

1. FYZIKÁLNÍ VELIČINY A JEJICH JEDNOTKY

1.1 SYSTEMATIKA FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

V řadě oblastí přírodních a technických věd, v technické a obchodní praxi, ale i v běžném životě se vyskytuje potřeba charakterizovat objektivní vlastnosti a stav předmětů a okolního prostředí, popsat průběh různých procesů apod. K tomu se zavádí systém veličin, které uvedené vlastnosti a stav charakterizují. Potřebné informace potom získáváme pozorováním, tedy speciálním postupem, při němž stanovíme kvantitativní, popřípadě kvalitativní parametry příslušných veličin, eventuálně jejich vztahy k veličinám ostatním.

Pozorovat můžeme na jedné straně jevy a procesy, které probíhají bez našeho zásahu a bez možnosti jejich průběh ovlivňovat, a na druhé straně stav, děje a procesy, které iniciujeme, řídíme, volíme podmínky jejich průběhu apod. V prvním případě jsou typickým příkladem pozorování astronomická, ve druhém případě pak hovoříme o pokusu nebo experimentu. Podle charakteru výsledku můžeme pokus dále dělit na pokus kvalitativní a pokus kvantitativní. Kvalitativním pokusem může být například stanovení charakteru pH roztoku zbarvením lakmusového papírku nebo zjištění, že pozorovaná kapalina dosáhla teploty varu. Jako kvantitativní chápeme takové pokusy, kdy lze výsledek, tedy objektivní stav studované veličiny, vyjádřit v číselné formě srovnáním s obecně zavedenou jednotkou. V takovém případě hovoříme o měření.

Definici pojmu fyzikální veličiny se lidé zabývali od samých počátků svých obchodních, hospodářských, technických a vědeckých aktivit. Jako příklad je možné uvést definici, kterou podal Leonard Euler ve svém díle „Algebra“ z roku 1766:

1. veličinou rozumíme vše to, co se může zvětšovat nebo zmenšovat, nebo to, k čemu můžeme něco přidat nebo ubrat (hmotnost, čas, délka, teplota, tlak, teplo, úhel, ...),
2. existují veličiny různého druhu, jejichž studiem se zabývají různé oblasti vědy (fyziky). Každá oblast vědy má své charakteristické veličiny. Fyzika je naukou o veličinách,
3. měření je srovnávání dané veličiny s vybranou veličinou téhož druhu (jednotkou).

První část Eulerovy definice se v současné době obvykle nahrazuje modernější definicí:

„Veličinou popisujeme objektivní vlastnost (stav) předmětu nebo fyzikálního jevu, kterou lze kvalitativně odlišit a kvantitativně popsat.“

Druhá část definice se nahrazuje klasifikací veličin na

- a) extenzivní (množství, kvantita) - aditivní (hmotnost, náboj, teplo, ...)
- b) intenzivní (kvalita) - veličiny stavové (teplota, napětí, tlak, ...)
- c) protenzivní (stále plynoucí) - (čas)

Charakteristika pojmu měření se od dob Eulerových nezměnila a výsledek měření veličiny x , tedy srovnání její velikosti s velikostí dané jednotky, zapisujeme ve tvaru

$$x = (\tilde{\mu}_x \pm u_{x,c})[x] , \quad (1.1)$$

kde $\tilde{\mu}_x$ je nejpravděpodobnější hodnota měřené veličiny, číslo $u_{c,x}$ je vyjádřením nejistoty výsledku měření a hranatá závorka v (1.1) je obecným symbolem pro označení použité jednotky měření, pokud je toto označení platnou normou zavedeno (viz např. [1]).

Jednotky měření dělíme dále na jednotky základní a jednotky odvozené. Jednotky základní, tedy jednotky veličin, které byly v daném systému jednotek za základní vybrány, definují tzv. systém (soustavu) jednotek a jejich volba je ovlivněna spíše tradicí a požadavky technické praxe, než nějakými rigorózními požadavky fyzikálními. V každém případě by však měl existovat pokud možno všeobecně akceptovaný systém poměrně snadno realizovatelných, dobře reprodukovatelných a časově stabilních základních jednotek, protože v opačném případě by se zkomplikovaly nejen podmínky komunikace uvnitř vědeckých komunit, což je problém principiálně řešitelný, ale hlavně by se znemožnily procesy standardizace ve výrobě, technické praxi a v obchodě, což by prakticky neřešitelným způsobem znemožnilo rozvoj všech rozhodujících oblastí technických a hospodářských aktivit moderní společnosti. V současné době je až na drobné výjimky všeobecně akceptován a národními normami uzákoněn mezinárodní systém jednotek („System International” (SI) - viz odst. 1.4). Jednotkami odvozenými jsou pak jednotky veličin, které jsou s veličinami základními spojeny pokud možno jednoduchými definičními vztahy (viz dále). V případě měření jednotek odvozených, kdy není normou zavedeno označení jednotky, má hranatá závorka v (1.1) význam tzv. rozměru. Rozměr je vyjádřením jednotky

měřené jednotkami základními pomocí definičního vztahu. Například pro jednotku rychlosti není v systému SI zavedeno označení a proto se podle definičního vztahu $v = s/t$ označení jednotky rychlosti nahrazuje rozměrem $[v] \equiv \text{m s}^{-1}$.

1.2 JEDNOTKY FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

Jednotky fyzikálních veličin se, jak již bylo řečeno, vytvářely historicky, hlavně vzhledem k potřebám obchodu a rozvoji technické praxe. Od začátku byla hlavním kritériem praktičnost a snadná dostupnost jednotky, později se rozvíjely snahy o objektivitu. Příkladem může být snaha o objektivizaci jednotky délky. Standardně používané jednotky „palec“ nebo „loket“ byly samozřejmě závislé na tělesné konstrukci konkrétních osob. Proto již v 16. století navrhl Jakob Köble ve svém díle Geometrie, které bylo vydáno ve Frankfurtu (a.M), jako jednotku délky „střední stopu“, která měla být střední hodnotou délky chodidla šestnácti náhodně vybraných osob. Proces hledání systému základních jednotek byl postupem času završen vytvořením mezinárodně uznávaných standardů, od kterých byly dále odvozovány standardy národní. Vzhledem k tomu, že člověk žije v prostoru a čase, je pochopitelné, že mezi základní jednotky v každém systému patřily vždy jednotky pro měření délky a času, k nimž byla pro potřeby mechaniky, která byla historicky první z významně se rozvíjejících oblastí fyziky, přidána jednotka hmotnosti. Vlastní způsob realizace jednotek délky a času se vzhledem ke vzrůstajícím nárokům na přesnost a objektivitu postupně poměrně rozmanitě měnil. Způsob realizace jednotky hmotnosti formou standardu vytvořeného již v roce 1889 naproti tomu všechny reformy přečkal v nezměněné podobě až do doby moderní. Podrobnosti o způsobu současné realizace nejen základních jednotek délky, času a hmotnosti, ale i všech ostatních fyzikálních jednotek v současně užívaném systému SI je možno najít např. v normě [1] nebo publikaci [2].

S rozvojem dalších oblastí fyziky se systém základních jednotek postupně rozšiřoval. Způsob tohoto rozšiřování však není nijak rigorózně definován, ve volbě dalších základních jednotek je značná libovůle, takže dosažení všeobecně uznávaného konsenzu je náročné. V současné době je hlavním kritériem pro eventuální zásahy do systému jednotek ekonomická náročnost případné změny.

Bliže bude o pravidlech a některých zákonitostech výstavby systému základních jednotek pojednáno v odstavci 1.4.

1.3 METROLOGICKÉ ROVNICE

Jako metrologické rovnice se souhrnně označují matematické formulace vztahů mezi fyzikálními veličinami, jejich jednotkami a rozměry. V prvním případě mluvíme o rovnicích veličinových, dále pak o rovnicích jednotkových a rozměrových. Veličinové rovnice popisují zkoumané přírodní zákony nebo zavádějí nové veličiny. Například veličinová rovnice

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1.2)$$

je obecnou formulací 2. Newtonova zákona, která popisuje vztah mezi působící silou \vec{F} a časovou změnou hybnosti \vec{p} . Jiná veličinová rovnice

$$\vec{F} = q(\vec{E} + (\vec{v} \times \vec{B})) \quad (1.3)$$

popisuje silové působení elektrického (\vec{E}) a magnetického pole (\vec{B}) na pohybující se elektrický náboj q , zatímco rovnice

$$\rho = \frac{dM}{dV} \quad , \quad (1.4)$$

kde M značí hmotnost a V objem, zavádí hustotu látky (ρ).

Jednotkové rovnice popisují vztahy mezi jednotkami studovaných veličin a formulují se v co nejjednodušší formě, bez diferenciálních, integrálních, popř. jiných složitějších operátorů. Pro již uvedené příklady veličinových rovnic (1.2.)–(1.4) jsou jednotkovými rovnicemi postupně

$$j_F = \frac{j_p}{j_t}, \quad j_F = j_q \cdot j_E, \quad j_F = j_q \cdot j_v \cdot j_B, \quad j_\rho = \frac{j_m}{j_V}, \quad (1.5)$$

kde symbolem j_F je označena jednotka síly a obdobně i v ostatních případech jednotky dalších použitých veličin.

Rozměrovými rovnicemi jsou jednotkové rovnice rozepsané pomocí jednotek základních, tedy bez užití případných speciálních označení jednotek zavedených v daném systému. Například v systému SI je rozměrovou rovnicí veličinové rovnice (1.2) rovnice

$$[F] = \text{kg m s}^{-2} = [p][t^{-1}] = \text{kg m s}^{-1} \text{ s}^{-1}.$$

V případě rovnice (1.3) pro silové působení na náboj pohybující se v magnetickém poli máme rozměrovou rovnici

$$[F] = \text{kg m s}^{-2} = [q][v][B] = \text{A s m s}^{-1} \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}.$$

Rovnosti pravé a levé strany rozměrových rovnic je možné využít pro kontrolu správnosti formulace rovnic veličinových. Tomuto postupu říkáme rozměrová analýza. Protože však rozměrové rovnice neobsahují bezrozměrné číselné konstanty, je případné splnění rovnic rozměrových pro celkovou správnost rovnic pouze podmínkou nutnou, nikoliv postačující.

Uveďme dále několik příkladů pro užití rozměrové analýzy. První z možností je kontrola odvozených formulí. Předpokládejme, že jsme užitím definičního vztahu

$$J = \int_V r^2 \rho dV \quad (1.6)$$

vypočetli, že moment setrvačnosti homogenního válce o poloměru R a hmotnosti M je dán vztahem

$$J = \frac{1}{2} MR^2. \quad (1.7)$$

Z definičního vztahu je zřejmé, že rozměr momentu setrvačnosti v soustavě SI je $[J] = \text{kg m}^2$. Potom ale pro výsledný vzorec (1.7) v této soustavě skutečně platí

$$\text{kg m}^2 = [J] = [M][R^2] = \text{kg m}^2$$