

FYZIKA, MATEMATIKA A TECHNIKA

- PRAVDA A NEPRAVDA

prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP,

Univerzita Pardubice

Studentská 95

532 10 Pardubice

vladimir.schejbal@upce.cz



OBSAH

Úvod

Fyzika – pozorování, experimenty a teorie

Ano a ne v matematice

Ano a ne v technice

Závěr



Úvod

Fyzika a všechny technické vědy včetně elektrotechniky a elektroniky je založena na pozorování a experimentech. Nejedná se však o ryze empirickou vědu, neboť vytváří a verifikuje (ověřuje) různé matematické modely, které používá k řešení.

Fyzikové a Inženýři vytváří matematické modely fyzikálních systémů, aby mohli tyto systémy navrhovat.

Cílem technika není ukázat jakýsi matematický model, který obvykle uživatele nezajímá, ale vytvořit zařízení, které lze používat ve specifikovaných podmínkách.

Proto je nutné, aby si technik uvědomoval nejen matematické podmínky (např. nepřipustnost některých matematických operací, jako je dělení nulou), ale i podmínky, které jsou dány fyzikální podstatou daného jevu.

Protože máme v sobě „zabudovanou“ formální logiku (výrok je buď pravdivý, nebo nepravdivý), jsme často překvapeni, že odpověď na praktické otázky může být ano i ne.

Přednáška bude ilustrovat, jaké může mít následky nepochopení základních principů.



Problém nejen studentů vzniká z toho, že mnozí jsou přesvědčení, že učení znamená nabířovat se nějaké poučky či vzorečky.

Pochopitelně v reálném životě (a tedy i ve fyzice, matematice a technice) nám biflování nepřináší téměř žádný užitek. Je nutné se snažit pochopit základní principy, které nám umožní používat rozumně nejrůznější poučky a vzorečky.

J. W. Goethe: „Šedá je teorie a zelený je strom života.“

A. Einstein: „Vše se musí udělat tak jednoduše, jak to jde, ale ne jednodušeji.“

J. C. Maxwell: „Snad bylo výhodou vědy, že Faraday, i když si důkladně uvědomoval základní formy prostoru, času a síly, nebyl profesionální matematik. Nebyl v pokušení provádět mnoho zajímavých výzkumů v čisté matematice, které by jeho objevy mohly sugerovat, kdyby byly vyjádřeny v matematické formě. Necítil výzvu buď uvést své výsledky do tvaru, který by byl akceptovatelný matematickou zálibou v dané době, nebo je vyjádřit ve tvaru, který by matematici mohli řešit. Mohl tedy svobodně dělat svou vlastní práci, aby uspořádal své myšlenky se svými fakty a vyjádřit je v přirozeném netechnickém jazyce.

Věřím, že převážně jeho myšlenky tvoří základ matematických metod, které jsem použil ve své práci.“

J. C. Maxwell: „Takže první proces při efektivním studiu vědy musí být zjednodušení a redukce výsledků předešlých zkoumání do takového tvaru, který rozsah našeho rozumu pochopí. Výsledek tohoto zjednodušení bude buď čistě matematický vzorec, nebo fyzikální hypotéza. V prvním případě zcela ztratíme náhled na jev, který se má vysvětlit; a i když můžeme sledovat důsledky daných zákonů, nikdy nezískáme obširnější pohled na spojení mezi jednotlivými předměty.

Na druhé straně, pokud přijmeme fyzikální hypotézu, vidíme jevy pouze v daném prostředí a vlivem této slepoty na skutečnosti a nesprávným předpokladům, nezískáme taková vysvětlení, které by daný jev mohl vyvolat.“

V. V. Sarwate: „Problém studentů nejlépe ilustruje epizoda o studentu Ekalavy v indickém eposu “Mahabharat”. Dronacharya, známý učitel a expert na použití různých zbraní ve válce, odmítl přijmout Ekalavyu jako svého studenta. I když student ztratil odvahu, rozhodl se použít trik. Udělal sochu učitele Dronacharya a v přítomnosti sochy pokračoval ve výuce samostudiem. Jeho inspirací byla socha a uspěl tak dobře, že jednoho dne byl Dronacharya velice šokovaný. Objevil, že Ekalavya získal tolik zkušeností v lukostřelbě, že byl schopný umlčet vyjícího psa střelbou řady šípů do jeho tlamy bez jakéhokoli zranění.“

Poučení toho příběhu je, že žádná vědomost se nemůže získat bez pomoci učitele, i když to je jen socha.“



Fyzika – pozorování, experimenty a teorie

Fyzika a všechny technické vědy jsou založené na pozorování a experimentech. Jak lidé, tak i zvířata, se neustále učí a získávají nové zkušenosti.

Všichni však víme, že pozorování může být velice ošidné, a proto existuje obrovské množství pozorování, která „popírají“ fyzikální zákony.

Například pozorujeme-li padající pírko a kovovou kuličku, nepadají stejně rychle.

Množství pokusů nás samozřejmě může přesvědčit, že ve vzduchoprázdnu padají předměty stejně rychle.

Nemůžeme říci, že pozorování není pravda a experiment dává pravdu, neboť pozorování a experiment, který se provádí v určitých situacích, aby se vyloučily různé podmínky, se neprovádí za stejných okolností.

Pokud vyslovíme nějakou fyzikální hypotézu, je nutné uvést příslušné okolnosti (podmínky) za kterých uvedená hypotéza platí.

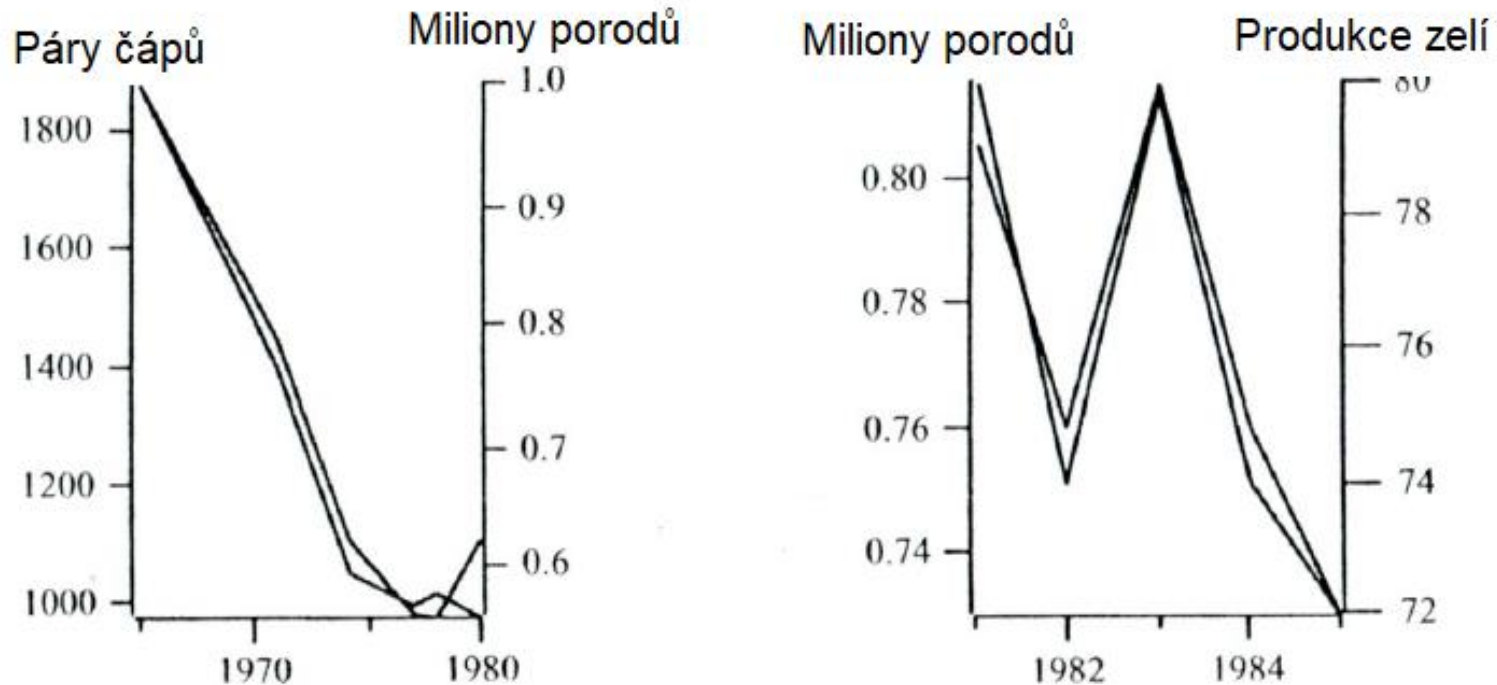
Nádherné příklady dává M. Faraday v *Experimental Researches in Electricity*, který podrobně popisuje všechny okolnosti provedených pokusů.

Pochopitelně, často se uvádí (v učebnicích, na Internetu apod.) různé fyzikální věty bez příslušných podmínek a nejen studenti jsou přesvědčení o všeobecné platnosti různých fyzikálních či matematických teorií.



Pokud vyslovíme nějakou fyzikální hypotézu, je nutné uvést příslušné okolnosti (podmínky). Mnohokrát se používají empirické modely. Pokud se takový model vytváří ve shodě se statistickou analýzou, bude přesně reprezentovat data, která sloužila k jeho vytvoření.

Protože empirické modely jsou relativně jednoduché a snadno použitelné, často se používají i pro další případy. Ovšem každá extrapolace je poněkud riskantní. V důsledku skrytých proměnných vzniká falešná závislost, která bez odhalení spojuje dvě proměnné, které nemají žádnou přímou spojitost. Často nám „zdravý rozum“ napoví, ale občas se nevyplatí na to spoléhat.



Fyzika ani technika není jen matematika, ale matematické modely fyzikálních systémů mohou být velice užitečné.

Ovšem mimo omezení dané podmínkami v matematice přistupuje ještě řada dalších omezení a je nutné matematická řešení fyzikálně vhodně interpretovat. Velmi užitečné mohou být semi-empirické modely, které jsou vytvářené ve shodě s fyzikální analýzou daného jevu.

Teoretické modely se opírají o základní fyzikální zákony, ale velmi často je nutné provádět velice drastická zjednodušení (např. fyzikálních vlastností okolního prostředí jako jsou změny teploty, tlaku a hustoty atmosféry, vlastnosti použitých materiálů apod.), a proto získané výsledky se mohou značně lišit od skutečnosti.

Ve škole často studenti nabývají dojmu, že všechny teoretické modely můžeme řešit „tužkou na papíře“ (což podporují různé řešené příklady, které ovšem jsou velice užitečné a slouží k demonstraci různých problémů). Ve skutečnosti většinu problémů dnes řešíme pomocí počítačů, což často vyvolává dojem, že získané výsledky musí být správné („řešil jsem to pomocí počítače!!!“). Bohužel i dnes jsou reálné problémy natolik složité, že vždy musíme provádět řadu zjednodušení. To může způsobit značný nesouhlas mezi výpočty a skutečností, jak potvrzují zkušenosti mnoha a mnoha výzkumníků.



Pochopení základních principů, místo biflování pouček a vzorečků, nám pomůže chápat i stále se zvětšující objem zcela nových poznatků ze všech oborů lidské činnosti.

Samozřejmě, náhled na nejrůznější jevy vyvolává řadu otázek, na které se lidé snaží odpovědět a nemůže být překvapivé, že odpovědi se mění nejen od jednotlivců, ale podstatné je i období.

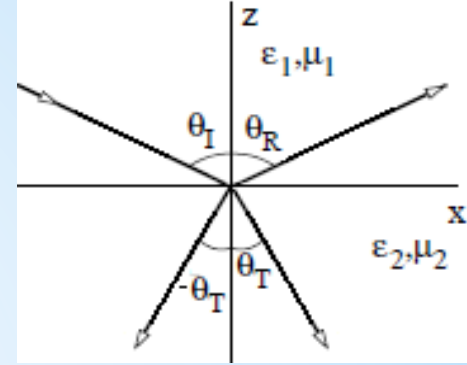
Např. J. C. Maxwell (1872) uvedl tabulku a závěr:

Rychlost světla		Poměr elektrických jednotek	
Fizeau	314000000	Weber	310740000
Aberace	308000000	Maxwell	288000000
Foucault	298360000	Thomson	282000000

„To ukazuje, že rychlost světla a poměr veličin jsou kvantitativně stejného řádu. O žádné z nich nelze říci, že byla určena s takovým stupněm přesnosti, aby nám umožnila tvrdit, že jedna je větší nebo menší než druhá... Naše teorie, která udává, že obě veličiny jsou stejné, není určitě v rozporu se srovnáním výsledků.“

Dnešní měření, které definuje 1m, udává přesnou hodnotu 299792458 m/s, zatímco v devatenáctém století byly tyto hodnoty známé s přesností $\pm 6\%$.

Zdánlivě nesmyslný požadavek záporné permitivity ($\epsilon < 0$) a permeability ($\mu < 0$) podnítl výzkum metamateriálů, neboť v tomto tisíciletí se objevily možnosti realizace umělých **metamateriálů**. Tok energie určuje Poyntingův vektor $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$, který je vždy dán pravidlem pravé ruky a index lomu $n = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$ je záporný.

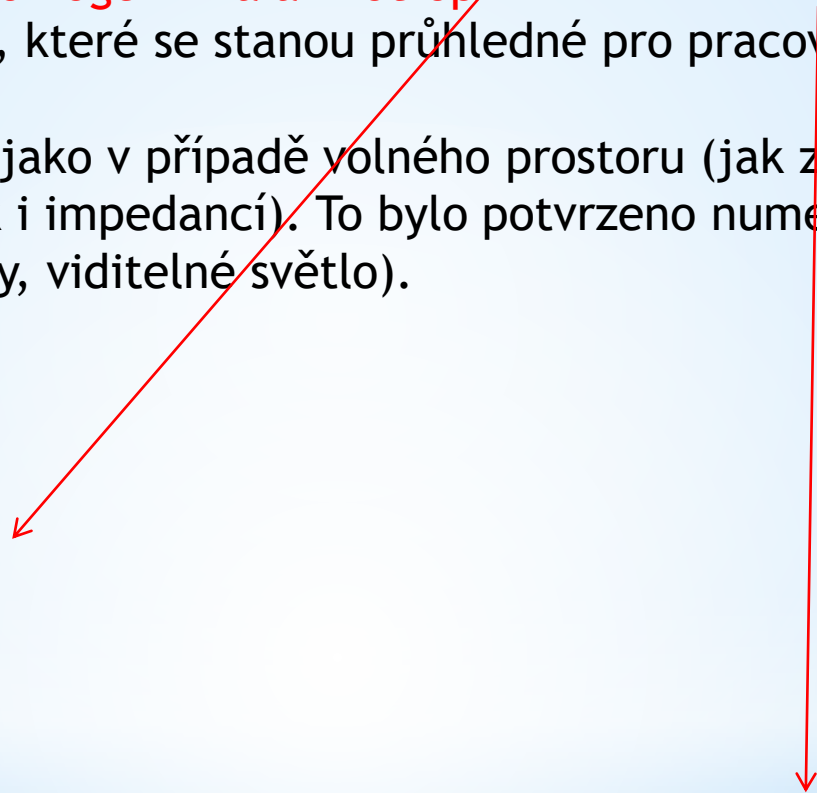


Příklad: Metamateriálová buňka, která umožňuje měnit efektivní parametry ($\epsilon_{r,ef}$ a $\mu_{r,ef}$) v určitém frekvenčním rozpětí. Magnetický rezonátor je tvořen dvěma symetrickými kovovými kroužky tištěnými na stejné straně substrátu s diskontinuitou uprostřed. Na spodní straně je kovový proužek tvořící elektrický rezonátor.

Příklad: Patch anténa s metamateriálem, který umožní větší koncentraci záření okolo osy vyzařování a tím lze docílit zvýšení směrovosti a zisku patch antény – např. nárůst 4dB pro $\epsilon_{r,ef} = \mu_{r,ef} = -4,5$. Metamateriálová anténa je elektrický obvod s vhodnou strukturou. Vypadá jako miniaturní obdélník s příslušným obrazcem připevněným na typické desce s plošnými spoji.

V dnešních komunikacích je velmi složité prostředí - např. na lodích nebo letadlech v důsledku dopředného rozptylu vzniká **hluboký stín (blokování)**. V těchto případech by bylo možné **pokrýt (nehomogéním a anizotropním metamateriálem s vhodným $\epsilon_{r,ef}$ a $\mu_{r,ef}$)** stínící předměty, které se stanou průhledné pro pracovní frekvence.

Anténa pak vysílá i přijímá jako v případě volného prostoru (jak z hlediska vyzařovacích diagramů, tak i impedancí). To bylo potvrzeno numerickými simulacemi i experimentálně (mikrovlny, viditelné světlo).



Ano a ne v matematice

Když mluvíme o matematice, běžně ji pokládáme za něco „vrcholně správného“.

Často jsme překvapeni, jak snadno lidé podléhají klamným představám.

Např. na dotaz:

„Obchodní řetězec zvedl cenu o 50%. Následně provedl rozsáhlou reklamní akci. Ohlásil snížení cen o 50%.“

Na otázku: „Zvedl cenu proti počáteční ceně, zůstala cena na stejné ceně, či snížila se cena?“ odpovídají chybně (cena se nezměnila) a správné odpovědi nechtějí uvěřit.

Jednoduchým výpočtem (např. pro 100 Kč) však zjistíme:

Zvýšení ceny na 150 Kč. Následné snížení na 75 Kč.

„Trik“ spočívá v tom, že pokaždé musíme uvažovat jiný základ.

Na dotaz jak dlouho trvá rozřezání 5m klády na metrové kusy, pokud řez trvá 5 minut, běžná odpověď je 25 minut, místo správných 20 minut.

Podobně existuje množství velice jednoduchých otázek s chybnými odpověďmi.



Pokud uvažujeme reálná čísla, nemůžeme počítat:

Odmocnina ze záporného čísla

Logaritmus pro záporné číslo

$\sin(x) > 1$

$\sin(x) < -1 \dots$

Ovšem pro komplexní čísla můžeme počítat nejen hořejší výrazy, ale i řadu dalších „překvapivých“ výrazů.

Samozřejmě ve fyzice není ani tak důležité, že dostaneme výsledek v oboru komplexních čísel, jako fakt, co to fyzikálně znamená (např. komplexní a imaginární výkon, imaginární úhly atd.)

**Funkce $f(x)$ nejsou definované, když $f(a)$ má tvar $0/0$, ∞/∞ , $0 \cdot \infty$, 0^0 , ∞^0 , 1^∞ , $\infty - \infty$;
Ale může existovat a běžně používáme**

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x)$$

Často z požadavků fyziků vznikaly nové matematické obory, které umožnily vysvětlit řadu fyzikálních hypotéz a naopak.



Ano a ne v technice

Matematika uvádí jednotlivé věty s příslušnými předpoklady (včetně okrajových nebo počátečních podmínek), které jsou občas těžko splnitelné.

Shoda fyzikálních hypotéz a matematických vztahů se ve fyzice obvykle ověřuje experimenty, které ovšem probíhají ve značně „sterilních“ okolnostech (např. ve vzduchoprázdnu, bez přítomnosti dalších těles, bez změn tlaku nebo teploty).

To samozřejmě není možné v technice, kdy jednotlivá zařízení musí pracovat v součinnosti s dalšími zařízeními, občas v extrémních podmínkách jako jsou mrazy v arktických oblastech, rychlé střídání vysokých a nízkých teplot (např. na poušti), vysoká vlhkost vzduchu (např. tropické pralesy, přímořské oblasti, či zařízení na lodích).

Zanedbání podrobnějších analýz vede často k podstatným odchylkám od skutečnosti, tzn. nejednou měřením odhalíme značné odchylky mezi výchozími návrhy a získanými výsledky. Pro optimalizaci jednotlivých prostředků nelze hledět pouze z jednoho pohledu (např. elektrotechniky), ale je nutné sledovat i další obory jako je termodynamika, či nauka o materiálech.

Například musíme uvažovat tepelné přestupy mezi jednotlivými díly, neboť dochází k vývinu ztrátového tepla a tím ke zvýšení teploty v okolí jejich zdroje, nebo ke změnám vlastností použitých materiálů.



Běžně dochází k termodynamické nerovnováze mezi více systémy. Tímto stavem je následně započat proces sdílení tepla, směřující k opětovnému dosažení rovnováhy. Pochopitelně mimo změn vlastností materiálů je nutné uvažovat i další okolnosti, které se mohou v provozu vyskytnout.

Dnes se začínají stále více prosazovat profesionální softwarové prostředky, které za pomoci simulačních metod řeší i velmi komplikované technické problémy zahrnující řadu různých oblastí fyziky, což klade vysoké nároky na teoretické i praktické znalosti a zkušenosti jednotlivých uživatelů.

Nepochybně použití i těch nejlepších simulačních metod vyžaduje znalosti jejich principů a nutnost použít jistých zjednodušení (demonstrační „školní“ verze mají omezenou kapacitu - lze řešit např. nejvýše 1 000 000 lineárních rovnic - a i „profesionální“ verze mají svá omezení).

Je tedy vždy nutné ověření numerických simulací vhodnými experimenty, i když je zpravidla možné ověřovat pouze jednotlivé dílčí výsledky.

To umožní získat detailní konkrétní informace o značně odlišných oborech fyziky jako je teorie elektromagnetických polí, teorie obvodů, termodynamika apod. Tak je např. možné si udělat představu o sdílení tepla v konstrukcích jednotlivých komponent s ohledem na charakteristiky proudění tekutiny v jejich okolí, změn vlastností použitých materiálů apod. a lze tak tyto analýzy následně využít jako výchozí bod pro další optimalizaci.

Nejednou měřením odhalíme značné odchylky mezi výchozími návrhy a získanými výsledky. Uvedeme pouze některé příklady i zdánlivě jasných otázek.

Elektrická izolace je stejně důležitá jako vodivost. Není možné, aby se elektřina pouze šířila z jednoho místa na druhé, musíme také zabránit úniku a šíření do míst, která chceme chránit.

Důležité vlastnosti izolačních materiálů jsou elektrická pevnost, permitivita a odolnost proti výboji. Izolační materiály zahrnují pevné, kapalné i plynné materiály.

Většina organických a anorganických sloučenin a nekovové prvky jsou izolátory.

Mnoho pevných izolačních materiálů jsou plastické lamináty, další jsou polymery nebo směsi, jako jsou sloučeniny s nebo bez plnidel.

Kapalné izolační materiály se používají pro ponoření a impregnaci řady transformátorů, kapacitorů, vysokonapěťových kabelů a přepínačů. U mnoha se po dlouhé době používání zjistilo, že jsou jedovaté, karcinogenní, či poškozují ozónovou vrstvu.

Plyny, obvykle pod tlakem, se používají místo vzduchu jako izolující materiály v různých zařízeních jako jsou vysokonapěťové vypínače obvodů a kabely. Zejména fluorid sírový SF_6 je dobrý izolační materiál. Vodík je také vynikající elektrický izolační materiál a teplotně vodivý, ale je to nebezpečná výbušnina.

Vakuum je vynikající izolační materiál, ovšem za předpokladu, že zde není zdroj buď volných elektronů - např. horké vlákno (katoda) - nebo iontů. Jak elektrony, tak ionty se mohou volně pohybovat (např. v mikrovlnných elektronkách či obrazovkách) a v tomto smyslu je vakuum supravodič.

Zanedbání podrobnějších analýz, tzn. použití zjednodušeného modelu změny komplexní permeability ve větším frekvenčním rozsahu, může vést ke zcela chybným modelům, např. při vyšetřování průchodu signálů zdí, odrazů od země, či kompozitních materiálů apod.

Na druhé straně, pokud se předem provede analýza těchto změn, lze obdržet uspokojivé výsledky. Jako příklad lze uvést, že činitel ztrát (a tedy i komplexní permitivita) se mění velmi málo pro různé typy zdí i pro široké kmitočtové spektrum UWB (ultra-wideband) signálů, jak to potvrzují matematické modely a experimenty s průchodem UWB signálů zdí.

Experiment provedený **Faradayem** ukazuje, jak dutá kovová nádoba byla zavěšená na hedvábných nitích a podobná nit' je upevněná na víčku nádoby, takže se může nádoba otevřít a zavřít bez toho, abychom se jí dotýkali. Podobně se zavěsí nabité tělísko. Není-li nádobka původně nabitá, pak pokud nabité tělísko vložíme bez doteku s nádobou a uzavřeme víčko, zjistíme, že vnější strana nádoby je nabitá stejně jako tělísko a lze ukázat, že nádoba má zvenku přesně stejný náboj bez ohledu na to v kterém místě je tělísko zavěšené.

Pokud tělísko vytáhneme bez dotyku s nádobou, náboj tělíska bude stejný jako předtím a nádobka už nebude nabitá.

O takovém nabití nádoby, které závisí na tom, zda je tělísko uvnitř a mizí při vyjmutí říkáme, že se nabíla vlivem *indukce*.

Podobné efekty vzniknou, když tělísko umístíme blízko nádoby, ale v tomto případě zjistíme, že náboj má stejné znaménko na části nádoby a opačné v jiné části.

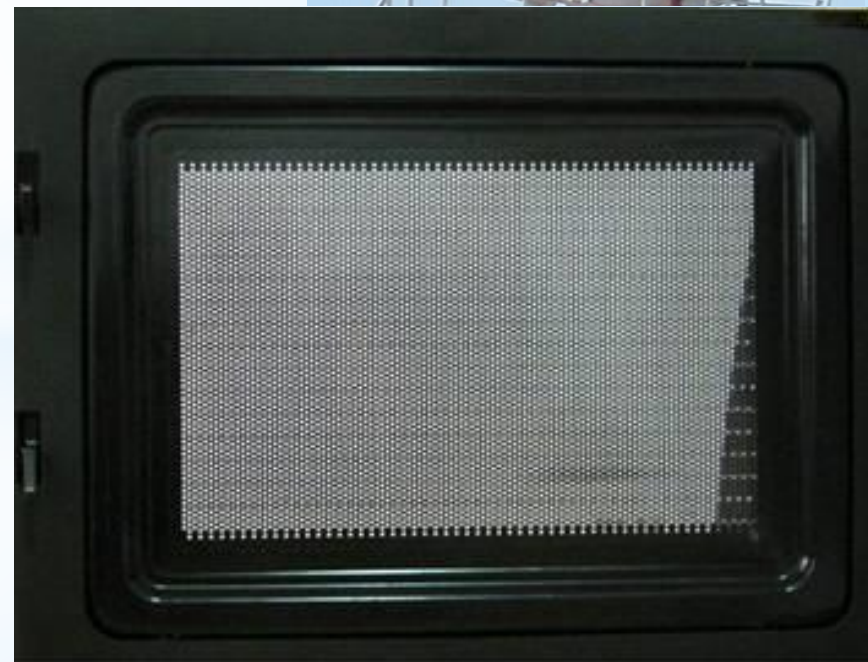
Pokud je tělísko uvnitř nádoby, celá vnější strana nádoby má stejné znaménko a celá vnitřní strana opačné (**Faradayova klec a funkce stínění**).

Pokud se nádoba nabíla vlivem indukce a připojíme druhé kovové těleso vodivým drátem (vodičem), zjistíme, že se nabílo nábojem se stejným znaménkem (vodivým spojením) a náboj nádoby se zmenšil.



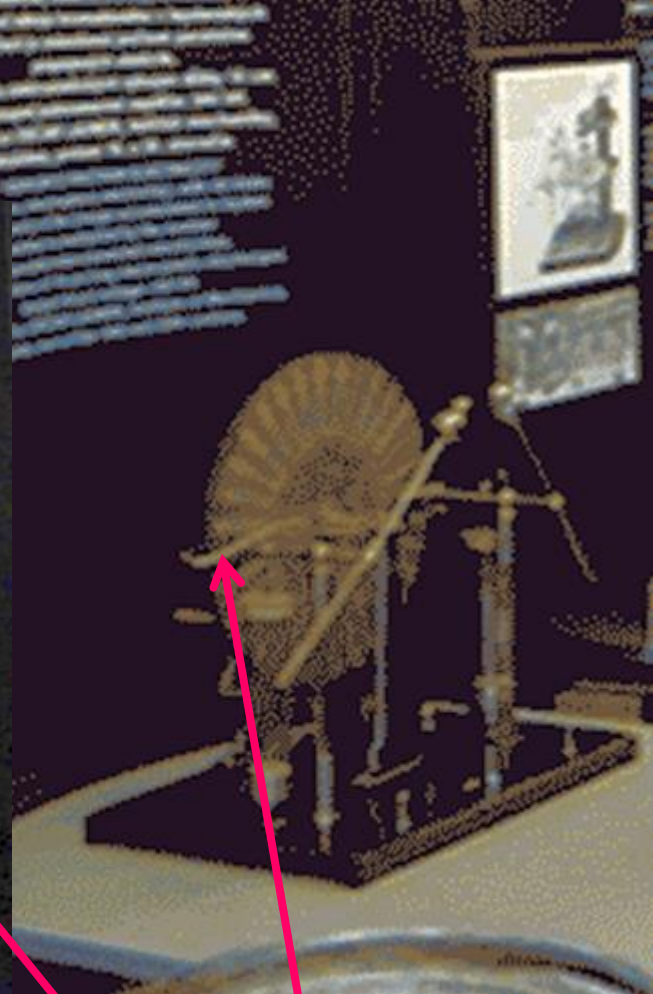
Faradayova klec a funkce stínění

Vliv otvorů se musí vyšetřovat velmi obezřetně (profesionálně provedená stínící komora). Otvory, okna aut podstatně zhorší stínící vlastnosti (např. není pravda, že nás auto vždy ochrání před bleskem, mobilní signál bude i v nedokonale provedené stínící komoře, nebo mikrovlnná trouba zeslabí signál „pouze“ 10 000).





**Technické
muzeum Košice**



**HISTORIE
Vývoj
Jiskra**

**Faradayova klec s „odvážným“
dobrovolníkem**

Je mylné se domnívat, že „jedinou“ škodou, kterou může při bouřce způsobit bleskový výboj, je požár nebo nepřímé poškození elektrospotřebičů vlivem přepětí v elektrizační soustavě. Elektromagnetické impulsy indukované bleskem jsou výsledkem proudů tekoucích kanálem vytvořeným mezi mrakem a zemí. Proudů tekoucí kanálem lze modelovat jako dlouhé drátové antény a to umožnilo vytvořit nejrůznější numerické modely, které ukazují některé pozorovatelné vlastnosti v různých vzdálenostech od místa úderu blesku. Jedná se řádově o proudy 10 až 100 kA s dobou náběhu zhruba 1 μ s. Vypočtené pole 50 m od bleskového kanálu je desítky kV/m po dobu desítky μ s. Okolní pole bude pronikat díky otvorům a difrakčním jevům a proto se budou proudy a napětí indukovat i uvnitř místností, aut a pod. Pásmo frekvencí pro blesk obsahuje většinu složek pro frekvence menší než 50 MHz (vlnová délka 6 m) a tedy lze většinu otvorů považovat za malé, ale mohou podstatně snižovat účinnost stínění. Proto například v datových, ale i jiných vodičích, v citlivých elektronických obvodech apod. „ukrytých“ uvnitř budovy a pod. se mohou indukovat proudy, které významně ovlivní činnost těchto zařízení, a to i ve stavu, kdy jsou „bezpečně vypnuty“.





Technické muzeum Košice

Van de Graaffův generátor, kterého se dobrovolnice dotýká pravou rukou a levou drží stojánek s barevnými proužky (její stojící vlasy jsou špatně vidět)

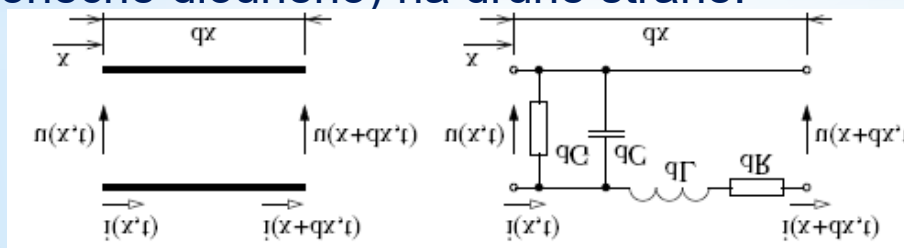


Univerzita
Pardubice
Dopravní fakulta
Jana Pernera

Homogenní vedení

Modelem elektromagnetického pole může být obvod se soustředěnými parametry, jehož energie je soustředěna do konečného počtu prostorově oddělených obvodových prvků (odporů, indukčností a kapacit). Takový model nelze použít, pokud různá časově proměnná a vzájemně závislá elektrická a magnetická pole jsou spojitě rozložena uvnitř společného prostoru. Pokud chceme řešit tato pole jako obvod, musíme vytvořit náhradní zapojení z nekonečného počtu elementárních obvodových prvků. Takový obvod označujeme jako *obvod s rozprostřenými (rozloženými) parametry*. Jeho obvodové veličiny jsou kromě času také funkcemi prostorových souřadnic a probíhající děje mají *vlnový charakter*. V obecném případě je řešení obvodů s rozprostřenými parametry velmi složité a zpravidla je výhodnější použít metody řešení polí. Výjimku tvoří obvody, jejichž podélné rozměry jsou mnohem větší než příčné, jako je tomu např. u vedení. Vzhledem k malé vzdálenosti vodičů se projeví vlnový charakter dějů pouze v podélném směru, takže k jejich popisu můžeme použít napětí mezi vodiči a proudů ve vodičích. Tato napětí a proudy jsou pak funkcemi času a jedné prostorové souřadnice.

Obecně není jasné rozhraní mezi obvyklým konceptem elektrických obvodů a dlouhým vedením s výjimkou extrémních případů obvyklých elektrických obvodů na jedné straně (mnohem menší než vlnová délka použitých signálů) a dlouhého vedení (teoreticky nekonečně dlouhého) na druhé straně.



Hlavní transatlantické kabely

První pokus položit kabel byl zcela neúspěšný. Nikdo netušil, jak hluboký je Atlantický oceán a kabel se při kladení přetrhl.

První úspěšně položený kabel, měl vysoké RC – filtr s velice nízkou frekvencí – takže trvalo hodiny přenést jednu větu. Je zajímavé, že 3 roky předtím lord Kelvin formuloval model, který dokázal správně předvídat špatné vlastnosti kabelu.

V té době nebyl Ohmův zákon prakticky znám, tzn. lidé si vůbec nedokázali představit jeho praktické důsledky, takže operátoři ve snaze zvýšit přenosovou rychlost „experimentovali“ - zvyšovali napětí signálu, a proto se kabel po měsíci provozu zničil.

Když se v roce 1 866 pokládal první úspěšný transatlantický kabel (1 014 kg/km) použili největší loď na světě Great Eastern. Kabel se vyráběl 8 měsíců (22 km/ den), nakládalo se 5 měsíců (zhruba 32 km/ den). Cena přenášené zprávy byla 10 USD za slovo, min. 10 slov. V té době 10 USD byla týdenní mzda kvalifikovaného pracovníka.

Hlavní transatlantické kabely

Přenosová kapacita se zvyšovala díky modernější technice (a technologii), rozvoji teorie a lepšímu zpracování signálů (při použití stejných kabelů).

Rok	Typ kabelu	Signál	Kapacita
1858	Koaxiál	Telegraf	Několik slov za hodinu – pracoval měsíc
1866	Koaxiál	Telegraf	6 – 8 slov za minutu
1928	Koaxiál	Telegraf	2 500 znaků za minutu
1956	Koaxiál	Telefon	36 (48 od r. 1978) hlasových kanálů
1963	Koaxiál	Telefon	138 (276 od r. 1986) hlasových kanálů
1970	Koaxiál	Telefon	845 (2112 od r. 1993) hlasových kanálů
1976	Koaxiál	Telefon	4 000 (10 000 od r. 1994) hlasových kanálů
1988	Optická vlákna	Data	280 Mb/s (~ 40 000 hlasových kanálů)
2000	Optická vlákna	Data	640 Gb/s (~ 9 700 000 hlasových kanálů)

Lineární a nelineární prvky

Kapacita soustavy dvou vodičů, které jsou nabity opačnými náboji $+Q$ a $-Q$ a mezi kterými je napětí U je $C = Q/U$. Kapacita soustavy závisí plně na geometrii vodičů, jejich vzájemné poloze, prostředí v okolí vodičů a při změně napětí se nezmění. Dvojice speciálně uspořádaných vodičů, která má požadovanou kapacitu, se nazývá **kapacitor**. Proto pro změnu kapacity se používají kapacitory s otočnými deskami a kapacita se mění mechanicky zasunutím nebo vysunutím desek.

Kapacita (varaktorové) diody při změně napětí U . Zvětšení šířky dielektrika kapacitoru zmenší jeho kapacitu a zmenšení šířky ji zvětší. To se využívá ve varaktorových diodách, kde kapacita přechodu (šířka vyprázdňené vrstvy) se mění s předpětím diody (to obecně platí pro libovolnou diodu). Tím poskytují elektronicky nastavitelné reaktivní obvodové prvky. Zvětšení nepropustného předpětí varaktoru zvětší tloušťku vyprázdňené oblasti, která se tedy chová jako virtuální dielektrikum a tím zmenší kapacitu diody a opačně snížení nepropustného předpětí zvětší kapacitu diody.

Varaktorové diody umožňují velice rychlou změnu kapacity např. ve filtrech a při elektronickém ladění frekvence v místních oscilátorech vícekanálových přijímačů pro mobilní telefony, bezdrátové LAN, radia nebo televizní přijímače, systémy pro elektronický boj, radary se skokovou změnou frekvencí a měřicí systémy.

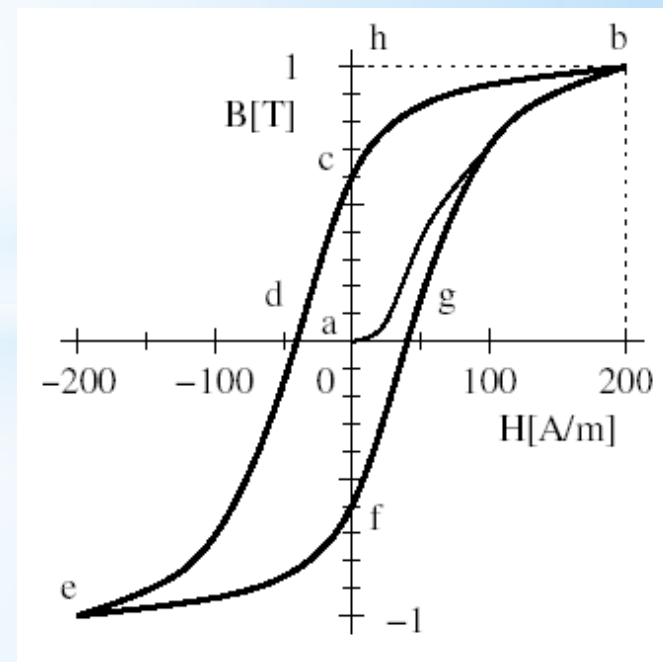
Vlastní indukčnost dané cívky závisí na geometrii cívky, počtu závitů a vlastnostech (permeabilitě) okolního prostředí.

Indukčnost L se může měnit, neboť $L = \Phi_c / I$, kde Φ_c závisí na \mathbf{B} a \mathbf{H} na I . Jestliže začneme magnetovat nezmagnetovaný vzorek feromagnetického materiálu pomocí cívky s N závity, ve které zvětšujeme proud, pak roste H a B podle magnetizační křivky, jako je například křivka ab pro transformátorový plech. Začneme-li snižovat proud v cívce na nulu, B klesá podle křivky bc . Jestliže pak změníme směr proudu a začneme zvětšovat proud, B klesá k nule v bodě d . Při dalším vzrůstu proudu stejným směrem se dostaneme do bodu e , který je symetrický s bodem b .

Jestliže se nyní proud snižuje na nulovou hodnotu (do bodu f), pak se změni směr proudu a začne vzrůstat, klesá B na nulovou hodnotu (bod g). Dalším zvyšováním proudu se dostaneme opět do bodu b (obvykle se po prvním cyklu nedostaneme přesně do bodu b , ale po několika cyklech bude křivka uzavřená). Uzavřená křivka $bcdefgb$ se nazývá *hysterezní smyčka*.

Ovšem je zřejmé, že vzduchová cívka nemůže měnit indukčnost změnou proudu.

Naproti tomu cívka s feromagnetickým jádrem bude při změně proudu měnit indukčnost, což se využívá v řadě technických zařízení, nejen v silnoproudé elektronice, ale i při elektronickém ladění frekvence.



Budíme-li nelineární prvek součtem dvou harmonických o různých frekvencích, pak mimo vyšších harmonických původních složek se zde vyskytují i součty a rozdíly těchto složek. To je nežádoucí při tzv. *intermodulačním zkreslení*, ale naopak se to využívá např. pro *amplitudovou modulaci*.

Intermodulační zkreslení může vzniknout na libovolné nelinearitě ať aktivní, tak i pasivní. Mohou to být materiálové a konstrukční prvky, které byly dosud považovány za lineární (kabely, konektory, antény, filtry), ale i nekvalitní (oxidované) spoje různých kovů a samozřejmě polovodičové prvky nebo bleskojistky. Jsou-li na této nelinearitě dva silné signály s frekvencemi ω_a a ω_b vznikají intermodulační produkty.

Přitom platí, že intermodulační produkty nižšího řádu jsou silnější než produkty vyšších řádů. Také platí, že původce vzniku produktů všech řádů je společný a odstraníme-li příslušnou nelinearitu ze systému, odstraníme všechny tyto produkty.

Nové technologie obvykle znamenají i větší nároky. Např. v systémech GSM byla hodnota šumového prahu -95 dBm až -98 dBm považována za přijatelnou a v sítích LTE se uvažuje -107 dBm. Rozdíl 10 dBm znamená například u základové stanice v rovinném terénu zmenšení poloměru pokrytí v daném segmentu o 8 km.

Základní a důležité jsou pracovní návyky jako extrémní nároky na čistotu čela konektorů, správný a definovaný moment utažení (momentovým klíčem), správná volba konektorů a kabelů a postupné odstraňování jednotlivých příčin vlastních intermodulací.



Pokroky v technologii

Starší generace elektrotechniků má zažito, že kapacita větší než 1 F je prakticky nerealizovatelná. To díky moderním technologiím už neplatí. *Ultrakapacitory* (*superkapacitory*) dnes mají kapacitou stovky až tisíce faradů (např. 3000 F a napětím 2,7 V). Dnes se používají pro rychlé ukládání větrné, solární nebo vodní energie. Velmi slibné je jejich použití pro pohon vozidel (např. lokomotivy, hybridní vozidla či elektromobily), kdy např. při jízdě s kopce energii ukládáme a využíváme při rozjíždění či jízdě do kopce, neboť ultrakapacitory umožní na rozdíl od akumulátorů velice rychle (a mnohonásobně) ukládat a využívat tuto energii. Ani tyto úvahy neplatí obecně a díky obrovskému rozvoji akumulátorů v posledních letech se jeví jako velice perspektivní použití akumulátorů pro tyto účely.

Ukládání energie z obnovitelných zdrojů -
baterie by mohly dodávat 1GW do sítě po
dobu 4 až 6 hodin.



Aby se snížily ztráty v odporu vedení při přenosu energie na velké vzdálenosti, používá se vysoké napětí. Zvýšení napětí snižuje přenášený proud, a protože tepelné ztráty ve vodičích I^2R jsou úměrné čtverci proudu a odporu drátů, snižují se ztráty. Ztráty lze také snížit zmenšením odporu vedení, např. zvětšením průměru drátů, ale ty jsou pak dražší a těžší.

Vysoké napětí nelze snadno používat pro motory a svícení a tak se přenášené vysoké napětí musí měnit na hodnoty vhodné pro koncového uživatele. Pro změnu střídavého napětí (AC) se používají transformátory. „Bitvu“ mezi Edisonovým stejnosměrným (DC) a Teslovým střídavým (AC) proudem vyhrály v 19. století střídavé proudy, i když Edison předváděl bezpečnost DC tak, že zabíjel zvířata pomocí střídavého proudu.

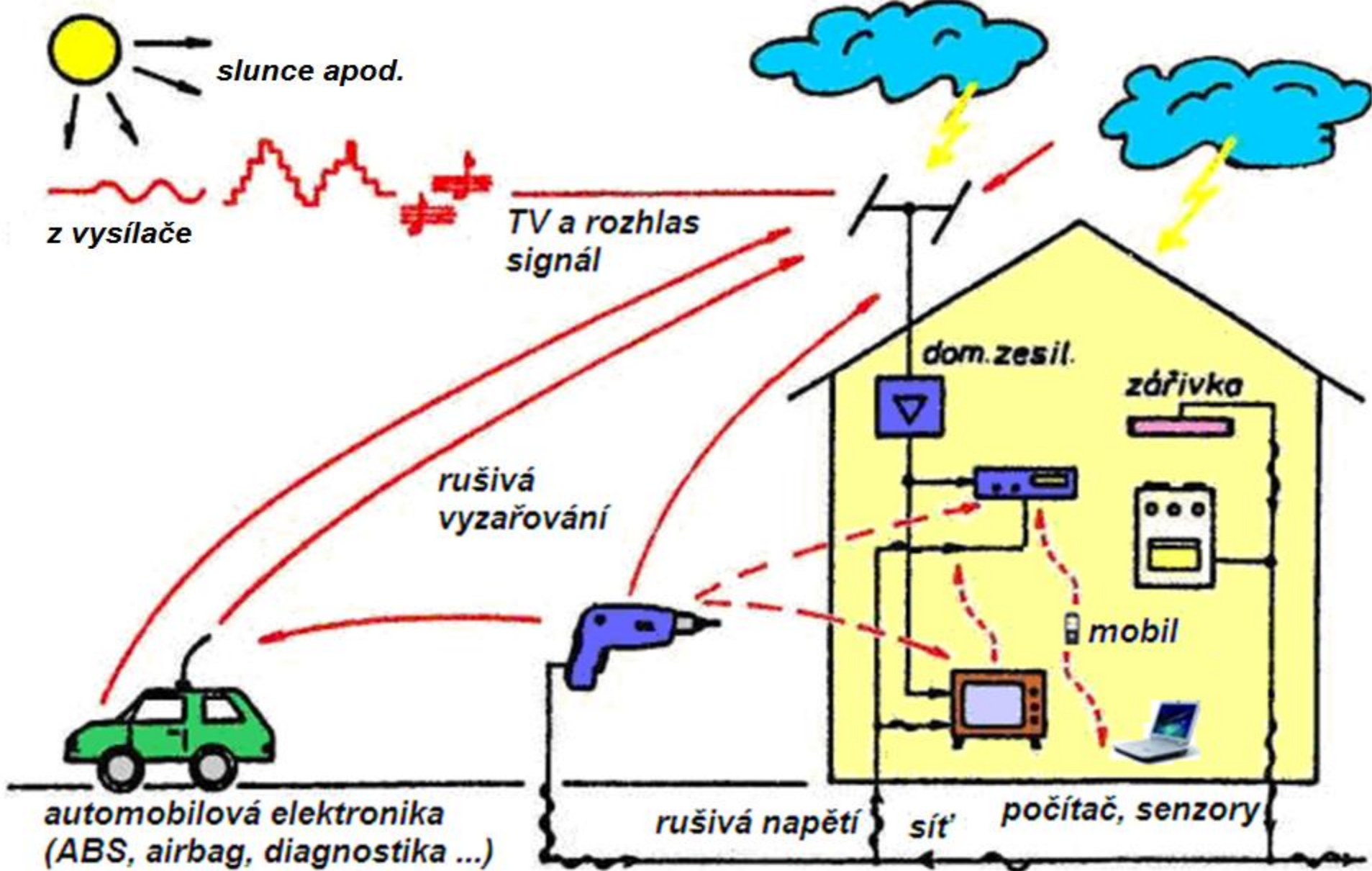
Moderní technologie (nejprve rtuťové výbojky a nyní polovodičové součástky jako IGBT, tyristory) způsobily, že je možné prakticky manipulovat s vysokým DC napětím. Vysokonapěťové DC systémy se používají pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti (např. napětí 800 kV na vzdálenosti větší než 2 000 km pro přenos z velkých osamocených hydroelektráren do hustě obydlených oblastí v Kanadě, Brazílii, Číně atd., neboť tyto systémy jsou lacinější a mají menší ztráty na vedení (5% pro DC a více než 10% pro AC). Na kratší vzdálenosti se zřejmě zachovávají AC systémy, neboť zařízení pro převod na vysoké DC napětí je drahé.



Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

je schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a současně svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. neprodukovat signály, jež by byly nepřípustně rušivé pro jiná zařízení.

Technicky nesmírně důležitou oblastí je *elektromagnetická kompatibilita* (*electromagnetic compatibility* EMC) a *rušení* (*electromagnetic interference* EMI). Existuje řada norem a předpisů, které se stále zpřesňují a jsou určeny jak pro všeobecné použití, tak i pro jednotlivé dopravní prostředky (např. vysokofrekvenční rušení zážehových motorů). Jednotlivá zařízení se ve větší nebo menší míře ovlivňují, ať se jedná o jednostranné či oboustranné ovlivňování. Proto nás zajímá *odolnost proti rušení* (*electromagnetic susceptibility* EMS) a úroveň rušení uvažovaného zařízení a to nejen pro základní frekvenci, ale i pro vyšší harmonické (obvykle mají z hlediska rušení největší vliv). Samozřejmě existují i „přírodní“ zdroje rušení (bouřky, výboje typu Eliášův oheň, kulové blesky a pod.).



Příklady působení rušivých signálů



Při bouřkách jsou přepětím poškozovány telefonní ústředny, faxy, záznamníky a telefony.

Důvodem je jejich nízká odolnost vůči přepětí a nevhodné či chybějící přepět'ové ochrany na vedení.

Kromě neúmyslného rušení, které pouze „znečišťuje“ životní prostředí („elektromagnetický smog“ – špatně odrušené motory, polovodičové a regulační prvky, vysílače atd.) a může se šířit jak po napájecích vedeních tak volným prostorem, existuje úmyslné rušení v rámci radioelektrického boje (electronic warfare), kdy nepřítel vysílá rušivý signál (jamming), aby znemožnil používání spojovacích, navigačních a výpočetních prostředků. Velkou hrozbou je možnost teroristických útoku pomocí elektromagnetické pumy (E-bomb), která vysílá velmi krátké impulsy (o délce řádově 1 ns) s výkonem řádově jednotek či desítek GW a tím může rušit (popř. zcela zničit) počítače, regulační a telekomunikační zařízení.

Kromě vysílání rušivých signálů existuje celá řada dalších prostředků rušení (electronic countermeasures ECM) a samozřejmě prostředků proti rušení (electronic counter-counter measures ECCM).

EMC

biologických systémů

technických systémů

EM pozadí životního prostředí
vliv EM polí na živé organizmy
přípustné úrovně EM polí



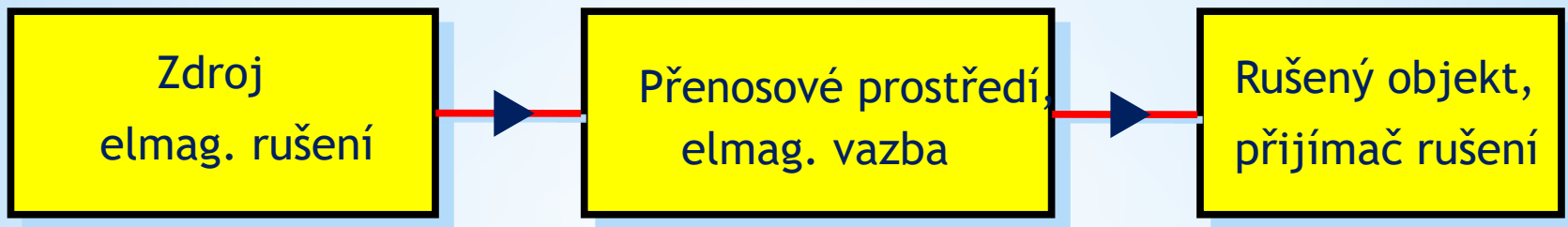
hygienické normy

tepelné účinky EM polí

netepelné účinky EM polí

EMC technických systémů

Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí



EM procesy v atmosféře
elektrostatické výboje
motory, spínače, relé
energetické rozvody
polovodičové měniče
zářivky
obloukové pece, svářečky
domácí spotřebiče, počítače,
číslicové systémy

vzdušný prostor
zemnění
energetické kabely
napájecí vedení
stínění
signálové vodiče
datové vodiče
společná napájecí síť

číslicová technika
počítače
měřicí přístroje
automatizační
prostředky
telekomunikační
systémy
systémy přenosu dat
rozhlasové
přijímače
televizní přijímače



ZÁKLADNÍ POJMY EMC

rezerva návrhu zařízení z hlediska EMS

úroveň odolnosti



rezerva odolnosti

mez odolnosti

rezerva vyzařování rezerva EMC

kompatibilní
úroveň

mez vyzařování

rezerva návrhu zařízení z hlediska EM

úroveň vyzařování

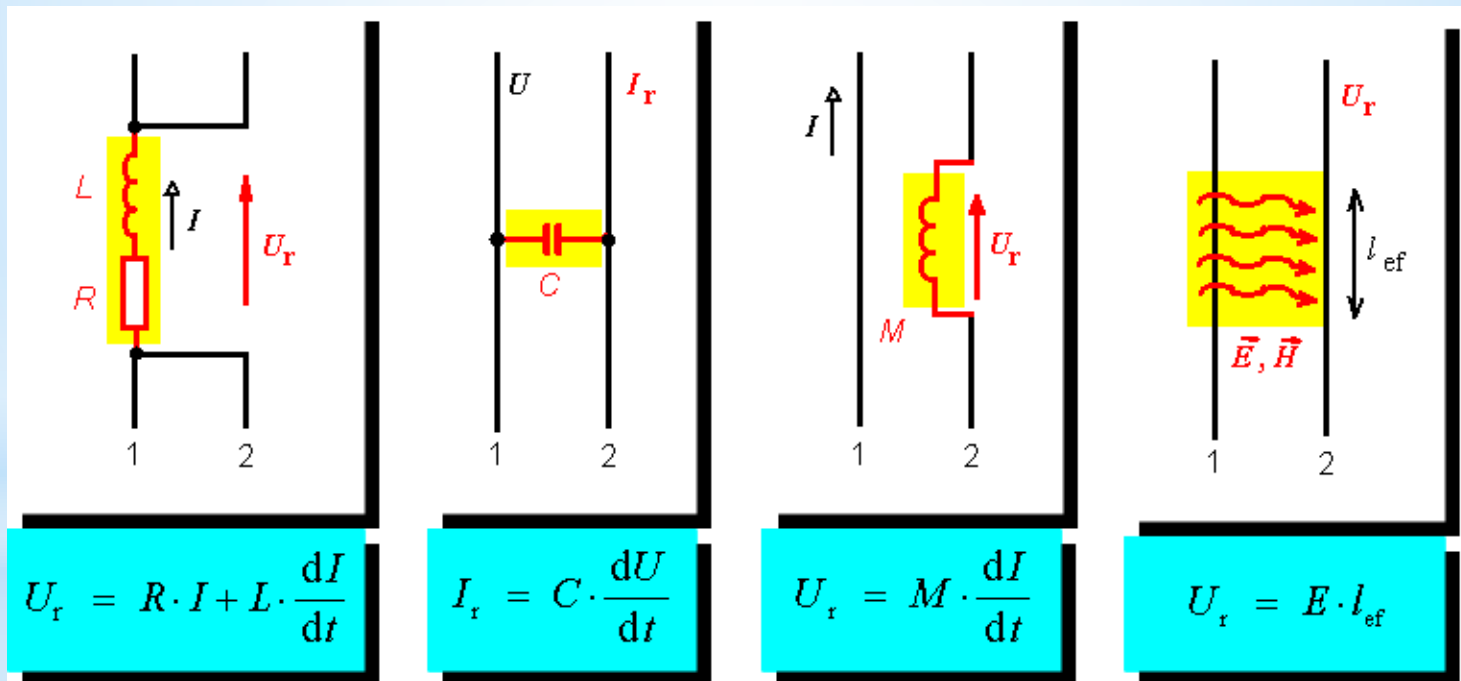
VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ

Galvanická vazba (vazba společnou impedancí)

Kapacitní vazba

Induktivní vazba

Vazba vyzařováním



ZÁVĚR

Byly ukázána řada příkladů, kdy nejen studenti, ale i lidé spoléhající se příliš na různé publikované vztahy bez snahy o porozumění základním principům dedukují zcela nesprávné závěry, a to jak pro zcela elementární, tak i velmi komplikované případy (šíření elektromagnetických vln a problémy elektromagnetické kompatibility).

Zdánlivě nesmyslný požadavek záporné permitivity a permeability podnítil výzkum metamateriálů. To umožní jak konstrukci zcela nových antén, tak i pokrytí stínících předmětů, které se stanou průhledné pro pracovní frekvence.

Podobně pokroky v matematice umožní zcela nové pohledy jak ve fyzice, tak i nejrůznějších oblastech techniky.

Na druhé straně díky pokrokům v nových technologiích je možné vytvářet zcela nová řešení pro nejrůznější obory elektrotechniky, která by se před několika málo lety jevila jako nereálná.

Bylo uvedeno použití DC rozvodů, ultrakapacitorů a moderních akumulátorů pro řešení problémů s obnovitelnými zdroji a v dopravě