\acute{\epsilon}\rho\gamma\epsilon\iota\alpha$ (*energeia*, „skutečnost identifikovaná pohybem“), který propojil s *entelechií*, tj. „kompletní realitou“. Podle Aristotela existenci každého předmětu udržuje *energeia* související s funkcí předmětu. Sloveso *energein* má tudíž znamenat pohyb, akci, práci a změnu. Tyto definice nevylepší žádný zásadní intelektuální pokrok po téměř celá dvě následující tisíciletí, a dokonce i mnozí zakladatelé moderní vědy přicházeli s naprosto mylnými představami o energii. Nakonec se tento termín stal prakticky neodlišitelným od výkonu a síly. V roce 1748 si David Hume (1711–1776) v díle *An Enquiry Concerning Human Understanding* postěžoval, že „se v metafyzice nevyskytují pojmy nejasnější a nejistější než *síla*, *výkon*, *energie* nebo *nezbytná spojitost*, s čímž se neustále musíme potýkat ve všech našich výkladech“.

V roce 1807 v přednášce pro Royal Institution definoval Thomas Young (1773–1829) energii jako produkt hmotnosti tělesa a čtverce jeho rychlosti, čímž vyslovil nepřesný vzorec (hmotnost by měla být vydělena dvěma) a omezil vysvětlení na kinetickou (mechanickou) energii. O tři desetiletí později sedmé vydání *Encyclopedia Britannica* (dokončené v roce 1842) přineslo pouze velice stručný a nevědecký záznam popisující energii jako „sílu, účinek nebo výkon tělesa. Používá se též obrazně k označení důraznosti projevu.“ V běžném projevu se od té doby, vlastně už od Humeových časů, změnilo kromě frekvence nesprávného užívání pojmu jen málo. Na počátku 21. století se podstatné jméno energie i z něj odvozené přídatné jméno (energický) používají zcela bez výběru jako kvalifikátory jakéhokoliv množství rušných, živých, intenzivních akcí a prožitků a energie je stále běžně zaměňována se silou, mocí a výkonem. Příklady je spousta – výkonný nový ředitel vnáší čerstvou energii do staré společnosti; dav je v moci působivého řečníka; pop kultura je měkkou silou Ameriky.

Stoupenci fitness jdou ještě dál a prohlašují (proti veškeré logice i vědeckým důkazům), že jsou nabití energií *po* obzvlášť náročném delším cvičení. Ve skutečnosti tím chtějí říci, že se po něm cítí lépe, pro což máme naprosto srozumitelné vysvětlení – dlouhodobé fyzické cvičení podporuje uvolňování endorfinů (neurotransmitterů, které tlumí vnímání bolesti a navozují euforii) v mozku, a může tudíž navozovat výrazné pocity pohody. Po dlouhém běhu můžete být unavení, dokonce i vyčerpaní, můžete být nadšení až euforičtí – ale nikdy nemůžete být nabití energií, tj. nemůžete mít vyšší hladinu akumulované energie, než jste měli, než jste se rozběhli.

Věda o energii: původ a abstrakce

Používání vžitých pojmů bez jakéhokoliv řádu se vymýtit nedá, ale pro více než stoleté užívání špatně definované terminologie v odborných textech není omluva. Teoretické výzkumy energie dosáhly uspokojivé (ačkoliv ne dokonalé) koherence a srozumitelnosti před koncem 19. století, kdy po generacích váhavého progresu propuknuvší intelektuální a vynálezecká aktivita v západním světě položila pevné základy moderní vědy a záhy vyvinula mnohé z jejích sofistikovanějších konceptů. Budování základů tohoto vývoje začalo v 17. století a významně pokročilo o století později, kdy bylo podpořeno přijetím Newtonova (1642–1727) komplexního vnímání fyziky i technickými experimenty souvisejícími zejména se zdokonalením parních strojů Jamesem Wattem (1736–1819) (obr. 1; viz též obr. 19).

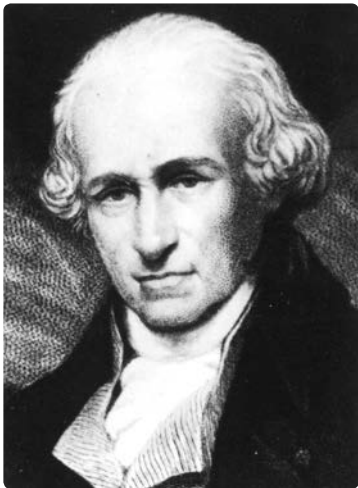
Na počátku 19. století byly klíčovým příspěvkem k mnohostranné povaze moderního chápání energie teoretické dedukce mladého francouzského technika Sadiho Carnota (1796–1832), který stanovil univerzální principy platné pro produkci kinetické energie z tepla a definoval maximální účinnost ideálního (vratného) tepelného stroje. Krátce nato Justus von Liebig (1803–1873), jeden ze zakladatelů moderní chemie a vědecky podloženého zemědělství, předložil v zásadě správný výklad metabolismu lidí a zvířat, v němž přisoudil vznik oxidu uhličitého a vody oxidaci potravy.

Formulace jednoho z nejzásadnějších zákonů moderní fyziky má původ v cestě na Jávu, kterou v roce 1840 podnikl mladý německý lodní lékař Julius Robert Mayer (1814–1878). Krev pacientů, jimž tam pouštěl žilou (tento postup se v léčbě řady onemocnění uplatňoval ještě dlouho

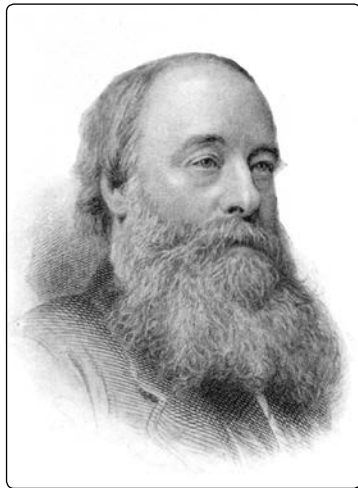
i v 19. století), se zdála být mnohem světlejší než krev pacientů v Německu.

Mayer nešel pro vysvětlení daleko. Krev v tropech podle něj nemusí být tolik okysličována jako v mírném podnebném pásu, protože v teplém podnebí není k tělesnému metabolismu zapotřebí tolik energie. Tato odpověď jej však zavedla k další zásadní otázce. Pokud se v tropech ztrácí méně tepla vyzařováním, co teplo ztracené v důsledku fyzické práce (tj. vynaložení mechanické energie), která zjevně ohřívá okolní prostředí, ať již je vykonávána v Evropě, nebo v tropické Asii? Pokud mu nepřisoudíme nějaký mysteriózní původ, pak i toto teplo musí pocházet z oxidace krve, a tudíž teplo a práce musí být ekvivalentní a v pevně daném poměru převoditelné. Tak začala formulace zákona zachování energie. V roce 1842 Mayer publikoval první kvantitativní odhad energetického ekvivalentu a tři roky nato rozšířil koncept zachování energie na veškeré přírodní jevy včetně elektřiny, světla a magnetismu a popsal detaily svého výpočtu založeného na pokusu s prouděním plynu mezi dvěma izolovanými válci.

Správnou hodnotu ekvivalentu tepelné a mechanické energie našel anglický fyzik (obr. 2) James Prescott Joule (1818–1889) poté, co provedl spoustu pečlivých experimentů. Joule používal vysoce citlivé teploměry k měření teploty vody mísené soustavou otočných lopatek poháněných klesajícími závažími; toto uspořádání umožňovalo poměrně přesné měření mechanické energie vynaložené na proces míchání. V roce 1847 přinesly Jouleovy puntičkářské experimenty výsledek s méně než 1% odchylkou přesnosti od skutečné hodnoty. Zákon zachování energie, podle nějž energii nelze vyrobit ani zničit, je nyní všeobecně znám jako první zákon termodynamiky.



1 | James Watt



2 | James Joule

V roce 1850 německý teoretický fyzik Rudolf Clausius (1822–1888) publikoval svoji mechanickou teorii tepla, v níž prokázal, že maximální výkon dosažitelný ze stroje využívajícího Carnotův cyklus závisí výlučně na teplotách zásobníků tepla, nikoliv na charakteru pracovního média, a že chladnější těleso nemůže samovolně předávat teplo tělesu teplejšímu. Clausius na této zásadní teorii dále pracoval a v díle z roku 1865 poprvé použil pojem *entropie* (z řeckého „přeměna“) k měření míry degradace v uzavřeném systému. Clausius rovněž jasně definoval druhý zákon termodynamiky, podle něhož entropie vesmíru směřuje k maximální hodnotě. V praxi to znamená, že v uzavřeném systému (bez jakéhokoliv přísunu energie zvenčí) může dostupnost využitelné energie pouze klesat. Kus uhlí

je vysoce kvalitní a vysoce uspořádaná (s nízkou entropií) forma energie, jehož spálení vyprodukuje teplo, rozptýlenou, neuspořádanou (s vysokou entropií) formu energie nízké kvality. Tato sekvence je nevratná: rozptýlené teplo (a uvolněné plynné spaliny) se už nikdy nemůže znovu stát kusem uhlí. Teplo má tudíž v hierarchii energií jedinečnou pozici: všechny ostatní formy energie lze v teplo zcela přeměnit, jeho přeměna na jiné formy však nikdy nemůže proběhnout beze zbytku, protože pouze určitý podíl prvotního vstupu skončí jako nová forma.

Druhý zákon termodynamiky – univerzální směřování k tepelné smrti a degradaci – se stal snad nejvýznamnější ze všech kosmických generalizací, ač jej většina nevědců nadále ignoruje. Tuto skutečnost famózně vystihl C. P. Snow (1905–1980), anglický fyzik, politik a spisovatel, ve své redeovské přednášce (Rede Lecture) z roku 1959 nazvané *Dvě kultury a vědecká revoluce*:

Mnohokrát jsem byl přítomen shromážděním lidí považovaných podle měřítek tradiční kultury za hluboce vzdělané, kteří s gustem vyjadřovali úžas nad nevzdělaností vědců. Tu a tam jsem se nechal unést a zeptal se společnosti, kolik z nich by dokázalo popsat druhý zákon termodynamiky. Reakce byla chladná a záporná zároveň. A přesto byla má otázka jakýmsi vědeckým ekvivalentem dotazu: „Četli jste Shakespeara?“

Navzdory předpokládané univerzálnosti se zdá, že je druhý zákon neustále porušován živými organismy, jejichž početí a růst (jako jedinců) i evoluce (jako druhů a ekosystémů) produkují výrazně uspořádanější a komplexnější formy života. Ve skutečnosti však o žádný konflikt nejde,

protože druhý zákon termodynamiky se vztahuje pouze na uzavřené systémy s termodynamickou rovnováhou. Biosféra Země je otevřený systém, který bez ustání importuje sluneční energii a využívá její fotosyntetické konverze na novou fytohmotu jako základu pro vyšší uspořádanost a organizovanost (redukci entropie).

Třetí zákon termodynamiky, který formuloval roce 1906 Walther Nernst jako tepelný teorém, říká, že všechny procesy dospějí k zastavení (a entropie na tom nic nemění), pouze pokud se teplota přiblíží absolutní nule (-273 °C).

První desetiletí 20. století přineslo zásadní rozšíření prvního zákona termodynamiky, když v roce 1905 Albert Einstein (1879–1955) dospěl k závěru, že hmota sama je formou energie. Podle snad nejslavnější rovnice na světě $E = mc^2$ je energie rovna součinu hmotnosti a čtverce rychlosti světla. Pouhé čtyři tuny hmoty podle této rovnice obsahují ekvivalent roční světové spotřeby komerční energie. Tento ohromující potenciál však zůstává právě jen potenciálem, protože nemáme prostředky k uvolnění energie hmoty například z vápence nebo z vody.

Relativně velký (avšak stále nedostačující) podíl hmoty dokážeme v komerčním měřítku konvertovat na energii pouze prostřednictvím jaderných reaktorů; štěpením jádra jednoho kilogramu uranu-235 se uvolní množství energie odpovídající 190 tunám surové ropy, přičemž dojde k úbytku pouhého gramu (čili jedné tisícině) původní hmoty. Naproti tomu spálením jednoho kilogramu surové ropy dojde k úbytku pouhé jedné desetimiliardtiny hmoty paliva (a kyslíku potřebného k jeho spálení), což je redukce tak malá, že je prakticky neměřitelná.

Po necelém století usilovného vědeckého bádání bylo poznání podstaty fenoménu energie prakticky kompletní.

Navzdory tomuto obsáhlému a vysoce komplexnímu vědeckému úspěchu však není nijak snadné porozumět základnímu konceptu, který je mnohem obtížněji pochopitelný než například hmota nebo teplota. Richard Feynman, jeden z nejbrilantnějších fyziků 20. století, to ve svých proslulých *Přednáškách z fyziky* z roku 1963 shrnul s odzbrojující upřímností:

Je důležité si uvědomit, že současná fyzika vlastně neví, co je to energie. Nepředstavujeme si, že by se energie vyskytovala v určitém počtu malých kapiček. Tak to není. Existují však vztahy pro výpočet určité číselné veličiny... Je to abstraktní věc v tom smyslu, že to neříká nic o mechanismu nebo příčinách jednotlivých vztahů. (Překlad M. Jodas a I. Štoll, 2000.)

Avšak jakkoliv je to obtížné, musíme se snažit do tohoto abstrakta více proniknout.

Základní pojmy: energie, konverze, účinnost

Dosud nejběžnější definicí energie je „schopnost vykonat práci“, ale úplný význam tohoto jednoduchého výroku se stává jasným, až když přestaneme uvažovat o práci jen jako o mechanické námaze (fyzikálně vzato o energii přenášené vyvinutím síly, obecně vzato o vykonané práci, ať už je to vytuknutí písmena na stroji nebo zasazení rýžové sazenice) a vztáhneme tento pojem obecně na jakýkoliv proces, který produkuje změnu (místa, rychlosti, teploty, složení) zasaženého systému (organismu, stroje, planety).

Pokud budete následujících deset minut nehybně sedět v izolované místnosti a zvažovat tento výrok, nevyvinete v omezeném, striktně fyzikálním a běžně užívaném smyslu uplatnění síly k mechanickému výkonu žádnou práci.

Avšak i když nehybně sedíte, váš metabolismus vykonává spoustu práce, protože energie získaná ze strávené potravy je využívána (abychom uvedli alespoň čtyři zásadní procesy) k dýchání, při němž dochází k příjmu kyslíku a uvolňování oxidu uhličitého; k udržování tělesné teploty zhruba 37 °C; k pumpování krve; a tvorbě řady enzymů, jež řídí vše počínaje trávením a konče přenosem nervových signálů. Usilovným přemýšlením o abstraktním pojmu ve skutečnosti opravdu využíváte o něco více energie, avšak navazování všech těch nervových spojení ve vašem mozku navíc znamená jen zcela zanedbatelné zvýšení energetické náročnosti. Dokonce i když tvrdě spíte, váš mozek se podílí na zhruba 20 % metabolismu vašeho organismu, a ani náročná duševní zátěž tento podíl nijak výrazně nenavýší.

Mimo izolovanou místnost je práce vykonávaná jednotlivými energiemi prováděna nesčítanou spoustou způsobů. Blesk, který sjede z letní oblohy, pracuje úplně jinak než gigantický přístavní jeřáb zvedající obrovské ocelové kontejnery z mola a skládající je do závratné výšky na nákladní loď. A tyto rozdílly spočívají v jedné z nejzásadnějších skutečností fyziky, jíž je existence různorodých forem energie a jejich konverze v prostoru a čase v řádech od galaktického po subatomický a od evolučního po efemérní. Blesk pracuje během nepatrného zlomku sekundy, kdy ozáří a ohřeje atmosféru a rozloží molekuly dusíku, čímž přemění elektrickou energii výboje mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí na energii elektromagnetickou, tepelnou a chemickou. Naopak motory nákladních jeřábů v kontejnerových přístavech pracují

Z na	elektromag- netické	chemické	tepelné	kinetické	elektrické	jaderné	gravitační
elektromagne- tickou	–	chemiluminis- cence	tepelné záření	urychlování náboje fosfor	elektromagnet- ké záření elektroluminis- cence	gama reakce jaderné bomby	–
chemickou	fotosyntéza fotochemie	chemické zpracování	var disociace	radiolytická disociace	elektrolýza	radiační katalýza ionizace	–
tepelnou	solární absorpce	spalování	tepelná výměna	tření	odporové vytápění	štěpení fúze	–
kinetickou	radiometry	metabolismus svaly	tepelná expanze vnitřní spalování	převody	motor elektro- strikce	radio- aktivita jaderné bomby	padající předměty
elektrickou	solární články fotovoltaika	palivové články baterie	termoelektrína termionika	konvenční generátor	–	nukleární baterie	–
jadernou	gama- neutronové reakce	–	–	–	–	–	–
gravitační	–	–	–	stoupající předměty	–	–	–

3 | Energie a jejich konverze

nepřetržitě a konvertují elektrickou energii v mechanickou a polohovou energii naskládaného nákladu.

Energie není jednoduchá a snadno definovatelná entita, ale spíše abstraktní kolektivní pojem, jímž fyzikové 19. století označili celou škálu přírodních i antropogenních (lidmi vyvolaných) jevů. Jejimi nejběžněji se vyskytujícími formami jsou teplo (tepelná energie), pohyb (kinetická nebo mechanická energie), světlo (elektromagnetická

energie) a chemická energie paliv a živin. Některé jejich konverze jsou samotným základem života: během fotosyntézy se malá část elektromagnetické energie světla stává chemickou energií bakterií a rostlin, vaření a topení probíhá konverzí chemické energie biomasy (dřeva, dřevěného uhlí, slámy) nebo fosilních paliv (uhlí, ropy, plynu) na energii tepelnou (obr. 3). Jiné přeměny umožňují ve velkém měřítku využívaný komfort: konverze chemické energie v bateriích na energii elektrickou pohání miliardy mobilních telefonů, přehrávačů i rádií. Další druhy konverze jsou naopak poměrně vzácné, například gama-neutronové reakce, k nimž dochází konverzí elektromagnetické energie na energii jadernou, jsou využívány pouze pro specializované vědecké a průmyslové cíle.

Kinetická energie souvisí s veškerou pohybující se hmotou, ať už jde o těžké protipancéřové granáty z ochuzeného uranu, nebo cáry mračen vznášející se nad tropickým deštým pralesem. Její projevy jsou snadno zaznamenatelné a její velikost lze snadno vypočítat, protože jde o prostou polovinu hmotnosti pohybujícího se předmětu (m) vynásoobenou čtvercem jeho rychlosti (v): $E_k = \frac{1}{2} mv^2$. Zásadní je fakt, že kinetická energie závisí na čtverci rychlosti předmětu. Zdvojnásobením rychlosti se energie zvětšuje čtyřnásobně, ztrojnásobením pak již devítinásobně, a tudíž se při vysoké rychlosti dokonce i malé předměty mohou stát velmi nebezpečnými. Vichry o síle tornáda, jejichž rychlost přesahuje 80 m/s (téměř 290 km/h) dokážou zarazit stéblo rovnající se hmotností peříčku do kmene stromu, drobná částička kosmického smetí (např. uvolněný šroubek) pohybující se rychlostí 8000 m/s dokáže proděravět tlakový skafandr kosmonauta pohybujícího se vesmírem a kosmická loď může být poškozena mikrometeoroidem

Teplo

Spalné teplo (neboli specifická energie) je rozdíl mezi energií vazeb ve výchozích reaktantech a vazeb v nově vzniklých sloučeninách. Nejméně účinná paliva (mokrý rašelina, mokrá sláma) uvolňují méně než třetinu tepelné energie produkované spalováním benzínu nebo petroleje. Energetický obsah paliva, potravin nebo jakéhokoliv jiného spalitelného materiálu lze snadno stanovit spálením absolutně suchého vzorku v kalorimetru (zařízení, které měří teplo uvolněné během chemických reakcí). Teplo je uvolňováno řadou dalších energetických konverzí. Jaderné štěpení je významným komerčně využívaným procesem, jehož teplo slouží k výrobě elektřiny, teplo vznikající odporem vůči elektrickému proudu se využívá k přípravě jídla, ohřevu vody a vytápění, tření produkuje značný podíl nežádoucího (v převodech vozidel) i nevyhnutelného (na styku pneumatik s vozovkou) tepla.

Jakmile je teplo vytvořeno, může se šířit třemi způsoby: *vedením* neboli *kondukcí* (což je přímý molekulární kontakt nejběžnější v pevném skupenství), *prouděním* neboli *konvekcí* (pohybem kapalin nebo plynů) a *sáláním* neboli *radiací* (vyzařováním elektromagnetických vln tělesy teplejšími než jejich okolí). Většina tepla sálajícího při teplotách okolního vzduchu z povrchu Země, z rostlin, budov i lidí má formu neviditelného infračerveného záření, ale žhavé (o teplotě nad 1200 °C) předměty, jako například vinutá wolframová

vlákna v žárovkách, tavená ocel v elektrických pecích nebo vzdálené hvězdy, sálají za doprovodu viditelného světla.

Latentní teplo je množství energie potřebné k dosažení změny fáze látky beze změny teploty. Změna vody na páru (latentní teplo odpařování) při teplotě 100 °C vyžaduje přesně 6,75× více energie než změna ledu na vodu při teplotě 0 °C.

Na ohřev vody rovněž připadá většina z rozdílu mezi hrubou (a tedy vyšší) výhřevností paliva a jeho čistou (nižší) výhřevností. První hodnota se rovná celkovému množství energie uvolněné jednotkou paliva při spalování, kdy je veškerá voda kondenzována na kapalné skupenství (a tudíž došlo k rekuperaci odpařeného tepla); k druhé hodnotě dojdeme po odečtení energie potřebné k odpaření vody vzniklé během spalování. Tento rozdíl činí zhruba 1 % u koksu (což je v podstatě prakticky čistý uhlík, jehož spalování generuje pouze oxid uhličitý), kolem 10 % u zemního plynu a téměř 20 % u čistého vodíku (jehož spalování generuje pouhou vodu). Rozdíl může být ještě větší u dřeva, ale pouze na malé části tohoto rozdílu se podílí vodík přítomný v palivu. Čerstvé (mokré) dřevo prostě obsahuje příliš mnoho (někdy přes 75 %) vlhkosti; většina tepelné energie uvolněné spalováním nezrálého (zeleného) dřeva se spotřebovává na odpařování vody místo na ohřev okolního prostoru, a pokud má mokré dřevo více než 67 % vody, ani nedojde k jeho zapálení.

pohybujícím se rychlostí 60 000 m/s (ač se toto riziko jeví jako skutečně minimální).

Potenciální (polohová) energie je výsledkem změny umístění hmoty v prostoru nebo jejího uspořádání. Gravitační potenciální energie vznikající změnou polohy v gravitačním poli Země je všudypřítomná; získává ji vše, co stoupá, ať je to vznášející se vodní pára, ruka zdvižená v gestu, letící pták nebo vzlétající raketa. Praktickým příkladem využití gravitační potenciální energie s významným ekonomickým přínosem je voda zadržovaná přehradní hrází ke spouštění na lopatky turbíny, a tím k výrobě elektřiny. Tímto způsobem se vyrábí téměř 20 % celosvětové produkce elektrického proudu. Potenciální energie vody za přehradní hrází (nebo kamene vratce umístěného na zvětřavajícím svahu) je prostým násobkem změny polohy hmoty o hmotnosti m směrem vzhůru, její průměrné výšky nad povrchem (h) a tíhového zrychlení (g): $E_p = mgh$. Pružiny napnuté vinutím jsou běžným příkladem praktického využití elastické potenciální energie, která je zadržována deformací a uvolněna jako užitečná práce, když se pružina rozvíjí a pohání hodinový stroj nebo mechanickou hračku.

Biomasa (živě zastoupená v rostlinách, mikroorganismech, zvířatech a lidech, neživě především v půdě, organické hmotě a kmenech stromů) a fosilní paliva (vznikající přeměnou neživé biomasy) jsou enormní zásobárnou chemické energie. Tato energie je udržována v atomových vazbách pletiv, tkání a paliv a je uvolňována spalováním (rychlou oxidací), jež produkuje teplo (*exotermní* reakce). To vede ke vzniku nových chemických vazeb a k tvorbě oxidu uhličitého, často k emisím dusíku a mnohdy i oxidů síry, v případě kapalných a plyných paliv také k uvolňování vody.

Účinnost energetické konverze je prostým poměrem žádoucího výstupu oproti počátečnímu vstupu. Snad nejvyš-

tižnějším příkladem vysoce neefektivního procesu je fotosyntéza. Dokonce ani u těch nejproduktivnějších plodin není v novou rostlinnou hmotu (fytomasu) transformováno více než 4–5 % slunečního záření, které každoročně dopadne na pole, a globální roční průměr tohoto procesu (obvykle limitovaného chladem nebo nedostatkem vláhy) odpovídá ubohým 0,3 %. Je-li počáteční vstup omezen pouze na fotosynteticky aktivní záření (vlnové délky, které mohou být absorbovány rostlinnými pigmenty a jejichž podíl na přichozím slunečním záření představuje kolem 45 %), užitečný přenos se zdvojnásobuje, globálně však zůstává nižší než 1 %. Vysoká energetická ztráta během energetické konverze o nízké účinnosti jednoduše znamená, že pouze velmi malá část počátečního energetického vstupu může být transformována na požadovaný výkon nebo produkt. Žádná energie se neztratí (první zákon termodynamiky), ale (jak diktuje druhý zákon termodynamiky) významný podíl počátečního vstupu končí jako nevyužitelné, rozptýlené teplo.

Existuje však i dostatek procesů, zařízení a strojů s účinností vyšší než 90 %. Elektrinu lze konvertovat na teplo deskovým odporovým ohřívačem se 100% účinností. Zdraví lidé s vyváženou stravou dokážou trávit sacharidy (cukry, škroby) s účinností až 99 %, nejkvalitnější kotle na zemní plyn jsou schopny konvertovat 95–97 % spotřebovaného paliva na teplo pro vytápění obydlí, více než 95 % elektriny je konvertováno na rychlou rotaci výkonných elektromotorů a naopak obří turbíny v tepelných elektrárnách konvertují rotací v magnetickém poli až 99 % své mechanické energie na elektrinu.

Navzdory jejich mnohotvárným projevům – od oslepujícího světla naší nejbližší hvězdy po nepostřehnutelné, avšak smrtící ionizující záření, jež může unikat z vadného jaderného reaktoru, od vysokoteplotního spalování

v raketových motorech po úžasně důmyslné enzymatické reakce probíhající při běžných teplotách a tlacích okolního prostředí – lze veškeré energetické jevy kvantifikovat pomocí nevelkého počtu univerzálních jednotek. Přestože se ve světě stále běžně používají tradiční měrné jednotky, moderní vědecké a technické kvantifikace vycházejí z Mezinárodní soustavy jednotek (*Système International d'Unités*), pro kterou se používá zkratka SI, přijaté v roce 1960. V této knize budu používat pouze příslušné jednotky SI: jejich ucelený přehled včetně předpon označujících násobky a zlomky bude uveden dále v této kapitole.

Kvantitativní chápání: nutnost měrných jednotek

Soustava SI specifikuje sedm hlavních fyzikálních veličin: délku, hmotnost, čas, elektrický proud, teplotu, látkové množství a svítivost. Příslušné jednotky jsou užívány přímo k měření sedmi běžných veličin i k odvozování těch komplexnějších. Druhá jmenovaná skupina zahrnuje některé relativně jednoduché jednotky používané v běžných situacích (plocha, objem, hustota, rychlost, tlak) i složitější pojmy používané ve vědě a v technice (síla, tlak, energie, kapacitance, světelný tok). Pouze tři zásadní veličiny – hmotnost (m), délka (l) a čas (t) – jsou potřebné k odvozování jednotek, s nimiž se opakovaně setkáváme při studiu energie. Plocha je logicky l^2 a objem l^3 , objemová hustota m/l^3 , rychlost l/t , zrychlení (změna rychlosti za jednotku času) l/t^2 a síla podle Newtonova druhého pohybového zákona ml/t^2 (hmotnost násobená zrychlením). Energie se spotřebovává (práce je vykonávána), pokud je síla vyvíjena na určitou vzdálenost: dimenzionální vzorec energie je tudíž ml^2/t^2 .

Základní jednotky SI

Veličina	Název	Symbol
Délka	metr	m
Hmotnost	kilogram	kg
Čas	sekunda	s
Elektrický proud	ampér	A
Teplota	kelvin	K
Látkové množství	mol	mol
Svítivost	kandela	cd

Vědeckou definicí *příkonu* je jednoduše poměr využití energie: příkon se rovná množství energie spotřebované za jednotku času neboli m^2/t^3 . Tento pojem je velmi často nesprávně používán dokonce i v technických časopisech, kde je příkon zaměňován s elektrickým proudem, a v souvislosti s výkonem elektráren; ty ve skutečnosti vyrábějí elektrickou energii v proměnlivém poměru určeném průmyslovou, komerční i občanskou poptávkou po kinetické energii (produkované elektromotory), tepelné energii (pro průmyslové pece, tepelné úpravy a vytápění domácností) a elektromagnetické energii (nebo přesněji po jejím viditelném segmentu, jímž je světlo). To, že znáte jmenovitý výkon konkrétního stroje, vám samozřejmě ještě nic neřekne o tom, kolik energie spotřebuje, pokud nevíte, jak dlouho poběží.

Každý zná standardní označení jednotek SI po délku (metr, m), hmotnost (kilogram, kg) a čas (sekunda, s), ale

Řády energie a výkonu

Základní jednotky energie výkonu se vztahují k velmi malým množstvím. Jediné zrnko cizrny obsahuje 5000 J chemické energie; droboučký hraboš potřebuje 50 000 J denně k pouhému přežití. Plná benzinová nádrž mé Hondy Civic obsahuje zhruba 1 250 000 000 J a při jízdě spalují toto palivo rychlostí asi osmi litrů na 100 km, což odpovídá průměrnému výkonu kolem 40 000 W. Vítr při prudké bouři uvolní více než 100 000 000 000 000 J za necelou hodinu, takže jeho výkon činí přes 25 000 000 000 W. Potřeba specifických předpon, aby nebylo nutné vypisovat všechny ty nuly nebo používat neustále vědeckou notaci 10^n , je tudíž nabíledni, a vzhledem k nepatrné velikosti základních jednotek se při studiu energie používají nejen předpony pro běžné násobky tisíce (10^3 , kilo, k) a milionu (10^6 , mega, M), ale i násobky mnohem vyšší: G (10^9 , giga), T (10^{12} , tera), P (10^{15} , peta) a E (10^{18} , exa). Nové předpony pro 10^{21} a 10^{24} byly k SI přidány v roce 1991.

NÁSOBKY

Předpona	Značka	Vědecká notace
deka	d	10^1
hekto	h	10^2
kilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9

tera	T	10 ¹²
peta	P	10 ¹⁵
exa	E	10 ¹⁸
zeta	Z	10 ²¹
yota	Y	10 ²⁴

Mega, giga a kilo (MJ, GJ, kWh) jsou nejběžněji používané násobky pro energii, kilo, mega a giga (kW, MW a GW) pro výkon. Čistý obsah energie v palivech se pohybuje od 11 MJ/kg (nebo GJ/t) u slámy sušené na vzduchu (se zhruba 20% vlhkostí) po 44 MJ/kg u benzínu, hrubý energetický obsah potravin (přičemž stravitelnost určuje podíl stravy, který je organismem skutečně využit) se pohybuje od necelého 1 MJ/kg u listové zeleniny po téměř 40 MJ/kg u čistých tuků (tabulka následující dále v této kapitole uvádí přehled průměrů a rozsahů obsahu energie u všech běžných paliv a hlavních kategorií poživatin). Jeden tisíc watt hodin nebo 3,6 milionu wattsekund je jedna kilowatt hodina (kWh), jednotka obvykle používaná k měření a oceňování spotřeby energie; průměrná americká domácnost spotřebuje kolem 1000 kWh (1 MWh) měsíčně, což zhruba odpovídá čtrnácti 100W žárovkám rozsvíceným nepřetržitě 30 dnů a nocí.

Energetický obsah paliv	MJ/kg
Vodík	114,0
Benziny	44,0–45,0
Surová ropa	42,0–44,0
Zemní plyn	33,0–37,0

Antracit	29,0–31,0
Černé uhlí	22,0–26,0
Lignity	12,0–20,0
Na vzduchu sušené dřevo	14,0–16,0
Obilná sláma	12,0–15,0

Pokud jde o výkon, u malých kuchyňských spotřebičů (od mlýnků na kávu po kávovary) je to obvykle 50–500 W, výkon osobních automobilů je 50–95 kW u subkompaktů (Toyota Echo) a kompaktů (Honda Civic) a 95–150 kW u sedanů (Toyota Camry a Honda Accord). Velké parní a vodní turbogenerátory mají kapacitu 500–800 MW a jejich mnohočetné agregáty v největších elektrárnách na fosilní paliva na světě dokážou vyrábět elektřinu s výkonem přesahujícím 2 GW. Čínský projekt (největší na světě) Tři soutěsky (San-sia) bude mít šestadvacet turbín s celkovou kapacitou 18,2 GW.

K běžným měřítkům výkonové hustoty patří celkové množství slunečního záření dopadajícího na zemský povrch (průměrně kolem 170 W/m²) a tepelná energie vyzařovaná centry velkých měst (*efekt městského tepelného ostrova*, běžně přesahující 50 W/m²). Pokud jde o vertikální výkonovou hustotu, bytelné stavby by neměly utrpět žádným znatelným poškozením při tocích pod 18 kW/m²; mocná tornáda mívají přes 100 W/m² a tsunami mohou být dokonce ještě ničivější.

Na opačném konci výkonového a energetického spektra jsou množství, jež vyžadují nejběžněji používané zlomky: mili (m, 10⁻³), mikro (μ, 10⁻⁶) a nano (n, 10⁻⁹). Každý úhoz, zatímco píše tuto knihu, mne stojí zhruba

2 mJ kinetické energie, dvoumilimetrová kapka rosy na stéble trávy má potenciální energii 4 μJ a energie protonu je 0,15 nJ. Úsporný laser v CD-ROM mechanice má výkon 5 mW, quartzové hodinky potřebují asi 1 μW a blecha skáče s výkonem nějakých 100 nW.

ZLOMKY

Předpona	Značka	Vědecká notace
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
mili	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
piko	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yokto	y	10^{-24}

k měření teploty se používají spíše kelviny (K) než stupně Celsia; jednotkou elektrického proudu je ampér (A), mol (mol) kvantifikuje látkové množství a kandela (cd) svítivost. Více než dvacet odvozených jednotek včetně veškerých veličin souvisejících s energií má své specifické názvy a symboly, z nichž mnohé byly stanoveny na počest významných vědců a techniků. Jednotka síly označovaná kg m/s^2 (kilogrammetr za čtvereční sekundu) se jmenuje newton (N):

uplatnění síly 1 N dokáže zrychlit hmotnost jednoho kilogramu o jeden metr za každou sekundu. Jednotka energie joule (J) je síla jednoho newtonu působící na vzdálenost jednoho metru ($\text{kg m}^2/\text{s}^2$). Výkon, jednoduše řečeno energetický tok za jednotku času ($\text{kg m}^2/\text{s}^3$), se měří ve wattech (W): jeden watt odpovídá jednomu J/s a naopak energie se pak rovná výkonu násobenému časem, a tudíž jeden joule je jedna wattsekunda.

Jednou z neobjevnějších veličin ve studiu energie je *výkonová hustota* (s jednotkou W/m^2). Tato odvozená jednotka SI je někdy označována více vymezujícím pojmem *hustota tepelného toku*, ale koncept výkonu na jednotku plochy lze logicky aplikovat na jakýkoliv energetický tok počínaje sklizní potravin a konče průměrnou poptávkou po elektřině v hustě zalidněných městských oblastech. Jmenovatelem této veličiny je plocha zemského povrchu, půdorys stavby nebo jakákoliv jiná horizontální plocha. Výkonová hustota přichozího slunečního záření určuje energetické toky biosféry; výkonová hustota energie domácnosti diktuje míru spotřeby paliv a elektřiny. V některých případech je rovněž výmluvný výpočet vertikální výkonové hustoty energetických toků. Mimořádně užitečné je to v případě prudkých větrů, záplav a tsunami, které mohou zasáhnout vegetaci a stavby velkou silou na jednotku vertikální plochy a způsobit rozsáhlé poškození. Stačí si vzpomenout na tsunami v Indickém oceánu dne 26. prosince 2004.

Snad nejsnazší je posoudit velikost těchto jednotek energie a výkonu prostřednictvím tíhového zrychlení. To na zemském povrchu činí $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$; pokud je zaokrouhlíme na 10 (což představuje zvýšení o necelá 2 %), usnadníme si následující výpočet. Držíte-li těleso o hmotnosti 1 kg 1 m nad zemí – například litrovou plastovou lahev s vodou zhru-

ba ve výši svého lokte –, bude tento předmět vystaven síle (zemské přitažlivosti) 10 N. Pokud budete držet něco, co váží desetinu této hmotnosti (mandarinka váží kolem 0,1 kg), bude na tento předmět působit síla jednoho newtonu. Zvednutí mandarinky z podlahy a její položení na stůl (zhruba 1 metr nad podlahou) tedy vyžaduje vynaložení energie jednoho joulu; pokud to provedete za přibližně jednu sekundu, vydali jste energii jednoho wattu.

Na tomto místě je vhodné zopakovat, že samotný výkon nám o celkovém množství energie spotřebované nebo uvolněné posuzovaným procesem nic neřekne. Gigantický blesk má výkon stejného řádu (10^{15} W) jako geotermální tok Země, blesk je však jev prchavý, trvající pouhý kratičký zlomek sekundy, kdežto geotermální tok trvá nepřetržitě od vzniku planety, čili už asi 4,5 miliardy let. Obdobně pokud jste drobná (padesátikilová) žena, váš bazální metabolismus (přeměna potravy na formy energie využitelné k růstu a aktivitě) nepřetržitě po celou dobu vašeho života bude přibližně 60 W, což odpovídá spotřebě žárovky, kterou jen tu a tam rozsvítíte na pár hodin. Sluneční záření dopadající na povrch Země je samozřejmě jejím nejsilnějším trvalým energetickým tokem, který vymezuje většinu přirozených procesů (o zbytek se starají geotermální energie a gravitace), a tím i charakteristiky obyvatelného prostředí planety; jeho intenzita je $1,7 \times 10^{17}$ W (tj. 170 PW). Oproti tomu v roce 2005 spotřeba veškerých fosilních paliv přispěla k této globální intenzitě necelými 12 TW, což odpovídá pouhým 0,007 % slunečního záření přijatého planetou.

Zaměříme-li se na elektřinu, elektrický proud (průtok elektronů vodičem označovaný v rovnicích obvykle značkou I) se měří v ampérech (A) na počest francouzského matematika jménem André-Marie Ampère (1775–1836),

Jednotky mimo soustavu SI

Všechny standardní jednotky SI mají své tradiční (imperiální) protějšky, které jsou dosud používány mnoha řemeslníky i techniky v anglicky hovořících zemích. Energetický obsah paliv je stále běžně vyjadřován v *britských termálních jednotkách* (1 Btu = 1055 J), vykonaná práce v jednotkách *foot-pounds-force* (1 ft-lbf = 1,36 J), výkon (automobilů nebo motorů) v *koňských silách* (1 hp = 745 W) a síla v *librách* (1 libra síly = 4,45 N).

Existuje rovněž jedna metrická jednotka nenáležící k soustavě SI, která není odvozena od žádné ze sedmi základních měrných veličin – *kalorie* je množství tepla potřebného ke zvýšení teploty 1 g vody ze 14,5 na 15,5 °C. Jde o malou energetickou jednotku nepatrně větší než 4 J (1 cal = 4,18 J), proto nejčastěji používáme její tisícinásobek, tj. *kilokalorii* (kcal). Zdravý a aktivní dospělý člověk s indexem tělesné hmotnosti (*body mass index* – BMI – vypočítá se vydělením tělesné hmotnosti v kg čtvercem výšky v m) v optimálním rozpětí 19–25 potřebuje denně přijmout v potravě přibližně 2500 kcal (2,5 Mcal nebo 10,5 MJ).

Namísto používání správné vědecké předpony však nutriční specialisté začali k označování kilokalorie používat značku Cal (tzv. velkou kalorii); protože se namísto velkého počátečního písmene často mylně používá malé, lidé si neuvědomují rozdíl. Může se stát, že se s vámi přátelé budou přít, že denně vám stačí přijmout v potravě pouhých 2500 kalorií. Opravte je – takové

množství by nenakrmilo ani dvacetigramovou myš. I pouhý její bazální metabolismus (kdy by 24 hodin ležela bez hnutí, což u myši není pravděpodobné) vyžaduje přibližně 5800 cal (téměř 16 kJ) denně. Oproti tomu denní bazální metabolická spotřeba zdravého 70kg dospělého muže je kolem 7,1 MJ a aktivita tento ukazatel zvýší o 20% (u sedavých zaměstnání) až 100% (u dlouhodobého náročného úsilí, jako je těžká fyzická práce nebo vytrvalostní sporty).

jednoho ze zakladatelů moderní elektrodynamiky. Volt (V), nazvaný podle Alessandra Volty (1745–1827), jednoho z prvních experimentátorů s elektřinou a vynálezce první baterie, je odvozenou jednotkou ($V = W/A$) elektrického potenciálu, a tudíž měřítkem rozdílu mezi kladným a záporným pólem baterie. Odpor (R), s nímž se proud setkává, se měří v ohmech (Ω) a závisí na materiálu a rozměrech vodiče. Měď je o téměř 70 % lepší vodič než čistý hliník, který naopak vede více než trojnásobně lépe než čisté železo, a dlouhý tenký drát klade vyšší odpor než krátký a tlustý. Hliníkové slitiny jsou však podstatně levnější než čistá měď, proto k výrobě dálkového vedení vysokého napětí používáme jich a nikoliv mědi.

Při stejnosměrném proudu (DC) elektrony proudí pouze jedním směrem, kdežto proud střídavý (AC) v pravidelných intervalech mění amplitudu i směr; v Severní Americe proběhne tato změna 120× za sekundu (frekvence 60 cyklů za sekundu), v Evropě 100× za sekundu. Ohmův zákon – Georg Simon Ohm (1789–1854) byl německý matematik

a fyzik – vyjadřuje lineárně vztah mezi napětím, odporem a proudem ve stejnosměrných obvodech: $U = IR$. Pro obvody se střídavým proudem je nutné zákon modifikovat, protože ignoruje reaktanci, tj. odpor kladený střídavému proudu cívkami (induktivní reaktance) a kondenzátory (kapacitní reaktance). S použitím impedance (Z , kombinovaná reaktance s odporem měřená rovněž v ohmech) modifikovaný zákon zní $I = U/Z$. Bez úpravy však Ohmův zákon bez jakýchkoliv větších odchylek platí pro všechny běžné domácí elektrospotřebiče, jako jsou svítidla a obvyklé přístroje.

Tento vztah má podstatný vliv jak na přenos elektriny, tak na její bezpečné využívání. Elektrický šok a riziko usmrcení elektrickým proudem závisí především na proudu, který prochází tělem. Podle Ohmova zákona $I = U/R$, což znamená, že u jakéhokoliv elektrického napětí (v Severní Americe je v běžné spotřebitelské síti pro domácnosti 120 V, v Evropě 230 V) bude proud minimalizován vyšším odporem. Suchá pokožka představuje odpor více než 500 k Ω a omezí proud na neškodnou úroveň pouhých několika miliampérů. Pokožka mokrá naopak poskytuje nízkoodporový (pouhý 1 k Ω) vodič pro letální hodnotu proudu 100–300 mA, která může vyvolat fibrilaci síní a smrt. Náhodný kontakt suché ruky zdravého dospělého s drátem pod napětím 120 V vede jen zřídka k usmrcení; pokud si s ním ovšem hrajeme zpocenými rukama a bosí za vlhkého letního dne, je to něco docela jiného dokonce i u oněch pouhých 120 V. Pokud pak budou veškeré podmínky shodné, vždycky je lepší sáhnout si na drát pod napětím v Bostonu či Vancouveru než v Londýně nebo v Paříži.

Nyní jsme připraveni pokračovat v evoluční sekvenci systematickým studiem energie v přírodě, historii a moderní společnosti.

Stejnoseměrný a střídavý proud

Protože (elektrický) výkon je produktem proudu a napětí (IU) a napětí se rovná proudu násobenému odporem, je výkon produktem I^2R a proud a odpor společně určují využití elektriny. K produkci bílé zářícího světla žárovky například potřebujete vysoký odpor (kolem 140Ω), kdežto topinkovač vyžaduje odpor relativně nízký (zhruba 15Ω). Vysoký odpor lampy by chléb spálil na popel, nízký odpor topinkovače vyprodukuje pouze zarudlou záři. Žárovka však potřebuje pouhých 100 W a spotřebovává proto pouhých $0,8 \text{ A}$; naopak topinkovač pracuje s příkonem 800 W a potřebuje proto proud přes 7 A . Vztah I^2R rovněž znamená, že přenos stejného množství výkonu se stokrát větším napětím sníží proud o 99% a stejnou měrou omezí odporové ztráty.

To vysvětluje, proč všechny moderní sítě používají střídavý proud k dálkovému přenosu i pro rozvod do domácností. První elektrické sítě, vynalezené Thomase Edisonem (1847–1931) na počátku osmdesátých let 19. století, využívaly stejnosměrný proud, jehož napětí buď muselo odpovídat výkonu (svítidla nebo motoru), nebo muselo být na jeho úroveň redukováno řadovým měničem nebo rezistorem, přičemž rozdíl hodnot přicházel nazmar. Zvýšení napětí a snížení proudu za účelem omezení ztrát při přenosu stejnosměrného proudu by vedlo k nebezpečně vysokému přiváděnému napětí v domácnostech i komerčních provozech. Naproti tomu střídavý proud s vysokým napětím lze díky

transformátorům dokonce i po přenosu na velké vzdálenosti s minimalizovanými ztrátami zredukovat na přijatelně nízké napětí.

Edison zavádění střídavého proudu bránil až do roku 1890 a dokonce proti němu vedl aktivní kampaň. O výsledku rozhodly inovace na sklonku osmdesátých let 19. století – spolehlivé transformátory, elektromotory a měřáky na střídavý proud a rotační měniče stejnosměrného proudu na střídavý, které umožnily připojení stávajících stejnosměrných elektráren a sítí na střídavé vedení vysokého napětí. Do roku 1890 byl tento souboj systémů v zásadě rozhodnut. Ačkoliv některé sítě na stejnosměrný proud se udržely až do doby po 1. světové válce, budoucnost zcela jasně náležela proudu střídavému. Všude kolem nás však elektrospotřebiči proudí i proud stejnosměrný, ať již vzniká přeměnou ze střídavého proudu, nebo je dodáván bateriemi. Díky vysokému záběrovému momentu (síle, která vyvolává rotaci) jsou stejnosměrné motory nejvhodnější pro elektrické lokomotivy. Zásobovány jsou střídavým proudem z vedení nad tratí a mění ho na proud stejnosměrný; osobní počítače zase využívají měniče k přívodu až 5 V stejnosměrného proudu do digitálních obvodů a více než 10 V k motorům diskových jednotek.

Přenosné spotřebiče na stejnosměrný proud jsou poháněny různými typy baterií – kompaktních zařízení, která mění chemickou energii přímo na elektrickou. Dosud nejběžnější je velký dobíjitelný olovo-kyselina-akumulátor používaný ve stamilionech automobilů. Dodává 12 V ze šesti článků s olověnými katodami

(kladné elektrody) a anodami (záporné elektrody) z pooxidovaného olova, mezi nimiž je kyselina sírová. Autobaterie dodává energii nejen motoru startéru, ale i mnoha malým stejnosměrným elektromotorům, které plní funkce, jež se dříve vykonávaly ručně: stahování oken, nastavování bočních zrcátek, zamykání dveří. Malé válcové baterie, které pohánějí stále se rozšiřující škálu hraček, svítilen, rádií, televizorů a přehrávačů, jsou v zásadě jen vylepšenou verzí zinko-uhlíkového článku, který v šedesátých letech 19. století vynalezl Georges Leclanché (1839–1882). Jeho původní baterie obsahovala mokré elektrolyt, běžně známý suchý článek využívající pastovitého elektrolytu přišel až později. V roce 1959 společnost Energizer uvedla na trh alkalickou baterii (s elektrolytem na bázi hydroxidu draselného) a nahradila tradiční uhlíkovou (grafitovou) katodu oxidem manganičitým. U všech válcových baterií je plochá kovová základna záporným pólem a vyvýšená kovová čepička pólem kladným. Nejběžnějšími typy jsou „buřtové“ baterie D do svítilen a tužkové AA do elektronických zařízení. Všechny tyto malé válcové baterie mají kapacitu 1,5 V (2600 mA/h) a poměrně dlouhou životnost, jejich napětí však s používáním trvale klesá. Existuje celá řada dalších typů baterií, k nimž patří tenké lithium-iontové obdélníkové destičky do laptopů (6–16 V) i drobné knoflíkové 1,5V baterie na bázi oxidu stříbra, které se používají do sluchátek a hodinek.