



## Výfučení: Vysoké napětí

S elektrinou se setkáváme každý den. Používáme ji ke svícení, topení, vaření, na provoz počítačů, televizi atd. Ve všech těchto situacích se dostáváme do styku s takzvaným *nízkým napětím* či *velmi nízkým napětím*.

Velmi nízké napětí je dle IEC<sup>1</sup> definováno jako stejnosměrné napětí do 120 V či střídavý proud do 50 V. Do této kategorie tedy spadá většina dnešních chytrých zařízení (bez samotného zdroje, který napětí z běžné zásuvky snižuje). Pokud se bavíme o nízkém napětí, myslíme tím stejnosměrné napětí od 120 V do 1 500 V nebo střídavé napětí od 50 V do 1 000 V. Jedná se o napětí, které najdete v klasických evropských zásuvkách, tedy i ve velkém množství domácích zařízení.<sup>2</sup>

I ve většině podniků a větších zařízeních můžeme tuto kategorii napětí najít v podobě *třífázových zásuvek*, které obsahují napětí 400 V. V takové zásuvce existují 3 vývody střídavého napětí o hodnotě 230 V, každý fázově posunutý o 1/3 periody. Pokud se připojíme na libovolný pár vývodů, dostaneme vždy dvě napětí s posunem 1/3 periody. Celkové napětí při připojení na takovéto 2 vývody je v každém okamžiku rozdíl jejich hodnot. Kdybychom se podívali na grafy napětí v čase, zjistíme, že v některých okamžicích je jeden vývod v kladných hodnotách napětí, kdežto druhý je v záporných a naopak. To nám způsobuje, že výsledné napětí je větší než maximální napětí každého z vývodů, díky čemu je efektivní hodnota 400 V.

V tomto Výfučení se však budeme zabývat napětím vysokým, tedy stejnosměrným napětím nad 1 500 V nebo střídavým napětím nad 1 000 V. Používá se v rentgenech, elektrických zapalovačích, elektronkách a jiných zařízeních. Jeho největším a nejdůležitějším použitím je však přenos energie.

### Přenos elektrické energie

Určitě jste se už někdy setkali s přenosovou sítí elektrické energie. Vysoké stožáry s několika dráty, od kterých jsme učení se držet dál. Proč se ale používá na přenos energie vysoké napětí a nepoužije se napětí nižší?

Cílem přenosové sítě je, jak název napovídá, přenos velkého množství elektrické energie a tedy přenášení vysokého výkonu. Ten můžeme v případě elektrických zařízení popsat vztahem  $P = U \cdot I$ , kdy  $U$  značí napětí a  $I$  proud na zařízení. Chceme-li zvýšit výkon, musíme zvýšit napětí nebo proud (případně obojí).

Uvažme modelovou situaci: máme dlouhý vodič vedoucí ze zdroje elektrické energie připojený na náš modelový spotřebič, který by měl pracovat s výkonem  $P_s$  a na konstantním cílovém napětí  $U_s$ .<sup>3</sup> Jak můžeme usoudit z předchozího stavu, bude pro proud na spotřebiči platit  $I_s = P_s / U_s$ . Protože je vodič připojen sériově, bude i na něm proud  $I_s$ , tedy  $I_v = I_s$ .

<sup>1</sup>Mezinárodní elektrotechnická komise

<sup>2</sup>V tomto odstavci i v celém Výfučení používáme pro střídavé napětí tzv. hodnoty efektivního napětí, které vyjadřují hodnoty napětí stejnosměrného proudu takové, aby v průměru byla přenesena stejné elektrická energie.

<sup>3</sup>V reálném světě všechny spotřebiče, které používáme, předpokládají konstantní vstupní napětí. Není to jen z důvodu přenosu energie, ale hlavně z praktických důvodů použitých elektrických součástek. Ty obvykle pracují na nějaké bezpečné hodnotě napětí a je potřeba interně vstupní napětí převádět na jiné hodnoty. Zároveň při překročení maximálních hodnot napětí je možné, že součástka shoří či dokonce exploduje. Naopak měnit proud na jiné hodnoty obvykle součástky zvládají bez problému – samozřejmě v rozumných mezích.

Vodič je poměrně dlouhý a má nezanedbatelný odpor  $R_v$ . Jak jsme již řekli, tímto vodičem poteče proud  $I_v = I_s$ . Protože známe tyto dvě informace, můžeme odvodit, že na vodiči bude muset být napětí  $U_v = R_v \cdot I_v$ . Ze vztahu vidíme, že nezáleží na vstupním či výstupním napětí. Pokud bude výsledný proud stejný, bude na vodiči stejná ztráta napětí.

Nyní by nás zajímalo, jaké ztráty se na vodiči vyskytnou. Ztrátami můžeme chápat všechny výkon, který vodič vyprodukuje v podobě tepla. Pro tento výkon bude platit  $P_v = U_v \cdot I_v$ , kde  $P_v$  je výkon vodiče. Do tohoto vztahu dosadíme dříve odvozenou rovnost pro napětí vodiče a získáváme rovnici

$$P_v = R_v \cdot I_v^2.$$

Vraťme se k našemu modelovému spotřebiči, na kterém bychom chtěli zvýšit výkon. Toho můžeme docílit dvěma způsoby: zvýšit proud na spotřebiči nebo zvýšit napětí, což samozřejmě zvýší energii potřebnou k přenesení přes vodič. Jak jsme již ukázali, na napětí na vodiči v otázce přenosu energie nezáleží. V případě, že bychom zvýšili napětí na spotřebiči a proud ponechali, tak se na samotném vodiči a jeho ztrátách nic nezmění. Povedlo se nám tak přenést více energie bez toho, aniž bychom zvýšili ztráty vyprodukované po cestě.

Naopak kdybychom zvýšili proud a ponechali napětí, nutně tím zvýšíme i proud na vodiči, což způsobí zvýšení výkonu na vodiči a budeme zbytečně ztrácet více energie. Všimněme si také, že ve vztahu výkonu vodiče figuruje proud s druhou mocninou. Pokud bychom zvětšili proud na spotřebiči 2krát, zvýší se nám celková ztráta energie dokonce 4krát.

### Odpor vodiče

Otázkou však zůstává: proč se nepoužívá jen jedna úroveň vysokého napětí, ale je jich více? A proč vidáme tlustší kabely na stožárech s vyšším napětím? Odpovědí na obě tyto otázky je odpor vodiče. Ten je závislý na několika vlastnostech vodiče: na délce  $l$ , průřezu  $S$  a měrném elektrickém odporu  $\rho$  ( $[\rho] = \Omega \cdot \text{m}$ ).

Čím delší budeme mít vodič, tím větším množstvím materiálu budou elektrony nuceny projít, což bude mít za následek vyšší odpor. Odpor  $R$  tedy bude lineárně záviset na délce. Obdobně je na tom měrný elektrický odpor: čím vyšší bude, tím vyšší bude výsledný odpor, takže  $R$  je přímo úměrné  $\rho$ . Nakonec, čím větší plochu elektronům poskytneme pro prostup, tím lépe budou procházet. Na rozdíl od  $l$  a  $\rho$  je  $R$  nepřímo úměrné  $S$ . Tímto dostáváme vztah pro odpor vodiče

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Můžeme vidět, že čím delší vodič, tím vyšší odpor, tedy bychom při přenosu energie měli vyšší ztráty. Abychom tedy při přenosu na delší vzdálenosti snížili ztráty, zvýšíme napětí (čímž snížíme proud) a zvětšíme průřez. Bohužel s rostoucím napětím roste i cena vybudování dané infrastruktury. Proto není využito jen jedno napětí, ale pokud je to možné, použije se napětí nižší, hlavně pokud nepřenášíme energii na velkou vzdálenost. Proto úroveň 400 kV je používána pro páteřní spoje, úroveň 220 kV pro spojení menšího významu a 110 kV pro lokální distribuci elektrické energie.<sup>4</sup>

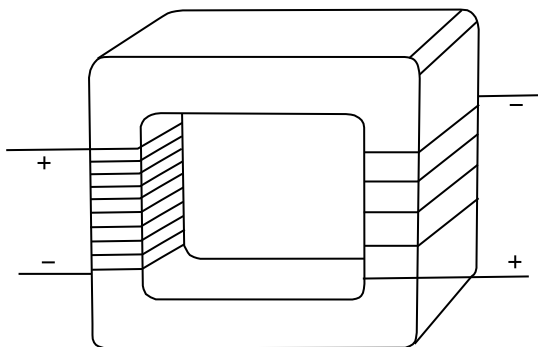
<sup>4</sup><https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/elektrizacni-soustava-cr.png>

## Transformátory

Ke změně hodnoty napětí nám slouží transformátory. Zařízení fungují na principu takzvané elektromagnetické indukce. Využívá dvou základních poznatků o interakci elektrického a magnetického pole:

1. Spolu s elektrickým polem vzniká pole magnetické reagující na jeho změny. Se střídavým proudem proto vzniká proměnné magnetické pole, zatímco se stejnosměrným neproměnné.
2. Nachází-li se (uzavřená) vodivá cívka v proměnném magnetickém poli, začne jí procházet střídavý elektrický proud.

Transformátor má jádro ve tvaru „U“ tvořené kovovými pláty z feromagnetického<sup>5</sup> materiálu zesilujícího indukované magnetické pole. Na něm jsou namotány navzájem elektricky izolované cívky. Takzvanou primární cívku prochází původní střídavý proud a vyvolává nestacionární magnetické pole. Proto začne sekundární cívku, zapojenou v druhém obvodu, procházet střídavý elektrický proud.



Obr. 1: Jádro transformátoru

Poměr napětí na cívkách v případě ideálního transformátoru přímo odpovídá poměru počtu závitů cívky. Vztah vychází z Faradayova<sup>6</sup> indukčního zákona, ten však přesahuje rámec Výfučtení:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

$U_1$  je napětí a  $N_1$  počet závitů na primární cívce,  $U_2$  a  $N_2$  totéž pro sekundární cívku.

Ve skutečných transformátorech ale dochází různými cestami ke ztrátám. Energie se přeměňuje na teplo, zajišťuje změnu polů feromagnetického materiálu atd. Přesto se účinnost většiny transformátorů pohybuje nad hranicí 85 % a u moderních dosahují ztráty dokonce jen desetiny procenta. Transformátory stavěné pro rozvod energie z elektráren mají rozměry až několik metrů. Zařízení se však využívají i v daleko menší podobě pro operování s nižšími hodnotami napětí. Najdeme je například v zástrčkách, nabíjecích kabelech či v domácích spotřebičích v blízkosti vody. Zde napětí snižují z důvodu nízké spotřeby, ale také kvůli bezpečnosti.

<sup>5</sup>Feromagnetický materiál je ten, na kterém dobře drží magnety, protože se v blízkosti magnetického pole zmagnetizuje, sám o sobě však magnetický není.

<sup>6</sup>Pokud se chcete o Michaelu Faradayovi dozvědět více, doporučujeme Výfučtení 5. série 8. ročníku. [https://vyfuk.org/\\_media/ulohy/r8/vyfucteni/vyfucteni\\_5.pdf](https://vyfuk.org/_media/ulohy/r8/vyfucteni/vyfucteni_5.pdf)

## *Nebezpečí vysokého napětí*

Lidské tělo není izolant, a proto může dojít k úrazu elektrickým proudem. Míru vážnosti pak významně ovlivňuje druh proudu, jeho intenzita, napětí a doba vystavení. V klasických evropských zásuvkách je napětí 230 V, což je pro nás při dotyku již smrtelné. U vyšších napětových hodnot může proud při zkratu „přeskočit“ vzdálenost několika centimetrů a zapojit tělo do elektrického obvodu. (Jev způsobuje tzv. obloukový výboj, o kterém se můžete dočíst v sekci Výboje.)

U vedení vysokého napětí nemusí ani dojít k průchodu proudu tělem, protože negativně působí i pobyt v silném elektrickém poli. Z toho důvodu se v okolí vedení vysokého napětí, elektrických stanic a výroben elektřiny zavádějí ochranná pásma délky jednotek až nižších desítek metrů.

## *Nebezpečí na životě*

Jako horní hranice bezpečných hodnot proudu se udává 3,5 mA pro střídavý a 10 mA pro stejnosměrný proud. Pro bezpečné napětí pak platí meze 50 V pro střídavé a 120 V pro stejnosměrné, dříve zmíněné rozmezí velmi nízkého napětí. U vyšších hodnot nastávají křeče a může dojít k ochrnutí, přerušeni krevního oběhu, narušení srdečního rytmu či k úplné zástavě srdce.

## *Výboje*

Riziko se pojí i s elektrickými výboji. V plynech s velkou kinetickou energií částic si molekuly a atomy srážkami vytrhávají elektrony, čímž získají náboj a ztrácí elektrickou neutralitu. Může tedy dojít k přenosu elektrického náboje, což pozorujeme jako elektrický výboj doprovázený světelným zářením.

V přírodě se s ním můžeme setkat v podobě blesku, který vzniká mezi opačně nabitými oblaky nebo oblakem a zemí. Uměle ho vyvolává Van de Graafův generátor, který nechá opačně nabít dvě kovové koule a při přiblížení mezi nimi přeskočí jiskra. Za zmínku stojí také obloukový výboj. Ten nastává, když zkratem přerušíme obvod, vzduch okolo se kvůli vysoké teplotě vedení nabije a dál pak vede proud obvodem. Tohoto principu se využívá například v zářivkách, obloukových lampách nebo při svařování.

*Adam Krška*  
adam@vyfuk.mff.cuni.cz

*Michaela Urbanová*

---

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.