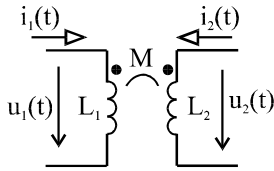


## Induktory se vzájemnou vazbou

Dvě cívky, které jsou umístěny v těsné blízkosti, mohou jedna druhou ovlivňovat. Magnetický tok vytvořený jednou cívkou zasahuje závitů druhé cívky a naopak. Hovoříme o cívkách se vzájemnou **magnetickou vazbou**. Setkáváme se s nimi např. u



Obr.1.13

elektrických strojů (transformátorů, motorů, generátorů), ale i v zařízeních pro sdělovací techniku. Příslušná schematická značka je na obr.1.13. Protože tok závitů cívky  $L_1$  se skládá z vlastního toku  $F_{11}$  této cívky vytvořeného jejím proudem  $i_1$  a toku  $F_{12}$  vyvolaného proudem druhé cívky  $i_2$ , je napětí na první cívce

$$u_1(t) = L_1 \frac{di_1(t)}{dt} \pm M_{12} \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1 - 27)$$

a podobně napětí na druhé cívce

$$u_2(t) = \pm M_{21} \frac{di_1(t)}{dt} + L_2 \frac{di_2(t)}{dt} . \quad (1 - 28)$$

V těchto rovnicích je  $L_1$  a  $L_2$  **vlastní indukčnost** každé z cívek bez vlivu druhé cívky a  $M_{12}=M_{21}=M$  je tzv. **vzájemná indukčnost**. Znaménko + před  $M$  se volí tehdy, jestliže jsou cívky navinuty souhlasně, tj. jestliže kladný proud vtékající u obou cívek do svorky označené ve schématu tečkou vytvoří magnetické toky, které se sčítají, podporují. Záporné znaménko vystupuje v případě, že tok vytvořený proudem jedné cívky je proudem druhé cívky zeslabován.

V praxi se setkáváme i s případy, kdy je vzájemně vázáno více cívek než dvě, princip matematického popisu zůstává i pak prakticky stejný.

### 1.4.3. Aktivní obvodové prvky

Aktivní prvky působí v obvodu jako **zdroje elektrické energie**. Ve skutečnosti ovšem tuto energii nevyrábějí, ale získávají ji z energie jiného druhu, např. energie chemické, tepelné, světelné nebo jiné.

Aktivní prvky dělíme na :

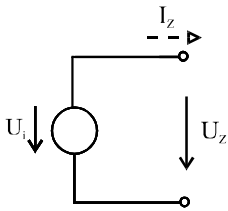
**nezávislé** (autonomní) **zdroje** a  
**závislé (řízené) zdroje**.

#### Nezávislé zdroje elektrické energie

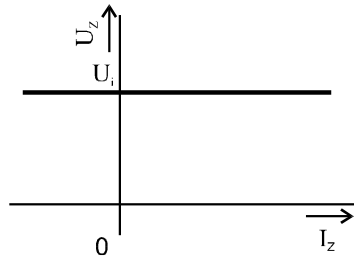
##### a) Nezávislý zdroj napětí

Nezávislé zdroje dodávají do obvodu elektrickou energii nezávisle na obvodových veličinách (napětích, proudech) v obvodu. V zásadě jde o **nezávislé zdroje napětí** a **nezávislé zdroje proudu**. U obou typů rozlišujeme dále **ideální** a **reálné** zdroje.

Schematická značka **ideálního nezávislého zdroje napětí** je na obr.1.14a. Napětí  $U_i$  na svorkách zdroje nezávisí na velikosti proudu  $I_z$ , který ze zdroje odebíráme. Tato skutečnost je vyjádřena tzv. **zatěžovací charakteristikou zdroje**, tj. závislostí



Obr.1.14a



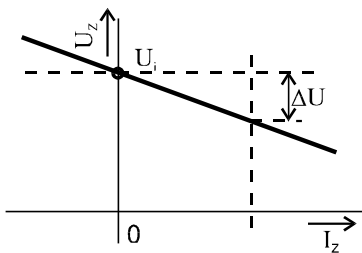
Obr.1.14b

výstupního napětí na odebíraném proudu, nakreslenou na obr.1.14b. Charakteristika je přímka rovnoběžná s vodorovnou osou. Tím, že přechází z 1. do 2. kvadrantu, je zdůrazněno, že zdroj je schopen nejen dodávat proud do zátěže, ale i přijímat proud z případného jiného zdroje v obvodu, a jeho výstupní napětí je stále konstantní, „tvrdé“. **Ideální zdroj** napětí je dále schopen dodávat jakkoli veliký výstupní proud a má tedy **nekonečnou zásobu energie**.

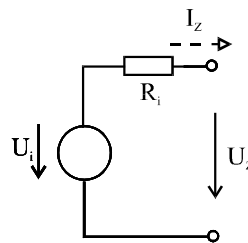
**Skutečné zdroje** se tak nechovají. Každý reálný zdroj má jistá **omezení**. Jeho výstupní napětí obvykle klesá, roste-li zatěžovací proud. Část typické zatěžovací charakteristiky je na obr.1.15a. Je-li zatěžovací proud roven nule, říkáme, že zdroj pracuje **naprázdno**. Jeho výstupní napětí je rovno  $U_i$ . Odebíráme-li ze zdroje proud  $I_z$ , výstupní napětí klesne o úbytek úměrný velikosti proudu, tj.  $\Delta U = R_i \cdot I_z$ .

Konstanta úměrnosti  $R_i$  má rozměr elektrického odporu a říká se jí **vnitřní odpor zdroje**. Je zřejmé, že čím je tento odpor menší, tím je výstupní napětí zdroje méně závislé na zatěžovacím proudu a tím je zdroj „tvrdší“, bližší ideálnímu zdroji napětí, který má vnitřní odpor rovný nule.

Chování reálného zdroje lze pak modelovat pomocí tzv. **náhradního schématu zdroje**,



Obr.1.15a



Obr.1.15b

nakresleného na obr.1.15b. Náhradní schéma se skládá z ideálního zdroje napětí  $U_i$  (tzv. vnitřního napětí) v sérii s vnitřním odporem  $R_i$ . Výstupní napětí takového náhradního obvodu je rovno

$$U_z = U_i - R_i \cdot I_z = U_i - \Delta U \quad (1 - 29)$$

stejně jako u původního reálného zdroje.

### Příklad 1.1.

Monočlánek typu R 14 má napětí naprázdno rovno  $U_o=1,5 \text{ V}$ . Odebíráme-li z něj proud  $I_z=0,5 \text{ A}$ , klesne výstupní napětí na  $1,1 \text{ V}$ . Určete prvky náhradního schématu monočlánu.

Protože pokles napětí  $\Delta U = 1,5 - 1,1 = 0,4 \text{ V}$  při zatěžovacím proudu  $0,5 \text{ A}$ , je vnitřní odpor roven  $R_i=0,4/0,5=0,8 \text{ W}$ . Vnitřní napětí zdroje v náhradním schématu je pak  $U_i=U_o=1,5 \text{ V}$ .

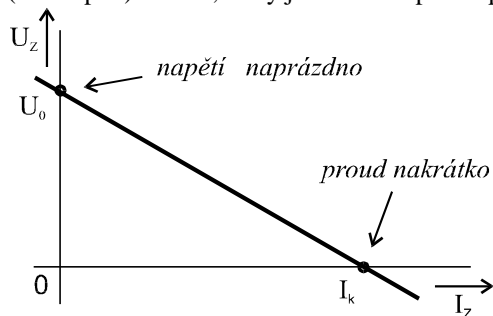
### Příklad 1.2.

Startér automobilu potřebuje pro bezpečný start napětí alespoň  $10 \text{ V}$  a odebírá přitom proud  $80 \text{ A}$ . Jaký největší vnitřní odpor smí mít akumulátorová baterie, má-li napětí naprázdno  $U_o=12 \text{ V}$ ?

Protože je při zatěžovacím proudu  $80 \text{ A}$  dovolený úbytek napětí  $\Delta U = 2 \text{ V}$ , nesmí být vnitřní odpor větší než  $2/80=0,025 \text{ W} = 25 \text{ mW}$ .

### Poznámka:

Zvětšujeme-li odebíraný proud ze zdroje, svorkové napětí klesá. Pokud to zdroj snese, můžeme pokračovat ve zvyšování zatěžovacího proudu tak dlouho, až výstupní napětí poklesne na nulu. Dostáváme se tak do situace, kdy jsou svorky zdroje spojeny nakrátko a zkratovou spojkou teče maximální proud, tzv. **proud nakrátko**,  $I_k=U_i / R_i$ . Celá zatěžovací charakteristika zdroje pak je zobrazena na obr.1.16. Je přímková a protíná vodorovnou osu (osu proudu) v bodě, odpovídajícím proudu nakrátko  $I_k$  a svislou osu (osu napětí) v bodě, který je bodem napětí naprázdno  $U_i=U_o$ .



Obr.1.16

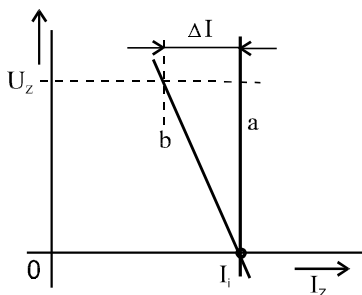
Hledáme-li tedy **parametry náhradního schématu** reálného zdroje napětí, musíme provést dvě měření. Především změříme napětí naprázdno  $U_o$ . Použijeme k tomu voltmetr s dostatečně vysokým vstupním odporem, aby ze zdroje odebíral prakticky zanedbatelný proud. Pokud to měřený zdroj snese a je schopen bez poškození pracovat po dobu měření nakrátko, změříme také proud nakrátko  $I_k$  ampérmetrem se zanedbatelně malým odporem a

vypočítáme vnitřní odpor jako  $R_i=U_o/I_k$ . Jestliže zdroj není dimenzován na tak velké proudy, musíme jej zatěžovat pouze v mezích dovoleného proudu  $I_{zmax}$ , změřit odpovídající pokles výstupního napětí a vnitřní odpor vypočítat z tohoto poklesu.

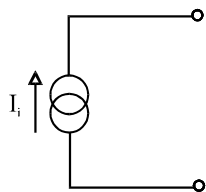
### b) Nezávislý zdroj proudu

Jedna z používaných schématických značek **ideálního nezávislého zdroje proudu** je na obr.1.17b. Proud zdroje je nezávislý na napětí na jeho svorkách. Odpovídající **zatěžovací charakteristika** je nakreslena na obr.1.17a a je označena písmenem *a*.

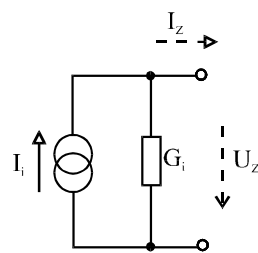
Výstupní proud **reálného zdroje** však na svorkovém napětí závisí, jak to ukazuje příklad zatěžovací charakteristiky (křivka *b*) na tomto obrázku. Toto chování zdroje lze vystihnout **náhradním schématem** na obr.1.17c. Skládá se z ideálního zdroje proudu  $I_i$  a



Obr.1.17a



Obr.1.17b



Obr.1.17c

paralelně zapojené vnitřní vodivosti  $G_i$ . Vnitřní vodivostí teče proud  $\Delta I = U_z \cdot G_i$ , o který se výstupní proud snížil. Proud  $I_i$  je proud nakrátko. Je zřejmé, že i neideální zdroj proudu má charakteristiku, která tvarem odpovídá charakteristice neideálního zdroje napětí na obr.1.16. **Proto je možno reálné zdroje napětí a proudu vzájemně zaměňovat** a podle potřeby pro jejich charakterizaci používat náhradního schématu na obr.1.15b nebo **ekvivalentního** náhradního schématu na obr.1.17c. Pro jejich ekvivalenci platí  $U_i = R_i I_i$ ,  $G_i = 1/R_i$ .

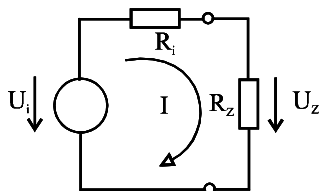
**Poznámka:**

Představa ideálního nezávislého zdroje proudu může činit určité obtíže, protože zdroj, který by se mu dostatečně blížil, není běžně na trhu k dispozici na rozdíl od např. akumulátorové baterie, která dobře představuje relativně tvrdý zdroj napětí blížící se ideálnímu zdroji napětí. Dalším problémem ztěžujícím představu ideálního zdroje proudu je fakt, že základním pracovním režimem takového zdroje je provoz nakrátko, s nulovým výstupním napětím.

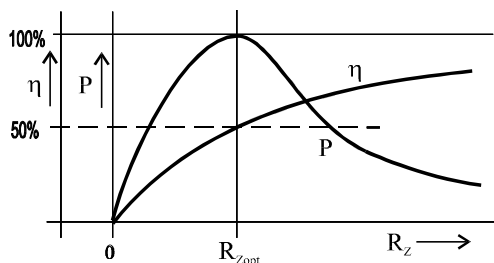
Se zdroji proudu se nicméně setkáváme, jde však téměř vždy o zařízení, která byla sestavena synteticky tak, aby se jako zdroj proudu chovala. Jako příklad lze uvést zdroje konstantního stejnosměrného proudu pro nastavení pracovních bodů tranzistorů v analogových integrovaných obvodech nebo zdroj konstantního střídavého proudu pro elektrickou obloukovou svářečku. V obou případech jde o relativně složité zapojení s vnitřní regulační smyčkou vybavenou silnou zápornou zpětnou vazbou.

**Přenos energie ze zdroje do odporové zátěže. Výkonové přizpůsobení**

Uvažujme, že máme **dán reálný zdroj elektrické energie** jeho vnitřním napětím  $U_i$  nebo proudem  $I_i$  a vnitřním odporem  $R_i$ . Na svorky zdroje je připojen **zatěžovací odpor**  $R_z$ , jak ukazuje obr.1.18. Zaujímáme se o velikost **výkonu** dodávaného **do zatěžovacího**



Obr.1.18



Obr.1.19

**odporu** a o podmínky, za kterých je tento výkon **maximální**. Jde např. o situaci, kdy zdrojem energie je přijímací anténa a spotřebičem vstupní odpor přijímače. Energie, která je k dispozici, je velmi omezená a proto se snažíme o co největší její využití. Dosáhneme-li maximálního možného výkonu signálu na vstupu přijímače, bude snadnější získat kvalitní příjem s nízkou úrovní rušivých signálů (např. šumu).

Výkon v zátěži je roven součinu proudu  $I$  a napětí na zátěži  $U_z$ . Proud obvodem je zřejmě

$$I = \frac{U_i}{R_i + R_z} \quad \text{a napětí na zátěži} \quad U_z = U_i \frac{R_z}{R_i + R_z} .$$

$$\text{Proto} \quad P_z = U_z \cdot I = U_i^2 \frac{R_z}{(R_i + R_z)^2} , \quad (1 - 30)$$

výkon závisí na parametrech zdroje, které jsou předem dány, a na velikosti zatěžovacího odporu  $R_z$ .

Výkon je nulový jak v případě, že  $R_z=0$  (napětí na zátěži je rovno nule), tak i v případě, že  $R_z$  roste nade všechny meze (proud je nulový). Pro určitou hodnotu  $R_z=R_{zopt}$  dosahuje výkon maxima. Polohu tohoto maxima vypočítáme z podmínky, že první derivace výkonu podle zatěžovacího odporu položíme rovnu nule, tj.

$$\frac{dP_z}{dR_z} = U_i^2 \frac{(R_i + R_z)^2 - R_z \cdot 2 \cdot (R_i + R_z)}{(R_i + R_z)^4} = 0 . \quad (1 - 31)$$

Protože zřejmě  $U_i \neq 0$  a současně  $R_i + R_z \neq 0$ , dostaneme pro **optimální velikost zatěžovacího odporu**

$$R_{zopt} = R_i . \quad (1 - 32)$$

Zatěžovací odpor musí být roven vnitřnímu odporu zdroje. Odpovídající výkon v zátěži, tj. **maximální využitelný výkon zdroje** pak bude

$$P_{max} = \frac{U_i^2}{4R_i} . \quad (1 - 33)$$

Poznamenejme, že podmínka, kterou jsme právě odvodili, vychází z požadavku maximálního využití schopností daného zdroje elektrické energie. Nebudeme se ovšem snažit ji aplikovat např. na případ, kdy odebíráme energii z elektrorozvodné sítě. Tam půjde o jinou situaci a tu posuzujeme podle tzv. účinnosti přenosu energie, dané jako

poměr výkonu odevzdaného do zátěže k výkonu, který zdroj vnitřního napětí  $U_i$  dodává do celého obvodu

$$h = \frac{P_z}{P_i} = \frac{U_i^2 \frac{R_z}{(R_i + R_z)^2}}{U_i^2 \frac{1}{R_i + R_z}} = \frac{R_z}{R_i + R_z} \quad (1 - 34)$$

Účinnost je nulová, pracuje-li zdroj nakrátko, blíží se však asymptoticky k jedné, roste-li zatěžovací odpor nade všechny meze. Křivky závislosti účinnosti i užitečného výkonu na zatěžovacím odporu jsou nakresleny na obr.1.19. Za podmínek, kdy zdroj odevzdává maximální výkon, je účinnost pouze padesátiprocentní. Odebíráme-li energii z veřejné rozvodné sítě, musíme se snažit o co největší účinnost přenosu, o minimální ztráty na odporech vedení a na odporech pomocných zařízení, která přenos energie zabezpečují. Za této situace tedy musí být zatěžovací odpor podstatně větší než vnitřní odpor zdroje.

## Řízené (závislé) zdroje elektrické energie

Zvláště proto, abychom postihli zesilovací schopnosti tranzistorů nebo celých složitých obvodů, je užitečné definovat pojem **řízeného zdroje elektrické energie**. Takový zdroj zprostředkovává přenos energie ze zdroje napájecího napětí (obvykle stejnosměrného) do obvodu a je při tom řízen zpracovávaným signálem. Přitom ze signálového obvodu energii neodebírá. Připomíná to motor automobilu, který chemickou energii paliva přenáší na kola podle toho, jak řidič sešlápne plynový pedál.

Protože máme zdroje napětí a zdroje proudu a protože řídicí veličinou může být také napětí nebo proud, rozlišujeme **čtyři typy** řízených zdrojů:

### 1. Zdroj proudu řízený napětím, ZPŘN

Schéma zdroje s označením důležitých veličin je na obr.1.20a. Výstupní proud zdroje je úměrný řídicímu napětí mezi vstupními svorkami. Konstanta úměrnosti  $S$  má rozměr vodivosti (často se označuje  $g_m$ ) a nazývá se strmost nebo přenosová (převodní)vodivost zdroje. Tento zdroj se používá v náhradních schématech bipolárních i unipolárních tranzistorů (tranzistorů řízených elektrickým polem, FET).

### 2. Zdroj napětí řízený napětím (ideální zesilovač napětí), ZNŘN

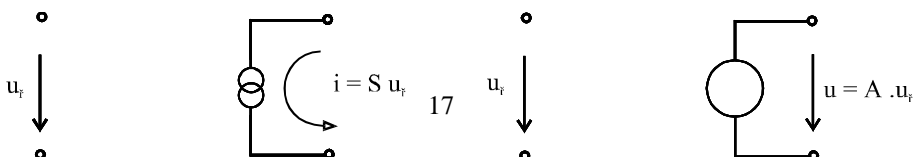
Schéma zdroje je na obr.1.20b. Výstupní napětí zdroje je úměrné řídicímu napětí. Konstanta úměrnosti  $A$  je bezrozměrná a nazývá se napěťové zesílení.

### 3. Zdroj proudu řízený proudem (ideální zesilovač proudu), ZPŘP

Schéma je na obr.1.20c. Výstupní proud je úměrný řídicímu proudu, který protéká zkratovou spojkou na vstupu zdroje. Konstanta úměrnosti  $B$  je bezrozměrná (někdy se značí  $\beta$ ) a nazývá se proudové zesílení.

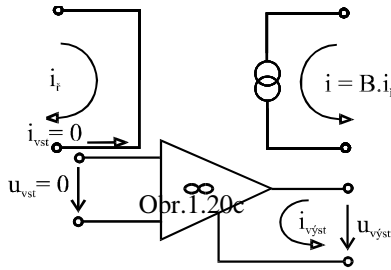
### 4. Zdroj napětí řízený proudem, ZNŘP

Schéma je na obr.1.20d. Výstupní napětí je úměrné řídicímu proudu. Konstanta úměrnosti  $W$  má rozměr odporu a nazývá se přenosový (převodní) odpor.

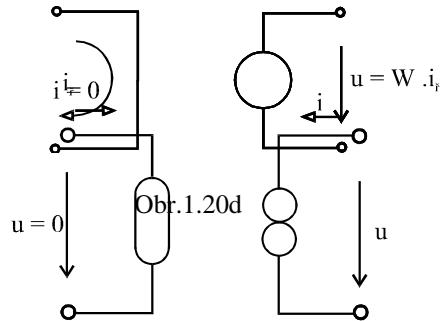


### Ideální operační zesilovač

Ideální operační zesilovač patří k základním obvodovým prvkům. Je definován jako **limitní případ** kteréhokoli ze čtyř typů řízených zdrojů, jestliže parametr příslušného zdroje  $S$ ,  $A$ ,  $B$  nebo  $W$  roste nade všechny meze. V praxi se mu svými vlastnostmi blíží reálný operační zesilovač nebo tzv. transimpedanční zesilovač. Tyto prvky jsou vyráběny



Obr.1.21a



Obr.1.21b

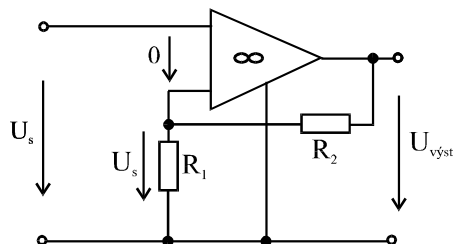
ve formě integrovaných obvodů. Integrované operační zesilovače běžně dostupné na trhu mívají napěťové zesílení řádově ve statisících až milionech. Přes to, že jejich zesílení není nekonečně velké, v mnoha aplikacích se dá za takové pokládat. Schematická značka ideálního operačního zesilovače je na obr.1.21a.

Protože samozřejmě očekáváme, že výstupní veličiny (napětí i proud na výstupu) operačního zesilovače mají konečnou velikost a zesilovač má nekonečně velké napěťové i proudové zesílení, musí být napětí i proud na vstupu současně rovny nule. Říkáme, že ideální operační zesilovač udržuje na vstupních svorkách tzv. **virtuální nulu**. (To je možné proto, že ideální operační zesilovač se používá vždy v zapojení se **zpětnou vazbou** signálu z výstupu na vstup.)

**Ideální operační zesilovač** lze pokládat za jeden ze **základních obvodových prvků**, protože jiné prvky, např. všechny čtyři řízené zdroje, lze nahradit zapojením, složeným z ideálního operačního zesilovače a rezistorového obvodu zpětné vazby.

### Příklad 1.3.

Na obr.1.22 je nakresleno schéma obvodu s ideálním operačním zesilovačem a dvojicí rezistorů  $R_1$ ,  $R_2$ . Protože vstupní napětí zesilovače je rovno nule, je napětí na svorkách



Obr.1.22

rezistoru  $R_1$  rovno napětí zdroje signálu  $U_s$ . Proud rezistorem je tedy  $U_s/R_1$ . Stejně veliký proud protéká i rezistorem  $R_2$  a proto je napětí na výstupu zesilovače rovno

$$U_{vyst} = U_s \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = A U_s .$$

Obvod jako celek se tedy chová jako ideální zesilovač napětí se zesílením  $A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ .

#### Poznámka:

Ideální operační zesilovač udržuje na vstupu současně nulové napětí i nulový proud. To se někdy modeluje zvláštním obvodovým prvkem, tzv. **nulátorem**, zapojeným do obvodu místo vstupních svorek zesilovače. Na druhé straně napětí i proud na výstupu jsou dány výhradně vlastnostmi obvodu zpětné vazby a na zesilovači vlastně nezávisí. To se může modelovat obvodovým prvkem nazývaným **norátor**. Místo ideálního operačního zesilovače můžeme tedy použít náhradního schématu s dvojicí nulátor-norátor, kterou nazýváme nulor (obr.1.21b). Je-li v obvodu větší množství nulátorů a norátorů, lze vždy libovolnou jejich dvojici vybrat a pokládat ji za náhradní schéma jednoho ideálního operačního zesilovače. Principiálně (alespoň teoreticky, bez ohledu na případnou nestabilitu) můžeme tedy dosáhnout stejné funkce obvodu s celou řadou různých variant zapojení s operačními zesilovači.

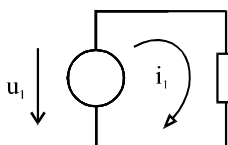
#### 1.4.4. Princip superpozice

Princip superpozice je klíčový princip, který je základem většiny metod, používaných při analýze lineárních elektrických obvodů. Analýzu velmi usnadňuje. Je založen na skutečnosti, že odezva lineárního obvodu na budící signál je přímo úměrná tomuto signálu.

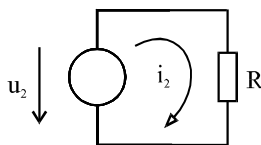
Uvažujme jednoduchý obvod s **lineárním rezistorem**  $R$ , nakreslený na obr.1.23a. Obvod je napájen napětím  $u_1$  a teče jím proud  $i_1 = u_1/R$ . Použijeme-li (jiného) napětí na vstupu  $u_2$ , bude proud obvodem roven  $i_2 = u_2/R$ , viz obr.1.23b. Jestliže nyní necháme obě napětí působit současně, jak uvádí obr.1.23c, bude na vstupu napětí  $u = u_1 + u_2$  a celkový proud bude roven

$$i = \frac{u}{R} = \frac{u_1 + u_2}{R} = \frac{u_1}{R} + \frac{u_2}{R} = i_1 + i_2.$$

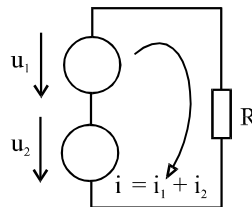
Výsledný proud je tedy dán prostým **součtem, superpozicí**, účinků obou dílčích napětí.



Obr.1.23a



Obr.1.23b



Obr.1.23c

**Zcela jiná situace** nastane v případě, kdy **rezistor** bude **nelineární**. Předpokládejme nejjednodušší případ, kdy má charakteristika rezistoru parabolický tvar, tedy

$$i = a \cdot u^2.$$

Pak při napětí  $u_1$  bude proud obvodem  $i_1 = a \cdot u_1^2$ , při napětí  $u_2$  bude proud  $i_2 = a \cdot u_2^2$ . Necháme-li obě napětí působit současně, bude celkový proud



$$i = a.u^2 = a.(u_1 + u_2)^2 = a.u_1^2 + a.u_2^2 + 2.a.u_1.u_2 = i_1 + i_2 + 2.a.u_1.u_2,$$

bude se tedy o  $2au_1u_2$  lišit od prostého součtu odezev obvodu na dílčí napětí. Tento **dodatečný člen existuje** pouze tehdy, působí-li oba signály  $u_1, u_2$  **současně**. Při větším počtu dílčích signálů by byla situace ještě daleko složitější.

**Superpozice tedy platí pouze v lineárním obvodu, v nelineárním obvodu neplatí.**

**Poznámka:**

Předchozí výklad uvažoval pro jednoduchost elementární obvod s jediným pasivním obvodovým prvkem. Libovolně složitou lineární obvodovou soustavu však můžeme postupným zjednodušováním (jak ukáže následující kapitola) převést na výše uvažovaný elementární model soustavy. **Princip superpozice** proto **platí pro libovolnou lineární obvodovou soustavu**.