

# Základy elektrických obvodů

I

## Úvod

OBVODOVÉ VELIČINY (NAPĚTÍ, PROUD, VÝKON). ZÁKLADNÍ PASIVNÍ  
A AKTIVNÍ IDEÁLNÍ OBVODOVÉ PRVKY, OHMŮV ZÁKON. ELEKTRICKÉ  
ZAŘÍZENÍ A JEHO OBVODOVÝ MODEL. CHARAKTERISTICKÉ  
HODNOTY

## Základní veličiny

### ➤ Elektrický náboj

symbol:

$Q$

jednotka:

coulomb [C], v jednotkách SI [A s]

elementární náboj:

$e \doteq 1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (náboj elektronu(-) a protonu(+))

neodstranitelná, nevytvořitelná vlastnost elementárních částic – **zákon zachování náboje**

U jakých veličin se s elektrickým nábojem setkáme?

- Elektrický proud
- Kapacita akumulátoru (např. 2700 mAh)
- Náboj akumulovaný v kapacitoru → napětí na kapacitoru, akumulovaná energie

### ➤ Elektrický proud

symbol:

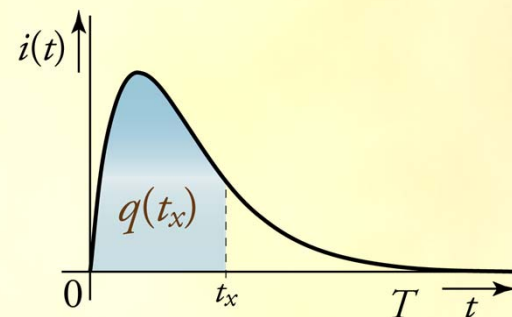
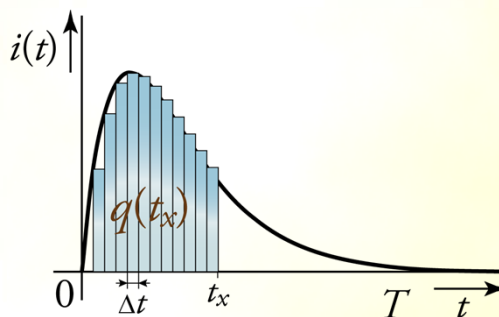
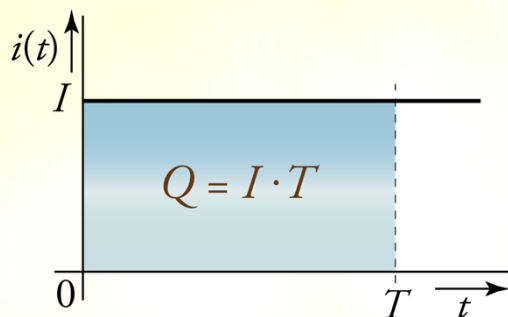
$I$

jednotka:

ampér [A]

obecně se jedná o **uspořádaný pohyb elektricky nabitých částic** – obvykle elektronů (kovy, vakuum), ale také iontů (elektrolyty, např. v akumulátorové baterii)

Je definován jako **velikost elektrického náboje, přeneseného za jednotku času**.



Konvence: je-li veličina konstantní, budeme ji psát velkým písmenem, např.  $Q$ ; pokud je funkcí času, budeme ji psát malým písmenem, případně doplníme do závorky čas, např.  $q(t)$

Náboj, přenesený konstantním elektrickým proudem  $I$  za dobu  $t$ :  $Q = I \cdot t$

Pokud se ale bude elektrický proud v čase měnit, pak:  $q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau$

**Fyzikální analogie:** elektrický proud si můžeme představit jako průtok vody, náboj jako celkové množství (hmotnost) vody, která protekla vodičem (potrubím)

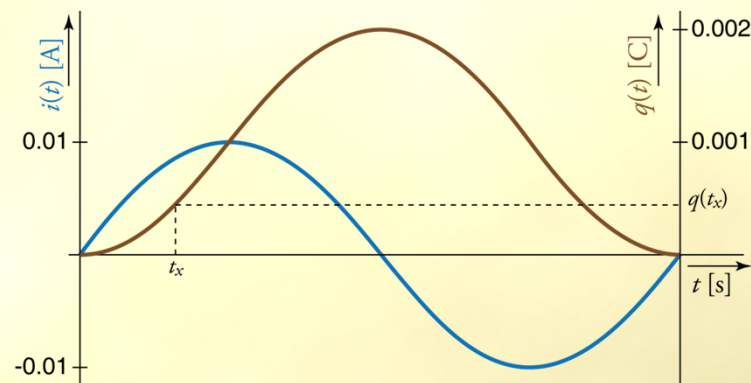
### Příklad

Časový průběh proudu je definován vztahem  $i(t) = 0.1 \sin(100t)$ .

- Vypočítejte náboj, přenesený za dobu  $t_x = 10$  ms.
- Vyjádřete obecně náboj, přenesený za dobu  $t$ .

$$\begin{aligned} q(0.01) &= \int_0^{0.01} 0.1 \sin(100t) dt = \left[ \frac{-0.1 \cos(100t)}{100} \right]_0^{0.01} = \\ &= 0.01 [-\cos(100 \cdot 0.01) + \cos(0)] \doteq \underline{\underline{459.7 \mu\text{C}}}. \end{aligned}$$

$$q(t) = \int_0^t 0.1 \sin(100\tau) d\tau = \left[ \frac{-0.1 \cos(100\tau)}{100} \right]_0^t = 0.001 [1 - \cos(100t)] \text{ C}.$$

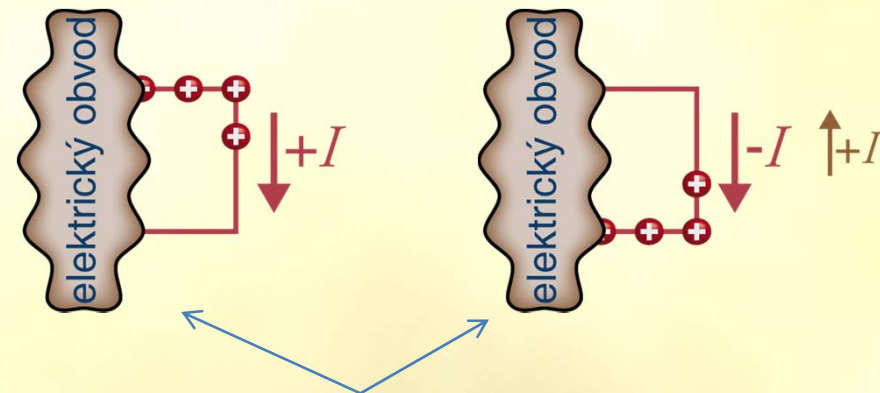
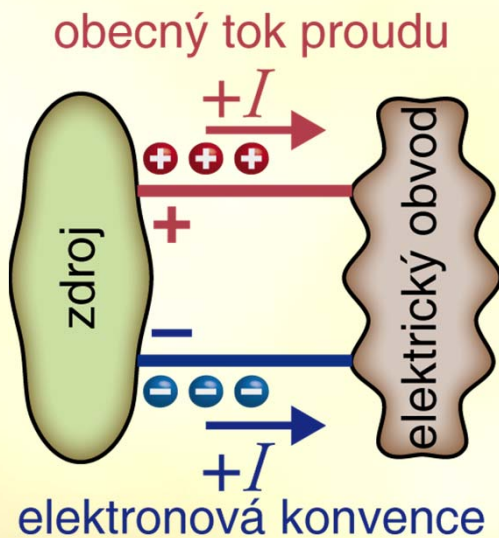


## Konvence

- Uvažujme zařízení, které je schopné dodávat do zbytku elektrického obvodu elektrický náboj (a tedy elektrický proud) – zdroj elektrického proudu
- Body, mezi kterými bude proudit elektrický náboj, rozlišené symboly + a – : svorky
- S výjimkou kladně nabitých iontů v elektrolytech přenáší elektrický náboj záporně nabitě elektrony

👉 **Elektronová konvence:** elektrony jako nosič elektrického náboje vytékají ze záporné svorky zdroje a navracejí se zpět do kladné svorky – **v ČR se běžně nepoužívá** (*anglická literatura electron current flow*)

👉 **Obecný tok proudu:** **kladný proud vytéká z kladné svorky zdroje** – **v ČR používaná konvence** (*anglická literatura conventional current flow*)

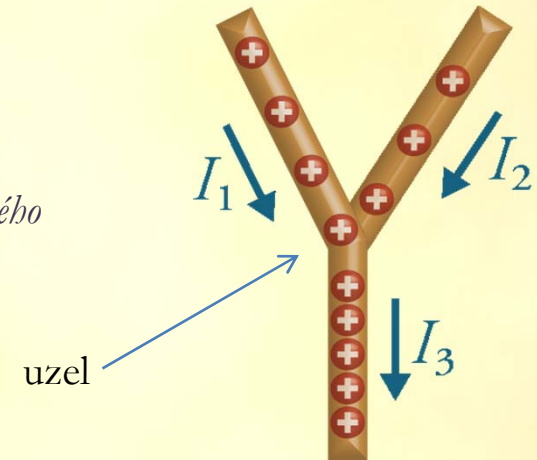


Kladný vyznačený směr proudu odpovídá směru toku náboje

1. Kirchhoffův zákon:  $\sum_{k=1}^n i_k = 0$

*Podle vodní fyzikální analogie – stejný objem (hmotnost) vody, který vteče do uzavřeného objemu (plného vody, samozřejmě), musí z tohoto uzavřeného objemu vytéct ven*

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad \rightarrow \quad -(I_1 + I_2) + I_3 = 0$$



**Konvence:**

- Proud **vtékající** do uzlu má znaménko **záporné**
- Proud **vytékající** z uzlu má znaménko **kladné**

Poznámky (pro informaci, ne ke zkoušce):

- Rychlost uspořádaného pohybu nabitých částic: v  $1 \text{ m}^3$  mědi je  $8.5 \cdot 10^{28}$  atomů, v  $1 \text{ mm}^3$  je tedy náboj  $13.617 \text{ C}$  ve formě volných elektronů; pokud vodičem o průřezu  $1 \text{ mm}^2$  protéká proud  $1 \text{ A}$ , pak se za  $1 \text{ s}$  musí tímto průřezem přesunout cca  $1/13$  volných nosičů z tohoto objemu – rychlost uspořádaného pohybu pak bude cca  $75 \text{ } \mu\text{m/s}$ !
- Jak je možné, že rychlost elektriny je mnohem vyšší? – Každý pohybující se elektrický náboj vytváří magnetické pole, mezi náboji je elektrické pole – tímto „nosičem“ je elektromagnetické pole...
- Vedení elektrického proudu v dielektriku – elektrická indukce.

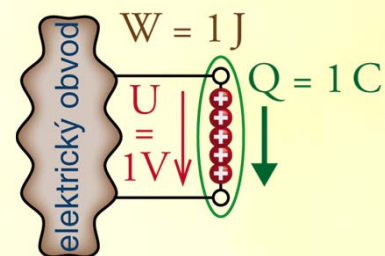


## ➤ Elektrické napětí

symbol:

jednotka:

$U$   
volt [V]



Skalární veličina, určuje práci  $W$ , která je nutná k přemístění jednotkového náboje  $Q$  po (libovolné) dráze z bodu A do bodu B

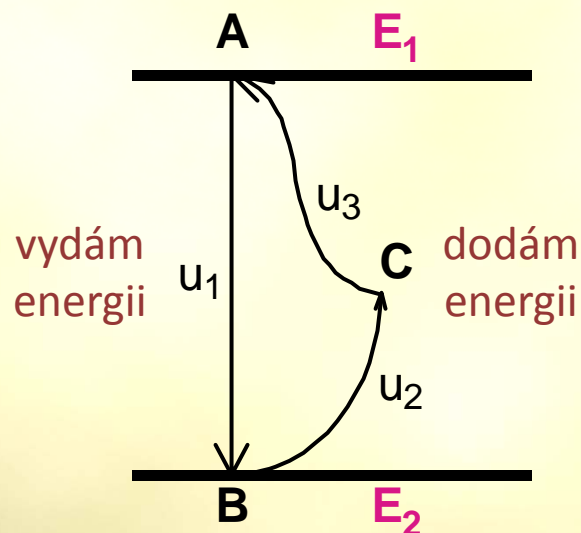
$$U_{AB} = \frac{W}{Q}$$

**Rozdíl elektrických potenciálů, nenulové elektrické napětí je příčinou elektrického proudu**

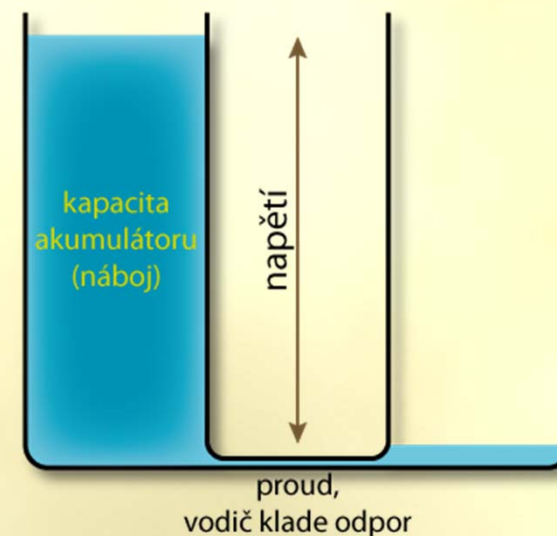
***Fyzikální analogie:**  $\propto$  analogie silového působení si můžeme intenzitu elektrického pole představit jako tíhové zrychlení, elektrický potenciál jako nadmořskou výšku a elektrické napětí jako rozdíl nadmořských výšek*

## 2. Kirchhoffův zákon (napět'ový)

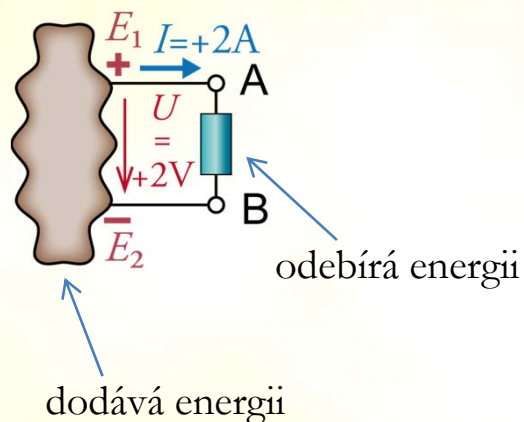
$$\sum_{k=1}^n u_k = 0$$



## Fyzikální analogie akumulátoru

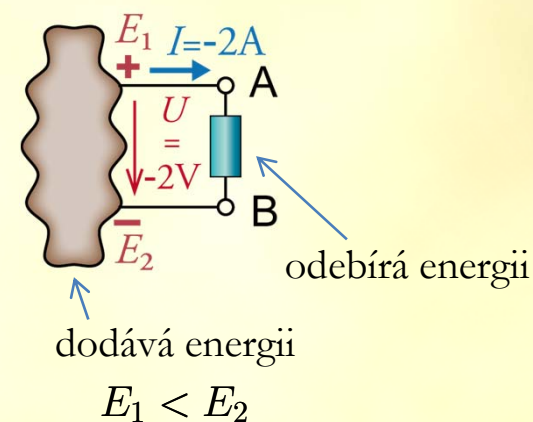
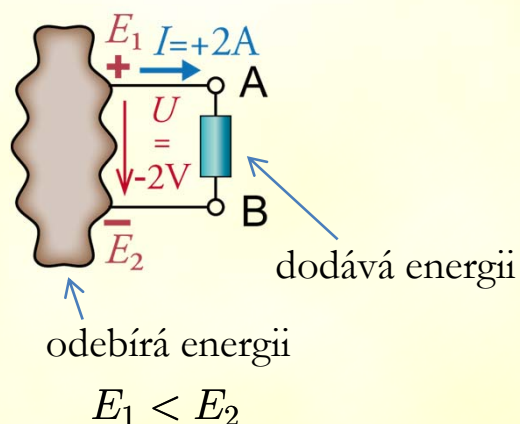
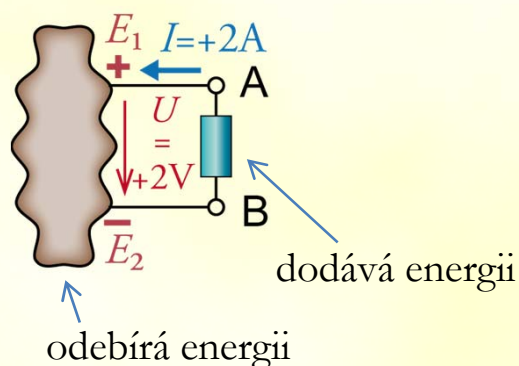


## Konvence



$$E_1 > E_2 \rightarrow \text{kladné napětí od } + \text{ k } -$$

- („kladný“) náboj teče ze svorky, označené +, do svorky –
- každou sekundu proteče náboj 2 C, vzhledem k napětí 2 V vykoná každý 1 Coulomb každou sekundu práci 2 J
- obvod nalevo **dodá** každou sekundu **práci** 4 J  $\Rightarrow$  chová se jako **zdroj**
- obvod napravo **spotřebuje** každou sekundu 4 J  $\Rightarrow$  chová se jako **spotřebič**





## ➤ Výkon

symbol:

$P$

jednotka:

Watt [W]

Práce 1 J vykonaná za dobu 1 s

Okamžitý výkon

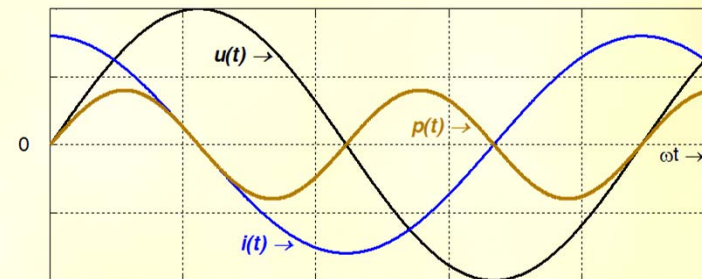
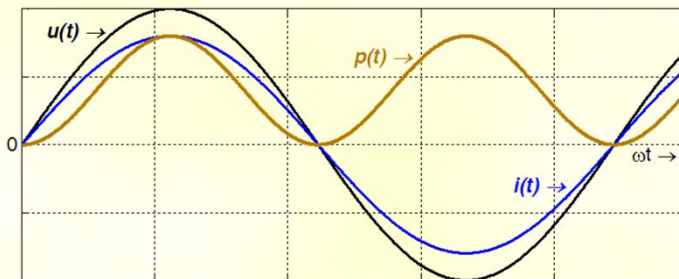
$$p(t) = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = u(t)i(t)$$

Pokud se napětí, ani proud nemění

$$P = UI$$

Pokud se napětí a / nebo proud mění (a změny jsou periodické)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

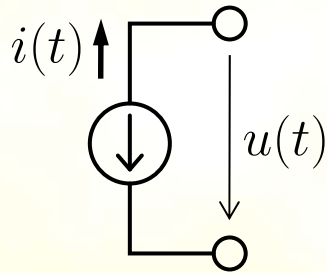


- Okamžitý výkon může mít kladné i záporné znaménko, v závislosti na okamžité hodnotě napětí a proudu
- Znaménko okamžitého výkonu u střídavých průběhů tedy závisí na fázovém posunu mezi napětím a proudem
- Střední hodnota výkonu okamžitého výkonu odpovídá energii, která je každou sekundu dodána ze zdroje do spotřebiče a nevratně přeměněna na jiný druh energie (teplo...).

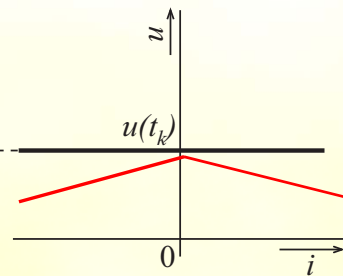
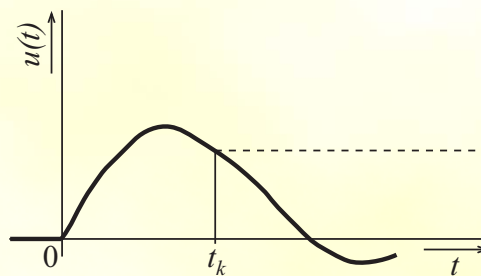
- Pokud bychom používali pouze spotřebičovou konvenci, pak:
  - Spotřebovaný výkon má kladné znaménko
  - Dodaný výkon má záporné znaménko
  - Součet dodaných a spotřebovaných výkonů je 0 (Tellegenův teorém)
- Při zdrojové orientaci jsou znaménka opačná
  - V Evropě používáme obě konvence – spotřebičovou pro pasivní prvky, a zdrojovou pro aktivní ☹
  - Potom je součet výkonů, dodaný zdroji roven součtu výkonů, odebraných spotřebiči (*/modifikovaný/* Tellegenův teorém)
  - Záporný výkon při zdrojové konvenci? Zdroj se chová jako spotřebič.

# Základní aktivní prvky elektrických obvodů

## Ideální zdroj napětí



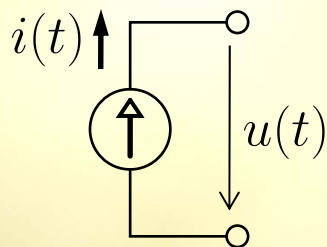
- Udržuje na svých svorkách napětí s daným časovým průběhem
- Je schopen dodat (nebo dokonce přijmout) libovolný proud, i nekonečně velký, tak, aby v závislosti na zátěži zachoval na svých svorkách konstantní napětí
- Je schopen dodat nekonečný výkon



Velikost elektrického napětí na svorkách ideálního zdroje se samozřejmě může v čase měnit; pokud by zdroj nebyl ideální, pak by elektrické napětí mezi svorkami kolísalo s měnící se zátěží

Neideální zdroj napětí

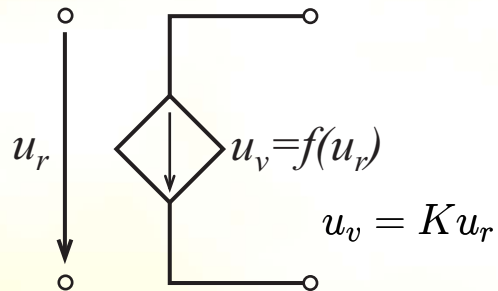
## Ideální zdroj proudu



- Udržuje mezi svými svorkami elektrický proud s daným časovým průběhem
- Na svých svorkách mění napětí úměrně připojené zátěži tak, aby protékající proud byl konstantní – napětí na svorkách může být nekonečně velké
- Je schopen dodat nekonečný výkon

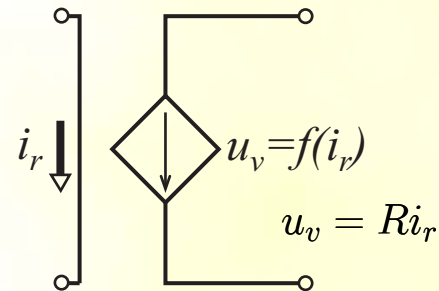
## Lineární řízené prvky elektrických obvodů

Řídící veličina - napětí



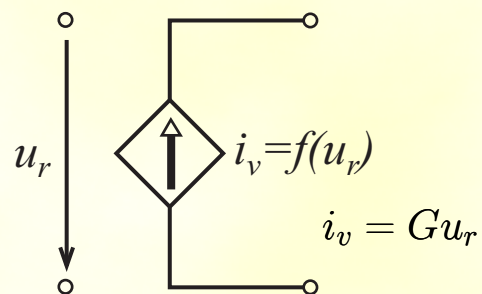
$K (A, \dots)$  napět'ové zesílení  
bezrozměrná veličina

Řídící veličina - proud

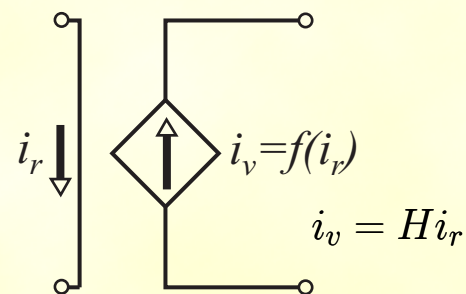


$R (Z, \dots)$  transrezistance  
rozměr odporu

Řízená veličina - napětí

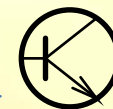


$K (G, \dots)$  transkonduktance  
rozměr vodivost



$H (\alpha, \beta, \dots)$  proudový zesilovací činitel  
bezrozměrná veličina

Řízená veličina - proud



S příslušným řízeným zdrojem se setkáme např. u tohoto obvodového prvku (tranzistoru)

## Příklad

- Automobil je vybaven startovacím akumulátorem s kapacitou  $C = 50 \text{ Ah}$ , napětí akumulátoru je  $U = 12 \text{ V}$
- Elektromobil je vybaven soustavou akumulátorů s kapacitou  $C = 2 \text{ Ah}$ , napětí je  $U = 400 \text{ V}$

? Který akumulátor je schopen dodat více energie? (pro zjednodušení budeme akumulátor považovat za ideální zdroj konstantního napětí, bez teplotních či jiných závislostí)

$$Q_1 = C_1 \cdot t = 50 \cdot 3600 = 180\,000 \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 \cdot t = 2 \cdot 3600 = 7\,200 \text{ C}$$

... ve druhém akumulátor je uložen mnohem menší náboj ...

$$W_1 = Q_1 \cdot U_1 = 180\,000 \cdot 12 = 2.16 \text{ MJ}$$

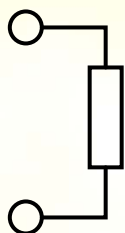
$$W_2 = Q_2 \cdot U_2 = 7\,200 \cdot 400 = 2.88 \text{ MJ}$$

... ale vzhledem k většímu napětí dodá více energie ...





## Základní pasivní prvky elektrických obvodů



R – rezistor (součástka); Ohmův zákon

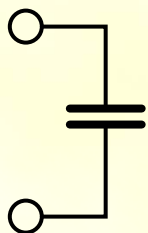
$$u = Ri$$

Výkon – teplo, které se (nevratně) rozptýlí na rezistoru za dobu 1 s

$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$$

Je to **nesetrvačný prvek**, protože ve vztahu mezi napětím a proudem nevystupuje čas

R (vlastnost) – elektrický odpor v  $\Omega$  je konstantou úměrnosti



C – kapacitor, akumuluje elektrický náboj.

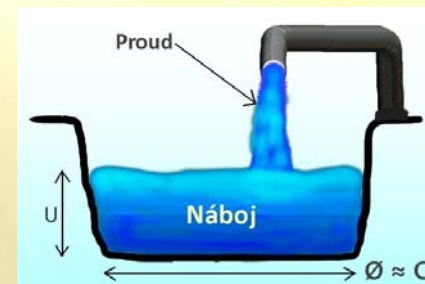
Ten musí být do kapacitoru dodán protékajícím elektrickým proudem – a to probíhá v určitém čase (*představte si opět naši „vodní“ fyzikální analogii*).

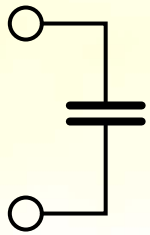
Ve vztahu mezi napětím a proudem proto musí vystupovat čas, jedná se o **prvek setrvačný**.

$$Q = Cu, \quad C = \frac{Q}{u}, \quad u = \frac{Q}{C}$$

Pokud je proud, dodávající náboj do kapacitoru konstantní, (a za předpokladu, že v kondenzátoru nebyl na začátku nabíjení uložen žádný náboj), pak

$$u(t) = \frac{I \cdot t}{C}$$





Pokud se ale proud, tekoucí do kapacitoru bude měnit, pak musíme k výpočtu použít integrál  
Náboj v čase  $t$  (za předpokladu, že na začátku již byl v kapacitoru uložený náboj  $q(0)$ )

$$q(t) = \int_0^t i(\tau) d\tau + q(0)$$

Takže napětí bude

$$u(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau + u_c(0)$$

Naopak, do kapacitoru vtéká proud pouze tehdy, když se na jeho svorkách mění napětí

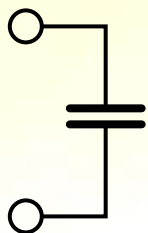
$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}$$

Co se stane, když ke kapacitoru připojíme zdroj stejnosměrného napětí?

⇒ napětí na kapacitoru se vyrovná s napětím zdroje – ten musí dodat elektrický náboj (a to určitou dobu trvá) – tvrzení, že kapacitor se ve stejnosměrném obvodu chová jako rozpojený obvod, platí, ale až za určitou dobu (po vyrovnání napětí); ve druhé polovině semestru budeme toto nabíjení počítat, budeme ho nazývat přechodným dějem

Co se stane, když ke kapacitoru připojíme ideální zdroj stejnosměrného proudu?

⇒ Zdroj proudu dodává konstantní proud, akumulovaný elektrický náboj proto neustále roste, a proto neustále roste i elektrické napětí (*rychleji, nežli při napájení ze zdroje napětí, praktické využití např. USB 2.0*) – teoreticky donekonečna; tvrzení, že se kapacitor ve stejnosměrném obvodu chová jako rozpojený obvod, zde neplatí vůbec



Kapacitor je prvek, který akumuluje energii

$$W_c = \frac{1}{2}CU^2$$

Poznámka

*I zde se v energii ukryvá vzorec pro výkon:*

$$\begin{aligned} W_e(t) &= A(t) = \int_0^t u(\tau)i(\tau)d\tau = \int_0^{q(t)} u(q)dq \\ &= \int_0^{q(t)} \frac{q}{C}dq = \frac{1}{2C}q^2(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) \end{aligned}$$

Buzení střídavým proudem:

$$i(t) = I_m \sin \omega t$$

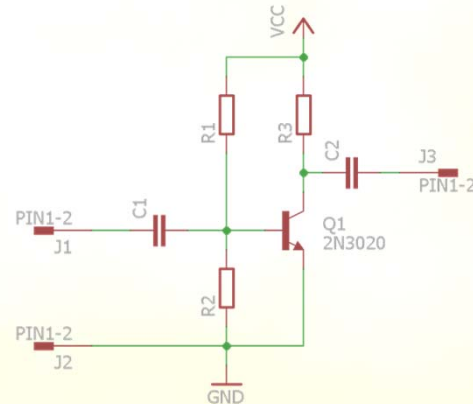
$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_m \sin \omega \tau \, d\tau + u_c(0) =$$

$$= \frac{I_m}{\omega C} (1 - \cos \omega t) + u_c(0) = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) + \frac{I_m}{\omega C} + u_c(0)$$

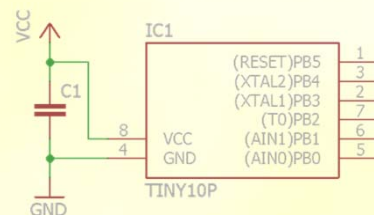
- Amplituda **harmonického** napětí je úměrná amplitudě proudu podle:  $\frac{1}{\omega C}$
- Můžeme psát vztah:  $U_c = X_c I_c$ 
  - Kde  $U_c$  je amplituda napětí,  $I_c$  je amplituda proudu a  $X_c$  je reaktance – výše uvedený člen
  - Formálně se jedná o Ohmův zákon
  - Nicméně, reaktance je frekvenčně závislá. Na nízkých frekvencích se kapacitor chová jako rozpojený obvod, zatímco na vysokých jako zkrat.
- Výše uvedený vztah nezohledňuje fázový posun a je platný pouze pro samotný kapacitor!!!

## Aplikace:

- **Vstupní oddělovací kondenzátor (input coupling capacitor):** protože pro stejnosměrný proud se kapacitor chová jako rozpojený obvod, a jako (téměř) zkrat pro vysoké frekvence, můžeme kapacitorem oddělit části obvodu, které pracují s různou úrovní stejnosměrného napětí. Kapacitor propustí pouze střídavý proud.

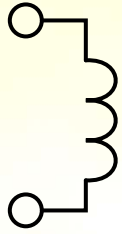


- **Blokovací kondenzátor (decoupling capacitor):** Je zapojen mezi (a co nejblíže k) napájecím svorkám integrovaných obvodů. Zkratuje vf proud, který vzniká v IO a zabraňuje jeho šíření do dalších částí obvodu. Typická kapacita je 100 nF a je kombinována s kondenzátory o vyšší kapacitě, které vyrovnávají proudové špičky odběru.



- **Ukládání energie (energy reservoirs)** – slouží jako dočasný zdroj energie (vyhlazování proudových špiček, pulsujícího napětí v usměrňovačích apod.).
- **Spínané kapacitory** – nahrazují rezistory v integrovaných frekvenčních filtrech, zdvojovače napětí...
- **Frekvenční filtry** – bude vysvětleno později (frekvenční charakteristiky) a v dalších předmětech.





L – induktor (idealizovaný model), v praxi realizovaný cívkou

Proud procházející induktorem vytváří magnetický tok, ve kterém je uložena energie. Rovněž vznik magnetického toku je setrvačný děj (v reálném obvodu nemůžeme uloženou energii dodat do induktoru za nekonečně krátkou dobu).

Vztah mezi magnetickým tokem a proudem je popsán rovnicí

$$\Phi = L \cdot i, \quad i = \frac{\Phi}{L}, \quad L = \frac{\Phi}{i}$$

Kde  $\Phi$  je magnetický tok ve Weberch [Wb] a

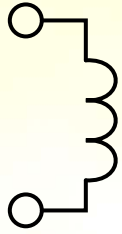
L indukčnost v Henry [H]

**Fyzikální analogie:** pokud stále zůstaneme u vodní analogie, pak si můžeme indukčnost představit jako moment setrvačnosti vodní turbíny

I z fyzikální analogie roztočené vodní turbíny je zřejmé, že se induktor brání změnám proudu – při změně připojeného odporu (odpojení zdroje) změni napětí na svých svorkách tak, aby vnutil ostatním prvkům v obvodu elektrický proud, který jím momentálně protéká; toto napětí může být (teoreticky) nekonečně velké; vzhledem k tomu, že akumulovaná energie není nekonečně velká, bude napětí i proud v případě odpojení zdroje postupně klesat

I když cívkou protéká magnetický tok, pokud se magnetické pole nemění, není na jejích svorkách žádné elektrické napětí. Teprve při změně magnetického pole (třeba alternátor v automobilu, nebo generátor v elektrárně) se na svorkách objeví elektrické napětí

$$u = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad \text{resp. } u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad \rightarrow \quad u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$



Velmi často nás naopak zajímá, jaký proud teče induktorem, pokud k němu připojíme zdroj napětí. V tom případě musíme samozřejmě integrovat. Navíc, již před připojením (resp. změnou) napětí na svorkách induktoru mohl induktorem protékat určitý magnetický tok, resp. jemu odpovídající proud  $i_L(0)$ , takže

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(\tau) d\tau + i_L(0)$$

Co se stane, když na svorky induktoru připojíme zdroj stejnosměrného napětí?

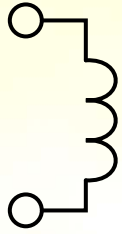
⇒ Základní poučka nám říká, že ve stejnosměrném obvodu se (ideální) induktor chová jako zkrat. ALE:

$$U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad \text{je konstanta}$$

takže proud induktorem lineárně roste (*praktické využití v měničích napětí a spínaných zdrojích*), v případě ideálního zdroje napětí a ideálního induktoru roste donekonečna – induktor se chová jako zkrat až za nekonečně dlouhou dobu,

$$I = \frac{Ut}{L}$$

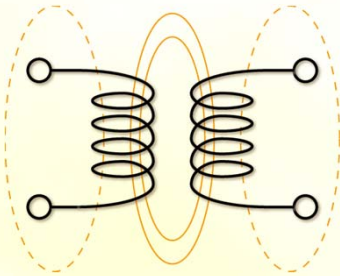
⇒ V případě, kdy mezi zdroj napětí a induktor zapojíme rezistor, bude maximální proud limitovaný odporem rezistoru, a induktor se po jisté době začne chovat jako zkrat...  
(Tuto nutnou dobu budeme opět studovat v kapitole přechodné jevy)



Vzhledem k protékajícímu magnetickému toku i induktor akumuluje energii,

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2$$

### Vázané induktory



Pokud dvě nebo více cívek geometricky uspořádáme tak, že indukční tok, generovaný průtokem proudu jednou cívkou, proniká do druhé cívky, objeví se na svorkách této vázané cívky (v případě časových změn indukčního toku) indukované napětí

*Napětí na svorkách jedné cívky pak ovlivňuje jak proud, tekoucí touto cívkou, tak proud, tekoucí cívkou vázanou*

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt}$$

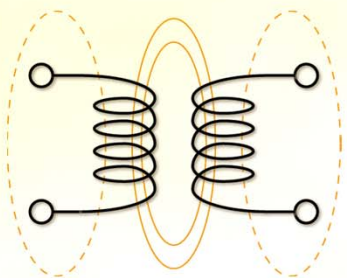
$$u_2(t) = L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt}$$

*Praktickým příkladem vázaných induktorů je transformátor. Obecné výpočty jsou často nahrazeny náhradními modely a návrhovými vzorci (a dále se týkají především silnoproudých oborů).*

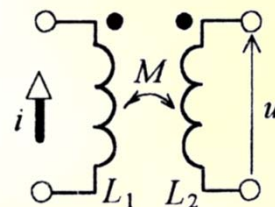
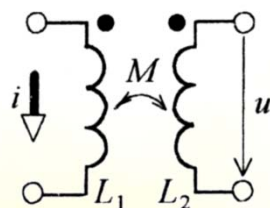
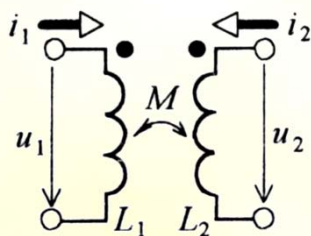
Poznámka – inverzní vzorce, vyjadřující proud z napětí:

$$i_1(t) = i_1(0_+) + \Gamma_1 \int_0^t u_1(\tau) d\tau + \Gamma_M \int_0^t u_2(\tau) d\tau \quad i_2(t) = i_2(0_+) + \Gamma_2 \int_0^t u_2(\tau) d\tau + \Gamma_M \int_0^t u_1(\tau) d\tau$$

$$\Gamma_1 = \frac{L_2}{L_1 L_2 - M^2}, \quad \Gamma_2 = \frac{L_1}{L_1 L_2 - M^2}, \quad \Gamma_M = \frac{-M}{L_1 L_2 - M^2} \quad M = \kappa \sqrt{L_1 L_2}, \quad \kappa \in \langle 0, 1 \rangle$$

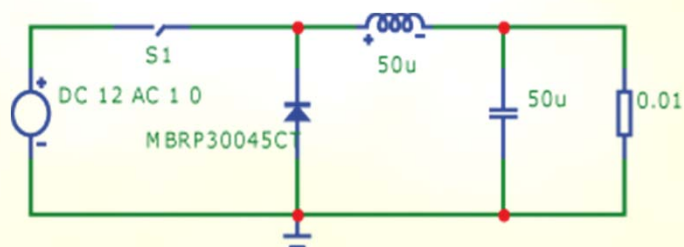


Pokud jednu z cívek otočíme, obrátí se směr protékajícího indukčního toku, takže se mění znaménka proudů, resp. napětí. U těchto cívek proto musí být vyznačen začátek a konec vinutí (ve schématech se rozlišují tečkou).



Aplikace:

- **Transformátory** – Snižují či zvyšují amplitudu střídavého napětí. Mohou rovněž měnit velikost impedance mezi svými svorkami. Konstrukčně se jedná o dva nebo více vázaných induktorů se společným magnetickým tokem.
- **Spínané zdroje** – mění velikost stejnosměrného napětí. Udržují konstantní střední hodnotu proudu, protékajícího cívkou.



- **Zdroje (regulátory) konstantního proudu pro LED** – pracují na stejném principu jako spínané zdroje, LED jsou obvykle zapojeny do série s induktorem.
- **Frekvenční filtry**



# Základní definice a pojmy

## ➤ Elektrické zařízení

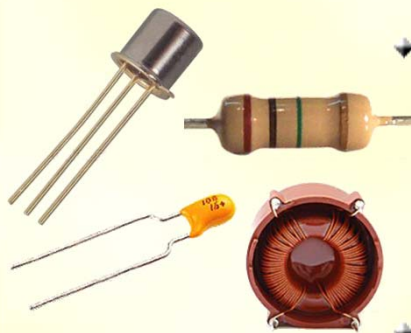
(Definice: jakékoliv zařízení užívané k výrobě, přeměně, přenosu, rozvodu nebo užití elektrické energie, jako jsou elektrické stroje, transformátory, přístroje včetně měřicích, ochranná zařízení, příslušenství systému rozvodu, spotřebiče)



- Jedná se tedy o skutečnou fyzickou realizaci zařízení
- Zařízení se stejnou funkcí může být realizováno různými způsoby
- Konkrétní elektrické zařízení může být matematicky popsáno a jeho funkce analyzována různými způsoby
- *Teoreticky bychom hledali popis pomocí Maxwellových rovnic doplněných tzv. okrajovými podmínkami, prakticky – příliš složité...*

## ➤ Elektrický obvod

- Obecně je vodivým spojením elektrických prvků (odporů, kondenzátorů, cívek, tranzistorů, ...)
- Z hlediska dalšího popisu za účelem analýzy elektrických zařízení budeme elektrický obvod považovat za idealizovaný model, tvořený propojením ideálních elektrických součástek



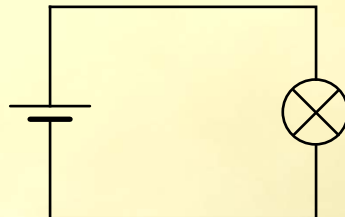
## ➤ Obvodové schéma

Grafické zobrazení elektrického obvodu smluvenými značkami (může se jednat i o blokové schéma)

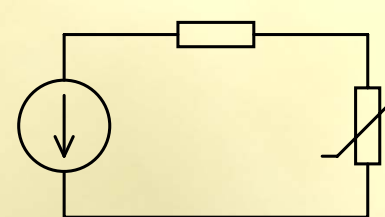
Elektrické zařízení



Obvodové schéma - funkční



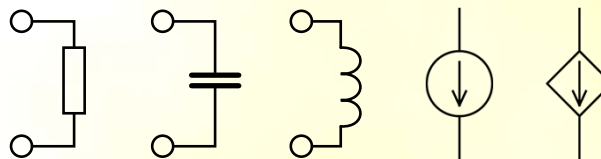
Obvodové schéma



## ➤ Prvky elektrických obvodů

**Idealizované součástky**, které spolu tvoří **náhradní elektrický obvod**, a které reprezentují schopnost omezit elektrický proud, akumulovat energii ve formě elektrického či magnetického pole, regulovat velikost proudu či napětí, ...

- Pasivní (rezistor, kapacitor, induktor)
- Aktivní (ideální zdroj napětí, proudu)

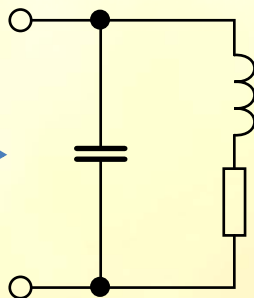
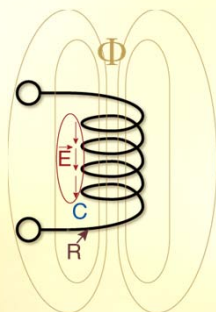


## ➤ Obvodový model elektrického zařízení

- **Kombinace elementárních prvků** elektrických obvodů se snaží popsat vlastnosti skutečného elektrického zařízení (nikdy je nepopíše dokonale)
- **Jedno elektrické zařízení je popsáno různými modely**
  - Každý model popisuje dané zařízení s přijatelnou přesností pro určité specifikované podmínky použití

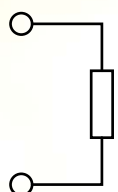
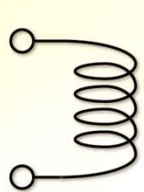
**Odpor, kondenzátor, cívka – elementární elektrická zařízení** (všechny vyjmenované prvky mohou více či méně vytvářet elektrické i magnetické pole, i mít elektrický odpor)

**Rezistor, kapacitor, induktor – idealizované prvky elektrického obvodu** (každý z nich vykazuje pouze jednu jedinou vlastnost)



Elektrické zařízení – cívka – je navinuta vodičem, který má elektrický odpor; mezi závity vodiče je elektrické pole, které modeluje kapacitor; cívkou teče magnetický tok, má tedy indukčnost – tu modeluje induktor, ...

## Různé obvodové modely cívky



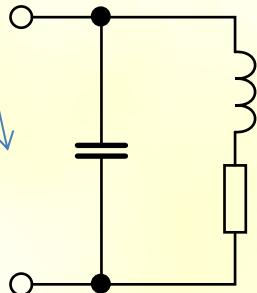
V případě, že je cívka připojena ke zdroji stejnosměrného napětí, přestane po určité době indukčnost ovlivňovat průtok elektrického proudu a elektrický proud tak bude ovlivněn pouze odporem vodiče;

*Elektromagnetické pole ale akumuluje energii a při změně napájecího napětí se projeví*

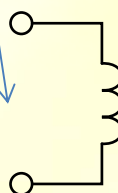


Typický model reálné cívky pro proud a napětí, které se v čase mění

*Protékající proud a elektrické napětí na svorkách cívky jsou ovlivněny jak odporem vinutí, tak indukčností cívky*



Při vysokých frekvencích přiloženého střídavého napětí se začne projevovat dosud zanedbatelná kapacita a nakonec může její vliv zcela převážit nad indukčností

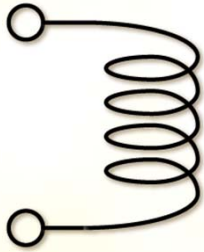


V případě, že odpor vinutí je zanedbatelně malý, zůstává pouze samotný induktor; používá se někdy v případě, že obvod analyzujeme ve velmi krátkém časovém intervalu (např. analýza měničů napětí), kdy převažuje pouze vliv indukčnosti

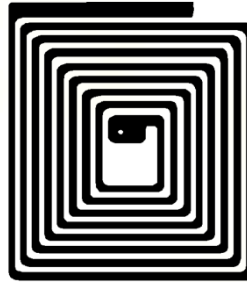
---

**Někdy je potřeba použít složitější obvodové modely, které popisují ztráty v jádře cívky a další fyzikální jevy**  
**My budeme vždy uvažovat ideální prvky**

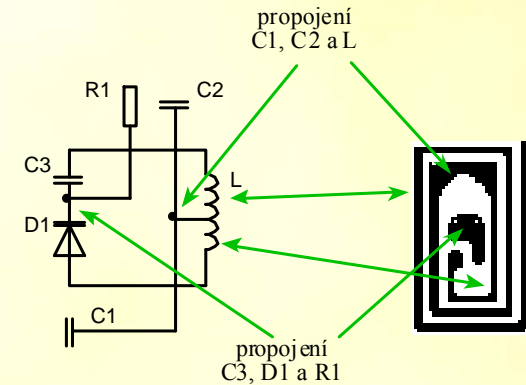
Jak již bylo uvedeno, elektrické zařízení se stejnou funkcí může být zrealizováno mnoha způsoby; studovaná cívka může být zrealizována vodičem, navinutém řadou závitů na vzduchovém, železném či feritovém jádře, nebo také jako pouhá vodivá cesta na desce plošného spoje:



Cívka jako závitů vodiče



Cívka jako vodivá cesta



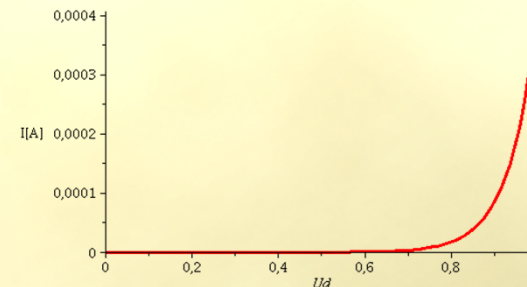
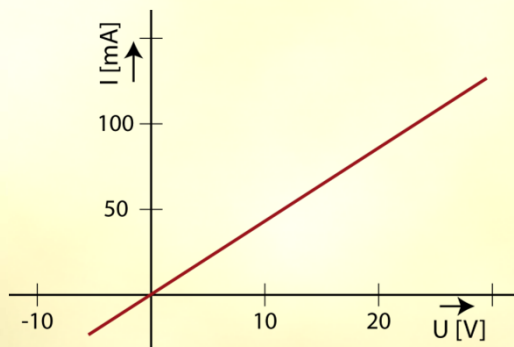
Obyčejné spojení součástek a cívka si mohou být někdy podobné (i propojky mají *parazitní* indukčnost)

### ➤ Lineární obvod

Vztah mezi obvodovými veličinami (napětí / proud, náboj, magnetický tok, ...) je lineární, dá se tedy obecně popsat vztahem  $y = Kx$  kde  $K$  je konstanta, např. tedy  $U = RI$

### ➤ Nelineární obvod

Nelineární závislost mezi obvodovými veličinami, např.  $I_D = I_S \left( e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right)$

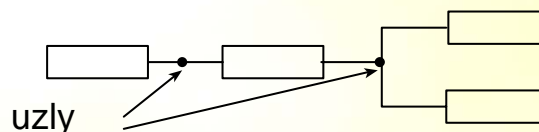




### ➤ Obvody se soustředěnými parametry

Obvod má konečný počet prvků, které jsou realizovány jako samostatné součástky (rezistory, kapacitory, induktory, ...)

- Jednotlivé ideální obvodové prvky v obvodovém schématu jsou propojeny ideálními vodiči, které nemají žádný elektrický odpor (indukčnost, kapacitu, ...) ani žádné časové zpoždění
- Propojení vodičů se zde nazývá uzly, graficky je reprezentováno tečkou



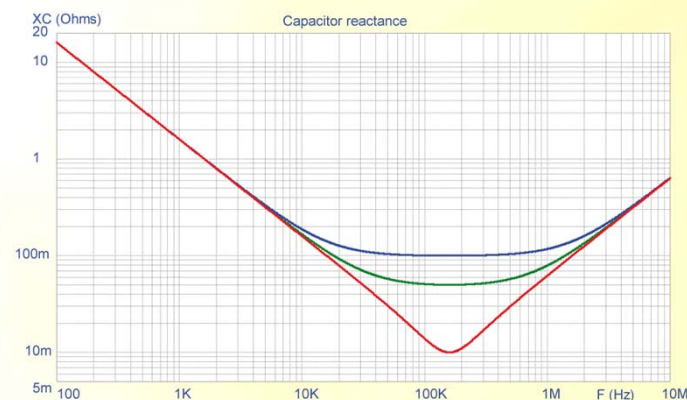
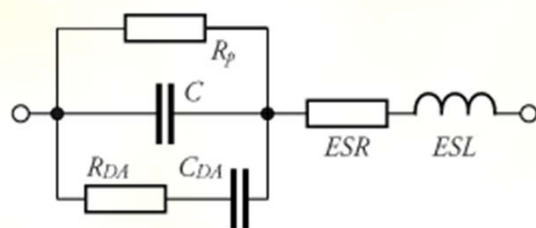
### ➤ Obvody s rozprostřenými parametry

Nejsou realizovány jako samostatné součástky (a laik je nejspíše ani nebude považovat za elektrický obvod) – příkladem je např. koaxiální kabel u TV, vodiče kroucené dvojlinky USB kabelu, nebo třeba i vodivé cesty počítačové sběrnice (nejen) na plošném spoji

- Záleží na geometrickém uspořádání vodičů
- Jednou z příčin je konečná rychlost šíření elektromagnetického vlnění
- Při odvozování rovnic mohou být (pro nekonečně malé obvodové prvky) klasické metody analýzy elektrických obvodů (se soustředěnými parametry), obecně jsou zkoumány metodami popisu elektromagnetického pole
- *Více se dozvíte v navazujících předmětech*



## ➤ Reálný kondenzátor

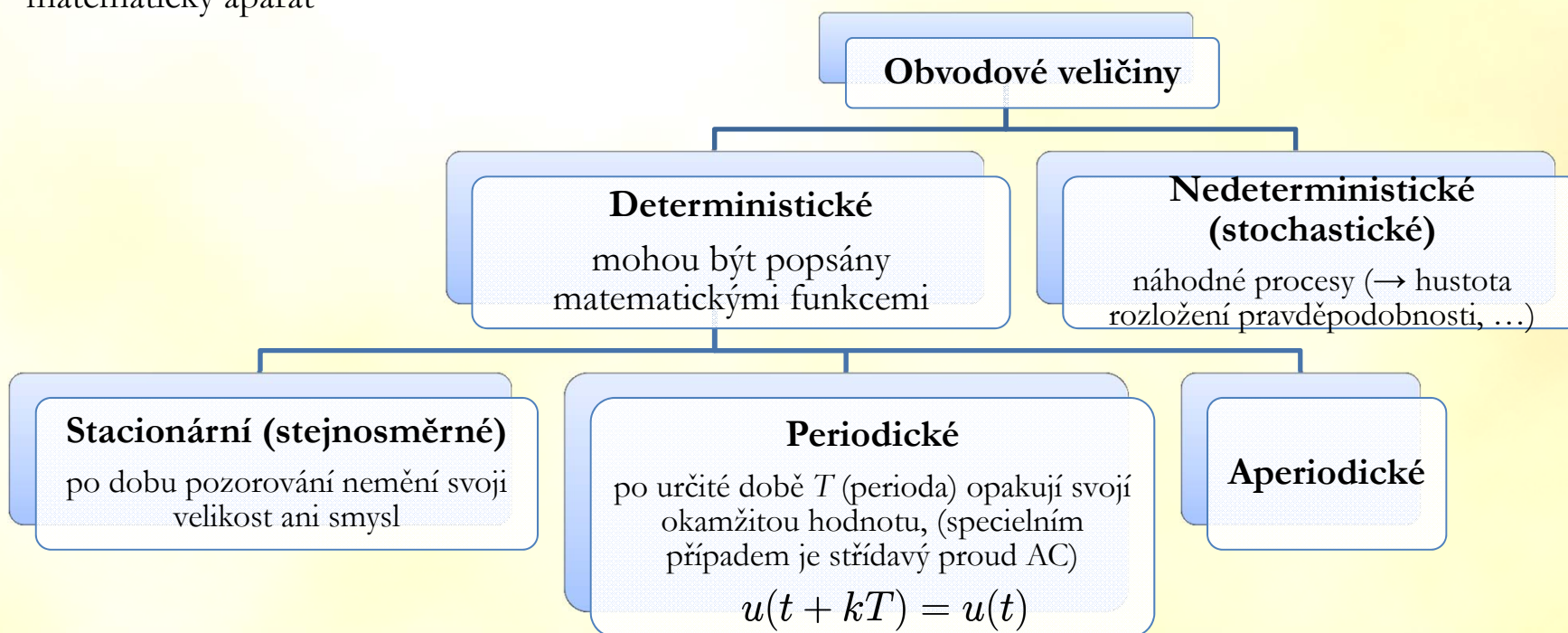


Důležité parametry:

- **ESR** – Equivalent series resistance – důležitý zejména ve spínaných zdrojích, kde kondenzátorem tečou velké proudy. Je zdrojem tepla. Keramické kondenzátory mají ESR menší jak 10 mΩ, low ESR electrolytické and tantalové menší jak 100 mΩ, hliníkové několikrát větší.
- **ESL** – equivalent series inductance – indukčnost vývodů (a desek). Na vysokých frekvencích se kondenzátor chová jako induktor.
- $R_p$  – odpor dielektrika (samovybíjení)
- $R_{DA}$ ,  $C_{DA}$  – dielektrická absorbce

## Klasifikace časových průběhů obvodových veličin

- Obvodové veličiny – napětí, proud, výkon, ...
- Obvodové veličiny se samozřejmě mohou v čase měnit; některé časové průběhy jsou natolik významné, že zde hovoříme o specifických provozních režimech obvodu, a k jejich popisu používáme různý matematický aparát



### Stacionární ustálený stav (SUS)

Počítáme v oboru reálných čísel

### Sin: Harmonický ustálený stav (HUS)

Počítáme v oboru komplexních čísel

### Obdélník, trojúhelník, ...: Periodický neharmonický ustálený stav (PNUS)

Fourierovy řady

### Přechodné jevy

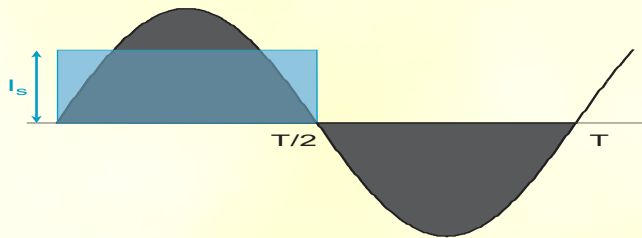
Integro-diferenciální rovnice  
Laplaceova transformace  
(obecně)

## Charakteristické hodnoty periodických průběhů

- Pro základní informace o periodickém průběhu nám často stačí pouze několik hodnot, které nám řeknou, jaké jsou tepelné účinky proudu, jaká je jeho stejnosměrná složka, atd.
- Např. v případě elektrické zásuvky nám obvykle postačí informace, že v zásuvce je 230 V (110 V, ...)

### Střední hodnota

- Je definována několika odlišnými způsoby
  - Z elektrochemického hlediska je to odpovídající velikost stejnosměrného proudu  $I$ , který přenesení stejný náboj, jako proud střídavý. Tato hodnota odpovídá výšce obdélníka se stejnou plochou, jako střídavý  $i(t)$  během jedné periody  $T$ .
  - Z elektrotechnického hlediska se jedná o stejnosměrnou složku ☺



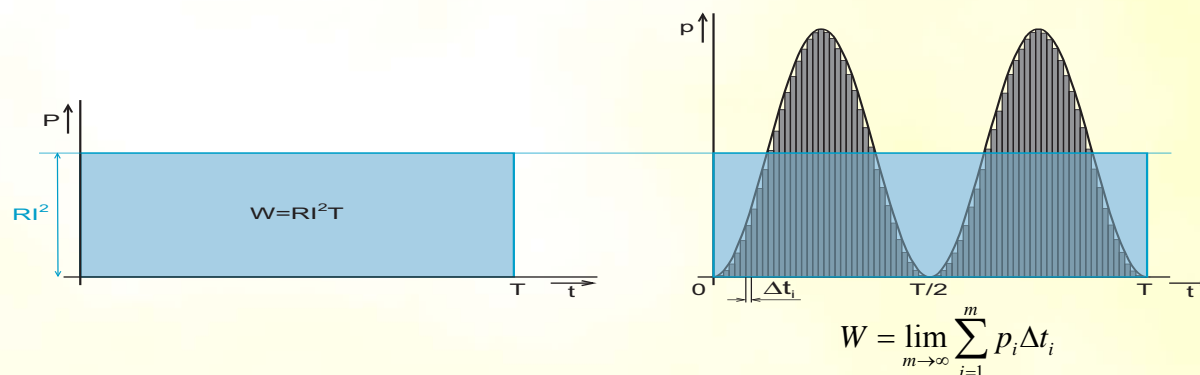
$$I_S = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt \quad U_S = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) dt$$

- Některé měřicí přístroje měří z podstaty svého fyzikálního principu střední hodnotu (usměrněného) časového průběhu; pak je potřeba střední hodnotu počítat buď na polovině periody (pokud mají obě stejnou plochu), nebo z absolutní hodnoty průběhu (aritmetická střední hodnota)

$$I_{sar} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |i(t)| dt \quad I_s = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) dt \quad I_s = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} i(t) dt$$

## Efektivní hodnota

- Napětí 230 V v elektrické zásuvce, to je právě efektivní hodnota
- **Význam:** Hodnota stejnosměrného proudu  $I$ , kterým se za dobu jedné periody vyvine ve stejném prostředí stejné množství tepla, jako proudem střídavým



1. Teplo, generované stejnosměrným proudem během periody  $T$ :  $W = RI^2T$
2. Okamžitý výkon střídavého proudu:  $p(t) = Ri^2(t)$
3. Celkové teplo, generované střídavým proudem za dobu jedné periody  $T$  může být vyjádřena jako “součet” všech okamžitých hodnot výkonu – tedy integrací (viz obrázek)  $W = \int_0^T Ri^2(t)dt$
4. Srovnáním (1) a (3) dostáváme

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2(t)dt \quad \Rightarrow \quad I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t)dt}$$

Sinusový průběh napětí má efektivní hodnotu  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  takže amplituda napětí v elektrické zásuvce je 325 V