

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Stejnoseměrné obvody

Ing. Jan Vaňuš Ph.D.

Ing. Roman Hrbáč Ph.D.

Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.

Ostrava 2013

© Ing. Jan Vaňuš Ph.D., Ing. Roman Hrbáč Ph.D., Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3049-0



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	STEJNOSMĚRNÉ OBVODY	3
1.1	ÚVOD	5
1.2	Základy teorie elektrických obvodů	5
1.3	Topologie elektrických obvodů	5
1.4	Aktivní prvky obvodu	7
1.5	Pasivní prvky elektrického obvodu	10
1.6	Metody řešení lineárních obvodů	14
1.6.1	Metoda postupného zjednodušování obvodu	15
1.6.2	Řešení obvodu Kirchhoffovými zákony	17
1.6.3	Řešení obvodu metodou smyčkových proudů	18
1.6.4	Řešení obvodu metodou uzlových napětí	19
1.7	Nelineární obvody	20
1.8	Přechodné děje	21
1.8.1	Zapínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)	21
1.8.2	Vypínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)	23
1.8.3	Zapínání obvodu R-C (odpor a kapacita)	25
1.8.4	Vypínání obvodu R-C (odpor a kapacita)	26
1.9	Literatura	28



1 STEJNOSMĚRNÉ OBVODY



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Základy teorie elektrických obvodů

Topologie elektrických obvodů

Aktivní prvky obvodu

Pasivní prvky elektrického obvodu

Metody řešení lineárních obvodů

Nelineární obvody

Přechodné děje

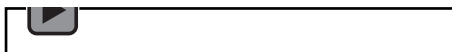


MOTIVACE:

Stejnoseměrný proud byl historicky prvním využívaným druhem proudu a o jeho rozšíření se zasloužil svými vynálezy především Thomas Alva Edison. Stejnoseměrné napájení využívá nejen řada pasivních a aktivních součástek, mezi které patří například rezistory, kondenzátory, diody, tranzistory, integrované obvody, ale taky stejnoseměrné motory. Vzájemným spojením těchto součástek je možné vytvořit elektronický obvod, který má svou specifickou funkci a je schopen potom řídit i složitý technologický proces. Pochopení principu a také výpočty stejnoseměrných obvodů jsou oproti střídavým obvodům mnohem jednodušší. Je jednodušší si představit, že zdroje mají kladný a záporný pól, že proud teče bez přerušování vodiči a dá se jednoduše spočítat podle Ohmova zákona. Použití Ohmova zákona nevyžaduje vysoký stupeň matematických znalostí.



Audio 1.1 Motivace



CÍL:

Obvody se soustředěnými parametry, obvody s rozloženými parametry.

Lineární obvody, nelineární obvody.

Aktivní prvek obvodu, pasivní prvek obvodu.



Ideální zdroj napětí, reálný zdroj napětí.

Provozní stav zdroje napětí naprázdno, nakrátko a při zatížení.

Ideální zdroj proudu, reálný zdroj proudu.

Ideální rezistor, ideální cívka, ideální kondenzátor.

Náhradní schéma reálné cívky a reálného kondenzátoru.

I. Kirchhoffův zákon a II. Kirchhoffův zákon.

Řešení lineárních obvodů postupným zjednodušováním obvodu.

Řešení lineárních obvodů s využitím metody smyčkových proudů.

Řešení lineárních obvodů s využitím metody uzlových napětí.

Přechodný děj vzniklý při zapínání a vypínání obvodu R-L zátěží.

Přechodný děj vzniklý při zapínání a vypínání obvodu R-C zátěží.



1.1 ÚVOD

Základy moderní teorie elektrických obvodů byly položeny v roce 1845, kdy G. Kirchhoff formuloval svoje zákony, později označené jako „I. a II. Kirchhoffův zákon“. Ale vlastní podstatou těchto dvou zákonů se staly až později, v roce 1873, formulované Maxwellovy rovnice elektrodynamiky.

Tento učební text předpokládá, že základní teoretické poznatky o elektrickém proudu, o teorii elektromagnetického pole včetně základních zákonů byly už probírány ve fyzice a nezabývá se zde jimi.

1.2 ZÁKLADY TEORIE ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

Elektrický obvod je soustava elektrických prvků (elektrický prvek je zařízení či součástka), které fungují jako zdroje či spotřebiče a vodičů, které je propojují. Elektrické obvody znázorňujeme nejčastěji pomocí schémat, v nichž každý prvek má svou značku. Značky nejběžnějších prvků elektrických obvodů jsou v těchto učebních textech postupně uvedeny. Základem teorie elektrických obvodů jsou poznatky z teorie elektromagnetického pole a z matematiky.

Obecně každý elektrický obvod lze znázornit elektrickým schématem, což je soustava aktivních a pasivních dvojpólů vzájemně propojených podle účelu a funkce obvodu. Ve schématech se používají normalizované značky a pojmy, které budou popsány v kapitole 2.2.1.

Elektrické obvody můžeme rozdělit na dva základní typy:

- obvody se soustředěnými parametry, tj. všechny sledované veličiny jsou pouze funkcí času, prostorové uspořádání prvků nemá vliv na vlastnosti obvodu. Řešení těchto soustav vede na obyčejné diferenciální rovnice.
- obvody s rozloženými parametry, tj. všechny sledované veličiny jsou nejen funkcí času, ale i funkcí vlnové délky šíření elektromagnetického pole. Řešení takovýchto obvodů vede na parciální diferenciální rovnice.

Pro zjednodušení se zde budeme zabývat pouze obvody se soustředěnými parametry.

Kromě výše uvedeného rozdělení dělíme obvody podle jejich vlastností na obvody:

- lineární - obsahují pouze lineární prvky.
- nelineární – vyznačují se závislostí napětí na proudu, která je dána nelineární charakteristikou.

1.3 TOPOLOGIE ELEKTRICKÝCH OBVODŮ

Základem každého elektrického obvodu jsou prvky. Tyto prvky jsou v obvodu propojeny svorkami-*póly*. Podle počtu svorek rozeznáváme prvky jako dvojpóly, trojpóly až obecně n-póly.

Elektrické obvody se od sebe liší svými prvky, vazbami mezi prvky a také způsobem, jakým jsou prvky spolu spojeny. Z této geometrie elektrického obvodu vychází nauka nazývaná **topologie**, která vyšetřuje vlastnosti geometrických útvarů a vztahy mezi nimi.

- V topologii elektrických obvodů je nejjednodušším obvodovým prvkem dvojpól, který má pouze dva vývody a jeho vlastnosti jsou dány dvojicí základních elektromagnetických veličin **napětím** a **proudem**. K označení dvojpólů používáme dohodnuté schematické značky a čítecí šipky, které určují orientaci jednotlivých veličin. Na Obr. 3.2 jsou uvedeny jednoduché příklady značení pro pasivní i aktivní prvky včetně napětí a proudů v daném obvodu.

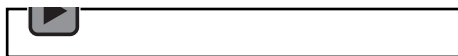


Co je tedy aktivní a pasivní prvek?

- pasivní prvek - je takový prvek, který je spotřebičem elektrické energie, a tedy přeměňuje elektrickou energii na jinou formu energie, např. tepelnou. V náhradním schématu mají vždy šipky napětí a proudu shodný směr.



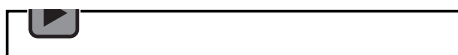
Audio 1.2 Pasivní prvek



- aktivní prvek - je zdrojem elektrické energie, tedy přeměňuje jiný druh energie na energii elektrickou. Aktivní prvek může být prakticky dvojitý - napěťový a proudový.

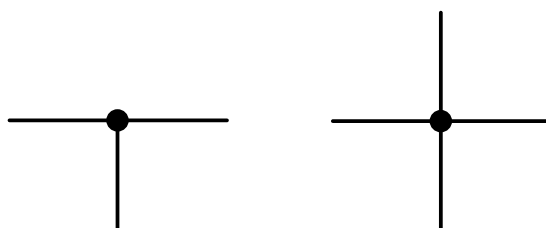


Audio 1.3 Aktivní prvek

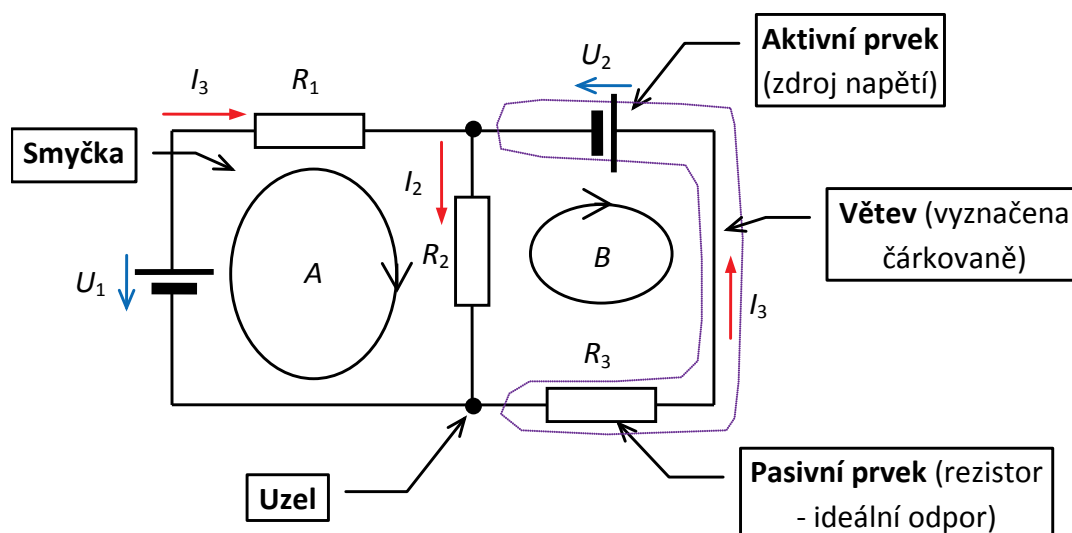


Při praktickém použití, tj. sestavování modelů obvodů na základě reálných stavů, se vždy snažíme všechny vlastnosti všech prvků obvodu popsat matematickými vztahy. Z tohoto důvodu se vždy reálné (skutečné) prvky nahrazují ideálními, přičemž ne vždy se to však podaří zcela dokonale.

Každý dvopól, ať už aktivní nebo pasivní, se zapojuje do obvodu dvěma svorkami (póly). Spojení dvou nebo více vodičů se nazývá uzel (viz. Obr. 3.1), část obvodu mezi dvěma uzly je větev, viz Obr. 3.2.



Obr. 3.1 Znárodnění uzlů



Obr. 3.2 Topologie elektrického obvodu

Libovolně uzavřený okruh v daném náhradním schématu obvodu se nazývá smyčka. Na Obr. 3.2 jsou vidět dvě takovéto smyčky - smyčka A a B. Tyto smyčky slouží pro výpočet obvodů,



tj. určení napětí a proudů v obvodu (viz kap. 2.3). Daný obvod lze tedy popsat tolika rovnicemi pro proudy, kolik má obvod uzlů a tolika rovnicemi pro napětí, kolik má smyček.

1.4 AKTIVNÍ PRVKY OBVODU

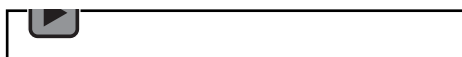
Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, aktivním prvkem (dvoj pólem) je zdroj elektrické energie. Tento zdroj může být pouze v provedení zdroje napětí nebo proudu.

Zdroj napětí - může být ideální nebo reálný (může se jednat o dynamo nebo galvanický článěk).

Ideální zdroj napětí je takový zdroj, jehož napětí nezávisí na odebíraném proudu. Na Obr. 4.1 (a) je uvedena schematická značka a voltampérová charakteristika zdroje.



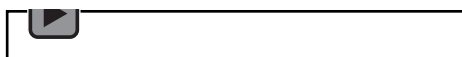
Audio 1.4 Ideální zdroj napětí



Reálný zdroj napětí - v těchto zdrojích vznikají ztráty, a proto je jeho napětí závislé na odebíraném proudu. Ztráty jsou znázorňovány vnitřním odporem R_i (i jako interní). Při průchodu elektrického proudu vzniká na tomto odporu úbytek napětí ΔU_i , který je příčinou poklesu napětí na svorkách zdroje vzhledem ke svorkovému napětí ideálního zdroje U_0 , viz Obr. 4.1 (b). Svorkové napětí zdroje je dáno vztahem (1).



Audio 1.5 Reálný zdroj napětí

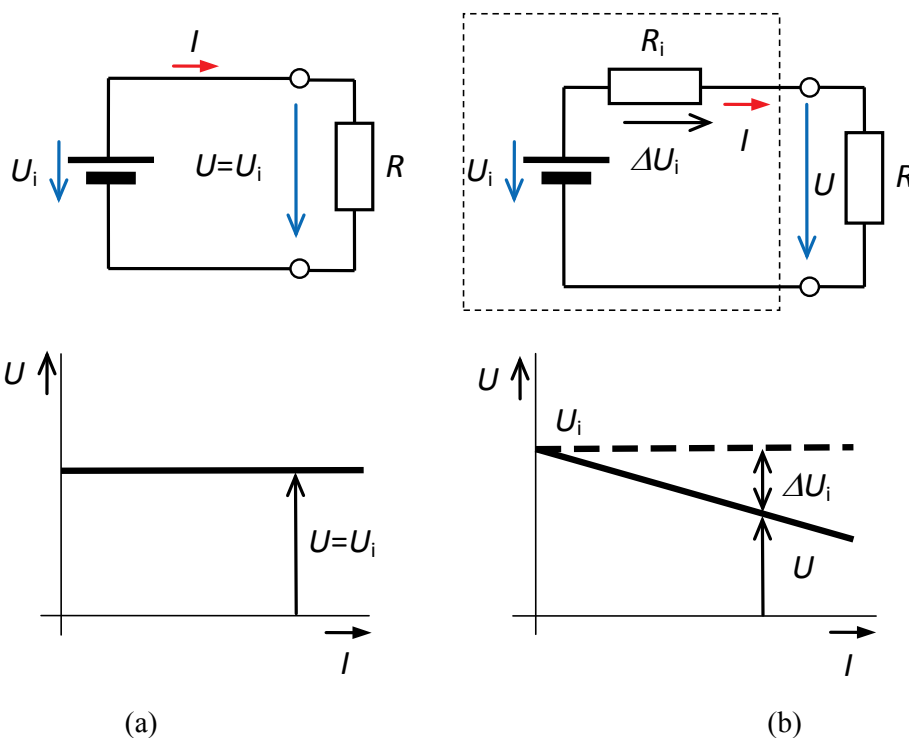


$$U = U_i - \Delta U_i \quad (1)$$

Pokud je vnitřní odpor zdroje konstantní, bude i úbytek napětí na tomto odporu úměrný procházejícímu proudu. Velikost úbytku napětí lze vypočítat z Ohmova zákona pomocí vztahu (2).

$$\Delta U_i = R_i \cdot I \quad (2)$$

Zdroj s malým vnitřním odporem má malý úbytek napětí. Jeho svorkové napětí klesá jen málo se zatížením, a takovýto zdroj se nazývá „tvrdý“ zdroj napětí. Pokud je ovšem úbytek napětí na zdroji velký, znamená to, že hodnota vnitřního odporu zdroje je rovněž velká a jedná se o tzv. „měkký“ zdroj napětí. U měkkého zdroje napětí se bude svorkové napětí se zatížením poměrně značně měnit.



Obr. 4.1 Schéma zdroje napětí se zatěžovací charakteristikou: (a) ideální, (b) reálný



Každý zdroj napětí je charakterizován třemi základními provozními stavy:

1. Stav naprázdno - svorky zdroje jsou rozpojeny a zdrojem neprotéká proud, tzn. $I = 0$ A.



$$U = U_0 = U_i \quad (3)$$

2. Stav nakrátko - svorky zdroje jsou spojeny nakrátko (zkratované). Svorkové napětí je nulové, tzn. $U = 0$ V. Ve zdroji protéká maximální proud, který je schopen zdroj dodat - proud nakrátko. Velikost tohoto maximálního proudu je dána vnitřním napětím zdroje U_i a vnitřním odporem zdroje R_i , jak uvádí vztah (4).

$$I = I_k = \frac{U_i}{R_i} \quad (4)$$

3. Stav při zatížení - na svorky zdroje je připojen spotřebič, např. lineární pasivní dvojpól (rezistor R). Proud je potom dán vztahem (5).

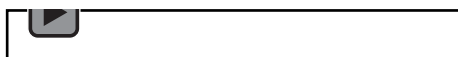
$$I = \frac{U_i}{R_i + R} \quad (5)$$

Zdroj proudu - může být ideální nebo reálný.

Ideální zdroj proudu je takový zdroj, jehož zatěžovací charakteristikou je přímka rovnoběžná s osou napětí, jak ukázáno na Obr. 4.2 (a). Velikost proudu tohoto zdroje nezávisí na velikosti napětí na zátěži. Ideální zdroj může dodávat i nekonečně velký výkon při konstantní velikosti proudu, jelikož velikost výstupního napětí je neomezená. Ideální proudový zdroj vykazuje nekonečně velký vnitřní odpor.



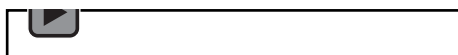
Audio 1.6 Ideální zdroj proudu



Reálný zdroj proudu - Reálný proudový zdroj je schopen dodávat pouze omezený výkon a zároveň je omezené i maximální svorkové napětí. Velikost vnitřního odporu reálného proudového zdroje je omezena. Ztráty reálného proudového zdroje jsou znázorněny vnitřním odporem R_i . Výstupní proud I je dán zatěžovací charakteristikou, kterou popisuje vztah (6).



Audio 1.7 Reálný zdroj proudu

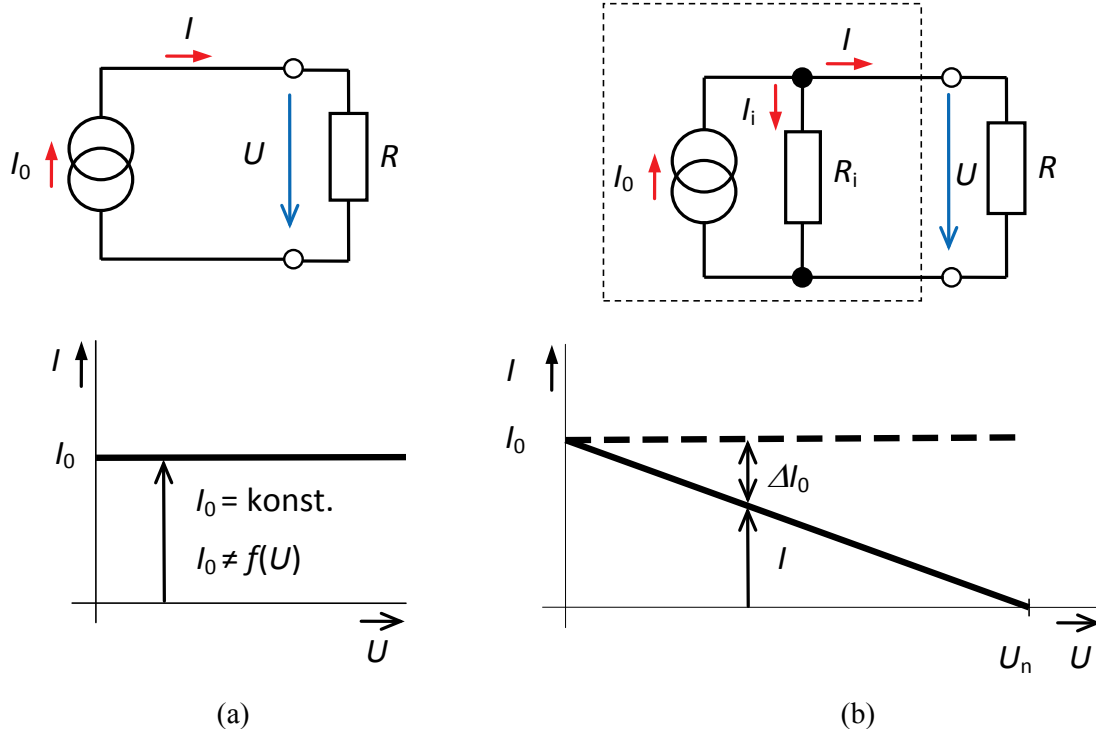


$$I = I_0 - I_i = I_0 - \frac{U}{R_i} \quad (6)$$

Napětí U_n je stav naprázdno, kdy $I = 0$. V tomto okamžiku platí vztah (7), kde napětí vytvořené zdrojem je maximální. Při stavu nakrátko platí, že $I_k = I_0$.

$$U_n = R_i \cdot I_0 \quad (7)$$





Obr. 4.2 Schéma zdroje proudu se zatěžovací charakteristikou: (a) ideální, (b) reálný

1.5 PASIVNÍ PRVKY ELEKTRICKÉHO OBVODU

Mezi pasivní prvky řadíme:

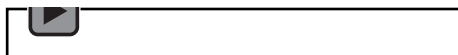
- rezistor (odporník, odpor),
- cívku (induktor),
- kondenzátor (kapacitor).

Tyto pasivní prvky lze opět rozdělit na ideální a reálné prvky.

Ideální rezistor (ideální odpor) je prvek, jehož jediným parametrem je odpor R . Jednotkou odporu je ohm, označení $[\Omega]$. V rezistoru dochází vlivem průchodu proudu k přeměně elektrické energie na tepelnou. Definičním vztahem je zde tzv. „OHMŮV ZÁKON“. Úbytek napětí U na rezistoru je přímo úměrný velikosti odporu R a protékajícího proudu I , jak uvádí vztah (8).



Audio 1.8 Ideální rezistor



$$U = R \cdot I \quad (8)$$

Voltampérová charakteristika spolu se značkou rezistoru je na Obr. 5.1. Z uvedené charakteristiky je zřejmé, že strmota charakteristiky je tím menší, čím menší je hodnota odporu. Napětí i proud mají stejný smysl, to znamená, že jsou obě tyto veličiny kladné nebo záporné. Převrácenou hodnotu odporu nazýváme vodivost G .

$$G = \frac{1}{R} \quad (9)$$

Pro okamžitou hodnotu výkonu platí vztah (10).

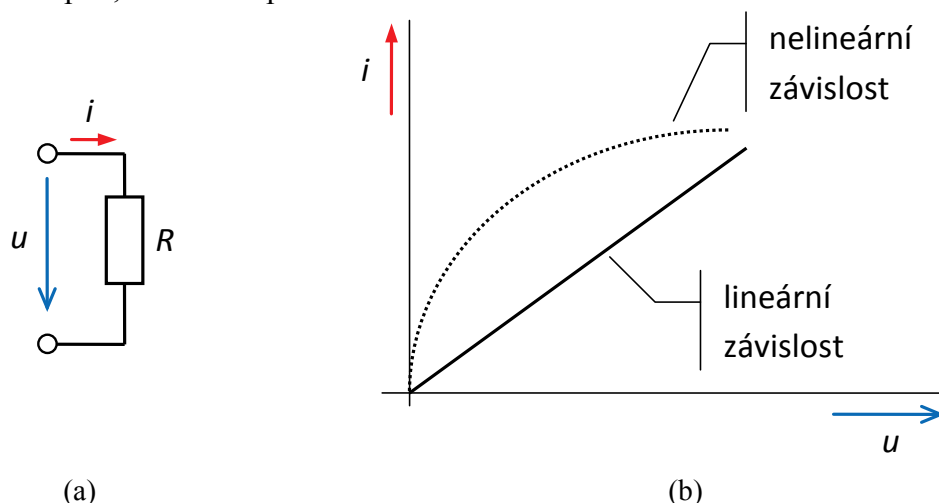
$$P = U \cdot I \quad (10)$$



Dosažením vztahu (8) do rovnice (10) bude potom výkon dán vztahem (11).

$$P = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2 \quad (11)$$

Ve většině případů je odpor závislý i na dalších veličinách, jako jsou např. teplota, mechanické napětí, osvětlení apod.

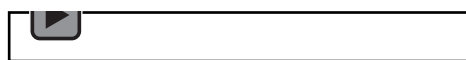


Obr. 5.1 (a) Schematická značka rezistoru, (b) Volt-ampérová charakteristika rezistoru

Ideální cívka je elektronická součástka, která má schopnost udržet v sobě v určitém okamžiku nahromaděnou elektrickou energii a v jiném okamžiku ji ze sebe vydat. Jelikož ideální cívka má nulovou hodnotu odporu, nevznikají v ní tepelné ztráty, pouze se v ní akumuluje a vydává energie magnetického pole. Velikost energie magnetického pole je charakterizována magnetickým tokem a proudem. Čím větší proud cívku protéká, tím větší magnetický tok je v cívkě vybuzen. Jediným parametrem induktoru je indukčnost L , jejíž jednotkou je henry, označení [H]. Pro lineární závislost tedy platí vztah (12).



Audio 1.8 Ideální cívka



$$\Phi = L \cdot I \quad (12)$$

Pro vztah mezi proudem a napětím platí vztah (13).

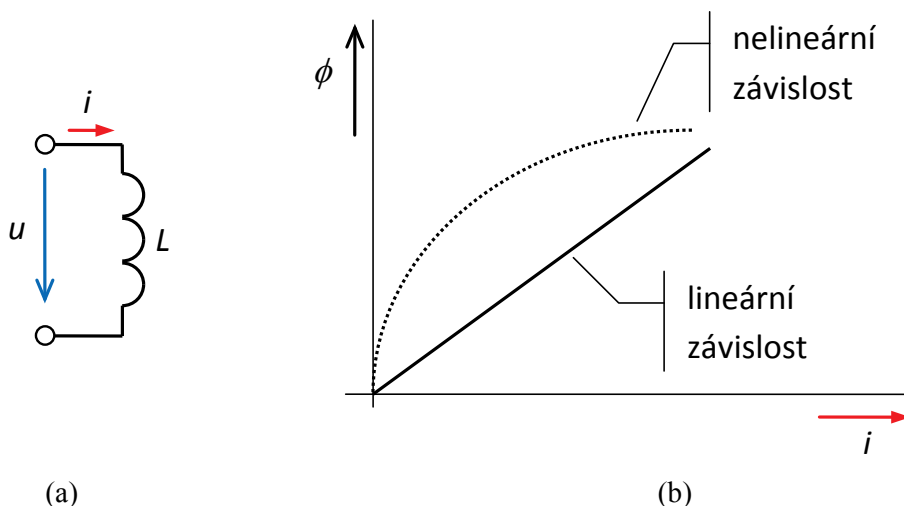
$$u = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (13)$$

Magnetickou energii akumulovanou v induktoru lze vyjádřit vztahem (14).

$$E_M = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{L} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (14)$$

Schematická značka induktoru a závislost magnetického toku na proudu jsou uvedeny na Obr. 5.2.





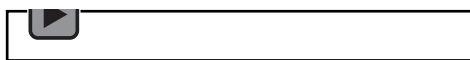
Obr. 5.2 (a) Schematická značka induktoru, (b) Ampér-Weberová charakteristika induktoru

U induktoru udává energii (energetický stav) jednoznačně hodnota cívkového toku $\Phi_C(t)$ nebo tomu odpovídající proud procházející induktorem $i(t)$. Proto je proud induktorem stavová veličina, která se nemůže měnit nekonečně rychle (skokem). U induktoru nemůže nikdy platit, že $di/dt \rightarrow \pm\infty$. Tato vlastnost je i podstatou ustalování obvodových veličin - příčinou přechodných dějů.

Ideální kondenzátor (kapacitor) je prvek, v němž se akumuluje jen energie elektrického pole, přičemž nevznikají tepelné ztráty. Jediným parametrem je kapacita C , jejíž jednotkou je farad, označení [F]. Pro lineární závislost pak platí vztah (15) mezi napětím U a nábojem Q .



Audio 1.10 Ideální kondenzátor



$$Q = C \cdot U \quad (15)$$

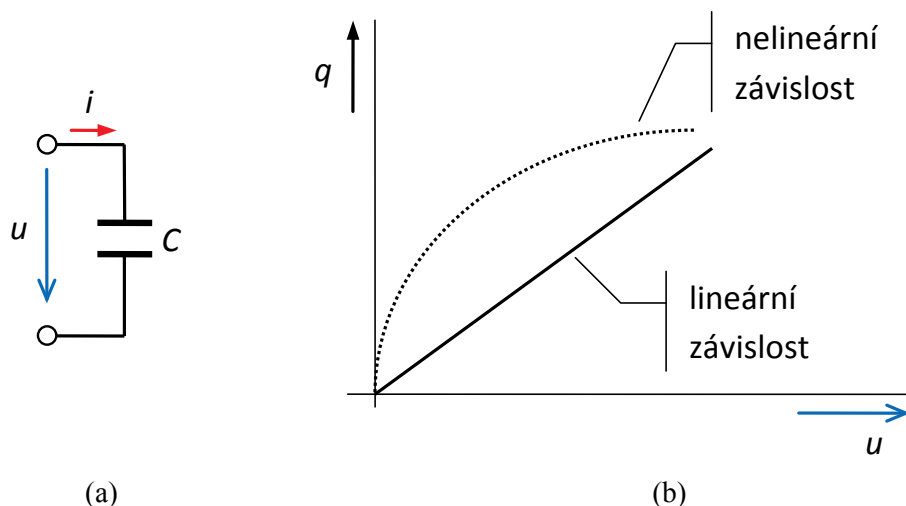
Ze zákona zachování elektrického náboje lze odvodit vztah (16) mezi proudem a napětím na kapacitoru.

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (16)$$

Pro energii elektrického pole nahromaděnou v kapacitoru platí vztah (17).

$$E_E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (17)$$

Schematická značka kapacitoru a závislost náboje Q na napětí U jsou uvedeny na Obr. 5.3.



Obr. 5.3 (a) Schematická značka kapacitoru, (b) Volt-Coulombová charakteristika kapacitoru

Princip vzniku elektrické indukce - Pokud umístíme proti sobě dvě rovinné vodivé desky a připojíme-li je ke zdroji stejnosměrného napětí, tak v okamžiku připojení nám obvodem poteče maximální proud, který rychle zanikne. Tento jev je důkazem toho, že k deskám protekl elektrický proud, třebaže jsou desky vzájemně odděleny. Na deskách se nahromadily náboje $+Q$ a $-Q$, které jsou stejně velké a zůstávají na deskách i po odpojení zdroje napětí. Mezi deskami je napětí, které je rovno napětí napájecího zdroje. Elektrický náboj, který připadá na jednotku plochy desek, nazýváme elektrická indukce, kterou určíme podle vztahu (18),

$$D = \frac{Q}{S} \text{ [C.m}^{-2}\text{]} \quad (18)$$

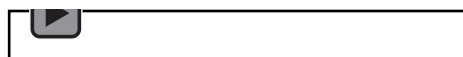
kde Q je velikost náboje nahromaděného na deskách a S je plocha desky.

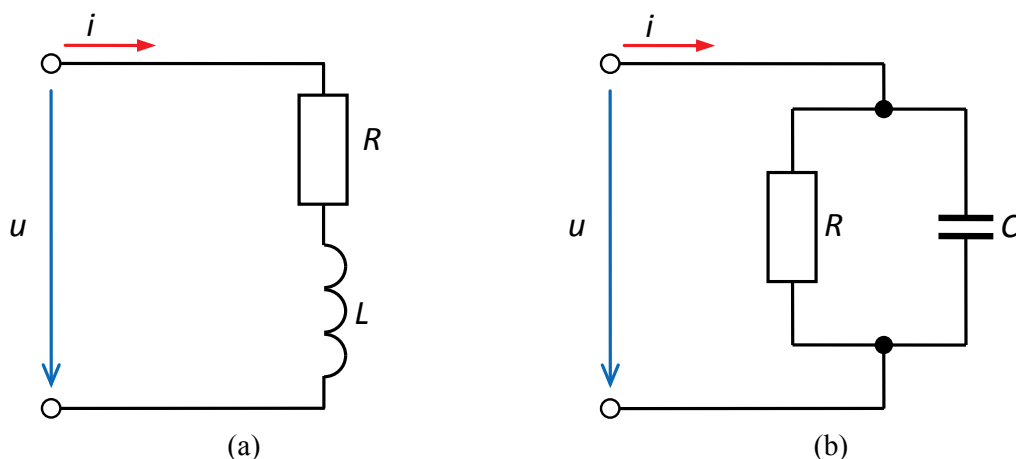
Je nutno si však uvědomit, že pro popsání vlastností reálného prvku nám ve většině případů nepostačuje použití pouze výše uvedených ideálních prvků. Musíme tedy přistoupit k vytvoření náhradního schématu. Toto náhradní schéma se týká jak cívky (induktoru), tak kondenzátoru (kapacitoru).

Každá reálná cívka je navinuta z vodiče o určitém počtu závitů. Tento vodič má svůj průřez a délku a z toho tedy plyne i ohmický odpor tohoto vodiče. Z tohoto důvodu je náhradním schématem reálné cívky jak odpor, tak indukčnost, viz Obr. 5.4 (a).



Audio 1.11 Reálná cívka





Obr. 5.4 (a) Náhradní schéma reálné cívky, (b) Náhradní schéma reálného kondenzátoru

Pro svorkové napětí takového dvojpólu platí vztah (18).

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} \quad (18)$$

Obdobný případ nastane i pro reálný kondenzátor. Ve skutečnosti každý kondenzátor obsahuje vnitřní odpor (má určitý svod). Tedy náhradní schéma je v provedení zapojení paralelního odporu a kapacity, jak je uvedeno na Obr. 5.4 (b). Rovnice tohoto dvojpólu bude mít potom tvar:

$$i = \frac{u}{R} + C \frac{du}{dt} \quad (19)$$

Vinutí elektrických strojů a přístrojů jsou vždy reálnými cívkami, to se týká i všech kondenzátorů. Proto musíme tedy vždy uvažovat správná náhradní schémata. Při výpočtech lze operovat s ideálními prvky, ale tyto nelze nikdy vyrobit.

Oba prvky, jak cívka, tak kondenzátor, se uplatní pouze ve střídavých obvodech, kde se projevuje změna napětí a proudu za jednotku času. Ve stejnosměrných obvodech se uplatní pouze činný odpor, nebo svodová vodivost.

1.6 METODY ŘEŠENÍ LINEÁRNÍCH OBVODŮ

Řešení neboli analýza elektrického obvodu, je založeno na tom, že pro daný obvod a dané elektrické parametry zdrojů hledáme ostatní neznámé obvodové veličiny. Vycházíme zpravidla z lineárních rezistorů a zdrojů. Jak už bylo řečeno, cívky a kondenzátory se zde neuplatní.

Metody řešení lineárních elektrických obvodů lze rozdělit na:

- Metoda postupného zjednodušování obvodu.
- Řešení obvodu pomocí Kirchhoffových zákonů.
- Metoda smyčkových proudů.
- Metoda uzlových napětí.
- Metoda řezů.
- Metoda založená na principu superpozice, apod.

Z hlediska pochopení vlastního postupu výpočtu, sestavování rovnic, analýze výsledků, docela postačuje, abychom se zde zabývali pouze prvními třemi metodami, tedy metodou „postupného zjednodušování“, „Kirchhoffových zákonů“ a „smyčkových proudů“.



1.6.1 Metoda postupného zjednodušování obvodu

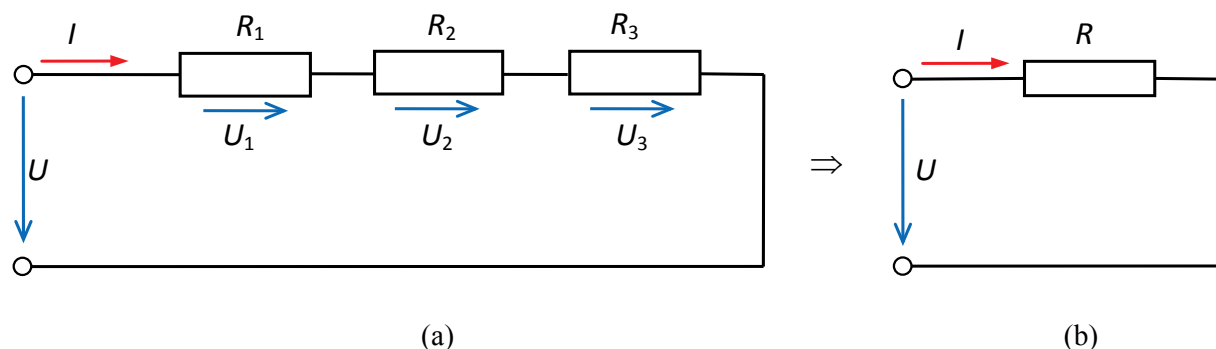
Tato metoda je vhodná zejména v obvodech s jedním zdrojem. Její podstatou je nahrazování sériových a paralelních skupin pasivních dvojpólů ekvivalentními dvojpóly. V některých případech je nutné použít tzv. „metody transfigurace Y- Δ “, o níž bude řečeno dále podrobněji. Vlastní řešení daného obvodu se potom řídí následujícími zásadami:

a) Rezistory zapojené v sérii.

Zapojením několika pasivních dvojpólů - rezistorů do série (za sebou), jak naznačuje Obr. 6.1 (a), dostaneme obvod, který lze nahradit jedním ekvivalentním rezistorem, jak ukazuje Obr. 6.1 (b) o velikosti odporu R dle vztahu (20).

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (20)$$

Tímto ekvivalentním rezistorem protéká při stejném napětí stejný proud jako v původním obvodu.



Obr. 6.1 (a) Schéma sériového zapojení rezistorů, (b) Ekvivalentní náhrada jedním rezistorem

Napětí na jednotlivých dvojpólech je dáno vztahy (21), pro které platí rovnost (22) a výsledné napětí - napětí zdroje je pak dáno součtem úbytků napětí na jednotlivých dvojpólech, jak uvádí vztah (23).

$$U_1 = R_1 \cdot I_1, \quad U_2 = R_2 \cdot I_2, \quad U_3 = R_3 \cdot I_3 \quad (21)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 \quad (22)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (23)$$

Obecně výsledný ekvivalentní odpor sériového zapojení rezistorů dán vztahem (24).

$$R = \sum_{x=1}^n R_x \quad (24)$$

Při sériovém řazení rezistorů se vždy hodnoty odporů sčítají.

b) Rezistory zapojené paralelně.

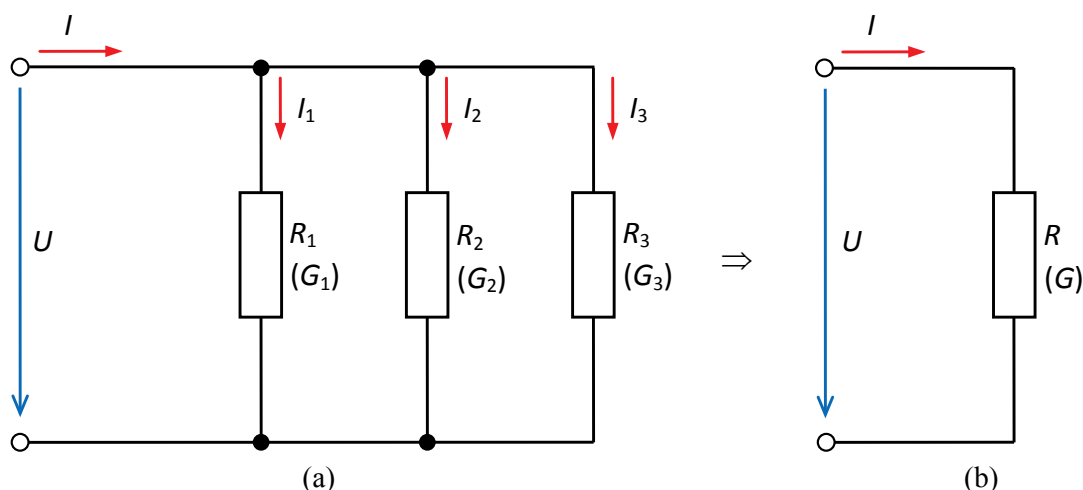
Rezistory zapojené paralelně (vedle sebe) mají jedno společné napájecí napětí U a celkový napájecí proud I se rozděluje v poměru odporů (vodivostí) jednotlivých rezistorů. Příklad paralelního zapojení tří rezistorů je ukázán na Obr. 6.2. Výpočet celkového odporu R paralelního zapojení je dán vztahem (20).

$$\frac{1}{R} = \sum_{x=1}^n \frac{1}{R_x} \quad (20)$$

Výsledná vodivost G je dána vztahem (21) a svou převrácenou hodnotou určuje odpor ekvivalentního náhradního rezistoru.

$$G = \sum_{x=1}^n G_x \quad (21)$$





Obr. 6.2 (a) Schéma paralelního zapojení rezistorů, (b) Ekvivalentní náhrada jedním rezistorem

Opět platí vztah (21), přičemž napětí na jednotlivých rezistorech je stejné a rovná se napětí zdroje, jak naznačuje vztah (22). Celkový proud v obvodu je potom dán součtem proudů jednotlivých rezistorů (23). S využitím vodivosti můžeme rovnici (23) vyjádřit vztahem (24).

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \quad (22)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (23)$$

$$I = \frac{U}{R} = U \cdot (G_1 + G_2 + G_3) = U \cdot G \quad (24)$$

Při paralelním spojení rezistorů se sčítají jejich vodivosti.

c) Transfigurace.

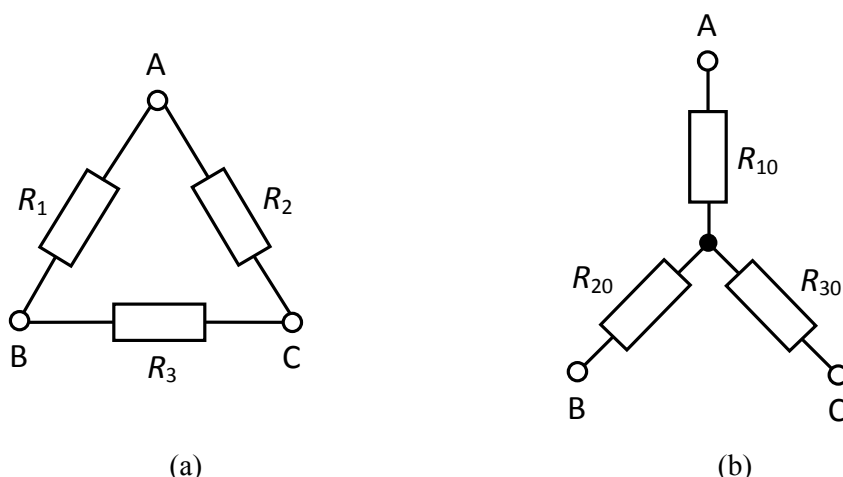
Ve složitějších elektrických obvodech, zvláště pak v můstkových zapojeních se lze setkat se třemi dvojpóly zapojenými tak, že tvoří trojúhelník (Δ) nebo hvězdu (Y), viz Obr. 6.3. Pro řešení zde nelze zvolit ani jeden z výše popsaných způsobů řešení – tedy sériovou ani paralelní kombinaci. Zpravidla se setkáváme v obvodech s případy, kdy se pro jednodušší řešení vyplatí nahradit zapojení dvojpólů do trojúhelníka zapojením do hvězdy, jak ukazuje Obr. 6.3 (b). Je to častější případ, nežli by tomu bylo obráceně. Takto upravený obvod lze pak řešit metodou postupného zjednodušování. Transfigurací se nemění poměry vně transfigurované oblasti - říkáme, že oba útvary (Y i Δ) jsou vzájemně ekvivalentní. Tedy pokud nahrazujeme trojúhelník hvězdou, dostaneme pro ekvivalentní odpory vztahy (25).

$$R_{10} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, R_{20} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, R_{30} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (25)$$

Nahrazujeme-li hvězdu trojúhelníkem, používáme pro výpočet ekvivalentních odporů vztahy (26).

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{10} + R_{20} + \frac{R_{10} \cdot R_{20}}{R_{30}} \\ R_2 &= R_{10} + R_{30} + \frac{R_{10} \cdot R_{30}}{R_{20}} \\ R_3 &= R_{20} + R_{30} + \frac{R_{20} \cdot R_{30}}{R_{10}} \end{aligned} \quad (26)$$





Obr. 6.3 (a) Zapojení odporů do trojúhelníka, (b) Zapojení odporů do hvězdy

1.6.2 Řešení obvodu Kirchhoffovými zákony

Pomocí dvou základních Kirchhoffových zákonů elektrotechniky jsme schopni sestavit matematické rovnice obvodu a následně jednoduchým výpočtem vyřešit. Řešením obvodu jsou v tomto případě neznámé proudy, při známých napětích zdrojů a velikostech odporu rezistorů.

I. Kirchhoffův zákon – platí pro rozvětvený elektrický obvod a je definován takto: „algebraický součet okamžitých hodnot proudů všech větví obvodu spojených s daným uzlem je roven nule“. Obecně platný vztah má tvar (27), kde n je počet proudů v uzlu.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (27)$$

Zpravidla volíme proudy vstupující do uzlu jako kladné a proudy vystupující z uzlu jako záporné, jak naznačuje vztah (28) popisující uzel na Obr. 6.4 (a).

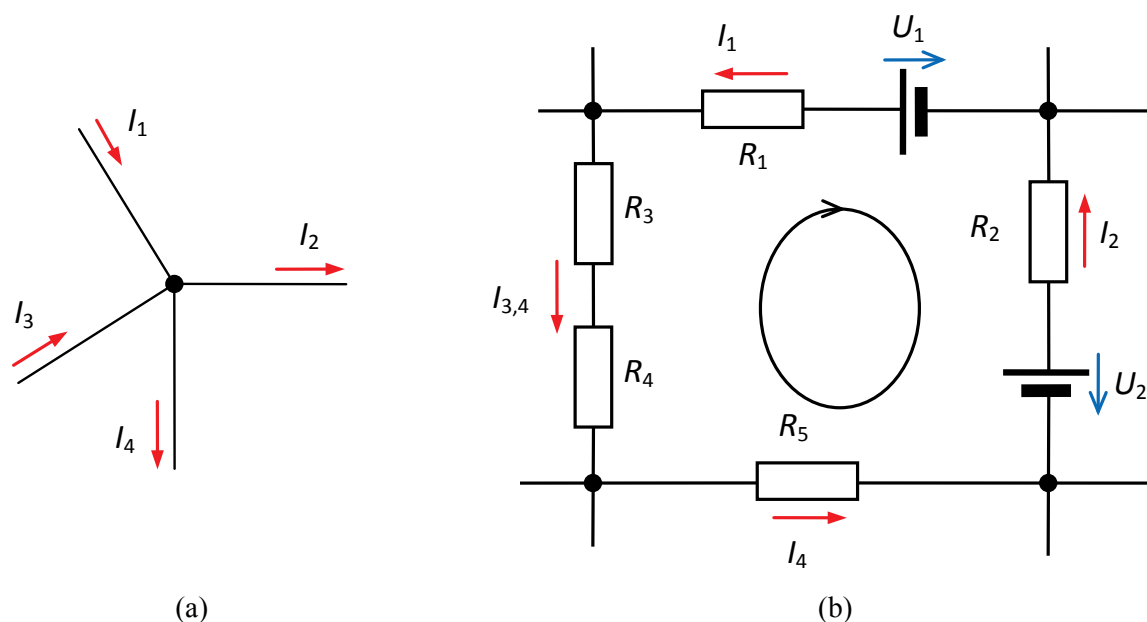
$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad (28)$$

II. Kirchhoffův zákon – platí pro uzavřený elektrický obvod a má toto znění: „algebraický součet všech okamžitých hodnot svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se rovná nule“. Obecně platný vztah má tvar (29), kde n je počet všech úbytků napětí v uzavřené smyčce obvodu.

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad (29)$$

Napětí větví se volí kladná, jestliže proud ve větvi v daném okamžiku prochází ve směru orientace smyčky a jako záporná, jestliže prochází v opačném směru, jak naznačuje rovnice (30) sestavena se zapojení uvedeného na Obr. 6.4 (b). V tomto zapojení platí, že proudy $I_{3,4} = I_3 = I_4$.

$$U_1 - R_2 \cdot I_2 + U_2 - R_5 \cdot I_4 - R_4 \cdot I_{3,4} - R_3 \cdot I_{3,4} - R_1 \cdot I_1 = 0 \quad (30)$$

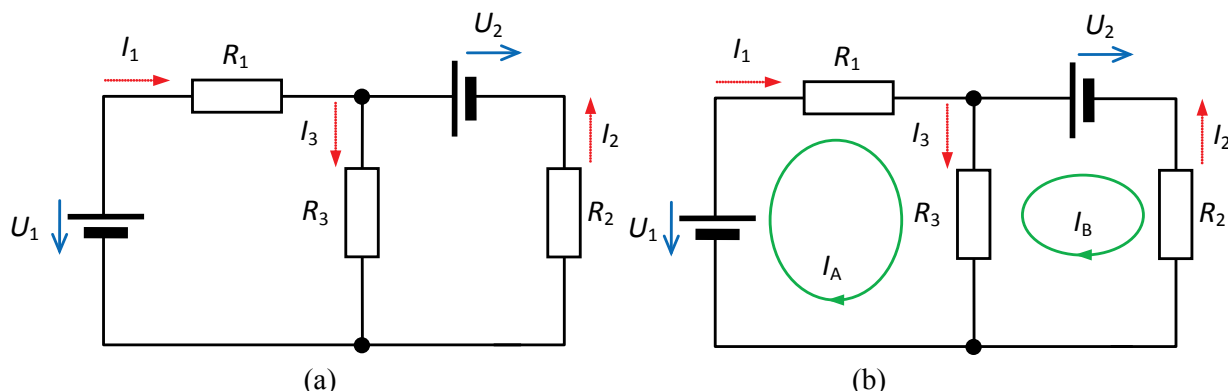


Obr. 6.4 (a) 1. Kirchhoffův zákon (b) 2. Kirchhoffův zákon

1.6.3 Řešení obvodu metodou smyčkových proudů

Metoda smyčkových proudů se používá hlavně při řešení složitějších obvodů a ve své podstatě využívá II. Kirchhoffův zákon. Při řešení metodou smyčkových proudů postupujeme následujícím způsobem:

- V jednotlivých členech obvodu označíme smysl předpokládaných proudů, viz Obr. 6.5 (a).
- Dále volíme smyčky takovým způsobem, aby každá větev obvodu byla alespoň v jedné z nich, viz Obr. 6.5 (b).
- Zvolíme smysl smyčkových proudů, který může být libovolný, ale pro snadnou kontrolu je vhodné je volit souhlasně, viz Obr. 6.5 (b).
- Určíme rovnice pro všechny smyčky podle II. Kirchhoffova zákona. Pro stanovení úbytku napětí na odporech uvažujeme smyčkové proudy, viz rovnice (31) a (32).
- Vypočítáme smyčkové proudy
- Vypočítáme skutečné proudy pomocí smyčkových proudů. V případě, že skutečný proud vyjde se záporným znaménkem, značí to pouze to, že skutečný proud má opačný smysl, než jsme předpokládali.



Obr. 6.5 Příklad obvodu pro sestavení rovnic metodou smyčkových proudů

Proudy v příslušných nezávislých větvích budou přímo rovny příslušným smyčkovým proudům, proudy ve větvích uvnitř obvodu budou dány lineární kombinací smyčkových



proudů. Pro obvod uvedený na Obr. 6.5 platí rovnice (31) a (32) sestavené podle metody smyčkových proudů pro smyčku I_A a I_B .

$$-U_1 + R_1 \cdot I_A + R_3 \cdot (I_A - I_B) = 0 \quad (31)$$

$$U_2 - R_2 \cdot I_B + R_3 \cdot (I_B - I_A) = 0 \quad (32)$$

Řešením soustavy rovnic obou rovnic jsou proudy I_A a I_B . Z těchto proudů se potom určí skutečné rozdělení proudů v daném obvodu, na Obr. 6.5 jsou tyto proudy vyznačeny čárkovaně a platí:

$$I_1 = I_A \quad (33)$$

$$I_2 = -I_B \quad (34)$$

$$I_3 = I_A - I_B \quad (35)$$

Kromě první metody, uvedeně jako metoda postupného zjednodušování, se všechny ostatní metody dají použít pro obvody s libovolným počtem zdrojů. Nakonec si je nutno uvědomit, že všechny v této kapitole uvedené postupy platí i pro okamžité hodnoty napětí a proudů, tedy pro analýzu obvodů v libovolném stavu.

1.6.4 Řešení obvodu metodou uzlových napětí

Tato metoda je založena na použití I. Kirchhoffova zákona. S výhodou ji lze použít u obvodů s převážně paralelně řazenými prvky.

Při řešení metodou uzlových napětí postupujeme následujícím způsobem:

- Zvolíme si referenční uzel tam, kde se stýká největší počet členů a pokud je takových to míst více, pak volíme za referenční uzel jeden pól zdroje napětí, neboť druhý má již známé svorkové napětí.
- Stanovíme všechny proudy v uzlu a určíme rovnice, kde platí vztah (27). Provádíme pro všechny uzly.
- Řešíme soustavu rovnic, kde neznámé jsou uzlová napětí.
- Pomocí uzlových napětí vypočítáme proudy nebo napětí na jednotlivých prvcích obvodu.

Pro ukázkou řešení metodou uzlových napětí opět využijeme schéma zapojení obvodu z Obr. 6.5. Obvod má celkem dva uzly, a to A a B, viz Obr. 6.6. Jako referenční uzel zde volíme uzel B. Obvod má jedno uzlové napětí U_A vzhledem k referenčnímu uzlu B. Podle vztahu (27) stanovíme proudy v uzlu A. Pro uzel A platí:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (36)$$

kde

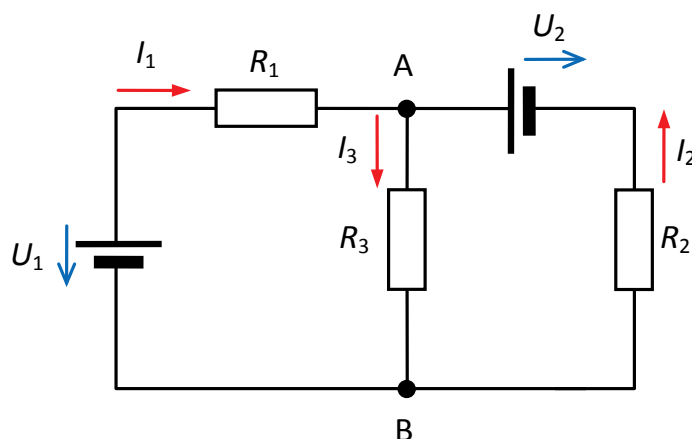
$$I_1 = \frac{U_A - U_1}{R_1}; I_2 = \frac{U_A - U_2}{R_2}; I_3 = \frac{U_A}{R_3} \quad (37)$$

Následně řešíme rovnici pro neznámé uzlové napětí U_A .

$$\frac{U_A - U_1}{R_1} + \frac{U_A - U_2}{R_2} - \frac{U_A}{R_3} = 0 \quad (38)$$

Vyřešením rovnice (38) získáme hodnotu uzlového napětí U_A . Dosazením do jednotlivých rovnic (37) vypočteme skutečné hodnoty a smysl proudů I_1 , I_2 a I_3 .





Obr. 6.6 Příklad obvodu pro sestavení rovnic metodou uzlových napětí

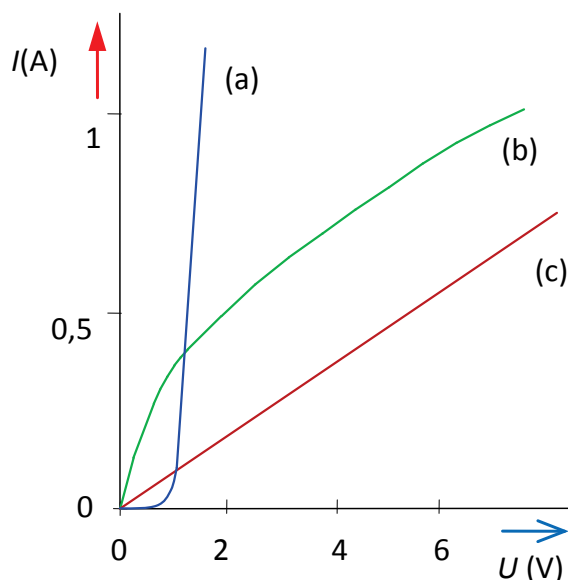
1.7 NELINEÁRNÍ OBVODY

Kromě lineárních prvků, kterými jsme se zabývali v předchozích kapitolách, existují i prvky nelineární. U lineárních prvků je procházející proud přímo úměrný napětí, takže poměr mezi napětím a proudem je konstantní a jejich voltampérovou charakteristiku tvoří přímka, jak naznačuje Obr. 7.1 (c).

Nelineární obvod je každý obvod, který obsahuje alespoň jeden nelineární prvek. U nelineárních prvků je závislost mezi napětím a proudem obecná, není lineární. To znamená, že jejich odpor se mění s přiloženým napětím, potažmo s procházejícím proudem. Jejich voltampérová charakteristika není přímka, jak ukazují Obr. 7.1 (a) a (b). Takové prvky se nazývají nelineární. Ve skutečnosti jsou všechny reálné prvky alespoň mírně nelineární, a to proto, že při průchodu proudem v nich vznikají Jouleovy ztráty - prvek se zahřívá a tím se mění jeho odpor. U většiny prvků můžeme ovšem tuto nelinearitu zanedbat. Jsou ovšem prvky, u kterých nelinearitu zanedbat nemůžeme, nebo ji dokonce využíváme.

Metody řešení nelineárních obvodů se podstatně liší od metod používaných při řešení obvodů s lineárními prvky. Při řešení nelineárních obvodů neplatí princip superpozice. Zpravidla se postupuje tak, že obvod rozdělíme na část s lineárními prvky a na část s nelineárními prvky. Lineární část obvodu nahradíme podle věty o náhradním zdroji napětí (Théveninova poučka) obvodem skutečného zdroje napětí. Nelineární část obvodu zjednodušíme až na jediný nelineární jednohran, který pro skutečný zdroj představuje zátěž.

Pro řešení nelineárních obvodů je možné rovněž použít metodu linearizace v okolí pracovního bodu, metodu náhradního proudového nebo napětěového zdroje, nebo popsat chování prvku matematickou rovnicí.



Obr. 7.1 Voltampérová charakteristika: (a) diody, (b) žárovky, (c) lineárního odporu

1.8 PŘECHODNÉ DĚJE

Pokud elektrický obvod obsahuje prvky, které akumulují energii (cívky a kondenzátory), dojde při spínání (zapínání, vypínání nebo přepínání) tohoto obvodu k přechodnému ději. Z fyzikálních principů plyne, že energie se nemůže měnit skokově, k tomu by byla potřeba zdroj energie o nekonečném výkonu a ten v praxi neexistuje.

V prvcích je akumulována energie, která je svázána s obvodovými veličinami. U cívky je to s proudem, u kondenzátoru s napětím, viz vztahy (14) a (17). Z tohoto důvodu se proud v cívce a napětí na kondenzátoru nemůže měnit skokově.

Prakticky z toho plyne, že například při sepnutí obvodu, ve kterém je cívka (indukčnost) nezačne obvodem téct proud okamžitě, ale bude se postupně zvyšovat z nuly na ustálenou hodnotu.

Při sepnutí obvodu, ve kterém je kondenzátor (kapacita) nedosáhne napětí v obvodu jeho maximální hodnoty okamžitě, ale bude se postupně zvyšovat z nuly na ustálenou hodnotu.

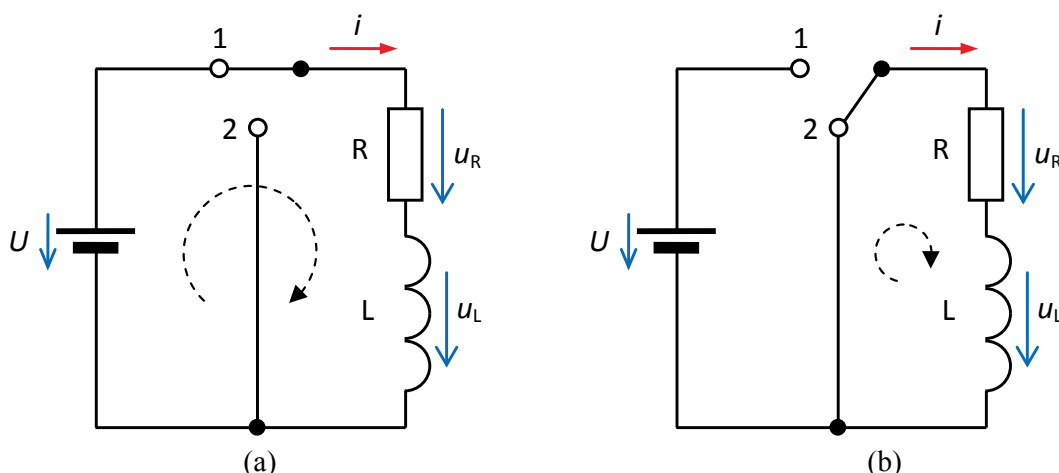
Některé důležité případy přechodných dějů jsou uvedeny dále.

1.8.1 Zapínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)

Obvod, kde je sériově zapojen rezistor a cívka se může v praxi vyskytovat buď jako skutečné spojení rezistoru a cívky, nebo jako reálná cívka, která má odpor a indukčnost. V technické praxi jde o velmi častý případ. Schéma spínaného obvodu je na Obr. 8.1 (a). Napětí u_R , u_L a proud i jsou závislé na čase.

Připojíme-li obvod RL na zdroj stejnosměrného napětí, tj. přepínač do polohy 1 jak je ukázáno na Obr. 8.1 (a), začne cívkou procházet proud, který vytvoří magnetické pole cívky. V cívce se indukuje napětí, které je úměrné časové změně indukčního toku

$$u_L = N \frac{d\phi}{dt} \quad (39)$$



Obr. 8.1 (a) Zapínání sériového R-L obvodu, (b) Vypínání sériového R-L obvodu

Před sepnutím spínače neprotéká obvodem žádný proud. Proud je proto úměrný rozdílu obou těchto napětí a ustálí se teprve, když se časová změna indukčního toku rovná nule. Po sepnutí spínače do polohy 1 bude podle II. Kirchhoffova zákona platit:

$$-U + u_R + u_L = 0 \quad (40)$$

Napětí u_R a u_L vyjádříme jako funkci proudu z Ohmova zákona a vztahu (13).

$$-U + R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} = 0 \quad (41)$$

Upravením rovnice (41) dostaneme vztah (42).

$$i + \frac{L}{R} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{U}{R} \quad (42)$$

Rovnice (42) je lineární diferenciální rovnice s konstantní pravou stranou. Při počátečních podmínkách, kdy proud v čase $t = 0$ je nulový, pro ni platí řešení:

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (43)$$

Kde U/R je ustálená hodnota proudu, které se dosáhne v čase $t = \infty$ (prakticky za velmi dlouhou dobu). Časová konstanta obvodu τ je dána poměrem indukčnosti a odporu, jak uvádí vztah (44).

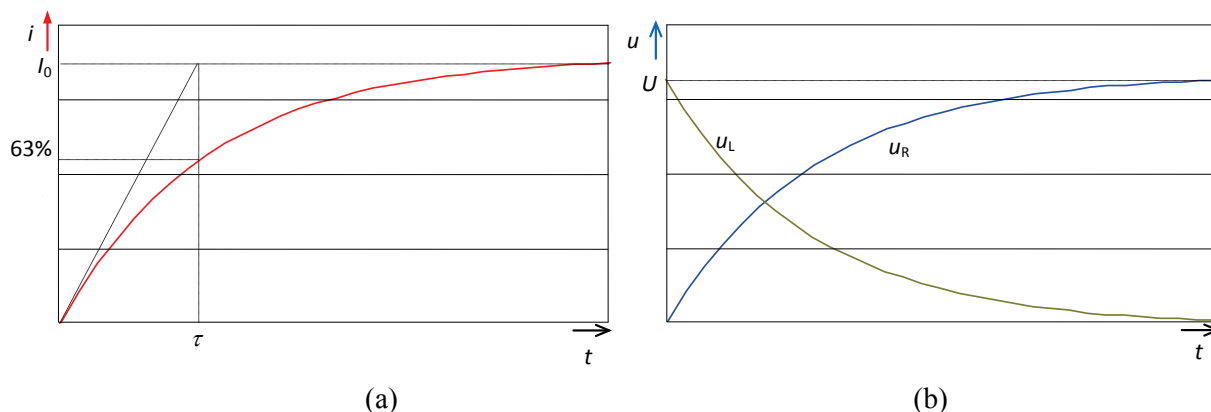
$$\tau = \frac{L}{R} \quad (44)$$

Z časového průběhu proudu můžeme vypočítat i průběhy napětí na rezistoru, vztah (45) a na cívce, rovnice (46).

$$u_R = R \cdot i = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (45)$$

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (46)$$

Časové průběhy proudu a napětí jsou ukázány na Obr. 8.2. Proud I_0 představuje maximální proud, který může procházet obvodem a je dán poměrem U/R .



Obr. 8.2 Průběhy napětí a proudu při spínání R-L obvodu

Na Obr. 8.2 (a) je graficky naznačena časová konstanta τ , což je doba, za kterou by přechodný děj dosáhl ustáleného stavu, kdyby stále probíhal stejnou rychlostí, jako na počátku přechodného děje. Prakticky to znamená, že nakreslíme-li v počátku tečnu k některé veličině přechodného děje, tam kde se tečna protne s její ustálenou hodnotou, odpovídá to času τ (viz čárkované úsečky).

Jiným způsobem můžeme určit z grafu τ jako čas, ve kterém dosáhne veličina 63,2 % ustáleného stavu. Prakticky považujeme přechodný děj za ukončený za dobu 3 až 5 τ .

Praktický význam přechodného děje při zapínání R-L obvodu:

Přechodný děj způsobuje, že proud v takovém obvodu narůstá pozvolna a musíme počítat s určitým zpožděním, které může být někdy zanedbatelné, jindy ovšem ne. Příkladem jsou cívky relé nebo budící vinutí stejnosměrných motorů, kde může časová konstanta dosahovat hodnot až jednotky sekund.

1.8.2 Vypínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)

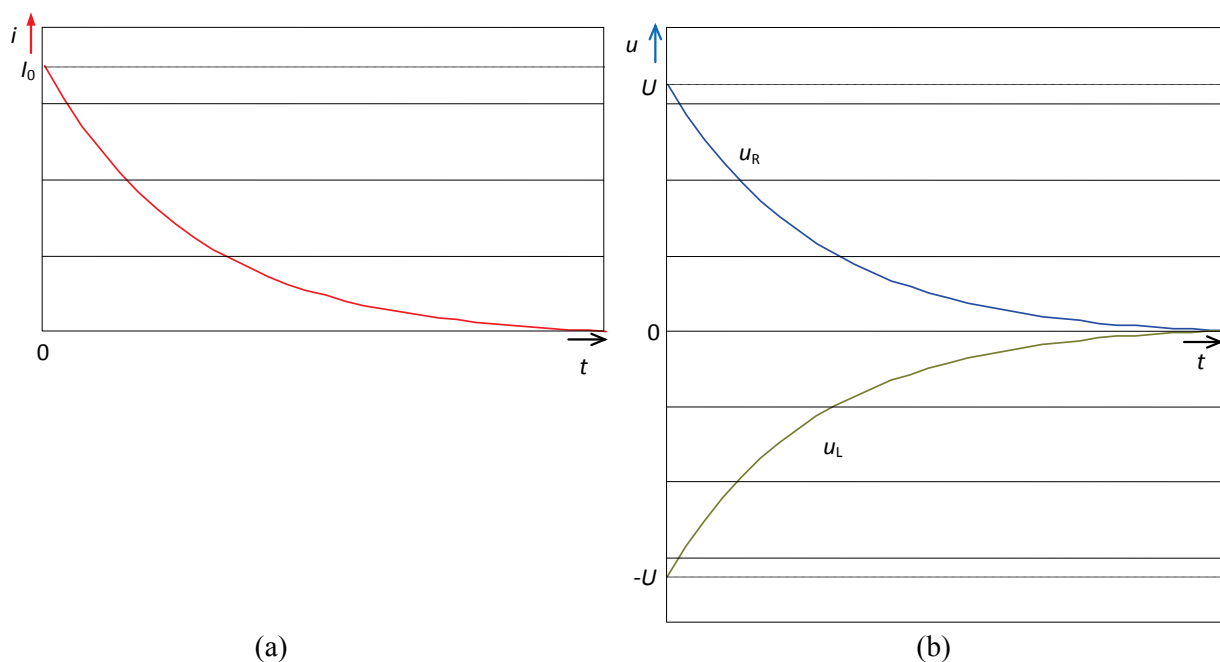
Při přepnutí přepínače z polohy 1 do polohy 2, viz Obr. 8.1 (b), se proud v obvodu a napětí na cívce a rezistoru mění podle těchto vztahů:

$$i = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (47)$$

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (48)$$

$$u_L = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (49)$$





(a) (b)
Obr. 8.2 Průběhy napětí a proudu při vypínání R-L obvodu

Předpokládejme, že před vypnutím prochází obvodem ustálený proud $I_0 = U/R$. Při rozepnutí spínače by teoreticky došlo k okamžitému přerušení tohoto proudu. To by způsobilo na cívce naindukování nekonečně velkého napětí, jak naznačuje vztah (50).

$$u_i = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{I_0}{0} = \infty \quad (50)$$

V praxi je to nemožné. Na cívce se při vypnutí naindukuje tak vysoké napětí, že mezi kontakty spínače dojde k přeskoku jiskry - oblouk. Jiskra způsobí pokračování proudu, takže ve skutečnosti nezanikne v nekonečně krátkém čase a indukované napětí nebude nekonečné. Ale i v tomto případě může indukované napětí narušit izolaci, případně zničit polovodičové prvky v obvodu. Z těchto důvodů se musí omezovat. Nejčastějším způsobem omezení přepětí je připojení některých z následujících prvků paralelně k cívce - odpor, kondenzátor, případně jejich kombinace nebo použitím zpětné diody.

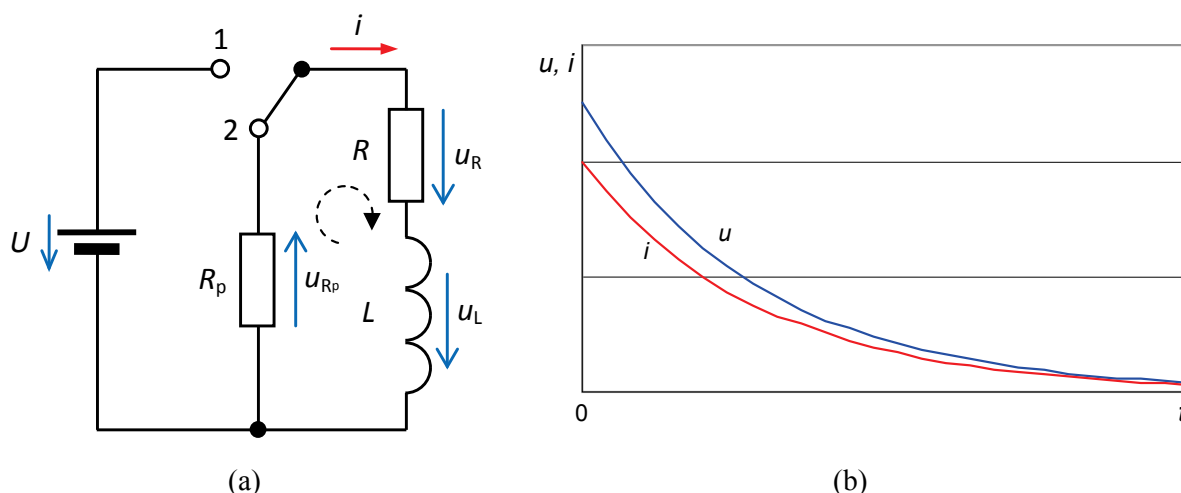
Vypočítat velikost přepětí při vypnutí v obvodu podle schématu na Obr. 8.1 (b) je prakticky nemožné, neboť neumíme jednoduše matematicky popsat jiskru mezi kontakty spínače.

Na Obr. 8.3 je obvod s odporem pro omezení přepětí při vypínání, kde napětí lze vypočítat. Jestliže byl před vypnutím obvod v ustáleném stavu, cívkou protékal proud $I_0 = U/R$. Po vypnutí bude mít proud a napětí průběhy podle vztahů:

$$i = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (51)$$

$$u_{R_p} = R_p \cdot i = U \cdot \frac{R_p}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (52)$$

$$\tau = \frac{L}{R_p + R} \quad (53)$$



Obr. 8.3 (a) Schéma vypínání sériového R-L obvodu s omezovacím odporem R_p , (b) Průběhy napětí a proudu při vypínání sériového R-L obvodu s omezovacím odporem R_p

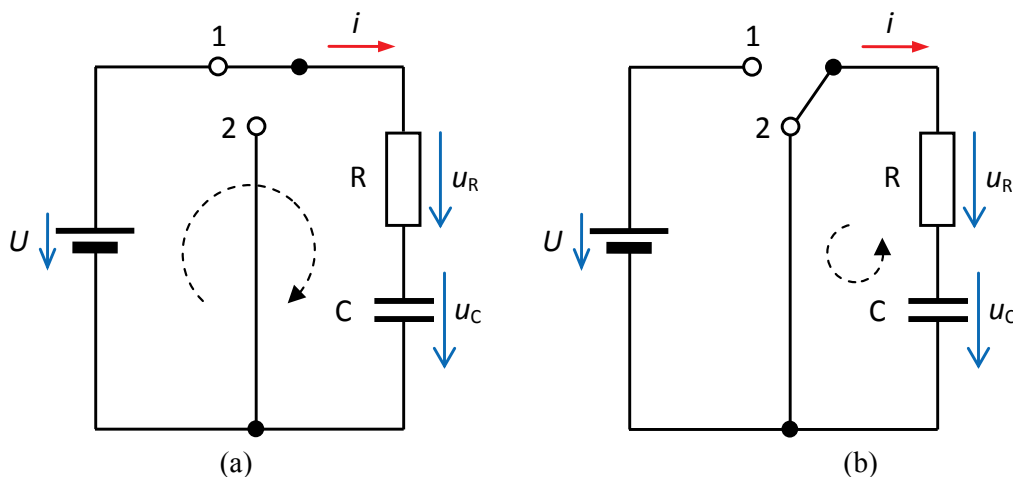
V prvním okamžiku po vypnutí je napětí u_{Rp} tolikrát vyšší než napětí zdroje, kolikrát je větší hodnota R_p než hodnota odporu R . Pokud by se odpor R_p blížil nekonečnu, blíží se také napětí u_{Rp} v prvním okamžiku nekonečnu a jde vlastně o případ podle rovnice (50). Časové průběhy proudů a napětí jsou na Obr. 8.3 (b).

Praktický význam přechodného děje při vypínání R-L obvodu:

Při vypínání vzniká napěťová špička, která by mohla poškodit izolaci nebo další prvky obvodu, proto ji většinou musíme omezovat paralelním odporem, kondenzátorem, nebo jejich kombinací, případně zpětnou diodou. Tento jev se však také využívá k vytváření impulsu vysokého napětí, například při rozsvěcování klasických zářivkových svítidel, nebo v zapalování zážehových motorů.

1.8.3 Zapínání obvodu R-C (odpor a kapacita)

Po zapnutí přepínače do polohy 1, tak jak je uvedeno na Obr. 8.4 (a), začne obvodem procházet proud a kondenzátor C se začíná nabíjet. Velikost proudu je omezena odporem R . V čase $t = 0$ představuje nenabitý kondenzátor zkrat a proud je maximální $I_0 = U/R$.



Obr. 8.4 (a) Zapínání sériového R-C obvodu, (b) Vypínání sériového R-C obvodu

S rostoucím napětím na kondenzátoru se proud zmenšuje a má nelineární průběh, který popisuje rovnice (54).

$$i = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (54)$$

Napětí na kondenzátoru v čase t popisuje vztah (55) a napětí na rezistoru potom rovnice (56).



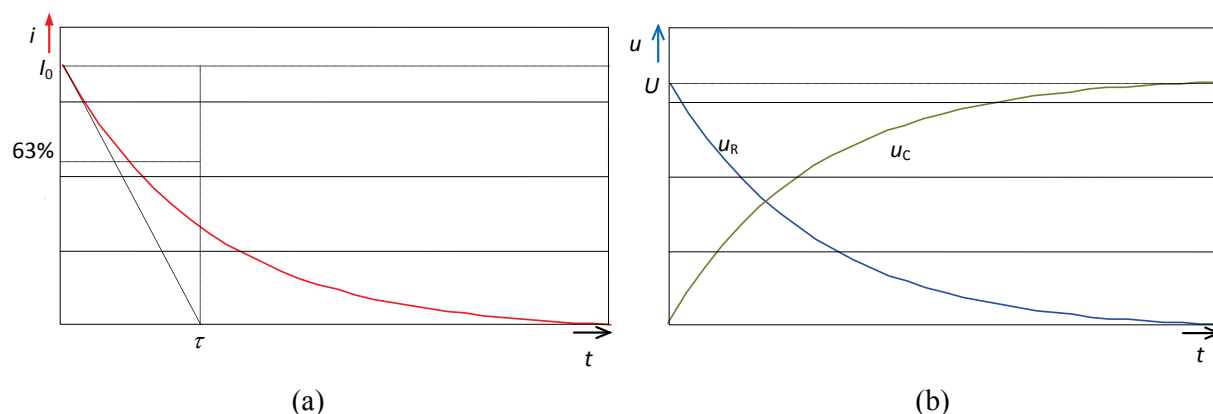
$$u_C = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (55)$$

$$u_R = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (56)$$

Časová konstanta obvodu τ je dána součinem hodnoty kapacity a odporu, jak uvádí vztah (57).

$$\tau = RC \quad (57)$$

Na Obr. 8.5 (a) je znázorněn průběh nabíjecího proudu, napětí na rezistoru a napětí na kondenzátoru.



Obr. 8.5 Průběhy napětí a proudu při zapínání R-C obvodu

Praktický význam přechodného děje při zapínání R-C obvodu:

Proud procházející obvodem je v okamžiku sepnutí spínače omezen pouze velikostí odporu. Ve skutečnosti nemusí být v obvodě zapojen žádný rezistor a odpor je dán pouze vnitřním odporem zdroje, který může být velmi malý. Potom připojení velkého kondenzátoru k takovému zdroji může způsobit velkou proudovou špičku, která by mohla například spálit pojistku. V takovém případě by bylo nutné připojit do obvodu navíc omezovací odpor, alespoň dočasně, po dobu sepnutí.

1.8.4 Vypínání obvodu R-C (odpor a kapacita)

Při přepnutí přepínače z polohy 1 do polohy 2, tak jak je uvedeno na Obr. 8.4 (b), se kondenzátor začne vybíjet přes rezistor R. Vybíjecí proud má opačný smysl a je dán vztahem (58).

$$i = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (58)$$

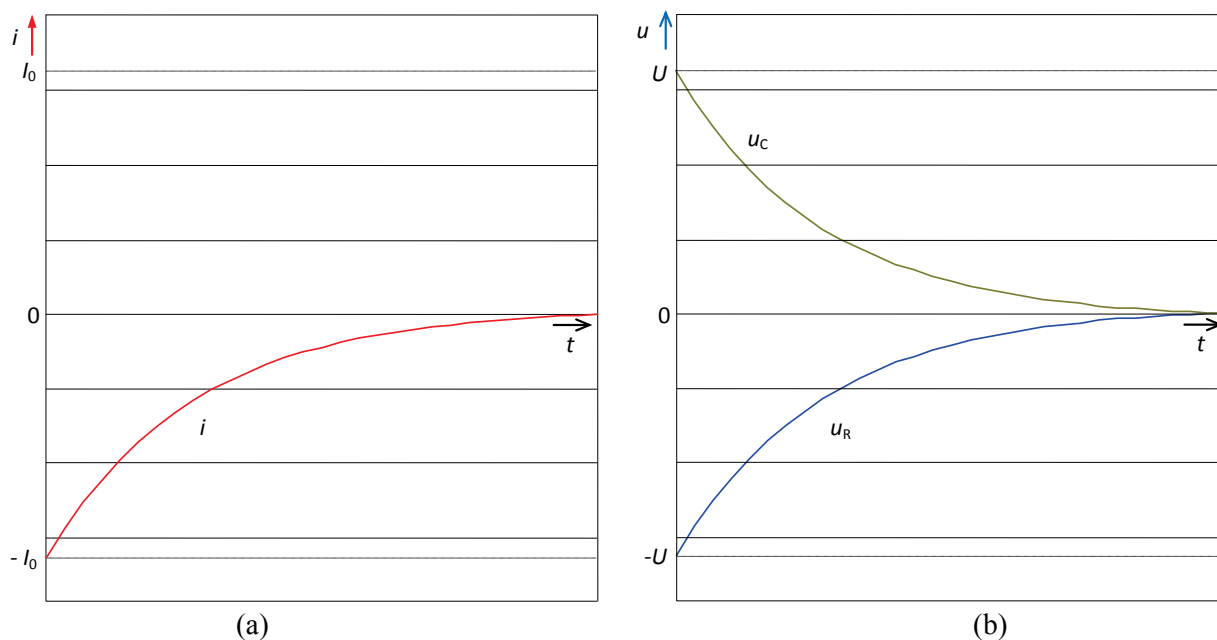
Napětí na kondenzátoru v čase t popisuje vztah (59) a napětí na rezistoru potom rovnice (60).

$$u_C = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (59)$$

$$u_R = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (60)$$

Na Obr. 8.6 (a) je znázorněn průběh vybíjecího proudu, průběh napětí na rezistoru a na kondenzátoru je zobrazen na Obr. 8.6 (b).





Obr. 8.6 Průběhy napětí a proudu při vypínání R-C obvodu

Praktický význam přechodného děje při vypínání R-C obvodu:

Přechodný děj při vybíjení kondenzátoru nastává v usměrňovačích s filtračním kondenzátorem. Pokud by byl usměrňovač zatížen ideálním odporem, vybíjel by se kondenzátor exponenciálně, jak je naznačeno na Obr. 8.6 (b). V usměrňovači dochází při každé periodě k nabití kondenzátoru a podle typu usměrňovače i vícekrát. Přechodný děj se tam tedy mnohokrát za vteřinu opakuje.

1.9 LITERATURA

Blahovec A.: Elektrotechnika III, Informatorium spol. s.r.o, druhé vydání, Praha 1997.

Doleček J.: Moderní učebnice elektroniky 1. díl, BEN – technická literatura, první vydání, Praha 2005.

Mlčák T., Kolář V.: Elektrické obvody stejnosměrného proudu, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Leden 2006.

Internet

http://fei1.vsb.cz/kat420/index_stary.html

<http://home.tiscali.cz/cz399521/kando/DCvsAC.htm>

