Katedra obecné elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB - TU Ostrava

1. ELEKTRICKÉ OBVODY STEJNOSMĚRNÉHO PROUDU

Leden 2006

Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D.
Ing. Václav Kolář, Ph.D.

2.1 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“ (kap. 2.3.2). Ale vlastní podstatou těchto dvou zákonů se staly až později, v roce 1873, formulované Maxwellovy rovnice elektrodynamiky.

Protože autoři tohoto učebního textu předpokládají, že základní teoretické poznatky o elektrickém proudu, o teorii elektromagnetického pole včetně základních zákonů byly už probírány ve fyzice, nezabývají se zde jimi.

2.2 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.

a) 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.

b) 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 - obsahuje pouze lineární prvky,

obvody nelineární - tj. závislost napětí na proudu je dána nelineární charakteristikou.

2.2.1 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. Má pouze dva vývody a jeho vlastnosti jsou dány dvojicí základních elektromagnetických veličin - ***napětím*** a ***proudem***. K označení dvoujpólů požíváme dohodnuté schématické značky a čítací šipky, které určují orientaci jednotlivých veličin. Na obr. 2.1 jsou uvedeny jednoduché příklady značení pro pasivní i aktivní prvky včetně napětí a proudů v daném obvodu.

Co je tedy aktivní a pasivní prvek?

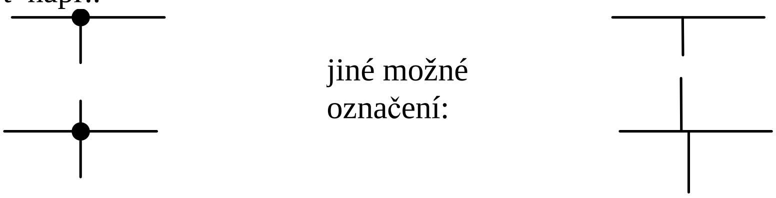
a) pasivní prvek - je takový prvek, který je spotřebičem elektrické energie, a tedy přeměňuje elektrickou energii na jinou formu energie,např. tepelnou. V náhradním schématu mají vždy šipky napětí a proudu shodný směr.

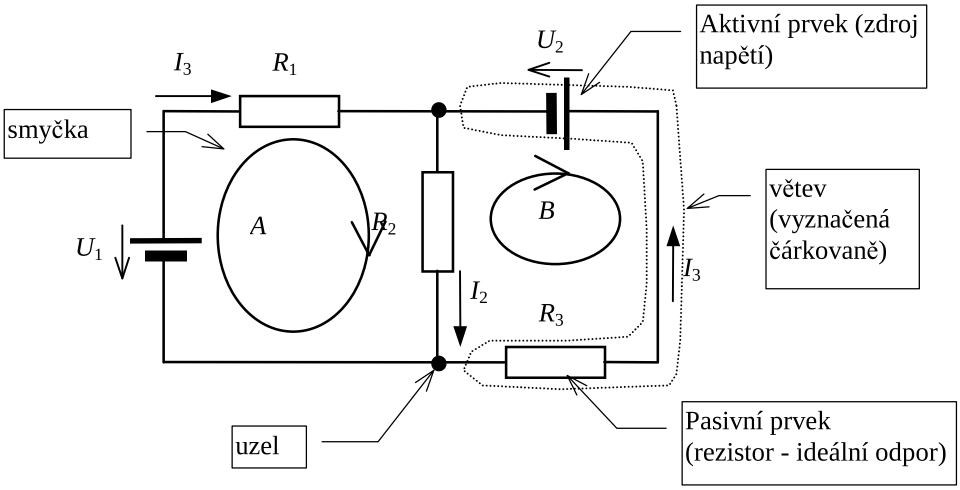
b) aktivní prvek - je zdrojem elektrické energie, tedy přeměňuje jiný druh energie na energii elektrickou. Může být prakticky dvojí - napěťový a proudový. O napěťovém se zmíníme podrobněji v podkapitole 2.2.2 . (Proudovým se nebudeme zabývat.)

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 (ne vždy se to však podaří zcela dokonale).

Každý dvojpól (ať už aktivní nebo pasivní) se zapojuje do obvodu dvěma svorkami (póly). Spojení dvou nebo více vodičů se nazývá uzel, část obvodu mezi dvěma uzly je větev, viz. obr. 2.1 .

Uzly mohou být např.:





Obr.2.1 - Topologie elektrického obvodu

Libovolně uzavřený okruh v daném náhradním schéma obvodu se nazývá smyčka. Na obr. 1.1 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). Tedy daný obvod lze popsat tolika rovnicemi pro proudy, kolik má obvod uzlů a tolika pro napětí, kolik má smyček.

2.2.2 Aktivní prvky obvodu

Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, aktivním prvkem (dvojpólem) 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 článek).

Ideální zdroj napětí je takový zdroj, jehož napětí nezávisí na odebíraném proudu. Na obr. 2.2a je uvedena schématická značka a voltampérová charakteristika zdroje.

Reálný zdroj napětí, v těchto zdrojích vznikají ztráty, a proto je jeho napětí závislé na 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 (obr. 2.2b). Svorkové napětí zdroje je dáno vztahem 2.1.

$$U = U_i - \Delta U_i \qquad (2.1)$$

Pokud je vnitřní odpor zdroje konstantní bude i úbytek napětí na něm úměrný proudu, lze ho vypočítat podle Ohmova zákona podle vztahu 2.2.

$$\Delta U_i = R_i \cdot I \qquad (2.2)$$

Zdroj s malým vnitřním odporem má malý úbytek napětí. Jeho svorkové napětí klesá jen málo se zatížením a takovýto zdroj se nazývá <u>tvrdý</u>. Pokud je ale úbytek velký, to znamená, že vnitřní odpor je také velký, pak se jedná o zdroj <u>měkký</u>. U měkkého zdroje se bude svorkové napětí značně měnit se zatížením.

Každý zdroj napětí je charakterizován třemi základními provozními stavy:

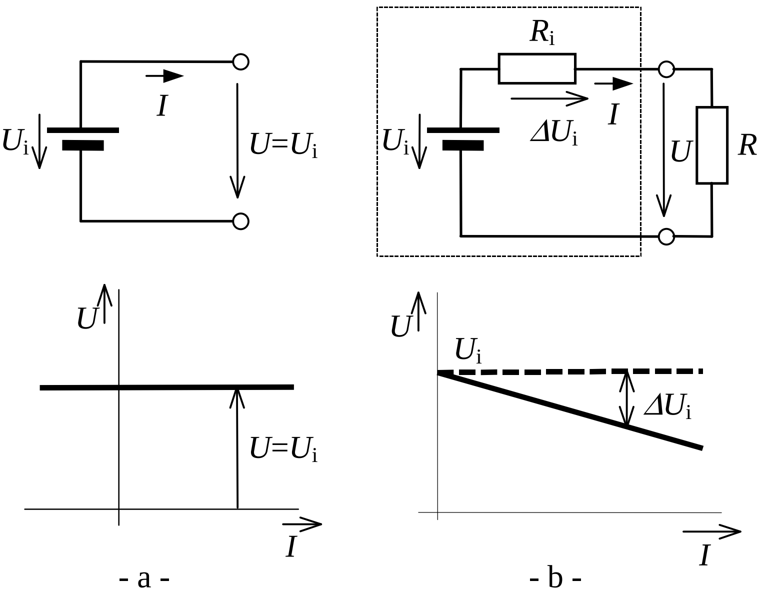
<u>*1. stav naprázdno*</u> - svorky zdroje jsou rozpojeny a zdrojem neprotéká proud.

$$I = 0,$$
$$U = U_0 = U_i \qquad (2.3)$$

<u>*2. stav nakrátko*</u> - svorky zdroje jsou spojeny nakrátko. Svorkové napětí je nulové. Ve zdroji protéká největší možný proud - proud nakrátko, daný vnitřním napětím a vnitřním odporem viz. vztah 2.4.

$$U = 0,$$
$$I = I_k = \frac{U_i}{R_i} \qquad (2.4)$$

<u>*3. stav při zatížení*</u> - na svorky je připojen spotřebič, např. lineární pasivní dvojpól ***R***. Proud je pak dán vztahem 2.5.



Obr. 2.2 - Zdroj napětí
-a- ideální, -b- reálný

$$I = \frac{U_i}{R_i + R} \qquad (2.5)$$

2.2.3 Pasivní prvky elektrického obvodu

Mezi pasivní prky řadíme :
rezistor (-odporník, odpor),
induktor (-cívka),
kapacitor (-kondenzátor).
Tyto pasivní prvky lze opět rozdělit na ideální a reálné.

a)*Rezistor* (ideální odpor) je prvek jehož jediným parametrem je odpor $\boldsymbol{R}$. V tomto prvku dochází pouze k přeměně elektrické energie na tepelnou. Definičním vztahem je zde tzv. „OHMŮV ZÁKON“:

$$U = R \cdot I \qquad (2.6)$$

Voltampérová charakteristika spolu se značkou rezistoru je na obr. 2.3. Převrácená hodnota odporu se nazývá vodivost $\boldsymbol{G}$.

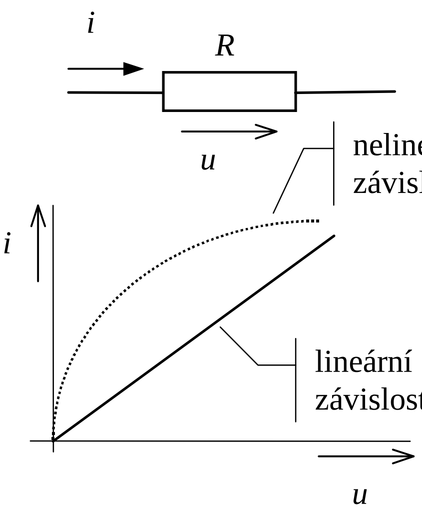
Pro okamžitou hodnotu výkonu platí rovnice 2.7.

$$P = U \cdot I \geq 0 \qquad (2.7)$$

Pokud se využije výraz (2.6) pak bude výkon dán vztahem 2.8.

$$P = \frac{U^2}{R} = R \cdot I^2 \qquad (2.8)$$

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



Obr.2.3 - Značka a voltampérová charakteristika rezistoru

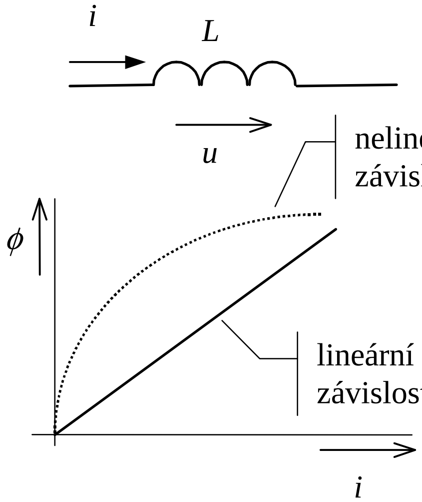
b)*Induktor* (ideální cívka) je prvek v němž se akumuluje a vydává jen energie magnetického pole. V ideální cívce tedy nevznikají tepelné ztráty. Velikost energie magnetického pole je charakterizována magnetickým tokem a proudem. Jediným parametrem induktoru je indukčnost $\boldsymbol{L}$. Pro lineární závislost tedy platí výraz 2.9.

$$\Phi = L.I \qquad (2.9)$$

Pro vztah mezi proudem a napětím platí vztah 2.10.

$$u = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \qquad (2.10)$$

pozn. malým písmenem se značí veličina proměnná v čase, např. „*i*“ ve vztahu 2.10



Obr. 2.4. - Značka a weberampérová charakteristika induktoru

Magnetickou energii akumulovanou v induktoru lze vyjádřit vztahem 2.11.

$$E_{\mathrm{M}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi^2}{L} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \qquad (2.11)$$

Schématická značka induktoru a závislost magnetického toku na proudu jsou uvedeny na obr.2.4.

c)*<u>Kapacitor</u>* (ideální kondenzátor) je prvek v němž se akumuluje jen energie elektrického pole, přičemž nevznikají tepelné ztráty. Jediným parametrem je <u>kapacita</u> ***C*** . Pro lineární závislost pak platí vztah 2.12 mezi napětím a nábojem.

$$Q = C \cdot U \qquad (2.12)$$

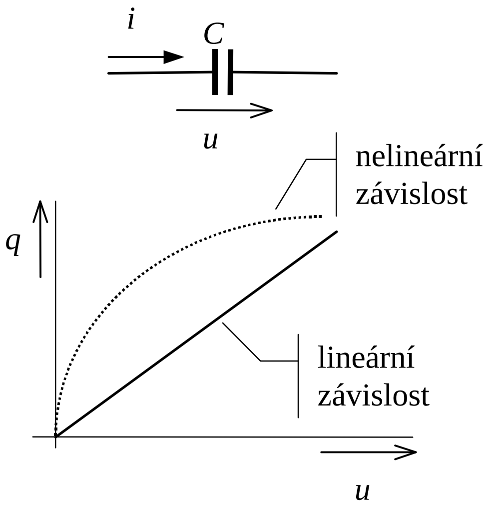
Ze zákona zachování elektrického náboje lze odvodit vztah 2.13 mezi proudem a napětím na kapacitoru.

$$i = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \qquad (2.13)$$

Pro energii elektrického pole nashromážděnou v kapacitoru platí vztah 2.14.

$$E_{\mathrm{E}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \qquad (2.14)$$

Schématická značka kapacitoru a závislost náboje na napětí jsou uvedeny na obr. 2.5.

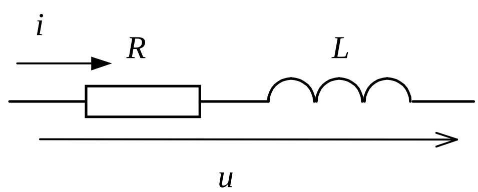


Obr.2.5 - Značka a coulombvoltová charakteristika kapacitoru

Je nutno si však uvědomit, že pro postižení vlastností reálného prvku nám ve většině případů nepostačuje použití pouze výše uvedených ideálních prvků. Musíme tedy přistoupit k vytvoření <u>náhradního schéma</u>. Toto se týká cívky (induktoru) a kondenzátoru (kapacitoru).

Každá *<u>reálná cívka</u>* je totiž navinuta z vodiče o určitém počtu závitů. Tento vodič má svůj průřez a délku a tedy i ohmický odpor. Proto náhradním schématem reálné cívky je jak odpor, tak indukčnost - viz. obr. 2.6. Pak pro svorkové napětí takovéhoto dvojpólu platí vztah 2.15.

$$u = R \cdot i + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \qquad (2.15)$$



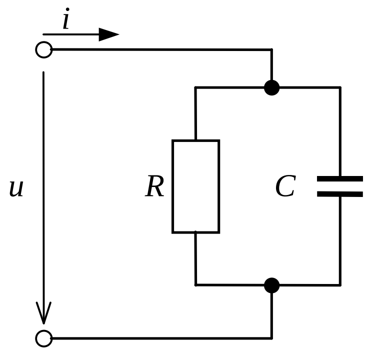
Obr.2.6 - Náhradní schéma reálné cívky

Obdobný případ nastane i pro *<u>reálný kondenzátor</u>*. Každý kondenzátor má totiž určitý svod. Tedy náhradní schéma je v provedení zapojení paralelního odporu a kapacity - viz. obr.2.7 . Rovnice tohoto dvojpólu bude mít pak tvar :

$$i = \frac{u}{R} + C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \qquad (2.16)$$

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.



Obr.2.7 - Náhradní schéma reálného kondenzátoru

2.3 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, induktory a kapacitory se zde neuplatní (viz. kap.2.2.3).

Metody řešení lineárních elektrických obvodů lze rozdělit na :

1. metoda postupného zjednodušování obvodu,
2. řešení obvodu pomocí Kirchhoffových zákonů,
3. metoda smyčkových proudů,
4. metoda uzlových napětí,
5. metoda řezů,
6. 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“, „Kirchhofových zákonů“ a „smyčkových proudů“.

2.3.1 Metoda postupného zjednodušování obvodu

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 podrobněji řečeno dále.

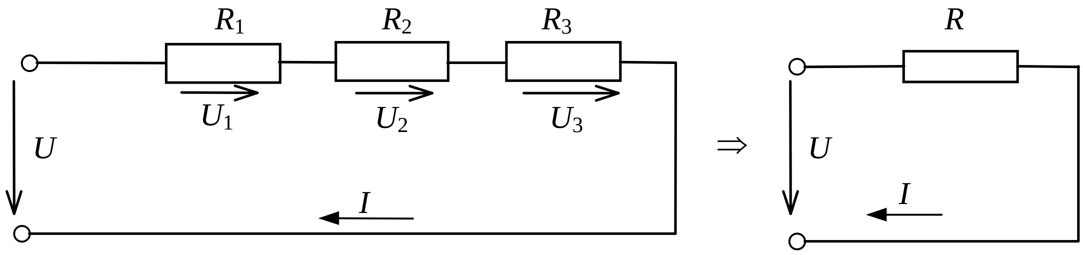
Vlastní řešení daného obvodu se pak řídí následujícími zásadami:

a) Rezistory v sérii.

Zapojením několika pasivních dvojpólů - rezistorů do série (t.j. za sebou) podle obr. 2.8, dostaneme obvod, který lze nahradit jedním ekvivalentním rezistorem o velikosti odporu dle vztahu 2.17 .

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \qquad (2.17)$$

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



Obr. 2.8. - Rezistory v sérii

Napětí na jednotlivých dvojpólech je dáno vztahy 2.18 a výsledné napětí - napětí zdroje je pak dáno součtem úbytků napětí na jednotlivých dvojpólech - vztah 2.19 .

$$U_1 = R_1 \cdot I \\ U_2 = R_2 \cdot I \\ U_3 = R_3 \cdot I \qquad (2.18)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \qquad (2.19)$$

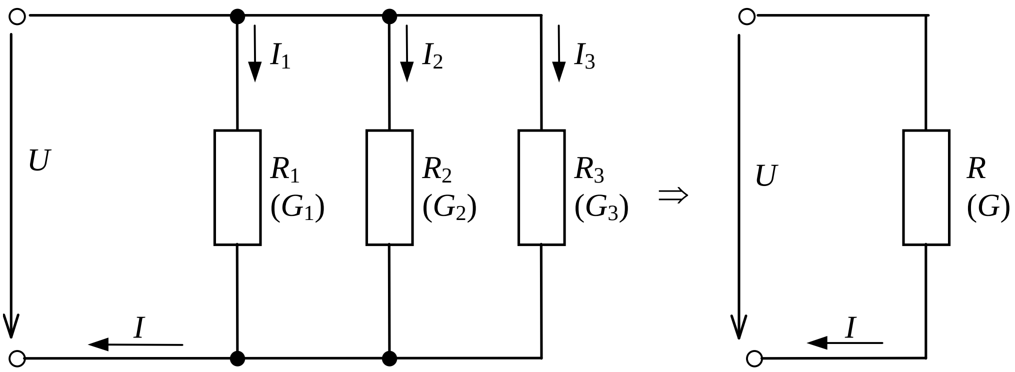
Obecně je výsledný ekvivalentní odpor sériového zapojení rezistorů dán vztahem 2.20.

$$R = \sum_{x=1}^{n} R_x \qquad (2.20)$$

<u>Při sériovém řazení rezistorů se vždy sčítají jejich odpory.</u>

b) <u>Rezistory paralelně.</u>

Rezistory zapojené paralelně (vedle sebe) podle obr. 2.9, mají jedno společné napájecí napětí **U**, ale celkový napájecí proud **I** se rozděluje v poměru odporů (vodivostí) jednotlivých rezistorů (vztah 2.21) paralelního obvodu.



Obr. 2. 9. Rezistory paralelně

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \cdot (G_1 + G_2 + G_3) = U \cdot G = \frac{U}{R} \qquad (2.21)$$

Výsledná vodivost určuje svou převrácenou hodnotou odpor ekvivalentního náhradního rezistoru.

$$G = \sum_{x=1}^{n} G_x \,, \quad \frac{1}{R} = \sum_{x=1}^{n} \frac{1}{R_x} \qquad (2.22)$$

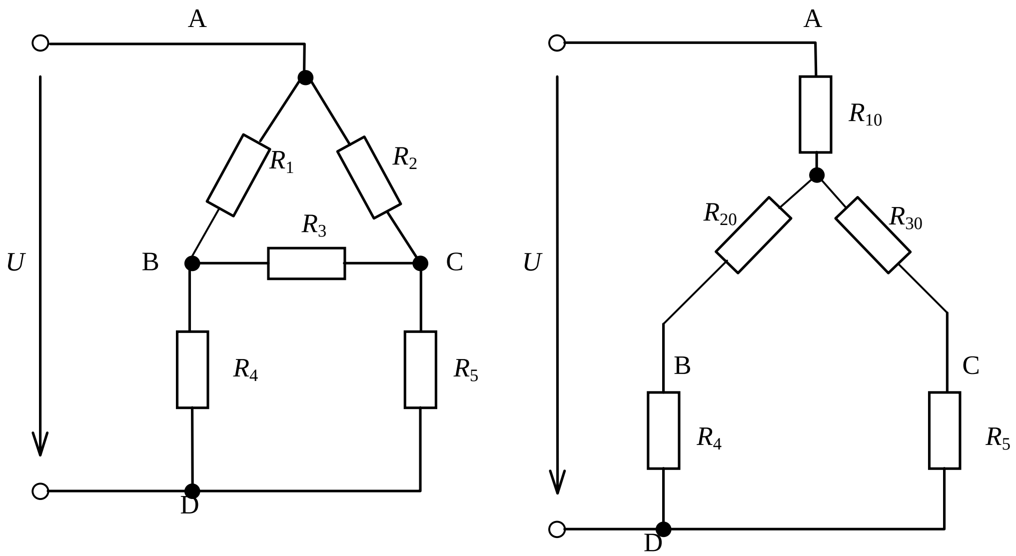
<u>Při paralelním spojením rezistorů se sčítají jejich vodivosti.</u>

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. 2.10 . Při řešení zde nelze zvolit ani jednu z výše popsaných způsobů - 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 (viz. obr. 2.10), 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 2.23. Nahrazujeme-li hvězdu trojúhelníkem používáme pro výpočet ekvivalentních odporů vztahy 2.24 .

$$R_{10} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, R_{20} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}, R_{30} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \tag{2.23}$$

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{10} + R_{20} + \frac{R_{10} \cdot R_{20}}{R_{30}} \\ R_2 &= R_{10} + R_{30} + \frac{R_{10} \cdot R_{30}}{R_{20}} \\ R_3 &= R_{20} + R_{30} + \frac{R_{20} \cdot R_{30}}{R_{10}} \end{aligned} \tag{2.24}$$



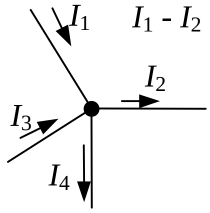
Obr.2.10 - Transfigurace obvodu zapojeného do trojúhelníka (Δ) na obvod zapojený do hvězdy (Y)

2.3.2 Řešení obvodu Kirchhoffovými zákony

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

I. Kirchhoffův zákon - je definován takto : „*součet okamžitých hodnot proudů všech větví obvodu spojených s daným uzlem je roven nule*“ (zpravidla volíme proudy vstupující do uzlu jako kladné a proudy vystupující z uzlu jako záporné) - podle obr. 2.11 . Obecně lze pro ***n*** proudů v uzlu napsat obecnou rovnici :

$$\sum_{x=1}^{n} I_x = 0 \qquad (2.25)$$



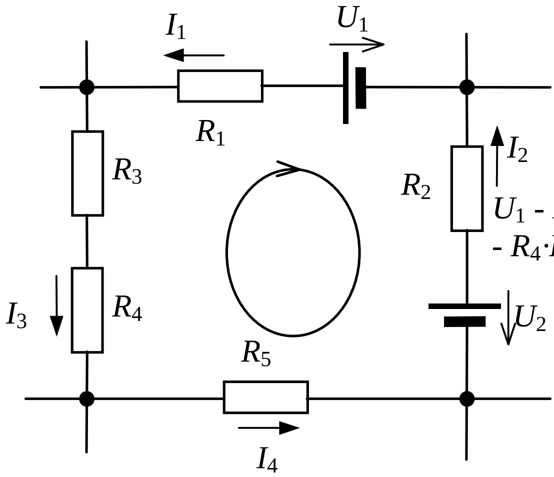
$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$

Obr.2.11 - I.Kirchhoffův zákon

II. Kirchhoffův zákon - je definován takto : „*součet okamžitých hodnot napětí ve větvích libovolné uzavřené smyčky elektrického obvodu je roven nule*“ (napětí větví se volí kladná, jestliže proud ve větvi v daném okamžiku prochází ve smyslu orientace smyčky a jako záporná, jestliže prochází v opačném směru) - podle obr. 2.12 .

Obecně lze II. Kirchhoffův zákon popsat obecnou rovnicí 2.26, která platí pro ***n***-úbytků napětí v uzavřené smyčce obvodu.

$$\sum_{x=1}^{n} U_x = 0 \quad (2.26)$$



$U_1 - R_2 \cdot I_2 + U_2 - R_5 \cdot I_4 -$
$- R_4 \cdot I_3 - R_3 \cdot I_3 - R_1 \cdot I_1 = 0$

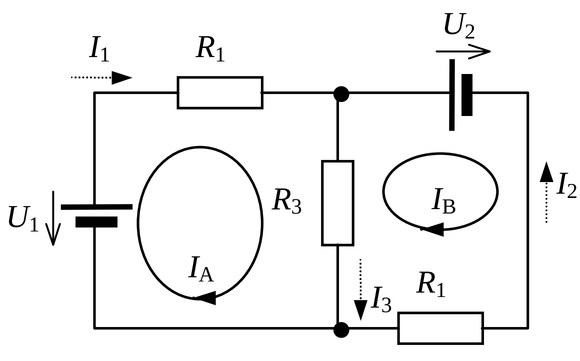
Obr.2.12 - II. Kirchhoffův zákon

2.3.3 Řešení obvodu metodou smyčkových proudů

Metoda smyčkových proudů vychází ve své podstatě z II. Kirchhoffova zákona. Je založena na tom, že přiřadíme systému nezávislých smyček fiktivní smyčkové proudy a sestavíme na základě II. Kirchhoffova zákona tolik rovnic, kolik máme nezávislých smyček. Při sestavování se řídíme těmito zásadami: větvové proudy nezávislých větví budou přímo rovny příslušným smyčkovým proudům,

proudy ve větvích uvnitř obvodu budou dány lineární kombinací smyčkových proudů.

Jednoduchý příklad sestavení rovnic podle této metody je na obr. 2.13 . Rovnice pro tento obvod jsou vztahy (2.27).



Obr.2.13 - Příklad obvodu pro sestavení rovnic metodou smyčkových proudů

$$R_1 \cdot I_A + R_3 \cdot (I_A - I_B) - U_1 = 0$$
$$R_3 \cdot (I_B - I_A) + U_2 + R_2 \cdot I_B = 0 \qquad (2.27)$$

Řešením soustavy rovnic (2.27) jsou proudy I_A a I_B, z těchto proudů se pak určí skutečné rozdělení proudů v daném obvodu (na obr. 2.15 jsou označeny čárkovaně) :

$$I_1 = I_A, \qquad I_2 = -I_B, \qquad I_3 = I_A - I_B \qquad (2.28)$$

Kromě první metody (metody postupného zjednodušování) se všechny ostatní metody dají použít pro obvody s libovolným počtem zdrojů.

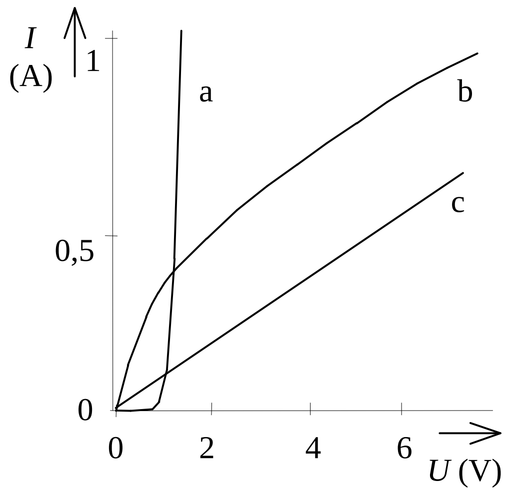
Nakonec si je nutno uvědomit, že všechny v této kapitole uvedené postupy platí i pro okamžité hodnoty napětí a proudů, tedy pro analýzu obvodů v libovolném stavu.

2.4 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. Poměr mezi napětím a proudem (což je vlastně odpor) je konstantní, jejich voltampérová charakteristika je přímka, viz- obr. 2.14.

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, viz. obr. 2.14.



Obr.2.14 - Voltampérová charakteristika
a) diody b) žárovky c)lineárního odporu

Takové prvky se nazývají nelineární. Ve skutečnosti jsou všechny reálné prvky alespoň mírně nelineární a to proto, že při průchodu proudu 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 (usměrňování, zesilování, stabilizace ap.).

Řešení obvodu s nelineárními prvky je podstatně složitější, než u lineárních obvodů a v rámci těchto materiálů se jím nebudeme zabývat. pro řešení je možné použít metodu linearizace v okolí pracovního bodu, metodu náhradního proudového nebo napěťového zdroje, nebo popsat chování prvku matematickou rovnicí.

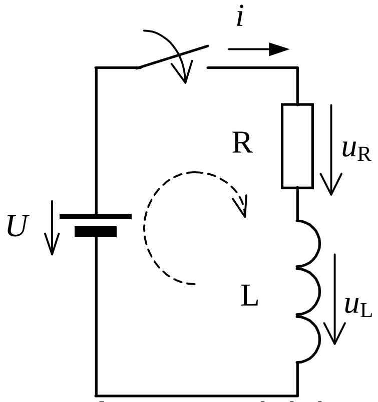
2.5 Přechodné děje

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 byl potřeba zdroj energie o nekonečném výkonu a ten v praxi neexistuje.

V prvcích je akumulována energie, která je svázána s obvodovými veličinami, u cívky s proudem, u kondenzátoru s napětím. (viz. vztahy 2.11. a 2.14.) Proto 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. Některé důležité případy přechodných dějů jsou uvedeny dále.

2.5.1 Spínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)



Obr.2.15 – Spínání sériového R-L obvodu

Obvod, kde je sériově zapojená indukčnost a odpor 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 obrázku 2. 15. (Napětí u_R, u_L a proud budou závislé na čase.)

Před sepnutím spínače neprotéká obvodem žádný proud. Po sepnutí spínače bude platit podle II. Kirchhoffova zákona: $-U + u_R + u_L = 0$

Napětí u_R a u_L vyjádříme jako funkci proudu podle Ohmova zákona a vztahu 2.10.

$$-U + R \cdot i + L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0 \quad \text{po úpravě} \quad i + \frac{L}{R} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = \frac{U}{R} \tag{2.29}$$

Rovnice 2.29 je lineární diferenciální rovnice s konstantní pravou stranou, a za počáteční podmínky, že proud v čase $t = 0$ je nulový, pro ni platí řešení:

$$i = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-t \cdot \frac{R}{L}}\right) = \frac{U}{R} \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{2.30}$$

Kde $\frac{U}{R}$ je ustálená hodnotu proudu, které by dosáhl v čase $t = \infty$ (prakticky za velmi dlouhou dobu).

$\tau = \frac{L}{R}$ je takzvaná časová konstanta (její rozměr je sekunda).

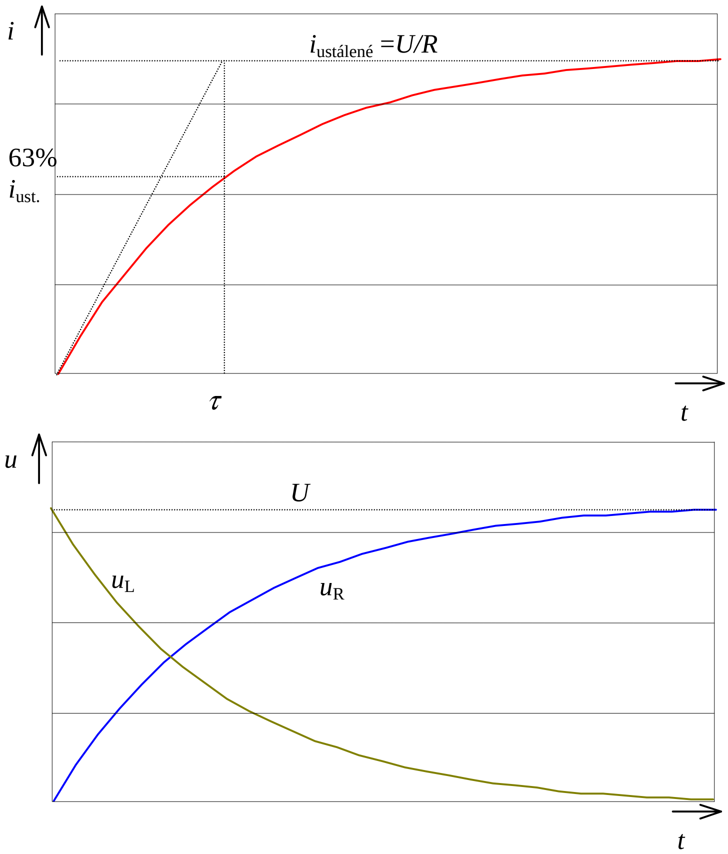
Z časového průběhu proudu můžeme vypočítat i průběhy napětí na cívce a rezistoru:

$$u_R = R \cdot i = U \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{2.31}$$

$$u_L = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \tag{2.32}$$

Časové průběhy proudu a napětí jsou na obrázku 2.16.

V obrázku je naznačeno grafické určení časové konstanty τ, je to doba, za kterou by přechodný děj dosáhl ustáleného stavu, kdyby stále probíhal stejnou rychlostí, jako na počátku. 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).



Obr. 2.16 - Průběhy při spínání R-L obvodu

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.

<u>Praktický význam přechodného děje při spínání R-L obvodu:</u>

Přechodný děj způsobuje, že proud v takovém obvodě narůstá pozvolna a musíme počítat s určitým zpožděním (někdy zanedbatelným, jindy ne). Příkladem jsou cívky relé nebo budící vinutí stejnosměrných motorů, kde může být časová konstanta až jednotky sekund.

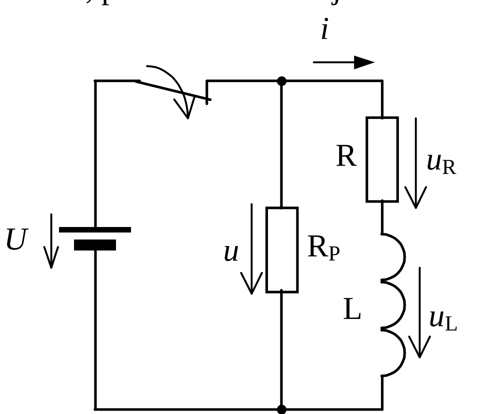
2.5.2 Vypínání obvodu R-L (odpor a indukčnost)

Při vypnutí obvodu podle obrázku 2.15. nastane zajímavá situace. Předpokládejme, že před vypnutím prochází obvodem ustálený proud $I_{\mathrm{ust.}} = U/R$. Při rozepnutí spínače by teoreticky došlo k okamžitému přerušení tohoto proudu. To by způsobilo na cívce naindukování nekonečně velkého napětí:

$$u_{\mathrm{i}} = L \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = L \cdot \frac{I_{\mathrm{ust.}}}{0} = \infty \qquad (2.33)$$

To je v praxi nemožné, na cívce se při vypnutí naindukuje tak vysoké napětí, že mezi kontakty spínače dojde k přeskoku jiskry. Jiskra způsobí pokračování proudu, takže ve skutečnosti nezanikne v nekonečně krátkém čase a indukované napětí nebude nekonečné. Ale i tak může indukované napětí ohrozit izolaci, případně polovodičové prvky v obvodě, proto se musí omezovat. Nejčastějším způsobem omezení přepětí je připojení některých z následujících prvků paralelně k cívce – odpor, kondenzátor, nebo jejich kombinace, nebo zpětná dioda (vysvětleno v sylabu Výkonová elektronika).

Vypočítat velikost přepětí při vypnutí v obvodě podle schématu 2.15. je prakticky nemožné, protože neumíme jednoduše matematicky popsat jiskru mezi kontakty spínače.



Obr.2.17 – Vypínání sériového R-L obvodu s omezovacím odporem

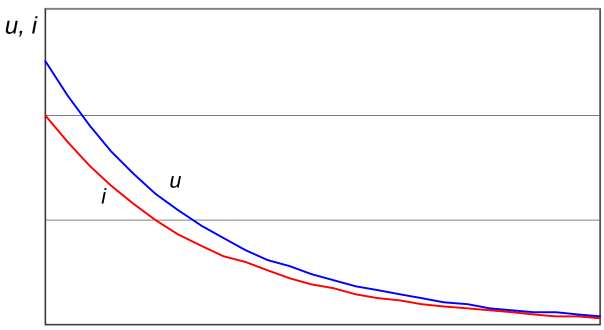
Na obrázku 2.17. je obvod s odporem pro omezení přepětí při vypínání, kde napětí lze vypočítat.

Jestliže byl před vypnutím obvod v ustáleném stavu, cívkou protékal proud $I_{\mathrm{ust.}} = U/R$, po vypnutí bude mít proud a napětí průběhy podle vztahů:

$$i = \frac{U}{R} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (2.34)$$

kde $\tau = \dfrac{L}{R_{\mathrm{P}} + R}$

$$u_{R_{\mathrm{P}}} = R_{\mathrm{P}} \cdot i = U \cdot \frac{R_{\mathrm{P}}}{R} \cdot \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (2.35)$$



Obr. 2.18 Průběhy při vypínání R-L obvodu

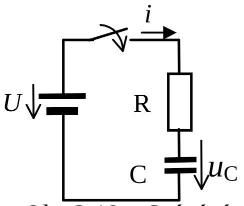
V prvním okamžiku po vypnutí je napětí u_{Rp} tolikrát vyšší než napětí zdroje, kolikrát je větší R_{P} než R. Pokud by se odpor R_{P} blížil nekonečnu (jako by tam žádný nebyl), blíží se také napětí u_{Rp} v prvním okamžiku nekonečnu a jde vlastně o případ podle rovnice 2.33. Časové průběhy proudů a napětí jsou na obrázku 2.18.

<u>Praktický význam přechodného děje při spínání R-L obvodu:</u>

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.

2.5.3 Zapínání obvodu R-C (odpor a kapacita)

Při zapínání obvodů s kondenzátory a odpory dochází také k přechodným dějům, pro stručnost uvedeme jen schéma obvodu, konečné vztahy a průběhy proudu a napětí.

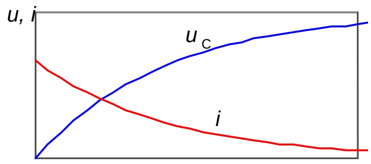


Obr.2.19 – Spínání sériového R-C obvodu

$$i = \frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau}$$

$$u_C = U \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (2.36 - 2.38)$$

$$\tau = R \cdot C$$



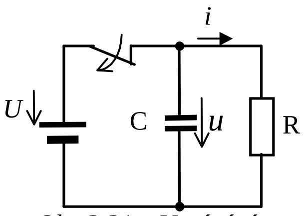
Obr. 2.20 Průběhy při spínání RC obvodu

<u>Praktický význam přechodného děje při spínání R-C obvodu:</u>

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 pojistky. V takovém případě by bylo nutné připojit do obvodu navíc omezovací odpor (alespoň dočasně po dobu spínání), jako je to na obrázku 2.19.

2.5.4 Vybíjení kondenzátoru v obvodě R-C (odpor a kapacita)

Pokud bychom vypnuli spínač v obvodě na obrázku 2.19. zůstal by kondenzátor nabitý na napětí zdroje. Protože z kondenzátoru by se neodebíral žádný proud, udržel by si toto napětí teoreticky nekonečně dlouhou dobu, prakticky, pokud by šlo o kvalitní kondenzátor, i několik dnů. Aby došlo k přechodnému ději, musí být ke kondenzátoru připojen spotřebič, který bude odebírat proud a tím kondenzátor vybíjet. Takový obvod s kondenzátorem a paralelním rezistorem je na obrázku 2.21. a příslušné průběhy proudu a napětí jsou na obrázku 2.22.

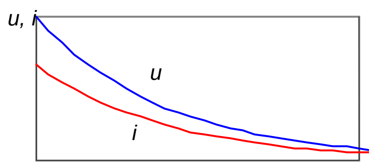


Obr.2.21 – Vypínání paralelního R-C obvodu

$$u = U \cdot e^{-t/\tau}$$

$$i = \frac{U}{R} \cdot e^{-t/\tau} \qquad (2.39 – 2.41)$$

$$\tau = R \cdot C$$



Obr. 2.22 Průběhy při vypínání RC obvodu

<u>Praktický význam přechodného děje při vypínání R-C obvodu:</u>

Přechodný děj při vybíjení kondenzátoru nastává v usměrňovačích s filtračním kondenzátorem. Pokud by byl usměrňovač zatížen ideálním odporem, vybíjel by se kondenzátor podle exponenciály, jak je naznačeno na obrázku 2.22. (V usměrňovači dochází při každé periodě k nabití kondenzátoru, podle typu usměrňovače i vícekrát, jak bude probráno v pozdějších kapitolách. Přechodný děj se tam tedy mnohokrát za vteřinu opakuje.)