

Přechodový jev v obvodu s cívkou

Vojtěch Beneš

Výstup RVP: žák aplikuje poznatky o mechanismech vedení elektrického proudu a chování cívky v elektrických obvodech

Klíčová slova: cívka, RL obvod, nestacionární děj, přechodový jev, časová konstanta, vlastní indukčnost, indukčnost cívky

Příprava na hodinu

Doba na přípravu:

10 min

Doba na provedení:

30 min

Obtížnost:

vysoká

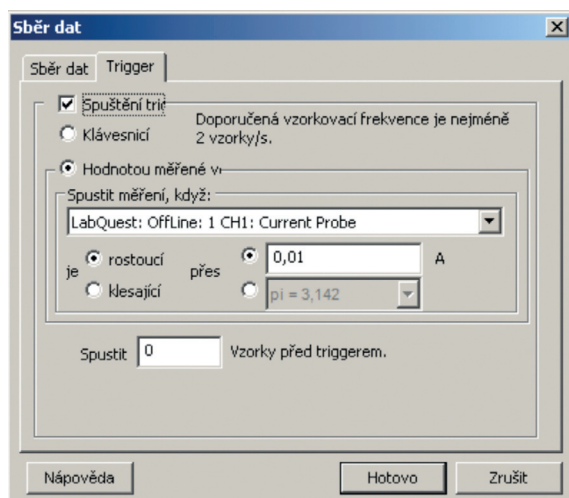
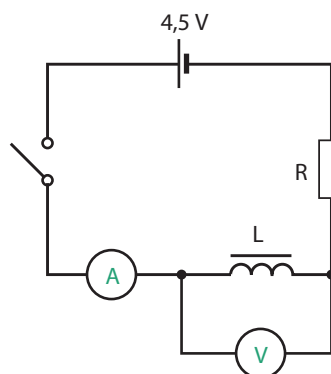
Úkol Pozorujte současně elektrický proud procházející cívkou a napětí na jejích svorkách po uzavření sériového RL obvodu.

- Zaznamenejte proud a napětí při náběhu proudu v RL obvodu a vzniklé křivky analyzujte. Zjistěte časovou konstantu obvodu.
- Porovnejte rychlost náběhu proudu pro různé indukčnosti při stálém odporu.
- Porovnejte rychlost náběhu proudu pro různé odpory při stálé indukčnosti.

Pomůcky Plochá baterie 4,5 V ve stojánku, vypínač, cívky o 100, 200 a 300 závitů, jádro rozkladného transformátoru, rezistory 10 Ω , 22 Ω , 47 Ω a 100 Ω , ampérmetr Vernier (max. 0,6 A), diferenciální voltmetr Vernier (max. 6 V), LabQuest, počítač s programem Logger Pro připojený na dataprojektor, vodiče

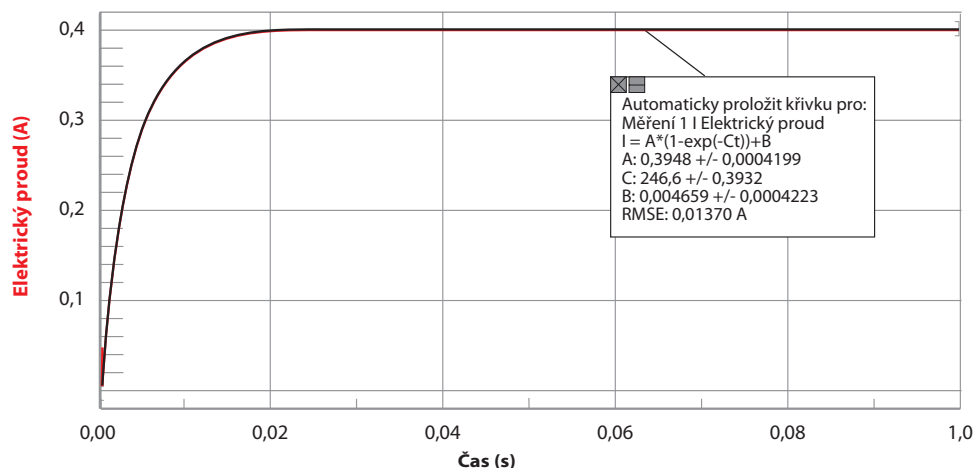
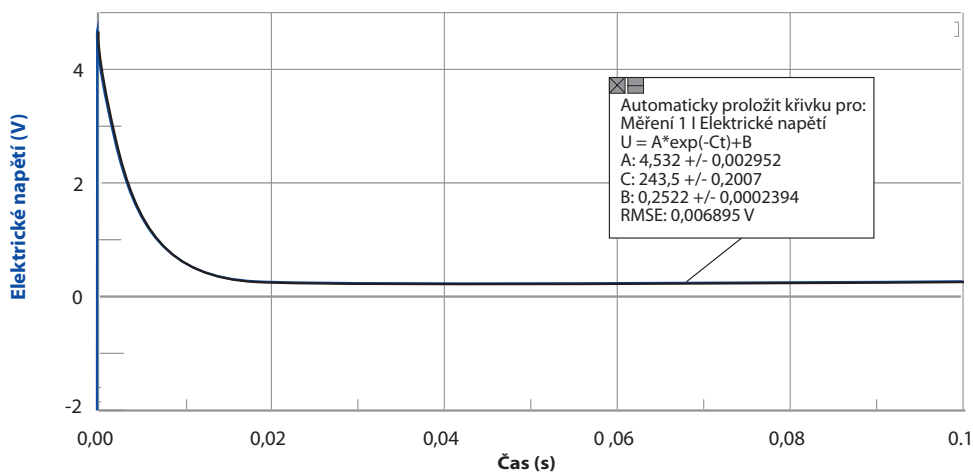
Postup Pozorování náběhu proudu

- 1) Zapojíme obvod podle schématu. Použijeme rezistor o odporu 10 Ω a cívku o 200 závitů. Nestacionární děj je velmi rychlý, pro zvýšení indukčnosti cívku opatříme uzavřeným transformátorovým jádrem. Před začátkem měření je vypínač vypnutý.
- 2) Ampérmetr a voltmetr zapojíme do analogových vstupů CH1 a CH2 LabQuestu, LabQuest propojíme s USB portem počítače.
- 3) Na počítači v programu Logger Pro nastavíme (menu **Experiment** → **Sběr dat...**):
 - doba měření 0,1 s,
 - vzorkovací frekvence 10 kHz,
 - trigger – dle obrázku



- 4) Před zahájením měření senzory vynuluujeme kliknutím na ikonu .
- 5) Měření spustíme kliknutím na  **Sběr dat** a v obvodu sepne vypínač. Po skončení měření (0,1 s) vypínač vypneme.

Přechodový jev v obvodu s cívkou

Graf
závislosti
proudu
na časeGraf
závislosti
napětí mezi
svorkami
cívky
na čase

Kvalitativní interpretace náběhu proudu

Po sepnutí obvodu nastává *přechodový jev* – elektrický proud se neobjeví ihned, ale nabíhá postupně. Před uzavřením spínače je proud nulový. Po uzavření obvodu nejprve strmě narůstá, poté se stabilizuje na maximální hodnotě $i = I_m = 0,395 \text{ A}$ (ke zjištění hodnoty lze použít ikonu **Odečet hodnot** .

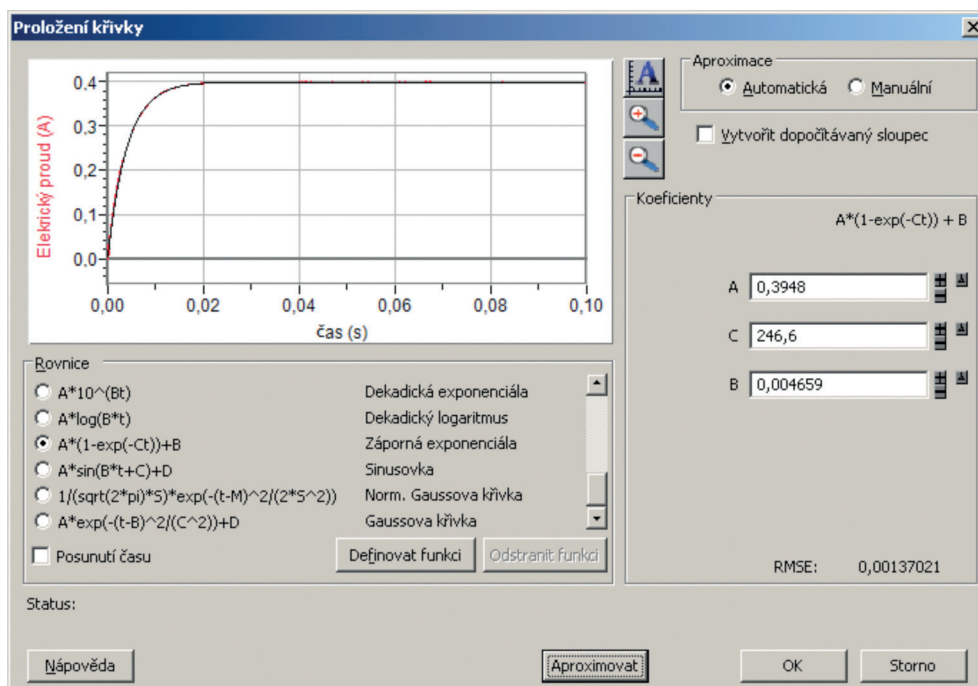
Ihned po uzavření obvodu se začne elektrický proud měnit. V cívce dochází k jevu nazvanému *vlastní indukce* – podle Lenzova zákona se cívka svými účinky brání změně, která je vyvolala. Cívka brání změnám magnetického pole (tyto jsou způsobeny změnami procházejícího proudu) tím, že indukuje dodatečné magnetické pole, resp. napětí orientované proti směru, kterým se mění původní magnetické pole. Indukované napětí má tedy za následek zpomalení změn proudu v cívce. Proto elektrický proud nedosáhne maximální hodnoty okamžitě, jak by tomu bylo v obvodech sestavených pouze z rezistorů.

Indukované napětí na cívce je maximální právě tehdy, kdy se proud v cívce mění nejprudčeji (ihned po uzavření obvodu, v čase $t > 0 \text{ s}$). Jak proud roste čím dál pomaleji, indukované napětí se postupně zmenšuje. V ustáleném stavu, tedy v okamžiku, kdy proud dosáhl maximální hodnoty a dál už se nemění, se v cívce žádné indukované napětí neobjevuje. Přesto, jak je patrné z 2. grafu, není napětí na cívce nulové, neboť se uplatní odpor vinutí, tj. vnitřní odpor cívky. V našem případě je v ustáleném stavu $u_L = 0,25 \text{ V}$.

Pozn.: Počáteční zakmitnutí napětí (v čase $t = 0,000 \text{ s}$) je způsobeno nedokonalostí použitého vypínače a jeho vysvětlování studentům nedoporučuji.

Kvantitativní analýza náběhu proudu

Získanými křivkami lze proložit exponenciální funkce. V menu **Analýza** → **Proložit křivku...** vybereme **Záporná exponenciála** a klikneme na **Aproximovat**. Pokud fit „sedí“, potvrdíme **OK**. V případě napětí zvolíme **Přirozená exponenciála**.



V grafu lze upravit prokládaný interval (označen hranatými závorkami) uchopením a tažením levým tlačítkem myši.

Porovnáním s údaji v grafu zjišťujeme, že elektrický proud je vyjádřen rovnicí

$$i = I_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

- Konstanta $A = I_m = 395 \text{ mA}$ představuje limitní proud v ustáleném stavu.
- Konstanta B má zanedbatelnou hodnotu, je dána podmínkami při startu měření.
- Konstanta $C = 247 \text{ s}^{-1}$ je převrácenou hodnotou časové konstanty τ obvodu RL.

Elektrické napětí na cívce je vyjádřeno rovnicí $u_L = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + U_\infty$.

- Konstanta $A = U_m = 4,53 \text{ V}$ vyjadřuje napětí na baterii.
- Konstanta $B = U_\infty = 0,252 \text{ V}$ představuje napětí na vinutí cívky v ustáleném stavu.
- Konstanta $C = 244 \text{ s}^{-1}$ je opět převrácenou hodnotou časové konstanty τ .

Určení parametrů cívky

- Vnitřní odpor $r_i = \frac{U_\infty}{I_m} = 0,64 \Omega$
- Celkový odpor obvodu $R_T = \frac{U_m}{I_m} = 11,5 \Omega$
- Časová konstanta $\tau = \frac{1}{245,5} \text{ s} = 4,07 \text{ ms}$
- Indukčnost cívky $L = \tau \cdot R_T = 46,8 \text{ mH}$

Přechodový jev v obvodu s cívkou

Rychlost náběhu proudu

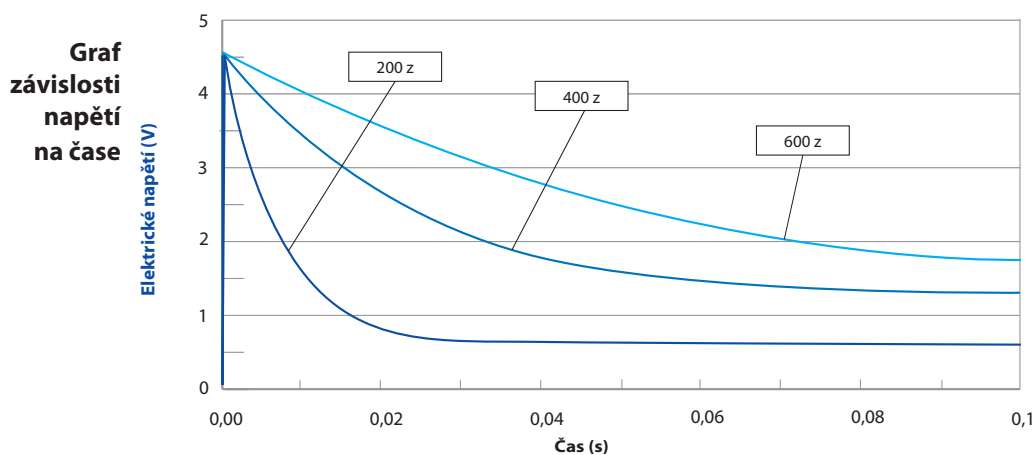
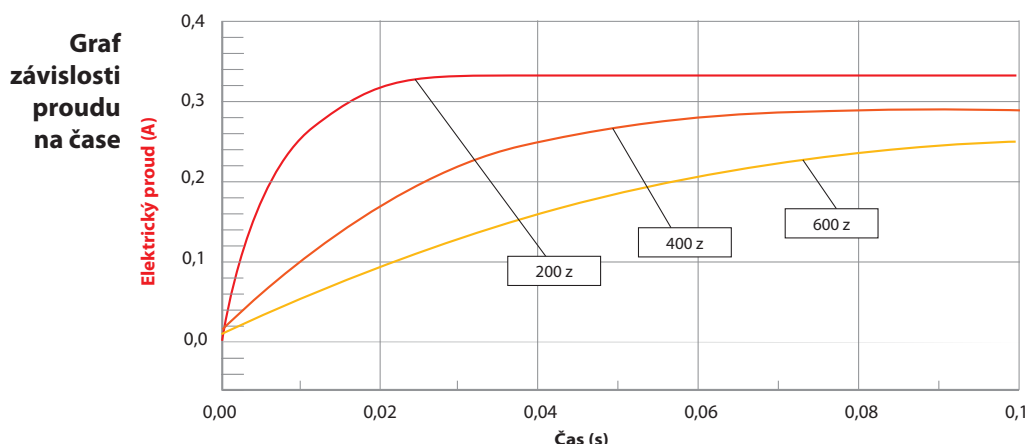
Náběh proudu není okamžitý děj, ale trvá určitou dobu. Rychlost náběhu je charakte-

rizována časovou konstantou obvodu $\tau = \frac{L}{R}$. Je rovna době, za kterou dosáhne proud

63 % maximální hodnoty. Po uplynutí doby 5τ je rozdíl mezi okamžitou hodnotou proudu a limitní hodnotou menší než 1 %.

Prozkoumání vlivu indukčnosti

Použijeme stejný obvod, stejné nastavení, $R = 10 \Omega$, připojujeme postupně cívku s 200, 400 a 600 závitů na uzavřeném jádru. Další křivku do grafu přidáme v menu **Experiment** → **Uchovat poslední měření**.

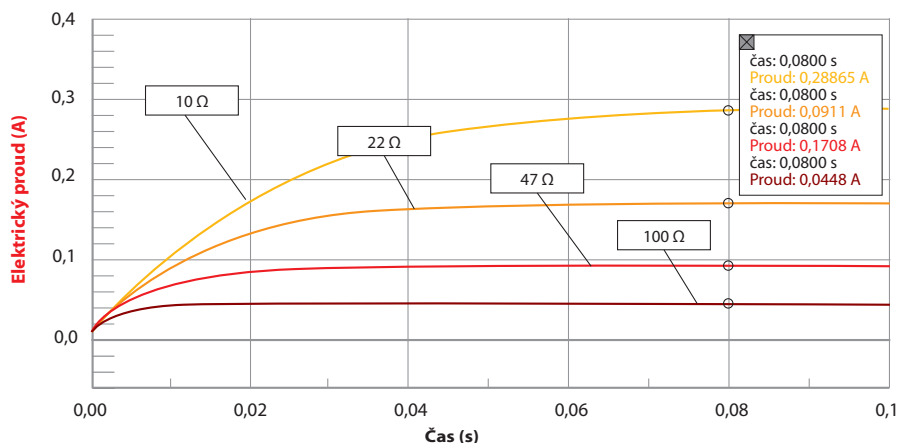


Je zřejmé, že pro větší indukčnosti trvá přechodový jev déle, časová konstanta se zvětšuje s rostoucí indukčností. Změnou počtu závitů došlo i ke změně odporu obvodu (čím víc závitů, tím větší odpor cívky), proto limitní hodnoty proudu ani napětí nejsou totožné.

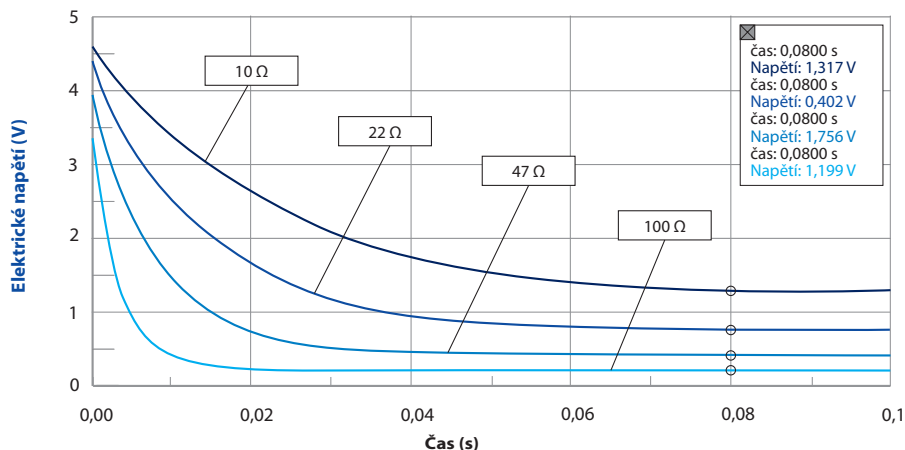
Prozkoumání vlivu odporu

Použijeme stejný obvod, stejné nastavení, zapojíme cívku se 400 závitů na uzavřeném jádru rozkladného transformátoru. Postupně připojujeme rezistory o odporu 10 Ω, 22 Ω, 47 Ω a 100 Ω. Další křivku do grafu přidáme v menu **Experiment**→**Uchovat poslední měření**.

Graf
závislosti
proudu
na čase



Graf
závislosti
napětí mezi
svorkami
cívky
na čase



Dospíváme k překvapivému zjištění: má-li obvod větší odpor, přechodový jev trvá kratší dobu, limitního proudu je dosaženo dříve než při menších odporech. Časová konstanta

tedy klesá s rostoucím odporem. Teoreticky lze odvodit, že časová konstanta $\tau = \frac{L}{R}$.

Bylo by výborným cvičením se žáky identifikovat křivky v grafu $u_L = f(t)$ a vysvětlit, proč při nižším odporu rezistoru bude v ustáleném stavu na cívce vyšší napětí.