

1 Fyzikálne veličiny a jednotky

Fyziku možno považovať za vedu, ktorá je zložená z dvoch súčastí - teoretickej a experimentálnej. Taktiež aj fyzikov možno rozdeliť do týchto dvoch skupín. Zatiaľ čo prvá skupina hľadá všeobecne platné pravidlá a zákony, druhá študuje prírodu experimentálnymi pozorovaniami. To, čo sa zistí experimentálne, teoretická fyzika sa snaží zovšeobecniť a popísať matematickými vzťahmi a opačne, čo teoretickí fyzici popíšu rovnicami, to sa snažia ich kolegovia potvrdiť experimentmi. Spoločným jazykom oboch skupín je prepracovaný systém jednotiek a fyzikálnych veličín a matematický aparát fyziky.

Fyzika, ako každá iná veda, používa jazyk, prostredníctvom ktorého môže čitateľom sprostredkovať poznatky. Aby sme mu rozumeli, je potrebné hneď v úvode oboznámiť sa s veličinami, ich jednotkami a ďalšími základnými pojmami.

1.1 Fyzikálna veličina

Väčšina pojmov, ktoré tvoria fyzikálny jazyk, sa získala zo skúseností. Dané sú historickým vývojom. Vo fyzike narábame hlavne s pojmami, ktoré vieme aj kvantitatívne vyjadriť. Aby sme dokázali charakterizovať výsledky meraní, prípadne daný fyzikálny jav, sústavu alebo samotný objekt v nej, boli zavedené **fyzikálne veličiny**, napríklad dĺžka, hmotnosť, čas, teplota, tlak atď. Niektoré fyzikálne veličiny majú povahu “množstva” (napr. teplo), iné povahu “stavu” (napr. teplota). Teplo predstavuje určité kvantum vnútornej energie, avšak teplota charakterizuje stav látky vzhľadom na množstvo vnútornej energie.

Aby sme mohli fyzikálne veličiny popísať, boli zavedené najprv **jednotky**. Jednotka predstavuje takú mieru veličiny, ktorej prisúdime presne číselnú hodnotu 1,0. Alebo inak, **číselná hodnota** (veľkosť) fyzikálnej veličiny uvádza,

koľkokrát sa daná jednotka nachádza v meranej veličine. **Hodnotu fyzikálnej veličiny** X možno vždy vyjadriť súčinom číselnej hodnoty $\{X\}$ a príslušnej meracej jednotky $[X]$, čo zapisujeme v tvare:

$$X = \{X\}[X] \quad (\text{napr. } t = 23 \text{ s}). \quad (1.1)$$

Hodnota nameranej fyzikálnej veličiny nás informuje o výsledku merania, pričom jednotka vyjadruje súvis fyzikálneho množstva s číselným údajom. Keď v rozmerovej rovnici napíšeme pre veličiny aj ich jednotky, dostaneme zároveň jednotku novodefinovanej veličiny. Napríklad zo vzťahu pre prácu (W) za istých podmienok platí $W = F \cdot s$, kde F je sila a s je dráha. Z predchádzajúceho vzťahu vyplýva, že jednotka práce je $1[W] = 1[F] \cdot 1[s]$, t. j. v konkrétnom prípade newton \cdot meter ($N \cdot m$). Pre zjednodušenie sa dôležitým jednotkám, ktoré sú vyjadrené kombináciou iných jednotiek dávajú nové názvy (v uvedennom prípade newton \cdot meter = joule ($N \cdot m = J$)).

Ukazuje sa, že niektoré fyzikálne veličiny sú dôležitejšie ako iné, keďže sa častejšie objavujú v odvodených vzťahoch. Aby bola nezameniteľná interpretácia o meraní fyzikálnej veličiny, bol vytvorený unifikovaný jednotkový systém, pričom niektoré jednotky boli prijaté ako záväzné na meranie fyzikálnych veličín (hlavné jednotky), ďalšie sa stanovili ako odvodené a niektoré ako dovolené pre používanie.

1.2 Medzinárodná sústava jednotiek SI

Jednotky fyzikálnych veličín a ich štandardy bolo možné definovať ľubovoľným spôsobom. Dôležité však bolo, aby bola definícia praktická, rozumná, a aby mohla byť v odborných kruhoch všeobecne prijatá. Keďže v minulosti bolo veľké množstvo fyzikálnych veličín, bolo po medzinárodnej dohode vybraných niekoľko, pre ktoré boli definované ich vlastné štandardy. Ostatné fyzikálne veličiny boli potom odvádzané pomocou týchto základných veličín a ich štandardov. Štandardy základných veličín musia byť dostupné a pri opakovaných meraniach nemenné.

Prvé písomné zmienky o mierach na území dnešného Slovenska pochádzajú z 13. storočia. Miery neboli dlho zjednotené a unifikačné snahy trvali niekoľko storočí. Takmer každá jednotka sa počas svojej existencie niekoľkokrát zmenila. Taktiež sa stávalo, že tie isté jednotky neboli v každej oblasti rovnaké (napr. lakeť bol definovaný ako 2 stopy a 4 palce (= 73,75 cm) a viedenský lakeť ako

77,7 cm; rakúska míľa = 7,5859 km, uhorská míľa = 8,3536 km; bratislavská merica = 54,2976 litra (do roku 1551), 62,3925 litra po roku 1551, viedenská merica = 61,4868 litra, vlastná merica predstavovala 53,332554 litra; siaha = 6 stôp = 1,8964838 metra, kráľovská siaha = 1,80 m (do 14. storočia), 2,125 m v 15. storočí, viedenská siaha = 1,896484 metra). Preto bolo potrebné zjednotiť systém mier.

Prvý metrický systém bol navrhnutý v roku 1790 počas Veľkej francúzskej revolúcie. V roku 1795 Francúzske národné zhromaždenie prijalo jednotku dĺžky - meter a jednotku hmotnosti - gram ako praktické miery prospešné pre priemysel a obchod. Medzinárodná normalizácia začala v roku 1870 poradou zástupcov 15 štátov v Paríži.

Snahou vedcov bolo zjednodušiť svoje merania, výpočty, komunikáciu medzi kolegami po celom svete. Existovali dva základné smery, aký systém zaviesť, pre malé jednotky (centimetre, gramy) a väčšie jednotky (metre, kilogramy). Tak vznikli dva metrické systémy: **CGS** (centimeter, gram, sekunda), ktorý bol formálne zavedený Britskou asociáciou pokroku vo vede (*The British Association for the Advancement of Science*) v roku 1874 a systém **MKS** (meter, kilogram, sekunda), ktorý bol zavedený v roku 1889 organizáciou BIPM (*Bureau of Weights and Measures*).

V roku 1875 (20.5.) bol podpísaný zástupcami 18 štátov (medzi nimi aj Rakúsko-Uhorsko) Medzinárodný metrický dohovor (vstúpil do platnosti 1.1.1876) a zriadený Stály medzinárodný úrad pre miery a váhy. Na riešenie všetkých záležitostí týkajúcich sa metrickej sústavy bola zriadená Generálna konferencia pre miery a váhy (The General Conference on Weights and Measures CGPM (z franc. Conférence Générale des Poids et Mesures)). V roku 1889 1. zasadanie CGPM legalizovalo staré etalóny metra a kilogramu za medzinárodné etalóny dĺžky a hmotnosti.

Na svojom 10. zasadaní v roku 1954 prijala CGPM racionalizovanú a koherentnú sústavu jednotiek, založenú na jednotkách meter - kilogram - sekunda - ampér (**MKSA**), ku ktorej bola pridaná jednotka teploty kelvin a jednotka svietivosti kandela. V roku 1960 sa konalo 11. zasadnutie CGPM, ktorého sa zúčastnilo 36 členských štátov. Toto zasadnutie prijalo názov **Medzinárodná sústava jednotiek** označovanú skratkou **SI** (z francúzskeho *Système Internationale d'Unités*), nazvanej tiež metrická sústava a stanovilo pravidlá pre predpony, doplnkové a odvodené jednotky a odporučila jedinú sústavu pre

definovanie jednotiek.

13. zasadanie CGPM v roku 1967 zaviedlo novú definíciu sekundy, premenovalo jednotku teploty a zmenilo definíciu kandely. Na 14. Generálnej konferencii pre váhy a miery v roku 1971 bola prijatá siedma základná jednotka mól. Tak bolo vybraných sedem základných veličín a zodpovedajúcich jednotiek, ktoré sa stali základom **Medzinárodnej sústavy jednotiek SI** (tab. 1.1). Dnes je systém postavený na 7 základných jednotkách, ktoré sa považujú za rozmerovo nezávislé: kilogram (kg), meter (m), sekunda (s), ampér (A), kelvin (K), kandela (cd), mól (mol). Pomocou týchto jednotiek sa ich kombináciou v súlade s algebraickými pravidlami vytvoril systém odvodených jednotiek (medzi ktoré v súčasnosti patria aj rovinný a priestorový uhol). Sústavu SI ešte dopĺňajú násobky a diely (tab. 1.3). 14. zasadanie CGPM schválilo názov pascal (Pa) ako zvláštny názov pre medzinárodnú meraciu jednotku tlaku alebo mechanického napätia, newton (N) na meter štvorcový (m^2) a siemens (S) ako zvláštne označenie jednotky elektrickej vodivosti. V roku 1975 prijalo CGPM bequerel (Bq) ako jednotku aktivity rádioaktívnych nuklidov a gray (Gy) ako jednotku pre pohltenú dávku.

Konferencie CGPM sa organizujú aj v súčasnosti, 23. konferencia CGPM bola v roku 2007 a jej cieľom bolo prispôbiť systém mier a váh novým trendom.

Medzinárodná sústava jednotiek SI zahŕňa:

- základné jednotky
- odvodené jednotky, vrátane doplnkových jednotiek

Základné jednotky SI

Sekunda (s) predstavuje časový interval zodpovedajúci 9 192 631 770 periódam kmitov žiarenia, ktoré vzniká pri prechode medzi dvoma hyperjemnými hladinami základného stavu atómu ^{133}Cs (13. CGPM, 1967).

Meter (m) je vzdialenosť, ktorú prejde svetlo vo vákuu za časový interval $1/299\,792\,458$ sekundy (17. CGPM, 1983).

Kilogram (kg) je hmotnosť platino-irídiového valca (medzinárodného prototypu kilogramu) uloženého v *Sèvres*. (3. CGPM, 1901) Tento štandard je platný od 1. konferencie CGPM od r. 1889.

Ampér (A) je stály elektrický prúd pretekajúci dvoma priamymi rovnobežnými nekonečne dlhými vodičmi zanedbateľného kruhového prierezu umiestnenými

mi vo vákuu vo vzájomnej vzdialenosti 1 meter, ktorý vytvára medzi týmito vodičmi silu 2×10^{-7} newtona na 1 meter dĺžky vodiča (9. CGPM, 1948).

Kelvin (K) je $1/273,16$ časť termodynamickkej teploty trojného bodu vody (13. CGPM, 1967).

Kandela (cd) je svietivosť zdroja, ktorý v danom smere emituje monochromatické žiarenie s frekvenciou $540 \times 10^{12} Hz$ (hertzov) a ktorého žiarivosť v tomto smere je $1/683$ wattov na steradián (16. CGPM, 1979).

Mól (mol) je látkové množstvo sústavy, ktorá obsahuje práve toľko elementárnych entít (atómov, molekúl, iónov, iných častíc), koľko je atómov v $0,012 kg$ izotopu uhlíka ^{12}C (14. CGPM, 1971). V $0,012 kg$ izotopu uhlíka ^{12}C sa nachádza $6,02214199 \times 10^{23}$ atómov.

Tabuľka 1.1: Základné veličiny a ich jednotky

Základná veličina	Značka veličiny	Základná jednotka	Značka jednotky
dĺžka	l	meter	m
hmotnosť	m	kilogram	kg
čas	t	sekunda	s
elektrický prúd	I	ampér	A
termodynamická teplota	T	kelvin	K
látkové množstvo	n	mól	mol
svietivosť	I	kandela	cd

Definície základných jednotiek sa historicky vyvíjali. Tak napríklad jeden meter bol v roku 1795 definovaný ako jedna desaťmilióntina poludníka od severného pólu po rovník a prechádzajúceho cez Paríž. V roku 1889 bola prijatá definícia, podľa ktorej meter bol definovaný vzdialenosťou pri $0^\circ C$ medzi osami dvoch centrálnych čiar vytvorených na tyči z platiny a irídia, uchovávanéj v BIPM, ktorá bola vystavená štandardnému atmosférickému tlaku a podoprená na dvoch valcoch s priemerom najmenej jeden centimeter, symetricky umiestnených na tej istej vodorovnej platni vo vzdialenosti 571 mm jedna od druhej. Tento štandard je dodnes uložený v Medzinárodnom úrade pre váhy a miery v *Sèvres* pri Paríži. Presné kópie, nazývané tiež druhotné štandardy, boli rozoslané do metrologických laboratórií po celom svete a boli používané pri výrobe ďalších štandardov. V roku 1959 bol úradne definovaný yard ako $1 \text{ yard} = 0,9144 m$. Táto definícia je ekvivalentná so vzťahom pre palec (inch): $1 \text{ in} = 2,54 cm$. Neskôr vyžadovala veda a technika ešte pres-

nejší štandard ako je vzdialenosť medzi dvoma jemnými vrypami na kovovej tyči, preto bol v roku 1960 prijatý nový štandard pre meter, ktorý vychádzal z vlnovej dĺžky svetla. *Meter bol definovaný ako 1 650 763,73 násobok vlnovej dĺžky žiarenia šíriaceho sa vo vákuu zodpovedajúceho prechodu medzi hladinami $2p_{10}$ a $5d_5$ v atóme kryptónu 86 ($^{86}_{36}\text{Kr}$).* Podľa tejto definície bolo možné reprodukovat' meter s presnosťou 10^{-9} , čo znamená, že dĺžka kópie a originálu je rovnaká ešte na deviatom mieste za desatinou čiarkou. Požiadavky na presnosť však neustále rástli. Kým napr. v minulosti bol medzinárodný etalón pre jednotku dĺžky platino-iridiová tyč uložená v *Sèvres* pri Paríži, tak dnes je táto dĺžka definovaná pomocou rýchlosti svetla a etalónu času. V roku 1983 bol meter 17. generálnou konferenciou pre váhy a miery nanovo definovaný ako vzdialenosť, ktorú svetlo prejde vo vákuu v presne stanovenom časovom intervale. Konkrétna voľba dĺžky časového intervalu v definícii metra presne určuje rýchlosť svetla vo vákuu $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$. Snaha o získanie lepšieho štandardu viedla ku konštrukcii atómových hodín.

Kilogram bol pôvodne bol definovaný ako hmotnosť jedného litra (1 dm^3) čistej odvzdušnenej vody pri teplote 4°C (jeden gram bol definovaný ako hmotnosť čistej vody, ktorá sa nachádza v kocke s hranami rovnej jednej stotine metra pri teplote topenia ľadu). Už prvá CGPM v roku 1889 potvrdila medzinárodný prototyp kilogramu vyrobeného zo zliatiny platiny a irídia (pomer 9 : 1) s presnosťou 0,0001: *tento prototyp sa odtiaľ považuje za jednotku hmotnosti*. V súčasnosti je podľa medzinárodného dohovoru kilogram určený hmotnosťou valca. Vďaka tejto definícii kilogram doteraz ostáva jedinou jednotkou, ktorej definícia sa nezakladá na fyzikálnom jave, ale na zhmotnenej miere. Prototyp je uložený v Medzinárodnom úrade pre váhy a miery v *Sèvres* pri Paríži, podobne ako ostatné etalóny. Presné kópie tohto etalónu boli rozoslané do laboratórií pre štandardy do ostatných štátov. Tie sú uložené v štandardizačných a metrologických inštitúciách v jednotlivých štátoch po celom svete, kde sa potom v zmysle platných noriem realizujú národné kalibrácie meracích zariadení a prístrojov. Hmotnosť ostatných telies sa meria porovnávaním s hmotnosťou s ktoroukoľvek z týchto kópií. Pre meranie hmotností elementárnych častíc, atómov a molekúl sa zvyčajne používa atómová hmotnostná jednotka u .

Pojmy ako hodina, minúta, sekunda boli všeobecne prijaté. Aj keď využívali šesťdesiatkovú sústavu, nebol dôvod na ich zmenu, len sa spresnila definícia sekundy. Sekunda bola pôvodne definovaná ako $1/86400$ časť stredného dňa.

Neskôr sa zistilo, že doba stredného slnečného dňa nie je rovnaká. Preto 11. CGPM (1960) prijala novú definíciu: *sekunda je 1/31 556 925,9747 časť tropického roku pre 1. 1. 1900 o 12. hod. efemerického času*. To platilo do roku 1967, kedy 13. konferencia pre váhy a miery prijala štandard sekundy odvodený od frekvencie kmitov atómov céziových hodín. Presnosť céziových hodín je taká, že by trvalo 6000 rokov, aby sa údaje dvoch takýchto hodín líšili o viac ako 1 sekundu. V súčasnosti sa vyvíjajú hodiny, ktorých presnosť by bola $1 : 10^{18}$, čo by zodpovedalo odchýlke 1 s za 10^{18} s (v prepočte 3×10^{10} rokov).

Odvođené jednotky SI vrátane doplnkových jednotiek SI

Tabuľka 1.2: Niektoré z odvodených veličín a ich jednotiek

Odvođená veličina	Jednotka	Názov jednotky
plošný obsah	m^2	štvorcový meter
objem	m^3	kubický meter
rýchlosť	m/s	meter za sekundu
uhlová rýchlosť	rad/s alebo s^{-1}	radián za sekundu
zrýchlenie	m/s^2	meter za sekundu na druhú
hustota	kg/m^3	kilogram na kubický meter
špecifický objem	m^3/kg	kubický meter na kilogram
koncentrácia látky	mol/m^3	mól na kubický meter
tlak	$Pa = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$	pascal
energia	$J = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$	joule
výkon	$W = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$	watt
sila	$N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$	newton
elektrický náboj	$C = A \cdot s$	coulomb
elektrický potenciál	$V = kg \cdot m^2 / (s^3 \cdot A)$	volt
elektrický odpor	$\Omega = V/A$	ohm
magnetický tok	$Wb = kg \cdot m^2 / (s^2 \cdot A)$	weber
magnetická indukcia	$T = N / (A \cdot m)$	tesla
svetelný tok	$lm = cd \cdot sr$	lumen
osvetlenie	$lx = lm/m^2$	lux
rovinný uhol	rad	radián
priestorový uhol	sr	steradián

Odvođené jednotky sa odvodzujú zo základných jednotiek pomocou definičných vzťahov medzi fyzikálnymi veličinami. Napríklad jednotku sily (newton (N)) možno určiť nasledujúco: veľkosť sily je daná vzťahom $F = m a$, kde m je hmotnosť a a je zrýchlenie. Zo vzťahu pre veľkosť zrýchlenia rovnomerne

zrýchleného pohybu vyplýva $a = v/t$. Veľkosť rýchlosti rovnomerného pohybu v je zase daná podielom dráhy (meter (m)) a času (sekunda (s)) $v = s/t$. Pomocou týchto vzťahov je možné postupne získať jednotky pre rýchlosť $[v] = m/s$, zrýchlenie $[a] = m/s^2$ a nakoniec aj pre silu $[F] = N = kg \cdot m/s^2$. Analogickým spôsobom je možné získať jednotky všetkých fyzikálnych veličín.

Medzi odvodené jednotky so zvláštnymi názvami sú zaradené aj radián a steradián, ktoré tvorili samostatnú triedu doplnkových jednotiek, ktorá však bola Generálnou konferenciou pre váhy a miery v roku 1995 zrušená. *Radián* (*rad*) je rovinný uhol zovretý dvoma polomeri kružnice, ktoré vytínajú na kružnici oblúk rovnakej dĺžky, akú má jej polomer. *Steradián* (*sr*) je priestorový uhol kužeľa, ktorý s vrcholom v strede gule vytína na povrchu tejto gule plochu s obsahom rovnajúcim sa druhej mocnine polomeru gule.

Predpony SI

Tabuľka 1.3: Násobky jednotiek

Názov	Značka	Násobok	Faktor
yotta	Y	1 000 000 000 000 000 000 000 000	10^{24}
dzéta	Z	1 000 000 000 000 000 000 000	10^{21}
exa	E	1 000 000 000 000 000 000	10^{18}
peta	P	1 000 000 000 000 000	10^{15}
tera	T	1 000 000 000 000	10^{12}
giga	G	1 000 000 000	10^9
mega	M	1 000 000	10^6
kilo	k	1 000	10^3
hekto	h	100	10^2
deka	da	10	10^1
deci	d	0,1	10^{-1}
centi	c	0,01	10^{-2}
mili	m	0,001	10^{-3}
mikro	μ	0,000 001	10^{-6}
nano	n	0,000 000 001	10^{-9}
piko	p	0,000 000 000 001	10^{-12}
femto	f	0,000 000 000 000 001	10^{-15}
atto	a	0,000 000 000 000 000 001	10^{-18}
zepto	z	0,000 000 000 000 000 000 001	10^{-21}
yokto	y	0,000 000 000 000 000 000 000 001	10^{-24}

Väčšie a menšie jednotky sa získavajú ako násobky základných jednotiek násobením faktorom 10^3 , resp. 10^{-3} (okrem menších násobkov a dielov (hekto (10^2), deka (10^1) a diely deci (10^{-1}), centi (10^{-2})). Názov vynásobenej jednotky sa získa pridaním zodpovedajúcej predpony k názvu jednotky. Výnimkou z tohoto pravidla je jednotka hmotnosti, kde sa násobky jednotky vytvárajú so základom gram.

Jednotky mimo sústavy SI uznané ako použiteľné spolu s SI

Pre všeobecnú rozšírenosť a užitočnosť sa okrem spomínaných jednotiek SI používajú aj ďalšie jednotky mimo sústavy SI, ale ich používanie je akceptované. Základnou jednotkou času v SI je sekunda, ale akceptované sú aj minúta (*min*), hodina (*h*), deň (*d*). Prehľad ostatných uznaných jednotiek mimo sústavy SI je uvedený v tabuľke 1.4.

Tabuľka 1.4: Niektoré z ďalších jednotiek mimo SI, ktoré sú akceptované a používané s SI.

Veličina	Názov jednotky	Značka	Definícia
čas	minúta	<i>min</i>	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	hodina	<i>h</i>	$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$
	deň	<i>d</i>	$1 \text{ d} = 86400 \text{ s}$
rovinný uhol	stupeň	$^\circ$	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
	minúta	'	$1' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	sekunda	"	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$
dĺžka	astronomická jednotka	<i>AU</i>	$1 \text{ AU} = 1,4959787 \times 10^{11} \text{ m}$
	parsec	<i>pc</i>	$1 \text{ pc} = 30,85678 \times 10^{15} \text{ m}$
	svetelný rok	<i>l.y.</i>	$1 \text{ l.y.} = 9,460730 \times 10^{15} \text{ m}$
plošný obsah	hektár	<i>ha</i>	$1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$
	ár	<i>a</i>	$1 \text{ a} = 10^2 \text{ m}^2$
objem	liter	<i>l</i>	$1 \text{ l} = 10^{-3} \text{ m}^3$
hmotnosť	tona	<i>t</i>	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
	zjednotená atómová jednotka hmotnosti	<i>u</i>	$1 \text{ u} \approx 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$
optická mohutnosť	dioptria	<i>D</i>	$1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$
energia	elektrónvolt	<i>eV</i>	$1 \text{ eV} \approx 1,602177 \times 10^{-19} \text{ J}$

Systém SI nie je statický, ale sa vyvíja tak, aby spĺňal zvyšujúce sa požiadavky na merania.

