

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

B. Klimeš

Soustavy jednotek

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 3, 292--298

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137117>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

SOUSTAVY JEDNOTEK

B. KLIMEŠ

a) Vytváření soustav jednotek

K systematickému uspořádání jednotek fyzikálních veličin bylo nutno přikročit, jakmile byly položeny teoretické základy fyziky a objasněna řada závislostí mezi fyzikálními jevy a veličinami. Do té doby vznikaly jednotky podle praktické potřeby a tak se vyskytlo většinou více jednotek pro tutéž veličinu současně; největší množství jednotek bylo vždy pro nejběžnější veličiny (délka, hmota, síla).

K systematickému uspořádání jednotek do soustavy jednotek musíme vždy zvolit některé jednotky ze základní a ostatní z nich odvozovat pomocí definic dalších fyzikálních veličin. Přitom je z teoretického hlediska lhostejné, které jednotky zvolíme za základní. Výběr základních jednotek se řídí čistě praktickými hledisky tak, aby byla vzniklá soustava přehledná a dobře použitelná a aby bylo možno jednotky definovat a realizovat s co možno největší přesností.

Počet základních jednotek však není libovolný a lze jej pro každý obor fyziky určit počtem veličin, které nelze definovat pomocí známých fyzikálních vztahů a zákonů. Např. v mechanice se v tomto případě uvádějí dvě rovnice

$$F = ma \quad (\text{zákon síly}), \quad (1)$$

$$F = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{gravitační zákon}), \quad (2)$$

kteří jsou výchozími rovnicemi pro mechaniku. V těchto rovnicích je obsaženo celkem 5 veličin (l, t, m, F, κ), z nichž dvě lze určit pomocí těchto rovnic a proto musíme pro mechaniku voliti tři základní jednotky.

V nauce o elektřině a magnetismu nevystačíme se třemi základními jednotkami a volíme ještě další čtvrtou. To vyplývá např. z Coulombova zákona

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (3)$$

v němž se kromě nově zaváděné veličiny el. náboje Q vyskytuje další veličina a to konstanta k . Podobně, jako u gravitačního zákona (2), je i konstanta u Coulombova zákona veličinou, která má svůj rozměr a fyzikální význam. V historii fyziky byly tato konstanta sice kdysi neoprávněně považována za „bezrozměrné číslo“ (s rozměrem 1), přitom se však vycházelo z předpokladu, že elektřina není než určitou formou mechanického pohybu a že musí být možno vysvětlit elektrické jevy na základě mechanických představ. Tato neoprávněná volba vedla mimo jiné k tomu, že řada veličin v elektřině a magnetismu měla stejné rozměry (např. $D, E; B, H$; ale také i G a v — el. vodivost a rychlost). Z toho vyplývá, že pro elektřinu a magnetismus je třeba nejméně čtyř základních jednotek.

Úvahy o zavedení pěti základních jednotek pro elektřinu a magnetismus je nutno rovněž zamítnout. Tak, jako malý počet základních jednotek vede k nejasnostem a kolísám v rozměrech, vede nadměrný počet jednotek k přeürčenosti a k dvojitosti odvozených jednotek. Pátá jednotka se navrhuje pro některou veličinu magnetického pole. Jelikož však je elektrické pole s magnetickým vázáno např. vztahem

$$F = QvB, \quad (4)$$

z něhož můžeme definovati B , je pátá jednotka zbytečná.

S podobnou, přece však poněkud odlišnou situací se setkáváme v termice. Lze také uvést dvě rovnice, které obsahují všechny výchozí veličiny, takže je další veličiny již možno odvozovat:

$$pV = nR\Theta \quad (\text{stavová rovnice}) \quad (5)$$

(n je počet molů, Θ je absolutní teplota),

$$Q = \lambda St \frac{\Delta\Theta}{\Delta x} \quad (\text{rovnice vedení tepla}) \quad (6)$$

(λ je tepelná vodivost, Δx tloušťka stěny). Tyto dvě rovnice obsahují celkem šest veličin ($l, t, m, R, \lambda, \Theta$); z toho jsou čtyři nezávislé a tomu odpovídají čtyři základní jednotky. Naproti tomu podává kinetická teorie plynů další rovnici

$$U = \frac{3}{2}RT, \quad (7)$$

kde U je vnitřní energie molu plynu, kterou lze převést na jednotky veličin l, t, m . Touto rovnicí se redukuje počet nezávislých veličin a tím i počet základních jednotek pro termiku na tři.

Tím je určen počet základních jednotek na tři pro mechaniku (a případně i termiku) a na čtyři pro elektřinu a magnetismus. Jak již bylo řečeno, můžeme teoreticky vybrat libovolné základní jednotky. Podaří-li se nám z nich odvodit vyhovující soustavu jednotek (má-li plně vyhovovat, musí tato soustava být koherentní, tj. převodní konstanta mezi jednotkami různých veličin musí být vždy jednička), dostaneme soustavu zcela rovnocenných jednotek. Dodatečně můžeme pak vybrat i jiné jednotky z této soustavy, pro něž lze lépe definovat prototypy a tyto prohlásit za základní. To se vyskytuje např. u Kalantarovova systému, kde jsou základními veličinami l, t, Φ (magnetický tok), Q , kdežto základními jednotkami m, kg, s, A .

b) Vývoj základních jednotek

Podle uvedených zásad je možno vytvořit libovolný počet soustav jednotek. Proto se jeví v posledních dvou stoletích snaha mezinárodně stanovit jednotky některých veličin, které bývají brány za základní jednotky v používaných soustavách. Byly to především jednotky délky, času, hmoty a síly. Tyto mezinárodně určované jednotky byly pokud možno odvozovány přímo z přírody, aby je bylo možno kdykoli reprodukovat. Že to nebylo vždy možné, ukazuje historie metru, který byl původně míněn jako 10^{-7} kvadrantu poledníku zemského. U prototypu, který byl zhotoven podle měření zemského poledníku byla však později shledána odchylka 0,2288 mm proti 10^{-7} kvadrantu poledníku zemského. Proto byl první Generální konferencí měř a vah v roce 1889 prohlášen za jednotku délky metr, realizovaný prototypem, uloženým u Mezinárodního úřadu pro míry a váhy. Tato definice, která byla zpřesněna sedmou Generální konferencí, platí dodnes.

Podobně byl kilogram stanoven původně jako hmota $1 \text{ dm}^3 \text{ H}_2\text{O}$ při maximální hustotě. Při realizaci prototypu vznikla chyba $27 \cdot 10^{-6}$ a proto byl za jednotku hmoty prohlášen kilogram, realizovaný prototypem, uloženým u Mezinárodního úřadu pro míry a váhy. Prototyp byl zhotoven zároveň s prototypem metru, definice byla vyhlášena třetí Generální konferencí v roce 1901. Při této příležitosti byla též určena jednotka síly jakožto váha prototypu kilogramu. Tato jednotka síly nebyla třetí Generální konferencí pojmenována. Je-li někdy tato jednotka označována názvem kilogram, je toto označení neoprávněné a odporuje usnesení třetí Generální konference, která vyhradila toto označení pro jednotku hmoty; v češtině je vhodné označení kilopond.

Pro jednotku času byl původně vzat za základ střední sluneční den a vteřina byla definována jako jeho $\frac{1}{86400}$ část. Desátá Generální konference v r. 1954 se rozhodla definovat vteřinu jako zlomek tropického roku 1900, přepočteného k 0. lednu 1900 12.00 hod. času efemerid, protože přesnost, se kterou se reprodukuje střední sluneční den je dnes již menší než přesnost časových měření.

Z důvodů, rozebranych v prvním odstavci, byla devátou Generální konferencí definována ještě jednotka pro elektrický proud, ampér, dále kandela, jako jednotka svítivosti a desátou Konferencí byl definován Kelvinův stupeň jako jednotka teploty.

Dnes je v mezinárodním určování jednotek snaha vázat všechny další jednotky na uvedené šest jednotek. Tak např. byl litr původně definován jako objem 1 kg H_2O při maximální hustotě. Takto by litr představoval samostatnou jednotku objemu a byl by v kolisi s jednotkou, odvozenou od jednotky délky. Proto byla definice litru vázána na dm^3 vztahem

$$1 \text{ litr} = 1,000027 \text{ dm}^3 .$$

Totéž platí pro kilopond, který je dnes definován vztahem

$$1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N} .$$

Nutnost definování čtyř jednotek byla ukázána výše. Jednotka pro teplotu byla definována vzhledem k současnému stavu v termice, kde se dosud pracuje s teplotou, jako čtvrtou základní veličinou. Bude-li v budoucnu termika zpracována v tříjednotkovém systému, což je z fyzikálního hlediska dobře možné, může být tato jednotka ($^{\circ}K$) opět vypuštěna. Šestá jednotka kandela byla zavedena pro vyhodnocování fotometrických měření na základě mezinárodně stanovené normální citlivosti lidského zrakového orgánu. Lze očekávat, že bude časem stanovena ještě sedmá jednotka, která bude podobným způsobem vystihovat normální vlastnosti sluchového orgánu.

e) Zhodnocení užívaných soustav jednotek

Z množství soustav jednotek, které byly uvedeny v literatuře a které byly též aspoň zčásti užívány, jsou v Československu převážně užívány tři soustavy: soustava cgs (a z ní odvozené cgses, cgsem, Gaussova soustava), soustava statická¹⁾ (technická) a soustava MKSA.²⁾ Ježto jsou tyto soustavy jediné důležité též z pedagogického hlediska, omezíme se v dalším na rozbor těchto tří soustav. Přitom pomineme otázku volby základních veličin a budeme se věnovat čistě otázce jednotek.

Soustava jednotek cgs má tři základní jednotky cm, g, s, které jsou odvozeny od mezinárodně určených jednotek. V termice je ve spojení s touto soustavou užívána čtvrtá jednotka Kelvinův stupeň. Pro mechaniku tato soustava vyhovuje (z fyzikálního hlediska), počet základních jednotek je dostačující a odvozené jednotky jsou koherentní. Mechanické jednotky této soustavy jsou však příliš malé pro praktickou potřebu. Stejným způsobem vyhovuje tato soustava pro termiku. Pro elektřinu a magnetismus soustava cgs nevyhovuje, protože chybí čtvrtá základní jednotka. Neobstojí ani námitka, že je čtvrtou jednotkou bezrozměrná dielektrická konstanta $[\epsilon] = 1$, ani že celé generace počítaly pomocí této soustavy s dobrými výsledky. Soustava cgs má pro elektřinu a

1) Zdůvodnění názvu „statická soustava jednotek“ viz dále.

2) Pro tuto soustavu navrhla Mezinárodní komise pro míry a váhy v roce 1956 označení „mezinárodní soustava jednotek“. Toto označení nebylo dosud všeobecně přijato.

magnetismus rozměry jednotek s lomenými exponenty a pro zásadně odlišné veličiny vycházejí stejné jednotky (např. *cm* pro *l*, *C*), a konečně se někdy (u Gaussovy soustavy) objevují v rovnicích převodní činitelé (*c*, *c*²), kteří do rovnic z fyzikálního hlediska nepatří. Ani racionalisaci nelze vady této soustavy odstranit. Konečně nejsou jednotky této soustavy vhodné pro praxi, což si vynutilo zavedení praktických (technických) jednotek.

Statická (technická) soustava jednotek má tři základní jednotky *m*, *s*, *kp* (název kilogram pro jednotku síly je nutno z výše uvedených důvodů zásadně odmítnout). I tato soustava vyhovuje pro mechaniku, má dostatečný počet základních jednotek a odvozené jednotky jsou koherentní. Vzhledem k tomu, že volí třetí základní jednotku pro sílu, hodí se dobře k řešení statických problémů. Protože je hmota odvozenou veličinou, komplikují se poněkud dynamické vahy, např. výraz pro kinetickou energii musí důsledně pro tuto soustavu mít tvar

$$W_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2 \quad (8)$$

apod., takže je pro dynamické úvahy tato soustava méně vhodná. Protože tato soustava není rovněž použitelná v celé technické praxi, nepovažujeme za vhodný název technická soustava a doporučujeme užívání názvu statická soustava jednotek. I pro mechaniku má statická soustava některé formální nevýhody, jako např. že chybí samostatné názvy některých jednotek. Proto dochází třeba ke kolisi mezi jednotkou pro práci (*kmp*) a statický moment. Rozlišení označením *mkp* pro moment není přípustné, protože *m* na začátku jednotky zkracuje předponu „mili“. Tato vada není ani u soustavy *ergs* (*erg*, *dyncm*), ani u *MKSA* (*J*, *Nm*). V termice lze statické soustavy použít ve spojení se čtvrtou jednotkou pro teplotu podobně, jako soustavy *ergs*. Jelikož je však teplo v tomto případě téměř výhradně užívána jednotka *kcal*, je tato soustava v termice nekoherentní a v rovnicích se vyskytují převodní činitelé. Pro obor elektřiny a magnetismu je statická soustava téměř nepoužitelná.

Soustava jednotek MKSA používá čtyři základní jednotky *m*, *kg*, *s*, *A* a v termice pátou jednotku $^{\circ}\text{K}$. Všechny tyto jednotky se shodují s mezinárodně definovanými jednotkami. Tato soustava jednotek vyhovuje počtem základních jednotek jak pro mechaniku, tak i pro elektřinu a magnetismus. Odvozené jednotky jsou pro oba obory koherentní (soustava *MKSA* se užívá pouze v racionalisovaném tvaru), jednotky mají až na malé výjimky (např. proudová hustota A m^{-2}) velikost vhodnou pro praxi a protože má většina jednotek samostatný název, jsou jednotky jednoduché a přehledné. Pro termiku je soustava *MKSA* přeurlčena, tj. užívá o jednu základní jednotku více než je nutno. Tuto vadu však mají též všechny ostatní dosud užívané soustavy. V některých zvláštních oborech fyziky (elektronika, atomistika) by bylo možná vhodnější zvolit jiné čtyři základní jednotky, nebo alespoň nahradit jednotku pro hmotu a proud jednotkami jiných veličin. V každém případě však je pro tyto obory také třeba čtyř základních jednotek.

Celkem lze říci, že z probraných tří soustav vyhovuje soustava jednotek *MKSA* nejlépe požadavkům, které klade jak fyzika, tak i praxe na soustavu jednotek. Výjimečné postavení soustavy *MKSA* mezi ostatními soustavami jednotek je však podloženo i právně. Desátá Generální konference měř a vah doporučila totiž signatárním státům metrické konvence, aby uzákonily mezinárodně definované jednotky *m*, *kg*, *s*, *A*, $^{\circ}\text{K}$, od jako základní jednotky pro národní soustavu měř. V některých státech byly tyto jednotky již uzákoněny (např. v Rakousku), v jiných státech se podobné zákony připravují. V NDR je zákon o jednotkách již projednán v resortech a bude předložen sněmovně, v Československu je úplně zpracovaný návrh zákona tč. v resortním připomínkovém řízení (v září 1957).

Tyto zákony stanovují šest zákonných základních jednotek a dále hlavní jednotky pro ostatní veličiny, které jsou koherentně odvozeny od základních jednotek a kryjí se s jednotkami soustavy MKSA. Kromě toho určují i ostatní nekoherentní jednotky, jichž je možno zákonně užívat a rozsah jejich užití. Tím se stává soustava MKSA jedinou soustavou, jejíž základní jednotky jsou současně zákonnými základními jednotkami a jejíž odvozené jednotky jsou současně hlavními zákonnými jednotkami příslušných veličin.

d) Význam jednotné soustavy jednotek pro vyučování fyziky a technickým předmětům

Nedokonalost soustav jednotek vedla v historii k vytváření dalších a dalších soustav, takže jich v dnešní době máme již úctyhodný počet. Vyjdeme-li z předpokladu, že má středoškolař ovládat aspoň užívané jednotky a vysokoškolař mít přehled o všech jednotkových soustavách, s nimiž se může v praxi setkat, stojíme ve školství před neřešitelným problémem. Jediným východiskem je zavedení jediné soustavy, v níž bude důsledně prováděn výklad fyziky na všech stupních škol. Samozřejmě musí být táž soustava jednotek zaváděna současně důsledně i do technické praxe, aby mohl student v praxi uplatnit znalosti, kterých nabyl ve škole.

Jednotná soustava jednotek umožní podstatně lepší využití času při vyučování, neboť doby potřebné k výkladu různých soustav a převodních vztahů mezi jednotkami lze daleko lépe využít k výkladu fyzikálních souvislostí mezi jevy a veličinami. Protože se hlediska pojetí výkladu fyziky poněkud liší při použití různých soustav jednotek, lze při použití jediné soustavy podat výklad přehledněji a uceleněji. Z těchto důvodů je zavedení jednotné soustavy jednotek pro vyučování nejenom východiskem ze současné nepřehledné situace, nýbrž i nutnou podmínkou ke zvládnutí stále se rozšiřujících partií moderní fyziky při vyučování.

Požadavkům, kladeným na soustavu jednotek (dostatečný počet základních jednotek, koherentnost, vhodná velikost a praktická použitelnost jednotek, souhlas s mezinárodními definovanými, případně uzákoněnými jednotkami) vyhovuje ze všech uvedených soustav pouze soustava jednotek MKSA, která je proto jedinou vhodnou soustavou, použitelnou pro zavedení jako jednotná soustava. Jednotky této soustavy se kryjí ve většině případů s jednotkami užívanými v technické praxi a proto se tato soustava hodí i pro vyučování technickým předmětům na odborných a vysokých školách.

e) Pedagogická problematika soustavy jednotek MKSA

Při zavádění soustavy jednotek MKSA do vyučování je nutno vyřešit několik otázek. První z nich je otázka vhodné literatury (učebnic), která je psána v soustavě MKSA. Tato otázka byla před deseti lety vážným problémem, avšak dnes je již prakticky skoro vyřešena. Nově vydávané knihy, zejména základní učebnice, jsou již převážně zpracovány v soustavě MKSA a pokud tomu tak nebylo u učebnic pro všeobecně vzdělávací školy, bude soustava MKSA použita při vypracování pokusných učebnic, které se již zpracovávají. Jedině do strojařské literatury pronikla zatím soustava MKSA velmi málo.

Další otázkou je metodika výkladu fyziky při použití soustavy MKSA. V mechanice nevznikají potíže, pokud se mechanika vykládala dříve v soustavě cgs. Obě tyto soustavy mají pro mechaniku stejnou strukturu a stejnou metodiku výkladu. Poněkud jiný postup výkladu mechaniky se užívá ve spojení se statickou soustavou, přechod k soustavě MKSA však nečiní potíže, vzhledem k důkladně propracované metodice absolutních soustav. Jakási obtíž se jeví jen při prvních výkladech fyziky na osmiletce, kde je nutno vycházet ze síly, která je názornější a přímo známá ze zkušenosti. Přitom se síla měří v kilogramech, protože je to jednotka, s níž se žáci setkávají již předem v životě

při vážení. Fysikální nesprávnost tohoto postupu je omluvitelná jedině na nejnižším stupni škol. Avšak ani v tomto případě není obtížné užít při výkladu soustavu MKSA, aniž by se měnil postup výkladu. Pokud se z počátku elementárního výkladu nečiní rozdíl mezi hmotou a vahou, je váha vlastně měřítkem hmoty a užití kilogramu je plně na místě. Od okamžiku, kdy se vyloží pojem hmoty a vztah mezi hmotou a silou, lze beze všeho dále pracovat s jednotkami soustavy MKSA.

Totéž, co jsme řekli o mechanice, platí i pro termiku, kde jsou rovněž soustavy cgs a MKSA ekvivalentní. Ve spojení se soustavou cgs se často užívá pro teplo nekoherentní jednotky kalorie. Kvůli tomu se však musí v rovnicích psát převodní činitele (mechanický nebo tepelný ekvivalent). V soustavě MKSA se doporučuje užívat pro teplo koherentní jednotku joule. Tím se jednak zjednoduší rovnice, jednak se lépe zdůrazní, že je teplo formou energie. Dále se doporučuje u měrných veličin vztažených na kilomol (mol), zahrnout do jednotky výraz mol^{-1} s rozměrem kg^{-1} .

V nauce o elektřině a magnetismu odpadá možnost užití technické soustavy, avšak i mezi soustavou cgs a MKSA je značný rozdíl. Z hlediska soustavy jednotek je lhostejné, začneme-li výklad elektrickým polem nebo elektrickým proudem. V prvním případě vycházíme pak z náboje jako základní veličiny, v druhém případě je základní veličinou proud; v obou případech je základní jednotkou ampér. Jelikož je mezi nábojem a proudem jednoduchý vztah, jsou z hlediska soustavy jednotek oba postupy ekvivalentní. V elektrostatice však již nelze použít rovnici

$$D = eE \quad (9)$$

k definici vektoru D , jak se to někdy dělalo při výkladu v soustavě cgs. Rovnice (9) slouží spíše k definování e .

Zásadní změna postupu je nutná při výkladu magnetismu. Protože je mezi elektrickým a magnetickým polem úzký vztah, nelze vykládat z počátku samostatně magnetostatiku např. z Coulombova zákona. Jeden z možných postupů např. definuje vektor magnetické indukce z rovnice

$$F = Qv \times B. \quad (107)$$

Magnetostatika se pak stává zvláštním případem elektromagnetického pole. Důsledně užití soustavy jednotek MKSA a jí přispůsobený postup výkladu přináší v elektřině vyjasnění fyzikálních souvislostí a odstranění rozporů, kdy mělo několik veličin stejné jednotky a rozměry.

V atomistice rovněž prakticky nevznikají potíže. Atomistika by nejspíše potřebovala samostatnou soustavu jednotek. To však není možné ani proto, že by se tím atomistika isolovala od ostatní fyziky a tím by se zpomalil pokrok v tomto novém oboru. Užití soustavy MKSA je i zde vhodnější, protože umožní rozlišovati vektory B a H , které bývají ve vakuu často zaměňovány. Pro atomistiku zatím máme ze všech oborů nejméně literatury v soustavě MKSA, avšak i zde se již situace zlepšuje.

V technické praxi se dnes již zcela běžně užívá soustavy MKSA v elektrotechnice a v oborech s ní souvisících. Do stavebního a strojního oboru proniká tato soustava poměrně pomaleji. Zde je dobře vidět, že statická soustava vystačí tam, kde jde čistě o mechaniku. Proto se v uvedených oborech začíná užívat jednotek MKSA nejdříve tam, kde se tyto obory stýkají s jinými obory, např. s automatizací, dálkovým ovládním apod.

Důsledně zavedení soustavy MKSA do celé technické praxe je jistě otázka delší doby. Nejrychleji se k tomuto cíli dostaneme zavedením této soustavy do vyučování na všech stupních škol, aby mladá inteligence mohla sama prosazovat její užívání ve výrobě a praxi.

Literatura

1. Bodea Eugen: *Giorgis rationales MKS – Mass-System mit Dimensionskohärenz*, Birkhäuser Basel 1949.
2. Malikov S. F.: *Mezinárodní a absolutní praktické elektrické jednotky*, Přírodovědecké vydavatelství Praha 1951.
3. Oberdorfer G.: *Die Masssysteme in Physik und Technik*, Springer Wien 1956.
4. Řezníček Josef: *Jednotky v energetice*, NČSAV Praha 1954.
5. Sena L. A.: *Fyzikální jednotky*, NČSAV Praha 1953.
6. Stille Ulrich: *Messen und Rechnen in der Physik*, Vieweg & Sohn Braunschweig 1955.
7. Wallot J.: *Grössengleichungen, Einheiten und Dimensionen*, J. A. Barth Leipzig 1953.