1. ÚVOD DO TEORIE OBVODŮ

Základem elektrických jevů je působení **elektrických nábojů**. Jak známo, každá hmota se skládá z molekul a molekuly z atomů prvků. Atomy jsou složeny z jádra a elektronového obalu. V jádře je určitý počet protonů, který určuje zařazení prvku do periodické soustavy. Protonům připisujeme kladný elektrický náboj. Kolem jádra obíhají **elektrony** se záporným elektrickým nábojem. Protože se náboje jádra a elektronového obalu vzájemně vyrovnávají, jeví se atom navenek jako elektricky neutrální. Elektrony je však možno působením vhodných sil z atomu uvolnit a použít jich jako **volných elektrických nábojů** ať již k vytváření elektrického pole nebo třeba k vytvoření paprsku v obrazové elektronce nebo v elektronovém mikroskopu. Nejmenší elektrický náboj je náboj jednoho elektronu. Všechny elektrické náboje, se kterými se setkáme, jsou pak dány celistvým násobkem tohoto **elementárního náboje**. Jednotkou elektrického náboje je 1 coulomb, který je roven

$6{,}24151.10^{18}$ elementárních nábojů

resp. jeden elementární náboj je roven $1{,}602177.10^{-19}$ coulombu.

Děje v prostoru, kde působí elektrické náboje, mohou být velice komplikované. Obecně jsou matematicky popsány soustavou tzv. **Maxwellových rovnic**. Hovoříme o rovnicích **elektromagnetického pole**. Protože řešení Maxwellových rovnic vyžaduje pokročilé znalosti matematických metod, snažíme se, pokud je to možné, situaci zjednodušit a nepodstatné rysy jevů zanedbat. Pak rozlišujeme **zvláštní případy** elektromagnetického pole a to

1**. pole elektrostatické**
2**. pole magnetické.**

1.1. Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je pole vytvořené **konstantními** (v čase i prostoru) **elektrickými náboji**, které mohou být samostatné, izolované, nebo mohou být usazeny na povrchu vodivých těles, tzv. **elektrod**. Projevuje se **silovými účinky** na jiné náboje. Nejjednodušší situaci, kdy na sebe působí dva bodové náboje o velikostech q_1 a q_2, popisuje **Coulombův zákon**

$$F = \frac{1}{4pe}\frac{q_1 q_2}{d^2} . \qquad (1-1)$$

V rovnici F je velikost síly [N] a d je vzdálenost nábojů [m].
Konstanta $e = e_o e_r$ je závislá na vlastnostech prostředí a nazývá se **permitivita**. Je dána součinem fyzikální konstanty $e_o = 8{,}854188.10^{-12}$ [Fm^{-1}], které se říká permitivita volného prostoru nebo **permitivita vakua** a bezrozměrné **relativní** permitivity e_r .
Síla je **přitažlivá** v případě, že náboje mají různé znaménko nebo **odpudivá** v případě, že jde o náboje stejného znaménka.
V prostoru kolem nábojů vzniká elektrické pole. To můžeme pozorovat např. tak, že do něj umístíme **zkušební náboj** (tak malý, aby sám neměl na pole prakticky žádný vliv) a zjišťujeme velikost a směr síly, která na tento náboj působí. Sílu znázorníme **vektorem**.

Obecně je síla v každém bodě jiná a proto úplný popis rozložení pole pomocí vektorů sil v jednotlivých bodech by byl málo přehledný. Obraz pole proto zjednodušíme pomocí **siločar**. Jsou to čáry sledující dráhu (trajektorii), po které se pohybuje zkušební náboj, je-li zcela uvolněn a působí-li na něj pouze síly pole.

Ukazuje se, že velikost síly je úměrná velikosti zkušebního náboje. Definujeme proto **intenzitu elektrického pole** $\vec{E}$ jako podíl $\vec{E} = \vec{F}/q$. Intenzita je vektor, mající směr síly $\vec{F}$ a její velikost již nezávisí na velikosti zkušebního náboje q. Měří se v jednotkách [Vm^{-1}].

Abychom se vyhnuli nutnosti používat k popisu pole vektorů, zavádíme **skalární veličinu**, tzv. **potenciál**. Potenciál bodu v poli je **úměrný práci**, kterou musíme proti silám pole vynaložit, abychom zkušební náboj dopravili z daného bodu do bodu, jehož potenciál pokládáme za nulový. Měří se ve voltech. Jako **bod nulového potenciálu** (tzv. **referenční** bod) volíme obvykle bod na povrchu Země nebo bod v nekonečnu.

(U konkrétního elektrického zařízení se pak obvykle pokládá za bod nulového potenciálu povrch kovové skříně, ve které je zařízení instalováno.) Pro získání názorné představy o rozložení pole spojujeme body stejného potenciálu do tzv. **ekvipotenciálních ploch**. Potom siločáry popisující pole vycházejí z ekvipotenciálních ploch kolmo.

Rozdíl potenciálů mezi dvěma body nebo ekvipotenciálními plochami definujeme jako **elektrické napětí**

$$U_{AB} = U_A - U_B \qquad (1-2)$$

a měříme je ve voltech.

Jestliže elektrodu umístěnou izolovaně v nevodivém prostředí nabijeme nábojem *Q*, povrch elektrody je ekvipotenciální plochou a má potenciál *U*. **Kapacitu** elektrody definujeme jako

$$C = Q/U \qquad (1-3)$$

a měříme ji ve faradech.

Častější je případ, kdy použijeme dvou elektrod, z nichž jednu nabijeme nábojem *Q* a druhou nábojem **-***Q*. Taková konfigurace se nazývá **kondenzátor** (**kapacitor**). **Kapacita kondenzátoru** je opět definována jako podíl náboje *Q* a napětí mezi elektrodami *U*. Při umisťování nábojů na elektrodách (nabíjení kondenzátoru) jsme museli vynaložit práci, která je nyní v kondenzátoru akumulována ve formě **energie elektrického pole** a je rovna

$$W_e = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 \qquad (1-4)$$

Tato energie může být později z kondenzátoru opět odebrána.

Až dosud jsme předpokládali, že náboje v poli jsou konstantní a nepohyblivé. Jestliže se však náboje s časem mění nebo pohybují, představují **elektrický proud**.

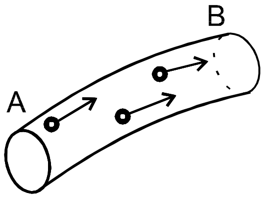
Proud pak definujeme jako **rychlost změny náboje**

$$i = \frac{dq}{dt} \qquad (1-5)$$

a měříme jej v ampérech.

Část prostoru, ve které dochází k pohybu volných nábojů, vytváří **vodivý kanál**. Příklad takového kanálu je nakreslen na obr.1.1.

Kanál omezíme na jedné straně plochou A, na druhé plochou B. Zjistíme, že potenciál bodů na obou koncích kanálu se liší, ve směru toku elektrického proudu dochází k úbytku potenciálu a tento úbytek je přímo úměrný velikosti proudu



Obr.1.1

$$U_{AB} = U_A - U_B = R.i = \frac{r\,l}{S}.i \qquad (1-6)$$

Konstanta úměrnosti R se nazývá **elektrický odpor** a měří se v ohmech. Velikost odporu je přímo úměrná délce kanálu l a nepřímo průřezu S. Závisí dále na vlastnostech prostředí, charakterizovaných **specifickým (měrným) odporem** r. Uvedený vztah vyjadřuje **Ohmův zákon**. Nutným předpokladem pro jeho platnost je však **linearita prostředí**, tj. nezávislost specifického odporu na velikosti proudu i.

Vedle elektrického odporu definujeme také **elektrickou vodivost** jako $G = 1/R$ a měříme ji v siemensech.

Při průtoku proudu vodivým kanálem dochází k přeměně elektrické energie v jinou formu, např. v energii tepelnou nebo světelnou. Tomu odpovídá **výkon** (rychlost toku energie)

$$p = u_{AB}.i \quad . \qquad (1-7)$$

V případě **lineárního prostředí** lze výraz pro výkon dále upravit

$$p = u_{AB}{}^2 / R = R.i^2 \quad . \qquad (1-8)$$

1.2. Magnetické pole

Magnetické pole je vytvořeno **konstantními elektrickými proudy** ve vodičích nebo elementárními proudy uvnitř tzv. permanentních magnetů. Působí **silovými účinky** na jiné vodiče protékané elektrickým proudem, na pohybující se náboje nebo na jiné magnety. Je charakterizováno **intenzitou magnetického pole** $\vec{H}$.

Intenzita $\vec{H}$ závisí na velikosti proudů, které magnetické pole vytvořily. **Ampérův zákon**, nazývaný také **zákon celkového proudu**, uvádí, že integrál intenzity braný podél uzavřené křivky l je roven součtu všech proudů, protékajících plochou, která je křivkou ohraničena

$$\oint_l \vec{H}\,d\vec{l} = \sum I \quad . \qquad (1-9)$$

Uvedený vztah platí bez ohledu na vlastnosti prostředí.

Pro posuzování silových účinků magnetického pole definujeme **vektor magnetické indukce** jako

$$\vec{B} = m\vec{H} = m_o m_r \vec{H} \quad . \qquad (1-10)$$

V uvedeném vztahu je μ **magnetická permeabilita**, μ_r je relativní permeabilita prostředí, μ_o je permeabilita vakua ($m_o = 4p.10^{-7}$ [Hm^{-1}]), která je podobně jako e_o fyzikální konstanta. Jednotkou magnetické indukce B je tesla [T], intenzitu magnetického pole H uvádíme v [Am^{-1}].

Dále definujeme **magnetický tok** jako průtok vektoru magnetické indukce plochou

$$\Phi = \int_S \vec{B}\, d\vec{S} \qquad (1-11)$$

a měříme jej ve weberech [Wb]. Vzhledem k tomuto vztahu můžeme magnetickou indukci také pokládat za vektor **plošné hustoty magnetického toku**.

Síla působící v magnetickém poli **na pohybující se náboj** je úměrná velikosti náboje q a vektorovému součinu rychlosti náboje a magnetické indukce v daném bodě

$$\vec{F} = q\left[\vec{v} \times \vec{B}\right] \quad . \qquad (1-12)$$

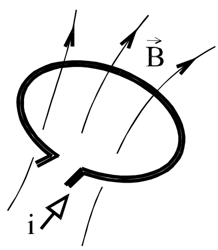
Tento vztah popisuje např. silové působení na volný elektron uvnitř obrazové elektronky nebo elektronového mikroskopu.

Síla působící **na vodič protékaný proudem** i a popsaný pomocí vektoru $\vec{l}$, je dána podobně

$$\vec{F} = i\left[\vec{l} \times \vec{B}\right] \quad . \qquad (1-13)$$

(Vztah se uplatní při vyšetřování silového působení např.v elektrických motorech nebo v ručkových měřicích přístrojích) .

Jestliže vytvoříme z vodiče smyčku podle obr.1.2 a necháme jí protékat proud i , kolem vodiče se vytvoří magnetické pole a plochou smyčky bude protékat magnetický tok F.



Obr.1.2

Potom definujeme **indukčnost smyčky** L jako podíl toku a proudu, který tok vytvořil

$$L = \frac{\Phi}{i} \ . \qquad (1-14)$$

Indukčnost měříme v jednotkách henry [H]. Vezmeme podobnou smyčku a vložíme ji do magnetického pole. Je-li pole proměnné, naměříme mezi konci smyčky **elektrické napětí** rovné **rychlosti změny magnetického toku**, protékajícího plochou smyčky $u(t) = \dfrac{d\Phi}{dt}$. (1 – 15)

Tento, tzv. **indukční zákon** platí bez ohledu na to, zda magnetické pole bylo vytvořeno vnějšími příčinami nebo zda šlo o pole vyvolané proudem, protékajícím smyčkou.

Docházíme k důležitému poznatku, že **časově proměnný elektrický proud vytvoří časově proměnné magnetické pole**. Na druhé straně **časově proměnné magnetické pole indukuje časově proměnné elektrické napětí**, které v důsledku může opět vyvolat průtok **časově proměnného elektrického proudu**.

Proto **při změnách** proudu, napětí, elektrického náboje nebo magnetického toku **nemůžeme elektrické pole oddělit od magnetického**. Hovoříme pak o **poli elektromagnetickém** a pole elektrostatické nebo magnetické bereme pouze jako jeho zvláštní případy.

1.3. Elektromagnetické pole

Rovnice elektromagnetického pole (tzv. Maxwellovy rovnice) vedou na řešení, jehož součástí jsou **vlny intenzit** $\vec{E}$ a $\vec{H}$. Tyto **vlny se šíří** prostorem jako rozruch **konečnou rychlostí** *v*.
Ve vakuu je tato rychlost rovna rychlosti světla *c=300 000 km/s*, v každém jiném prostředí je menší. I když by se mohlo zdát, že je to obrovská rychlost, vlna urazí pouze

300 km/ms = 300 m/μs = 300 mm/ns = 0,3 mm/ps.

Při sledování časových průběhů procesů proto musíme obecně brát tuto skutečnost v úvahu a rozlišovat

soustavy se soustředěnými parametry
a **soustavy s rozprostřenými parametry**.

Soustava se soustředěnými parametry se vyznačuje relativně malými fyzickými rozměry ve srovnání s drahou, kterou elektromagnetické vlnění urazí za dobu, po kterou trvají typické děje v soustavě. Příklady: zesilovač akustického signálu, analogový integrovaný obvod, rozvod elektrické energie v domě nebo v obci.
Soustavu lze rozdělit na jednotlivé prvky, jejichž vzájemné propojení je charakterizováno **elektrickým schématem**. Přitom nezáleží na tom, jak jsou jednotlivé prvky rozloženy v prostoru.
Z matematického hlediska je soustava popsána **obyčejnými diferenciálními rovnicemi** s časem jako jedinou nezávisle proměnnou.

Soustava s rozprostřenými parametry má relativně veliké rozměry. Příklad: vedení k anténě, dálkové (např. transkontinentální) vedení elektrické energie, podmořský telefonní kabel, kabeláž počítače s vysokým hodinovým kmitočtem.
Při popisu soustavy je podstatné nejen vzájemné propojení jednotlivých částí, ale i jejich **prostorové uspořádání**. K popisu soustavy jsou nutné **parciální diferenciální rovnice**, v nichž kromě času vystupují jako nezávisle proměnné také souřadnice v prostoru.

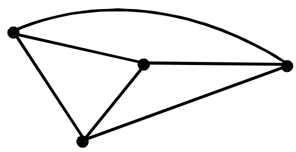
1.4. Elektrický obvod jako soustava se soustředěnými parametry

1.4.1. Úvod

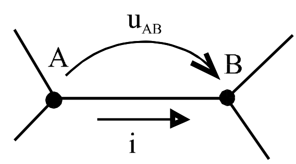
Pod pojmem **elektrický obvod** rozumíme takové uspořádání obvodových prvků, jehož účelem je určitá funkce, např. přenos či přeměna elektrické energie nebo zpracování elektrického signálu. V souvislosti s tím rozlišujeme analýzu a syntézu elektrického obvodu.
Analýzou rozumíme postup, při kterém zkoumáme obvodové veličiny (napětí, proudy) v obvodu, jehož struktura i hodnoty parametrů jednotlivých prvků jsou dány. **Cílem** analýzy je pak výpočet a tabelární nebo častěji grafické vyjádření důležitých průběhů a následné posouzení funkce obvodu. Analýza je často důležitou podmínkou pro dokonalé pochopení podstaty dějů v obvodu. Je to v principu **postup jednoznačný**, i když různé metody analýzy mohou vést k cíli rozdílnými a různě složitými cestami.
Syntézou rozumíme návrh konfigurace obvodu a výpočet parametrů jeho prvků tak, aby co nejlépe plnil předem stanovenou funkci. Obecně může syntéza vést k celé řadě

různých způsobů realizace výsledného obvodu. Úkolem konečné fáze syntézy bývá **optimalizace** výsledného řešení např. z hlediska přesnosti splnění výchozích požadavků, z hlediska výrobních nákladů, náročnosti na údržbu apod.

Při analýze vycházíme z elektrického schématu obvodu. Jednotlivé obvodové prvky jsou vzájemně propojeny prostřednictvím svých **svorek**. Místo, kde jsou spojeny svorky minimálně dvou prvků, se nazývá **uzel**. Část obvodu mezi dvěma uzly je **větev**. Počet uzlů a větví v obvodu určuje složitost obvodu a v důsledku toho i **počet nezávislých rovnic**, které potřebujeme k dokonalému popisu procesů v obvodu.



Obr.1.3



Obr.1.4

Dobrou představu o konfiguraci obvodu dává tzv. **topologické schéma**. Jeho příklad je na obr.1.3. V topologickém schématu jsou znázorněny jednotlivé uzly jako body, v nichž se stýkají větve znázorněné čarami. Konkrétní složení větví není z topologického schématu patrno.

V elektrickém schématu vyznačujeme **elektrická napětí** mezi uzly pomocí šipek, jak uvádí obr.1.4. Šipka ukazuje nejen to, mezi kterou dvojicí uzlů napětí měříme, ale i **orientaci**, tj. odkud a kam je napětí určováno. Pro označení **proudů** větvemi používáme **proudové šipky**, které se tvarově od šipek pro napětí liší, jak je rovněž patrno z obrázku.

Orientační šipky zakreslujeme do schématu na samém počátku analýzy, kdy často ještě nemáme představu o skutečných polaritách napětí a proudů v obvodu. Zvolené orientace se však od tohoto okamžiku musíme při formulaci rovnic důsledně držet. Teprve potom, když řešením rovnic získáme numerické hodnoty obvodových veličin včetně znamének, můžeme definitivně určit, jak to s polaritami skutečně je. Kladná hodnota napětí u_{AB} označeného na obr.1.4 šipkou mířící od uzlu A k uzlu B znamená, že uzel A je kladný vzhledem k uzlu B. Je-li však výsledná hodnota u_{AB} záporná, je potenciál uzlu A nižší než potenciál uzlu B. Podobně kladný výsledek pro proud i indikuje, že proud skutečně teče směrem, kterým ukazuje šipka, záporný výsledek znamená, že proud ve skutečnosti teče směrem opačným.

Všechny metody analýzy vycházejí ze dvou základních vztahů, vyjadřujících tzv. **Kirchhoffovy zákony**.

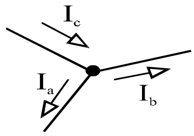
První Kirchhoffův zákon (ve zkratce 1.KZ , tzv. **proudový**) říká, že součet proudů v uzlu je roven nule. Vychází ze skutečnosti, že v uzlu se nemohou elektrické náboje ani ztrácet ani generovat. Při formulaci rovnic zachováváme pravidlo, že proudy, které z uzlu vytékají, bereme s kladným znaménkem, proudy vtékající se záporným znaménkem. Tak pro situaci na obr.1.5a platí

$$\sum I = I_a + I_b - I_c = 0\,, \qquad (1-16)$$

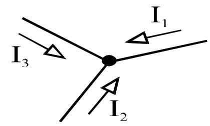
pro obr.1.5b pak

$$-I_1 - I_2 - I_3 = 0 \, .$$

Zde samozřejmě předpokládáme, že výsledné hodnoty proudů I_1, I_2, I_3 budou mít různá znaménka (znaménko jednoho z nich se bude lišit od znaménka zbývajících dvou).



Obr.1.5a

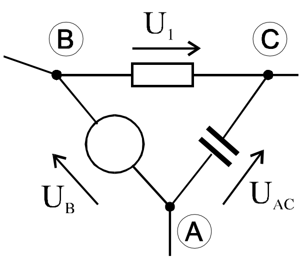


Obr.1.5b

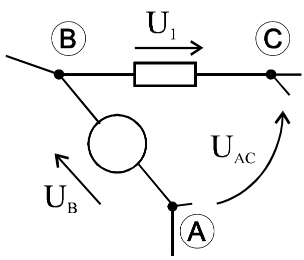
Druhý Kirchhoffův zákon (2.KZ, **napěťový**) říká, že součet napětí podél uzavřené smyčky je roven nule. Jako **uzavřenou smyčku** v této souvislosti chápeme cestu začínající v některém uzlu, pokračující dalšími uzly a končící v uzlu, ve kterém začala. Žádným uzlem přitom neprochází dvakrát. Příklad ukazuje obr.1.6a. Platí

$$\sum U = U_1 - U_{AC} + U_B = 0 \; . \qquad (1-17)$$

Přitom není nutné, aby mezi jednotlivými uzly existovala skutečně větev, jak ukazuje příklad na obr.1.6b.



Obr.1.6a



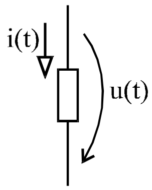
Obr.1.6b

1.4.2. Pasivní obvodové prvky

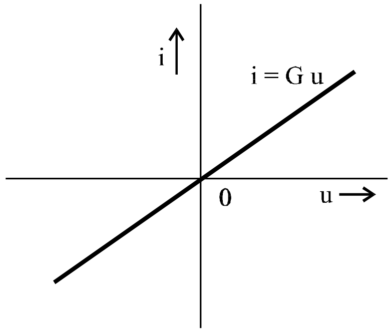
Za pasivní obvodové prvky pokládáme ty prvky, které nemohou elektrickou energii do obvodu dodávat. Jsou to prvky **disipativní**, které energii **spotřebovávají** (mění na jinou formu energie) a prvky **akumulační**, které ji akumulují (dočasně **uchovávají**) ve formě energie elektrického nebo magnetického pole..

Skutečné, **reálné prvky**, se kterými se v praxi setkáváme, obvykle v sobě zahrnují všechny uvedené způsoby přeměny energie. Většinou je jeden z nich žádoucí a je **dominantní** a zbývající jsou obvykle nežádoucí a pokládáme je za **parazitní**. Pro zjednodušení analýzy a syntézy definujeme potom **ideální obvodové prvky**, které se vyznačují pouze jediným způsobem přeměny energie. Pomocí nich pak vytváříme **náhradní schémata**, **modely** reálných prvků od jednoduchých až po značně složitá náhradní schémata podle toho, jakou přesnost náhrady vyžadujeme resp. podle režimu, ve kterém prvky pracují.

Rezistor
je disipativní obvodový prvek, který elektrickou energii nevratným způsobem mění na jinou formu energie. Jeho schématická značka je na obr.1.7a spolu se šipkami napětí a proudu. Základní charakteristikou rezistoru je závislost proudu na napětí, tzv.



Obr.1.7a



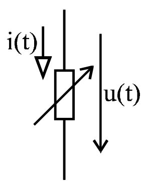
Obr .1.7b

ampérvoltová charakteristika. V nejjednodušším případě tzv. **lineárního rezistoru** je tato závislost zobrazena v rovině u-i přímkou, procházející počátkem, jak je znázorněno na obr.1.7b. Potom je proud přímo úměrný napětí a platí **Ohmův zákon**

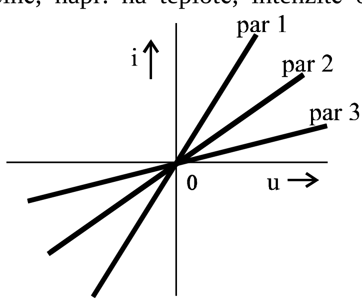
$$i = G.u = \frac{1}{R}.u \ , \qquad (1 - 18)$$

kde R je odpor rezistoru, G je jeho vodivost. Rezistor je pak popsán jedinou číselnou konstantou, parametrem R nebo G.

Existují však také rezistory s lineární charakteristikou, jejíž sklon není konstantní, ale závisí na nějaké vnější veličině, např. na teplotě, intenzitě osvětlení,



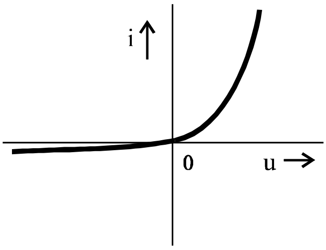
Obr.1.8a



Obr.1.8b

mechanickém nastavení ovládacího prvku, napětí v nějakém jiném místě obvodu apod. Používáme pak schématickou značku podle obr.1.8a a hovoříme o rezistorech **parametrických**, s parametry obecně závislými na čase.

Jiná situace je zobrazena na obr.1.9. Ampérvoltová charakteristika tohoto rezistoru je **nelineární**. Pro popis funkce rezistoru pak jedna hodnota nestačí, obvykle je třeba mít k dispozici celou charakteristiku. Nelineární rezistory tvoří velmi důležitou skupinu obvodových prvků. Řešení obvodů s těmito rezistory je vždy podstatně složitější než řešení obvodů lineárních. Také nelineární rezistory mohou být parametrické. Příkladem je např. fotodioda, polovodičová dioda, jejíž charakteristika závisí na intenzitě dopadajícího světla (viditelného nebo neviditelného).



Obr.1.9

Bez ohledu na to, zda jde o lineární nebo nelineární rezistor, **okamžitý výkon** ztracený v rezistoru je roven součinu napětí a proudu v daném okamžiku

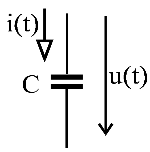
$$p(t) = u(t).i(t) \quad . \qquad (1-19)$$

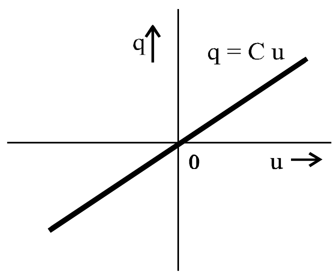
U **lineárního rezistoru** je dále možno pomocí Ohmova zákona upravit výraz pro výkon jako

$$p(t) = R.i^2(t) = G.u^2(t) = \frac{u^2(t)}{R} \quad . \qquad (1-20)$$

Kapacitor

akumuluje energii ve formě energie elektrického pole. Jeho schématická značka je na obr.1.10a. Kapacitor je charakterizován závislostí akumulovaného náboje *q* na napětí *u*. Říká se jí **coulombvoltová charakteristika**. Je-li zobrazena přímkou procházející





Obr.1.10a Obr.1.10b

počátkem, jde o **lineární kapacitor**, definovaný kapacitou

$$C = \frac{q}{u} \qquad (1-21)$$

jako jediným parametrem.

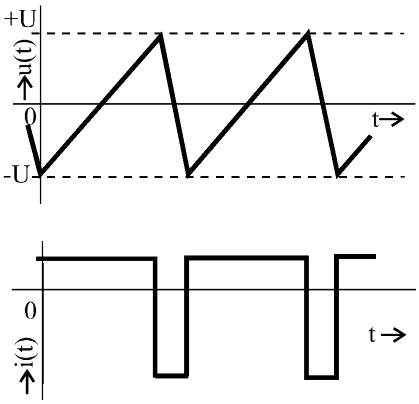
Ačkoli se **kondenzátor** – praktická realizace kapacitoru - skládá z elektrod, oddělených vzájemně dielektrikem (izolantem), může obvodem s kondenzátorem protékat časově proměnný proud. Protože **proud** definujeme jako rychlost změny elektrického náboje, v případě časově neproměnné kapacity (C = konst) potom platí

$$i(t)=\frac{d\,q(t)}{dt}=C\frac{d\,u(t)}{dt}\quad . \qquad (1-22)$$

Pro **napětí** na kondenzátoru dostaneme integrací obou stran této rovnice podle času

$$u(t)=\frac{1}{C}\int i(t)dt=u(0)+\frac{1}{C}\int_0^t i(t)dt\ . \qquad (1-23)$$

V první části tohoto výrazu vystupuje neurčitý integrál, jehož hodnota představuje náboj kondenzátoru *q(t)*. Ve druhé části je pak napětí v okamžiku *t* vyjádřeno jako součet tzv. **počátečního napětí** kondenzátoru *u(0)* a přírůstku napětí za dobu od nuly do *t*.

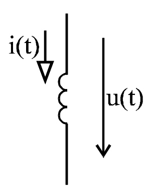


Obr.1.11

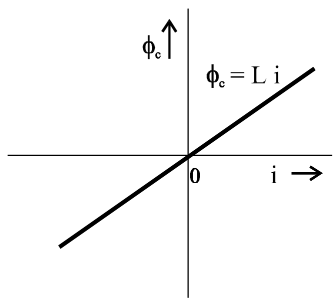
Pro ilustraci funkce kondenzátoru předpokládejme, že napětí na něm je určeno vnějším zdrojem a má časový průběh znázorněný na obr.1.11. Je to tzv. pilovitý průběh, běžně používaný např. v měřicích přístrojích nebo v převodnících analogových signálů na digitální. Ve spodní části obrázku je znázorněn průběh proudu. Protože v první části periody napětí lineárně narůstá s konstantní kladnou směrnici, je jeho časová derivace, a tedy i proud obvodem, kladná konstanta. Ve druhé části periody pak napětí lineárně klesá (rychleji než předtím stoupalo) a proud je proto konstantní a záporný. Průběh proudu je obdélníkový. Kondenzátor působí jako derivační prvek. Obvod může ovšem pracovat i obráceně, jako integrátor. Stačí napájet kondenzátor obdélníkovými proudovými pulsy a napětí na kondenzátoru bude mít pilovitý tvar.

Induktor

akumuluje energii v magnetickém poli. Jeho schématická značka je na obr.1.12a. Induktor je charakterizován závislostí (celkového) magnetického toku induktoru Φ_c na



Obr.1.12a



Obr.1.12b

proudu *i*. Říká se jí **weberampérová charakteristika**. Je-li zobrazena přímkou procházející počátkem, jde o **lineární induktor**, popsaný **indukčností**

$$L = \frac{f_c}{i}$$

jako jediným parametrem. Praktickou realizací induktorů jsou **cívky**.
Napětí na svorkách induktoru je rovno **rychlosti změny magnetického toku** a protože tok je úměrný proudu, v případě časově neproměnné indukčnosti (L = konst) platí

$$u(t) = \frac{d f_c(t)}{dt} = L.\frac{d i(t)}{dt}\ .$$

Proud induktorem můžeme naopak vyjádřit jako

$$i(t) = \frac{1}{L}\int u(t)dt = i(0) + \frac{1}{L}\int_0^t u(t)dt\ ,$$

kde *i(0)* je **počáteční hodnota proudu**.

Z podobnosti (v tomto případě se jí říká **dualita**) rovnic pro kapacitor a induktor plyne, že i cívka se podobně jako kondenzátor dá použít pro integraci nebo derivování signálu. (Praktické důvody však vedou k tomu, že se pro tyto účely daleko častěji používá kondenzátorů.)