

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Ing. Jan Vaňuš Ph.D.

Ing. Roman Hrbáč Ph.D.

Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.

Ostrava 2013



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

Název: ELEKTROTECHNIKA - TEORIE
Autoři: Ing. Jan Vaňuš Ph.D., Ing. Roman Hrbáč Ph.D., Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.
Vydání: první, 2013
Počet stran: 247
Náklad: 5
Jazyková korektura: nebyla provedena.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tyto studijní materiály vznikly za finanční podpory Evropského sociálního fondu a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu Operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.



Název: Modernizace výukových materiálů a didaktických metod
Číslo: CZ.1.07/2.2.00/15.0463
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

© 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



MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD
CZ.1.07/2.2.00/15.0463

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

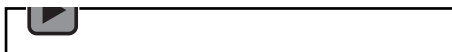


MOTIVACE:

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 proudu v daném obvodu.

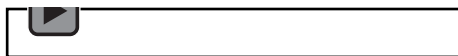


Co je tedy aktivní a pasivní prvek?

- 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.



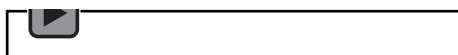
Audio 1.2 Pasivní prvek



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

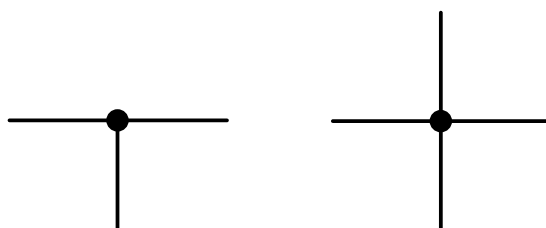


Audio 1.3 Aktivní prvek

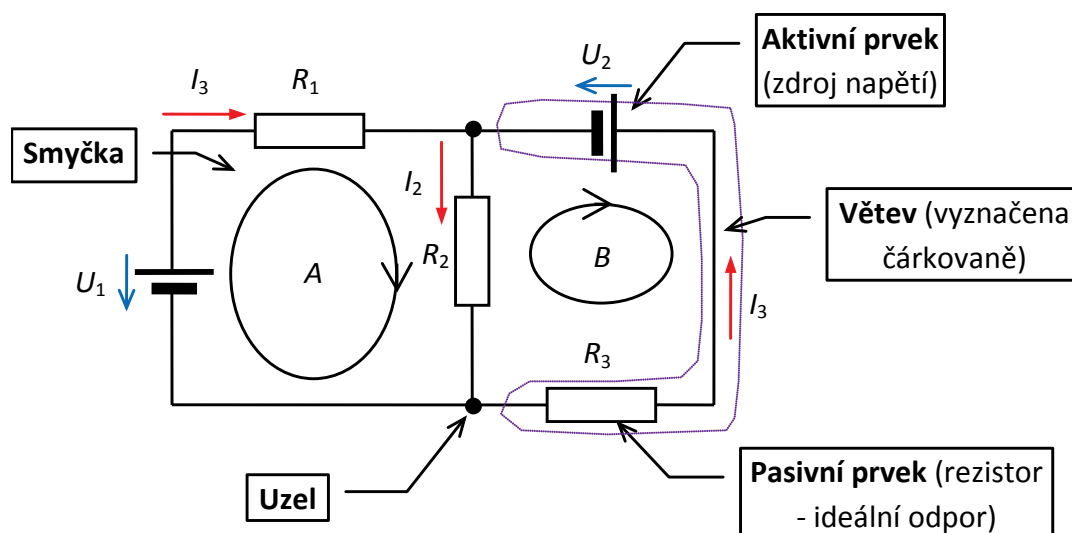


Při praktickém použití, tj. sestavování modelů obvodů na základě reálných stavů, se vždy snažíme všechny vlastnosti všech prvků obvodu popsat matematickými vztahy. Z tohoto důvodu se vždy reálné (skutečné) prvky nahrazují ideálními, přičemž ne vždy se to však podaří zcela dokonale.

Každý dvupól, 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

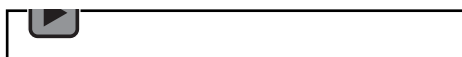
Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, aktivním prvkem (dvoj pólem) je zdroj elektrické energie. Tento zdroj může být pouze v provedení zdroje napětí nebo proudu.

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.



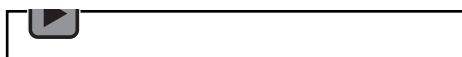
Audio 1.4 Ideální zdroj napětí



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

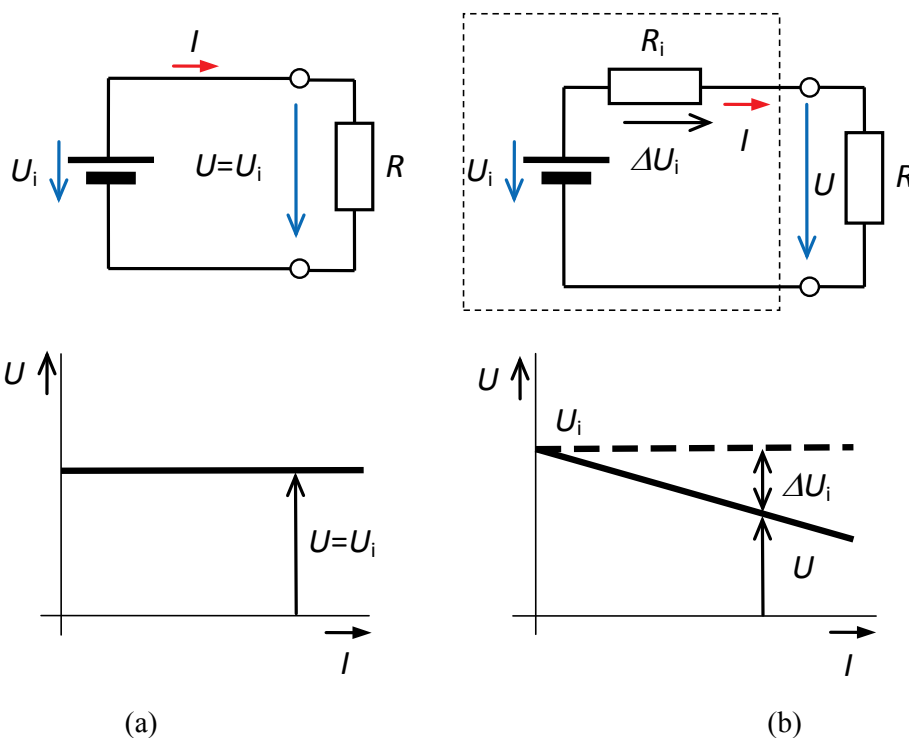


$$U = U_i - \Delta U_i \quad (1)$$

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

Reálný zdroj

Pro tématický okruh "Elektrotechnika"

Návrh animace:

Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D.

Vypracoval:

Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D.

Fakulta elektrotechniky a informatiky

VŠB-Technická univerzita Ostrava

2012

⏮ ⏪ ⏩ ⏭

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).

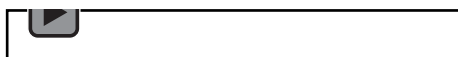
$$I = \frac{U_i}{R_i + R} \quad (5)$$

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.



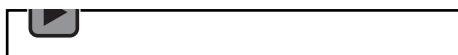
Audio 1.6 Ideální zdroj proudu



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

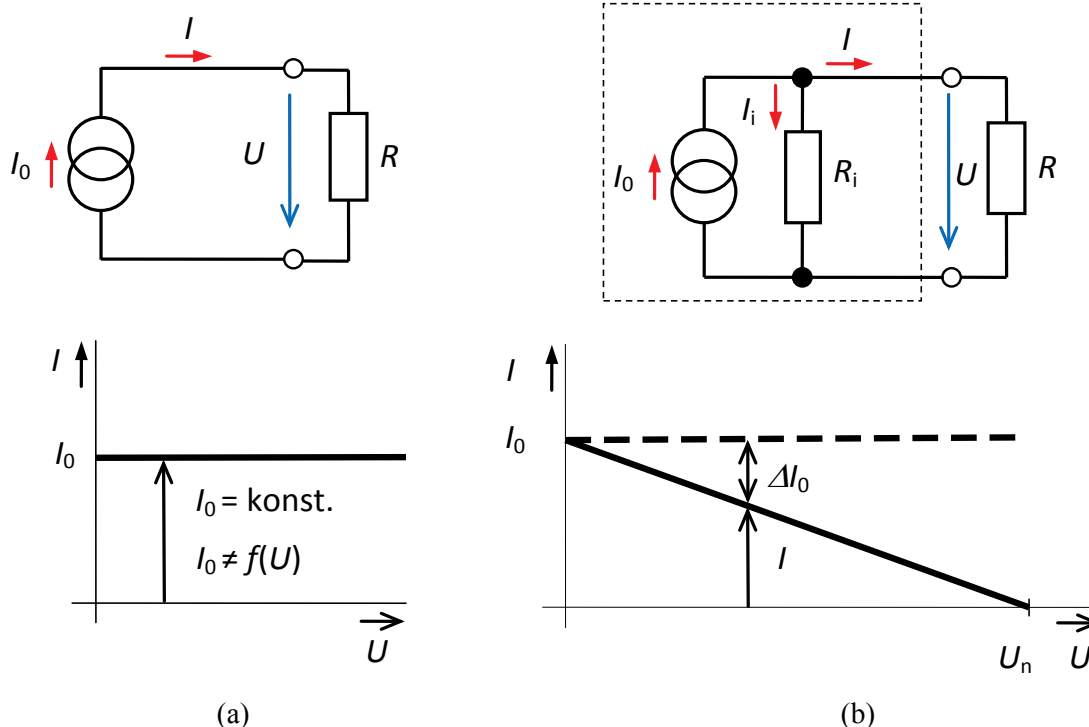


$$I = I_0 - I_i = I_0 - \frac{U}{R_i} \quad (6)$$

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:

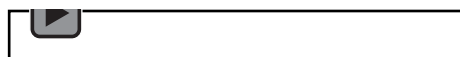
- rezistor (odporník, odpor),
- cívku (induktor),
- kondenzátor (kapacitor).

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).

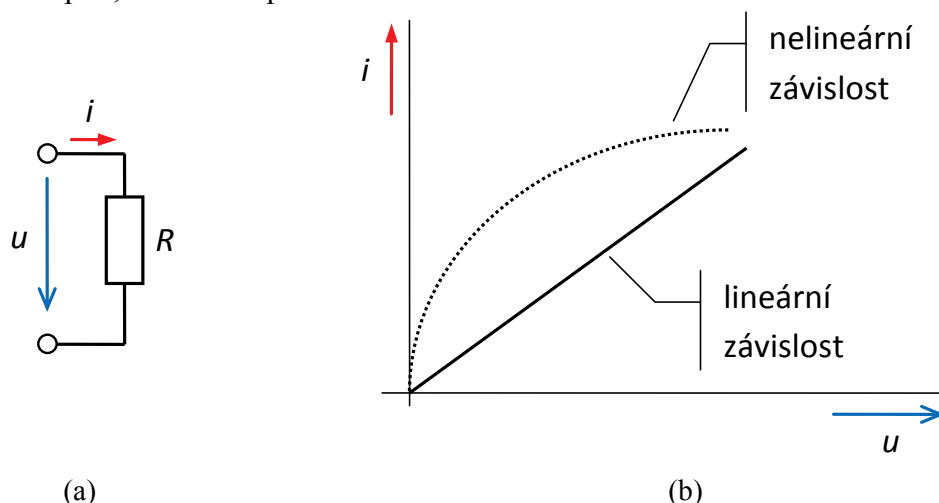
$$P = U \cdot I \quad (10)$$



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.

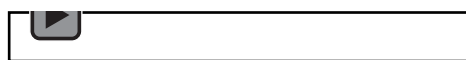


Obr. 5.1 (a) Schematická značka rezistoru, (b) Volt-ampérová charakteristika rezistoru

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 cívkce 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).

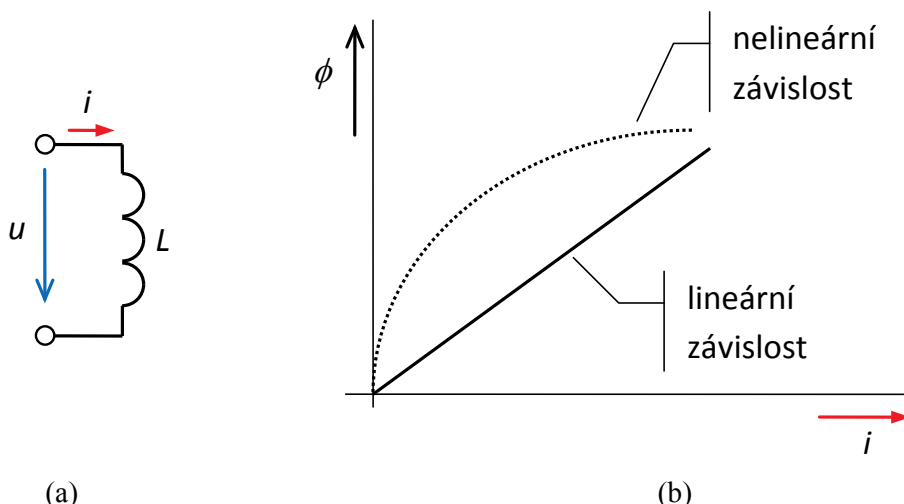
$$u = L \frac{di}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (13)$$

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.





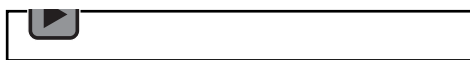
Obr. 5.2 (a) Schematická značka induktoru, (b) Ampér-Weberová charakteristika induktoru

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



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

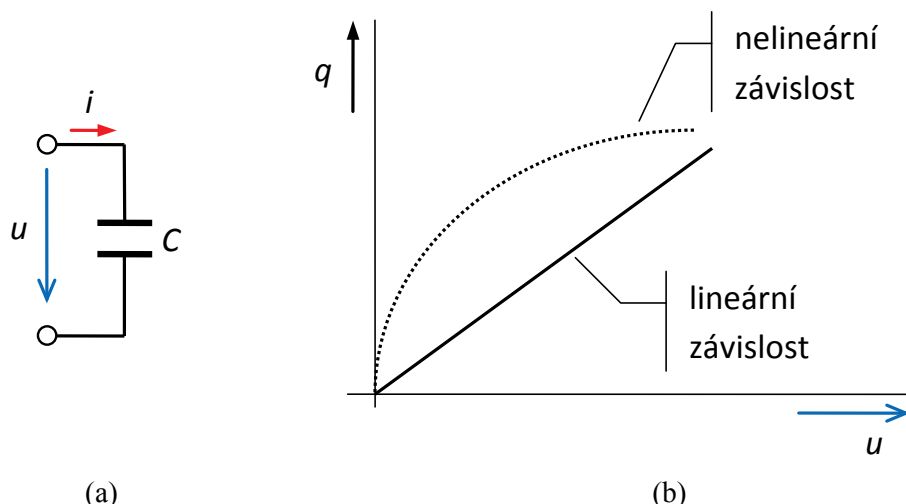
Ze zákona zachování elektrického náboje lze odvodit vztah (16) mezi proudem a napětím na kapacitoru.

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

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),

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

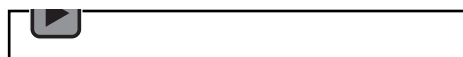
kde Q je velikost náboje nahromaděného na deskách a S je plocha desky.

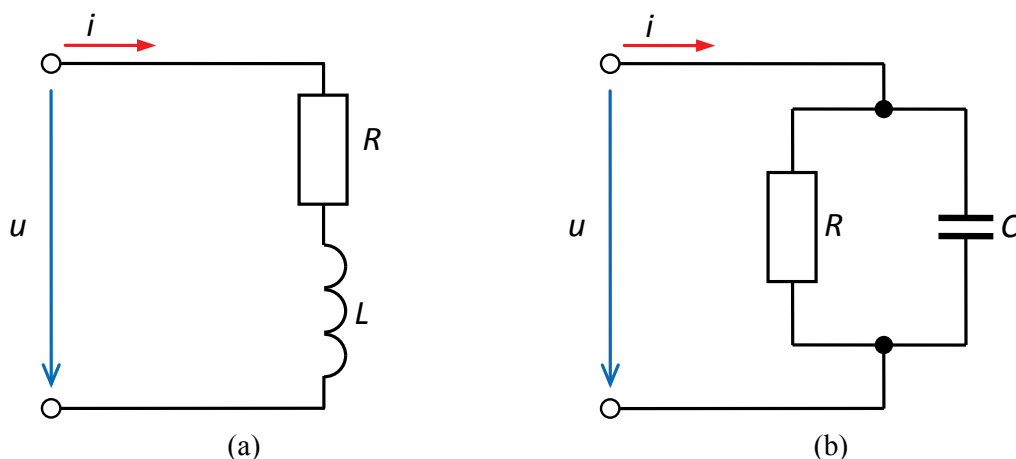
Je nutno si však uvědomit, že pro popsání vlastností reálného prvku nám ve většině případů nepostačuje použití pouze výše uvedených ideálních prvků. Musíme tedy přistoupit k vytvoření náhradního schématu. Toto náhradní schéma se týká jak cívky (induktoru), tak kondenzátoru (kapacitoru).

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

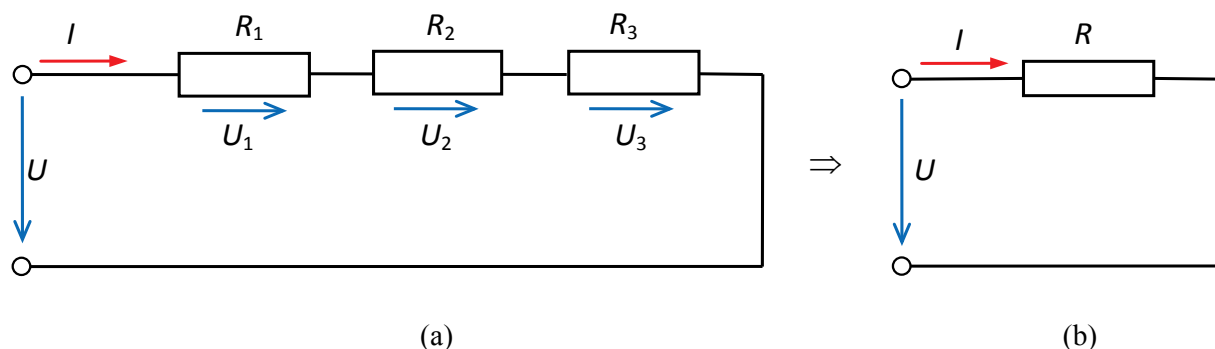
Tato metoda je vhodná zejména v obvodech s jedním zdrojem. Její podstatou je nahrazování sériových a paralelních skupin pasivních dvojpólů ekvivalentními dvojpóly. V některých případech je nutné použít tzv. „metody transfigurace Y- Δ “, o níž bude řečeno dále podrobněji. Vlastní řešení daného obvodu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

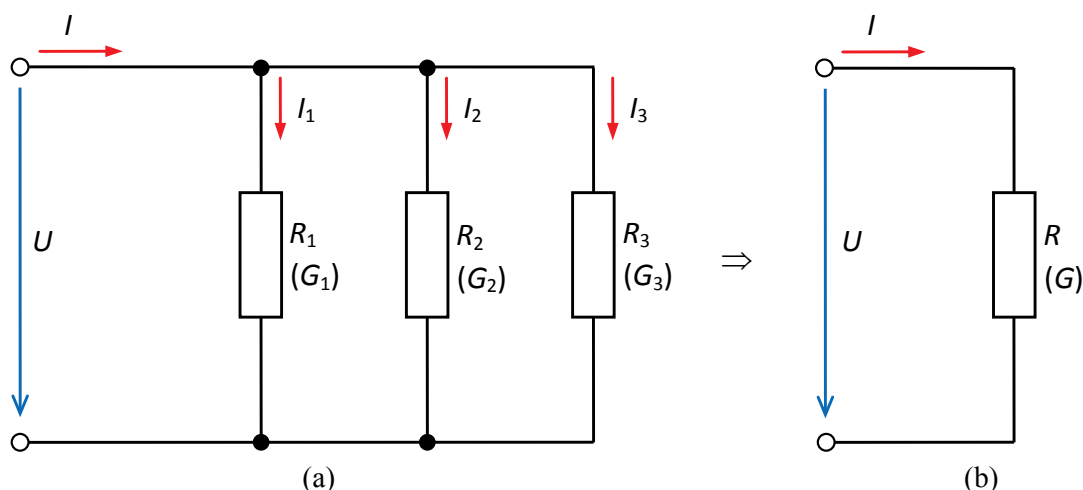
Rezistory zapojené paralelně (vedle sebe) mají jedno společné napájecí napětí U a celkový napájecí proud I se rozděluje v poměru odporů (vodivostí) jednotlivých rezistorů. Příklad paralelního zapojení tří rezistorů je ukázán na Obr. 6.2. Výpočet celkového odporu R paralelního zapojení je dán vztahem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

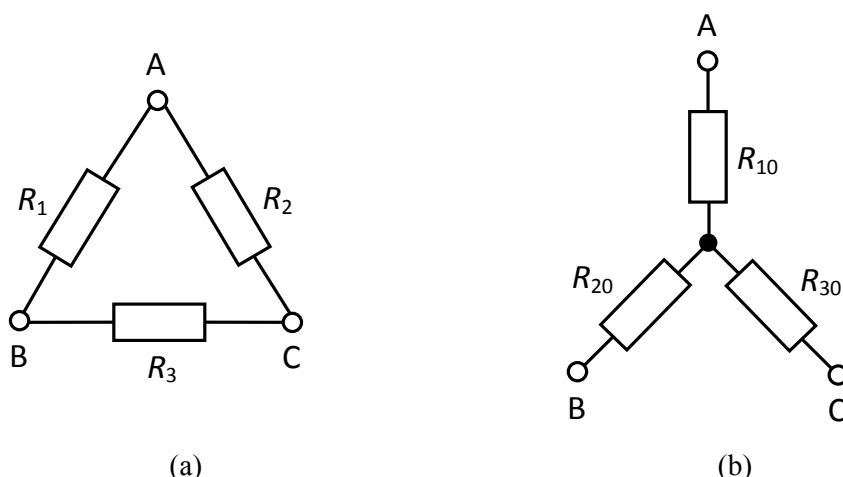
Ve složitějších elektrických obvodech, zvláště pak v můstkových zapojeních se lze setkat se třemi dvojpóly zapojenými tak, že tvoří trojúhelník (Δ) nebo hvězdu (Y), viz Obr. 6.3. Pro řešení zde nelze zvolit ani jeden z výše popsaných způsobů řešení – tedy sériovou ani paralelní kombinaci. Zpravidla se 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).

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

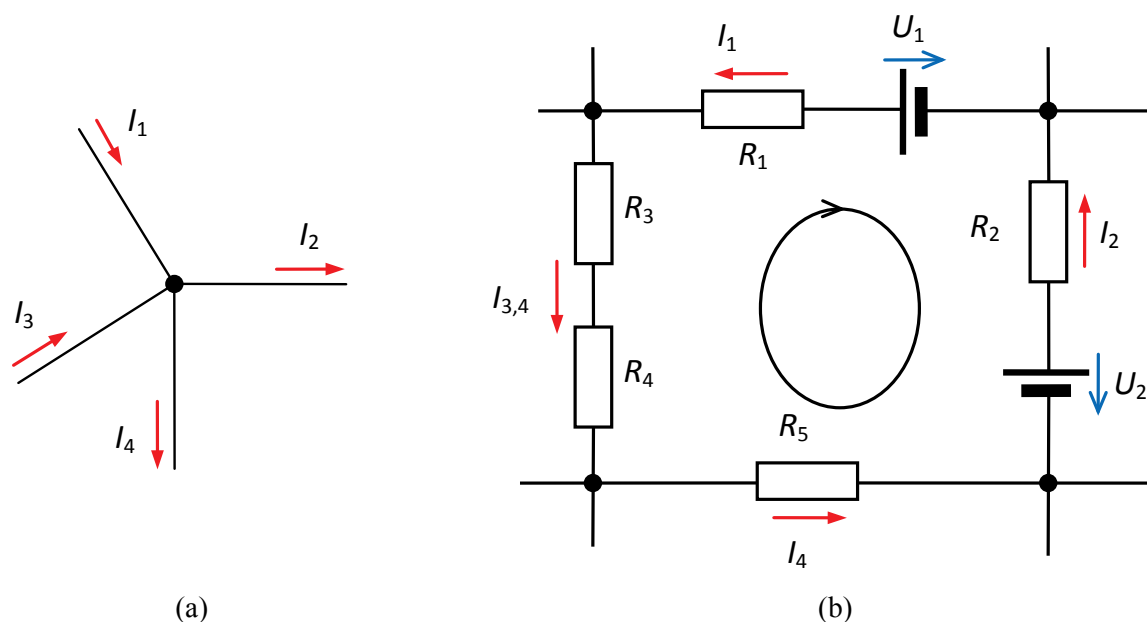
II. Kirchhoffův zákon – platí pro uzavřený elektrický obvod a má toto znění: „algebraický součet všech okamžitých hodnot svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích se rovná nule“. Obecně platný vztah má tvar (29), kde n je počet všech úbytků napětí v uzavřené smyčce obvodu.

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

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 $I_{3,4} = I_3 = I_4$.

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



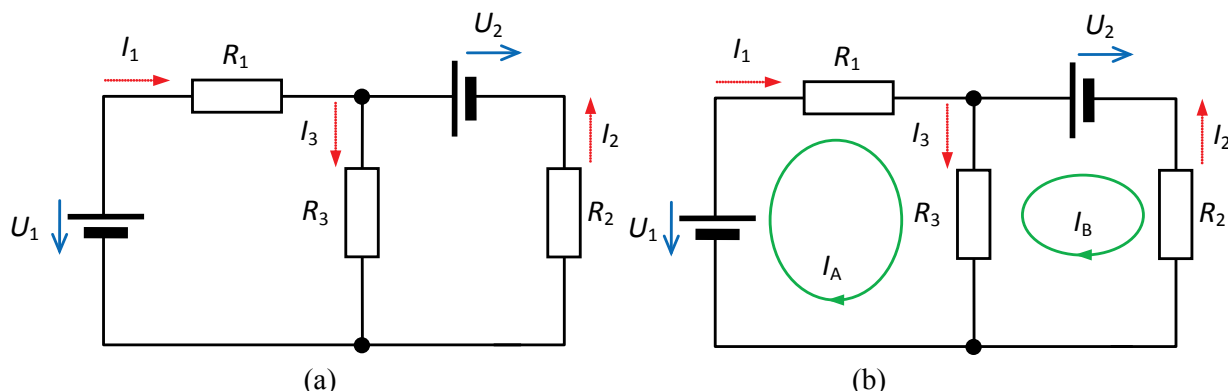


Obr. 6.4 (a) 1. Kirchhoffův zákon (b) 2. Kirchhoffův zákon

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

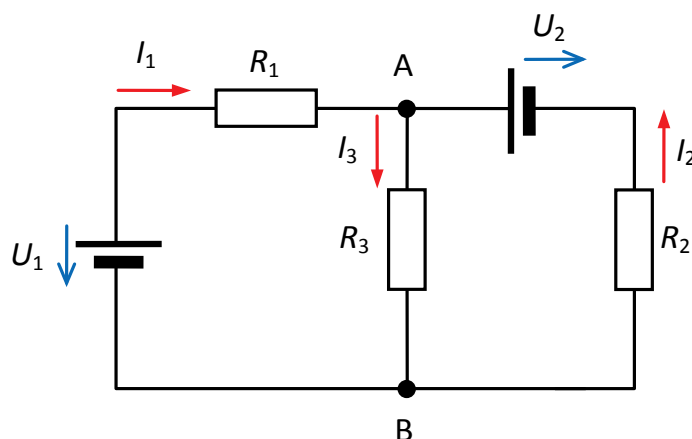
$$I_1 = \frac{U_A - U_1}{R_1}; I_2 = \frac{U_A - U_2}{R_2}; I_3 = \frac{U_A}{R_3} \quad (37)$$

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

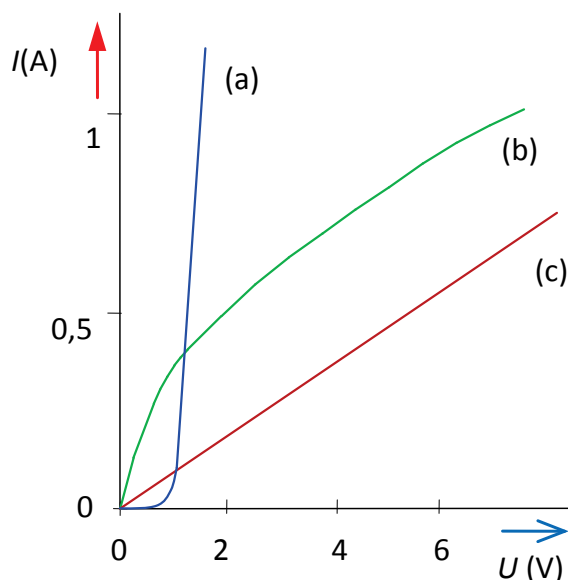
1.7 Nelineární obvody

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.

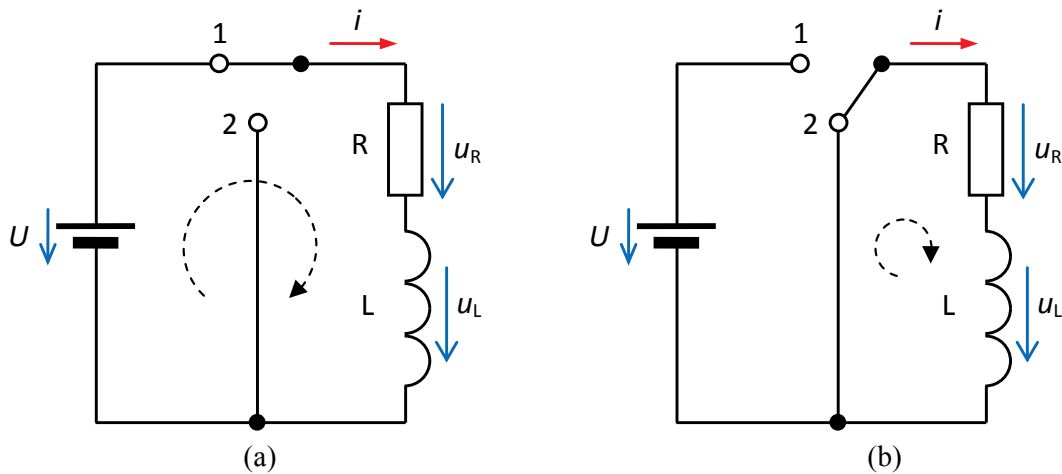
Některé důležité případy přechodných dějů jsou uvedeny dále.

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).

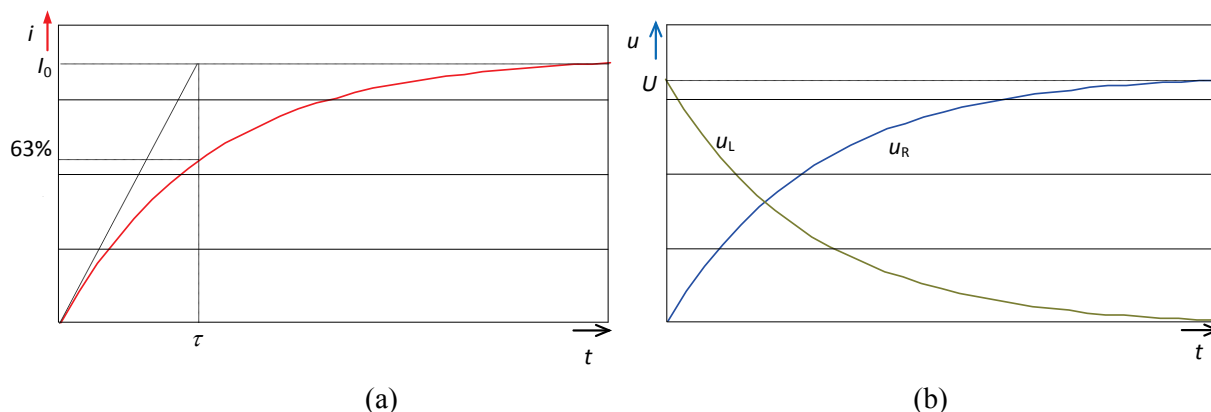
$$\tau = \frac{L}{R} \quad (44)$$

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)

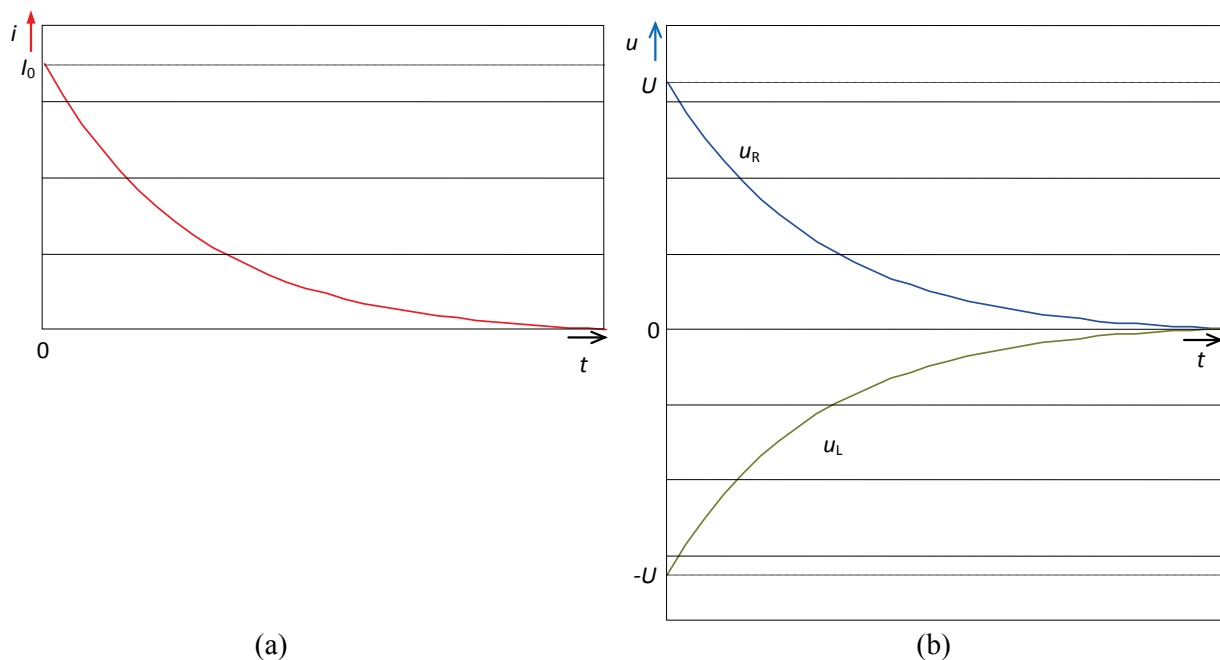
Při přepnutí přepínače z polohy 1 do polohy 2, viz Obr. 8.1 (b), se proud v obvodu a napětí na cívce a rezistoru mění podle těchto vztahů:

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

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

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





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 obvodě. 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 obvodě podle schématu na Obr. 8.1 (b) je prakticky nemožné, neboť neumíme jednoduše matematicky popsat jiskru mezi kontakty spínače.

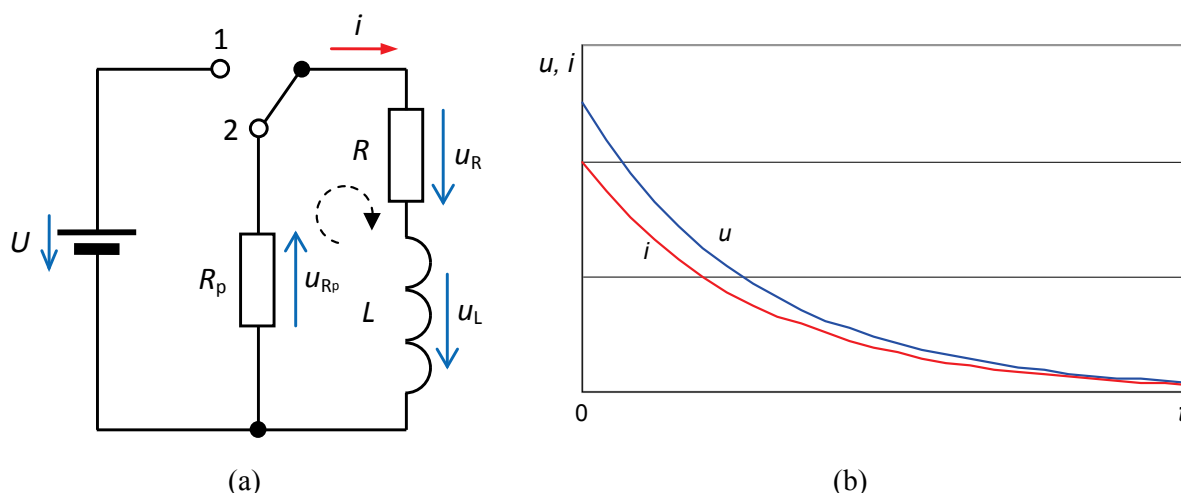
Na Obr. 8.3 je obvod s odporem pro omezení přepětí při vypínání, kde napětí lze vypočítat. Jestliže byl před vypnutím obvod v ustáleném stavu, cívkou protékal proud $I_0 = U/R$. Po vypnutí bude mít proud a napětí průběhy podle vztahů:

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

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

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





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

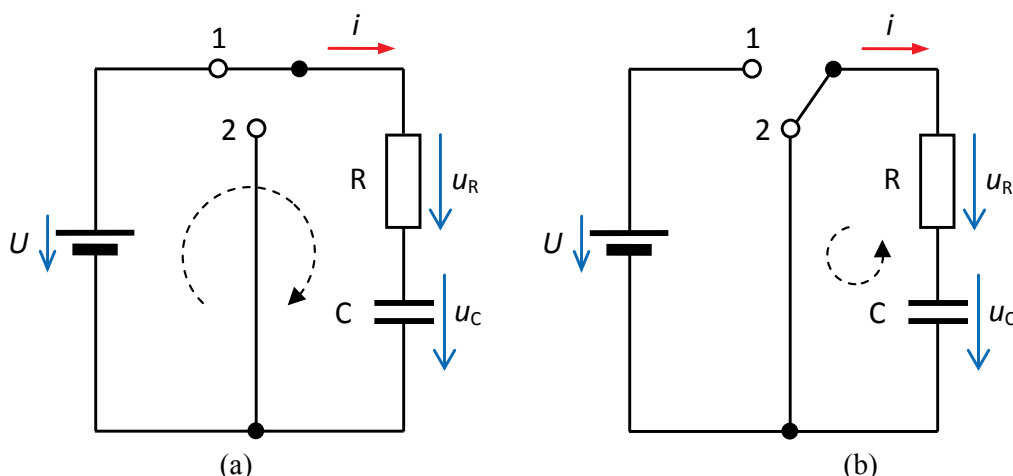
V prvním okamžiku po vypnutí je napětí u_{Rp} tolikrát vyšší než napětí zdroje, kolikrát je větší hodnota R_p než hodnota odporu R . Pokud by se odpor R_p blížil nekonečnu, blíží se také napětí u_{Rp} v prvním okamžiku nekonečnu a jde vlastně o případ podle rovnice (50). Časové průběhy proudů a napětí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



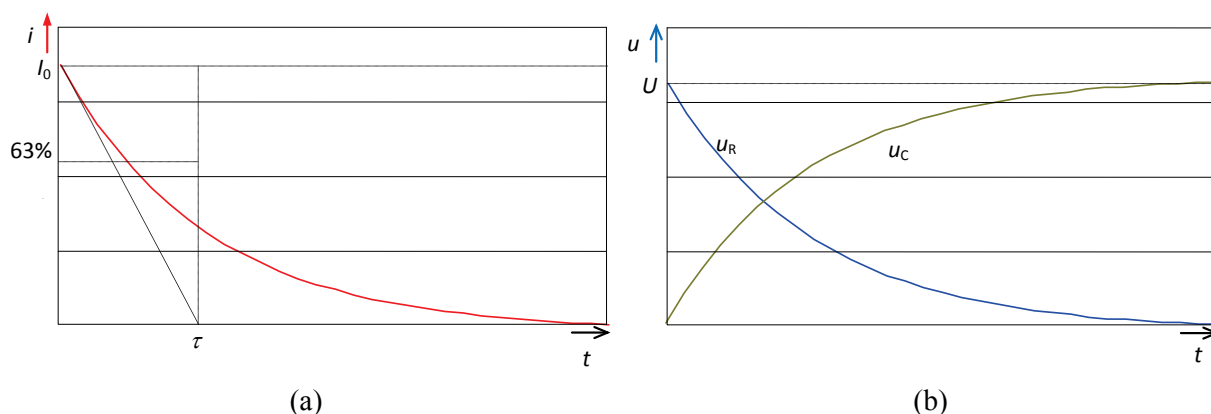
$$u_C = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (55)$$

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

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).

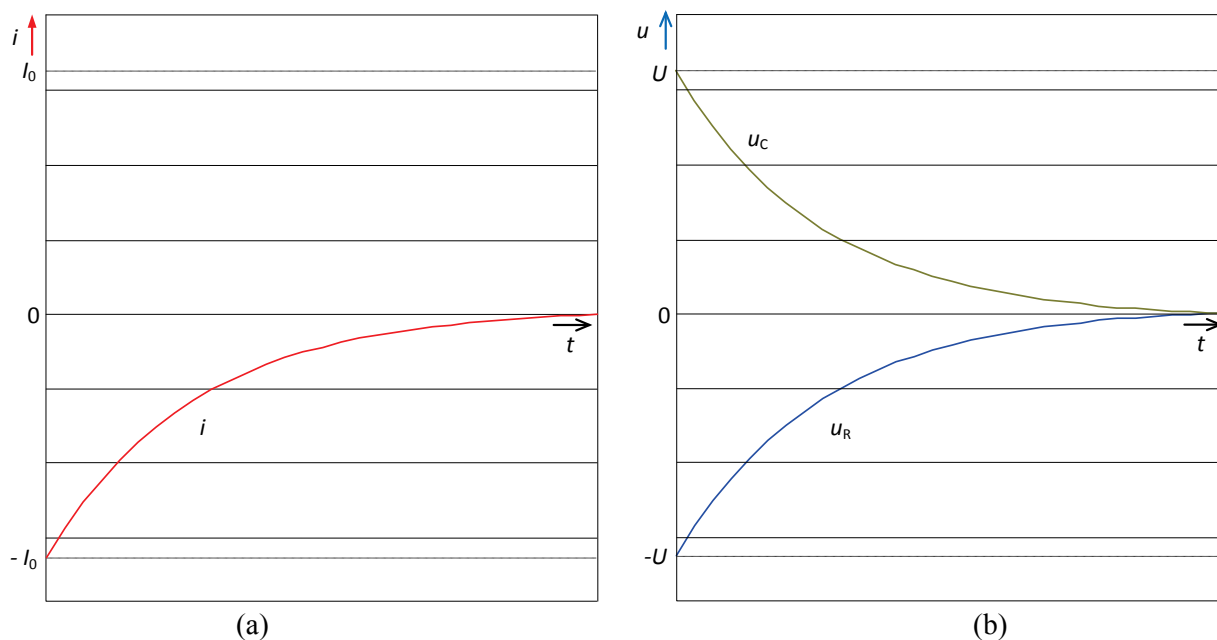
$$i = -I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (58)$$

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>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Jednofázové 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

3	JEDNOFÁZOVÉ OBVODY	3
3.1	ÚVOD.....	5
3.2	Symbolicko - komplexní metoda, fázory.....	8
3.3	Výkon střídavého proudu.....	10
3.3.1	Činný výkon	11
3.3.2	Jalový výkon	11
3.3.3	Zdánlivý výkon	12
3.4	Pasivní dvojpóly v obvodu střídavého (harmonického) proudu.....	12
3.4.1	Rezistor.....	12
3.4.2	Ideální cívka (induktor)	13
3.4.3	Ideální kondenzátor (kapacitor)	14
3.5	Sériové a paralelní řazení pasivních prvků	15
3.5.1	Sériové řazení prvků	15
3.5.2	Paralelní řazení prvků	16
3.5.3	Sériově paralelní řazení prvků	17
3.6	Rezonance	18
3.6.1	Sériový rezonanční obvod.....	18
3.6.2	Paralelní rezonanční obvod	19
3.7	Kompenzace účinníku.....	20
3.8	Neharmonické časové průběhy obvodových veličin	23
3.9	Literatura.....	25



3 JEDNOFÁZOVÉ OBVODY



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Základní pojmy z teorie střídavého proudu

Symbolicko - komplexní metoda, fázory

Výkon střídavého proudu

Pasivní dvojpóly v obvodu střídavého proudu

Sériové a paralelní řazení pasivních prvků

Rezonance

Kompenzace účinníku

Neharmonické průběhy

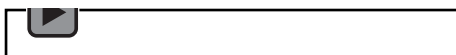


MOTIVACE:

Ke sledování televize, k práci na počítači nebo k večernímu čtení při lampičce je potřeba zdroj jednofázového napětí 230V. Tyto spotřebiče lze zapojit například připojením pohyblivého přívodu do zásuvky 230V. Každý z těchto zmíněných spotřebičů má své specifické parametry jako je např. jmenovitý činný, jalový nebo zdánlivý výkon, jmenovitý proud, jmenovitá frekvence, popřípadě charakter zátěže. Bližší vysvětlení uvedených termínů s popisem chování jednotlivých prvků v jednofázové soustavě je vysvětlen v následující přednášce o jednofázových střídavých obvodech.



Audio 3.1 Motivace



CÍL:

Perioda, amplituda, střední a efektivní hodnota střídavého proudu a napětí, kapacitní C , induktivní L a odporový R charakter zátěže, jejich vlastnosti v obvodech napájených zdrojem jednofázového střídavého napětí, symbolicko - komplexní metoda výpočtu jednofázových obvodů, fázory, vektorový diagram, paralelní a sériové řazení prvků R , L , C .
činný, jalový a zdánlivý výkon,



rezonance,
kompenzace účinníku,
neharmonické průběhy napětí a proudu.



3.1 ÚVOD

Doposud jsme se zabývali obvody, kde obvodové veličiny (proud a napětí) měly v ustáleném stavu konstantní, časově nezávislé hodnoty. Kromě těchto veličin se lze velmi často v praxi setkat s veličinami, které se s časem mění - veličiny střídavé. Obvody ve kterých se tyto veličiny vyskytují, se označují jako obvody střídavé.

Výklad základních pojmů, pro střídavý proud se vztahuje na jakoukoliv střídavou veličinu (tedy např. na napětí). Střídavý elektrický proud se může měnit v elektrickém obvodu v pravidelných nebo i nepravidelných časových intervalech v závislosti na změnách napětí napájecího zdroje včetně jeho polarity).

Důležité jsou zejména periodické průběhy střídavého harmonického proudu (sinusového). Jejich časový průběh se opakuje v pravidelných intervalech - periodách (cyklech, kmitech) - obr.1. Délka periody se nazývá doba kmitu T , její závislost je dána kmitočtem sítě f (rovnice 1).

$$T = \frac{1}{f} \text{ (s; Hz)}. \quad (1)$$

Jednotkou kmitočtu je hertz (Hz), který má rozměr (s^{-1}). Jedna perioda proudu se také nazývá vlna střídavého proudu. Pro okamžitou hodnotu (značí se malým písmenem) periodického proudu platí vztah 2.

$$i(t) = i(t+T) = i(t+kT). \quad (2)$$

Nejvyšší okamžitá hodnota, které periodický proud dosahuje, se nazývá maximální nebo vrcholová hodnota, amplituda, značí se velkým písmenem s indexem m, nebo max, např. I_m , $I_{\max}$.

Pro okamžitou hodnotu sinusového proudu platí vztah

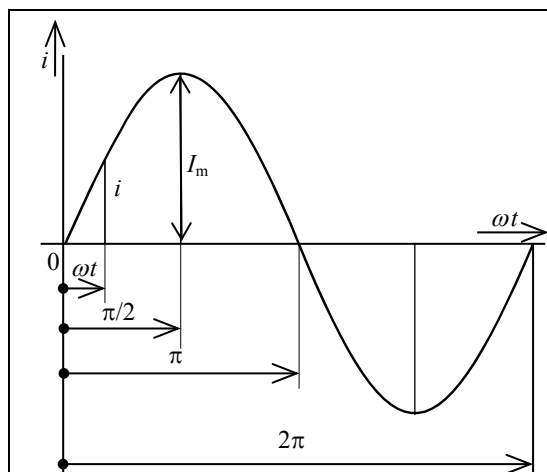
$$i(t) = I_m \sin(\omega t), \quad (3)$$

kde ω se nazývá úhlová rychlost.

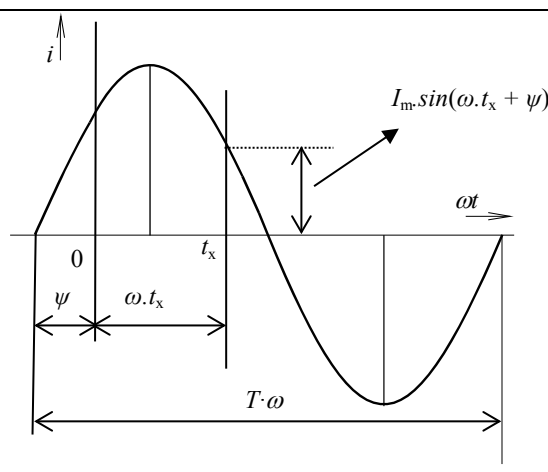
$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

Harmonický průběh nemusí obecně začínat z nulové hodnoty, je to dáno volbou počátku časové osy. Průběh má potom v čase $t=0$ počáteční fázový úhel ψ , který může být kladný tak i záporný.





Obr. 1 Střídavý proud sinusového průběhu bez posunutého počátku.

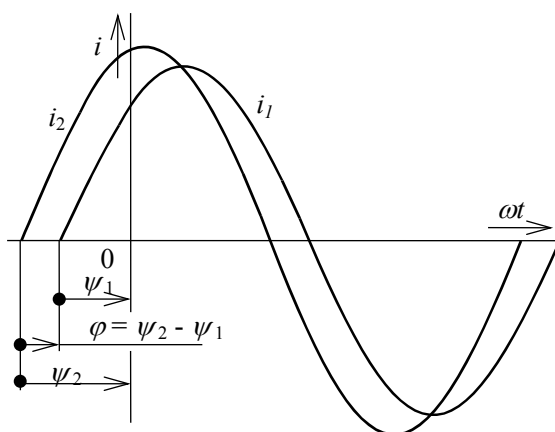


Obr. 2 Střídavý proud sinusového průběhu s posunutým počátkem.

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi) \quad (5)$$

Harmonické průběhy dvou veličin téhož kmitočtu mohou být vůči sobě vzájemně posunuty o úhel φ , kterému říkáme fázový posuv, pro který platí vztah

$$\varphi = \psi_2 - \psi_1 \quad (6)$$



Obr. 3 Dva harmonické proudy posunuté o úhel φ .

Přitom může jít o různé veličiny, například o proud a napětí. Pro fázový posuv φ a tato situace je znázorněna na obr. 3.

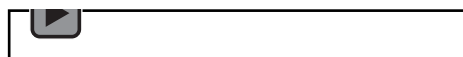
Pokud druhý průběh před prvním předbíhá, je úhel φ kladný, pokud se zpožďuje, je záporný. Pozor, v praxi je často velmi důležité dbát na znaménko fázového posuvu. Poněkud zvláštní význam má situace, kdy například dva proudy mají nulový fázový posuv, říkáme, že jsou ve fázi a jestliže mají posuv rovný π , říkáme, že jsou protifázi.

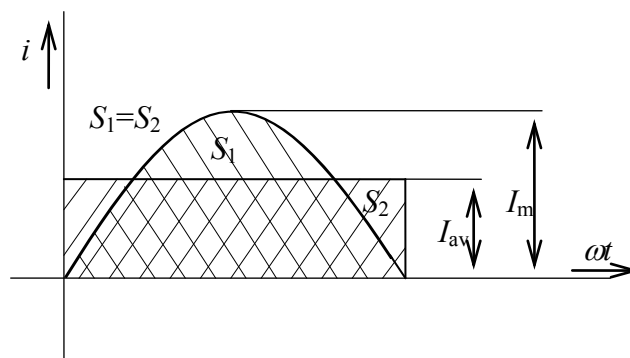
Mezi základní pojmy ve střídavých obvodech patří střední a efektivní hodnota veličin.

Střední hodnota odpovídá velikosti stejnosměrného proudu, který přenesení za jednotku času stejný náboj, jako daný střídavý proud. Je to vlastně výška obdélníku o stejné ploše, jako je plocha mezi průběhem proudu a nulovou osou, jak je uvedeno na obrázku 4.



Audio 3.2 Střední hodnota





Obr. 4 Střední hodnota střídavého proudu.

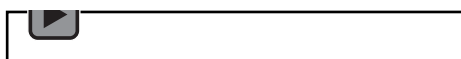
Pro harmonický proud ji počítáme pro jednu půlperiodu, protože obě půlperiody jsou stejné, ale s opačným znaménkem a za celou periodu by byla střední hodnota nulová. (Pro jiné průběhy kde není střední hodnota za celou periodu nulová, ji počítáme za celou periodu a udává nám vlastně stejnosměrnou složku veličiny.) Střední hodnota se obvykle značí velkým písmenem s indexem av (average), např. I_{av} . Pro střední hodnotu harmonického průběhu platí vztah 7.

$$I_{av} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \quad (7)$$

Efektivní hodnota střídavého proudu charakterizuje výkon proudu. Značí se velkým písmenem bez indexu, např. I a je to **nejběžněji udávaná hodnota střídavého proudu a napětí** (např. hodnota napětí v naší síti 230 V je právě efektivní hodnota tohoto napětí), rovněž většina měřicích přístrojů měří efektivní hodnoty napětí a proudů. Efektivní hodnota je velikost stejnosměrného proudu, který by při průchodu rezistorem vykonal za jednotku času stejnou práci (vyvinul teplo) jako daný průběh střídavého proudu.



Audio 3.3 Efektivní hodnota



Při odvození efektivní hodnoty se vychází z dříve uvedeného vztahu $p=R \cdot i^2$. Dosazením do rovnosti práce stejnosměrného proudu velikosti I a střídavého proudu i za dobu jedné periody, (za práci W dosazujeme integrál z výkonu) dostaneme vztah:

$$\int_0^T R \cdot I^2 dt = \int_0^T R \cdot i^2 dt \text{ z něhož efektivní hodnota } I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 dt}. \quad (8)$$

Jestliže za i dosadíme rovnici harmonického proudu, vyjde nám jako výsledek vztah 9.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Poměr I_m/I se nazývá vrcholový činitel k_v , pro harmonické průběhy má hodnotu právě $\sqrt{2}$.



3.2 SYMBOLICKO - KOMPLEXNÍ METODA, FÁZORY

Pro zjednodušení matematického popisu a řešení střídavých obvodů je výhodné vyjadřovat obvodové veličiny, tedy proudy a napětí pomocí fázorů.

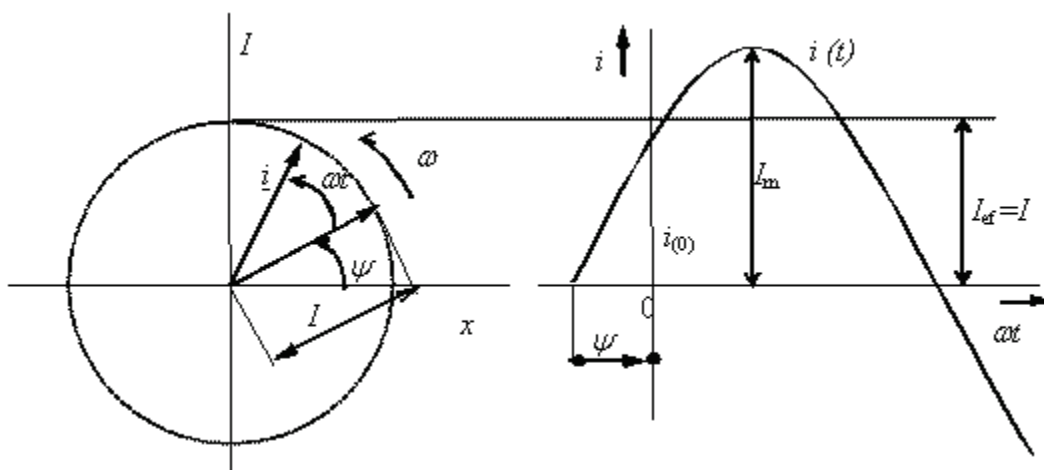
Fázorem rozumíme znázornění veličiny komplexní veličinou, jejíž argument se rovná počátečnímu fázovému úhlu a jejíž absolutní hodnota se rovná efektivní hodnotě dané veličiny.



Audio 3.4 Fázor



Příklad uvedeme opět pro proud. Fázor je otáčející se úsečka (vzhledem připomíná vektor), umístěný do počátku kartézského souřadnicového systému (nebo např. do komplexní Gaussovy roviny). Jeho velikost je rovna efektivní hodnotě proudu a otáčí se proti směru otáčení hodinových ručiček úhlovou rychlostí ω , která je totožná s úhlovou rychlostí proudu. Přitom v čase nula je pootočen o počáteční fázový úhel ψ . Průmět koncového bodu fázoru do svislé osy násobený přepočítacím koeficientem rovným $\sqrt{2}$ nám potom v každém okamžiku udává okamžitou hodnotu proudu. Jak ukázáno na obrázku 5, jedna vlna proudu vznikne otočením fázoru kolem dokola, o 2π radiánů (360°). (Sinusovka vlastně vzniká časovým rozvojem otáčivého pohybu.) Takový otáčející se fázor označujeme podtrženým malým písmenem, např. $\underline{i}$.



Obr. 5 Konstrukce časového průběhu proudu pomocí fázoru.

Při kladném úhlu ψ je fázor na počátku otočen v kladném směru otáčení, při záporném ψ naopak.

Otáčení fázoru ale uvažujeme, pouze hledáme-li okamžitou hodnotu veličiny. Jinak vystačíme s fázory zastavenými v jejich počáteční poloze (při $t'=0$), protože harmonická veličina je jednoznačně dána svou amplitudou a počátečním úhlem. Takovýto zastavený fázor už není funkcí času, proto ho značíme velkým písmenem.

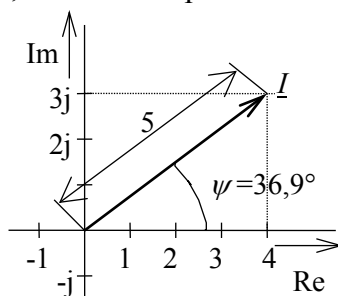
Fázor může být reprezentován komplexním číslem, což nám umožní provádět s ním poměrně snadno veškeré potřebné matematické operace (sčítání, odčítání, násobení, dělení).

Způsobů označení fázoru, se kterými se můžete setkat v literatuře je několik, buďto tučně $\mathbf{I}$, $\dot{I}$, $\hat{I}$, my se přidržíme označení s podtržením $\underline{I}$.



Dále existuje několik způsobů jak fázor zapsat:

- **Složkový tvar.** Příklad fázoru je na obr. 6 a jeho zápis ve složkovém tvaru by byl $\underline{I} = (4+j3) \text{ A}$. (Komplexní číslo píšeme do závorky, protože jednotka patří k oběma jeho složkám.)
- **Verzorový tvar.** Používá se převážně v elektrotechnice, $\underline{I} = I \angle \psi$, kde I je efektivní hodnota proudu a ψ je počáteční fázový úhel ve stupních, případně v radiánech. Fázor z obrázku by se v tomto případě zapsal $\underline{I} = 5 \text{ A} \angle 36,9^\circ$. (Jednotka se píše hned za hodnotu proudu, protože fázový úhel ψ už nemá rozměr proudu.)
- Třetím tvarem je **exponenciální (Eulerův) tvar**, známý též z matematiky. $\underline{I} = I \cdot e^{j\psi}$, kde e je základ přirozených logaritmů. V exponenciálním tvaru bychom měli zapisovat úhel v radiánech, nikoli ve stupních.



Obr. 6 Příklad fázoru v komplexní rovině.

Dále je opakování základních matematických operací s komplexními čísly (tato látka by již měla být studentům známá z matematiky).

Při výpočtech budeme používat pouze složkový a verzorový tvar komplexních čísel. V principu jdou všechny potřebné matematické operace (sčítání, odčítání, násobení, dělení a vytvoření komplexně sdruženého čísla) provádět ve složkovém tvaru, ale někdy je výhodnější používat tvar verzorový. Proto si objasníme převod mezi těmito tvary:

- **Ze složkového tvaru na verzorový.**

$$\underline{I} = x + jy = I \angle \psi,$$

kde absolutní hodnota proudu I a počáteční fázový úhel se spočítají dle vztahů

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \psi &= \arctg \frac{y}{x} \end{aligned} \quad (10)$$

Pozor, jestliže je reálná složka fázoru x záporná, je nutné k výslednému úhlu přičíst 180° , jestliže je reálná složka nulová, vztah sice nedokážeme vyčíslit, ale limitním řešením bychom dostali $\psi = +90^\circ$ ($y > 1$) nebo -90° ($y < 1$).

- **Z verzorového tvaru na složkový.**

$$\underline{I} = I \angle \psi = x + jy.$$

Složky x a y vypočítáme podle vztahu 11.

$$x = I \cos(\psi),$$



$$y = I \sin(\psi). \quad (11)$$

Nyní už k samotným matematickým operacím.

- **Sčítání a odčítání.** K těmto operacím používáme složkový tvar komplexního čísla, provádí se to tak, že sčítáme (odečítáme) zvlášť reálnou a zvlášť imaginární složku.

Například součet dvou proudů, které jsou:

$$\underline{I}_1 = x_1 + j y_1; \quad \underline{I}_2 = x_2 + j y_2,$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = x_1 + x_2 + j(y_1 + y_2).$$

- **Násobení** se provádí ve verzorovém tvaru, a to tak, že absolutní hodnoty dvou fázorů se vynásobí, a jejich fázové úhly se sečtou. Vynásobení předchozích fázorů by vypadalo:

$$\underline{I}_1 = I_1 \angle \psi_1; \quad \underline{I}_2 = I_2 \angle \psi_2,$$

$$\underline{I}_1 \cdot \underline{I}_2 = I_1 I_2 \angle (\psi_1 + \psi_2).$$

- **Dělení** se provádí opět ve verzorovém tvaru, absolutní hodnoty fázorů se vydělí a úhly se odečtou.

$$\frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} = \frac{I_1}{I_2} \angle \psi_1 - \psi_2.$$

Pomocí těchto operací můžeme provádět všechny výpočty při řešení střídavých obvodů analogicky jako u stejnosměrných, s tím rozdílem, že všechny veličiny budou fázory (komplexní čísla).

3.3 VÝKON STŘÍDAVÉHO PROUDU

Střídavý proud i napětí mění periodicky svůj směr a velikost. Pro okamžitou hodnotu výkonu platí vztah $p = u \cdot i$.

Proto se bude v čase periodicky měnit i výkon v obvodu.

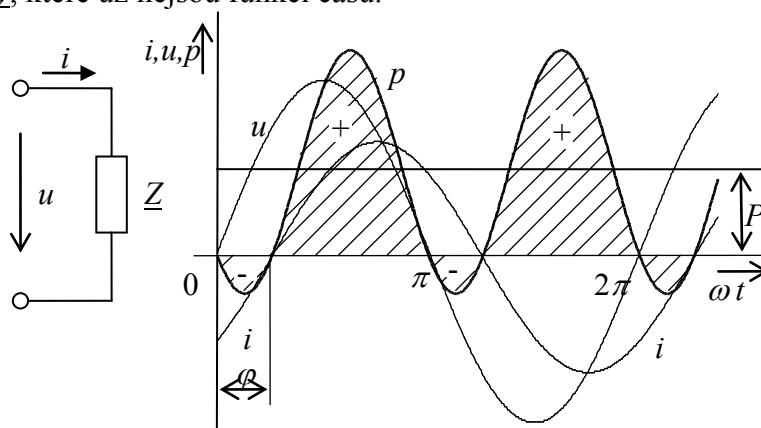
Grafický průběh výkonu na obecné zátěži, kde harmonické napětí a proud mají vzájemný fázový posun φ je na obrázku 7.

Jak je vidět, okamžitý výkon má také harmonický průběh, ale dvojnásobný kmitočet, oproti kmitočtu napětí a proudu a má určitou střední hodnotu. Záporné znaménko výkonu znamená, že v této chvíli zátěž vrací energii zpátky do zdroje. Dosadíme-li si do vztahu pro výkon za napětí a proud harmonické průběhy, dostaneme vztah 12

$$p = \sqrt{2}U \cdot \sin(\omega t) \cdot \sqrt{2}I \cdot \sin(\omega t + \varphi) = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi). \quad (12)$$



Abychom mohli výkon popsat konstantní hodnotou a ne časovým průběhem, zavádíme (podobně jako jsme pro proud a napětí zavedli efektivní hodnoty) tři druhy výkonu, činný, jalový, a zdánlivý, které už nejsou funkcí času.



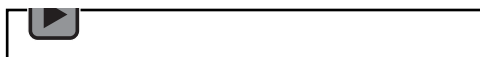
Obr. 7 Napětí, proud a výkon na obecné zátěži.

3.3.1 Činný výkon

Je to střední hodnota z průběhu výkonu. Tento výkon se ve spotřebiči přeměňuje na jiný druh energie, koná užitečnou práci, odtud název činný, označuje se písmenem P a jeho jednotkou je watt (W). Vyjádříme-li si ze vztahu 12 střední hodnotu výkonu, dostaneme pro činný výkon vztah:



Audio 3.5 Činný výkon



$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (13)$$

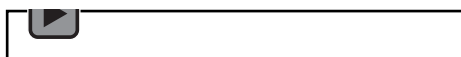
kde $\cos \varphi$ nazýváme účinník (v elektrotechnice je důležitá veličina).

3.3.2 Jalový výkon

Část výkonu, která se v určitých okamžicích vrací do zdroje, nazýváme jalovým výkonem. Označuje se Q , jiné možné označení podle normy je P_q a jeho jednotkou je var (ze slov voltampér reaktanční, protože jalový výkon se realizuje na reaktanci). Platí pro něj vztah:



Audio 3.6 Jalový výkon

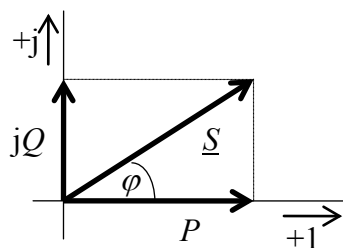


$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (14)$$

Tento výkon nám nekoná žádnou užitečnou práci, ale je nutný pro funkci spotřebičů (k vytvoření elektrického nebo magnetického pole).



3.3.3 Zdánlivý výkon



Obr. 8 Fázorový diagram výkonů.

Zdánlivý výkon určitým způsobem shrnuje činný a jalový výkon. Značíme ho S jiné možné označení je P_S a jeho jednotkou je voltampér ($V \cdot A$). Pro zdánlivý výkon platí:



Audio 3.7 Zdánlivý výkon

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (15)$$

Tento výkon nám udává zatížení elektrických zdrojů, např. transformátorů.

Činný, jalový a zdánlivý výkon můžeme tedy znázornit pomocí fázorů, přičemž činný a jalový mají vzájemný fázový posun $\pi/2$ a zdánlivý je jejich součtem. Tuto situaci znázorňuje fázorový diagram výkonů na obr. 8.

3.4 PASIVNÍ DVOJPÓLY V OBVODU STŘÍDAVÉHO (HARMONICKÉHO) PROUDU

V této kapitole se budeme zabývat chováním ideálních pasivních prvků (rezistoru, induktoru a kapacitoru) v obvodech harmonického proudu. Pokud bychom chtěli uvažovat reálné prvky, museli bychom je nahradit takovouto kombinací několika ideálních prvků (viz. kapitola 6).

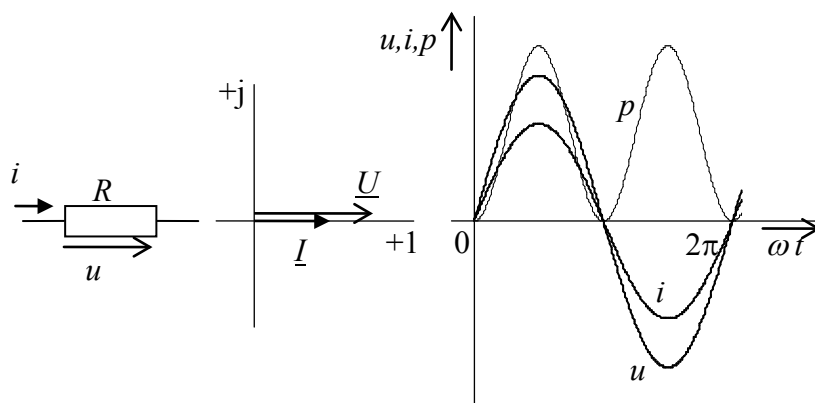
3.4.1 Rezistor

Mezi okamžitou hodnotou proudu a napětí na rezistoru platí vztah Ohmův zákon $u = R \cdot i$. To znamená, že velikost proudu je v každém okamžiku přímo úměrná velikosti napětí. Proto platí Ohmův zákon i pro efektivní hodnoty proudu a napětí a tím i pro fázory proudu a napětí na rezistoru.

$$I = U/R. \quad (16)$$

$$\underline{I} = \underline{U}/R. \quad (17)$$





Obr. 9 Časový průběh napětí, proudu a výkonu na rezistoru a fázorový diagram.

Mezi napětím a proudem není žádný fázový posuv, $\varphi=0$, $\cos(\varphi)=1$, $\sin(\varphi)=0$, jak je také vidět na obrázku 11, proto ze vztahu 13 plyne, že činný výkon na rezistoru je:

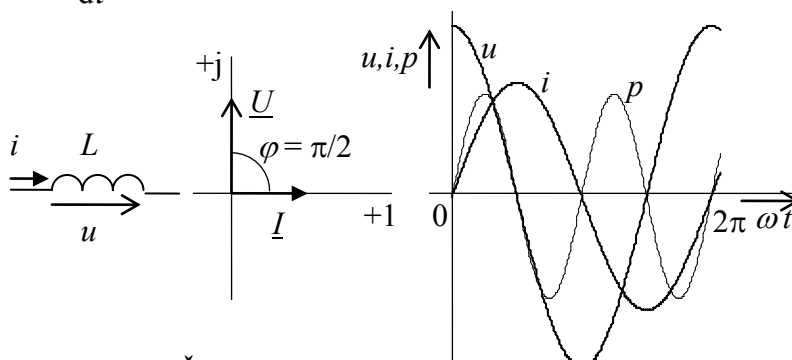
$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (18)$$

Kde U a I jsou efektivní hodnoty. Ze vztahu 14 je jasné, že se na rezistoru nevzniká žádný jalový výkon.

3.4.2 Ideální cívka (induktor)

Pro okamžité hodnoty napětí a proudu na ideální cívce platí vztah $u=L(di/dt)$, když za proud dosadíme vztah 5 pro harmonický proud podle, vyjde nám pro napětí vztah 19:

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d I_m \cdot \sin(\omega t + \psi)}{dt} = L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \psi) = I_m \cdot X_L \cdot \sin(\omega t + \psi + \pi/2) \quad (19)$$



Obr. 10 Časový průběh napětí, proudu a výkonu na cívce a fázorový diagram.

Kde X_L je takzvaná induktivní reaktance, její jednotkou je Ohm (Ω) a je to konstanta úměrnosti mezi velikostí napětí a proudu na cívce. Převrácená hodnota reaktance se nazývá (induktivní) susceptance $B_L=1/X_L$.

$$X_L = \omega \cdot L \quad (20)$$

Ze vztahu 3.19 je vidět, že napětí se předbíhá před proudem o $\pi/2$ (90°), $\varphi = \pi/2$. Napíšeme-li Ohmův zákon pro induktor, vyjde nám:



$$U = X_L \cdot I = \omega \cdot L \cdot I$$

$$I = \frac{U}{X_L} \quad (21)$$

Protože mezi napětím a proudem na induktoru je fázový posun $\varphi = \pi/2$, realizuje se na induktoru pouze jalový výkon. Jalovému výkonu na induktoru přisuzujeme kladné znaménko (u kapacitoru to bude naopak. Průběhy napětí a proudu na ideální cívce a jejich fázorový diagram jsou na obr. 10.

Stručně řečeno, cívka se chová vůči proudu jako setrvačný člen, (akumuluje energii v podobě proudu), proto se průběh proudu opoždí za průběhem napětí.

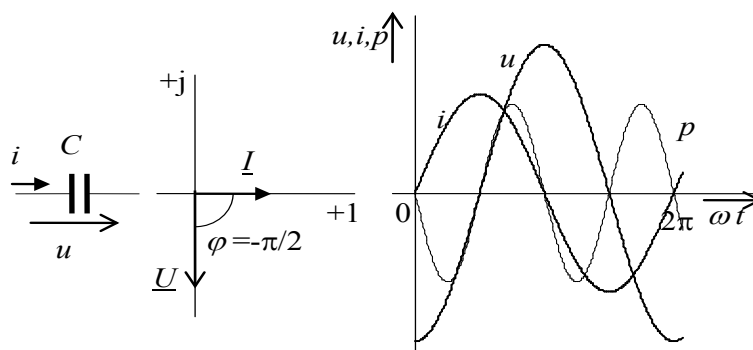
3.4.3 Ideální kondenzátor (kapacitor)

Mezi napětím a proudem na ideálním kondenzátoru platí vztah $u = \frac{1}{C} \cdot \int i \, dt$. Když si z tohoto vztahu vyjádříme $\underline{U}$ a dosadíme harmonický průběh proudu, vyjde nám pro napětí řešení:

$$u = \frac{1}{C} \cdot \int i \, dt = \frac{1}{C} \cdot \int I_m \cdot \sin(\omega t + \psi) dt = \frac{I_m}{\omega \cdot C} \cdot -\cos(\omega t + \psi) = \frac{I_m}{B_C} \cdot \sin(\omega t + \psi - \pi/2), \quad (22)$$

kde B_C je kapacitní susceptance, jednotkou je siemens, ale častěji se používá převrácená hodnota susceptance - kapacitní reaktance X_C , jednotkou je ohm (Ω).

$$X_C = \frac{1}{B_C} = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (23)$$



Obr. 11 Časový průběh napětí, proudu a výkonu na kondenzátoru a fázorový diagram.

Mezi napětím a proudem je opět fázový posun $\pi/2$, ale v opačném směru než u cívky, napětí se zpožďuje za proudem, $\varphi = -\pi/2$. Časový průběh a fázorový diagram napětí a proudu na kondenzátoru nám ukazuje obrázek 11.

Podobně jako u cívky můžeme i pro kondenzátor napsat Ohmův zákon pro efektivní hodnoty proudu a napětí:

$$U = X_C \cdot I = X_C \cdot I \quad (24)$$

Analogicky s cívkou se také na kondenzátoru realizuje pouze jalový výkon, kterému ovšem přisuzujeme tentokrát záporné znaménko. To znamená, že jalový výkony kondenzátoru a

cívky se mohou vzájemně odečítat. Toho se ve skutečnosti také využívá (kompenzace účinníku).

3.5 SÉRIOVÉ A PARALELNÍ ŘAZENÍ PASIVNÍCH PRVKŮ

V praxi se ale v elektrických obvodech setkáváme s reálnými prvky, které nemají jen jednu požadovanou vlastnost, ale navíc mají i nežádoucí parazitní vlastnosti. Např. reálná cívka má indukčnost a odpor.

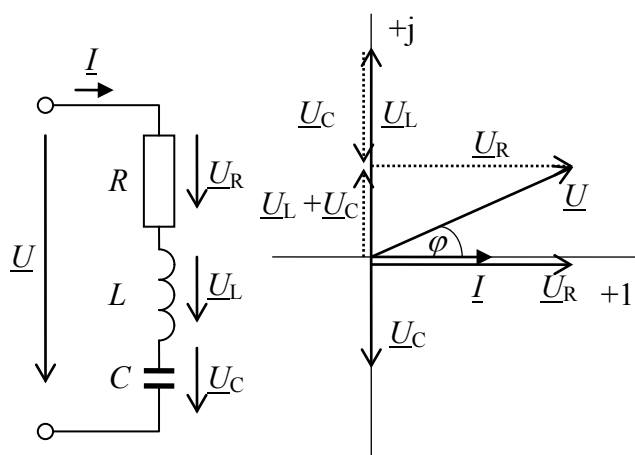
Náhradní schéma reálných prvků lze vytvořit z ideálních prvků zapojených sériově nebo paralelně. V praxi se také používají obvody, ve kterých jsou různě zkombinovány prvky R , L a C .

Abychom mohli vyřešit poměr mezi napětím a proudem u libovolného obvodu, zavedeme si pojem *impedance* a *admittance*. Impedance je poměr mezi napětím a proudem, je to určitá analogie odporu, zahrnuje v sobě jak odpory R , tak i reaktance X . Impedance může být vyjádřena jako reálné číslo, nebo jako komplexní číslo. Pokud ji vyjádříme komplexním číslem, značíme ji stejně jako fázor (i když to z fyzikální podstaty není fázor, neotáčí se v čase).

Impedanci značíme písmenem Z , její jednotkou je Ohm (Ω). Komplexní impedanci značíme $\underline{Z}$.

Převrácenou hodnotou impedance je admittance, je to opět určitá analogie vodivosti, označuje se Y , případně $\underline{Y}$ a její jednotkou je Siemens (S).

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} \quad \text{nebo} \quad Y = \frac{1}{Z} \quad (25)$$



Obr. 12 Sériové řazení prvků R , L , C a jejich fázorový diagram.

3.5.1 Sériové řazení prvků

Všemi prvky prochází **stejný proud** $\underline{I}$, a celkové napětí je rovno součtu napětí na jednotlivých prvcích. Na obrázku 12 máme sériové řazení rezistoru, kapacitoru a indukčnosti. Fázorový diagram nám znázorňuje napětí a proudy v obvodě a pomocí grafického součtu řeší výsledné napětí v obvodě.

Napětí na jednotlivých prvcích budou:

$$\underline{U}_R = R \cdot \underline{I}; \quad \underline{U}_L = jX_L \cdot \underline{I}; \quad \underline{U}_C = -jX_C \cdot \underline{I}$$

Výsledné napětí potom bude:



$$\underline{U} = R \cdot \underline{I} + jX_L \cdot \underline{I} - jX_C \cdot \underline{I} = \underline{I} \cdot (R + j(X_L - X_C))$$

Jestliže je impedance poměr napětí ku proudu, tak pro impedanci sériového řazení R , L , C potom platí vztah 26 :

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) \quad (26)$$

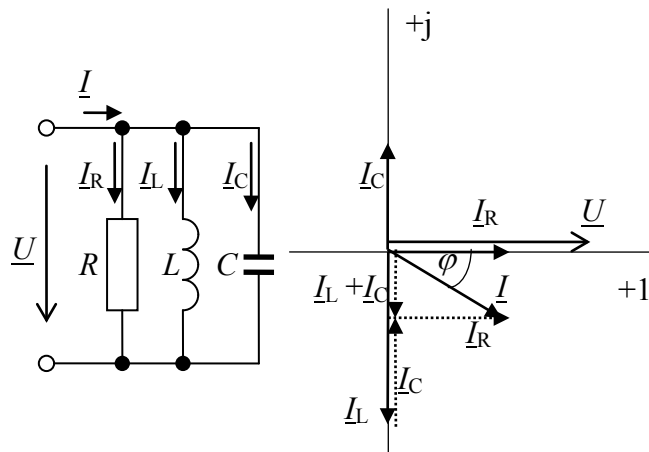
nebo $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

Fázový posuv mezi napětím a proudem lze v sériovém R , L , C obvodu vypočítat podle vztahu:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R}\right) \quad (27)$$

3.5.2 Paralelní řazení prvků

Při paralelním spojení několika prvků je na všech **stejně napětí** $\underline{U}$, a výsledný proud $\underline{I}$ je dán součtem dílčích proudů.



Obr. 13 Paralelní řazení prvků R , L , C a jejich fázorový diagram.

Na obrázku 13 máme paralelní kombinaci R , L , C a příslušný fázorový diagram. Jednotlivé dílčí proudy budou:

$$\underline{I}_R = \frac{\underline{U}}{R}; \quad \underline{I}_L = \frac{\underline{U}}{jX_L}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}}{-jX_C}$$

Pro celkový proud tedy platí:

$$\begin{aligned} \underline{I} &= \frac{\underline{U}}{R} + \frac{\underline{U}}{jX_L} + \frac{\underline{U}}{-jX_C} = \\ &= \underline{U} \cdot \left(\frac{1}{R} + j \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) \right) \end{aligned}$$

V tomto případě bude výhodnější, vypočítáme-li výslednou admitanci obvodu, a impedanci pak získáme jako její převrácenou hodnotu.

$$\underline{Y} = \frac{1}{R} + j \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} \right) = G + j(B_C - B_L), \quad (28)$$



kde G je vodivost rezistoru a B_C a B_L jsou susceptance induktoru a kapacitoru. Impedance se vypočítá jako převrácená hodnota admitance. Lze ji vyjádřit i jako reálné číslo:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2}} \quad (29)$$

$$\varphi = \arctg \left(R \cdot \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C} \right) \right)$$

3.5.3 Sériově paralelní řazení prvků

Máme-li v obvodě složitější sério - paralelní řazení prvků, postupujeme metodou postupného zjednodušování, analogicky jako u stejnosměrných obvodů (kapitola 2.3.1), s tím rozdílem, že všechny veličiny jsou fázory (komplexní čísla).

Jestliže máme v obvodě více zdrojů, můžeme použít metodu Kirchhoffových rovnic, nebo metodu smyčkových proudů. Pro řešení těmito metodami musí mít všechny zdroje v obvodě stejnou frekvenci.

Při řešení složitějších obvodů máme často za úkol slovně popsat *výsledný charakter obvodu* (zátěže) vůči zdroji. Tento charakter vychází z fázového posunu mezi celkovým proudem a napětím. Přičemž jak jsme dříve uvedli, úhel se počítá od napětí k proudu. Charakter obvodu také určuje znaménko jalového výkonu dodávaného do obvodu. Spokojíme-li se s hrubším odhadem, postačí nám tři typy charakterů odporový ($\varphi=0$), induktivní ($\varphi>0$) a kapacitní ($\varphi<0$).

Chceme-li být ale zcela přesní, musíme rozeznávat 5 druhů charakterů zátěže:

Odporový - jestliže $\varphi=0$, $Q=0$. Tento stav může nastat ve dvou případech, buďto když máme v obvodě pouze odpory, nebo když dojde ke vzájemnému vyrušení kapacitních a induktivních reaktancí. Tento stav nazýváme rezonance a je obsahem další kapitoly.

Odporově induktivní - jestliže $0<\varphi<\pi/2$, $Q>0$. Obvod se nám chová jako spojení rezistoru a induktoru (např. reálná cívka).

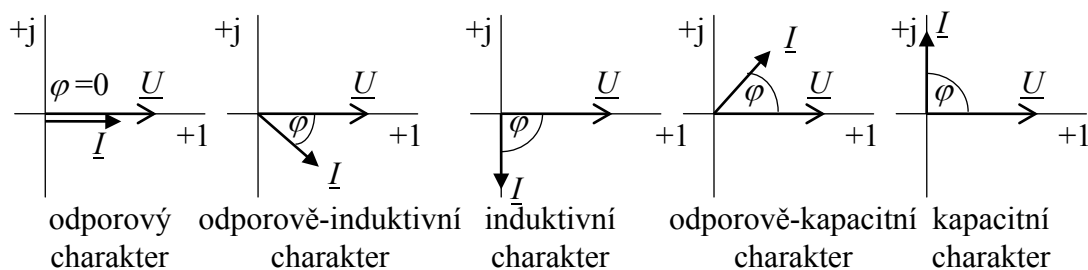
Induktivní - $\varphi = \pi/2$, $Q>0$. Tento stav nastane, máme-li v obvodě ideální induktor, eventuálně s ideálním kapacitorem, přičemž ovšem induktivní složka převažuje.

Odporově kapacitní - jestliže $-\pi/2<\varphi<0$, $Q<0$. Obvod se navenek chová jako spojení rezistoru a kapacitoru (např. reálný kondenzátor).

Kapacitní charakter - jestliže $\varphi = -\pi/2$, $Q<0$. Tento případ nastane, máme-li v obvodě ideální kapacitor. Může tam být spolu s ním i ideální induktor, ale kapacitní složka musí převažovat.

Fázorové diagramy jednotlivých případů znázorňuje obrázek 14.





Obr. 14 fázorové diagramy jednotlivých druhů zátěže.

3.6 REZONANCE

U každého střídavého obvodu, který obsahuje induktory, kapacitory a eventuelně rezistory (platí to i pro reálné obvody s cívkami, kondenzátory a odporníky) může nastat při určitém kmitočtu napájecího napětí stav, při němž je fázový posun roven nule. Tedy výsledné (celkové) napětí a proud jsou ve fázi, obvod se chová jako by měl pouze zapojen odpor. Tento stav je důležitý v technické praxi, často ho využíváme při kompenzaci účinníku (bude popsáno dále), v oscilátorech, ladicích obvodech. Jindy se mu ale snažíme zabránit, protože může být nebezpečný (vzniká přepětí).

Rezonance může nastat v libovolném obvodu, který obsahuje indukčnosti a kapacity, ale dále se omezíme pouze na sériové a paralelní $R-L$ obvody. Nejdříve budeme uvažovat, že máme ideální induktor a pak reálnou cívku, která má i odpor (kondenzátor můžeme většinou považovat za ideální prvek).

Při hledání rezonančního kmitočtu, postupujeme tak, že si vyjádříme vztah pro impedanci, nebo admitanci obvodu, a její imaginární část položíme rovnu nule.

3.6.1 Sériový rezonanční obvod

Jak uvidíme, u tohoto obvodu nemá na rezonanční kmitočet vliv, jestli je v obvodu zapojen ideální induktor, nebo reálná cívka. Odvození tedy provedeme pro obvod s reálnou cívku. Jde potom vlastně o sériový obvod $R-L-C$, jak nám ho znázorňuje obr. 15.

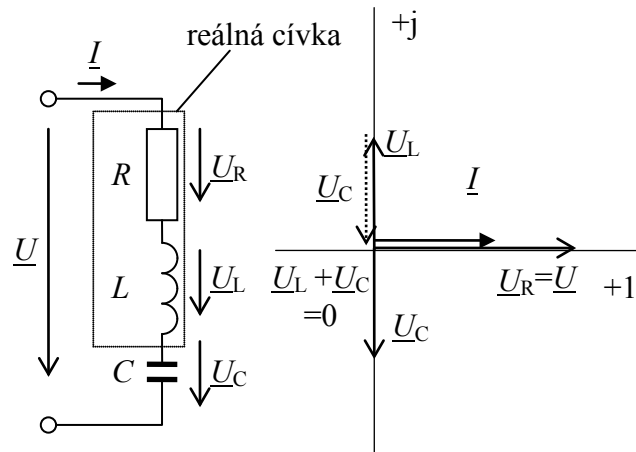
Imaginární část impedance položíme rovnou nule:

$$\left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = 0$$

Tuto rovnici poměrně jednoduše vyřešíme, a jako řešení pro rezonanční úhlovou rychlost ω_r a kmitočet f_r dostaneme vztah 30, který je známý pod názvem Thomsonův vztah:

$$\begin{aligned} \omega_r &= \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \\ f_r &= \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \end{aligned} \quad (30)$$





Obr. 15 Sériový rezonanční obvod a jeho fázorový diagram.

3.6.2 Paralelní rezonanční obvod

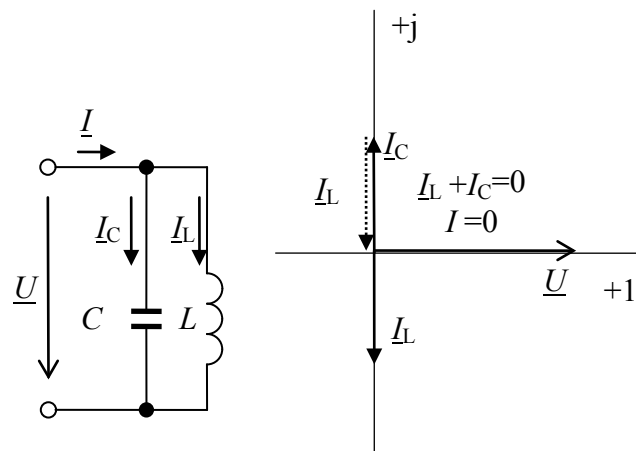
U tohoto obvodu již bude záležet na tom, jestli budeme uvažovat ideální induktor, nebo reálnou cívku, nejdříve si tedy provedeme odvození pro ideální prvky.

Ideální paralelní rezonanční obvod

Tuto situaci znázorňuje obrázek 16.

Budeme vycházet z admitance obvodu, protože ta se dá u paralelního obvodu snadněji vyjádřit.

$$\underline{Y} = j(B_C - B_L) = j\left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right). \quad (31)$$



Obr. 16 Paralelní rezonanční obvod a jeho fázorový diagram.

Admitance vlastně nemá reálnou část, takže ji celou položíme rovnu nule:

$$\left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right) = 0. \quad (32)$$

Vyřešením této rovnice dojdeme ke stejnému výsledku pro rezonanční úlovou rychlost a kmitočet jako pro ideální paralelní rezonanční obvod je: jako u sériového obvodu,

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}} \quad (33)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C}}$$



Jelikož admitance je tohoto obvodu je při rezonanci nulová, impedance se blíží nekonečnu, ideální paralelní rezonanční obvod neodebírá ze zdroje žádný proud.

3.7 KOMPENZACE ÚČINÍKU

Mnoho běžně používaných spotřebičů má induktivně odporový charakter, například asynchronní motory, transformátory, svářečky, zářivková svítidla ap. Tyto spotřebiče potřebují ke své činnosti jalový výkon induktivního charakteru. Ten ale nekoná žádnou práci. Jalový výkon se pouze přelévá po vedení mezi zdrojem a spotřebičem a způsobuje ztráty. Princip kompenzace spočívá v tom, že potřebný induktivní jalový výkon vyrobíme v kondenzátorech (nebo synchronních kompenzátorech, což jsou speciální synchronní stroje) přímo u spotřebiče a po vedení přivádíme buď pouze činný výkon, nebo velikost jalového výkonu podstatně zmenšíme. To bude mít za následek zmenšení proudu protékajícího přívodním vedením a tím pádem menší ztráty, nebo při stejných ztrátách můžeme použít vedení s menším průřezem. V energetických sítích bývá obvyklé, že se kompenzuje tak, aby $\cos \varphi$ byl 0,95 induktivního charakteru.

Kompenzaci provádíme nejčastěji jako trojfázovou, protože rozvod většina spotřebičů v průmyslu bývají trojfázové. Při kompenzaci pomocí kondenzátorů zapojujeme tři kondenzátory do hvězdy, nebo častěji do trojúhelníka. Kompenzace může buďto regulovaná nebo neregulovaná. Regulace se provádí buďto nespojitě, tak že místo jednoho kondenzátoru je v každé fázi paralelní baterie kondenzátorů a automatický regulátor provádí jejich připojování nebo odpojování podle potřeby jalového výkonu v síti. Nebo může být regulace spojitá pomocí výkonových polovodičových prvků. Tento způsob je složitější.

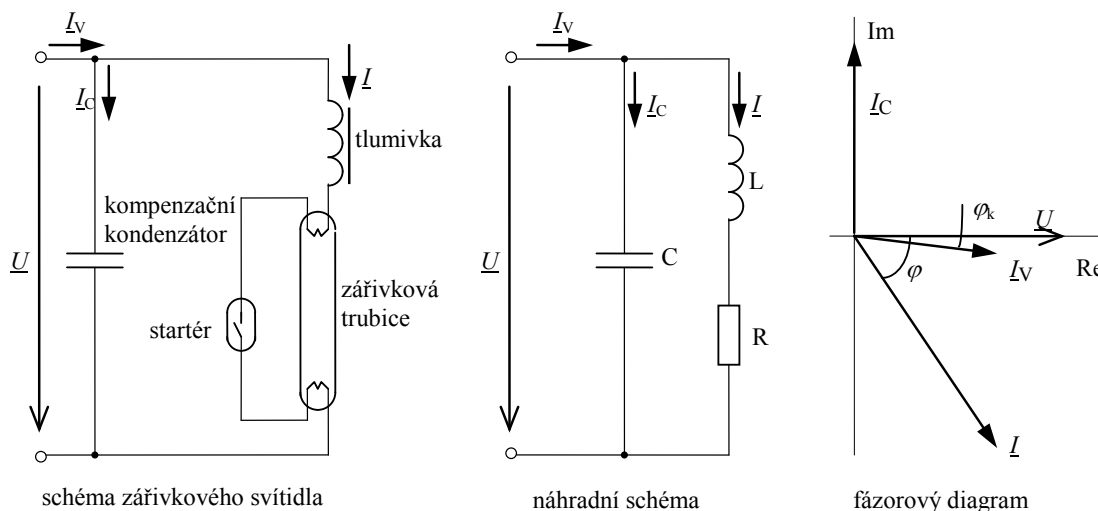
Podle umístění můžeme mít kompenzaci

Individuální - každý spotřebič má své vlastní kompenzační kondenzátory. Výhodou je to, že tato kompenzace většinou nemusí být regulovaná a že kompenzace se provede co nejbližší spotřebiči, takže po přívodním vedení se nemusí přelévat žádný jalový výkon. Nevýhodou je že ke každému spotřebiči potřebujeme kompenzační kondenzátory. Tato kompenzace se používá například v klasických zářivkách, kde v každém svítidle bývá kompenzační kondenzátor.

Skupinová - kompenzuje se najednou několik spotřebičů připojených na jeden rozvaděč, např. spotřebiče v jedné dílně. Zde ušetříme počet kompenzačních kondenzátorů, ale nevýhodou je, že kompenzace musí být regulovaná, protože spotřebiče nepracují vždy současně a velikost odebíraného jalového výkonu se mění.

Centrální - kompenzace se provádí centrálně v rozvodně pro celý závod, výhody a nevýhody jsou obdobné jako u skupinové kompenzace.





Obr. 17. Schéma a fázorový diagram zářivkového svítidla s filtračním kondenzátorem.

Jak vypočítat velikost potřebné kondenzátorové baterie je uvedeno na následujícím příkladě zářivkového svítidla. Schéma, náhradní schéma a fázorový diagram je na obr. 17.

V tomto případě se činný výkon odebíraný ze spotřebiče před a po kompenzaci nemění, pro jalový výkon kompenzačního kondenzátoru lze odvodit vztah:

$$Q_C = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_k) \quad (34)$$

Kde: P je činný výkon odebíraný spotřebičem,

Q_C je jalový výkon kondenzátorové baterie

φ a φ_k je fázový posuv před a po kompenzaci, (φ nebo $\cos(\varphi)$ většinou udává výrobce zařízení)

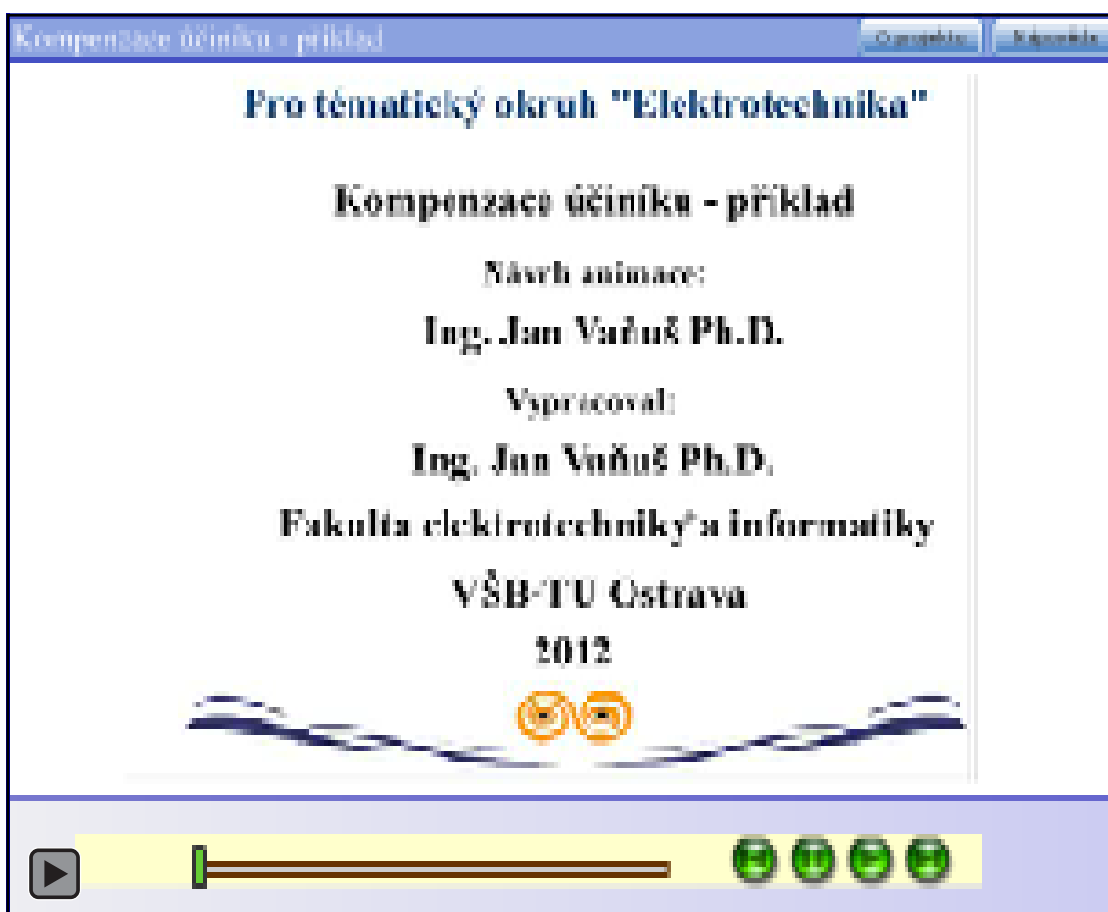
Známe-li potřebný jalový výkon, příslušnou kapacitu kondenzátoru vypočítáme jako

$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot U^2} \quad (35)$$

Kde: ω je úhlová rychlost napájecí sítě

U je napětí na které je kondenzátor připojen.

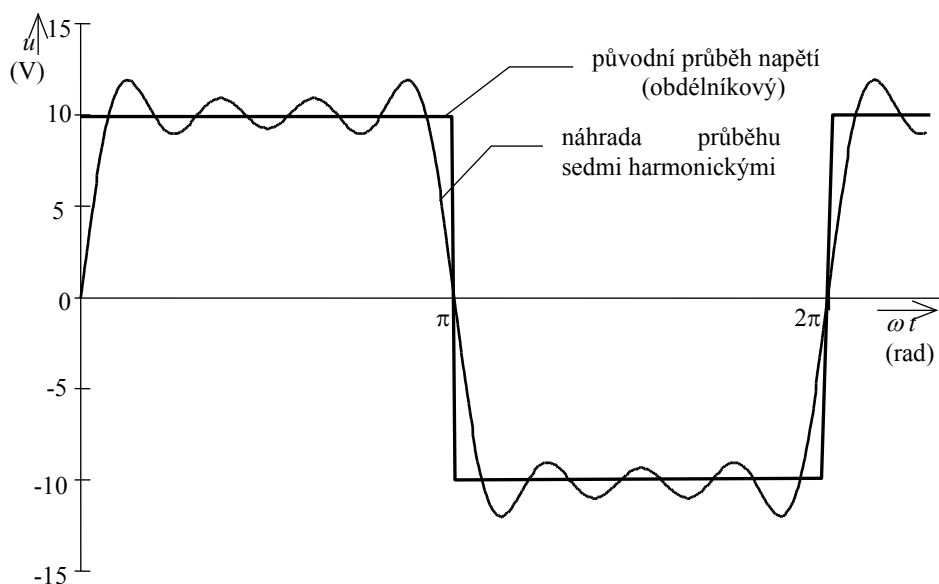
V případě že by se jednalo o trojfázovou kompenzaci, byla by kapacita jednoho kondenzátoru třetinová.



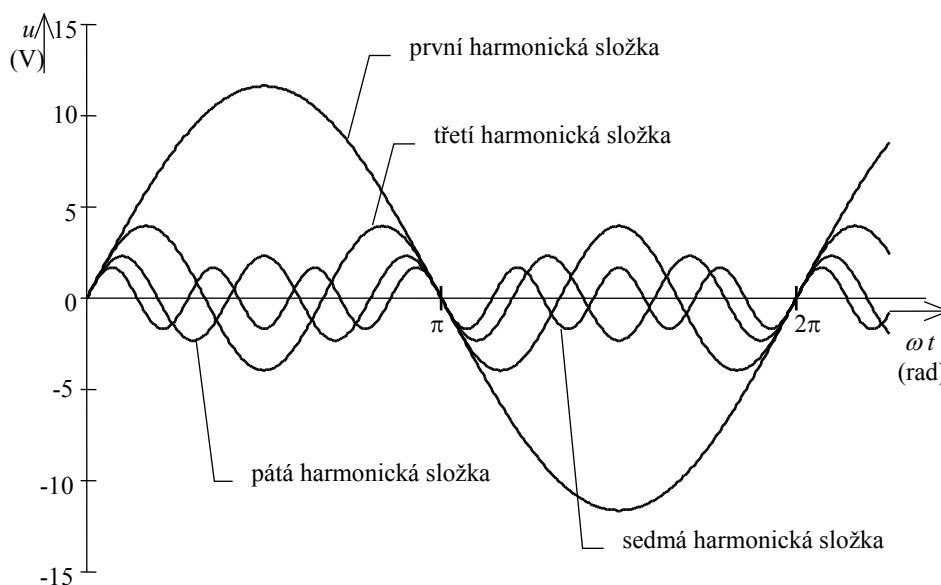
3.8 NEHARMONICKÉ ČASOVÉ PRŮBĚHY OBVODOVÝCH VELIČIN

Zatím jsme uvažovali střídavé obvody s harmonickými (sinusovými) průběhy napětí a proudu. V praxi se ale vyskytují i proudy a napětí s průběhy jinými, které obecně nazýváme neharmonické průběhy. Zvláště se vyskytují v obvodech, kde jsou nelineární prvky (např. polovodičové měniče).

Řešením takových obvodů se nebudeme zabývat, pro přehled zde pouze naznačíme metodiku řešení.



Náhrada průběhu sedmi harmonickými



Rozklad původního průběhu na jednotlivé harmonické složky.

Obr. 18 Náhrada obdélníkového průběhu řadou harmonických složek.

Při řešení takovýchto obvodů vycházíme z toho, že každý periodický průběh s úhlovou rychlostí ω lze rozložit na řadu harmonických průběhů, které nazýváme **harmonické složky**. Jejich úhlové rychlosti a tím i kmitočty jsou násobkem základní úhlové rychlosti ω a základnímu kmitočtu. Napětí a proud potom řešíme jako součet těchto všech harmonických



složek. Tomuto rozkladu se říká *Fourierova řada* a existují matematické postupy, podle kterých se provádí. Uvedeme si jako příklad rozklad napětí obdélníkového průběhu se základním kmitočtem 50 Hz ($\omega = 314 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$) a s amplitudou 10 V na sedm harmonických složek. Pro vyšší přesnost, bychom museli počítat více harmonických složek.

$$u(t) = 12,73 \cdot \sin(\omega t) + 4,24 \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + 2,55 \cdot \sin(5 \cdot \omega t) + 1,82 \cdot \sin(7 \cdot \omega t)$$

první harmonická
třetí harmonická
pátá harmonická
sedmá harmonická

Pro toto obdélníkové napětí rozložené na 7 harmonických platí:

Průběh neobsahuje druhou a čtvrtou harmonickou složku (žádné sudé), protože je symetrický podle časové osy.

Původní průběh i jeho náhradu pomocí pěti harmonických složek ukazuje obrázek 18.



3.9 LITERATURA

Smejkal J, Elektrotechnika, VUT Brno,

TKOTZ K., Příručka pro elektrotechnika: Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Bastian P a kolektiv, Praktická elektrotechnika; Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Kolář V., Vrána V.: Elektrické obvody střídavého proudu, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, 2005

Internet

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Trojfázové 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

5	TROJFÁZOVÉ OBVODY	3
5.1	Úvod	4
5.2	Vznik trojfázové soustavy	5
5.3	Fázové a sdružené napětí.....	8
5.4	Zapojení trojfázových spotřebičů a zdrojů do hvězdy - Y a trojúhelníka - D .	9
5.5	Výkony v trojfázových soustavách	12
5.6	Nesouměrné (nesymetrické) trojfázové soustavy	13
5.7	Literatura.....	15



5 TROJFÁZOVÉ OBVODY



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Vznik trojfázové soustavy

Fázové a sdružené napětí

Zapojení elektrických spotřebičů do hvězdy a do trojúhelníka

Výkony v trojfázových souměrných soustavách

Nesouměrné (nesymetrické) trojfázové soustavy

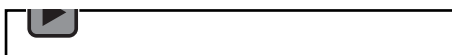


MOTIVACE:

Pro napájení spotřebičů jako jsou např. trojfázové asynchronní motory (zajištění pohonu pro pily nebo míchačky), průtokových ohřivačů vody, elektrických topných kamen a dalších spotřebičů je potřeba zajistit zdroj trojfázového napětí a proudu. Jak se chovají tyto spotřebiče při připojení na 3f soustavu v chodu bez poruchy a při poruše, jak lze popsat a vypočítat jednotlivé parametry zdroje 3f napětí, 3f vedení a 3f zátěže v trojfázové soustavě je vysvětleno v přednášce trojfázové obvody.



Audio 5.1 Motivace



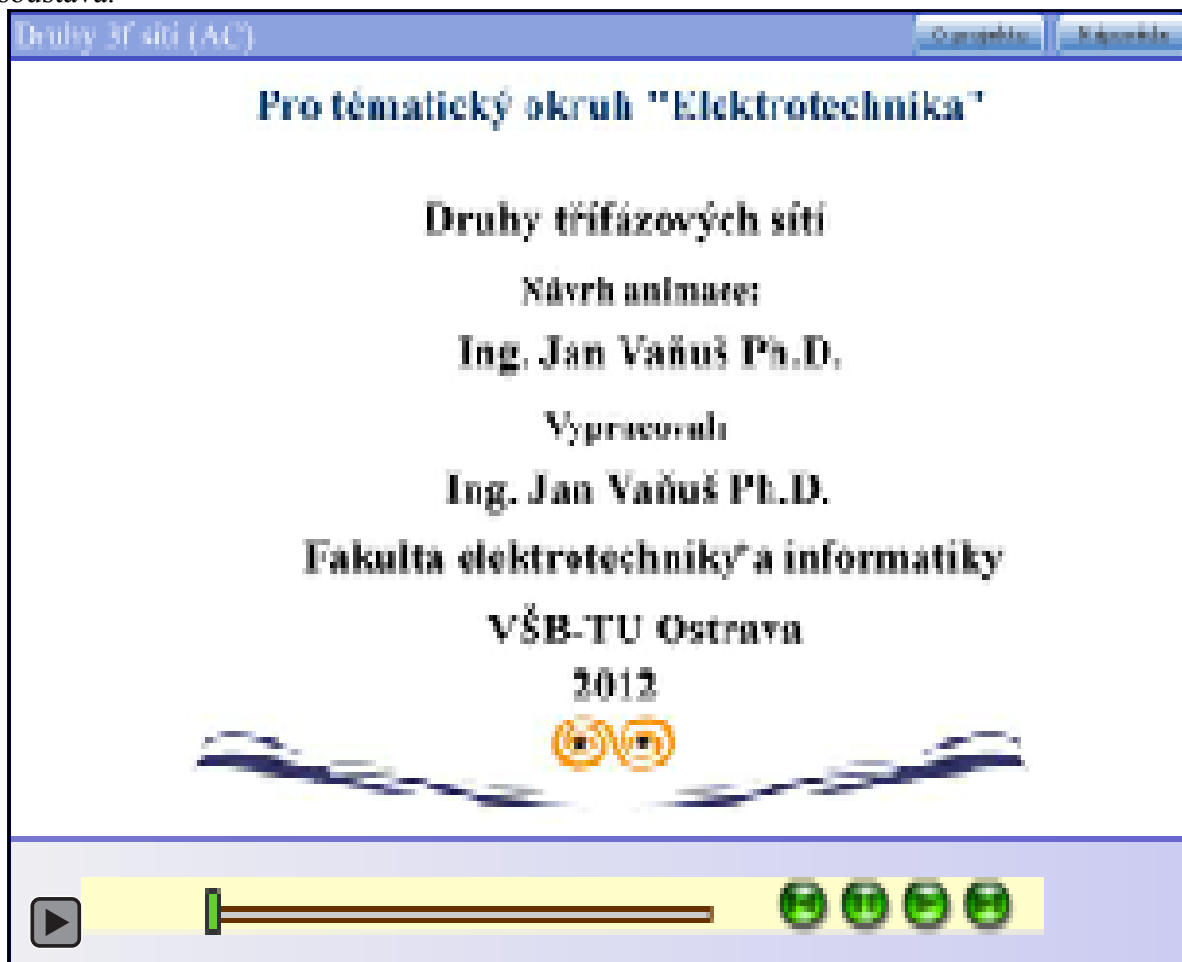
CÍL:

Konstrukce trojfázového zdroje napětí,
souměrný zdroj 3f napětí, souměrná zátěž,
troj vodičová a čtyř vodičová soustava,
sdružené, fázové napětí,
zapojení zátěže do hvězdy a do trojúhelníku,
činný, zdánlivý a jalový výkon,
výkonové poměry a poruchy (nesymetrie) v 3f soustavě.



5.1 ÚVOD

Pro přenos elektrické energie v elektrických sítích se většinou používá střídavá trojfázová soustava.



Trojfázová soustava je zvláštní případ střídavého obvodu.

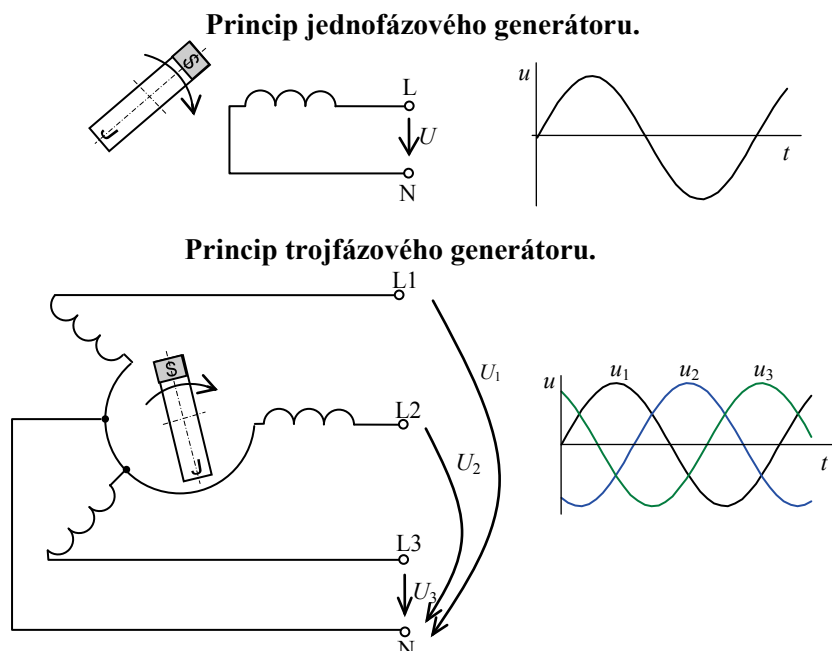
Trojfázové soustavy (obvody) mají oproti jednofázovým soustavám (obvodům) některé výhody:

- Umožňují lepší (hospodárnější) využití rozvodů elektrické energie, zdrojů a transformátorů. To znamená, že jeden trojfázový generátor je levnější a má menší hmotnost (rozměry), než tři jednofázové generátory, které by měly v součtu stejný výkon. Totéž by platilo při srovnání trojfázového transformátoru a tří jednofázových transformátorů. Také při přenosu energie trojfázovým vedením dochází k menším ztrátám, než při přenosu stejného výkonu jednofázovým vedením (při použití vodičů, které mají v součtu stejné množství materiálu).
- Umožňují vznik točivého magnetického pole, které se využívá v trojfázových asynchronních motorech. Tyto motory jsou v průmyslu velmi rozšířené, jsou relativně jednoduché, levné a nenáročné na údržbu.
- Kromě trojfázových soustav mohou existovat i vícefázové soustavy, ale trojfázové soustavy jsou v praxi nejrozšířenější.



5.2 VZNIK TROJFÁZOVÉ SOUSTAVY

V souměrném trojfázovém generátoru se otáčením magnetu (nebo elektromagnetu) indukují tři střídavá napětí, která tvoří **souměrnou trojfázovou soustavu napětí**. Napětí všech fází mají stejnou velikost (amplitudu) U_m a jsou vůči sobě posunuty o $1/3$ doby kmitu, to je $2\pi/3$ nebo 120° .



Obr. 1 Princip výroby střídavého napětí v točivých generátorech.

Když uvažujeme, že napětí první fáze má nulový počáteční fázový posuv, tak platí:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_m \cdot \sin(\omega t) \\ u_2 &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ u_3 &= U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Maximální hodnota napětí $U_m = \sqrt{2} \cdot U$, kde U je efektivní hodnota napětí (např. v naší síti 230V).

Na obrázku 1 je naznačeno, jak se otáčením magnetu (nebo elektromagnetu) v generátoru indukují střídavé napětí.

Vodič, který vychází ze středu (uzlu) cívek generátoru se nazývá nulový vodič a značí se písmenem N (dříve se nazýval střední). Vodiče, které vychází z konců cívek generátoru, se nazývají fázové vodiče a značí se písmeny L1, L2 a L3.

Nulový vodič nemusí být v každé trojfázové soustavě. Pokud v trojfázové soustavě nulový vodič je, nazýváme ji čtyřvodičovou soustavou (častější případ) a pokud není, nazýváme ji třívodičovou soustavou.

V komplexním tvaru můžeme zapsat souměrná trojfázová napětí takto:

zápis ve vektorovém tvaru **zápis v exponenciálním tvaru** (2)



$$\underline{U}_1 = U \angle 0$$

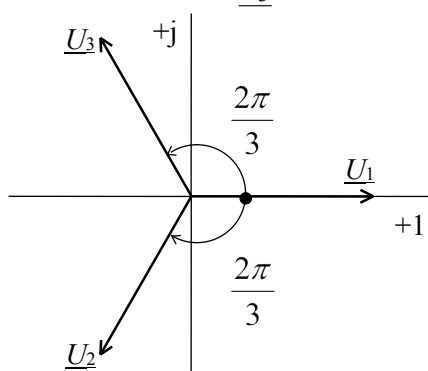
$$\underline{U}_2 = U \angle -\frac{2}{3}\pi$$

$$\underline{U}_3 = U \angle -\frac{4}{3}\pi = U \angle \frac{2}{3}\pi$$

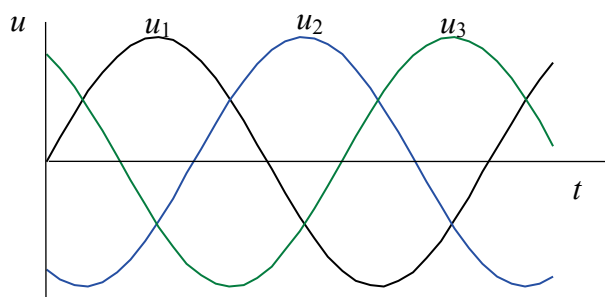
$$\underline{U}_1 = U \cdot e^{j0}$$

$$\underline{U}_2 = U \cdot e^{-j\frac{2}{3}\pi}$$

$$\underline{U}_3 = U \cdot e^{-j\frac{4}{3}\pi} = U \cdot e^{j\frac{2}{3}\pi}$$



Obr. 2 Fázorový diagram napětí v trojfázové soustavě (v komplexí Gaussově rovině).



Obr. 3 Časový průběh napětí jednotlivých fází.

Napětí první fáze může být proti počátku posunuto. Potom se ve vztazích 1 a 2 přičte ke všem úhlům tento fázový posun. Posunou se i fázory na obr. 2 a sinusovky na obr. 3.

Většina trojfázových obvodů je souměrných. To znamená, že ve všech fázích jsou zapojeny stejné impedance:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (3)$$

Proudy v jednotlivých fázích lze pak vypočítat:

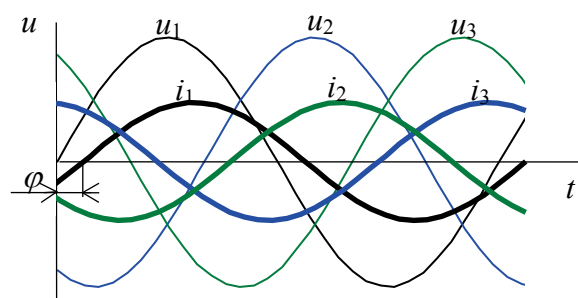
$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}}; \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_3}{\underline{Z}} \quad (4)$$

Proudy v jednotlivých fázích mají stejnou hodnotu, stejný fázový posun φ vzhledem k napětí příslušných fází a jsou vzájemně posunuty o $2\pi/3$ (viz obr. 3). Tvoří tedy souměrnou trojfázovou soustavu proudů, podobně jako soustava napětí. Pro proudy budou platit obdobné vztahy jako 1 a 2 pro napětí:

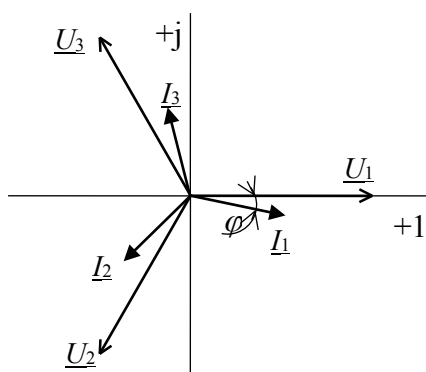


$$\begin{aligned}
 i_1 &= I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) & \underline{I}_1 &= I \angle -\varphi & \underline{U}_1 &= U \cdot e^{-j\varphi} \\
 i_2 &= I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2}{3}\pi\right) & \underline{I}_2 &= I \angle -\varphi - \frac{2}{3}\pi & \underline{U}_2 &= U \cdot e^{-j\left(\varphi + \frac{2}{3}\pi\right)} \\
 i_3 &= I_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4}{3}\pi\right) & \underline{I}_3 &= I \angle -\varphi - \frac{4}{3}\pi = U \angle -\varphi + \frac{2}{3}\pi & \underline{U}_3 &= U \cdot e^{-j\left(\varphi + \frac{4}{3}\pi\right)} = U \cdot e^{j\left(\frac{2}{3}\pi - \varphi\right)}
 \end{aligned} \quad (5) \quad (6)$$

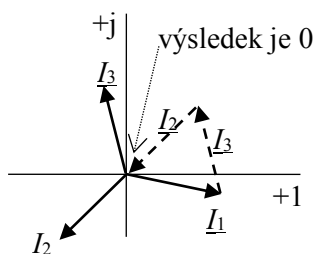
Výše uvedené vztahy vypadají velmi složitě, grafické vyjádření na obrázku 4 je názornější. Tři sinusovky napětí vzájemně posunuté o 120° a tři sinusovky proudů také vzájemně posunuté o 120° . Mezi příslušným napětím a proudem je vždy fázový posun φ . Ještě názornější je zobrazení pomocí fázorů na obr. 5.



Obr. 4 Časové průběhy proudů a napětí v souměrné trojfázové soustavě.



Obr. 5 Diagram proudů a napětí v souměrné trojfázové soustavě.



Obr. 6 Fázorový součet proudů v souměrné 3 fázové soustavě.

V souměrné trojfázové soustavě je součet všech tří proudů v každém okamžiku roven nule (7). Totéž platí i pro napětí. Grafický fázorový součet proudů, jehož výsledkem je 0, je nakreslen na obrázku 6.



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0$$

(7)

5.3 FÁZOVÉ A SDRUŽENÉ NAPĚTÍ



Z trojfázové soustavy můžeme získat dvě velikosti napětí:

- Fázové napětí. Je to napětí mezi fázovým vodičem a nulovým vodičem. O tomto napětí jsme mluvili v minulé kapitole. V trojfázové soustavě máme tři fázová napětí, která jsou stejně velká a jsou vůči sobě fázově posunuta o 120° . Fázové napětí se označuje U_f . V naší síti nízkého napětí je fázové napětí 230V (zaokrouhleně).



Audio 5.2 Fázové napětí

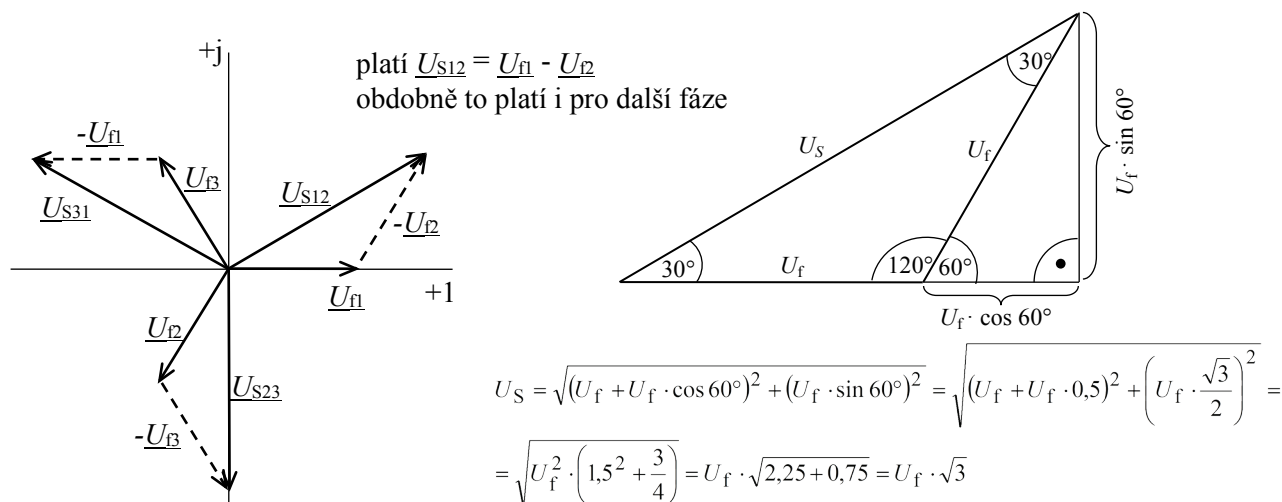
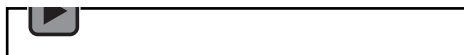


- Sdružené napětí. Je to napětí mezi dvěma fázovými vodiči. Jeho velikost lze vypočítat jako fázorový rozdíl dvou fázových napětí, viz obr. 7 a vztah (8). V trojfázové síti máme tři sdružená napětí, která jsou stejně velká a vzájemně fázově posunutá opět o 120° . Sdružené napětí se značí U_S . Platí že $U_S = \sqrt{3} \cdot U_f$. V naší síti nízkého napětí je hodnota sdruženého napětí 400V.





Audio 5.3 Sdružené napětí



Obr. 7 Znázornění vztahu mezi fázovým a sdruženým napětím ve fázorovém diagramu a odvození velikosti sdruženého napětí.

V trojfázových obvodech je velmi důležitý vztah mezi velikostí fázového a sdruženého napětí:

$$U_S = \sqrt{3} \cdot U_f \quad (8)$$

5.4 ZAPOJENÍ TROJFÁZOVÝCH SPOTŘEBIČŮ A ZDROJŮ DO HVĚZDY - Y A TROJÚHELNÍKA - D

Jak trojfázové zdroje, tak spotřebiče většinou obsahují v principu 3 prvky:
rezistory - např. u tepelných spotřebičů jako jsou trojfázové elektrické pece a ohřívače,
cívky - např. u trojfázových motorů a generátorů, nebo transformátorů,
kondenzátory - např. u trojfázových zařízení pro kompenzaci jalového výkonu,
nebo nějakou jejich kombinaci.

Tyto prvky mohou být zapojeny do hvězdy (označuje se písmenem Y), nebo do trojúhelníka (označuje se písmenem D). Každý tento prvek tvoří jednu fázi zdroje nebo spotřebiče.

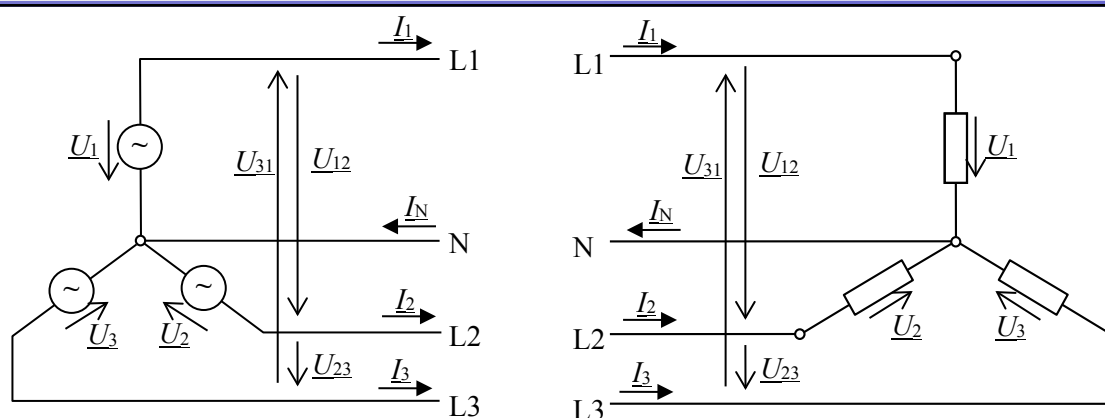
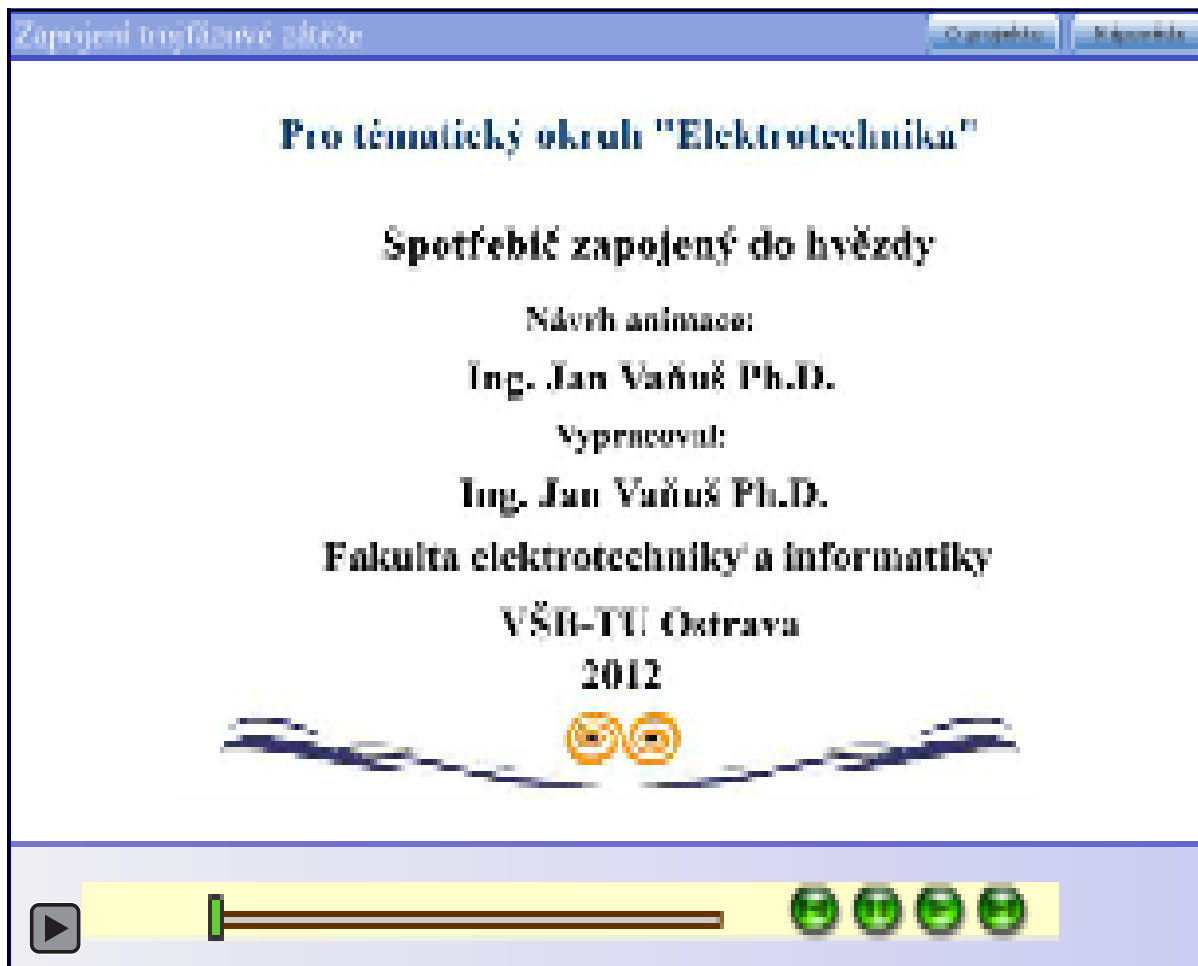
Zapojení do hvězdy Y

Zapojení zdroje a spotřebiče do hvězdy je na obrázku 8.

V zapojení do hvězdy je na jednotlivé fáze spotřebiče připojeno fázové napětí sítě (v naší síti nejčastěji 230V). Fázovými vodiči sítě protéká stejný proud jako fázemi spotřebiče – síťový proud $I = I_f$.

V případě, že je zdroj i spotřebič souměrný (fázová napětí přesně stejně velká a posunutá přesně o 120° , impedance všech fází spotřebiče stejné), jsou všechny tři proudy $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$ a $\underline{I}_3$ stejně velké a vzájemně posunuté o 120° . Jejich součet je nula (viz obr. 6) a nulovým vodičem pak neprotéká žádný proud $\underline{I}_N = 0$.





Obr. 8 Zapojení trojfázového zdroje a spotřebiče do hvězdy.

Zapojení do trojúhelníka D

Zapojení spotřebiče do trojúhelníka je na obrázku 9. (Zapojení zdroje do trojúhelníka by bylo obdobné.)

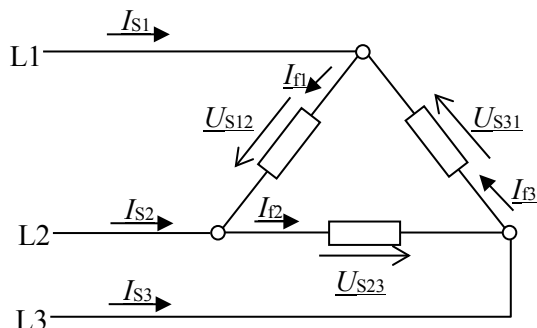
V zapojení do trojúhelníka není nulový vodič. Jednotlivé fáze spotřebiče jsou připojeny na sdružené napětí sítě (v naší síti většinou 400V). Potom fázové napětí spotřebiče je rovno sdruženému napětí sítě, nebo také síťovému napětí. $U = U_S = U_{f \text{ spotřebiče}}$.

Praktická poznámka: Z toho plyne, že do trojúhelníka je možné zapojit pouze takový trojfázový spotřebič, který je na to dimenzován. To znamená, že jeho fáze jsou navrženy na sdružené napětí. Pokud by byly fáze spotřebiče navrženy na fázové napětí (např. 230V), po přepojení do trojúhelníka by se na nich objevilo napětí sdružené (400V), spotřebič by se spálil. Při neodborném zapojování trojfázových motorů se to někdy stává.

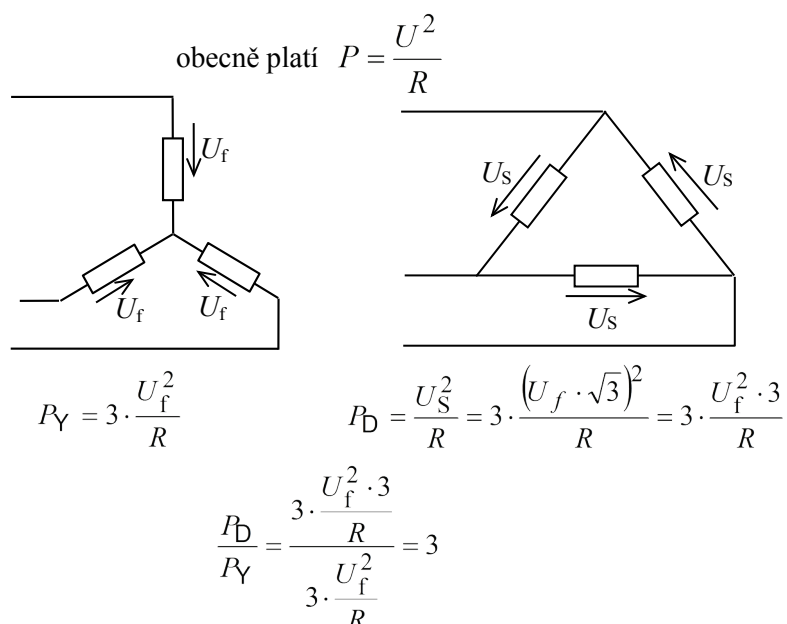


V zapojení do trojúhelníka teče fázovými vodiči sítě sdružený proud, tedy síťový proud se rovná sdruženému proudu $I = I_S$. Odvození pro velikost fázového a sdruženého proudu pro souměrný spotřebič by bylo stejné jako pro fázové a sdružené napětí (obr. 7). Pro velikost sdruženého proudu platí:

$$I_S = \sqrt{3} \cdot I_f \quad (9)$$

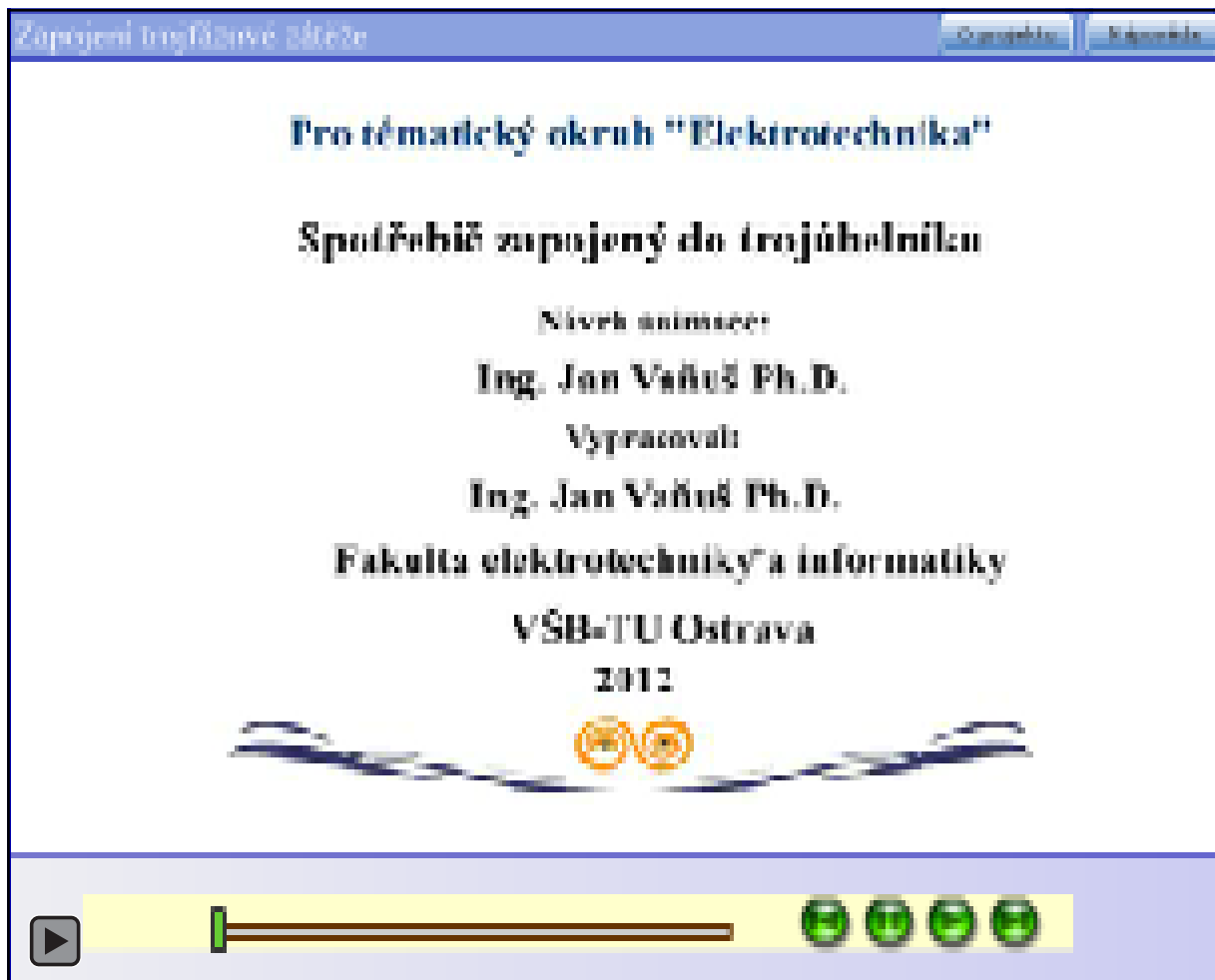


Obr. 9 Zapojení trojfázového spotřebiče do trojúhelníka.



Obr. 10 Odvození výkonu v zapojení do hvězdy a do trojúhelníku.

Zdroj a k němu připojený spotřebič může, ale nemusí být zapojen stejně. Je možná kombinace, kdy zdroj je zapojen do hvězdy a spotřebič do trojúhelníka, nebo opačně zdroj do trojúhelníka a spotřebič do hvězdy. V tom případě ale nemůže být uzel spotřebiče připojen k nulovému vodiči, protože zdroj zapojený do trojúhelníka žádný nulový vodič nemá.



5.5 VÝKONY V TROJFÁZOVÝCH SOUSTAVÁCH

Činný, jalový i zdánlivý výkon v trojfázové soustavě je dán součtem výkonů jednotlivých fází. Příklad uvedeme nejprve pro zdánlivé výkony: $S = S_1 + S_2 + S_3 = U_{f1} \cdot I_{f1} + U_{f2} \cdot I_{f2} + U_{f3} \cdot I_{f3}$.

Výše uvedený vztah platí pro souměrnou i nesouměrnou trojfázovou soustavu.

Jsou-li zdroj i spotřebič souměrný, platí: $S = 3 \cdot U_f \cdot I_f$.

Pokud nemůžeme měřit napětí a proudy uvnitř spotřebiče, ale jen na jeho svorkách (nemůžeme ho rozebrat), je nutné vyjádřit fázové napětí a proudy z hodnot na svorkách – z takzvaných síťových hodnot.

Pro zapojení do trojúhelníka platí:

$$U = U_{\text{spotřebice}} ; I = I_S = I_f \cdot \sqrt{3} \Rightarrow I_f = \frac{I}{\sqrt{3}} ; S = 3 \cdot U_f \cdot I_f = 3 \cdot U \cdot \frac{I}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Pro zapojení do hvězdy platí:

$$I = I_{\text{spotřebice}} ; U = U_S = U_f \cdot \sqrt{3} \Rightarrow U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} ; S = 3 \cdot U_f \cdot I_f = 3 \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot I = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

Je vidět že konečné vztahy jsou stejné, ať už je spotřebič zapojen do hvězdy nebo do trojúhelníka.



Vztahy pro činný a jalový výkon jsou obdobné jako pro zdánlivý, s tím že je v nich navíc $\cos \varphi$ a $\sin \varphi$.

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \\ P &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \\ Q &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (10)$$

Vztah 10 platí pro souměrné trojfázové obvody. Hodnoty napětí U a proudu I jsou takzvané síťové hodnoty (napětí mezi fázovými vodiči a proud ve fázovém vodiči).

Pro praxi je důležité určit, jaký výkon má jeden a tentýž trojfázový spotřebič v zapojení do hvězdy a do trojúhelníka. Na obr. 10 je odvození pro spotřebič sestávající ze tří lineárních rezistorů.

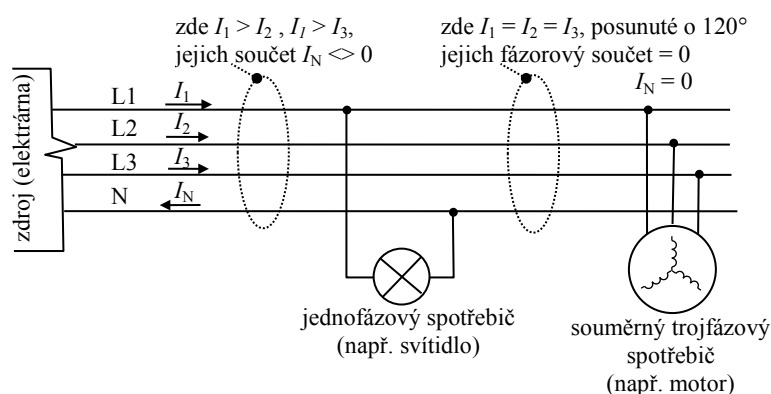
Teoreticky je výkon při zapojení do trojúhelníka 3krát větší než při zapojení do hvězdy. V případě, že zátěž není lineární, tak tento poměr není přesně 3.

Změny výkonu spotřebiče při přepínání zapojení mezi hvězdou a trojúhelníkem se využívá při regulaci některých tepelných spotřebičů, nebo při spouštění trojfázových asynchronních motorů.

5.6 NESOUMĚRNÉ (NESYMETRICKÉ) TROJFÁZOVÉ SOUSTAVY

Zdroje elektrické energie jsou v trojfázové elektrizační soustavě vždy souměrné (generátory v elektrárnách). Přenosové cesty (vedení a transformátory) jsou také přibližně souměrné. To co způsobuje nesouměrnost v trojfázových soustavách, jsou tedy spotřebiče.

Trojfázové spotřebiče jsou většinou konstruovány jako souměrné, nesouměrnost pak způsobují jednofázové spotřebiče připojené do trojfázové sítě. Je to běžný způsob připojování elektrických spotřebičů do sítě, a je naznačen na obr. 11.



Obr. 11. Vznik nesymetrie vlivem jednofázového spotřebiče v trojfázové síti.

Nesouměrnost se projeví tím, že nulovým vodičem bude protékat proud, vznikne takzvaná proudová nesymetrie.

Tato proudová nesymetrie vyvolá následně i malou nesymetrii napětíovou. Protože více zatíženou fází (na obr. 11 je to fáze L1) teče větší proud než zbývajícemi fázemi, bude ve fázi L1 větší i úbytek napětí mezi zdrojem a spotřebičem. Proto bude na konci vedení ve fázi L1 o trochu nižší napětí než ve zbývajících fázích – vznikne napětíová nesymetrie. V běžné elektrizační síti bývá napětíová nesymetrie velmi malá.

Praktická poznámka: Jednofázové spotřebiče bývají běžně konstruovány na fázové napětí (u nás 230V) a zapojují se mezi fázový a nulový vodič. Jednofázové zásuvky jsou tedy



jednofázovou odbočkou z trojfázové sítě, kde je vyvedena fáze a nulový vodič (a navíc ochranný vodič, o kterém jsme se zatím nezmiňovali).

Některé jednofázové spotřebiče mohou být výjimečně konstruovány na sdružené napětí, ale není to příliš časté.



5.7 LITERATURA

Smejkal J, Elektrotechnika, VUT Brno,

TKOTZ K., Příručka pro elektrotechnika: Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Bastian P a kolektiv, Praktická elektrotechnika; Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Kolář V., Fiala M, Vrána V.: Elektrické obvody střídavého proudu, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, 2008.

Internet

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Elektrická měření

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

6	ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ	3
6.1	Úvod.....	4
6.1.1	Elektrické měření obsahuje:	4
6.1.2	Rozdělení elektrického měření podle účelu:	5
6.1.3	Základní pojmy	5
6.2	Chyby měření.....	6
6.2.1	Podle způsobu výskytu chyby rozeznáváme	7
6.2.2	Podle příčiny vzniku chyby rozeznáváme.....	7
6.3	Elektrické měřicí přístroje	8
6.3.1	Rozdělení měřicích přístrojů podle použití:	8
6.3.2	Rozdělení elektrických měřicích přístrojů podle snímání a zobrazení výstupní veličiny:	8
6.3.3	Rozdělení elektrických měřicích přístrojů podle způsobu odečítání:	8
6.3.4	Rozdělení nejčastěji používaných ručkových měřicích přístrojů dle principu funkce:.....	8
6.3.5	Ostatní měřicí přístroje	11
6.4	Měření elektrických veličin	12
6.4.1	Měření elektrického napětí U	12
6.4.2	Měření elektrického proudu I	13
6.4.3	Měření elektrického výkonu.....	14
6.4.4	Měření elektrické energie.....	17
6.4.5	Měření odporu.....	18
6.4.6	Měření kapacit C :.....	19
6.4.7	Měření vlastních indukčností L :	20
6.5	Měření neelektrických veličin elektrickými metodami.....	20
6.5.1	Podle druhu snímané neelektrické veličiny se rozlišují snímače:	21
6.5.2	Podle využívaného fyzikálního jevu nebo principu snímání, který určuje druh výstupního signálu senzoru rozlišujeme snímače na:	21
6.5.3	Podle chování snímané neelektrické veličiny na výstupu senzoru rozdělujeme snímače:.....	21
6.5.4	Rozdělení senzorové techniky podle vývojových stupňů	22
6.5.5	Základní aplikace vybraných snímačů neelektrických veličin	22
6.6	Literatura	27



6 ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ



OBSAH KAPITOLY:

Úvod,
Chyby měření,
Elektrické měřicí přístroje,
Měření elektrických veličin,
Měření neelektrických veličin.

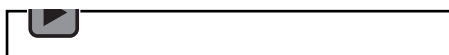


MOTIVACE:

V každodenním životě se setkáváme s požadavky na měření elektrických i neelektrických veličin. Příkladem měření neelektrických veličin je např. venkovní teplota, teplota v místnosti, množství spotřebované vody v domě, množství spotřebovaného plynu pro vytápění atd. V současné době je kladen důraz na úspory energií nejen v budovách, což se zjištěním neboli měřením jednotlivých neelektrických veličin úzce souvisí. Příkladem měření elektrických veličin může být například měření množství spotřebované elektrické energie, měření výkonu, měření napětí a proudu. V následujícím textu jsou popsány definice, jednotlivé principy měření, základní rozdělení snímačů a způsobů provádění měření elektrických a neelektrických veličin.



Audio 6.1 Motivace



CÍL:

Základní rozdělení způsobů měření elektrických veličin, chyby měření,
rozdělení elektrických měřicích přístrojů, použité značky,
způsoby měření elektrické energie a základních elektrických veličin (napětí,
proud, výkon, odpor, kapacita, indukčnost),
základní principy a metody měření neelektrických veličin.

6.1 ÚVOD

Měření představuje poznávací proces, jehož prvořadým cílem je zjištění výskytu a velikosti měřené veličiny. V poznávacím procesu měření využíváme známých poznatků o fyzikálních jevech a zákonech.

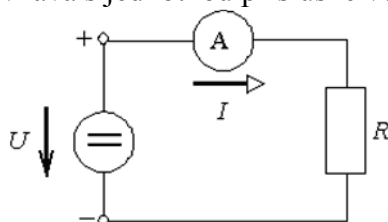


Audio 6.2 Úvod



Elektrické měření je měření elektrických veličin (např. napětí U nebo proudu I) a měření neelektrických veličin (např. tlaku, teploty, rychlosti) s využitím elektrických měřicích prostředků. Neelektrické fyzikální veličiny lze poměrně snadno převést na elektrické veličiny, tedy na elektrické signály, které jsou nositeli informace.

Velikost, popř. číselnou hodnotu měřené veličiny určíme pomocí měřicího přístroje (MP), který měřenou veličinu porovnává s jednotkou příslušné veličiny.



Obr. 1 Příklad měření el. proudu I

Příklad: Ukazuje-li ampérmetr např. hodnotu 5 A, znamená to, že měřený proud je 5 x větší, než jeho jednotka 1 A.

6.1.1 Elektrické měření obsahuje:

- Objekt měření

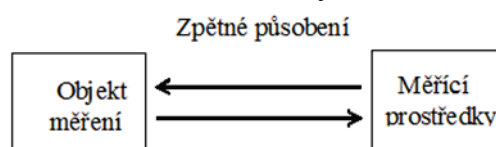
U objektu, na kterém provádíme měření, zjišťujeme jednu nebo více měřených veličin, např. proud I nebo napětí U . Jestliže zjišťujeme hodnotu neelektrické veličiny, je nutné ji převést vhodným snímačem na elektrickou veličinu (např. měření teploty, tlaku, atd.).

- Metoda měření

Pro přesné zjištění hodnoty měřené veličiny zvolíme vhodnou metodu měření. Pro měření použijeme odpovídající fyzikální zákon.

- Měřicí prostředky

Pomocí měřicích prostředků změříme hodnotu měřené veličiny. Jsou to například voltmetr, wattmetr, ampérmetr, osciloskop atd. Je nutné zajistit vhodné propojení objektu měření s měřicím zařízením, aby při měření nedocházelo k chybám.



Obr. 2 Obecný příklad elektrického měření.



6.1.2 Rozdělení elektrického měření podle účelu:

- Laboratorní měření

Těmito měřeními se hledají a ověřují fyzikální vlastnosti a jevy.

- Technická měření

Při těchto měřeních probíhá hodnocení, zkoušení, prověřování různých elektrických zařízení (například motorů).

- Provozní měření

Provozním měřením se průběžně sleduje, popř. řídí výrobní proces v různých továrnách nebo provozech.

6.1.3 Základní pojmy

a) Způsob odečítání měřené hodnoty z analogových měřicích přístrojů

- výchylka ručky se odečítá při pohledu kolmo na přístroj,
- výchylka by měla být pokud možno ve třetí třetině rozsahu přístroje (zajistíme změnou rozsahu měřicího přístroje),
- zjistí se celkový počet dílků na stupnici α_c ,
- zjistí se rozsah přístroje r ,
- na měřicím přístroji se odečte výchylka α , která odpovídá hodnotě změřené veličiny,

$$k = \frac{r}{\alpha_c}$$

- vypočte se konstanta k přístroje

- určí se hodnota měřené veličiny, např. při měření napětí U :

$$U = k \cdot \alpha$$

- citlivost c přístroje se určí ze vztahu

$$c = \frac{\alpha_c}{r}$$

b) **Zkušební napětí měřicího přístroje** – je to napětí, kterým se zkouší elektrická pevnost izolace přístroje. Zaručuje se tím bezpečnost práce s přístrojem.

c) **Vlastní spotřeba** měřicího přístroje je příkon potřebný na plnou výchylku ručičky. Udává se ve wattech [W], u některých přístrojů ve voltampérech [VA].

d) **Přetížitelnost** měřicího přístroje je násobek jmenovité hodnoty proudu nebo napětí, který nezničí přístroj.

e) **Provozní poloha** měřicího přístroje je výrobcem předepsaná poloha, ve které je zaručená třída přesnosti. Provozní poloha může být vodorovná, svislá, šikmá, popř. s udáním úhlu vůči vodorovné podložce.

Tab.1. Příklady značek, vyskytujících se na měřicích přístrojích (MP).



MP pro měření stejnosměrného proudu,

MP pro měření střídavého proudu,

MP pro měření stejnosměrného (DC) a střídavého (AC) proudu,

1,5; 0,5; 0,2

třídy přesnosti MP,





MP je určen pro svislou polohu,



MP je určen pro vodorovnou polohu,



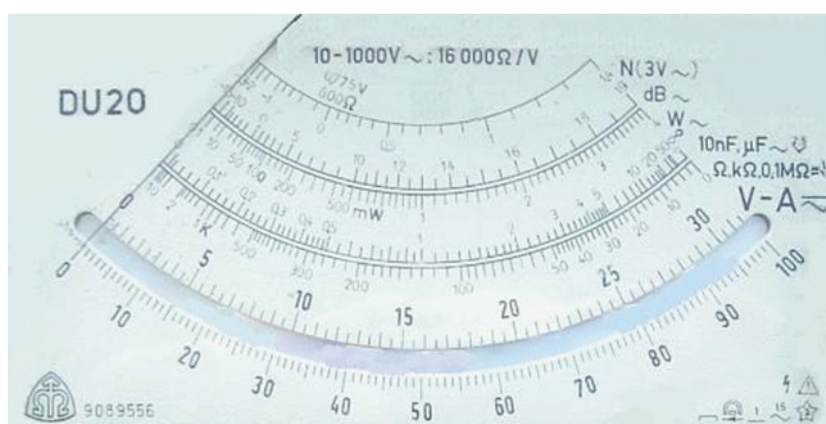
MP je určen pro šikmou polohu 60° k vodorovné rovině,



značka uzemňovací svorky,



Značka „2 ve hvězdě“ znamená zkušební napětí je 2kV; „hvězda bez čísla“ znamená zkušební napětí je 500V; „hvězda s 0“ znamená, že se zkušební napětí nezměřilo.



Obr. 3 Stupnice analogového měřicího přístroje DU 20.

6.2 CHYBY MĚŘENÍ

Při měření se snažíme zjistit skutečnou hodnotu měřené veličiny (MV). Žádným měřicím přístrojem ani měřicí metodou nelze skutečnou hodnotu MV stanovit zcela přesně. Výsledek měření bude vždy odlišný od skutečné hodnoty.

Přesnost, s jakou vlastní měření provádíme, se vyjadřuje pomocí chyby měření. Pro zjištění chyby měření lze použít několik postupů.

Nejprve provedeme **kontrolní měření** s nejmenší možnou chybou měření. Chybu kontrolního měření zanedbáme a výsledek měření budeme považovat za skutečnou hodnotu X_S .

- **Absolutní chyba měření Δ**

$$\Delta = X_M - X_S$$

X_M naměřená hodnota
 X_S skutečná hodnota

Používá se při vyhodnocení výsledků měření.

- **Relativní chyba měření $\delta\%$**

$$\delta\% = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 100[\%]$$

Používá se při určení přesnosti měřicí metody.



Při každém měření uděláme **rozběr vlivů**, které mohou způsobit chyby měření, tyto chyby vyčíslíme a výpočtem určíme skutečnou hodnotu X_S .

6.2.1 Podle způsobu výskytu chyby rozeznáváme

a) Chyby **soustavné** (systematické)

Tyto chyby se při měření se stále opakují, lze určit jejich velikost.

b) Chyby **nahodilé**

Tyto chyby se vyskytují zcela náhodně. Projevují se u nich nepravidelné, proměnné vlivy. Tyto vlivy se vyskytují zcela náhodně.

6.2.2 Podle příčiny vzniku chyby rozeznáváme

a) Chyba **metody měření**

Vzniká tím, že se při výpočtu měřené veličiny neuvažují všechny známé vlivy (spotřeba měřicího přístroje, maximální hodnota kmitočtu). Je to chyba soustavná.

b) Chyba **měřicího zařízení**

Je daná vlastnostmi a nedokonalostí měřicího zařízení za určitých, přesně stanovených podmínek. Je to chyba soustavná. Tato chyba se určuje pro analogové i číslicové měřicí přístroje:

- Chyba analogových měřicích přístrojů

Chyba analogového MP je stanovena třídou přesnosti. Třída přesnosti je výrobcem zaručovaná největší možná relativní chyba přístroje δ_p , vyjádřená v procentech rozsahu měřené veličiny. Třídy přesnosti jsou normovány v hodnotách: $\delta_p = 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5$.

Největší absolutní chyba měření ΔX , kterou lze očekávat při měření s přístrojem třídy přesnosti δ_p je

$$\pm \Delta X = \frac{\delta_p \cdot \alpha_m}{100}$$

$\pm \Delta X$ absolutní chyba měření

α_m maximální výchylka

δ_p třída přesnosti

- Chyba číslicových měřicích přístrojů

U číslicových měřicích přístrojů vzniká chyba při převodu analogové hodnoty měřené veličiny na hodnotu diskretní (digitální). Tato chyba se nazývá chyba kvantizační.

c) Chyba **použitých elementů**

Vzniká nepřesností vyrovnání a kalibrace etalonů odporu, kapacity, napětí.

d) Chyby **způsobené rušivými vlivy**

Vznikají působením rušivých činitelů v měřicím obvodu. Jsou to například rušivá napětí, indukovaná v měřicím obvodu cizím polem, rušivé kapacitní a indukční vazby mezi členy měřicího obvodu.

e) Chyby **čtení**

Jsou způsobeny pozorovatelem, který čte údaje měřicích přístrojů.



Pro vyjádření přesnosti měření použijeme celkovou chybu měření. Celková chyba měření je součtem většího počtu různých dílčích chyb, uvedených výše.

6.3 ELEKTRICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

6.3.1 Rozdělení měřicích přístrojů podle použití:

- Etalon je měřidlo, které slouží k realizaci a uchování měřicí jednotky.
- Stanovená měřidla jsou měřidla stanovená Úřadem pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví k povinnému ověřování.
- Pracovní měřidla nejsou ani etalonem ani stanoveným měřidlem a lze je využít k prokázání shody produktu s určenými požadavky.
- Informativní měřidla slouží pouze pro účely výuky. **Nelze je využít k prokázání shody produktu s určenými požadavky!**

6.3.2 Rozdělení elektrických měřicích přístrojů podle snímání a zobrazení výstupní veličiny:

- Analogové** měřicí přístroje
Jsou určené pro vyjádření nebo zobrazení výstupní informace jako spojitě funkce měřené veličiny.
- Číslicové** (digitální) měřicí přístroje (viz obr. 6)
Měřená veličina je na vstupu převáděna na diskrétně kódované signály vyjádřené na výstupu nebo na displeji v číslicovém tvaru. Základem je převodník analogové veličiny na digitální (A/D převodník).
- Ukazovací** měřicí přístroje
Tento měřicí přístroj zobrazuje kdykoliv hodnotu měřené veličiny bez jejího zaznamenávání.
- Zapisovací** (měřicí) přístroj
Zapisuje na nosič informace odpovídající hodnotě měřené veličiny.

6.3.3 Rozdělení elektrických měřicích přístrojů podle způsobu odečítání:

- Ručkové
- Registrační
- Vibrační, světelné
- Číslicové (základem je A/D převodník)

6.3.4 Rozdělení nejčastěji používaných ručkových měřicích přístrojů dle principu funkce:

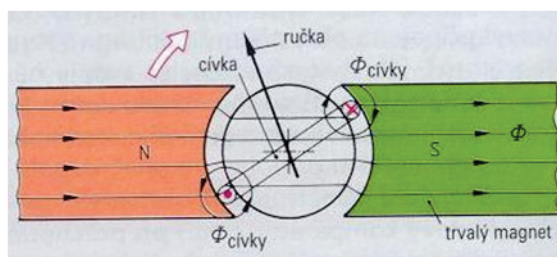
- Magnetoelektrické** měřicí přístroje (m.e.)
Nazývají se také deprezské měřicí přístroje nebo přístroje s otočnou cívkou.

Značky:

-  magnetoelektrický přístroj,
-  magnetoelektrický přístroj s usměrňovačem,
-  magnetoelektrický přístroj s termočlánkem.



Magnetoelektrické přístroje využívají sil, působících v magnetickém poli permanentního magnetu na vodiče otočně uložené cívky. Vodiči cívky prochází měřený stejnosměrný proud. Proud se do cívky přivádí pružinami. Pružiny slouží zároveň k vytváření řídicího momentu, který působí proti akčnímu silovému momentu měřicího systému. Cívka je spojena s ukazovací ručkou, jejíž směr vychýlení závisí na smyslu protékajícího proudu (viz obr. 4).



Obr. 4 Princip soustavy s otočnou cívkou.

Výchylka je úměrná střední hodnotě procházejícího proudu. Stupnice je rozdělená rovnoměrně. Pro otočný moment systému platí:

$$M \sim F \cdot r = 2 \cdot N \cdot r \cdot B \cdot I \cdot l \sim k_s \cdot I_d$$

Magnetoelektrické MP se používají se pro měření stejnosměrného proudu a napětí.

Pro měření střídavých harmonických elektrických veličin je nutné střídavou harmonickou veličinu nejdříve usměrnit. Proto používáme magnetoelektrické MP s usměrňovačem nebo s termočlánkem. Stupnice těchto přístrojů je cejchovaná v **efektivních hodnotách**.

Výhodou magnetoelektrických měřicích přístrojů je velká citlivost, velká přesnost a velká přetížitelnost.

b) Elektromagnetické měřicí přístroje

Někdy se nazývají plíškové nebo feromagnetické.

Značka:



feromagnetický měřicí systém

Princip činnosti je založen na využití síly F , působící na feromagnetické tělísko. Feromagnetické tělísko je uloženo v magnetickém poli cívky, kterou protéká měřený proud I .

$$F \sim I_{ef}^2 \text{ (výchylka ručky je úměrná čtverci proudu)}$$

Elektromagnetický přístroj měří **efektivní** hodnotu střídavého proudu nezávisle na časovém průběhu nebo frekvenci měřeného proudu.

Elektromagnetické přístroje jsou vhodné pro měření střídavého i stejnosměrného proudu a napětí. V průmyslu se používají jako montážní ampérmetry a voltmetry nebo jako rozváděčové měřicí přístroje.

c) Elektrodynamické měřicí přístroje

Značky:





elektrodynamický měřicí systém,



ferodynamický měřicí systém.

Princip elektrodynamického přístroje je založen na využití silových účinků magnetického pole dvou cívek, kterými protéká proud. Jedna z cívek je pevná a druhá pohyblivá.

Pohyblivá cívka má tendenci se natočit tak, aby se směr magnetického toku obou cívek shodoval. Vzniká pohybový moment měřicího systému:

$$m = i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha}$$

i_1 i_2 jsou okamžité hodnoty proudu, které procházejí cívkami [A],
 dM změna vzájemné indukčnosti obou cívek. [H],
 $d\alpha$ změna úhlu α (vychýlení otočné cívky) [°].



Obr. 5 Ferodynamický wattmetr EL 20.

Elektrodynamické měřicí přístroje jsou využívány zejména jako wattmetry pro měření elektrického výkonu střídavého proudu. Pevná cívka (proudová) se zapojuje do série se spotřebičem, otočná cívka (napětová) se zapojuje paralelně ke spotřebiči.

U ferodynamických měřicích přístrojů se využívá stejný princip jako u elektromagnetických měřicích přístrojů. Elektrodynamické působení el. proudu se zesiluje vložením feromagnetické části do cesty magnetického toku. Výhodou je, že výchylka otočné cívky není u těchto přístrojů závislá na kmitočtu a časovém průběhu měřené veličiny.

d) **Vibrační** měřicí přístroje (rezonanční)

Značka:



vibrační měřicí přístroj

Princip měřicího přístroje je založen na rozkmitání tenkých feromagnetických ocelových jazýčků střídavým magnetickým polem.



Přístroje s rezonančním systémem se nejčastěji používají pro měření kmitočtu (frekvence f). Příkladem může být jazýčkový kmitoměr.

6.3.5 Ostatní měřicí přístroje

a) Číslicové (digitální) měřicí přístroje

Přirozené analogové elektrické signály se převádějí v číslicových měřicích systémech do číslicové formy. Výhodou je vyšší přesnost měření ve srovnání s elektromechanickými měřicími přístroji, odpadá chyba nepřesným odečtením polohy ukazovací ručky, jsou méně náchylné na mechanické poškození než analogové přístroje. Jsou také levnější a ve speciálních případech je možné připojit digitální měřicí přístroje přímo na PC.

Většinou se jedná o multifunkční MP (tzv. multimetry viz obr.6) s možností měření více veličin (např. napětí, proud, odpor). Parametry přístroje a návod k použití bývá uveden v průvodní dokumentaci.



Obr. 6 Digitální multimetr
Metex M-3800.

b) Registrační měřicí přístroje

Zaznamenávají průběh měřené veličiny na pohyblivý pás papíru. Jsou to přístroje, určené pro nepřerušovanou kontrolu provozních veličin.

c) Osciloskop

Je přístroj, určený k zobrazení časových průběhů prakticky všech druhů signálů. Osciloskopy zobrazují stejnosměrné i střídavé periodické průběhy (harmonické i neharmonické). Pomocí osciloskopu lze zjistit maximální hodnotu (amplitudu) nebo mezi vrcholovou hodnotu (rozkmit) signálu.

Obvod časové základny osciloskopu zajišťuje pohyb měřeného signálu na obrazovce.

Značka osciloskopu:



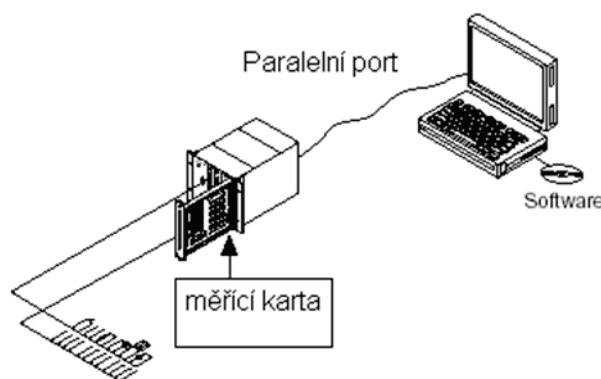
d) Oscilograf

Je přístroj, určený k zapisování časových průběhů hodnot naměřených veličin. Zápis se provádí na papír, který se pohybuje konstantní rychlostí.

e) Virtuální měřicí přístroje (VMP) - (PC + převodník)



Podstatou VMP je doplnění PC zásuvnou multifunkční kartou (zásuvnou měřicí deskou) a vytvoření vhodného programu pro PC, který realizuje všechny činnosti měřicího přístroje. Významnou roli zde hraje tzv. vývojové prostředí umožňující pohodlné a poměrně snadné vytváření vlastního software. Známá jsou např. vývojová prostředí Lab Windows, Lab View apod. Určitým kompromisem mezi klasickým MP a VMP je propojení MP s počítačem přes tzv. rozhraní (sériové - RS, paralelní - GPIB). Toto propojení umožňuje doplnit funkce MP dalšími funkcemi pomocí SW v PC. MP většinou slouží jako snímač a převodník měřené veličiny, která je pak dále zpracována v PC. Takto lze např. z digitálního osciloskopu vytvořit další měřicí přístroj například frekvenční analyzátor. Výhodnými vlastnostmi VMP jsou nižší ceny, možnosti změn vlastností MP změnou programu a flexibilita přístroje pro různá měření.



Obr. 7 Připojení měřicí karty přes paralelní port k notebooku.

6.4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÝCH VELIČIN

6.4.1 Měření elektrického napětí U

Přístroje určené pro měření elektrického napětí U se nazývají voltmetry. Mohou být vyrobeny jako analogové nebo číslicové měřicí přístroje. Zapojují se vždy **paralelně** k měřenému obvodu (viz obr. 12).

Značka voltmetru:



Voltmetrem měříme stejnosměrnou nebo střídavou hodnotu napětí. Změřená hodnota harmonického střídavého napětí je na voltmetru vyjádřena jako efektivní hodnota naměřeného napětí. U měřených neharmonických průběhů napětí se k jejich vyjádření používá střední hodnota napětí U_{AV} , popř. maximální hodnota napětí U_m .

Změna měřicího rozsahu voltmetru se provádí:

- **Předřadným odporem R_p**

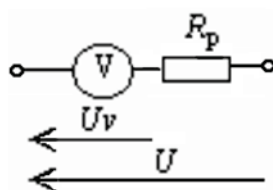
Předřadným odporem R_p se zvětšuje měřicí rozsah voltmetru. Připojuje se do série k měřicímu ústrojí (viz obr. 8).

Stejnoseměrné měřené napětí U_V se zmenší na napětí měřicího systému U podle vztahu pro

$$\text{napětíový dělič: } U_V = U \cdot \frac{R}{R + R_p}$$

R hodnota odporu měř. systému
 R_p hodnota předřadného odporu





Obr. 8 Princip změny rozsahu voltmetru předřadným odporem R .

- **Měřicím transformátorem napětí**

Měřicí transformátor napětí slouží ke změně rozsahu voltmetrů pro střídavá harmonická napětí síťového kmitočtu. Zároveň je určen pro galvanické oddělení měřicích přístrojů od měřeného obvodu.

- **Měřicím zesilovačem**

Malá napětí, řádově asi od 10^{-2} až 10^{-3} V nelze úspěšně měřit přímo elektromechanickými měřidly a ani zpracovat pomocí číslicových voltmetrů. V těchto případech se měřené napětí zesílí v měřicím zesilovači a teprve potom přivede na vstup měřicího systému.

6.4.2 Měření elektrického proudu I

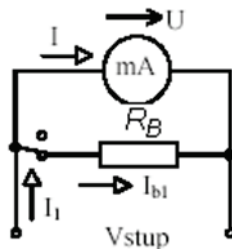
Přístroje pro měření elektrického proudu se nazývají ampérmetry. Jsou to buď analogové, nebo číslicové měřicí přístroje. Zapojují se vždy do **série** s měřeným obvodem (viz obr. 12).

Značka ampérmetru:



Ampérmetrem měříme stejnosměrnou nebo střídavou hodnotu proudu I .

Změřená hodnota harmonického střídavého proudu je ampérmetrem vyjádřena jako efektivní hodnota naměřeného proudu. U měřených neharmonických průběhů proudů se k jejich vyjádření používá střední hodnota proudu I_{AV} , popř. maximální hodnota proudu I_m .



Obr. 9 Princip změny rozsahu ampérmetru bočníkem R_B .

Změna měřicího rozsahu ampérmetru se provádí:

- **Bočníkem**

Bočník je rezistor R_B , který se připojuje paralelně k měřicímu ústrojí (viz obr. 9). Může být v měřicím přístroji zabudovaný, nebo je oddělený jako příslušenství k měřicímu přístroji.

- **Měřicím transformátorem proudu**

Měřicí transformátor proudu slouží ke změně rozsahu ampérmetrů pro střídavé proudy síťového kmitočtu. Měřicí obvod je galvanicky oddělen od měřeného obvodu.

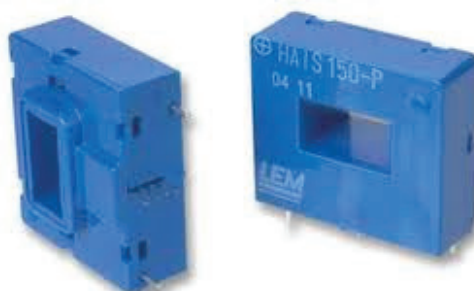




Obr. 10 Měřicí transformátory proudu.

- **Měření s využitím Hallova jevu**

Pro měření proudu se používají také moderní technologické poznatky. Příkladem mohou být čidla pro měření proudu, které vyrábí firma LEM. Tato čidla využívají pro snímání proudu princip tzv. Hallova jevu.



Obr. 11 Čidla pro měření proudu od firmy LEM.

6.4.3 Měření elektrického výkonu

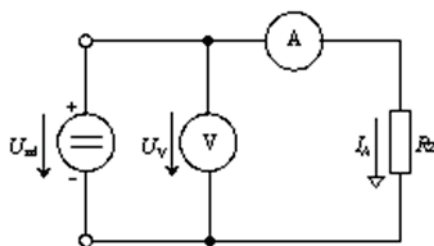
V elektrickém obvodu, který je napájený ze zdroje stejnosměrného napětí, měříme na spotřebiči hodnotu výkonu P stejnosměrného proudu. V elektrickém obvodu, který je napájený z jednofázového nebo třífázového zdroje střídavého napětí měříme na spotřebiči hodnotu:

- činného výkonu P [W],
- jalového výkonu Q [VA],
- zdánlivého výkonu S [var].

Pro určení a měření jednotlivých výkonů existuje několik různých způsobů a metod:

a) **Nepřímá metoda**

Nepřímá metoda se používá pro určení elektrického výkonu P spotřebiče v elektrickém obvodu, ve kterém je zapojen zdroj stejnosměrného napětí (viz obr. 12). Voltmetrem se změří napětí U_V a ampérmetrem proud I_A , protékající spotřebičem.



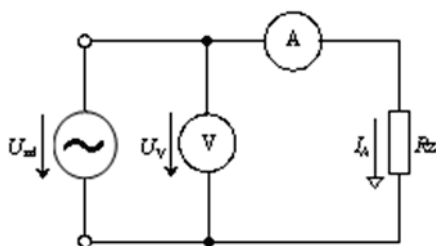
Obr. 12 Příklad zapojení měřicích přístrojů pro měření elektrického výkonu P pomocí nepřímé metody.

Elektrický výkon P stejnosměrného proudu ve spotřebiči se stanoví jako součin mezi napětím U_V na spotřebiči a proudem I_A pomocí následujícího vztahu:

$$P = U_V \cdot I_A \quad [\text{W}, \text{V}, \text{A}]$$

Jestliže je v elektrickém obvodu zapojen zdroj střídavého napětí (viz obr. 13), můžeme pomocí nepřímé metody určit zdánlivý výkon:

$$S = U_V \cdot I_A \quad [\text{VA}, \text{V}, \text{A}]$$



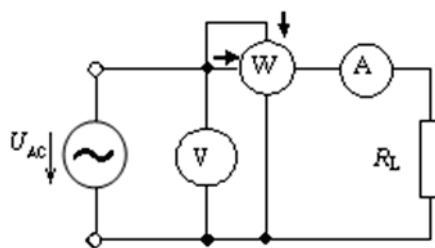
Obr. 13 Příklad zapojení měřicích přístrojů pro měření zdánlivého výkonu S a činného výkonu P pomocí nepřímé metody.

Když víme, že v elektrickém obvodu na obrázku 10 je spotřebič s odporovým charakterem ($\cos\varphi=1$), lze nepřímou metodou určit také činný výkon P .

b) Přímá metoda

Pro měření činného výkonu P spotřebiče, napájeného ze zdroje jednofázového střídavého napětí U , použijeme wattmetr, zapojený podle obr. 15.





Obr.14 Zapojení voltmetru a ampérmetru pro kontrolu přetížení wattmetru.

Při měření činného výkonu P je nutné dát pozor na přetížení wattmetru v el. obvodu. Podle následujícího vztahu je výchylka ručky wattmetru α závislá nejen na hodnotě změřeného proudu I , napětí U , ale také na fázovém posunu φ mezi měřeným proudem I a napětím U :

$$\alpha = \frac{P}{k_W} = \frac{UI \cos \varphi}{k_W}$$

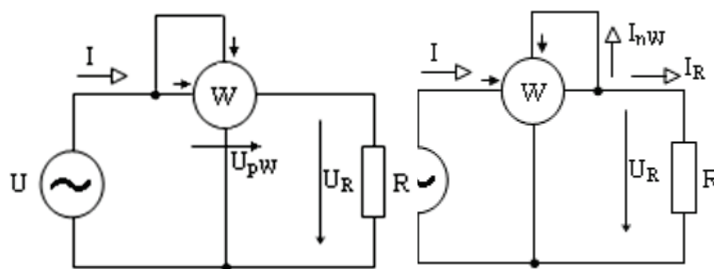
k_W konstanta wattmetru

Značka wattmetru:



Aby nedošlo k přetížení wattmetru, je nutné kontrolovat proud I a napětí U pomocí ampérmetru a voltmetru (viz obr. 14).

Pro měření výkonu přímou metodou se používá například elektrodynamický wattmetr. Budeme ho používat pro měření činného výkonu P také v laboratořích. Pro měření proudu I má wattmetr proudový měřicí obvod (proudová cívka). Pro měření napětí U má wattmetr napěťový měřicí obvod (napěťová cívka). Pevná cívka, zpravidla proudová, zapojuje se do **série** se zátěží. Otočná cívka, napěťová se připojuje **paralelně** k zátěži.

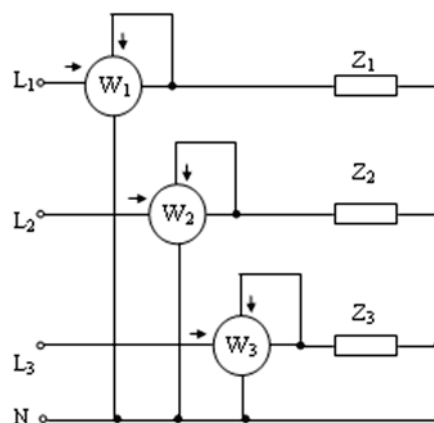


Obr.15 Příklad zapojení proudové a napěťové cívky wattmetru v el. obvodu pro měření činného výkonu P .

Pro měření činného výkonu v 3-fázových obvodech se používají tyto způsoby zapojení wattmetrů:

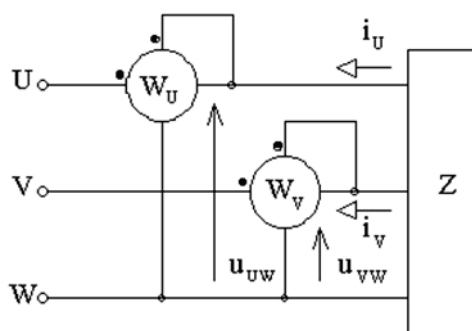
- Zapojení s jedním 1-fázovým W-metrem (souměrná zátěž). Změří se činný výkon P_W v jedné fázi a celkový trojfázový činný výkon se vypočítá podle vztahu :
 $P = 3 \times P_W$.
- Zapojení s jedním 3-fázovým W-metrem.
- Zapojení se třemi 1-fázovými W- metry (viz obr.16).





Obr.16 Příklad zapojení se třemi
jednofázovými wattmetry v obecné
čtyřvodičové 3f soustavě.

- Zapojení se dvěma W-metry (tzv. Aronovo zapojení metoda – zapojení, viz obr.17) Princip metody spočívá v měření činného výkonu P na trojfázovém spotřebiči pomocí dvou wattmetrů. Pro určení celkového trojfázového činného výkonu P se vychází z následujícího vztahu pro měřené výkony v Aronově zapojení: $P_{(3)} = P_{(wu)} + P_{(wv)}$. Průměrný výkon jedné fáze bude pro souměrnou zátěž $P_1 = P_2 = P_3 = P_{(3)}/3$.



Obr. 17 Aronovo zapojení pro měření
výkonu v 3-fázových obvodech.

Pro objasnění způsobu měření jalového výkonu Q si uvedeme následující vztah pro výpočet jalového výkonu Q :

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = U \cdot I \cdot \cos(\pi/2 - \varphi) \quad [\text{var, V, A}]$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že jalový výkon Q lze měřit přímou metodou pomocí var – metru (v podstatě je to W-metr, zapojený tak, že napětí má fázový posun 90°).

Jestliže použijeme nepřímou metodu, potom jalový výkon určíme z tzv. trojúhelníku výkonů:

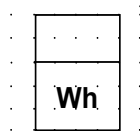
$$U^2 \cdot I^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow Q = \sqrt{U^2 \cdot I^2 - P^2} = \sqrt{(U \cdot I + P) \cdot (U \cdot I - P)}$$

6.4.4 Měření elektrické energie

Odběratel elektrické energie musí spotřebovanou elektrickou energii (práci) zaplatit dodavateli (elektrárně). Elektrická energii W se měří elektroměry.



Značka watthodinového elektroměru:



Pro výpočet elektrické energie platí vztah:

$$W = P \cdot t \quad [J, W, s]$$

W elektrická energie,
 P výkon,
 t čas.



Obr. 18 Příklad provedení indukčního trojfázového elektroměru.

Podle druhu proudu rozdělujeme elektroměry na:

- elektroměr na stejnosměrný proud,
- elektroměr na střídavý proud.

Podle principu činnosti rozdělujeme elektroměry na:

- **Elektromechanické** elektroměry

Indukční elektroměry (viz obr. 18) pro měření elektrické energie střídavého proudu používají indukční měřicí ústrojí. Elektrodynamické elektroměry se používají pro měření stejnosměrné energie.

- **Elektronické** elektroměry

Výhodou elektronických elektroměrů jsou funkce, které u mechanických elektroměrů nebyly možné. Jsou to například komunikační možnosti elektroměrů (přes optická rozhraní, rozhraní RS232, RS 485.). Elektroměry dávají informaci o celkové spotřebě, registrují průběh spotřeby, je možné provádět dálkový odečet el. energie atd. Pro měření elektrické energie lze použít rovněž analyzátoři elektrických sítí.

6.4.5 Měření odporu

Odpor nelze měřit přímou metodou. Existuje mnoho metod měření odporů. Nejznámější a nejrozšířenější metodou je měření odporu R pomocí ohmetrů.

Pro měření odporu lze použít i další metody:



a) **Měření odporu pomocí Ohmetru**

Ohmetr je měřicí přístroj, který udává velikost měřeného odporu přímo v ohmech. Ve většině případů se jedná o součást tzv. víceúčelových měřicích přístrojů - multimetrů.

b) **Ohmova metoda**

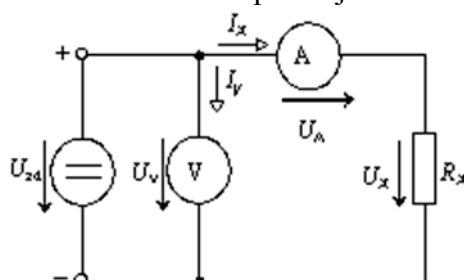
Využívá Ohmova zákona, podle kterého je měřený odpor:

$$R_X = \frac{U_X}{I_X} \quad [\Omega, V, A]$$

kde: U_X - úbytek napětí na měřeném odporu,

I_X - proud procházející měřeným odporem.

Pro tuto metodu je nutné použití dvou měřicích přístrojů: V-metru a A-metru (viz obr. 19).



Obr. 19 Příklad zapojení el. obvodu pro zjišťování hodnoty odporu rezistoru pomocí Ohmovy metody.

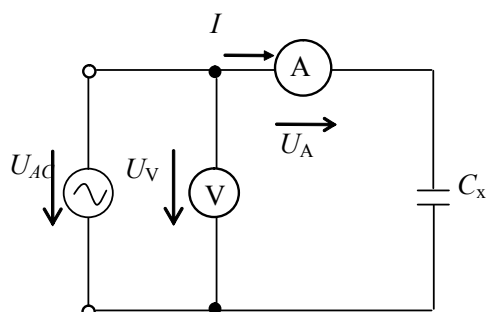
c) **Srovnávací metoda**

Metoda je založena na porovnávání měřeného odporu se známým (referenčním) odporem R_N .

6.4.6 Měření kapacity C:

Jedním ze způsobů měření kapacity C je zapojení kondenzátoru v obvodu s **voltmetrem a ampérmetrem** (viz obr. 20). Ke zdroji střídavého napětí U_{AC} známého kmitočtu f je připojen měřený kondenzátor a měří se proud I a napětí U_V . V této metodě je využitý následující vztah:

$$C_X = \frac{I}{\omega \cdot U} \quad [F, A, \text{rad.s}^{-1}, V]$$



Obr. 20 Měření kapacity C voltmetrem a ampérmetrem.



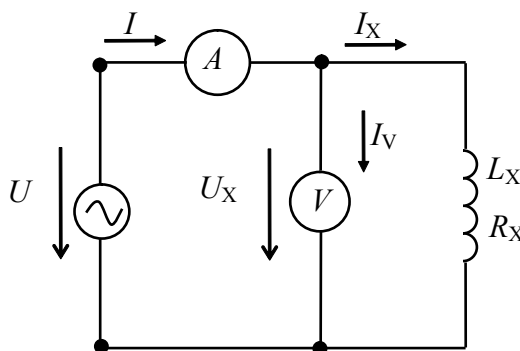
6.4.7 Měření vlastních indukčností L :

Pro měření vlastní indukčnosti L je vhodné zapojení v obvodu s **voltmetrem a ampérmetrem** (viz obr. 21). Zapojení se volí podle velikosti impedance cívky Z_X a odporů použitých přístrojů. Pomocí této metody měříme proud I_X a napětí U_X , vypočítáme velikost impedance cívky Z_X :

$$Z_X = \frac{U_X}{I} \quad [\Omega, V, A]$$

Potom můžeme odvozením následujícího vztahu určit neznámou indukčnost L_X :

$$Z_X = \sqrt{R_X^2 + \omega^2 \cdot L_X^2} \quad [\Omega, \Omega, \text{rad.s}^{-1}, H].$$



Obr. 21 Měření vlastní indukčnosti L voltmetrem a ampérmetrem.

Činný odpor cívky R_X se změří záměnou střídavého zdroje napětí U_{AC} za stejnosměrný zdroj napětí U_{DC} , nebo ohmetrem.

$$R_X = \frac{U_{DC}}{I} \quad [\Omega, V, A]$$

Tato metoda není vhodná pro měření parametrů cívek, které budou provozovány při vysokých kmitočtech. Vlastní indukčnost cívky je

$$L_X = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_X^2 - R_X^2} \quad [H, \text{rad.s}^{-1}, \Omega, \Omega]$$

nebo

$$L_X = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U_X^2}{I^2} - R_X^2} \quad [H, \text{rad.s}^{-1}, V, A, \Omega]$$

Tato metoda je výhodná pro měření vzduchových cívek při nízkém kmitočtu.

6.5 MĚŘENÍ NEELEKTRICKÝCH VELIČIN ELEKTRICKÝMI METODAMI

Pro měření neelektrických veličin se využívá fyzikálních vlastností a jevů, umožňujících převod neelektrických veličin na elektrický signál. Tento signál se používá k dalšímu vyhodnocení nebo jako akční veličina (např. v automatizovaných provozech).

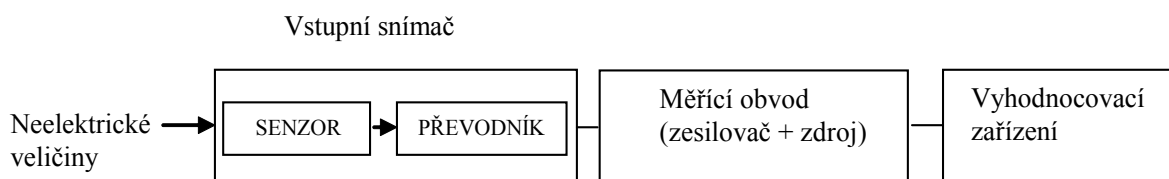


Výhodou elektrického měření neelektrických veličin jsou velká citlivost, velká přesnost, velká rychlost přenosu informace elektrického signálu, snadný přenos informace elektrického signálu (bezdrátový přenos, satelit, rádio), snadné zpracování signálu (pro indikaci signálu na displeji, registrace signálu). Nevýhodou mohou být větší pořizovací náklady.

6.5.1 Podle druhu snímané neelektrické veličiny se rozlišují snímače:

- mechanických veličin (např. poloha, rychlost, otáčky, síla, moment..),
- tepelných veličin (např. teplota, tepelný tok ..),
- magnetických veličin (např. mag. indukce, intenzita mag. pole ..),
- radiačních veličin (např. intenzita viditelného, infračerveného a ultrafialového záření,
- chemických veličin (např. pH, koncentrace, vlhkost ..).

Vstupní snímač umožňuje přeměnu neelektrické veličiny na elektrický signál.

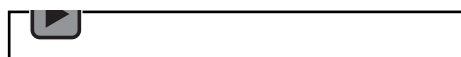


Obr. 22 Blokové schéma způsobu převodu neelektrické veličiny na elektrickou veličinu.

Termínem senzor je myšleno zařízení, které snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a podle určitého definovaného principu ji transformuje fyzikálním převodem na veličinu výstupní. Stav sledované veličiny snímá citlivá část senzoru občas označovaná jako čidlo a zpracovává vyhodnocovací obvod senzoru. Výstupní informaci z vyhodnocovacího obvodu senzoru je kvantitativní, obvykle elektrický signál, který je vyhodnocen elektronickým detektorem a lze ho dále zpracovat dalšími obvody.



Audio 6.3 Senzor



6.5.2 Podle využívaného fyzikálního jevu nebo principu snímání, který určuje druh výstupního signálu senzoru rozlišujeme snímače na:

- odporové,
- kapacitní,
- transformátorové,
- indukčnostní,
- indukční,
- piezoelektrické,
- optické,
- ultrazvukové,
- magnetoelastické,
- magnetoelektrické,
- termoelektrické a další.

6.5.3 Podle chování snímané neelektrické veličiny na výstupu senzoru rozdělujeme snímače:

- Generátorové (aktivní):



Aktivní snímače umožňují přímý převod měřené neelektrické veličiny na elektrickou energii bez pomocného zdroje energie. Při působení snímané veličiny se snímač chová jako zdroj elektrické energie. Výstupní signál snímače (napětí, proud, náboj) se v měřicím obvodu zesílí a upraví na vyhodnocení ve vyhodnocovacím zařízení.

b) Modulační (pasivní):

Působením snímané veličiny na senzor se mění některý z parametrů senzoru (např. odpor R , indukčnost L , kapacita C , popř. i stav kontaktu). Musíme dodat zdroj elektrické energie.

6.5.4 Rozdělení senzorové techniky podle vývojových stupňů

a) První generace senzorů

Využívá různé makroskopické principy např. elektromechanický princip (odporový kontaktní snímač, potenciometrický snímač polohy, elektrodynamický snímač vibrací) elektrochemický (rtuťová elektroda), mechanický (dilatační snímač, kontaktní snímač vibrací). Jejich vývoj je prakticky ukončený.

b) Druhá generace senzorů

Využívá elektronické jevy v tuhých látkách a plynech, např. magnetostrikční jev, piezoelektrický jev, povrchové akustické vlny, nárazovou ionizaci apod. Vyznačují se větší citlivostí, menšími rozměry a hmotností.

c) Třetí generace senzorů

Do třetí generace patří tzv. integrované senzory. U těchto senzorů bývají stále častěji snímače v jednom pouzdře se zesilovacím členem a mikroprocesorem (viz obr. 22). Lze je označit také jako inteligentní senzory. Tyto integrované senzory mohou měřené signály (tlak, teplota) převádět na jiný typ signálů (napětí, proud). Takto převedené signály mohou inteligentní senzory dále zpracovávat (provádět různé výpočty). Na základě získané informace mohou inteligentní senzory činit rozhodnutí a vysílat řídicí signály přes odpovídající rozhraní do centrálního počítače. Inteligentní integrované snímače nahrazují celé měřicí řetězce.

6.5.5 Základní aplikace vybraných snímačů neelektrických veličin

a) Piezoelektrické snímače

Piezoelektrický snímač využívá pro převod neelektrického signálu na elektrický piezoelektrického jevu. Uvnitř piezoelektrického materiálu s dipólovou strukturou (např. krystal křemíku SiO_2), vzniká vlivem mechanických deformací elektrická polarizace. V důsledku této polarizace se na přiložených elektrodách objeví elektrický náboj, úměrný síle, způsobující deformaci krystalu.

Piezoelektrické snímače se používají např. pro měření tlaků, tlakové síly, zrychlení, relativní deformace, mechanického napětí atd.



Obr. 23 [Piezoelektrický snímač pro měření síly.](#)

b) Indukční senzory

Indukční senzory mají široké uplatnění v automatizaci průmyslu. Pracují bezdotykově a jsou díky uzavřenému pouzdru odolné vůči vlivům provozního prostředí. Vyznačují se vysokou spolehlivostí. Indukční senzor je zcela polovodičový prvek. Pokud nedojde k jeho mechanickému poškození, má téměř neomezenou životnost.

Z aplikačního hlediska lze tyto senzory rozdělit na:

- senzory standardního provedení (jedno cívkové), které původně vznikly jako náhrada mechanických kovových spínačů,
- senzory analogové se zabudovaným komunikačním rozhraním. Tyto senzory mají lepší funkční parametry.

Typickými příklady použití jsou:

- náhrada mechanických koncových spínačů,
- zpětné hlášení polohy akčního členu (ventilu, pohonu),
- počítání kusů (například balíky na pásovém dopravníku),
- regulační úlohy (regulace polohy nebo rychlosti),
- kontrola správného umístění plechovky na dopravníkovém pásu. Úkolem je zjistit polohu ocelových a hliníkových plechovek na výrobní lince kvůli označení plechovky datem.



Obr. 24 Příklad provedení indukčního senzoru.

c) Kapacitní senzory

Kapacitní senzory přiblížení pracují právě tak, jako indukční senzory bezdotykově s polovodičovým výstupem. S kapacitními senzory lze detekovat nevodivé i vodivé materiály. Většinou se používají jako senzory přiblížení. Nevýhodou těchto senzorů je větší závislost na teplotě a na rušivých vlivech.

Typickými aplikacemi jsou:

- snímání nekovových předmětů,
- hlídání hladin kapalin a sypkých hmot,
- hlídání přetržení vodičů (při výrobě kabelů),
- hlídání přítomnosti malých kovových předmětů,
- hlídání úniku kapalin (ekologie), hlídání netěsnosti na mechanických spojích. Úkolem je zajistit detekci úniku ekologicky škodlivé kapaliny.



Obr. 25 Kapacitní senzor pro detekci hladiny.

d) Magnetické senzory

Magnetické senzory jsou založeny na principech známých z měření magnetického pole. Zdrojem magnetického pole bývá trvalý magnet, který je umístěn na snímaném předmětu. Méně častý případ je, že magnet je součástí senzoru (pod čelní plochou). Snímaný předmět musí být potom feromagnetický.

Magnetické senzory lze rozdělit z hlediska principu využití fyzikálního jevu na:

- senzory s Hallovou sondou,
- magnetorezistivní sondy,
- senzory s nasycovaným jádrem cívky.

Nejčastější aplikace jsou:

- snímání poloh pneumatických válců,
- snímání hladin kapalin a sypkých materiálů (magnet je v plováku),
- jednoduché identifikační systémy v budovách,
- hlídání dolní a horní meze agresivní kapaliny. Úkolem je přes stěnu plastové nádoby hlídat výšku hladiny agresivní kapaliny. Je použit plastový plovák s feritovým magnetem. Plovák je umístěn do plastové trubky s dostatečnou stranovou vůlí. Trubka je připevněna ke stěně. Držák trubky je zároveň horní a dolní doraz.



Obr. 26 Bezdrátový magnetický senzor na okno/dveře.

e) Optické senzory

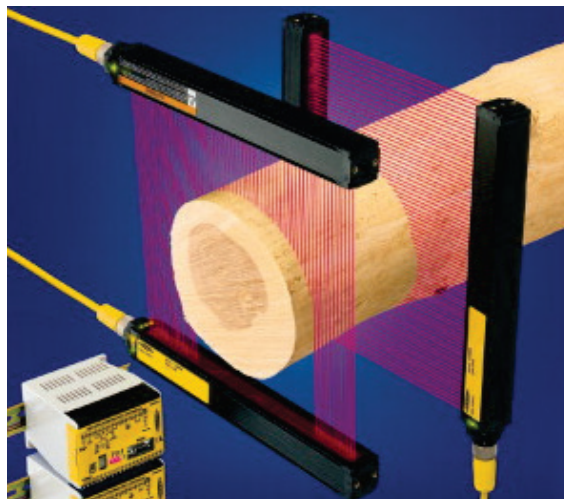
Optické senzory, nazývané přesněji optoelektronické nebo fotoelektronické představují z pohledu funkčního rozsahu nejvíce používané senzory v průmyslové automatizaci. Jedním z důvodů rostoucího zájmu o optosenzory jsou stále menší rozměry a stále stoupající výkonnost. Používají se především tam, kde je požadována větší spínací vzdálenost. Jejich



výhodou je zejména necitlivost vůči rušivým elektromagnetickým polím a hluku. Nevýhodou je menší odolnost vůči vlhkosti, silnému znečištění a infrazáření.

Optosenzory lze rozdělit do tří základních skupin:

- reflexní senzory,
- reflexní senzory s odrazkou neboli reflexní závory,
- senzory, obsahující oddělený vysílač a přijímač neboli jednocestné závory.



Obr. 27 Měření rozměrů výrobku během výroby pomocí optického senzoru, tzv. světelného závěsu.

Typickými aplikacemi optických senzorů jsou:

- dopravníkové úlohy (detekce přítomnosti materiálu, detekce značek, kontrola plnění/obsahu, kontrola polohy/velikosti atd.),
- hlídání hladin,
- hlídání rozměrů na velké vzdálenosti,
- inspekční úlohy s rozlišením barvy,
- měření rozměrů výrobku během výroby (viz obr. 27),
- zjišťování přítomnosti pečiva na výrobní lince. Úkolem je zjišťovat přítomnost pečiva v několika řadách.



Obr. 28 Příklad provedení optosenzoru.

f) Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory využívají ke své činnosti akustické vlny ve frekvenčním rozsahu nad hranicí lidské slyšitelnosti, maximálně 1 GHz. Zvuk vzniká chvěním hmoty, která toto chvění předává hmotným částicím prostředí, např. vzduchu. Zvukové vlny se mohou šířit jen hmotou. Rychlost šíření zvuku nezávisí na kmitočtu.

V ultrazvukové sensorové technice má zásadní význam zvukové pole, prezentované pro každý senzor jeho směrovou vyzařovací charakteristikou. Vyzařovací charakteristika se počítá pomocí složitých, časově náročných výpočtů pomocí výkonných počítačů.



Pomocí ultrazvukových senzorů lze zjišťovat:

- vzdálenost mezi dvěma místy. Tyto senzory pracují na principu měření času odezvy (echa) pomocí reflexního nebo difuzního snímání. Jestliže se pro vyslání a příjem používá jediný měnič, je tento systém označován jako jednoduchý. Toto provedení je nejčastější.
- výskyt osob v prostoru pomocí prostorového hlídání. Pro použití ultrazvukových snímačů při prostorovém hlídání se využívá tzv. reflexní závora, kdy je vysílač i přijímač v jednom pouzdru a odraz zajišťuje reflektor. V prostorovém hlídání lze použít také jednocestnou závoru, u které jsou přijímač a vysílač v samostatných pouzdrech a jsou umístěny proti sobě.



Obr. 29 Způsob provedení ultrazvukového senzoru.

6.6 LITERATURA

Smejkal J, Elektrotechnika, VUT Brno,

Bičovská B., Elektrická měření, VŠB TU Ostrava,

TKOTZ K., Příručka pro elektrotechnika : Europa - Sobotáles cz. s.r.o.,

Martinek R., Senzory v průmyslové praxi, BEN

Internet

Katalog firmy Turck

<http://pdb.turck.de/catalogue/>

Katalog firmy Balluff

<http://www.balluff.cz/>

Ultrazvukový senzor fy Pepperl+Fuchs Group

<http://www.panelovameridla.cz/>

Optosenzory

<http://www.camiscomponents.com/>

Kapacitní senzory

<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1700>

Indukční snímač

<http://www.cncshop.cz/lm8-indukcni-snimac-m8x1>

Měřicí transformátory proudu

<http://www.mtbrno.cz/index.php?l=cs&k=produkty>

Bezdotykové měření proudu

<http://cz.farnell.com/lem/>

Piezoelektrický snímač

http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/sila/sila_piezoelektricke_snimace.htm

Indukční elektroměry

<http://www.dk-elvis.eu/elektromery/trifazovy-repasovany-elektromer-na-podruzne-mereni/>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Základy polovodičové techniky

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

7	ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ	3
7.1	Úvod	5
7.2	Funkce a vlastnosti polovodičových prvků.....	5
7.3	Polovodičové diody.....	6
7.3.1	Usměrňovací diody	6
7.3.2	Zenerovy diody	8
7.3.3	Kapacitní diody - Varikapy	9
7.3.4	Fotodiody a svítivé diody	10
7.4	Tyristory	12
7.5	Triaky.....	13
7.6	Tranzistory	15
7.6.1	Bipolární tranzistor	15
7.6.2	Unipolární tranzistor.....	20
7.7	Literatura.....	25



7 ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Funkce a vlastnosti polovodičových prvků

Polovodičové diody

Tyristory

Triaky

Tranzistory

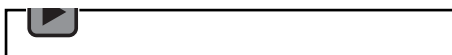


MOTIVACE:

Polovodičové prvky, mezi které například patří diody, tyristory, triaky a tranzistory, nahradily díky svým přednostem dříve používané elektronky. Mezi hlavní předností těchto součástek patří nižší spotřeba energie, vyšší spolehlivost, životnost, odolnost a především menší rozměry. Pro výrobu polovodičových prvků se používají především materiály, jakou jsou germanium a křemík, dále také selen a telur. Pro charakteristické polovodičové vlastnosti se v posledních desetiletích značně rozvinula výroba germania a čistého křemíku. V dnešní době jsou polovodičové prvky nedílnou součástí všech moderních přístrojů a zařízení.



Audio7.1 Motivace



CÍL:

Rozdíl mezi vodičem, polovodičem a izolantem.

Jaké jsou typické materiály pro výrobu polovodičových součástek?

Vlastní a nevlastní vodivost polovodičů.

Vodivost typu N a vodivost typu P.

Druhy polovodičových diod, jejich vlastnosti a skutečná Voltampérová charakteristika.

Princip funkce tyristoru, jeho schematická značka a použití v praxi.

Princip funkce triaku, jeho schematická značka a použití v praxi.



Zapojení bipolárního tranzistoru se společným emitorem, se společným kolektorem a se společnou bází. Vstupní a výstupní odpor a vstupní a výstupní proud těchto zapojení.

Princi funkce unipolárního tranzistoru JFET a MOSFET, základní zapojení.



7.1 ÚVOD

Polovodičová technika se začala intenzivně rozvíjet jako samostatný obor od roku 1949 a pronikla do všech oblastí elektrotechniky. Polovodičové prvky, díky svým přednostem (nižší spotřeba energie, vyšší spolehlivost, životnost, odolnost, menší rozměry) nahradily dříve používané elektronky. Jediným dosud běžně přežívajícím druhem elektronek jsou obrazovky. V následujícím textu bude uveden princip polovodičového jevu, konstrukce základních polovodičových součástek a jejich využití zejména v silnoproudé elektrotechnice.

Kromě diskretních polovodičových součástek, mezi které patří například diody, tranzistory, tyristory a triaky, jsou od sedmdesátých let 20. století stále významnější takzvané integrované obvody. Integrovaný obvod je součástka, která má v sobě umístěn celý obvod sestávající se z několika desítek, ale také několika milionů součástek (tranzistorů, diod a rezistorů), velmi malých rozměrů. Použití integrovaných obvodů přineslo další miniaturizaci, zlevnění a zvýšení spolehlivosti elektronických zařízení.

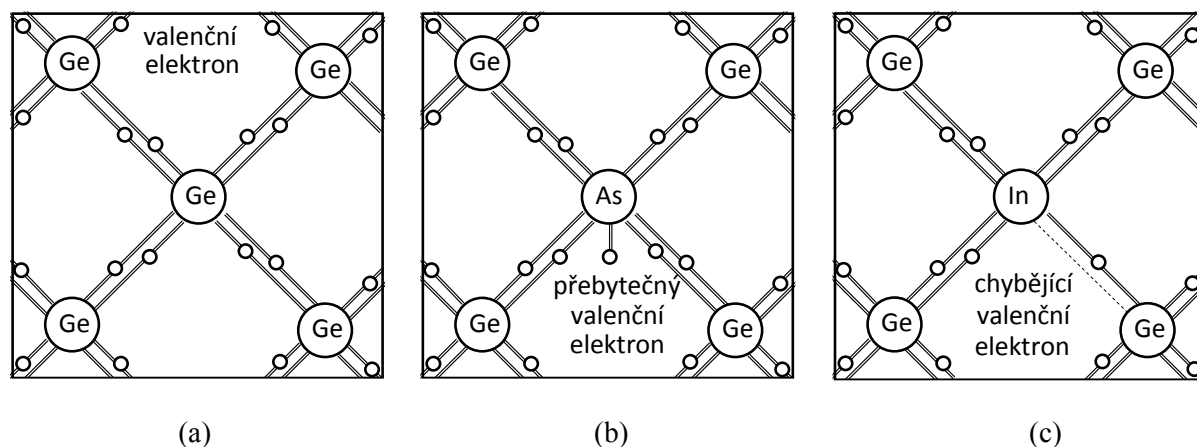
7.2 FUNKCE A VLASTNOSTI POLOVODIČOVÝCH PRVKŮ

Funkce a vlastnosti polovodičových prvků jsou dány vlastnostmi látek zvaných polovodiče. Rozdíl mezi vodičem, polovodičem a izolantem spočívá v pevnosti vazby valenčních elektronů na jádra atomů. U vodičů je tato vazba velmi slabá a po připojení elektrického napětí se volné elektrony pohybují ve směru elektrického pole, což znamená, že elektrický odpor vodičů je malý. U polovodičů a izolantů je vazba valenčních elektronů s jádrem natolik silná, že za normálních podmínek se tyto elektrony neuvolní, a proto po přiložení elektrického napětí proud neteče. Situace se změní, dodává-li se elektronům energie prostřednictvím tepla nebo jiného záření. Zvyšuje-li se například teplota polovodiče nebo izolantu, odtrhnou se některé valenční elektrony od jádra atomu a zvýší tím vodivost materiálu. Rozdíl mezi polovodičem a izolantem se udává poměrem jejich vodivostí za pokojové teploty. Elektrická vodivost izolantů je asi 10^{15} krát menší než vodivost polovodičů.

Typickými polovodivými materiály je germanium a křemík. Atom těchto prvků má čtyři valenční elektrony, takže každý atom je se sousedním atomem spojen čtyřmi vazbami. Pokud se zvýší jeho teplota, vznikne pár, který představuje volný elektron a díru. Dírou je nazvána mezera ve struktuře po uvolnění elektronu. Tato dvojice se potom může vlivem vnějšího elektrického pole pohybovat a vzniká vodivost zvaná vlastní vodivost polovodičů. Tato vodivost je silně závislá na teplotě materiálu.

Druhým typem vodivosti je vodivost nevlastní – příměsová. Vznikne tím, že do čistého čtyřmocného křemíku je přimícháno určité množství pětímocného nebo třímocného prvku (As, In). U každého atomu pětímocného prvku zůstane jeden přebytečný volný elektron a vzniklá vodivost je vodivost typu N (negativní). Naopak u trojmocné příměsi bude jeden valenční elektron chybět, vznikne „díra“ a tím vodivost typu P (pozitivní). Takto vzniklý volný elektron i díra jsou snadno pohyblivé a výrazně zvyšují vodivost materiálu, viz Obr. 2.1.





Obr. 2.1 Typy vodivosti v polovodiči: (a) vlastní, (b) příměsová N, (c) příměsová P

Spojí-li se dva polovodiče různých typů tak, že jejich krystalové mřížky těsně na sebe navazují, vzniká na styku obou polovodičů tzv. **přechod PN**. Pokud je vnější přiložené napětí orientováno tak, že na části N je záporný pól zdroje, je přechod polarizován v propustném směru. Při opačné orientaci vnějšího napětí je přechod polarizován v závěrném směru. V závěrném směru teče přechodem jen velmi malý proud, nazývaný zbytkový, jenž je způsobený především nedostatečně čistou výrobou.

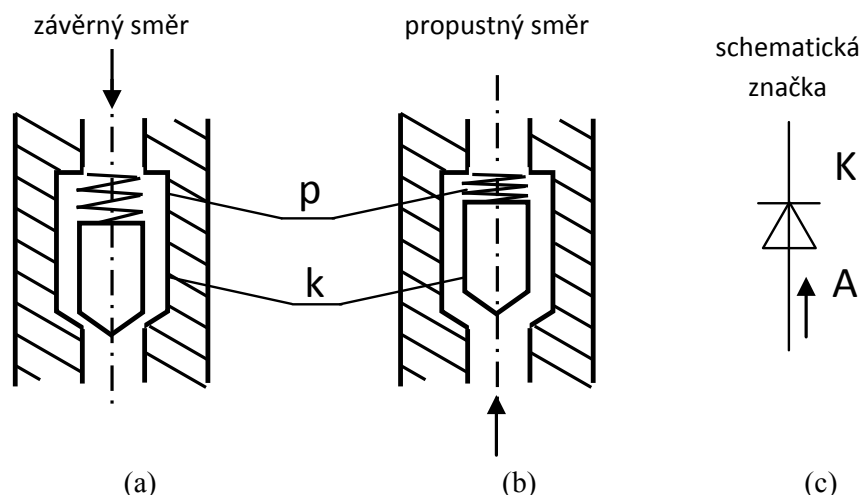
7.3 POLOVODIČOVÉ DIODY

Polovodičové diody jsou prvky, které využívají vlastností polovodičového přechodu PN. Jejich nejzákladnější vlastnost je, že vedou proud pouze v jednom směru. Podle oblasti použití je můžeme rozdělit do několika základních skupin:

- Usměrňovací diody
- Zenerovy diody
- Tunelové diody
- Schottkyho diody
- Varikapy
- Světelné diody a fotodiody

7.3.1 Usměrňovací diody

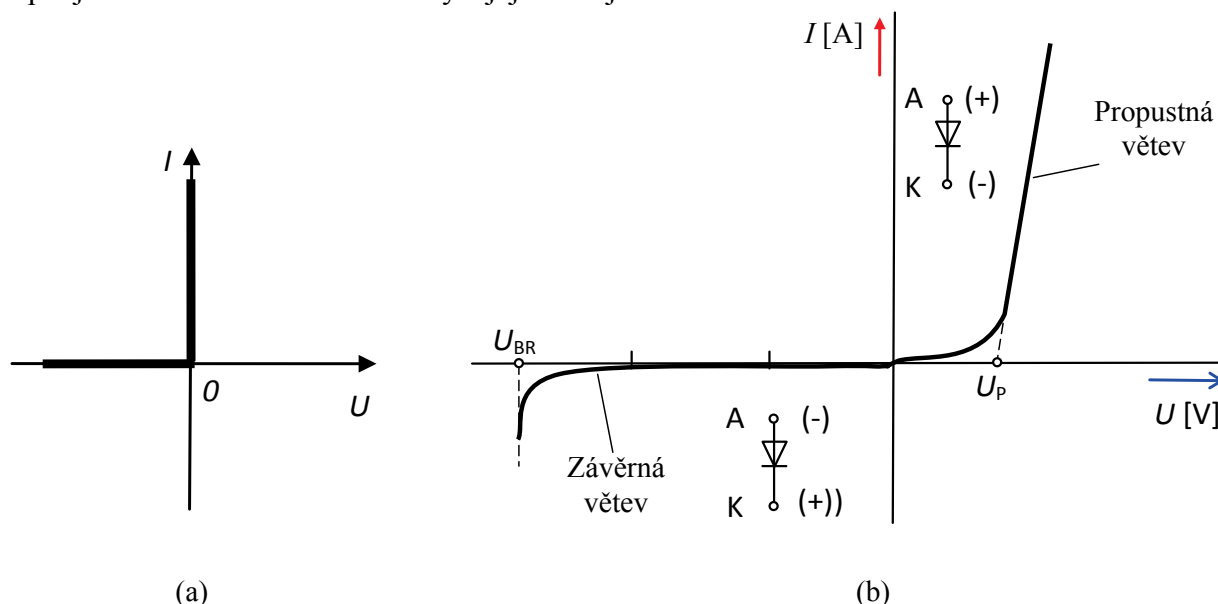
Usměrňovací diody tvoří nejpočetnější skupinu diod využívající usměrňovacích účinků PN přechodů k usměrňování střídavých proudů. Schematická značka diody je na Obr. 3.1 (c). Dioda má dvě elektrody, anodu A a katodu K. Vede proud pouze jedním směrem, a to od elektrody označené písmenem A k elektrodě K. Pokud je anoda kladnější než katoda, je dioda zapojena v propustném směru a diodou teče proud. V opačném případě, pokud na katodě je kladnější napětí než na anodě, je dioda orientována v záměrném směru a proud diodou neteče. Hydraulickou analogii diody je zpětný ventil, viz Obr. 3.1 (a) a (b). Jedná se o ventil, jehož kuželka „k“ je přitlačována pružinou „p“. Působí-li tlak ve směru šipky, kuželka dosedá do sedla a kapalina neproudí. V opačném případě bude kuželka nadzvedávána proti síle pružiny ze sedla a kapalina bude ventilem proudit.



Obr. 3.1 Hydraulická analogie diody: (a) závěrný směr, (b) propustný směr, (c) schematická značka

Ideální dioda má v propustním směru nulový odpor a v závěrném směru nulovou vodivost. Vlastnosti diody popisuje její voltampérová charakteristika, viz Obr. 3.2 (a). Je to závislost velikosti proudu diodou na velikosti napětí mezi anodou a katodou. V-A charakteristika popisuje základní statické vlastnosti diody. Její tvar, jenž je znázorněn na Obr. 3.2 (b), lze získat měřením pomocí zapojení na Obr. 3.3.

Při zvyšování napětí v propustném směru roste proud diodou pozvolna až do hodnoty prahového napětí U_p . U germania je jeho hodnota přibližně 0,4 V, u křemíku kolem 0,6 V. Při dalším zvyšování proud diodou poroste daleko rychleji. V závěrném směru je proud velmi malý, a to až do vysokých hodnot závěrného napětí U_{BR} . Při hodnotě U_{BR} , nazývané průrazné napětí (breaking), se velikost proudu začne prudce zvyšovat. Tuto hodnotu by napětí v závěrném směru nemělo překročit, protože dochází k průrazu diody, a tím k jejímu zničení. Hodnota průrazného napětí je jedním z omezujících faktorů a udává, jak velká napětí může dioda usměrňovat. Druhým omezujícím faktorem je velikost proudu v propustném směru. Při průchodu proudu diodou vznikají tepelné ztráty a teplo je nutno odvádět. Schopnost odvodu tepla je závislá na konstrukci diody a jejím vnějším chlazení.



Obr. 3.2 Voltampérová charakteristika diody: (a) ideální, (b) skutečná

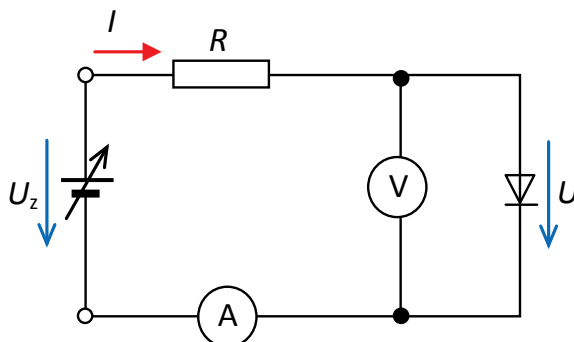
Podle provedení PN přechodu dělíme diody na hrotové a plošné.



U hrotových diod je PN přechod vytvořen na styku destičky polovodiče s hrotem wolframového drátku. Používají se pro usměrňování malých proudů až do vysokých kmitočtů.

U plošných diod je přechod vytvořen na daleko větší ploše, například difuzí par příměsí prvků do základní polovodičové destičky. Plošné diody se využívají pro usměrňování větších proudů. Jejich použití je omezeno na nižší kmitočty.

K ochraně před vlivy okolí je vlastní přechod zapouzdřen do skleněných, kovových nebo plastových pouzder. Pouzdra výkonových diod jsou konstruována tak, aby je bylo možno upevnit na vnější chladič. V současné době se rovněž pouzdra vyrábí tak, aby bylo možné do jednoho pouzdra umístit několik vzájemně propojených diod. Vytvoří se tak integrovaný celek, např. usměrňovač. Usměrňovací diody se vyrábějí pro proudy až do velikosti kA a napětí do kV v závěrném směru.

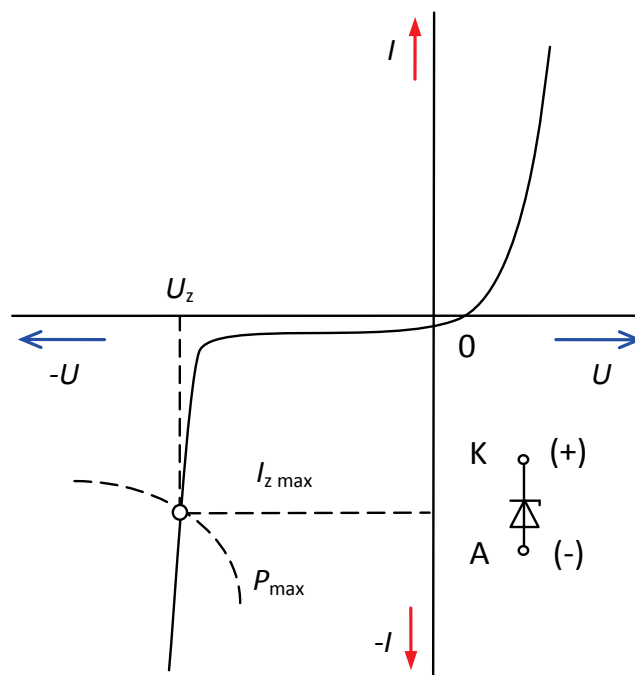


Obr. 3.3 Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky diody

7.3.2 Zenerovy diody

Vhodnou technologií výroby přechodu PN lze u charakteristiky křemíkové plošné diody dosáhnout v závěrné oblasti strmého zlomu (nedestruktivního průrazu). Závěrný proud se po překročení napětí U_z (tzv. Zenerova napětí) rychle lineárně zvyšuje, jak je vidět na Obr. 3.4. Velikost Zenerova napětí je závislá na měrném odporu výchozího polovodičového materiálu. Zenerova dioda se používá v obvodech stabilizátorů a omezovačů napětí. Při provozu se nesmí překročit maximální proud $I_{z\max}$, který je pro daný typ určen maximální výkonovou ztrátou $P_{\max}$. Vyrábějí se diody pro $P_{\max}$ od 0,1 do 10 W. Důležitým parametrem diod je diferenciální odpor $R_d = \Delta u / \Delta i$, který určuje účinnost stabilizace.



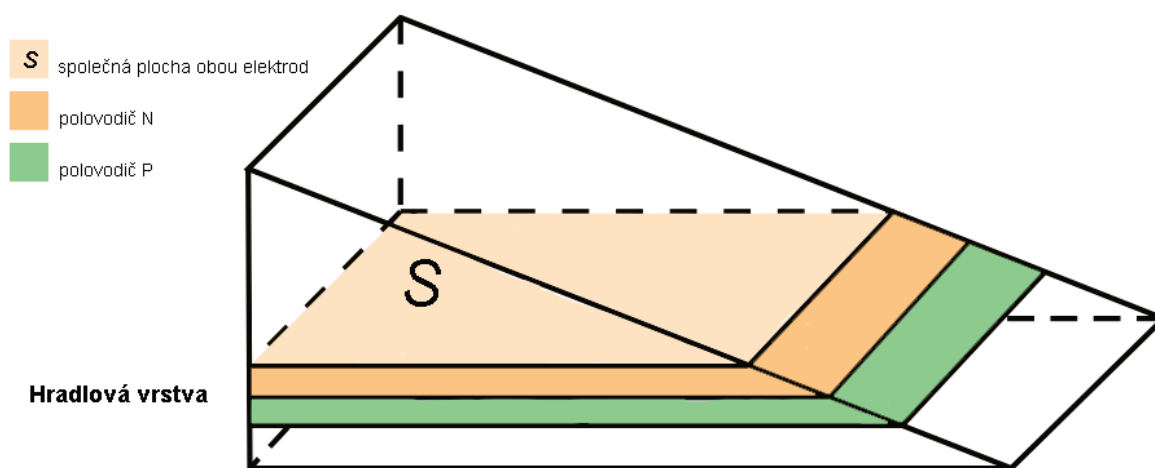


Obr. 3.4 Voltampérová charakteristika Zenerovy

7.3.3 Kapacitní diody - Varikapy

Varikap je speciální plošná polovodičová dioda sloužící jako napětím řízený kondenzátor. Jsou vyráběné z křemíku nebo z arzenidu galia technologickým postupem, který je určen požadovanou závislostí kapacity diody na přiloženém napětí. Průběhy závislosti koncentrace příměsí na vzdálenosti od přechodu mohou mít kapacitní diody pro různé účely buď lineární závislost kapacity na napětí, nebo závislost nelineární.

Kapacitní dioda je zapojena v závěrném směru. Se zvyšujícím se napětím se zvětšuje vzdálenost mezi oběma vodivostmi (potenciálová bariéra) a tím dochází ke snižování kapacity varikapu. Napětí pro ovládání se pohybuje v rozmezí 0 – 30 V. Pro své malé geometrické rozměry, malou hmotnost a snadné ovládání jsou varikapy používány v laděných rezonančních obvodech jako náhrada za proměnné kondenzátory, například se používá jako ladicích prvků pro automatické doladování obvodů rozhlasových a televizních přijímačů. Geometrická úprava PN přechodu kapacitní diody je zobrazena na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Geometrická úprava PN přechodu kapacitní diody

7.3.4 Fotodiody a svítivé diody

Máme-li konstruován PN přechod tak, že na něj může dopadat světlo, můžeme takto konstruovanou diodu využít jako fotocitlivý prvek. Abychom si kvalitativně vysvětlili fyzikální princip tohoto efektu, vraťme se k vlastnímu polovodiči. Pokud jej neozařujeme, je excitace elektronů z valenčního do vodivostního pásu způsobena výhradně tepelnou energií. Do vodivostního pásu mohou být excitovány elektrony z vysokoenergetického "chvostu" rozdělovací funkce. Uvažujeme-li ozáření, může excitace elektronu z valenčního do vodivostního pásu proběhnout i tak, že elektron ve valenčním pásu absorbuje foton dopadajícího záření, který mu předá energii dostatečnou k překonání zakázaného pásu. Při ozáření polovodiče zvýšíme tedy jeho vlastní vodivost tím, že zvýšíme koncentraci elektronů ve vodivostním a koncentraci děr ve valenčním pásu. Tomuto jevu se říká vnitřní fotoefekt, neboť elektrony excitované do vodivostního pásu neopouštějí polovodič (na rozdíl od vnějšího fotoefektu, kdy dopadající foton dodá elektronu energii dostatečnou k překonání tzv. výstupní práce a elektron opustí látku a přejde do vakua látku obklopující). Tento efekt je výrazný u polovodičů, jejichž vlastní vodivost je pro značnou šířku zakázaného pásu velmi malá, např. CdS se šířkou zakázaného pásu 2,45 eV. Na vnitřním fotoefektu je založena funkce fotoodporů, které jsou součástí měřičů expozice u řady fotografických přístrojů. Důležité je si uvědomit, že ozářením se zvyšuje vlastní vodivost polovodiče, tedy koncentrace nosičů obou polarit a tedy po přimíchání příměsí se bude ozářením zvyšovat koncentrace minoritních nosičů.

Fotodioda je polovodičová, nejčastěji křemíková, dioda s přechodem PN zapouzdřená tak, aby na přechod mohlo dopadat světlo. Fotodioda má okénko nebo plastickou čočku, která soustřeďuje světlo do oblasti přechodu PN. Dioda je zapojená v závěrném směru s takovým napětím, aby nedošlo k průrazu lavinovým nebo Zenerovým efektem. Není-li tedy přechod PN ozářen, teče diodou jen velmi malý závěrný proud, u křemíkových diod se jedná o proudy v řádu desítek nA. Jedná se o proud tvořený minoritními nosiči, tedy nosiči, které vznikly termickou excitací elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Tento proud je přímo úměrný koncentraci minoritních nosičů. Ozáříme-li nyní přechod PN, vytvoříme dodatečnou koncentraci minoritních nosičů, které budou přispívat ke zvýšení proudu fotodiodou v závěrném směru - proud fotodiodou se zvýší a zvýšení bude závislé na intenzitě dopadajícího záření. Je-li v sérii s fotodiodou zapojen odpor, dojde na něm k úbytku napětí průchodem proudu a tento úbytek můžeme využít ke měření intenzity záření.

Typickým příkladem aplikace fotodiody byly čtečky děrné pásy, kde pod každou pozici možného otvoru v děrné pásce byla umístěna fotodioda, indikující přítomnost otvoru v pásce. Řadu aplikací fotodiody dnes převzaly fototranzistory.

Nezaměnitelné místo mají speciální fotodiody, kterých se používá ke konverzi energie záření na energii elektrickou. Fyzikální princip funkce nejlépe vysvětlíme, představíme-li si fotodiodu nezapojenou do obvodu. Není-li ozářena, je vytvořena PN přechodem difuzní potenciálová bariéra vysoká tak, aby omezila proud majoritních nosičů na právě takovou velikost, aby proud majoritních nosičů každé polarit přes přechod PN byl právě kompenzován proudem minoritních nosičů stejné polarit přes přechod opačným směrem. Ozáříme-li nyní fotodiodu, zvýšíme koncentraci minoritních nosičů v polovodičích obou typů vodivosti a v důsledku toho stoupne proud minoritních nosičů přes PN přechod. Vzhledem k tomu, že jsme předpokládali diodu nezapojenou do obvodu, musí být celkový proud přes přechod roven nule právě tak jako v případě bez ozáření. To je možné jenom tak, že klesne potenciálová bariéra v blízkosti přechodu PN a umožní tak zvýšení proudu majoritních nosičů přes přechod. Krystal však tak přestává být v rovnováze, fermiho hladina se deformuje, a rozdíl mezi původní velikostí difuzního potenciálu a velikostí této bariéry po ozáření se objeví na svorkách diody jako napětí; na anodě fotodiody bude kladný pól a na katodě záporný pól.

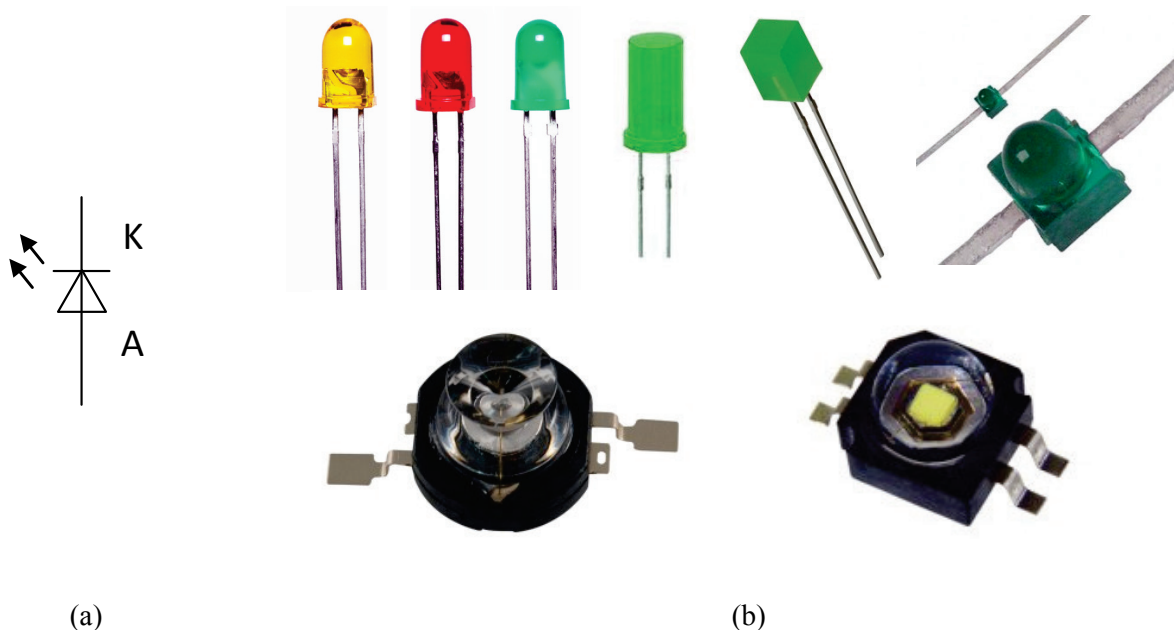


Uzavřeme-li nyní elektrický obvod tím, že k fotodiodě připojíme rezistor jako spotřebič, bude obvodem protékat elektrický proud - fotodioda bude fungovat jako sluneční článek.

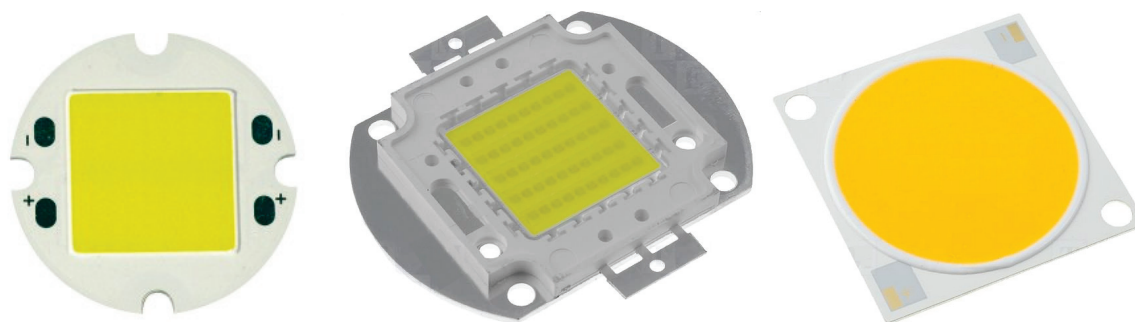
LED dioda je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod PN. Na rozdíl od klasických diod, LED vyzařuje viditelné světlo, infra případně UV v úzkém spektru barev a používá se v široké řadě aplikací. Na Obr. 3.6 (a) je uvedena schematická značka LED diody. Obr. 3.6 (b) a Obr. 3.7 ukazují několik z mnoha typů LED pouzder.

Prochází-li přechodem elektrický proud v propustném směru, přechod vyzařuje (emituje) nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Může emitovat i jiné druhy záření. Tento jev je způsoben elektroluminiscencí.

Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. LED jsou vyráběny s pásmy vyzařování od ultrafialových, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo. Poměrně dlouho trval vývoj modré LED, na nějž čekal jeden z projektů ploché barevné televizní obrazovky.



Obr. 3.6 LED: (a) Schematická značka, (b) Různé typy LED pouzder



Obr. 3.7 Různé typy pouzder výkonových LED diod

Z principu funkce LED vyplývá, že nelze přímo emitovat bílé světlo - starší bílé zářivé diody většinou obsahují trojici čipů vybíraných tak, aby bylo aditivním mísením v rozptýlném materiálu vrchlíku obalu diody dosaženo vjemu bílého světla. Protože není možné přímo emitovat bílé světlo, pravé bílé LED využívají luminoforu. Některé bílé LED emitují modré světlo, část tohoto světla je přímo na čipu luminoforem transformována na žluté světlo a díky mísení těchto barev vzniká bílá. Jiné typy bílých LED emitují ultrafialové záření, to je přímo na čipu luminoforem transformováno na bílé světlo. Se zkracující se vlnovou délkou



emitovaného světla roste velikost potřebného elektrického proudu a z toho vyplývajícího napětí. U křemíkové diody je toto napětí asi 0,6 V, u zelené LED z GaP 1,7 V a u modré z SiC již 2,5 V. Základní monokrystaly diod bývají překryty kulovými vrchlíky z epoxidové pryskyřice nebo akrylového polyesteru. Materiály, z nichž se LED vyrábějí, totiž mají poměrně vysoký index lomu a velká část vyzařovaného světla by se odrazela totálním odrazem zpět na rovinném rozhraní se vzduchem.

Oproti jiným elektrickým zdrojům světla (žárovka, výbojka, doutnavka) mají LED tu výhodu, že pracují s poměrně malými hodnotami proudu a napětí. Z toho vyplývá jejich užití v displejích (ve tvaru cifer a písmen). Kombinací LED základních barev (červená, zelená, modrá) je možno získat i barevné obrazovky.

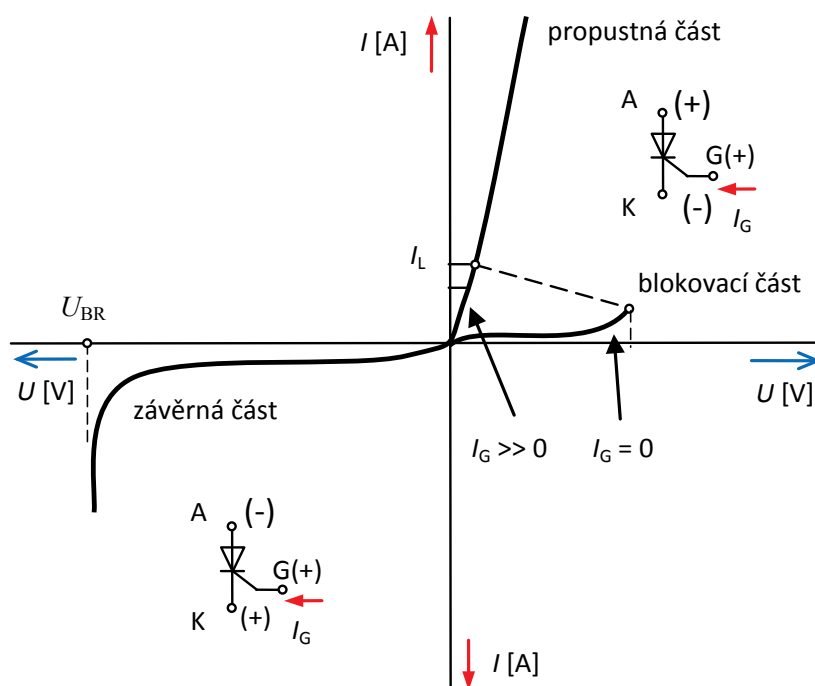
Konstrukčně představují LED součástku, v níž je kontaktovaný čip (nebo kombinace čipů) zastříknut materiálem s požadovanými optickými vlastnostmi (LED se vyrábějí v bodovém či rozptýlném provedení, s různým vyzařovacím úhlem). Kontakty mohou být v provedení pro povrchovou montáž (SMD) nebo ve tvaru ohebných či poddajných přívodů. Sestavy více LED, pouzdřené společně mohou mít samostatně vyveden každý čip, společnou anodu či katodu nebo jiný systém kontaktování dle zamýšleného užití (například dvojbarevné diody).

7.4 TYRISTORY

Tyristor je čtyřvrstvý polovodičový prvek, který mimo hlavních elektrod (katody a anody) má ještě další, řídicí elektrodu (G). Z hlediska funkce je tyristor řízená usměrňovací dioda a může pracovat jako spínač. Tyristor lze sepnout proudovým impulzem aplikovaným do řídicí elektrody G a vypne se přerušením proudu mezi anodou a katodou (běžný tyristor se nedokáže vypnout sám, vypne se až po přerušení proudu).

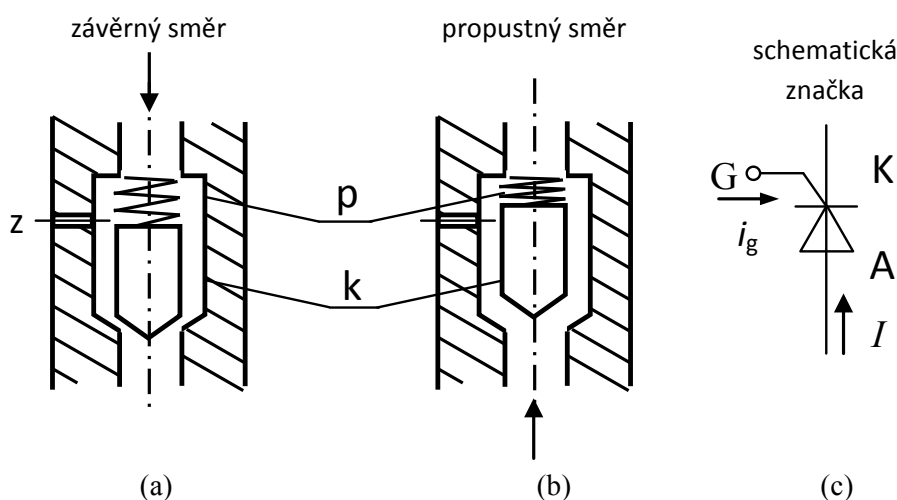
Vlastnosti tyristoru popisuje Voltampérová charakteristika, která je uvedena na Obr. 4.1. Charakteristiku je možno rozdělit na tři části: závěrnou, blokovací a propustnou. Vlastnosti tyristoru v oblasti závěrné části jsou víceméně shodné se závěrnou oblastí diody. Tyristorem protéká jen malý proud, a to až do průrazné hodnoty závěrného napětí U_{BR} . Průběh proudu mezi anodou a katodou v blokovací části charakteristiky je závislý na velikosti proudu řídicí elektrodou I_G . Je-li $I_G = 0$, dochází se zvyšováním napětí na tyristoru k pomalému nárůstu proudu mezi anodou a katodou, prakticky je tyristor uzavřený. Při překročení určitého napětí mezi anodou a katodou (řádově stovky až tisíce V) by došlo k nežádoucímu samovolnému sepnutí tyristoru - vyznačeno na Obr. 4.1 čárkovaně, pracovní bod přejde skokem propustnou část charakteristiky. Tento děj nesmí v praxi nastat. Propustná část charakteristiky tyristoru je shodná s průběhem charakteristiky usměrňovací diody. Tyristor je sepnut dostatečně velkým proudem I_G (řádově stovky mA). Od okamžiku sepnutí nemá proud řídicí elektrodou na činnost tyristoru již žádný vliv. Z tohoto důvodu není nutné dodávat proud do řídicí elektrody tyristoru po celou dobu, ale pouze jen po dobu, při které dojde k jeho bezpečnému sepnutí. Tyristor se uzavírá jen v případě, když proud mezi anodou a katodou poklesne pod hodnotu vratného proudu I_H , jehož hodnota se v praxi pokládá za velmi blízkou nule.





Obr. 4.1 Voltampérová charakteristika tyristoru

Funkci tyristoru lze objasnit na jeho hydraulické analogii zobrazené na Obr. 4.2 (a) a (b). Podobně jako u diody jde o zpětný ventil, který je doplněn blokovací západkou označenou z. Pokud je západka vysunuta, chová se ventil jako zpětný, tzn., že v jednom směru propouští a v druhém je uzavřen. Pokud se západka zasune nad kuželku ventilu, a to je možné jen při uzavřeném ventilu, pak bude ventil uzavřen bez ohledu na směr působení tlaku.

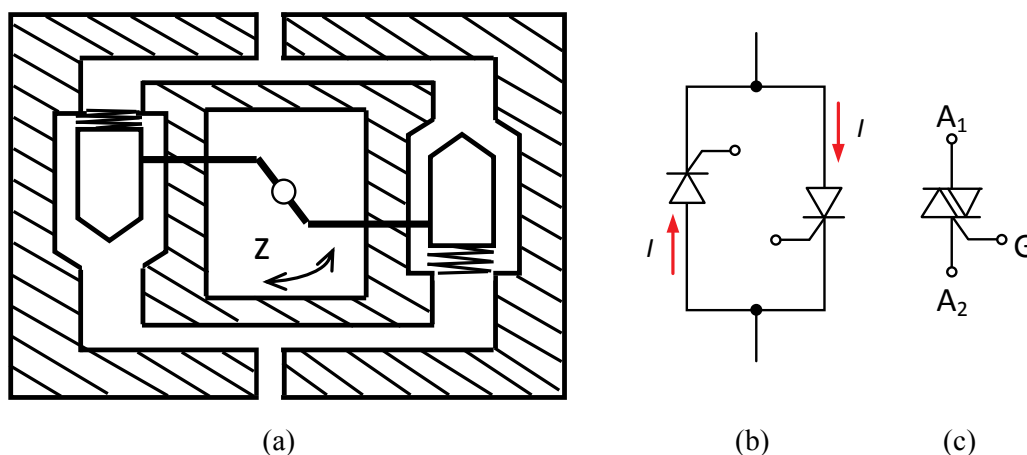


Obr. 4.2 Hydraulická analogie tyristoru: (a) závěrný směr, (b) propustný směr, (c) schematická značka

7.5 TRIAKY

Podstatnou nevýhodou tyristoru je jeho schopnost vést proud pouze jedním směrem. Proto byl vyvinut další polovodičový prvek triak. Je to pětivrstvý bistabilní spínací prvek schopný vést elektrický proud oběma směry. Triak má vlastnosti přibližně odpovídající vlastnostem dvou antiparalelně zapojených tyristorů, jak uvádí Obr. 5.1 (b). Řídící elektrody jsou vhodně propojeny, tak aby tvořily pouze jedinou řídící elektrodu triaku.



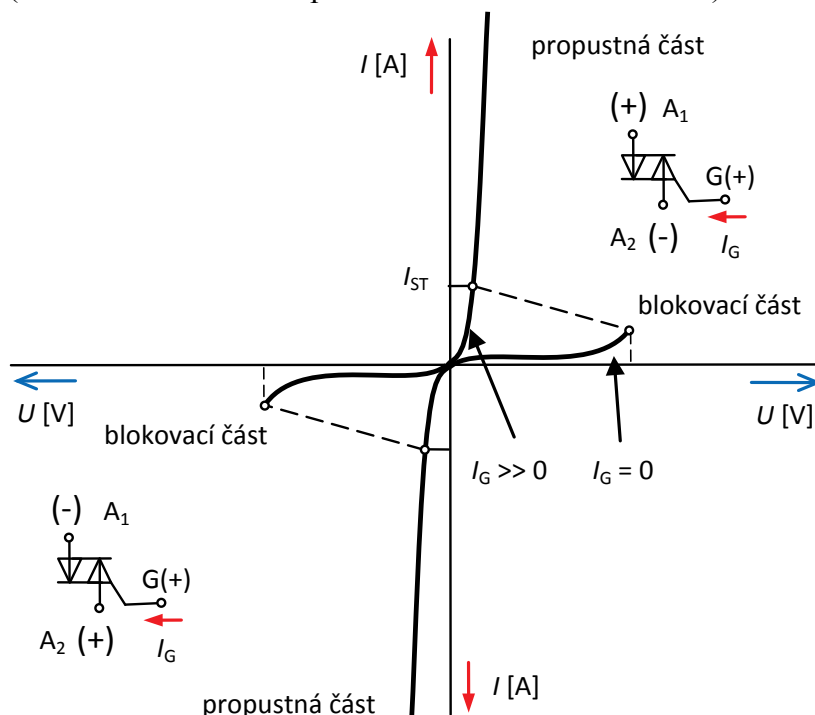


Obr. 5.1 Analogie triaku: a) hydraulická, b) pomocí dvou tyristorů, c) schematická značka

Vlastnosti triaku popisuje voltampérová charakteristika zobrazena na Obr. 5.2. V prvním i třetím kvadrantu se nachází blokovácí a propustná část charakteristiky tyristoru.

Vnější funkci triaku lze rozdělit na čtyři části:

- triak sepne, pokud je mezi hlavními elektrodami dostatečně velké napětí a do řídicí elektrody se přivede proudový impuls o velikosti schopné k jeho sepnutí,
- triak vede, pokud proud mezi hlavními elektrodami neklesne pod hodnotu vratného proudu (v okolí nuly),
- triak se uzavře, klesne-li proud pod hodnotu vratného proudu (nezáleží na velikosti proudu I_G),
- triak je uzavřen (rozepnut), pokud jim neteče proud a proud I_G má hodnotu menší než spínací (nezáleží na hodnotě napětí mezi hlavními elektrodami).



Obr. 5.2 Voltampérová charakteristika triaku

Funkci triaku dokresluje jeho hydraulická analogie na Obr. 5.1 (a). Je to antiparalelní (protisměrné) spojení dvou řízených zpětných ventilů, jejichž blokovácí západky jsou spojeny pákou tak, aby byly ovládány současně. Oblasti použití triaků jsou v podstatě shodné s tyristory. Jejich aplikace je v řadě případů jednodušší.



7.6 TRANZISTORY

Tranzistorový jev (efekt) byl objeven a tranzistor vynalezen 16. prosince 1947 v Bellových laboratořích týmem ve složení William Shockley, John Bardeen a Walter Brattain. Za tento objev jim byla roku 1956 udělena Nobelova cena za fyziku, jednalo se o velmi významný objev, který vedl k faktickému vědeckotechnickému převratu v oblasti aplikované elektrotechniky. Tím byl zároveň potvrzen dosavadní stálý trend miniaturizace jednotlivých a později integrovaných součástek, shrnutý Mooreovým zákonem jako v čase konstantní proces koncentrace polovodičových součástek.

Tranzistor je prvek, který může pracovat jako zesilovač nebo spínač. Na rozdíl od tyristoru, který zůstane sepnutý i po zániku proudu na řídicí elektrodě (hradlu), je tranzistor sepnutý pouze po dobu, kdy teče do řídicí (báze) elektrody proud.

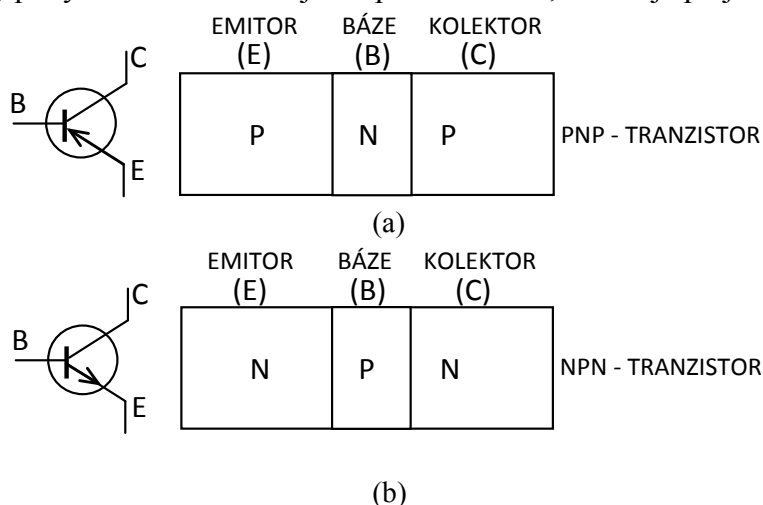
Podle principu funkce dělíme tranzistory na bipolární a unipolární (řízené elektrickým polem).

7.6.1 Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor (dále jen tranzistor) byl objeven v roce 1947 jako výsledek úsilí nahradit vakuové elektronky polovodičovým zesilovacím prvkem.

a) Popis struktury a funkce

Struktura tranzistoru se skládá se tří oblastí typu P a N, jež jsou za sebou řazeny buď ve sledu P–N–P, tj. tranzistor typu PNP, nebo N–P–N, tj. tranzistor typu NPN, jak je naznačeno na Obr. 6.1. Vývody z jednotlivých oblastí se označují jako emitor E, báze B, kolektor C. Emitor vysílá (emituje) pohyblivé nosiče nábojů do prostoru báze, odkud je přejímá (sbírá) kolektor.



Obr. 6.1 Tranzistor: a) PNP, b) NPN

Tranzistor PNP využívá dvou přechodů PN, jeden je mezi emitorem a bází, druhý mezi kolektorem a bází. Tranzistor si lze představit složený ze dvou diod, emitorové a kolektorové, jež jsou zapojeny proti sobě. Přiloží-li se mezi kolektor a emitor napětí, neprochází proud, protože při obou možných polaritách vnějšího napětí je vždy jedna z diod polarizována závěrně. Funkci tranzistoru nelze vysvětlovat pomocí zapojení dvou diod, protože všechny tři oblasti vzájemně spolupracují především díky malé šířce střední oblasti, báze, na kterou se také přikládá vnější napětí.

Je-li napětí vnějšího zdroje U připojeno na tranzistor typu PNP tak, že kladný pól je spojen s emitorem, záporný s kolektorem a část tohoto potenciálního rozdílu je přivedena na bázi, je báze oproti kolektoru kladná a oproti emitoru záporná. Pro typ NPN jsou polarity opačné. Pokud by působilo pouze napětí uvedené polarity mezi emitorem a bází, procházel by

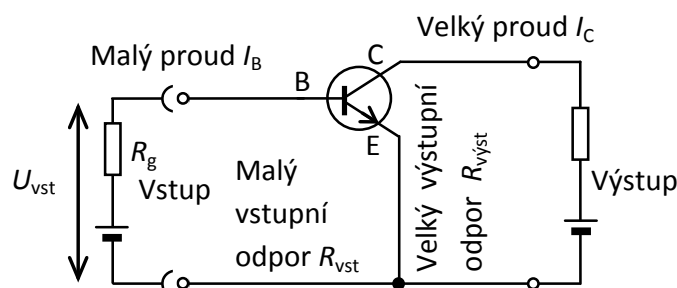
emitorovým přechodem velký proud, protože by se pohyboval značný počet děr z emitoru do báze, popř. velký počet elektronů z báze do emitoru.

Kolektor je však připojen na záporné napětí. Nosiče kladných nábojů (díry) přecházejí vlivem malého napětí mezi emitorem a bází přes první přechod do prostoru báze, odtud jsou však působením značného napětí mezi kolektorem a bází hnány přes druhý přechod a pravou oblast typu P ke kolektorovému vývodu. Proud, vycházející z emitoru, se tedy dělí do dvou složek: první složka směřuje k bázi, druhá ke kolektoru.

Snahou výroby je taková konstrukce tranzistoru, aby co možná největší část emitorového proudu přecházela do kolektoru a jen minimální zbytek do báze. U moderních tranzistorů činí proud báze jen několik setin či tisícín proudu emitoru. Emitorový proud I_E je tedy vždy větší, než kterýkoliv z obou zbývajících proudů a je roven součtu proudu báze I_B a kolektoru I_C .

b) Základní zapojení tranzistoru

Tranzistor má tři vývody: emitor, bázi, kolektor. Je-li zapojen jako zesilovač, musí mít dvě svorky na vstupní straně a dvě na výstupní straně. Každý ze tří vývodů tranzistorů může být vstupem i výstupem zesilovače, a proto existují tři základní zapojení tranzistoru nazývaná zapojení se společným emitorem (Obr. 6.2), se společnou bází, se společným kolektorem. Chování tranzistoru značně závisí na tom, které z uvedených zapojení je použito.



Obr. 6.2 Zapojení tranzistoru se společným emitorem

V technické praxi se nejčastěji vyskytuje zapojení tranzistoru se společným emitorem. Vstupní signál se u něj přivádí mezi bází a emitor, výstupní signál se odebrá v obvodu z kolektoru a emitoru. Protože dioda báze – emitor je polarizována v propustném směru, vstupní odpor tranzistoru R_{vst} je malý. Ve výstupním obvodu je v sérii se zatěžovacím odporem zapojena dioda báze – kolektor, polarizovaná závěrně, takže výstupní odpor $R_{výst}$ je velký.

Tranzistor je polovodičový prvek, který slouží především k zesilování elektrických signálů. Pracuje tak, že malý vstupní proud (proud báze I_B) vyvolá velký výstupní proud kolektoru I_C nebo-li malá změna vstupního proudu vyvolá velkou změnu výstupního proudu. Protože proud báze bývá u moderních tranzistorů 100 až 1000 krát menší než proud emitoru, je stejnosměrný proudový zesilovací činitel takových tranzistorů dán vztahem (1).

$$h_{21E} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1)$$

c) Základní parametry tranzistoru

Jak již bylo uvedeno, proudový zesilovací činitel h_{21E} udává zesilovací schopnost tranzistoru. Pro malé změny proudů je častěji definován jako jejich podíl:

$$h_{21E} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \quad (2)$$

Přípustné výkonové zatížení tranzistoru je omezeno maximální kolektorovou ztrátou,

$$P_{Cmax} = U_{CE} \cdot I_C \quad (3)$$



kteřá je důležitým údajem pro provoz tranzistorů, stejně jako maximální přípustné hodnoty napětí a proudů jednotlivých elektrod. Přípustná kolektorová ztráta je určena konstrukcí a pohybuje se v mezích stovek mW u tranzistorů s malým výkonem a stovek W u výkonových tranzistorů.

Druhým nejpoužívanějším zapojením je zapojení se společným kolektorem, tzv. emitorový sledovač, viz Obr. 6.3 (a). Toto zapojení je typické svým vysokým vstupním odporem, přibližně jednotkovým napětovým zesílením a velkým zesílením proudovým. Používá se především do vstupních dílů zařízení, u kterých vyžadujeme vysoký vstupní odpor.

Vstupní signál přichází do báze a společné elektrody, kterou je kolektor. Výstupní signál se odebírá z emitoru proti kolektoru. Nutno podotknout, že pro praktické použití je takové zapojení značně nepohodlné, a proto je v původní podobě ve schématech asi neuvidíte. Osvědčilo se upravené zapojení, které se navenek dost liší, avšak po elektrické stránce rovnocenné.

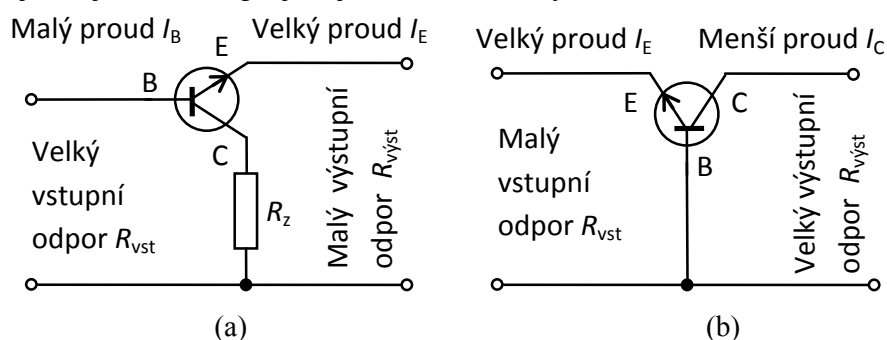
Řídicím proudem je proud báze. Ten jak víme, je mnohonásobně menší než výstupní proud emitoru, proto proudové zesílení je velmi dobré. Horší je to s napětovým zesílením, které je menší než 1, a tak výstupní napětí na emitoru je vždy menší než přiváděné vstupní napětí. Přesto se zapojení se společným kolektorem občas používá z důvodů, že poskytuje jednu neocenitelnou výhodu, a tou je velký vstupní odpor. Z Ohmova zákona můžeme vyjádřit vztah (4).

$$R_{vst} = \frac{U_{vst}}{I_B} \quad (4)$$

Ve jmenovateli je proud I_B vyjádřen číslem mnohem menším než jedna, protože proud báze je nepatrný. Hodnota zlomku je proto velká, vstupní odpor R_{vst} je značně velký. Úplným opakem je hodnota výstupního odporu. Ten je velmi malý. Snadno to pochopíme, uvědomíme-li si, že výstupní napětí je menší než 1 a proud emitoru je přitom značný. Hodnota zlomku rovnice (5) je malá, výstupní odpor je značně malý.

$$R_{výst} = \frac{U_{výst}}{I_E} \quad (5)$$

Zapojením tranzistoru se společným kolektorem používáme tehdy, jestliže se požaduje velký vstupní odpor tranzistoru. Ten je nutný k tomu, aby nezatěžoval zdroj vstupního signálu, k němuž se tranzistor připojí. Rovněž malý výstupní odpor zesilovače je v mnoha případech vítaný. Tak např. jeho prostřednictvím lze přenášet střídavý signál (od mikrofону) po dlouhém vedení, aniž by se signál znehodnotil naindukovaným rušivým napětím z okolního prostředí. Nejčastěji se rušení projevuje neodstranitelným brumem.



Obr. 6.3 Zapojení tranzistoru: (a) se společným emitorem, (b) se společnou bází

Zapojení se společnou bází se využívá ve výjimečných případech, kdy vyžadujeme zvláště malý vstupní odpor a dobrý frekvenční přenos.

Vstupní signál se přivádí mezi emitor a bázi, která je v tomto zapojení společnou elektrodou – bází, viz Obr. 6.3 (b). Výstupní signál se odvádí z kolektoru proti společné elektrodě



– bázi. Budícím proudem je tedy emitorový proud I_E , o kterém víme, že je největším proudem tranzistoru. Znamená to zároveň, že výstupní kolektorový proud je vždy menší než vstupní. Je zmenšený o proud báze, a proto nelze mluvit o proudovém zesílení. To je v každém případě menší než 1.

Dále nás zajímá vstupní odpor. Víme, že podle Ohmova zákona je odpor přímo úměrný napětí a nepřímo úměrný proudu. Potom můžeme napsat vztah:

$$R_{\text{vst}} = \frac{U_{\text{EB}}}{I_E} \quad (6)$$

Vstupní napětí U_{EB} , které dosadíme do čitatele zlomku, je stejně malé jako v zapojení se společným emitorem. Ve jmenovateli zlomku je však proud emitoru I_E , a ten je velký, mnohem větší než proud báze v předešlém zapojení. Výsledná hodnota zlomku bude malá, protože ve jmenovateli je velké číslo. Vstupní odpor v zapojení se společnou bází je velmi malý. Ve výstupním obvodu je přechod C-B polarizován v závěrném směru, proto výstupní odpor je velký.

Použití zapojení se společnou bází se nejvíce používalo ve vysokofrekvenčních obvodech se staršími tranzistory. Umožnilo dosáhnout zvláště malý vstupní odpor, který byl podmínkou ke stabilní činnosti vysokofrekvenčního zesilovače.

d) Stručný přehled vlastností zapojení bipolárního tranzistoru

Z Tab. 1 je zřejmé, že nejčastěji používaným zapojením bipolárního tranzistoru je zapojení se společným emitorem (SE). Cenné je to, že kromě velkého proudového zesílení vykazuje také největší proudové zesílení. Ostatní zapojení (SB, SC) volíme tehdy, potřebujeme-li využít některou z výrazných vlastností těchto zapojení.

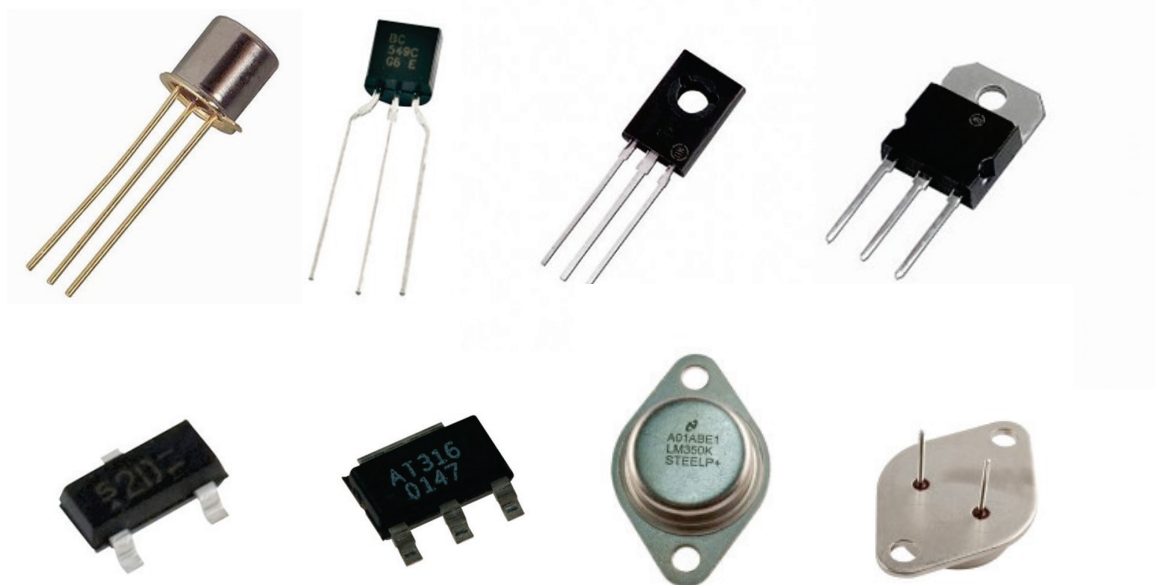
Veličina	SE	SB	SC
Vstupní odpor (R_{vst})	malý až střední	značně malý	velmi velký
Výstupní odpor ($R_{\text{výst}}$)	velký	velmi velký	velmi malý
Napěťové zesílení	velké	značně velké	< 1
Proudové zesílení	velké	< 1	velké
Výkonové zesílení	velké	malé až střední	malé až střední

Tab. 1 Stručný přehled vlastností zapojení bipolárního tranzistoru

e) Konstrukce tranzistoru

Vlastní systém tranzistoru vyráběný především planární technologií se umísťuje do vhodného kovového nebo plastického pouzdra. U výkonových tranzistorů se systém upevňuje pro snadný odvod tepla na silnější základovou desku, která současně tvoří vývod kolektoru a je konstruována většinou pro uchycení na větší kovovou plochu – chladič. Na Obr. 6.4 jsou zobrazeny různé typy pouzder tranzistorů.





Obr. 6.4 Různé typy pouzder tranzistorů

f) Teplotní stabilita tranzistoru

Pokud tranzistor pracuje s vyšším napětím U_{CE} , může být teplotně nestabilní. Po připojení napětí má tranzistor určitý ztrátový příkon, který zvyšuje teplotu přechodu tranzistoru nad teplotu okolí, tím zvýší zbytkový proud (stoupá exponenciálně s teplotou), který opět zvýší teplotu přechodu. Vznikne lavinovitý efekt tepelné nestability, která vede ke zničení tranzistoru, pokud není omezen proud kolektoru na bezpečnou hodnotu sériově zapojeným odporem. V úvahu je také nutno vzít, že všechny přechody tranzistoru jsou tepelně závislé. Toto chování způsobuje, že se vlastnosti tranzistoru mění s teplotou, některé lineárně, jiné exponenciálně. Naskytá se otázka, kdy vlastně měřit charakteristiky tranzistorů. Většinou se měření provádějí při teplotě okolí, bez ohledu na skutečné provozní podmínky tranzistoru. Znamená to, že po zahřátí zesilovače je vše jinak?

Ztrátový příkon P_{cmax} , který je dán vztahem (7), závisí na teplotě přechodu a je v podstatě omezen její maximální přípustnou hodnotou.

$$P_{cmax} = U_{CE} \cdot I_C \quad (7)$$

Přechod B-E má předpětí v propustném směru a tudíž malý odpor, přechod mezi C-B s předpětím v závěrném směru má veliký odpor. Poněvadž emitorem i kolektorem prochází v podstatě stejný proud, zahřívá se kolektorový přechod. Výrobci doporučují jako maximální teplotu přechodu u křemíkových tranzistorů cca 150 až 200 °C. Teplota přechodu je však rozdílná od teploty pouzdra! U tranzistorů, které pracují s malým ztrátovým výkonem, většinou postačí odvod sáláním pouzdra do okolí, jiná situace je u výkonových typů.

Tepelné namáhání tranzistoru závisí na:

- vnitřním tepelným odporem mezi přechodem a vlastním pouzdrém tranzistoru - hodnoty udává výrobce,
- tepelným odporem mezi pouzdrém a chladičem, který ovlivňuje výběr typu izolační podložky, typu silikonové vazelíny, způsob uchycení tranzistoru a také typ pouzdra.
- tepelným odporem mezi chladičem a okolím, jež závisí na velikosti chladičí plochy, tepelné konstantě a množstvím tepla odvedeného zářením, prouděním a vedením.



Maximální ztrátový výkon je omezen vztahem:

$$P_{c \max} = \frac{\vartheta_{j \max} - \vartheta_{a \max}}{R_{th}} \quad (8)$$

kde:

$\vartheta_{j \max}$ - největší přípustná teplota přechodu tranzistoru udávaná výrobcem, maximálně 150 °C,

$\vartheta_{a \max}$ - nejvyšší teplota okolí, kterou uvažujeme za provozu součástky,

R_{th} - celkový tepelný odpor, který je dán součtem odporů:

$$R_{th} = R_{thjc} + R_{thd} + R_{thr} \quad (9)$$

kde:

R_{thjc} - vnitřní tepelný odpor tranzistoru (polovodič-pouzdro, udává výrobce tranzistoru),

R_{thd} - tepelný odpor styku dosedací plochy tranzistoru s chladičem (pouzdro-chladič), který je 0,1 - 0,2 K/W pro přímou montáž se silikonovou vazelinou, 0,4 - 0,8 K/W pro slídovou izolační podložku a 0,7 - 1,6 K/W pro teflonovou izolační podložku,

R_{thr} - tepelný odpor chladiče (chladič-okolí) určíme podle přibližného vztahu:

$$R_{thr} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C^{0,25} + \frac{650}{S} \cdot C \quad (10)$$

S - plocha čtvercové chladičové desky s tranzistorem uprostřed,

C - korekční činitel 0,43 - 1,00 dle polohy a povrchu desky,

d - tloušťka desky,

λ - tepelná vodivost materiálu chladiče udávaná výrobcem (většinou v rozmezí 1,1 - 2,5 pro hliník, 3,8 pro měď, 1,1 mosaz a 0,46 pro ocel),

Pro malé čtvercové desky (do 20 cm²) je možné použít zjednodušený vztah:

$$R_{thr} = \frac{650}{S} \quad (11)$$

U chladičů složitějších tvarů je i obecný výpočet velmi komplikovaný, proto lze zhruba použít výše uvedený postup a vlastní rozměr zjistit experimentálně.

$P_{c \max}$ nelze pro výpočet uvažovat jako sinusový, jednoduchým výpočtem zjistíme, že např. 500 W modul by pro dokonalé chlazení musel mít výrazně vyšší počet tranzistorů, protože tepelný odpor chladiče vychází pro daný modul záporný, což je nesmysl. Hudební produkce nikdy nemá charakter sinusového zatěžování zesilovače.

Pokud shrneme výše uvedené poznatky, je vcelku jasné, že vlastním experimentům se meze nekladou. Pokud používáme jakékoliv profily pro převod tepla na chladič, je nutné mít na mysli, že množství tepla převedeného na chladič je dáno nejužším místem řetězce, tzn. používáním tenkých plechů nebo nekvalitních profilů můžeme i kvalitní chladič degradovat. Každopádně při výkonech nad 200 W je ventilátor nutností, neboť zajišťuje alespoň minimální cirkulaci vzduchu.

7.6.2 Unipolární tranzistor

Na rozdíl od předchozích bipolárních tranzistorů je u těchto tranzistorů proud tvořen pouze nosiči jednoho typu. Podle principu činnosti jsou nazývány FET – tranzistory řízené elektrickým polem.

Tranzistory řízené polem se používají v obvodech, které vyžadují vysoký vstupní odpor zesilovacího prvku, ve spínačích, zdrojích impulsů, jako napětově řízené rezistory a pro celou řadu aplikací elektroniky.

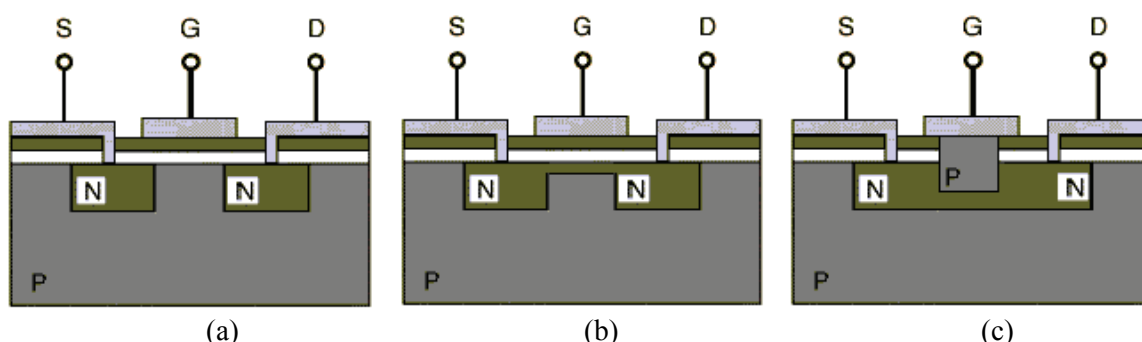


K zajištění činnosti tranzistoru řízeného polem – k průchodu proudu mezi vývodem S (source, emitor) a D drain, kolektor, viz Obr. 6.5 – stačí vždy nosiče jednoho typu:

- elektrony pro kanál N (mezi S a D)
- díry pro kanál typu P (mezi S a D)

Z tohoto důvodu se nazývají unipolární tranzistory. Odpor kanálu je řízen elektrickým polem, které vzniká přiložením napětí U_{GS} mezi vývod S a vývod G (gate). Proud do hradla G lze z praktického hlediska považovat za nulový.

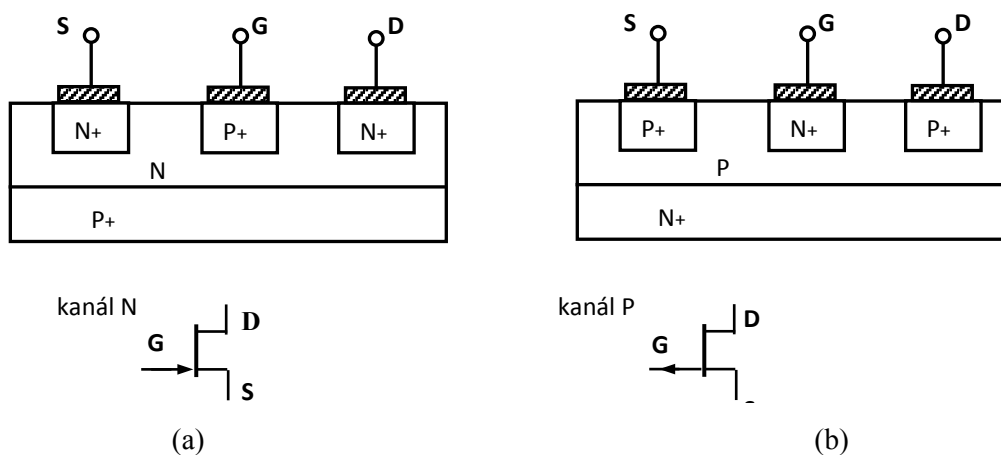
Průřez jednotlivými unipolárními tranzistory je ukázán na Obr. 6.5 a Obr. 6.6. Existuje-li vodivý kanál i při $U_{GS} = 0$, hovoříme o tranzistoru FET se zabudovaným kanálem (ochuzovací režim). Je-li nutné pro vytvoření vodivého kanálu (mezi D a S) připojit nenulové napětí U_{GS} , hovoříme o tranzistoru s indukovaným kanálem (obohacovací režim). Z tohoto hlediska patří běžné JFETy mezi tranzistory se zabudovaným kanálem (i když je možné i zde zajistit, aby při $U_{GS} = 0$ proud mezi D a S neprotékal).



Obr. 6.5 Průřez unipolárním tranzistorem: (a) MOSFET s indukovaným kanálem typu N, (b) MOSFET se zabudovaným kanálem typu N, (c) přechodový JFET s kanálem typu N Různé typy pouzder tranzistorů

a) Konstrukce a princip činnosti tranzistorů JFET

Průřez přechodovým tranzistorem JFET (Junction Field Effect Transistor) je na Obr. 6.6 (a) – kanál typu N. Na Obr. 6.6 (b) je zobrazen průřez přechodovým tranzistorem s kanálem typu P. Současně jsou uvedeny i nejběžnější symboly pro tyto tranzistory.

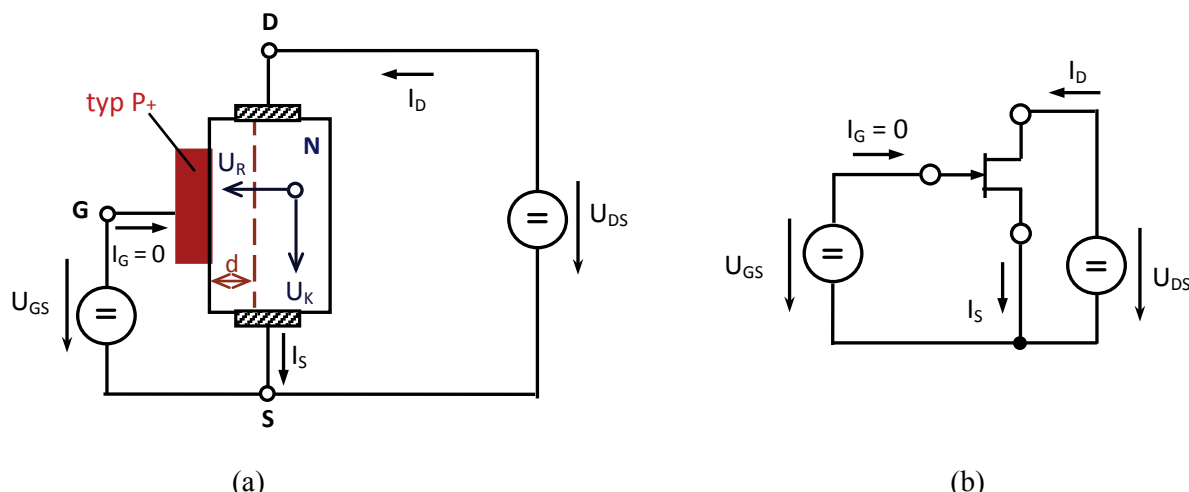


Obr. 6.6 Průřez tranzistorem a symbolická značka tranzistoru: (a) (N) JFET, (b) (P) JFET

Další výklad se bude týkat pouze tranzistoru (N) JFET (s kanálem typu N). Pro (P) JFET platí všechna tvrzení analogicky pro opačné polaroty napětí. Oblasti se zvýšenou dotací donorů (N^+) u elektrod D a S zaručují dobrý ohmický kontakt těchto vývodů. Situace je zjednodušeně znázorněna na Obr. 6.7 (a).

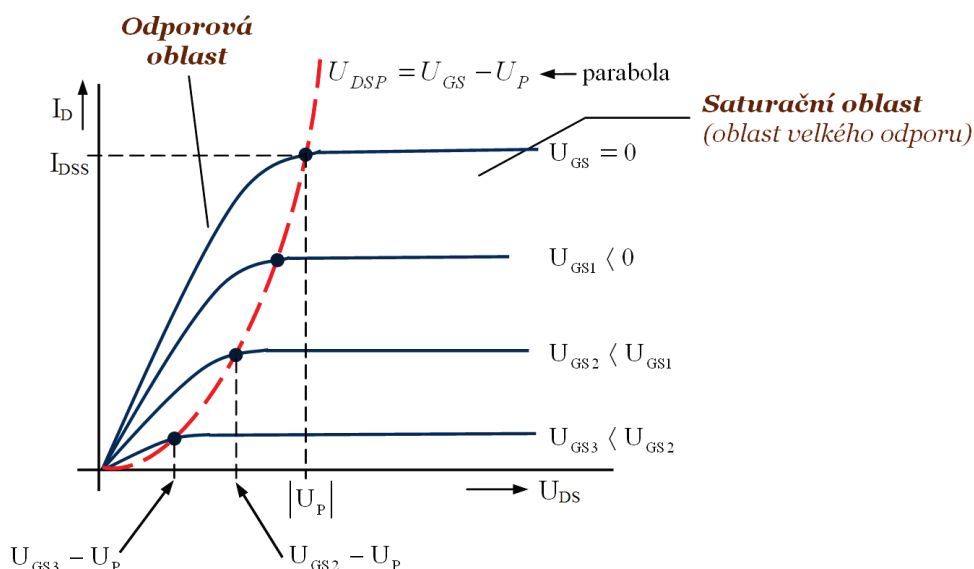
Za normální situace musí platit $U_{GS} \leq 0$. Přechod P-N (G-S) je uzavřen a vstupní proud I_G je dán pouze proudem diody (přechodu) v závěrném směru (řádově pA). Vstupní odpor R_{GS} je značný, $10^{12} \Omega$ a větší. Pro $U_{GS} > 0$ by se přechod P-N otevřel a pokud by proud v hradle G

nebyl omezen externím (zapojeným) odporem, došlo by ke zničení tranzistoru. Pro $U_{GS} < 0$ by se přechod mohl také otevřít.



Obr. 6.7 (a) Principiální struktura přechodového tranzistoru s kanálem N – NJFET, (b) Zapojení s použitím symbolické značky

Výstupní charakteristiky tranzistoru NJFET jsou znázorněny na Obr. 6.8. Pro $U_{DS} < U_{DSP}$ je proud I_D přibližně lineární funkcí napětí U_{DS} , hovoříme o odporové oblasti. Pro $U_{DS} > U_{DSP}$ není proud I_D (ideálně) funkcí napětí U_{DS} , hovoříme o saturační oblasti (oblast velkého odporu).



Obr. 6.8 Výstupní charakteristiky tranzistoru NJFET

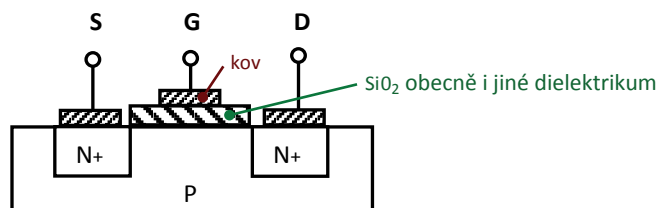
b) Konstrukce a princip činnosti tranzistorů s indukovaným kanálem (EMOSFET, enhancement mode)

Průřez tranzistorem MOSFET s indukovaným kanálem typu N je na Obr. 6.9. Označení vývodů je stejné jako u tranzistoru JFET.

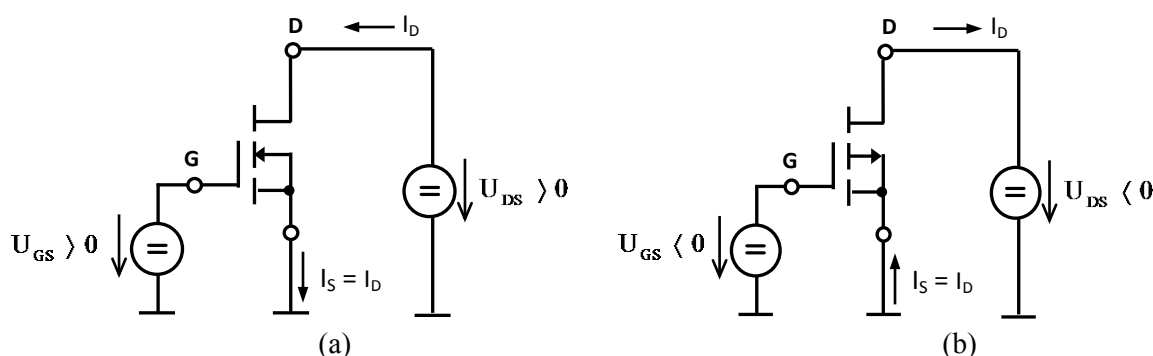
Struktura na Obr. 6.10 (a) pracuje pouze v tzv. obohacovacím režimu (enhancement mode). Při $U_{GS} \leq 0$ jsou vývody S a D jednoduše rozpojeny (dioda D – oblast P je pro $U_{DS} > 0$ zavřená). Teprve pro $U_{GS} > U_p > 0$ se indukuje kanál typu N pod vrstvou oxidu křemíku. Kovová vrstva hradla G tvoří přes dielektrickou vrstvu proti vrstvě P kondenzátor. Je-li napětí $U_{GS} > 0$ jsou díry v polovodiči typu P odpuzovány (příčinným elektrickým polem) od hradla G. Při dosažení hodnoty $U_{GS} = U_p > 0$ se na rozhraní vrstvy oxidu křemíku a vrstvy P indukují volné elektrony a propojují oblasti N^+ (pod elektrodami S, D). Při dalším růstu U_{GS} se kanál dále obohacuje o volné elektrony (stále více děr je odtlačováno od hradla), vodivý kanál se



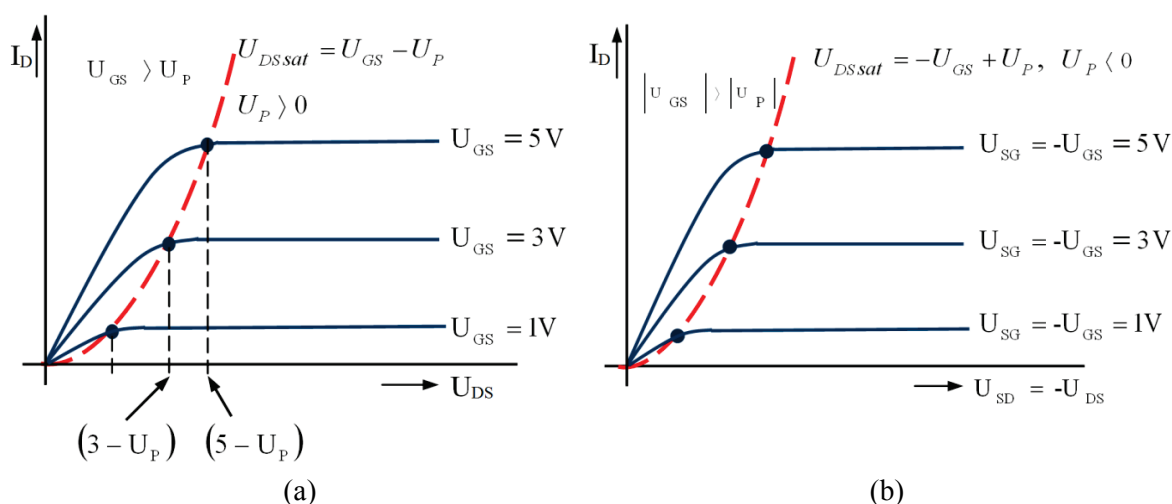
rozšiřuje. Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem typu N a typu P jsou kvalitativně zachyceny na Obr. 6.11.



Obr. 6.9 Průřez tranzistorem MOSFET s indukovaným kanálem typu N



Obr. 6.10 Symbolická značka tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem: (a) N, (b) P



Obr. 6.11 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem typu: (a) N, (b) P

c) Konstrukce a princip tranzistoru se zabudovaným kanálem (DMOSFET, depletion mode)

Průřez tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem typu N je na Obr. 6.12. Vývody S a D jsou trvale propojeny kanálem typu N (zabudovaným). Označení vývodů je i zde stejné jako u tranzistoru JFET.

Struktura na Obr. 6.12 může pracovat:

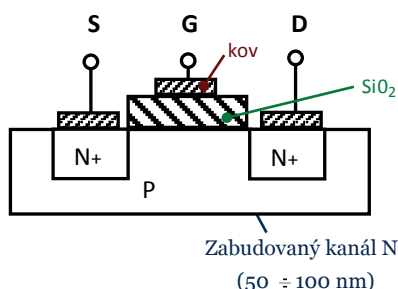
v ochuzovacím režimu – $U_{GS} < 0$ záporné napětí na G „vytlačuje“ přes dielektrikum (příčné pole) ze zabudovaného kanálu elektrony. Odpor kanálu roste. Při $U_{GS} = U_p < 0$ je kanál uzavřen, $I_D = 0$.

v obohacovacím režimu – $U_{GS} > 0$ kladné napětí na G zvyšuje dále počet elektronů v kanálu N (obohacuje), odpor kanálu dále klesá.

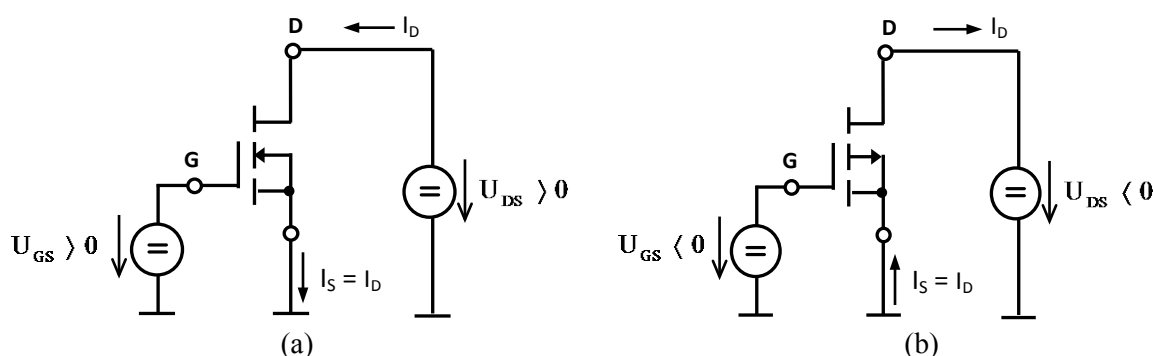


Vliv napětí U_{DS} je stejný jako v předchozích případech. Nejméně se uplatňuje u vývodu S, nejvíce u vývodu D. Když je $U_{DS} = U_{GS} - U_p$, dochází k uzavření kanálu („sevržení“) v oblasti vývodu D, proud I_D je saturován.

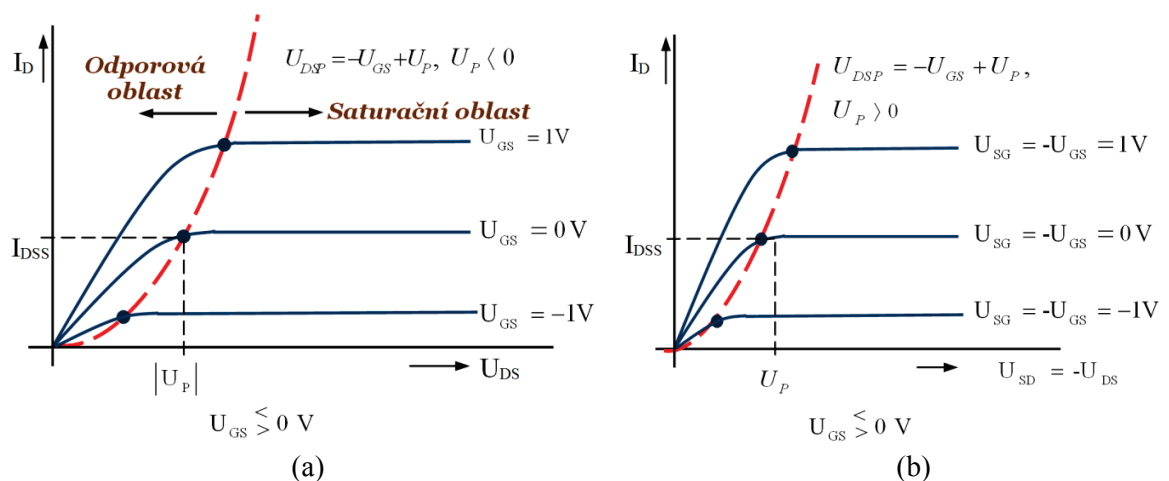
Pro zabudovaný kanál typu P platí úplně stejné úvahy s tím, že se zamění typy vodivosti a polarita napájecích napětí a proudů – viz Obr. 6.13 (c). Výstupní charakteristiky jsou kvalitativně zachyceny na Obr. 6.14.



Obr. 6.12 Průřez tranzistorem MOSFET s indukovaným kanálem typu N



Obr. 6.13 Symbolická značka tranzistoru MOSFET se zabudovaným kanálem typu: (a) N, (b) P



Obr. 6.14 Výstupní charakteristiky tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem typu: (a) N, (b) P

7.7 LITERATURA

Vrána V., Kolář V.: Základy polovodičové techniky, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Zář 2005.

Mohylová, J., Punčochář, J.: Elektrické obvody II., VŠB – TU Ostrava, 2007, 163 stran, ISBN 978-80-248-1338-7

Internet

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

http://www.vossost.cz/svab/elektross/skripta/kap2/2_2_5.html

http://cs.wikipedia.org/wiki/Bipol%C3%A1rn%C3%AD_tranzistor#Princip

http://www.edunet.souepl.cz/EZO/t_zkz.htm

<http://www.zesilovace.cz/view.php?cisloclanku=2002122409>

<http://www.dmaster.wz.cz/postupy/chladice/chladice.htm>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Polovodičové měniče

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

8	POLOVODIČOVÉ MĚNIČE.....	3
8.1	Úvod	5
8.2	Usměrňovače	5
8.2.1	Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení.....	7
8.2.1.1	Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	7
8.2.1.2	Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	12
8.2.1.3	Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	14
8.2.1.4	Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač	16
8.2.2	Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení	17
8.2.2.1	Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač	17
8.2.2.2	Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač.....	20
8.2.3	Řízené polovodičové usměrňovače.....	22
8.2.3.1	Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač	22
8.2.3.2	Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač	23
8.2.4	Střídače.....	24
8.2.4.1	Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)	25
8.2.4.2	Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím	25
8.2.4.3	Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím.....	26
8.2.5	Střídavé měniče napětí.....	27
8.3	Literatura	28



8 POLOVODIČOVÉ MĚNIČE



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Usměrňovače

Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení

Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač

Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení

Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač

Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač

Řízené polovodičové usměrňovače

Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač

Střídače

Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)

Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídavé měniče napětí

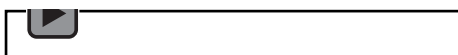


MOTIVACE:

Termínem měnič se dnes v praxi míní především polovodičové měniče napětí nebo frekvence. Měnič může pracovat podle jeho funkce jako usměrňovač, který převádí střídavou energii na stejnosměrnou nebo jako střídač, který naopak převádí stejnosměrnou energii na střídavou. Kaskádním zapojením usměrňovače a střídače se vytvoří tzv. měnič kmotočtu, který mění frekvenci střídavého napětí a proudu. Existuje zde taky možnost nastavování i jiných parametrů výstupu. V poslední době se začínají uplatňovat především tzv. aktivní usměrňovače, které umožňují i rekuperaci, pomocí níž jsou schopny vrátit energii zpět do střídavé napájecí



sítě. Polovodičové měniče dnes najdeme téměř v každém elektrickém zařízení, jako jsou nabíječky akumulátorů, v mikrovlnných troubách, ve sporácích s indukčním ohřevem, rovněž tvoří spínané zdroje pro počítače a jinou spotřební elektroniku, frekvenční měniče nebo v kompaktních zářivkách. Jednou z nejdůležitějších aplikací polovodičových měničů jsou aplikace v regulovaných elektrických pohonech, kde dovolují zásadní zvýšení účinnosti, dynamiky, stability, přesnosti a užité hodnoty pohonu. Význam použití měničů neustále roste, protože umožňují připojení alternativních zdrojů elektřiny, jako jsou například větrné elektrárny nebo fotovoltaické články do běžné elektrické sítě. Jako další významné uplatnění se jeví jejich použití v elektromobilech nebo v automobilech s hybridními pohonnými systémy.

**Audio8.1 Motivace****CÍL:**

Základní druhy polovodičových měničů.

Základní rozdělení usměrňovačů a jejich bloková struktura.

Princip neřízeného jednofázového jednopulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného jednofázového dvoupulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače.

Princip řízeného jednofázového jednopulzního uzlového usměrňovače.

Princip řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače.

Princip střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení).

Princip střídavých měničů napětí

8.1 ÚVOD

Měnič elektrické energie mění energii určitých parametrů (u nn napájecí sítě je to např. $3 \times 400 \text{ V}$, 50 Hz) na takové parametry, aby výstupní parametry splňovaly požadavky kladené připojenou zátěží.

Polovodičový měnič je statické zařízení, které využívá ke své činnosti odporů, indukčností, kapacit a spínacích vlastností polovodičových prvků. Měnič je elektrický obvod s nelineárními součástkami, proto musí při jeho řešení docházet k určitým zjednodušením.

V měniči se přeměna energie na jiné parametry výstupního napětí, proudu, kmitočtu apod. děje s minimálními ztrátami a tím s poměrně vysokou účinností.

Základní druhy polovodičových měničů jsou:

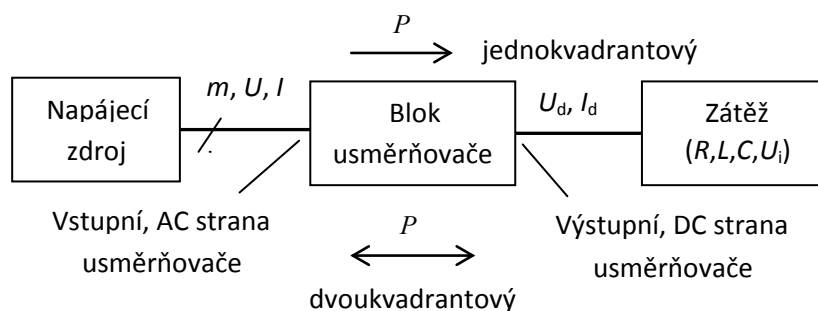
- usměrňovače,
- střídače,
- fázově řízené měniče střídavého napětí (softstartéry),
- pulzní měniče (spínané zdroje),
- střídavé měniče kmitočtu.

8.2 USMĚRŇOVAČE

Jedná se o druh výkonového polovodičového měniče používaného k přeměně střídavého elektrického proudu na proud stejnosměrný (AC/DC). Protože elektronické obvody ke své činnosti obvykle potřebují stejnosměrný proud a k distribuci elektrické energie se využívá proud střídavý, bývá usměrňovač součástí většiny elektrických přístrojů a zařízení spotřební elektroniky, napájených z elektrické sítě. Usměrňovače se také v hojné míře používají v napájecích soustavách elektrických trakčních vozidel (kupř. pro pohon lokomotiv, tramvají, trolejbusů či vozů metra). Tento druh provozní jednotky elektronické výkonové přeměny se skládá z následujících bloků, viz Obr. 2.1:

- Napájecí zdroj, který může tvořit m-fázová střídavá napájecí síť, popř. transformátor.
- Vlastní blok usměrňovače obsahující výkonové polovodičové součástky (VPS).
- Zátěž sestávající z kombinace zapojení prvků obvodu R , L , C , popřípadě i s protinapětím U_i .

Parametry a varianty zapojení těchto bloků ovlivňují provozní vlastnosti usměrňovačů.



Obr. 2.1 Sestava polovodičového usměrňovače

V současnosti se používají téměř výhradně polovodičové usměrňovače na bázi křemíku, kterými byla ostatní zařízení prakticky vytlačena, i když není vyloučeno, že vzniknou nová zařízení založená na karbidu křemíku, jehož předpokládanou výhodou je možnost provozu při vyšší teplotě. Obecně mohou být realizovány usměrňovače polovodičové (křemíkové, germaniové, selenové, ...), elektronkové, rtuťové.

Pro průmyslové účely se na přeměnu střídavého proudu na proud stejnosměrný používalo dříve také spojení elektromotoru a dynama - motorgenerátor (neboli Ward-Leonardovo soustrojí).



Výklad různých variant usměrňovačů bude dále prováděn za předpokladů:

- idealizovaného napájecího zdroje,
- idealizovaných polovodičových ventilů (součástek), tj. neuvažování jejich vnitřního odporu,
- idealizovaných spojovacích vodičů a dalších částí, (neuvažování jejich parametrů).
- Rozdělení usměrňovačů je možno provést na základě různých kritérií (hledisek).

a) **Podle druhu napájecího zdroje - počtu fází:**

- jednofázové, ($m = 1$),
- třífázové, ($m = 3$),
- m-fázové

b) **Podle charakteru výstupních** (stejnoseměrných) **veličin:**

- neřízené, osazené neřiditelnými polovodičovými spínacími součástkami – diodami,
- polořízené, osazené kombinací řiditelných a neřiditelných polovodičových součástek (tyristory, tranzistory, diody),
- řízené, osazené řiditelnými polovodičovými součástkami (tyristory, tranzistory), které podle způsobu provozu (směru toku energie-výkonu) dále dělíme na:
- jednokvadrantové (energie je přenášena pouze ze zdroje do zátěže),
- dvoukvadrantové (energie je přenášena ze zdroje do zátěže a naopak).

c) **Podle počtu pulzů** (počet komutací z jedné větve na jinou během jedné periody):

- jednopulzní,
- dvoupulzní,
- trojpulzní,
- šestipulzní,
- dvanácti a více pulzní ($q = 1, 2, \dots$).

d) **Podle zapojení měniče** (uspořádání jeho výkonového obvodu) z hlediska tvaru proudu na vstupní straně (svorkách) bloku usměrňovače:

- jednocestné - proud na vstupních svorkách je jednosměrný,
- dvoucestné - proud na vstupních svorkách je obousměrný.

e) **Podle zapojení zdroje a jednotlivých VPS**

- uzlové - všechny VPS a napětové zdroje jsou jedním shodným pólem spojeny do uzlu,
- můstkové - vnější svorky stejné polarity jsou společné a současně výstupní, středy skupiny jsou vstupní).

Usměrněné napětí:

Průběh okamžité hodnoty usměrněného napětí u_d se vyznačuje střídavou složkou nasuperponovanou na jeho střední hodnotu U_d . Při vlastním usměrnění střídavé vstupní veličiny vybírá usměrňovač jen určitou část jeho křivky tak, aby výstupní napětí přiváděné na zátěž bylo stejnosměrné. Z hlediska zvlnění výstupního DC napětí vychází příznivě usměrnění vícefázového vstupního napětí, kdy jsou z jednotlivých fází vybírány ze sinusového průběhu jen části, a to v oblasti maxima napětí.

Střední hodnotu usměrněného napětí naprázdno U_{d0} je možno určit pro dvou a více pulzní zapojení

($q \geq 2$) dle vztahu:

$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \frac{\pi}{q} \quad (1)$$

kde U je efektivní hodnota napájecího napětí usměrňovače na vstupních svorkách s výjimkou uzlových zapojení, kde se jedná o fázovou hodnotu napětí.



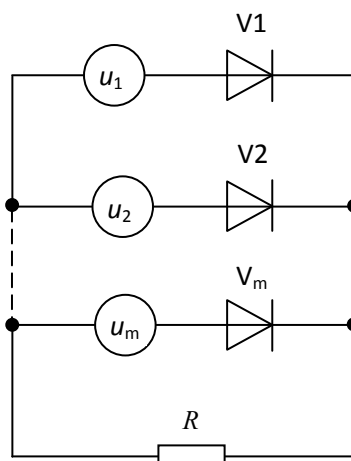
Usměrněný proud:

Okamžitá hodnota usměrněného proudu je označována i_d . Průběh i_d je dán průběhem usměrněného napětí u_d a zátěží. Obecná zátěž může obsahovat prvky R , L , C , popř. protinapětí U_i . Usměrněný proud bude zvlněný, a pokud v průběhu periody vstupního napětí nedosáhne nulové hodnoty, nazývá se nepřerušovaný neboli spojitý proud. Pokud v rámci dané periody klesne proud na nulovou hodnotu, a to pouze v jednom okamžiku, říká se, že je proud na mezi spojitosti. Pokud ovšem zůstane proud nulový po určitý delší časový okamžik, nazývá se přerušovaný proud.

8.2.1 Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení

Obecný q -pulzní usměrňovač v uzlovém zapojení je tvořen q větvemi s minimálně jednou polovodičovou součástkou. V případě $q > 1$ jsou všechny výkonové polovodičové součástky shodným pólem spojeny, a vzniká tak katodový nebo anodový uzel. Každá větev usměrňovače je napájena jednou fází m -fázového střídavého zdroje, viz Obr. 2.2. Pro tento druh spojení platí, že $q = m$ (počet pulzů je roven počtu fází zdroje).

Přídavné jméno „uzlová“ je odvozeno od toho, že u těchto zapojení je zátěž připojena mezi „uzel“ vícefázového zdroje a „uzel“ katod (anod) VPS. Zdroj je tedy tvořen m -fázovou soustavou střídavých napětí, vzájemně posunutých o úhel $2\pi/m$. Běžně se používá toto spojení pro $m = 2$ a $m = 3$. Většího počtu fází lze dosáhnout vhodným spojením sekundárních vinutí napájecího transformátoru. Charakteristické pro toto zapojení je, že proud na střídavé straně usměrňovače prochází jen jedním směrem.



Obr. 2.2 q -pulzní usměrňovač v jednocestném (uzlovém) zapojení

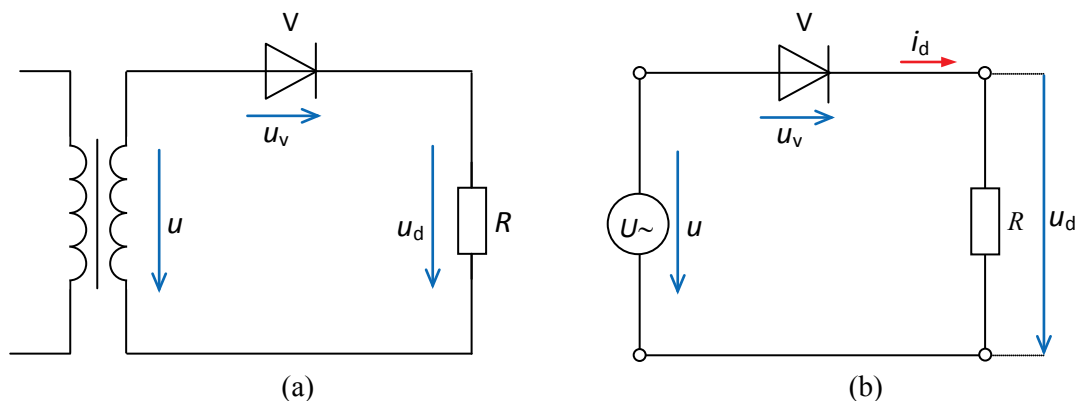
8.2.1.1 Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač**a) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporovou zátěží R**

Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač propouští pouze jednu půlvlnu vstupního napětí. Má tudíž pouze poloviční účinnost a používá se především u zařízení s velmi nízkým odběrem proudu. Jde o nejjednodušší zapojení usměrňovače, které vyžaduje pouze jednu diodu.

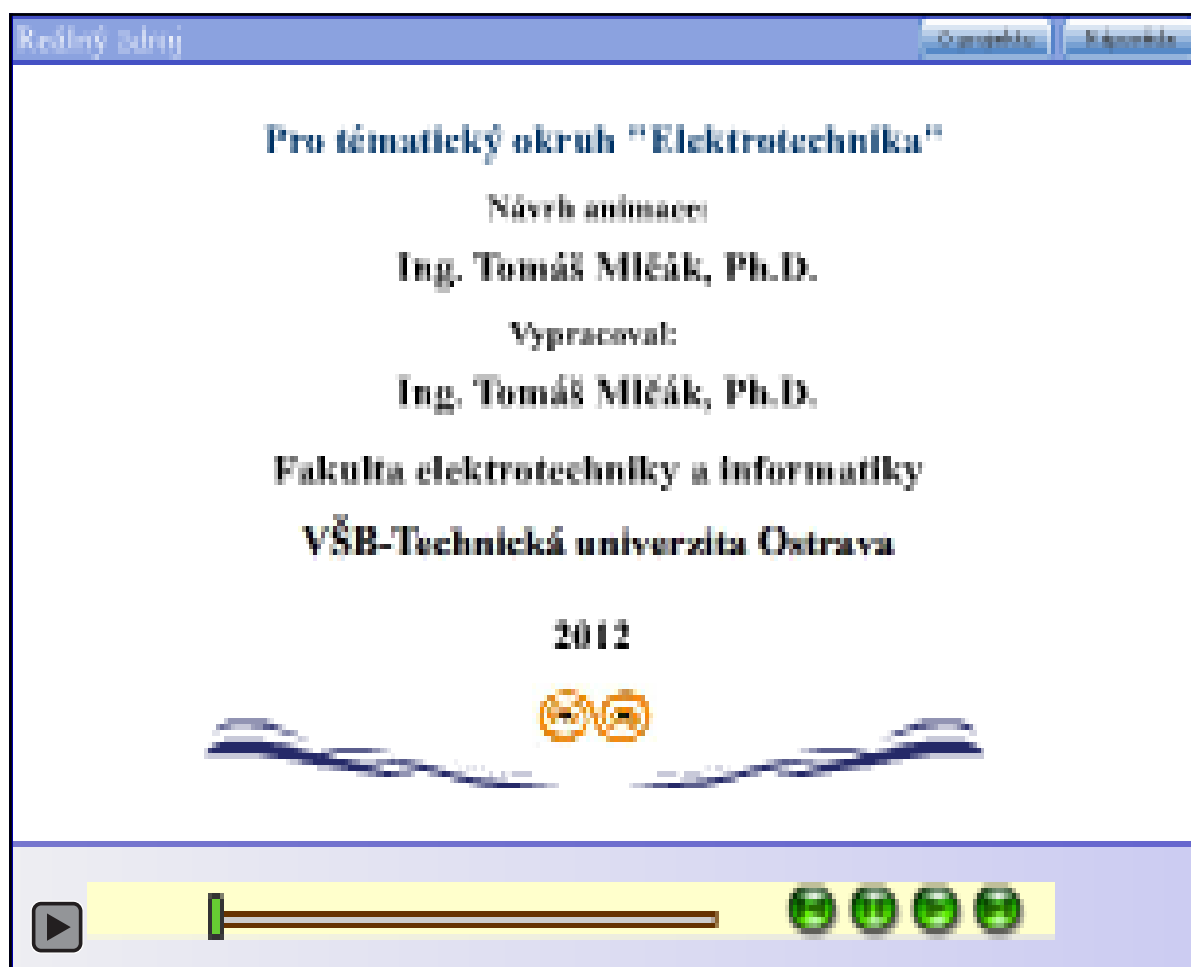
Jako výkonová polovodičová součástka je zde použita usměrňovací dioda, značená jako V (ventil), viz Obr. 2.3 (a) a (b). Dioda je propustná (vodivá, sepnutá) v přímém směru a blokuje (nevodivá, vypnutá) ve zpětném směru. Obvod je napájen z jednofázového střídavého zdroje (sít' nebo transformátor) s harmonickým napětím:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

Provozní vlastnosti usměrňovače jsou závislé na parametrech zátěže.



Obr. 2.3 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s odporovou zátěží: (a) obvodové schéma zapojení, (b) náhradní schéma zapojení



Pokud budeme mít v obvodu jednopulzního usměrňovače zapojenou pouze čistě odporovou zátěž, může obvod popsat Kirchhoffovými rovnicemi:

$$u_d + u_v - u = 0 \quad (3)$$

$$u_d = R \cdot i_d \quad (4)$$

kde $i_d = i_v$. Dioda pracuje ve dvou stavech:

- a) **Propustný stav**, kdy je dioda sepnuta, $u_v = 0$, $i_v > 0$, dosazením do rovnic (3) a (4) dostaneme

$$u_d = u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$



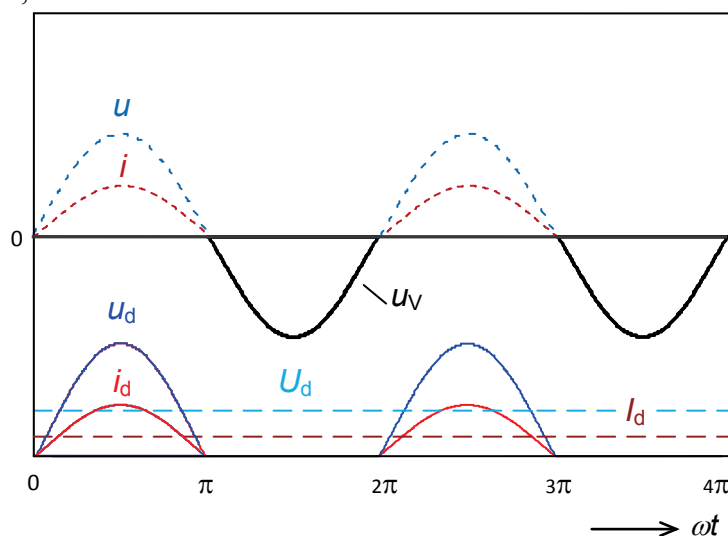
$$i_d = \frac{u_d}{R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) > 0 \quad (6)$$

kde U je efektivní hodnota střídavého napětí napájecího zdroje. Pokud bude $\omega \cdot t_1 = \pi$, bude proud diody roven nule $i_v = i_d = 0$.

b) **Závěrný stav**, kdy je dioda vypnuta, $u_v < 0$, $i_v = 0$, potom platí, že $u_d = 0$ a u_v vyjadřuje rovnice (7).

$$u_v = u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) < 0 \quad (7)$$

Dioda v propustném stavu je sepnuta, má prakticky téměř nulový odpor, takže napětí zdroje se objeví na zátěži. Stejný průběh má také proud protékající diodou v přímém směru. Při poklesu proudu na nulu se dioda dostane do závěrného stavu, tedy vypíná, její odpor se stává nesrovnatelně větší než odpor zátěže. Napětí zdroje se objevuje na diodě, kterou polarizuje v závěrném směru, viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače s odporovou zátěží

Pokud označíme, že $\omega \cdot t = \theta$, potom střední hodnotu stejnosměrného (usměrněného) napětí naprázdno můžeme vyjádřit jako:

$$U_d = U_{av} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} [-\cos(\theta)]_0^{\pi} = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,45 \cdot U \quad (8)$$

Potřebné střídavé napětí U (efektivní hodnota) nutné k dosažení U_d (střední hodnoty)

$$U = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d = 2,221 \cdot U_d \quad (9)$$

Obvodem bude protékat pulzující přerušovaný stejnosměrný proud i_d , jehož střední hodnota je dána vztahem (10).

$$I_d = I_{av} = \frac{U_d}{R} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot I_m \cong 0,318 \cdot I_m \quad (10)$$

Vstupní proud, jenž je v tomto případě odporové zátěže úměrný i výstupnímu dc napětí, jednopulzního neřízeného usměrňovače má neharmonický průběh.

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:

Efektivní hodnota proudu I je dána vztahem (11), kde $\omega \cdot t = \theta$.

$$I = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot I_d = 1,57 \cdot I_d \quad (11)$$

Zdánlivý výkon můžeme vyjádřit jako:



$$S = U \cdot I = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{2} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot P_d \cong 3,5 \cdot P_{dm} \quad (12)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě, jehož hodnotu je potřeba znát pro její napěťové dimenzování je dáno vztahem (13).

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U = U_m = \pi \cdot U_d \cong 3,14 \cdot U_{dm} \quad (13)$$

Vstupní proud (jenž je v tomto případě zátěže úměrný i výstupnímu dc napětí) jednopulzního neřízeného usměrňovače má neharmonický průběh, který lze rozložit ve Fourierovu řadu harmonických složek n (např. pro dané zapojení je $n = 0, 1, 2, 4, \dots$)

$$i_d = I_d + I_m \left[\frac{1}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{2}{3\pi} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - \frac{2}{15\pi} \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t) \dots \right] \quad (14)$$

obsahujících:

stejnosemnnou (nulovou) složku I_d , kde $n = 0$,

základní (první) harmonickou o amplitudě $0,5 \cdot I_m = 1,571 \cdot I_d$, kde $n = 1$,

druhou harmonickou o amplitudě $0,212 \cdot I_m = 0,666 \cdot I_d$, kde $n = 2$,

čtvrtou harmonickou o amplitudě $0,0424 \cdot I_m = 0,133 \cdot I_d$, kde $n = 4$.

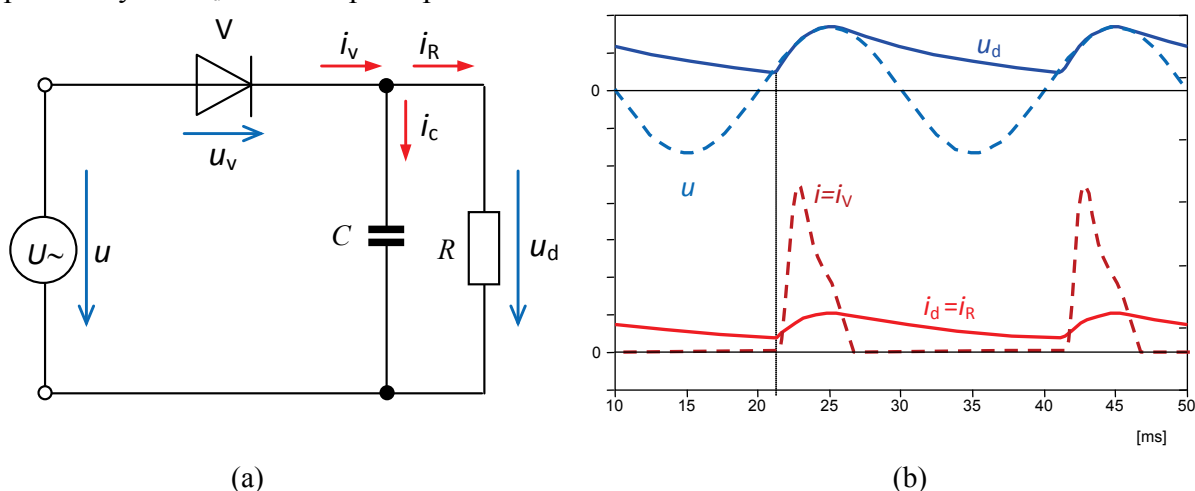
Činitel zvlnění usměrňovaného dc proudu:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{2} = 1,57 \quad (15)$$

b) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporovou zátěží a kondenzátorem

K vyhlazení pulzujícího průběhu usměrňovaného napětí u_d se používá kondenzátor C , který je zapojen na výstupní straně usměrňovače, tj. paralelně k odporové zátěži R , Obr. 2.5 (a).

Ventilem V začne téci proud i_v , je-li $u > u_d$ (dioda je polarizována v propustném směru a v tomto okamžiku se na zátěži objeví napětí zdroje. Za vrcholem kladné půlvlny napětí zdroje je $u < u_d$ a kondenzátor se začne vybíjet do odporu. Vybíjecí napětí má exponenciální tvar. Současně s poklesem napětí klesá i celkový proud tekoucí odporem R . V okamžiku, kdy kondenzátor dodává celý proud do odporu $|i_c| = |i_R|$, proud ventilem i_v klesl k nule a ventil vypnul. V tomto okamžiku je obvod $R-C$ oddělen od napájecího zdroje. Rozdílem okamžitých hodnot napětí na kondenzátoru a napětí zdroje ($u < u_d$) je polovodičová dioda polarizována v závěrném směru. Při opětovném nárůstu napětí zdroje do kladných hodnot dojde ke splnění podmínky $u > u_d$ a ventil opět sepne.



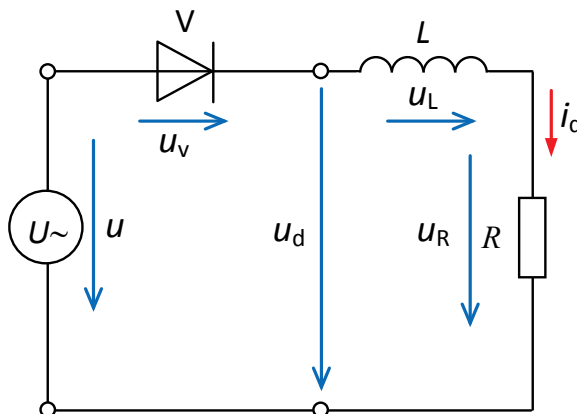
Obr. 2.5 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač se zapojenou odporovou zátěží a kondenzátorem:
(a) Náhradní schéma zapojení, (b) Časové průběhy veličin

Z Obr. 2.5 (b) je zřejmé vyhlazení průběhu usměrněného napětí u_d , které bude tím lepší, čím větší bude časová konstanta zátěže τ , která je rovna součinu $R \cdot C$. Dioda vede proud kratší interval než π , jak je tomu v případě odporové zátěže bez kondenzátoru.

Proud odebíraný z napájecí sítě je značně neharmonický (má tvar strmého impulsu), obsahuje velké množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí.

c) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporově-induktivní zátěží R-L

Jednopulzní usměrňovač se zátěží tvořenou reálnou cívkou (v náhradním schématu sériové spojení odporu R a indukčnosti L) je znázorněn na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač se zapojenou reálnou cívkou (R-L zátěž)

Při analýze obvodu lze opět vyjít ze základních rovnic (3) a (4) s tím, že v obvodu je indukčnost, na které je napětí:

$$u_L = L \cdot \frac{di_d}{dt} \quad (16)$$

Při sepnutí diody V lze obvod popsat diferenciální rovnicí:

$$u_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \quad (17)$$

jejímž řešením obdržíme časový průběh proudu ve tvaru:

$$i_d = \frac{U_m}{Z} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) + e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \psi \right] \quad (18)$$

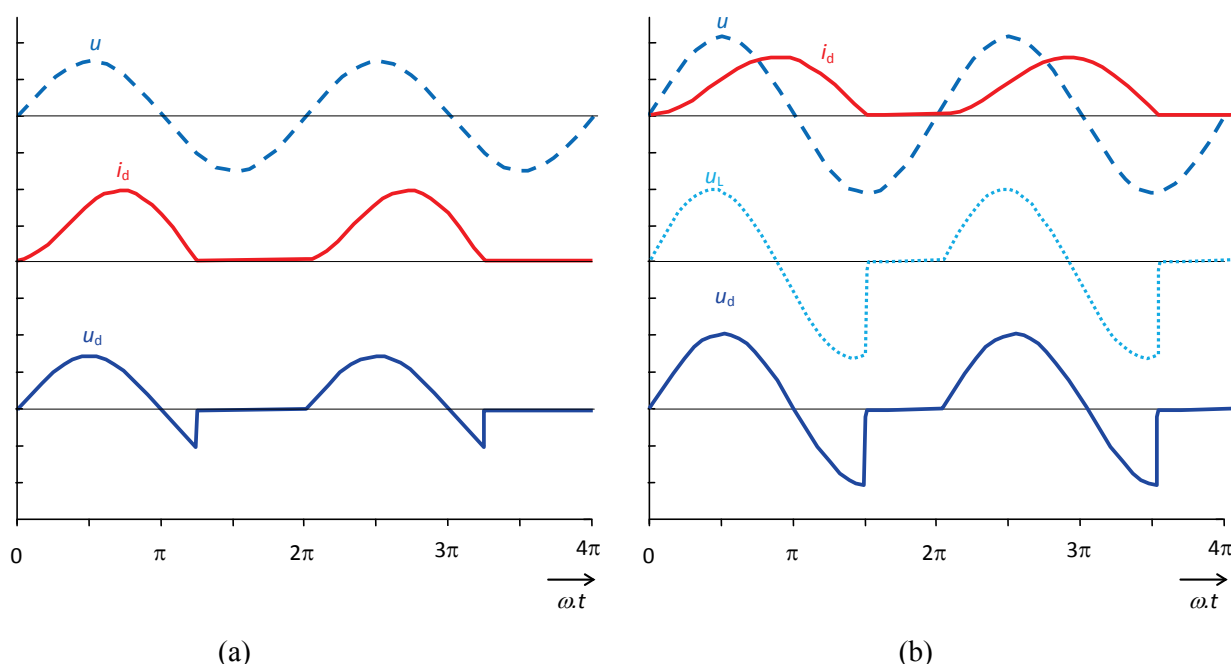
kde Z je výsledná impedance ze sériového zapojení odporu a indukčnosti, τ je časová konstanta obvodu, kde $\tau = L/R$ a $\Psi = \arctg \omega \cdot \tau$.

V intervalu od nuly po úhel Ψ proud tekoucí obvodem roste, tlumivka se nabíjí ze zdroje elektromagnetickou energií, následně se tlumivka vybíjí do odporu R (získanou elektromagnetickou energii předá). Dioda vypíná vždy při poklesu proudu i_d k nule.

Proud teče obvodem delší dobu než při čistě odporové zátěži a má charakter přerušovaného proudu. Průběhy obvodových veličin jsou závislé na časové konstantě obvodu $\tau = L/R$. Se vzrůstající indukčností rovněž narůstá i časová konstanta obvodu τ a zvětšuje se hodnota úhlu Ψ , proud se více vyhlazuje. Střední hodnota výstupního napětí je rovněž závislá na časové konstantě obvodu. Doba vedení proudu při záporných hodnotách napětí u_d snižuje jeho střední hodnotu.

Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou pro menší hodnoty L ($L > 0$) jsou zobrazeny na Obr. 2.7 (a).

Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou pro větší hodnoty L ($L \gg 0$) jsou zobrazeny na Obr. 2.7 (b).



Obr. 2.7 Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou při: (a) $L > 0$, (b) $L \gg 0$

Použití:

Použití tohoto typu usměrňovače lze hledat spíše v historických aplikacích, kdy výkonová elektronika byla na samém počátku vzniku. Dnes je tento usměrňovač používán velmi zřídka, např. pro malé výkony (vysavače, regulace osvětlení) a díky své jednoduchosti je zde uváděn jen pro pochopení základních principů.

8.2.1.2 Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

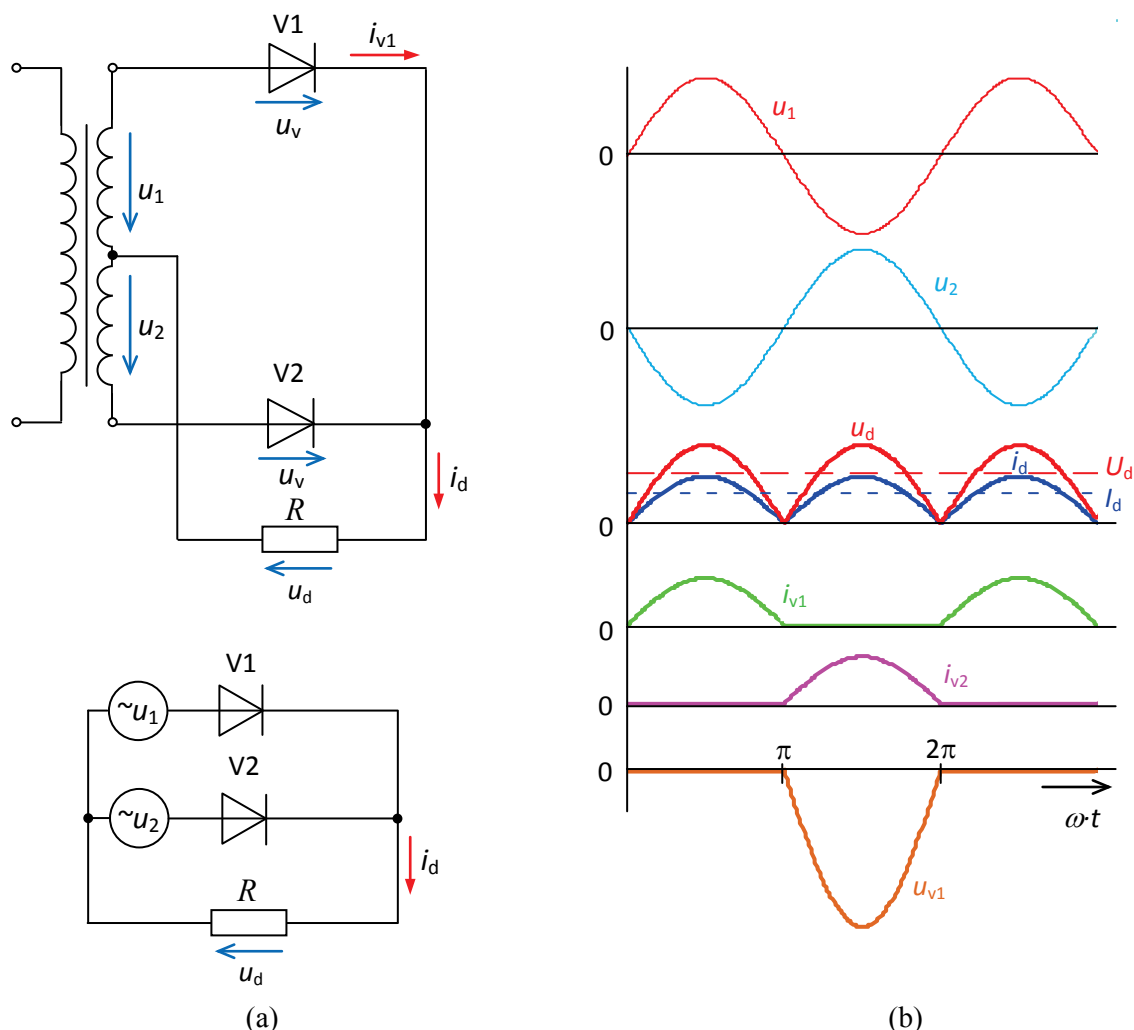
Dvoupulzní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z jednofázového transformátoru, jehož sekundární vinutí je opatřeno středním vývodem (odbočkou). Tento vývod je připojen k jednomu přívodu zátěže, jak je zobrazeno na Obr. 2.8 (a). Druhý přívod zátěže je připojen k uzlu polovodičových součástek (diod). Střední vývod výstupního vinutí transformátoru tvoří uzel dvou fázových napětí, která popisují rovnice (19) a (20),

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (19)$$

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t - \pi) = -u_1 \quad (20)$$

kde U je efektivní hodnota výstupního napětí transformátoru, tj. napětí jedné poloviny výstupního vinutí.





Obr. 2.8 Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač: (a) Obvodové a náhradní schéma zapojení, (b) Časové průběhy obvodových veličin

Průběhy obvodových veličin pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na Obr. 2.8 (b). Usměrněné napětí je obalovou křivkou kladných půlvln napětí u_1 a u_2 . Tato napětí v průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří dva pulsy – odtud název dvoupulzní usměrňovač.

Střední hodnotu usměrněného napětí vyjadřuje vztah:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U = 0,45 U_2 \quad (21)$$

kde $\theta = \omega \cdot t$ a $U_2 = U_1 + U_2 = 2 \cdot U$.

Potřebné střídavé napětí U jednoho sekundárního vinutí transformátoru popisuje vztah (22).

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d = 1,11 \cdot U_d \quad (22)$$

Špičkové závěrné napětí je dáno rovnicí (23).

$$U_{RRM} = 2 \cdot U_m = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U = 2,82 \cdot U = 3,14 \cdot U_d \quad (23)$$

Střední hodnota usměrněného proudu je dána rovnicí (24).

$$I_d = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \quad (24)$$

Činitel zvlňení usměrněného dc proudu popisuje vztah (25).



$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot 2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{4} = 0,786 \quad (25)$$

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:

Ve dvoupulzním uzlovém usměrňovači prochází proud každou polovinou sekundárního vinutí transformátoru jen po dobu jedné poloviny periody. Potom efektivní hodnota uvedeného proudu při čistě odporové zátěži je dána vztahem:

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot I_d = 0,78 \cdot I_d \quad (26)$$

Zdánlivý výkon sekundárního vinutí transformátoru můžeme vyjádřit jako:

$$S = 2 \cdot U \cdot I_{ve} = 2 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} U_{dv} \cdot I_d = 1,75 \cdot U_d \cdot I_d \quad (27)$$

Použití:

Tento druh zapojení usměrňovače se často používá pro malé výkony a malá napětí.

Jeho hlavní výhodou je použití pouze dvou diod.

Hlavní nevýhodou jednofázového dvoupulzního uzlového usměrňovače je nutnost použít transformátoru se dvěma vinutími. Zároveň závěrné napětí diod musí být dimenzované minimálně na dvojnásobek maximální hodnoty napětí zdroje.

8.2.1.3 Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Schéma zapojení trojpulzního uzlového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.9 (b). Trojpulzní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z trojfázového transformátoru, jehož primární (vstupní) vinutí může být zapojeno buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka, viz Obr. 2.9 (a), kdežto sekundární (výstupní) vinutí je vždy zapojeno do hvězdy. Konce všech tří vinutí jsou spojeny a tvoří jeden uzel. Napájecí napětí usměrňovače tvoří trojfázovou souměrnou soustavu se vzájemným fázovým posunem $2\pi/3$. Střídavé sinusové napětí nabývá plynule hodnot od nuly až do svého kladného maxima, poté od kladného maxima až do nuly a od nuly plynule až do svého záporného maxima a vrací se zpět do nuly. Tento děj se periodicky stále opakuje.

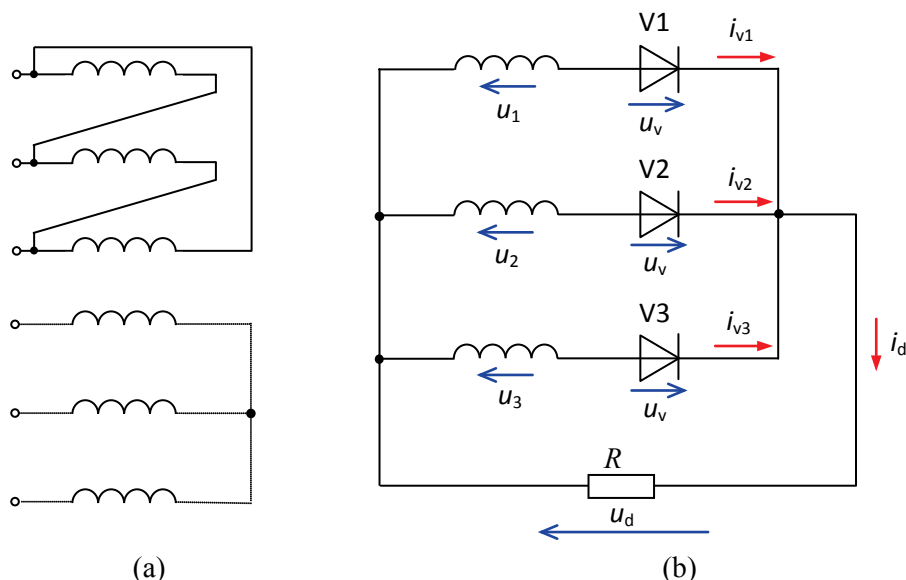
K realizaci zapojení třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače potřebujeme tři diody. Každou diodu zapojíme anodou na jednu fázi a jejich katody spojíme do uzlu a propojíme s uzlem vinutí.

Diody, označené jako V_1 , V_2 a V_3 , odstraní záporné půlvlny střídavého proudu ale s tím rozdílem, že dioda V_1 nevede po celou kladnou půlperiodu první fáze (u_1), ale jen do doby, než dojde ke zvýšení napětí v další fázi (u_2) nad napětí fáze první fáze, od té doby začíná vést dioda V_2 a vede až do doby než se zvýší napětí třetí fáze (u_3) nad napětí fáze druhé. Od té doby vede dioda V_3 až do doby, než napětí třetí fáze klesne pod hodnotu napětí fáze první. V tomto okamžiku začíná vést dioda V_1 a celý děj se periodicky opakuje. V sepnutém (vodivém) stavu se tedy nachází vždy dioda, která je připojena k fázovému napětí s největší okamžitou hodnotou.

Obecně určuje napětí n -té fáze m -fázového napájecího zdroje vztah (28).

$$u_n = U_m \cdot \sin \left[\omega \cdot t - (n-1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right] \quad (28)$$



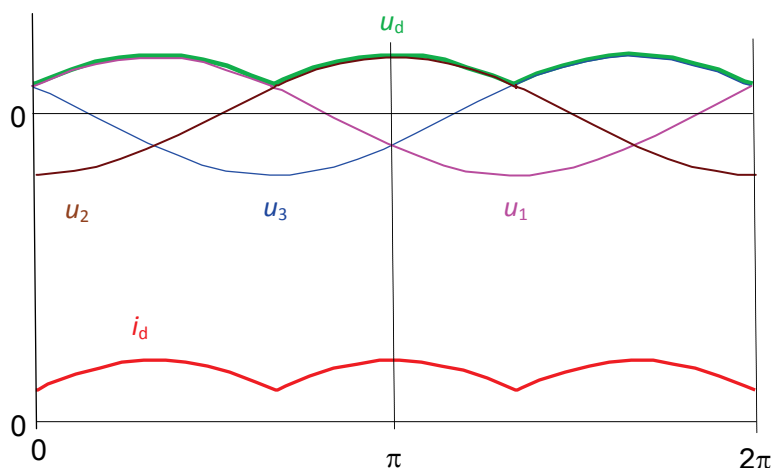


Obr. 2.9 Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač: (a) Možnosti zapojení primárního vinutí trojfázového transformátoru, (b) Obvodové schéma zapojení

Na horním grafu Obr. 2.10 jsou znázorněny časové průběhy napětí jednotlivých fází (u_1 - fialová, u_2 - hnědá, u_3 - modrá) posunutých o 120° . Na každou fázi je zapojena jedna dioda v propustném směru. Průběh usměrněného napětí u_d (znázorněn zelenou barvou) je obalovou křivkou kladných půlvln fázových napětí u_1 , u_2 a u_3 (každá fáze je usměrňována do doby dokud je hodnota jejího napětí vyšší než hodnota napětí jiné fáze). Výsledkem takto usměrněného napětí je nízké zvlnění, protože výstupní napětí po celou dobu neklesá až na nulu, ale je drženo na určité úrovni. Výstupní napětí má vysoký výkon a je vhodné k použití do obvodů s vysokým výkonem.

Na dolním grafu Obr. 2.10 je znázorněn průběh usměrněného proudu i_d .

Z grafů je zřejmé, že název trojpulzní usměrňovač vychází ze skutečnosti, že v průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří usměrňovač tři pulzy. Všechny znázorněné průběhy odpovídají zapojení s odporovou zátěží na výstupu usměrňovače.



Obr. 2.10 Časové průběhy obvodových veličin třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot U = 1,17 \cdot U \quad (29)$$

Střední hodnota usměrněného proudu je dána rovnicí (30).



$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{1,17 \cdot U_m}{R \cdot \sqrt{2}} = 0,827 \cdot I_{\max} \quad (30)$$

Proudy jednotlivých diod mají tvar sinusových úseků šířky 120° .

Střední hodnota proudu diody a tedy i fázového proudu napájecího transformátoru je

$$I_{\text{Vav}} = \frac{1}{3} I_d = \frac{\sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,39 \cdot \frac{U}{R} \quad (31)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (25).

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,5)}{0,827 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,3 \quad (32)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (33).

$$U_{\text{RRM}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{6} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (33)$$

Použití:

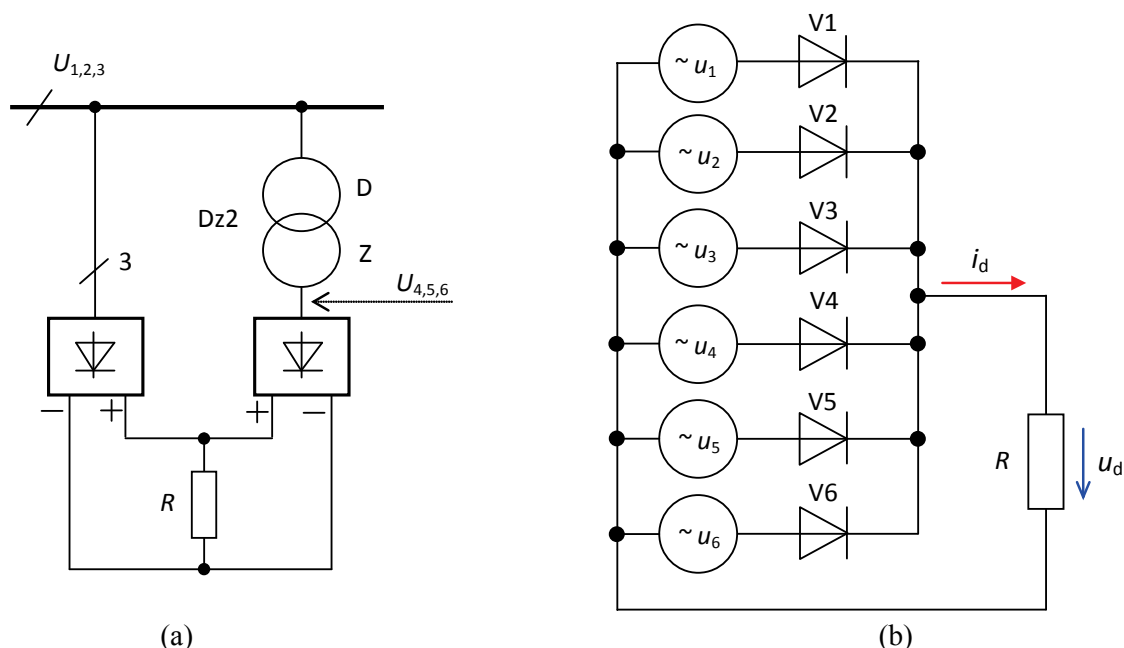
Výhody: Jednoduché zapojení, vysoký výkon a poměrně malé zvlnění.

Nevýhody: Třífázová soustava, velké proudy a napětí (potřeba transformátoru).

8.2.1.4 Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač

Tohoto druhu usměrňovače lze dosáhnout dvojicí trojpulzních usměrňovačů, z nichž jednotlivá napájecí napětí jsou vzájemně posunuta o třicet stupňů. Tohoto posunu lze dosáhnout např. pomocí transformátoru s hodinovým úhlem 60° , napájecího jeden usměrňovač. Hodinový úhel je závislý na zapojení primárního a sekundárního vinutí. Napětí v každé fázi sekundárního vinutí je posunuto o daný úhel vůči napětí téže fáze primárního vinutí.

Schéma zapojení šestipulzního uzlového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.11 (a) a (b).

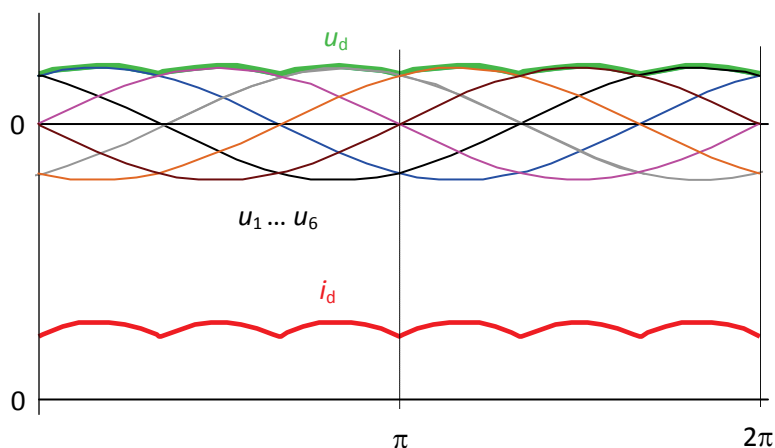


Obr. 2.11 Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Na horním grafu Obr. 2.12 jsou znázorněny časové průběhy napětí jednotlivých fází (u_1 až u_6) posunutých o 60° . Na každou fázi je zapojena jedna dioda v propustném směru. Průběh usměrněného napětí u_d je obalovou křivkou kladných půlvln fázových napětí u_1 až u_6 (každá fáze je usměrňována do doby dokud je hodnota jejího napětí vyšší než hodnota napětí jiné fáze). Výsledkem takto usměrněného napětí je nízké zvlnění, protože výstupní napětí po celou



dobu neklesá až na nulu, ale je drženo na určité úrovni. Výstupní napětí má vysoký výkon a je vhodné k použití do obvodů s vysokým výkonem.



Obr. 2.12 Časové průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 1,35 \cdot U = 0,779 \cdot U_s \quad (34)$$

Střední hodnota proudu diody a tedy i fázového proudu napájecího transformátoru je

$$I_{\text{Vav}} = \frac{1}{6} \cdot I_d = \frac{\sqrt{6}}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,19 \cdot \frac{U}{R} \quad (35)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (36).

$$q_i = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,866)}{1,35 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,07 \quad (36)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (37).

$$U_{\text{RRM}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{6} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (37)$$

Použití:

Výhody: Vysoký výkon, snadné zapojení, malé zvlnění napětí, které se přibližně blíží k „čistému“ stejnosměrnému napětí

Nevýhody: Třífázová soustava, vysoké napětí a proudy, potřeba šest napětí z transformátoru, velký počet diod.

8.2.2 Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení

Usměrňovač v můstkovém zapojení je v podstatě sériové spojení dvou uzlových usměrňovačů. Na vstupní svorky dvou uzlových usměrňovačů zapojených s opačnou polaritou ventilů je přiváděno společné napájecí napětí. Prakticky se používají jen jednofázová a trojfázová provedení usměrňovačů.

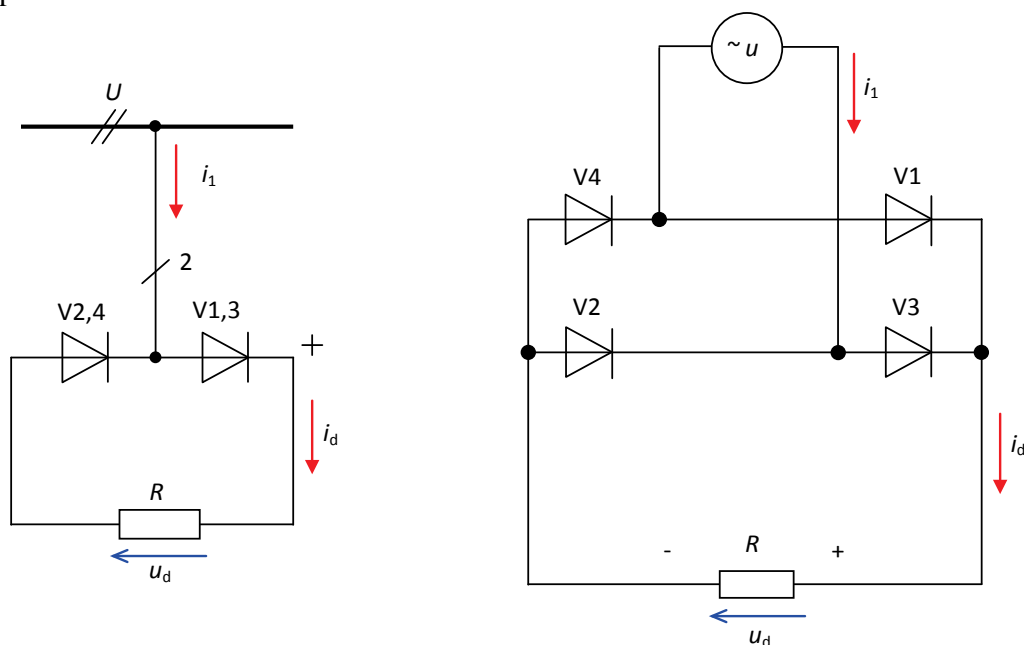
8.2.2.1 Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač

Dvoupulzní usměrňovače jsou elektrické obvody, u kterých využíváme zapojení více diod. Fungují tak, že převrátí záporné půlvlny střídavého napětí (proudu) do oblasti kladných. Takto usměrněné napětí není tolik zvlněné oproti jednopulznímu usměrňovači.

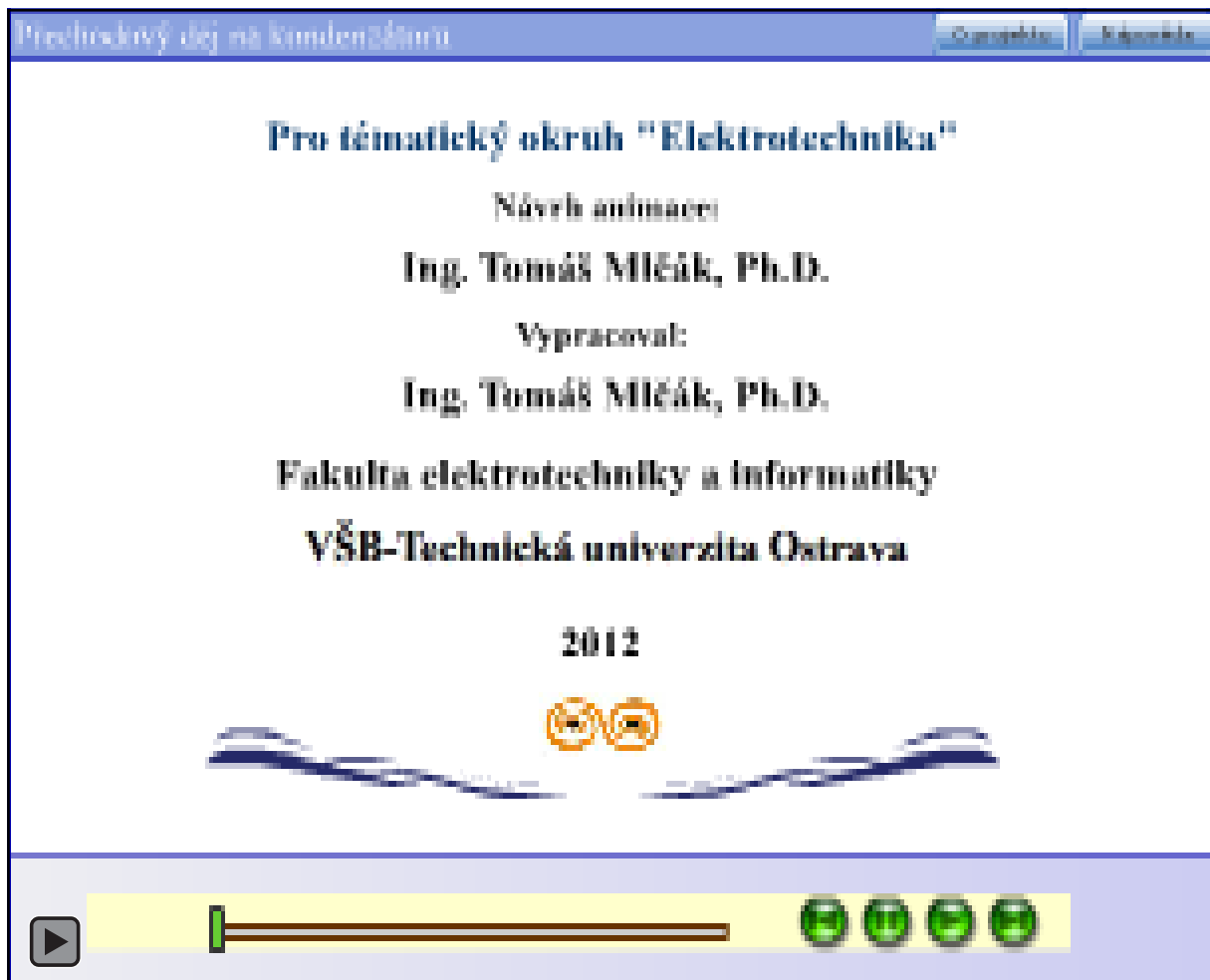
Schéma zapojení jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.13 (a) a (b).



Když dosáhne střídavý proud smyslu vyznačené polaroty (50-krát za 1 sekundu při 50 Hz), prochází proud od kladného pólu (+) zdroje diodou V1 na kladný (+) výstup U_d a přes zátěž R se vrací zpět diodou V2 na záporný (-) pól zdroje. Při změně polaroty zdroje (naopak než je vyznačeno, také 50-krát za 1 sekundu při 50 Hz), prochází proud od kladného pólu (+) zdroje diodou V3 na kladný (+) výstup U_d a přes zátěž R se vrací zpět diodou V4 na záporný (-) pól zdroje. Z toho vyplývá, že se na výstupu trvale objevují kladné pulzy. Takto usměrněné napětí si zachovává téměř stejný výkon, jako je napětí zdroje a je méně zvlněné oproti jednopulznímu usměrňovači.



Obr. 2.13 Jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení



Vstupní proud i_1 v jednotlivých vodičích bude procházet oběma směry a pro odporovou zátěž bude úměrný napájecímu napětí. Proud v obvodu usměrňovače bude procházet vždy tou dvojicí ventilů, na kterých je kladné napětí. Každá dvojice ventilů povede za dobu jedné periody proud v intervalu 180° , viz Obr. 2.14.

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

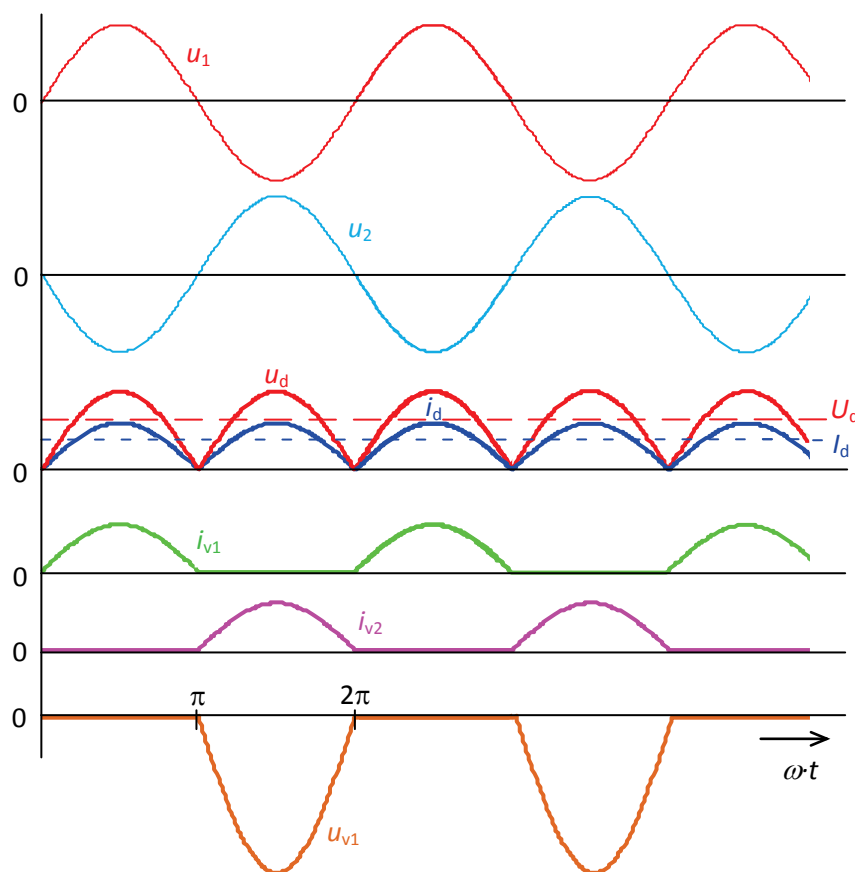
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U \quad (38)$$

Průběhy výstupních veličin u_d a i_d jsou obdobné jako v případě uzlového provedení usměrňovače. Napětí na jednotlivých ventilech u_v , je ale poloviční.

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (39).

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U \quad (39)$$





Obr. 2.14 Časové průběhy obvodových veličin jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače

Použití:

Neřízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač je využíván při napájení elektroniky a jako vstupní měnič pro napájení střídačů malých výkonů. Pro výkony větší musíme použít trojfázový můstek.

Řízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač se využívá v trakčních aplikacích, při buzení menších stejnosměrných strojů, atd. Jeho využití je vhodné pro aplikace, kde je potřeba rychlé změny řídicího úhlu α .

Pro možnost řízení střední hodnoty výstupního napětí na usměrňovači je vhodné použít polořízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač, kde jsou zapojeny dvě diody a dva tyristory, tudíž je levnější než plně řízený můstek se čtyřmi tyristory. Neumožňuje ovšem rychlý pokles proudu. Polořízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač je využíván v traktu a v aplikacích kde není potřeba rychlého odbuzování stroje.

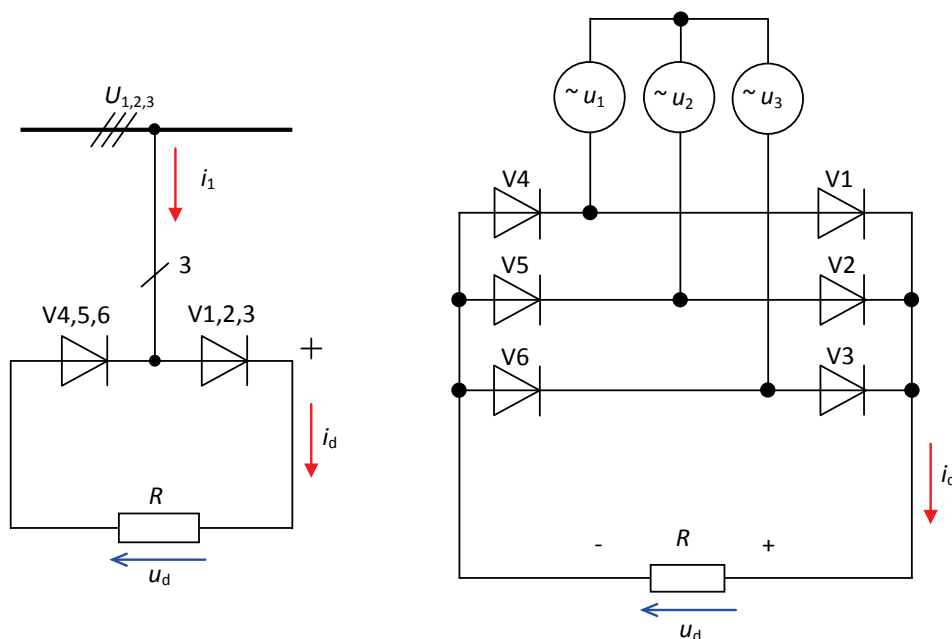
Nevýhodou jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače ve srovnání s trojfázovým je větší zvlnění proudu.

8.2.2.2 Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač

Napětí v jednotlivých fázích působí vždy na dvojici polovodičových ventilů tvořících jednu větev usměrňovače. Vstupní proud v jednotlivých fázích bude procházet oběma směry. Proud v obvodu usměrňovače prochází vždy tou dvojicí ventilů, na kterých je největší napětí. Každý ventil povede za dobu jedné periody proud v intervalu 120° a dvojice ventilů v intervalu 60° .

Obvodové schéma zapojení třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.15 (a). Náhradní schéma zapojení třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače ukazuje Obr. 2.15 (b).





Obr. 2.15 Třífázový šestipulzní můstkový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_s = 1,35 \cdot U_s = 2,34 \cdot U_f \quad (40)$$

kde U_s je efektivní hodnota sdruženého napětí napájecí sítě ($U_s = U_{12} = U_{23} = U_{13}$) a U_f je efektivní hodnota fázového napětí napájecí sítě ($U_f = U_1 = U_2 = U_3$).

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (41).

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{2 \cdot \frac{3}{\pi}} = 0,07 \quad (41)$$

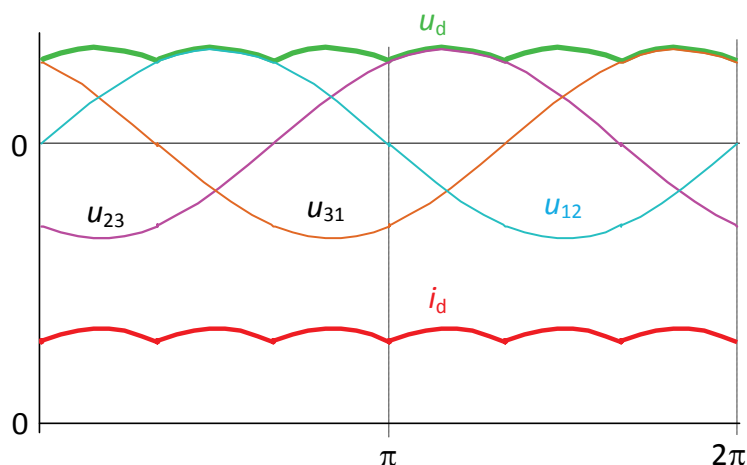
Proud odebíraný z napájecí sítě je neharmonický, obsahuje množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí. Skutečný tvar proudu je závislý na parametrech zátěže.

Průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na Obr. 2.16.

Použití:

Třífázové můstkové usměrňovače mají velmi širokou škálu využití. Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač je využíván jako vstupní měnič ve frekvenčním měniči, v měnících a například jako součást přepětových ochran.

Řízeným trojfázovým můstkovým usměrňovačem lze napájet kotvu stejnosměrných motorů nebo budící vinutí strojů velkých výkonů. Tvoří základ pro složitější měniče, jako jsou například reverzační měniče, cyklokonvertory, vysokonapětové měniče atd.



Obr. 2.16 Časové průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače

8.2.3 Řízené polovodičové usměrňovače

Pokud jsou v usměrňovačích nahrazeny diody řízenými tyristory, dostáváme řízený usměrňovač. Tyristory se stanou vodivými až od okamžiku, kdy dostanou v kladné půlperiodě se zpožděním α_f zapínací impulz. Úhel α_f se nazývá úhlem řízení (řídící úhel). Vypínání tyristoru nastává snížením napětí na tyristoru (průchod nulou). Řídí se množství přenesené energie a tím výkon připojeného zařízení (například topného tělesa, žárovky, dc motoru). Výhodou tohoto způsobu řízení oproti jiným jsou minimální energetické ztráty. Doba vedení proudu obvodem je závislá na charakteru zátěže.

U odporové zátěže je proud přímo úměrný odporu, což znamená, že při nulovém napětí je rovněž nulový proud. K řízeným usměrňovačům patří především tyristorové jednocestné i dvoucestné.

8.2.3.1 Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač

Jednofázový jednopulzní řízený usměrňovač propouští pouze jednu půlvlnu vstupního napětí a umožňuje s vysokou účinností řídit hodnotu výstupního napětí u_d usměrňovače v rozsahu od nuly do hodnoty napětí neřízeného usměrňovače. Sepnutí tyristoru V závisí na okamžiku přivedení proudového impulzu do řídící elektrody tyristoru. Posun řídícího impulsu proti okamžiku, kdy se tyristor dostal do blokovacího stavu, nazýváme řídící úhel α . Z hlediska činnosti tyristorů je nežádoucí, aby řídící impulzy přicházely v okamžiku, kdy je tyristor v závěrném stavu. Značně by tím vzrostl proud a tepelné namáhání tyristorů. Obvod je napájen z jednofázového střídavého zdroje (síť nebo transformátor) s harmonickým napětím:

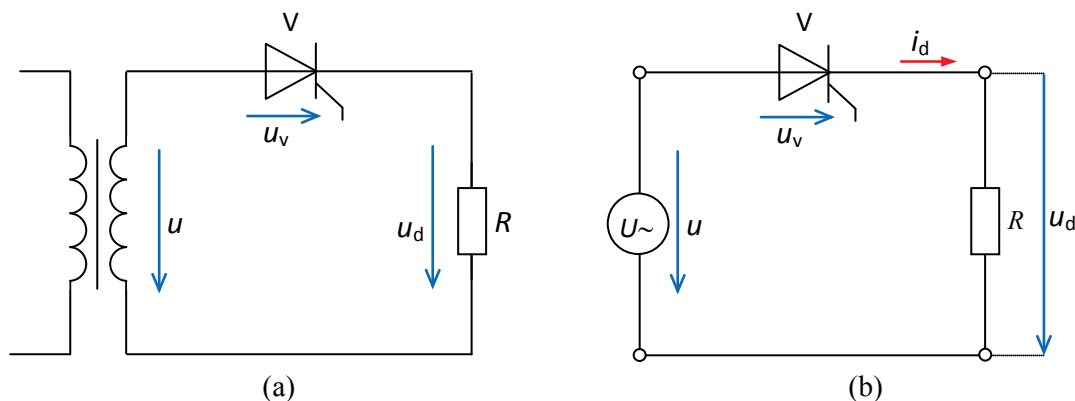
$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (42)$$

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem (43), kde $\theta = \omega \cdot t$.

$$U_d = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) \Rightarrow U_d = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} [-\cos(\theta)]_{\alpha}^{\pi} \Rightarrow U_d = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} (1 + \cos \alpha) \quad (43)$$

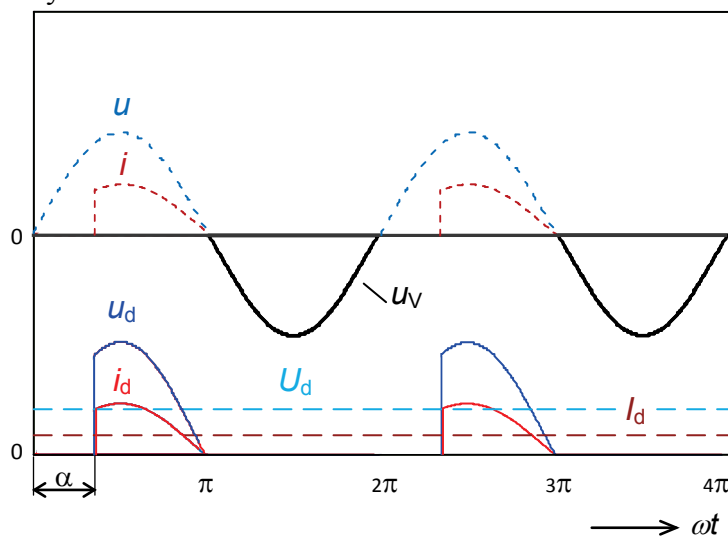
Obvodové schéma zapojení jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.17 (a). Náhradní schéma zapojení jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače ukazuje Obr. 2.17 (b).





Obr. 2.17 Jednofázový jednopulzní řízený usměrňovač s odporovou zátěží: (a) obvodové schéma zapojení, (b) náhradní schéma zapojení

Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží jsou zobrazeny na Obr. 2.18.



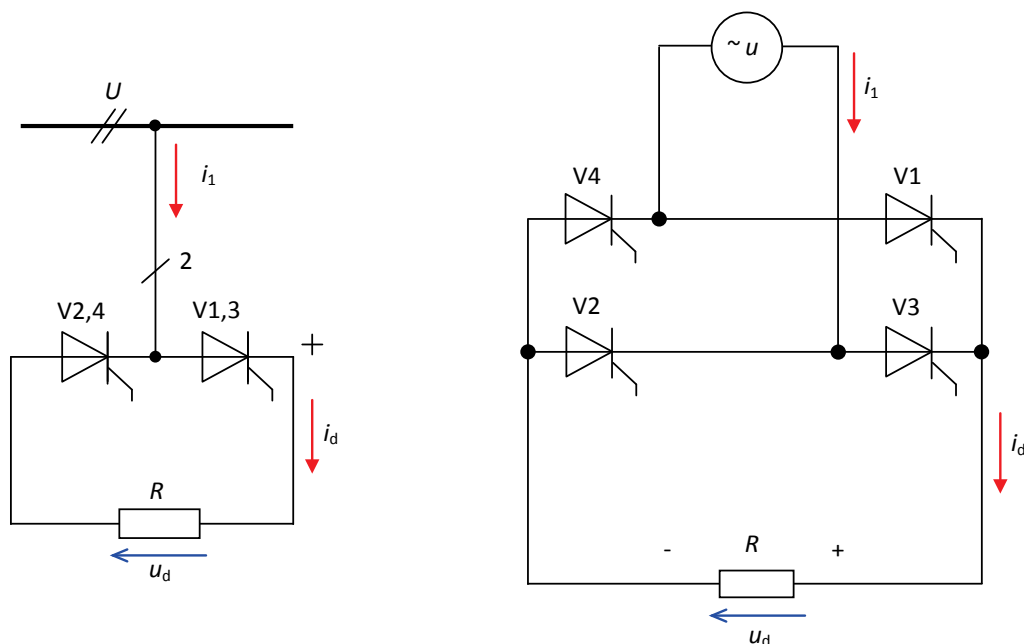
Obr. 2.18 Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží

8.2.3.2 Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní řízený usměrňovač propouští dvě půlvlny vstupního napětí a umožňuje s vysokou účinností řídit hodnotu výstupního napětí u_d usměrňovače v rozsahu od nuly do hodnoty napětí neřízeného usměrňovače.

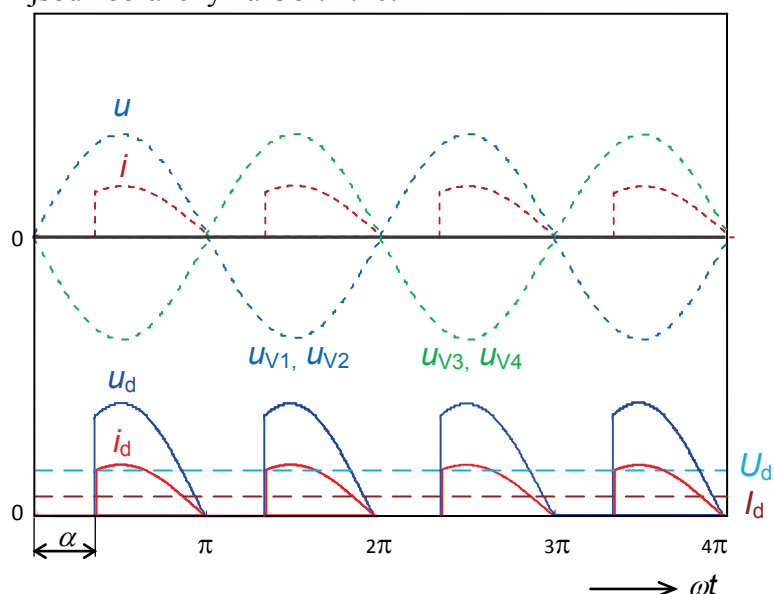
Vždy pracuje dvojice tyristorů V1 a V2 nebo V3 a V4. Aby došlo k sepnutí tyristoru, je nutné přivést proudový impuls do řídicí elektrody tyristoru. Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, je z hlediska činnosti tyristorů nežádoucí, aby řídicí impulzy přicházely v okamžiku, kdy je tyristor v závěrném stavu.

Obvodové schéma zapojení řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.19 (a). Náhradní schéma zapojení řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače ukazuje Obr. 2.19 (b).



Obr. 2.19 Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Časové průběhy veličin řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače s odporovou zátěží jsou zobrazeny na Obr. 2.20.



Obr. 2.20 Časové průběhy veličin jednofázového dvoupulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží

8.2.4 Střídače

Střídače jsou polovodičové měniče, které mění stejnosměrné napětí na střídavé.

Z hlediska tvaru výstupního napětí mohou být střídače:

- s harmonickým výstupním napětím,
- s obdélníkovým výstupním napětím (častější případ).

Z hlediska počtu výstupních fází rozdělit střídače na:

- jednofázové,
- trojfázové.

Základem každého střídače jsou polovodičové spínače, tranzistory – pro výkony do řádu desítek kW, nebo tyristory – pro výkony větší. Velkou výhodou tranzistorů je, že se dokážou



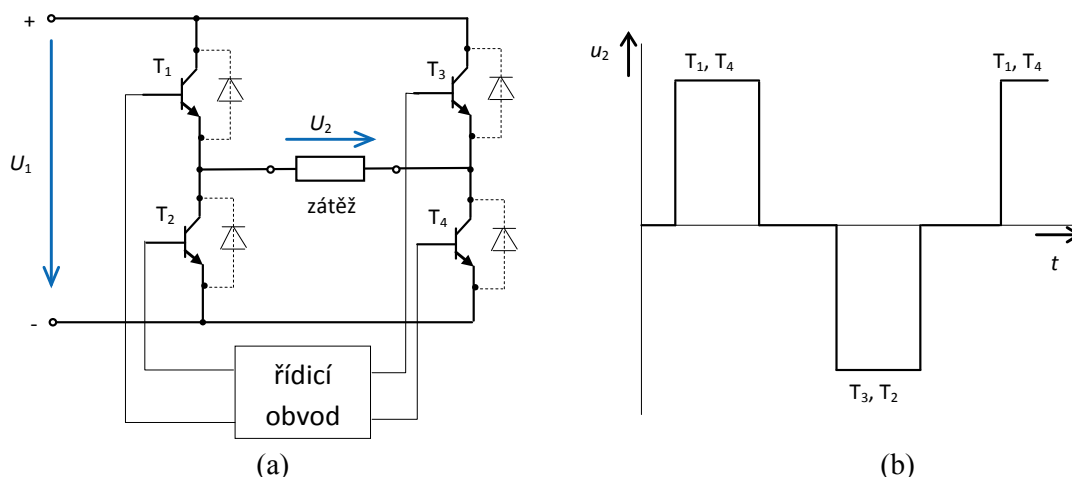
samy vypnout (tyristor potřebuje vypínací obvod, případně ho může vypínat komutace zátěže. Tranzistory mohou dosahovat velkých spínacích frekvencí (desítky kHz), proto jsou v poslední době stále rozšířenější střídače s tranzistory. Nejrozšířenější je tzv. střídač v můstkovém zapojení, který si dále popíšeme.

8.2.4.1 Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)

Tyto střídače můžou být jednofázové nebo trojfázové. Používá se ve zdrojích střídavého napětí pro napájení běžných spotřebičů v mobilních zařízeních (auta, vlaky), dále pro řízení otáček asynchronních případně synchronních motorů. Často je součástí tzv. nepřímých měničů frekvence, u kterých je na vstupu měniče usměrňovač, jenž střídavé napětí usměrní. Za usměrňovačem je tzv. meziobvod (napěťový, proudový) a dále následuje střídač, který usměrněné napětí opět rozstřídá s jinou frekvencí. Jako spínací prvky se v tomto typu střídače většinou používají tranzistory.

8.2.4.2 Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Princip si vysvětlíme na jednofázovém můstkovém střídači, jehož schéma je na Obr. 2.21 (a). Pro vysvětlení principu činnosti nemusíme uvažovat tzv. zpětné diody (na Obr. 2.21 (a) jsou znázorněné čárkovaně), které se uplatní pouze, jestliže má zátěž induktivní charakter (v tom případě by bez použití těchto zpětných diod došlo při vypnutí tranzistoru k jeho zničení vysokým indukovaným napětím).



Obr. 2.21 (a) Schéma jednofázového můstkového střídače, (b) Průběh výstupního napětí

Na průbězích výstupního napětí na Obr. 2.21 (b) je na počátku nulové napětí. V tomto okamžiku není sepnut žádný tranzistor. Potom sepnou tranzistory T_1 a T_4 , na zátěž se dostane kladné napájecí napětí. Po určitém čase oba tranzistory vypnou, na zátěži je opět nulové napětí. Následně sepnou tranzistory T_3 a T_2 , na zátěž se připojí záporné napětí (tranzistory připojí zátěž jakoby obráceně než v prvním případě). Po určitém čase tranzistory opět vypnou a celý cyklus se opakuje.

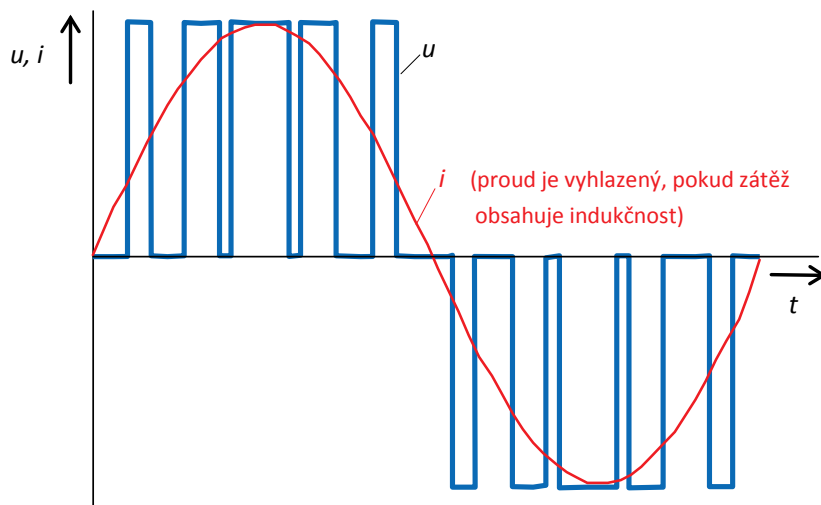
Délkou doby sepnutí tranzistorů a prodlevy mezi sepnutími je možné řídit efektivní hodnotu výstupního napětí. Čím menší prodleva, tím vyšší efektivní hodnota napětí. V případě, že by byla zátěž induktivního charakteru, průběhy napětí i proudů by měly trochu odlišný tvar (induktivní zátěž by indukovala napětí v době, kdy tranzistory nejsou sepnuty). Pro vysvětlení principu však stačí příklad s odporovou zátěží. Při chodu střídače však nesmějí sepnout zároveň tranzistory T_1 a T_2 , nebo T_3 a T_4 , což by způsobilo zkrat.

Pulzně šířková modulace u střídačů v můstkovém zapojení

V případě, že nechceme mít na výstupu střídače obdélníkový průběh, ale průběh více podobný sinusovému průběhu, můžeme použít jiný způsob spínání tranzistorů, tzv. „Pulzně



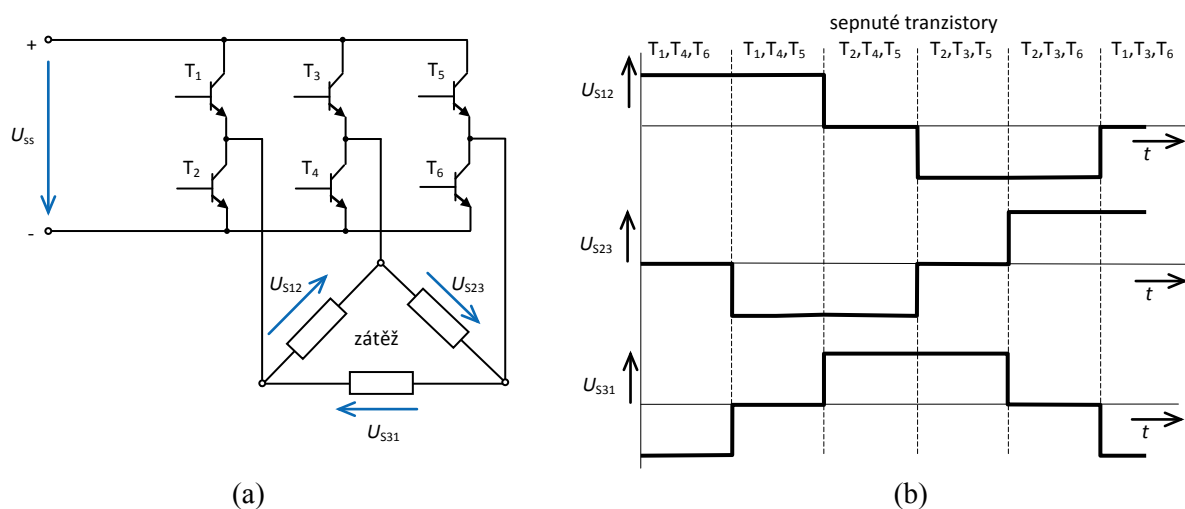
šířkovou modulací“. Průběhy napětí a proudu v tomto případě jsou na Obr. 2.22. Napětí je sice stále obdélníkové, k tomu značně „rozsekané“, ale proud bude v případě odporově induktivní zátěže (např. motoru) téměř sinusový. Indukčnost zátěže zde funguje jako setrvačnost vůči proudu a ten je potom vyhlazený. S tímto způsobem spínání pracuje většina dnešních střídačů.



Obr. 2.22 Princip pulzně šířkové modulace

8.2.4.3 Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídače tohoto typu se nejčastěji konstruují jako trojfázové. Zjednodušené schéma a průběh výstupního napětí trojfázového střídače v můstkovém zapojení je na Obr. 2.23 (a). Na Obr. 2.23 (b) jsou znázorněny průběhy sdružených výstupních napětí a nad nimi je uveden tzv. spínací diagram, jenž naznačuje, ve kterém okamžiku je který tranzistor sepnutý.



Obr. 2.23 (a) Zjednodušené schéma trojfázového můstkového střídače, (b) Průběh sdružených výstupních napětí

Můžeme si představit, že spínáním jednotlivých tranzistorů jsou výstupní svorky střídače připojovány buď na kladné, nebo záporné napětí. Rozdíl mezi napětím dvou sousedních výstupních svorek potom vytváří sdružené napětí.

V praxi se tyto trojfázové střídače většinou konstruují s pulzně šířkovou modulací, podobně jak bylo uvedeno u jednofázového střídače. Pro vysvětlení principu ale stačí průběhy bez této modulace.

8.2.5 Střídavé měniče napětí

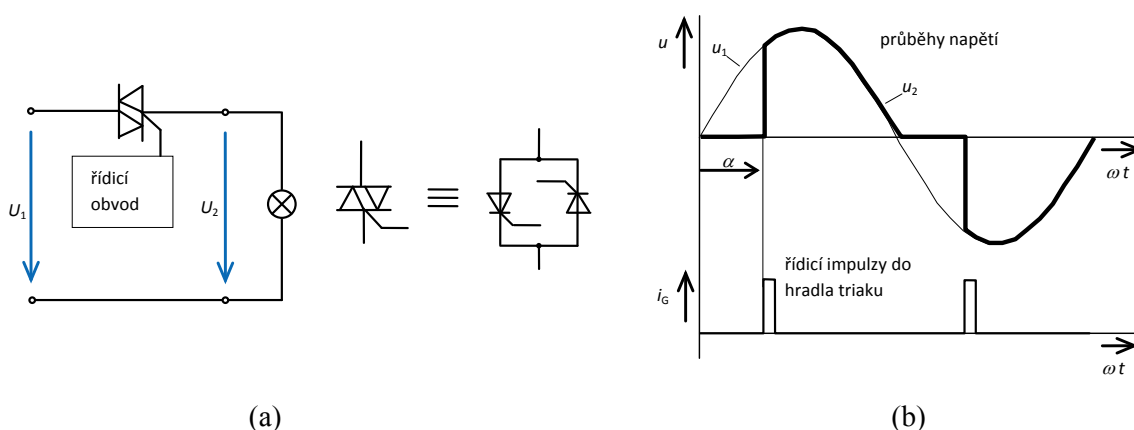
Tyto měniče mění efektivní hodnotu střídavého napětí, přičemž frekvence zůstává zachována. Základní částí tohoto měniče je polovodičový spínací prvek, který spíná střídavý proud. Bývá to triak, případně dva antiparalelně zapojené tyristory. Schéma a časové průběhy napětí jsou zobrazeny na Obr. 2.24. Princip činnosti je dobře patrný z průběhu výstupního napětí měniče na Obr. 2.24 (b).

Triak sepne v okamžiku, kdy řídící obvod pustí řídící proudový impuls do jeho hradla. Kdyby tento okamžik nastal hned v době začátku sinusové funkce, dostalo by se na výstup měniče celé vstupní napětí. Pokud triak sepne později, dostane se na výstup měniče menší část sinusovky a efektivní hodnota výstupního napětí je menší. Zpoždění sepnutí triaku vyjadřujeme takzvaným řídícím úhlem, který se obvykle značí α , viz Obr. 2.24 (b). Změnou řídícího úhlu α od 0° do 180° lze měnit efektivní hodnotu U_2 od 0 až do hodnoty U_1 .

Pro velikost efektivní hodnoty napětí U_2 při odporové zátěži platí vztah (44).

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (44)$$

Tyto měniče se používají k regulaci výkonu u činných spotřebičů, jako žárovek (tzv. stmívače - velmi rozšířené použití) nebo některých tepelných spotřebičů, a také k řízení otáček střídavých komutátorových motorků, například v ručních vrtačkách. Konstrukce střídavého měniče může být v jednofázovém nebo trojfázovém provedení.



Obr. 2.24 (a) Schéma střídavého měniče napětí, (b) Průběh sdružených výstupních napětí

8.3 LITERATURA

Vrána V., Kolář V.: Základy polovodičové techniky, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Zář 2005.

Internet

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

<http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bni%C4%8D>

<http://educon.zcu.cz>

<http://www.elektronikapc.wz.cz/en/info/usmernovace.htm>



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Elektrické přístroje

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

10	ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE	3
10.1	Úvod	5
10.2	Elektrický oblouk a kontakty u elektrických přístrojů.....	6
10.3	Jistící přístroje.....	8
10.3.1	Pojistky	8
10.3.2	Jističe	9
10.3.3	Proudové chrániče	10
10.3.4	Jistící relé a spouště.....	11
10.4	Spínací a spojovací přístroje	12
10.4.1	Spínací přístroje.....	12
10.4.1.1	Stykače	12
10.4.1.2	Pomocné stykače	13
10.4.1.3	Motorové spouštěče	13
10.4.1.4	Pomocná relé.....	13
10.4.1.5	Časová relé	13
10.4.2	Nesamočinné spínací přístroje.....	14
10.4.3	Přístroje spojovací.....	14
10.5	Elektromagnety	15
10.6	Literatura.....	17



10 ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Elektrický oblouk a kontakty u elektrických přístrojů

Jistící přístroje

Pojistky

Jističe

Proudové chrániče

Jistící relé a spouště

Spínací a spojovací přístroje

Spínací přístroje

Stykače

Pomocné stykače

Pomocná relé

Časová relé

Nesamočinné spínací přístroje

Přístroje spojovací

Elektromagnety

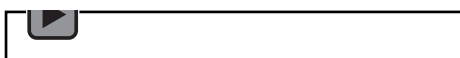


MOTIVACE:

Elektrický přístroj je speciální zařízení - elektrické zařízení, které může být přímou součástí elektrických obvodů (např. obvodů určených pro rozvod elektrické energie), nebo se jedná o detekční, signalizační či měřicí prvky umístěné mimo elektrický obvod. Elektrické přístroje nejčastěji slouží například k jištění, regulaci, spínání, odpojování, spouštění, signalizaci či k měření elektrických veličin apod.



Audio10.1 Motivace



**CÍL:**

Z jakých základních prvků se skládá každý elektrický obvod.

Rozdělení elektrických přístrojů podle funkce.

Co je to elektrický oblouk a jak vzniká.

Jakým způsobem se provádí zhášení elektrického oblouku v obvodech stejnosměrného proudu.

Jakým způsobem se provádí zhášení elektrického oblouku v obvodech střídavého proudu.

Nakreslete grafickou značku zapínacího, vypínacího a přepínacího kontaktu.

Jaké máme druhy jisticích přístrojů

Popište základní funkci pojistky a vyjmenujte druhy provedení tavných vložek pojistek dle jejich vypínacích charakteristik.

Popište základní funkci jističe a vyjmenujte druhy vypínacích charakteristik jističů.

Popište základní funkci proudového chrániče a jeho využití.

Vyjmenujte základní spínací přístroje.

Popište základní funkci stykače a jeho využití.

K čemu slouží pomocné stykače a pomocná relé.

K jaké funkci se využívají motorové spouštěče.

Kde se využívají časová relé a jaký je jejich hlavní princip.

Co jsou to nesamočinné spínací přístroje.

Jaké máme druhy spojovacích přístrojů.

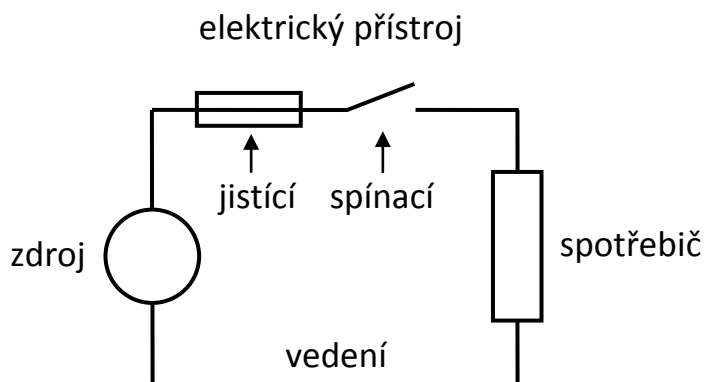
Co jsou to elektromagnety a kde se u elektrických přístrojů využívají.



10.1 ÚVOD

Každý elektrický obvod - EO (i ten nejjednodušší) obsahuje čtyři základní prvky, viz Obr. 1.1:

1. Zdroj (baterie, generátor, síť apod.),
2. spojovací vedení (vodiče, kabely, šňůry, troleje apod.),
3. spotřebiče (žárovky, topidla, motory, počítače, televizory apod.),
4. ovládací, spínací a jistící člen (vypínač, pojistka, atd.) – tzv. Elektrický spínací přístroj (ESPř).



Obr. 1.1 Základní schéma elektrického obvodu

Elektrický přístroj je zařízení používané v elektrických obvodech k obsluze a jistění elektrických rozvodů, pohonů, spotřebičů, k měření a k využití silových účinků elektrického proudu. Jedná se o velmi obsáhlý sortiment elektrických zařízení (EZ).

Rozdělení Elektrických přístrojů podle funkce:

- **Spínací (TSPř)** - spínají a rozspínají elektrický obvod, galvanicky oddělují zdroj od spotřebiče.

Podle působení dále dělíme spínací přístroje na:

- nesamočinné - obyčejné (spínače, vypínače, odpínače, odpojovače - k sepnutí dochází jen vnějším mechanickým zásahem, např. rukou, částí stroje, atd.),
- samočinné (stykače, relé, jističe, vypínače se spouští, atd.).
- **Řídicí, spouštěcí, regulační** - zabezpečují další požadované funkce elektrického obvodu kromě jeho spojení. Jedná se o aktivní členy, které tvoří polovodičové prvky a pasivní členy, což jsou rezistory, tlumivky, atd.
- **Jistící** - chrání elektrický obvod a okolí před účinky poruchových stavů jako např.:
 - přetížení (pojistky, jističe, relé),
 - přepětí (bleskojistky),
 - ohrožení zdraví osob, zvířat a majetku (chrániče).
- **Spojovací** - pro trvalé spojení (svorkovnice, zásuvky, armatury apod.).
- **Měřicí** (měřicí přístroje a jejich příslušenství).
- **Ostatní** (odporníky, tlumivky, elektromagnety apod.).

Elektrické přístroje slouží k:

- požadovanému připojení, zapojení spotřebiče, popř. rozvodu,
- jistění spotřebiče, popř. rozvodu (proti nadproudům),
- řízení funkcí a činností,
- měření elektrických i neelektrických veličin (zvláštní skupina tzv. měřicí přístroje a systémy).



Charakteristika spínacích přístrojů:

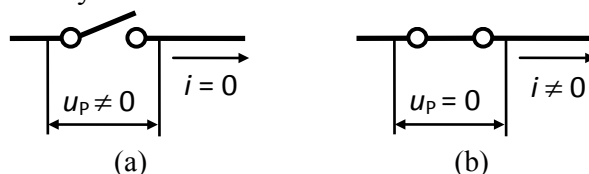
Každý Elektrický přístroj má čtyři základní stavy:

VYPNUTO - nulový proud a plné napětí na kontaktech, které určuje rozměr přístroje, viz Obr. 1.2 (a).

ZAPNUTO - nulové napětí a průchod proudů kontaktem způsobuje oteplení přístroje vlivem Jouleových ztrát, viz Obr. 1.2 (b).

Zapínání - přechod mezi stavy VYP → ZAP.

Vypínání - přechod mezi stavy ZAP → VYP.



Obr. 1.2 Elektrický přístroj s jeho základním stavem: (a) VYPNUTO, (b) ZAPNUTO

Vypínací schopnost přístroje je dána velikostí proudu, který dokáže spínač vypnout, aniž by došlo k jeho poškození.

10.2 ELEKTRICKÝ OBLOUK A KONTAKTY U ELEKTRICKÝCH PŘÍSTROJŮ

Elektrický oblouk (EO) - výboj v plynném prostředí (následná fáze elektrické jiskry popř. doutnavého výboje).

- průvodní jev při vypínání (přerušování) elektrického obvodu, kterým protéká elektrický proud nebo i při jeho zapínání (zejména u vypínačů na vn a vvn),
- následek většiny průrazů a přeskoků izolačních částí (poruchový stav).

Hlavní části oblouku:

- katodový prostor - označen **K**,
- anodový prostor - označen **A**,
- trup - označen **T**.

Vlastnosti oblouku:

- Ionizace - proces, při kterém se z neutrálního plynu (N_2 , O_2 , He, H, ...) stává plazma,
- plazma = charakteristický stav ionizovaného plynu (ionizace atomů) - 4. skupenství hmoty (6000 K),
- chování jako vodič (neplatí zde ale Ohmův zákon),
- napětí na oblouku je součtem napětí na jeho jednotlivých částech,
- vlastnosti jsou silně závislé na materiálu kontaktů.
- elektricky vodivý (10^8 A/m^2),
- vysoká teplota ($10^4 \div 10^6 \text{ K}$)
- intenzivní záření
- nelineární charakteristika, čtvrtý charakter

Zhášení oblouku:

V důsledku ochlazení dojde ke zmenšení jeho vodivosti (stupeň ionizace závislý na teplotě).

Zhášení elektrického oblouku v obvodech stejnosměrného proudu:

- prodloužením jeho délky (rozdělení na úseky),
- intenzivním ochlazováním (změna odporu oblouku v důsledku zmenšování průřezu)

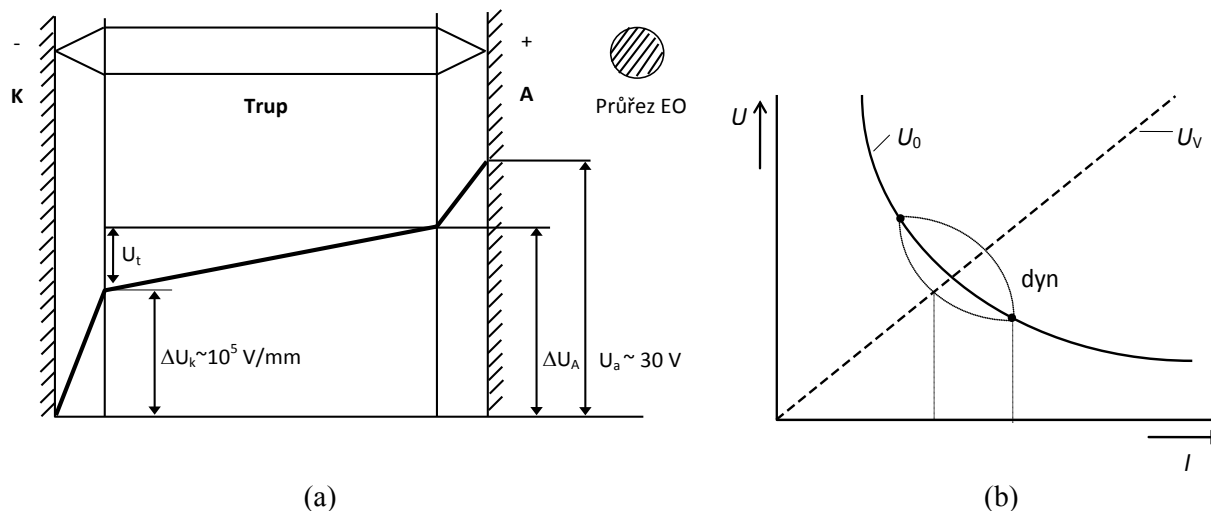


Praktická realizace: vhánění (vyfoukávání) elektrického oblouku prostřednictvím magnetického pole do zhašecí komory opatřené úzkými štěrbinami.

Zhášení elektrického oblouku v obvodech střídavého proudu:

- lepší podmínky než u stejnosměrného oblouku (samovolné zhašení neboli obnovení izolačního stavu při průchodu proudu nulou),
- potřeba chlazení a rychlé deionizace prostředí mezi kontakty (nejrychlejší je to ve vakuu).

Na Obr. 2.1 (a) je zobrazeno rozložení napětí na oblouku a Obr. 2.1 (b) znázorňuje statickou charakteristiku oblouku.



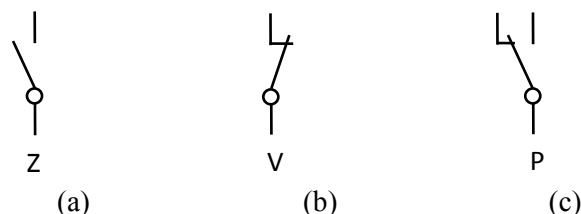
Obr. 2.1 (a) Rozložení napětí na oblouku, (b) Statická charakteristika oblouku

Kontakty (základní prvky) u ESPř:

Podstata činnosti je ve změně elektrického odporu části obvodu mezi kontakty:

- $R = \infty$ při vypnutém stavu,
- $R \cong 0$ při zapnutém stavu (závisí na velikosti proudu, stavu kontaktů a prostředí),
- provedení kontaktů podle různých kritérií dle:
 - místa styku - bodové, přímkové, plošné,
 - konstrukce - nožové, palcové, kartáčové, lamelové, atd.,
 - celkové uspořádání mechanismu - pákové, můstkové, suvné,
 - funkce - spojovací (pracovní), rozpojovací (klidové), hlavní, opalovací, pomocné.
- opotřebení kontaktů - míra životnosti a funkčnosti ESPř, (úbytek materiálu na A - kráter, nános materiálu na K - výčnělek)
- materiál kontaktů:
 - neušlechťené - nejčastěji Cu a jeho slitiny (bronz, mosaz),
 - Ag (odolné proti atmosférické korozi),
 - poloušlechťené - spékané materiály (slinuté kovy, W, Ni, Cu, Ag, C), mechanicky a tepelně odolné.

Na Obr. 2.2 (a) až Obr. 2.2 (c) jsou ukázány grafické značky zapínacího, vypínacího a přepínacího kontaktu.



Obr. 2.2 Označování kontaktů ve schématech (grafické značky): (a) zapínací, (b) vypínací, (c) přepínací

10.3 JISTÍCÍ PŘÍSTROJE

10.3.1 Pojistky

Pojistky jsou přístroje, u kterých se přetavením určených součástí (tavných vložek) přeruší obvod, ve kterém jsou zapojeny, za předpokladu, že proud pojistkou přesáhne po stanovenou dobu stanovené hodnoty. Ve schématech se pojistky značí písmenem F (FU) a jejich značka je uvedena na Obr. 3.1. Pojistky se používají k jištění rozvodu nebo elektrického zařízení před nadproudem, který by mohl způsobit jejich poškození, případně úraz.

Základní funkce pojistky:

- Přerušení obvodu v důsledku přetavení drátku, případně pásku umístěného v tavné vložce obsahující zhášelo - křemičitý písek. K přetavení dochází teplem vznikajícím při průchodu proudu.
- Omezení zkratového proudu v obvodu za pojistkou (v důsledku rychlého působení v 1. půlperiodě zkratového proudu).

Konstrukční části pojistek:

- Pojistková vložka (patrona),
- pojistkový spodek (držák), případně ukazatel indikace zapůsobení.

Mechanické provedení pojistek:

- trubičkové (skleněné, požívané u domácích spotřebičů a elektronických obvodů),
- závitové (E13, 27, 33),
- nožové (zásuvné),
- válcové,
- speciální (např. v auto instalacích, apod.).

Při průchodu zkratového proudu i_k je teplo vznikající v tavné vložce pojistky:

$$Q = R_p \int_0^{t_t} i_k^2 dt \quad (1)$$

kde R_p je odpor pojistkové vložky a t_t je doba tavení vložky.

Pojistka propustí do elektrického obvodu energii úměrnou propustnému integrálu (tzv. Joulovu integrálu):

$$[I^2 \cdot t]_{\text{prop}} = \int_0^{t_k} i_k^2 dt = \int_0^{t_t} i_k^2 dt + \int_{t_t}^{t_v} i_k^2 dt \quad (2)$$

kde t_k je vypínací doba pojistky. Integrál je možno dále rozložit na tavný integrál - závislý na vlastnostech pojistky a zhášecí integrál - závislý na parametrech a vlastnostech jištěného obvodu.

Pojistka tedy vypíná zkratový proud během jeho nárůstu, a tím vlastně dochází k omezení zkratového proudu tekoucího obvodem na hodnotu tavného proudu pojistky. Z hlediska omezení je nejnejpříznivější zkrat s velkou počáteční strmostí proudu.

Schopnost pojistky omezení zkratového proudu se vyjadřuje pomocí tzv. omezovacích charakteristik pojistky uváděných v dokumentaci – v katalozích.

Rozsahy vypínání pojistek (označuje se písmenným znakem na tavné vložce):



„g“ - tavné vložky mohou vypínat všechny nadproudy (v celém rozsahu vypínací schopnosti)

„a“ - tavné vložky mohou vypínat pouze část nadproudů.

Kategorie užití pojistek (písmeno na tavné vložce):

„G“ - všeobecné užití,

„M“ - jištění motorových obvodů,

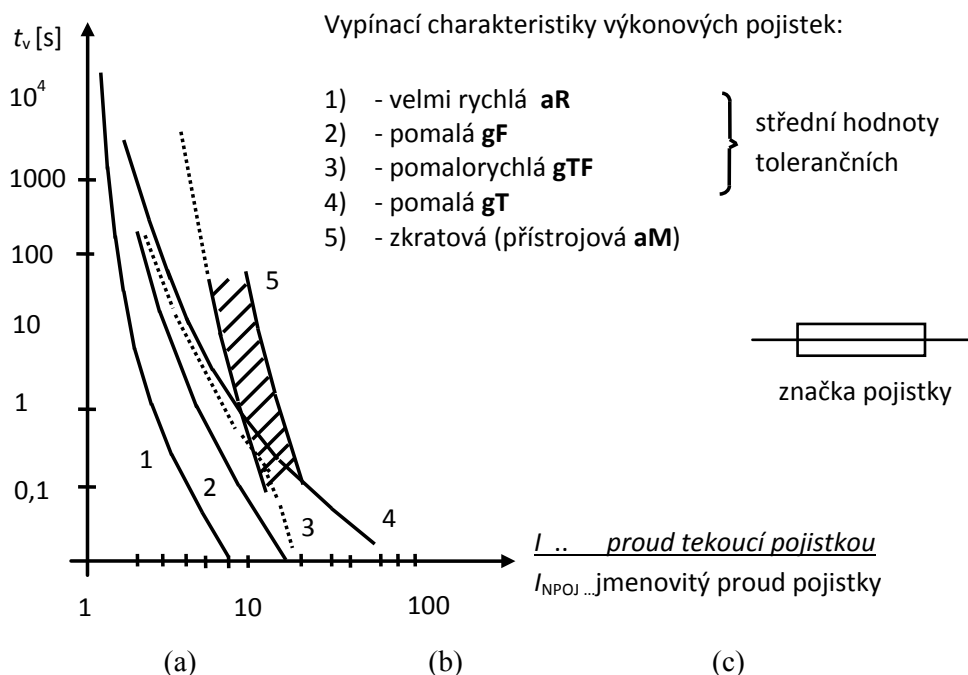
„R“ - jištění polovodičů,

„Tr“ - jištění transformátorů.

Jmenovitá vypínací schopnost pojistky:

Je to hodnota předpokládaného proudu, kterou je schopna tavná vložka přerušit (uváděno v TD).

Vlastnosti pojistek jsou udávány **vypínacími charakteristikami**, které vlastně vyjadřují střed tolerančního (rozptylového) pásma, viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Vypínací charakteristiky výkonových pojistek a jejich značka

Provedení tavných vložek pojistek dle jejich vypínacích charakteristik:

- **normální** (použití k jištění vedení),
- **pomalé** (označené znakem - šnekem - použití k jištění motorů),
- **rychlé a velmi rychlé** (k jištění obvodů s polovodičovými součástkami).

Rozdělení pojistek podle obsluhy:

- pojistky určené pro kvalifikovanou obsluhu (dříve pro průmyslové použití),
- pojistky určené pro nekvalifikovanou obsluhu (dříve pro domovní a podobné účely)
 - zajištění ochrany před nebezpečím úrazu elektrickým proudem a nezaměnitelnosti tavných vložek.

10.3.2 Jističe

Jističe jsou mechanické spínací přístroje se schopností spínání, přenášení a vypínání proudu obvodu za normálních i abnormálních podmínek (např. při zkratu). Ve schématech se jističe značí písmenem F a jejich možné typy značení jsou uvedeny na Obr. 3.2 (a).

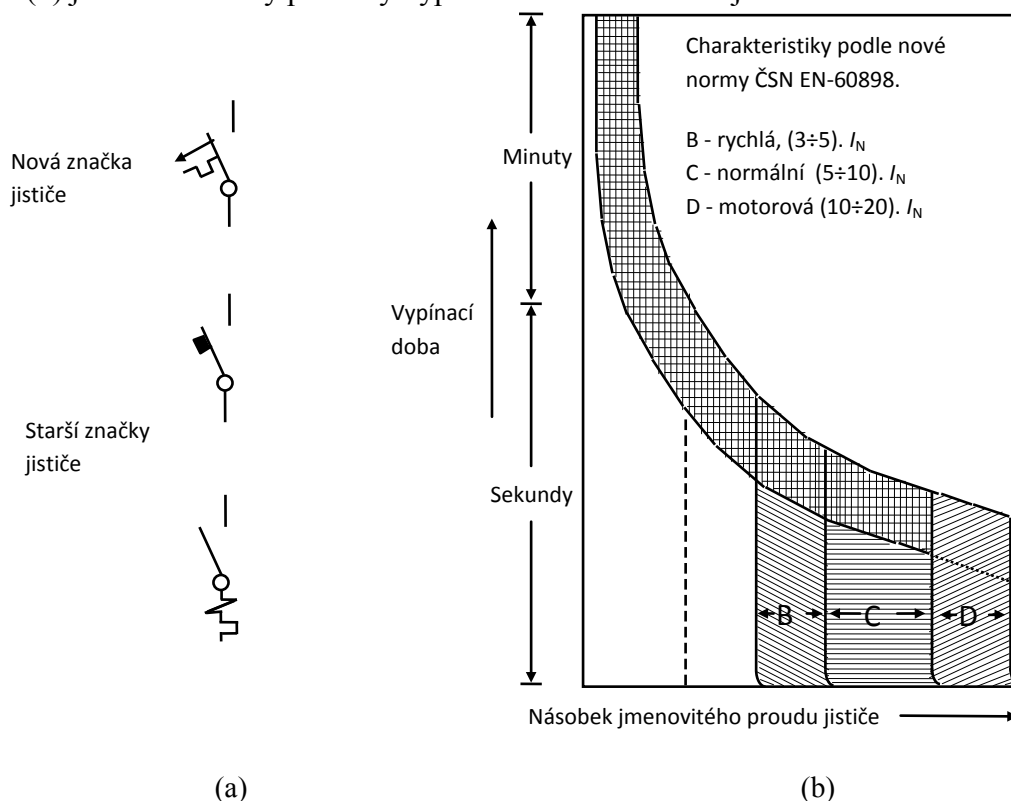
Stabilní poloha jističe je ve vypnuté poloze. Do zapnuté polohy jsou jističe uváděny vnější silou (mechanicky pomocí ovládacího elementu, případně zapínací cívkou) a jsou v ní drženy pomocí volnoběžky. Síla na vypnutí je vyvozena od pružiny. Popud k vypnutí (k vybavení volnoběžky) je mechanicky, a to buď ručně, nebo od spouští, případně cívky elektromagnetu.



Funkce jističe spočívá v jištění výkonového obvodu a zařízení zapojených za jističem před poškozením při poruše. Většina jističů je vybavena standardní nadproudovou a zkratovou spouští s možností přidavného doplnění (např. podpětovou spouští, cívkami, pomocnými kontakty a podobně).

K jištění a k ručnímu spínání střídavých motorů se používají trojpólové jističe označované jako motorové spouštěče (spouštěče motorů).

Vypínací schopnost jističů je rozdílná podle výrobce, typové velikosti a pracovního napětí. Na Obr. 3.2 (b) jsou znázorněny příklady vypínacích charakteristik jističů.



Obr. 3.2 (a) Značky jističů, (b) Vypínací charakteristiky jističů

10.3.3 Proudové chrániče

Proudový chránič je elektrický ochranný prvek, který detekuje a vyhodnocuje tzv. reziduální (rozdílový) proud vůči přednastavené hodnotě. Proudový chránič nejistí připojený obvod před nadproudy. Jeho praktické použití je spojeno s ochranou před nebezpečím úrazu elektrickým proudem.

Upozornění: proudový chránič nechrání před účinky při dvoupólovém dotyku (dotknete-li se současně dvou fází, nebo fázového a nulového vodiče).

Reziduální proud: efektivní hodnota výsledného vektoru okamžitých hodnot proudů tekoucích hlavním obvodem.

Provedení proudové chrániče z hlediska počtu pólů:

- 2 pólové - určené pro 1fázové spotřebiče připojené na L a N,
- 4 pólové - určené pro 3fázové spotřebiče, připojené na L1, L2, L3, N.

Provedení s ohledem na rychlost vypnutí:

- bez zpoždění (určen pro všeobecné použití),
- s prodlouženým vypínacím časem (např. s $t_{vmin} = 10$ ms),
- selektivní s prodlouženým vypínacím časem ($t_{vmin} = 40$ ms).

Sestava proudového chrániče obsahuje:

- proudový součtový transformátor (pro všechny pracovní vodiče),
- citlivé vybavovací relé,



- spínací mechanismus (pro všechny pracovní vodiče).

Normální pracovní podmínky (stav):

- kontakty jsou v zapnutém stavu, spotřebič je připojen,
- součet všech proudů procházejících vodiči, a tím i součtovým transformátorem je roven nule,
- indukované napětí ve vinutí je nulové $U_i = 0$.

Poruchový stav (průraz izolace, dotyk apod.):

$\sum i \neq 0, U_i \neq 0 \rightarrow$ vybavovací relé aktivuje vypínací mechanismus a kontakty se rozpojí, poté se spotřebič odpojí od napájecí sítě.

Provedení s ohledem na citlivost (druh proudu):

AC - citlivost na střídavý proud,

A - citlivost na střídavý a pulzující stejnosměrný proud,

B - citlivost jako A na stejnosměrné reziduální proudy vzniklé při usměrňování.

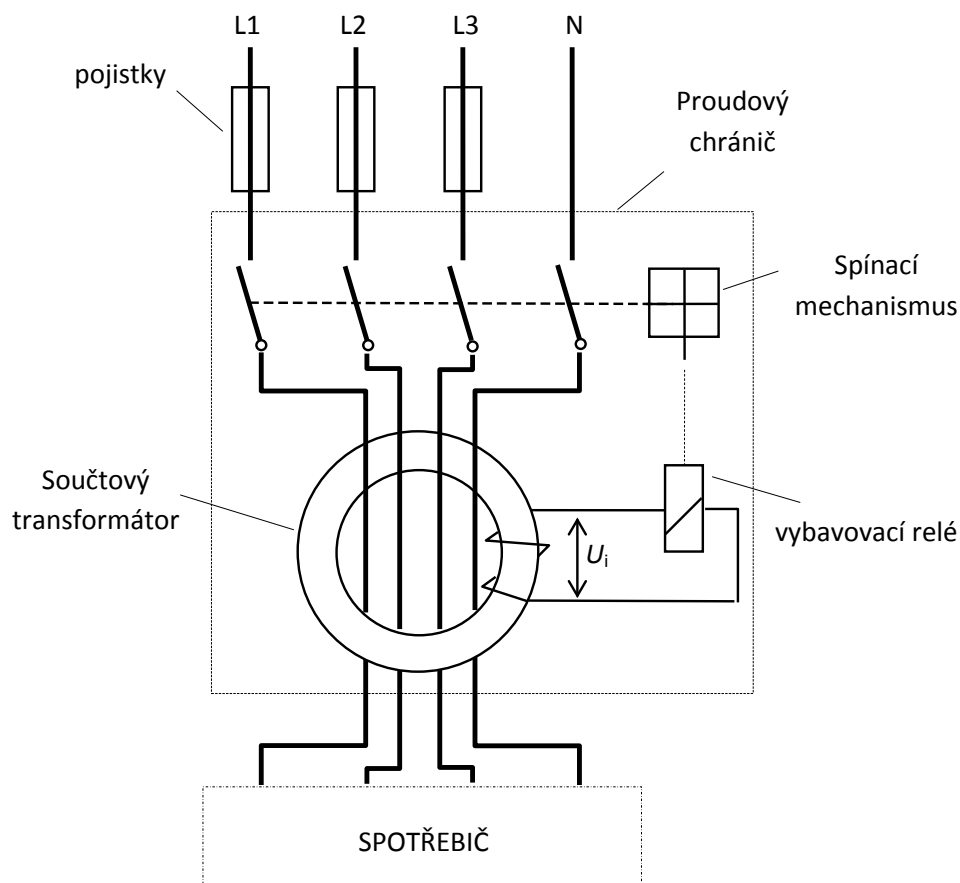
Možná mechanická provedení:

- vestavná (do rozvaděče),
- přenosná pro pohyblivé přívody (TZV. zásuvkový adaptér).

Použití:

- ochranný prvek při ochraně před nebezpečím úrazu elektrickým proudem.

V poslední době jsou k dispozici i kombinované přístroje: proudový chránič + jistič, zabezpečující jak ochranu před nebezpečím úrazu elektrickým proudem, tak i proti přetížením, případně zkratům.



Obr. 3.3 Sestava proudového chrániče (třífázového)

10.3.4 Jistící relé a spouště

Spoušť - část jističe nebo výkonového vypínače působící mechanicky na jeho vybavovací ústrojí.



Jističí relé (nebo soupravy) - jsou samostatné přístroje s kontaktními výstupy, které elektricky ovládají vybavovací ústrojí výkonových spínačů (jističů, stykačů, apod.). Některá provedení mohou být doplňkovým modulovým prvkem spínačů.

Teplná nadproudová relé a spouště - nejčastěji v provedení s bimetalovým článkem, který je napájen buď přímo proudem jištěného obvodu, nebo přes transformátor proudu. Vzniklé ztráty $P_v = R \cdot I^2$ oteplují článek a při dosažení vybavovací teploty odpovídající $1,05 \div 1,2$ násobku I_N dochází k aktivaci vybavovacího ústrojí.

Vypínací charakteristiky $t = f(I/I_{nast})$ se udávají pro teplotu okolí $20 \pm 5^\circ \text{C}$. Mají značný rozptyl vůči výchozímu studenému stavu a dají se v omezeném rozsahu měnit (např. vypínací dráhou, připojením paralelních odporů, apod.).

Do jednofázových případně do stejnosměrných obvodů je nutno vždy zapojovat všechny články trojpólových provedení přístroje.

10.4 SPÍNACÍ A SPOJOVACÍ PŘÍSTROJE

10.4.1 Spínací přístroje

Konstrukčně nejjednodušší, nikoliv svým významem. Dělení je možno provést dle množství kritérií (např. konstrukce, provedení, krytí, funkce, způsob vypnutí apod.):

samočinné spínače:

- stykače, pomocná a časová relé,

nesamočinné spínače:

- otočné a stiskací ovládače, mezní spínače (mechanické, teplotní, tlakové, rychlostní, apod.).

10.4.1.1 Stykače

Stykače jsou nejpoužívanější samočinné spínače, které mají aretovanou pouze jednu polohu (nejčastěji klidovou, tj. ve vypnutém stavu). Umožňují poměrně vysokou hustotu spínání s možností dálkového ovládání (zapínání i vypínání). Jsou základním výkonovým spínacím prvkem pro kontaktní logické řízení.

Provedení stykačů:

- vzduchové (nejčastější),
- olejové,
- vakuové.

Základní vybavení:

- ovládací cívka (elektromagnet),
- kontakty.

Druhy kontaktů:

- hlavní (silové) - kontakty přenášející výkon připojeného spotřebiče (obvodu),
- pomocné (ovládací).

Provedení kontaktů:

- zapínací - *pracovní* (Z),
- vypínací - *klidový* (V).

Popis funkce:

Přivedením napětí na ovládací cívku elektromagnetu dojde působením elektromagnetického pole k přitahu kotvy, která je spojena s pohyblivými kontakty (nejčastěji v můstkovém provedení), které se uvedou do druhé pracovní polohy (pracovního stavu zapnuto/vypnuto).

Kategorie použití stykačů s ohledem na jejich životnost:

AC-1 - Neinduktivní nebo slabě induktivní zátěž (např. odporové pece).

AC-2 - Motory s kotvou kroužkovou (spouštění a reverzace chodu).



AC-3 - Motory s kotvou nakrátko.

AC-4 - Motory s klecovým rotorem (spouštění a reverzace chodu).

AC-11 - Elektromagnety (cívky stykačů, břemenové).

Modulární (sestavné) provedení stykačů umožňuje sestavení požadované varianty (např. hlavní a pomocné kontakty, časově zpožděný kontakt, atd.).

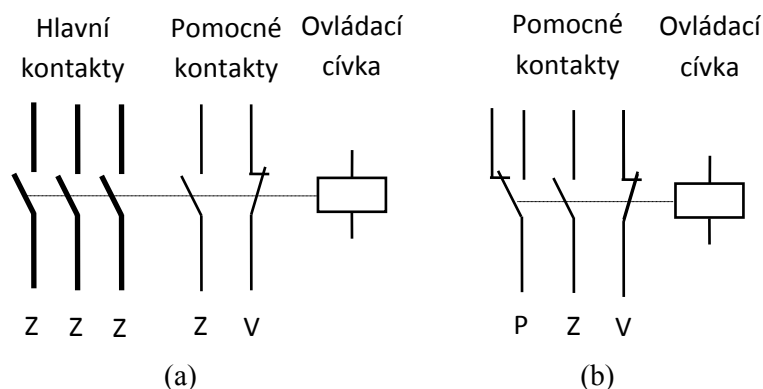
Proudová zatížitelnost stykačů se pohybuje v rozmezí $10 \div 420$ A.

Ovládání stykačů se provádí pomocí ovládacích přístrojů zapojených v obvodu ovládací cívky.

Změny stavu stykače lze v zásadě dosáhnout:

- impulzním sepnutím a vypnutím (např. tlačítka),
- trvalým sepnutím (rozpojením) kontaktu ovládacího spínače.

Schematická značka stykače je uvedena na Obr. 4.1 (a).



Obr. 4.1 (a) Značka stykače, (b) Značka pomocného relé

10.4.1.2 Pomocné stykače

Pomocné stykače jsou svým konstrukčním provedením (nízká proudová zatížitelnost kontaktů) obdobné stykačům a jsou určeny ke spínání malých výkonů (proudů).

10.4.1.3 Motorové spouštěče

Jedná se o obdobné provedení jako u stykačů s možností přímého mechanického ručního ovládání jejich stavu. Jsou určeny k zapojení do přívodu k elektrickým motorům.

10.4.1.4 Pomocná relé

Pomocná relé (zkráceně jenom relé) jsou svým konstrukčním provedením obdobná stykačům s tím, že obsahují pouze pomocné kontakty v různé sestavě vypínacích a zapínacích kontaktů. Tyto jsou určeny pro zapojení do obvodů dalších přístrojů (tzv. ovládacích obvodů) a mají malou proudovou zatížitelnost (nejsou tedy určeny ke spínání přenášeného elektrického výkonu). Provedení kontaktů je rovněž obdobné (ZAP, VYP). Často se zde navíc vyskytuje provedení přepínacího kontaktu (P). Schematická značka pomocného relé je uvedena na Obr. 4.1 (b).

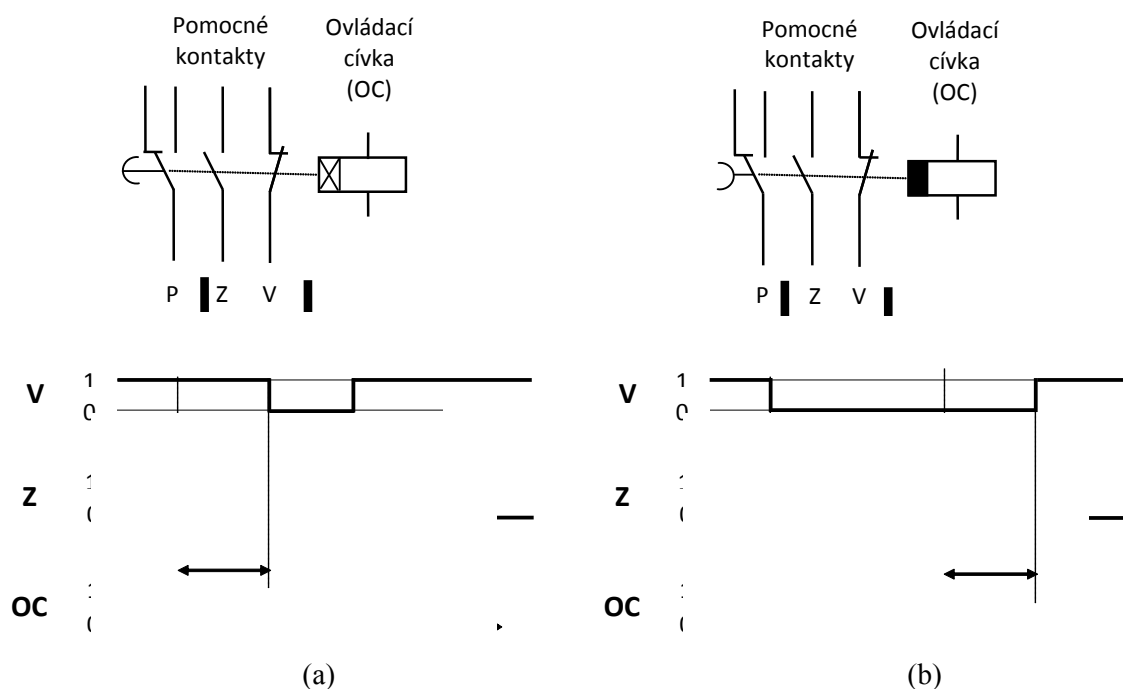
10.4.1.5 Časová relé

Časová relé umožňují dosáhnout časového zpoždění mezi připojením (odpojením) ovládací cívky k napětí a přitahem (odpadem) kotvy elektromagnetu spojené s kontakty, a tím i změny jejich stavu. Podle funkce je dělíme na časová relé:

- se zpožděným přitahem (kotvy),
- se zpožděným odpadem (kotvy).



Funkce a označení kontaktů a ovládacích cívek ve schématech je zřejmé z Obr. 4.2 (b). U většiny těchto relé lze časové zpoždění nastavit. Provedení těchto relé bývají elektromechanické (např. s hodinovým strojkem) nebo elektronické.



Obr. 4.2 Konfigurace a tabulka spínání časových relé: (a) se zpožděným přitahem, (b) se zpožděným odpadem

10.4.2 Nesamočinné spínací přístroje

Jedná se opět o obsáhlou skupinu přístrojů, které lze rozdělit podle řady kritérií:

- dle provedení kontaktů a způsobů ovládání: nožové, pákové, otočné, stiskací, kolébkové, apod.
- dle druhu ovládacího mechanismu: ručně ovládané, koncové, mezní, programové, atd.

10.4.3 Přístroje spojovací

- Svorky, svorkovnice (pevný spoj).
- Zásuvky, vidlice (snadno rozpojitelný spoj určený např. pro připojení pohyblivých (mobilních) spotřebičů, rozebíratelné prodloužení přívodu apod.). Napětí ze zdroje je zde vždy nutno přivést na izolačně chráněné části, tzv. dutinky.

Zásuvka tvoří nepohyblivou část zásuvkového spojení. Protikusem je vidlice (zástrčka). Zásuvka je pevně spojená se stěnou budovy, rozvaděče nebo stroje.

- Síťová zásuvka je konstruována pro opakované spojování a rozpojování bez použití nástrojů. Svou konstrukcí umožňuje manipulaci i naprostým laikům bez elektrotechnické kvalifikace. Toho se dosahuje důsledným dodržováním principu použití obnažených kontaktů (kolíků) na straně spotřebiče a maximálně skrytých kontaktů (dutinek) na straně zdroje energie. Na straně zdroje zůstává odkrytý pouze zemnicí kontakt, upravený tak, aby byl první, který se spojí a poslední, který se rozpojí. Aby se umožnilo používání prodlužovacích přívodů, musely být vyvinuty k zásuvce a vidlici ještě dva další přístroje:
 - Spojka je pohyblivá zásuvka, přístroj montovaný na prodlužovací kabel, který má stejné provedení jako zásuvka, je kompaktní, odolný a lze do něj zasunout vidlici.



- Přívodka je přístroj zabudovaný napevno do stěny obytného přívěsu, obytného kontejneru nebo třeba sanitky. Má ale kolíky jako vidlice a jde na něj nasunout spojka na konci prodlužovacího přívodu.

Zásuvky mohou být jednofázové i vícefázové (typicky třífázové). Podléhají standardům, tyto standardy bývají v různých částech světa odlišné. V České republice je normalizované napětí 230/400 V, 50 Hz.

- Zásuvky pro nízké napětí - Napětí se dle místních norem liší, takže někde je to 90 V, jinde 250 V ale v naprosté většině zemí je buďto cca 230 V nebo cca 115 V, (kmitočet buďto 50 Hz nebo 60 Hz) u jednofázových a od 200 V až 400 V u třífázových rozvodů. Z toho vyplývá nutnost užívat redukce nebo převodní transformátory, pokud chceme elektrické spotřebiče používat mimo oblast, pro kterou byly vyrobeny. U spotřební elektroniky vybavené odděleným síťovým adaptérem je jednodušší opatřit si nový adaptér. Například přístroje určené pro USA a Evropu často pocházející ze stejné asijské montovny se liší právě jen přiloženým síťovým adaptérem.
- Vidlice je součástí pohyblivého přívodu (kabelu) k jinému elektrickému zařízení, nebo je přímo částí tohoto zařízení (zásuvkový adaptér). Obdobné spojení datových, telekomunikačních, obecně slaboproudých rozvodů, případně kombinace silových a slaboproudých rozvodů se jmenuje konektorové spojení.
- Spojovací armatury (ke spojení holých vodičů (troleje, zemnicí vedení, bleskosvody, apod.)

10.5 ELEKTROMAGNETY

Elektromagnety jsou přístroje využívající silové účinky elektrického proudu, které se projevují silovým působením magnetického pole na feromagnetické materiály.

Magnetický obvod:

Je to část prostoru, ve kterém se uzavírá magnetický tok. Soustředění magnetického pole do určitého pracovního prostoru lze dosáhnout pomocí dobře magneticky vodivého materiálu. Nejčastěji železo, nebo v kombinaci železo a vzduchová mezera.

Obdobně jako v elektrických obvodech i zde platí Kirchhofovy zákony a zákon Hopkinsonův (obdoba Ohmova zákona).

I. Kirchhofovův zákon - algebraický součet magnetických toků v místě jejich rozdělování magnetického obvodu (obdoba uzlu u elektrického obvodu) je roven nule, jak naznačuje rovnice (3).

$$\sum \Phi = 0 \quad (3)$$

II. Kirchhofovův zákon - algebraický součet magnetických napětí v uzavřené smyčce magnetického obvodu (obdoba uzlu u elektrického obvodu) je roven nule, jak ukazuje rovnice (4).

$$U_m = \sum F_m \quad (4)$$

Hopkinsonův zákon popisuje rovnice (5), jehož grafickým vyjádřením je magnetizační charakteristika $\Phi = f(F_m)$.

$$\Phi = \Lambda_m \cdot F_m = \frac{F_m}{R_m} \quad (5)$$

Pro cívku s N závitů protékanou proudem I lze uvedené zákony aplikovat do vztahu:

$$F_m = \sum U_m = \Phi \cdot \sum R_m = N \cdot I \quad (6)$$

Magnetomotorická síla je rovna součtu magnetických napětí všech částí magnetického obvodu na uzavřené indukční čáře.



Cílem výpočtu magnetického obvodu je zpravidla určení magnetomotorické síly F_m (popř. budícího proudu cívkou I_b) pro danou velikost magnetického toku Φ (nebo indukce B) v pracovní oblasti elektromagnetu.

Pro magnetický obvod lze taky použít náhradního elektrického schématu, v němž jsou elektrické veličiny U , I a R nahrazeny veličinami magnetickými F_m , Φ , R_m .

Magnetický odpor materiálu konstantního průřezu S a stejné permeability μ je pro délku siločáry l možno zjednodušeně určit dle vztahu:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad [\text{H}^{-1}; \text{m}, \text{H.m}^{-1}, \text{m}^2] \quad (7)$$

Rozdělení elektromagnetů dle jejich použití:

přidržené - slouží k upnutí ferromagnetických předmětů při jejich přemísťování nebo opracovávání, (břemenové elektromagnety, elektromagnetické upínací desky, elektromagnetické spojky, třidiče, apod.). Charakteristický rys: celistvost magnetického obvodu, nejčastěji v provedení na stejnosměrný proud.

pohybové - (zapínací - vypínací mechanismy jističů, spínačů, ventily, brzdy, apod.). Charakteristický rys: magnetický obvod obsahuje pevnou část, pohyblivou část (kotvu) a vzduchovou mezeru.

Rozdělení EM podle druhu elektrického proudu:

stejnosměrné (konstantní proud, a tím i buzení, síla je závislá na momentálním zdvihu elektromagnetu)

střídavé (magnetický tok i indukce jsou přibližně konstantní, tzn., že je konstantní i síla)

Přitažlivá (tažná) síla elektromagnetu:

Je dána změnou energie magnetického pole - W_m při posuvu (zdvihu) pohyblivého jádra (kotvy), $x = l_\delta$.

$$F = \frac{dW_m}{dx} \approx \frac{dR_m}{dl_\delta} \quad (8)$$

Kde:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot F_m \cdot \Phi = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot \Phi^2 \cdot R_m = \frac{1}{2} \cdot \Lambda_m \cdot F_m^2 \quad (9)$$

Při zapínání a vypínání obvodu s magnety na stejnosměrný proud se jedná o přechodný děj elektrického obvodu s prvky R a L . K zamezení nežádoucích jevů a k dosažení požadovaných vlastností se proto používají následné prostředky:

- předřadné indukčnosti (tlumivky) - zvětšení časové konstanty $\tau = L/R$,
- předřadné odpory - zmenšení časové konstanty,
- ochranné odpory (diody) - omezení přepětí při vypínání.

U elektromagnetů na střídavý proud je složení magnetického obvodu provedeno z orientovaných (dynamových) plechů a je zde časová závislost tažné síly (harmonická funkce). Po připojení cívky elektromagnetu na střídavé napětí U o kmitočtu f vznikne v magnetickém obvodu magnetický tok Φ , jehož velikost lze určit z rovnice pro indukované napětí.

Napětí indukované ve vinutí s N závitů, které se nachází v magnetickém obvodu je dle indukčního zákona ($u = d\Phi/dt$) dáno vztahem (10).

$$U = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad (10)$$

Z rovnice (9) lze určit velikost magnetického toku vybuzeného cívkou připojenou k napětí U jako:

$$\Phi = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot N} \quad (11)$$



10.6 LITERATURA

Vrána V.: Elektrické přístroje, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Říjen 1998.

Vrána V., Kolář V.: Elektrické přístroje, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Únor 2006.

Internet

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

http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A9_p%C5%99%C3%ADstroje



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Základy logického řízení

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

12	ZÁKLADY LOGICKÉHO ŘÍZENÍ.....	3
12.1	Úvod	5
12.2	Používané spínací prvky v logickém řízení.....	5
12.2.1	Kontaktní logické řízení.....	5
12.2.1.1	Příklady zapojení kontaktních řídicích obvodů.....	9
12.2.2	Bezkontaktní logické řízení	11
12.2.2.1	Kombinační logické obvody	11
12.2.2.2	Sekvenční logické obvody	16
12.3	Programovatelné automaty (PLC - Programable Logical Controler).....	18
12.4	Literatura.....	22



12 ZÁKLADY LOGICKÉHO ŘÍZENÍ



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Používané spínací prvky v logickém řízení

Kontaktní logické řízení

Bezkontaktní logické řízení

Kombinační logické obvody

Sekvenční logické obvody

Programovatelné automaty (PLC - Programmable Logical Controler)



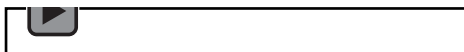
MOTIVACE:

Obvody logického řízení zpracovávají dvouhodnotové informace a mohou být značně jednoduché až komplikované s mnohými vazbami. Logický obvod má z dvouhodnotových vstupních informací vytvořit opět dvouhodnotové informace určitým způsobem závislé na dodaných informacích (zprávách o stavech veličin a procesu).

Logické řízení slouží k ovládání a řízení různých strojů. Někdy může jít o velmi jednoduché případy, jindy o složité systémy jako je automatizované řízení celé výrobní linky. Příkladem jednoduchého ovládání může být například zapínání a vypínání odstředivky dvěma tlačítky. Složitější může být potom ovládání pásové dopravy sestávající z řady na sebe navazujících dopravníků tak, že pokud se jeden z nich zastaví, musí řídicí obvod zastavit i předcházející pásy. Nejsložitějším příkladem může být automatické řízení výrobní linky, například na válcování plechů.



Audio12.1 Motivace



CÍL:

S jakými dvěma stavy pracují logické obvody a v jaké soustavě.

Jaké informace zpracovávají obvody logického řízení.

Jaké se používají spínací prvky v logickém řízení.



Co je to kontaktní logické řízení a kde se využívá.

Nakreslete schematickou značku tlačítkového spínače se zapínacím kontaktem a samočinným návratem.

Nakreslete schematickou značku stykače a relé.

Nakreslete schematickou značku nadproudového tepelného relé.

Co je to bezkontaktní logické řízení a kde se využívá.

Základní dělení logických členů.

Co je to kombinační logický obvod.

Čím se vyznačuje Booleova algebra.

Jaké jsou základní typy logických hradel.

Co je to sekvenční logický obvod.

Jaké máme základní typy sekvenčních logických obvodů.

Co je to programovatelný automat (PLC) a kde se využívá.

Jaký je rozdíl mezi kompaktním systémem a modulárním systémem.

Jaké jsou základní vlastnosti PLC.



12.1 ÚVOD

Logické obvody pracují se dvěma stavy. Je to logická 0 a 1. Log. 0 si můžeme představit jako stav „vypnuto“. Jako synonymum se používá symbol L, což pochází z anglického Low (nízký). Log. 0 má nižší napěťovou úroveň než log. 1. Log. 1 si můžeme představit jako stav „zapnuto“. Synonymum je H (High - vysoký; vyšší napěťová úroveň). Ze skutečnosti, že logické obvody pracují se dvěma stavy, je možné odvodit, že používají dvojkovou (binární) soustavu. Podobně jako desítková (dekadická) soustava (kterou běžně používáme) rozlišuje deset vzájemně rozdílných hodnot: 0 až 9, rozlišuje dvojková soustava dvě hodnoty: 0 a 1.

Řízení je definováno jako cílené působení řídicího systému na řízený objekt tak, aby bylo dosaženo určeného cíle. Je členěno na automatické a ruční.

Automatické řízení je děleno na logické, spojitě, diskrétní a fuzzy řízení.

Obvody logického řízení zpracovávají dvouhodnotové informace a mohou být značně jednoduché až komplikované s mnohými vazbami. Logický obvod má z dvouhodnotových vstupních informací vytvořit opět dvouhodnotové informace určitým způsobem závislé na dodaných informacích (zprávách o stavech veličin a procesu). Analýzu a syntézu těchto obvodů je možno provádět buď pomocí intuicí (na základě zkušeností) nebo pomocí teoreticky propracované metody – spínací (Boolovy) algebry. Výsledkem operace logického řízení je nakonec nějaký stav spínacího prvku ve výkonové (silové) části elektrického zařízení (řízeného objektu), kterým může být například pohon, ventil, brzda, spotřebič, atd. Tento spínací stav musí odpovídat určitému procesu v řídicí části obvodů logického řízení.

Jako spínací prvky ve výkonové části se převážně používají kontaktní spínací přístroje zajišťující bezpečné a spolehlivé galvanické oddělení obvodů. Bezkontaktní spínače (polovodičové prvky -tranzistory, tyristory, triaky) se zde používají hlavně v případech požadavku vysoké hustoty (frekvence) spínání a často se z hlediska bezpečného oddělení kombinují s kontaktními spínači.

12.2 POUŽÍVANÉ SPÍNACÍ PRVKY V LOGICKÉM ŘÍZENÍ

Podle druhu použitých spínacích prvků v řídicí části dělíme tyto obvody logického řízení na:

- Kontaktní, využívající kontaktní spínací přístroje (stykače, pomocná a časová relé, ovládače a čidla s kontaktním výstupem)
- Bezkontaktní využívající polovodičové součástky, obvody, moduly a systémy. Podle způsobu sestavení programu realizujícího požadované funkce rozlišujeme dále tyto obvody na:
 - Pevně programovatelné využívající prvky logických funkcí a operací v pevném zapojení realizující dle vstupních informací obsluhy, nadřazených systémů, zpětnovazebních signálů požadované funkce a chování obvodu s výstupním signálem k ovládání výkonového spínacího prvku. V praxi se jedná většinou o typové integrované obvody obsahující prvky logických funkcí (součet, součin, negace), prvky časové (zpožďovací) a klopné obvody.
 - Volně programovatelné využívající možnosti realizací nastavených řídicích funkcí výpočtem pomocí logického procesoru (automatu) nebo řídicího počítače.

12.2.1 Kontaktní logické řízení

Kontaktní logické řízení je historicky nejstarší, už od přelomu 19. a 20. století. Využívá kontaktních spínacích prvků ovládaných jak ručně (různá tlačítka) tak automaticky (relé, stykače, časová relé).

Návrh těchto obvodů je proveden v tzv. ovládacích schématu obsahujícím zapojení cívek a pomocných kontaktů spínacích přístrojů (stykačů, relé), kontaktů ovládacích, a mezních spínačů, návěstních přístrojů (signální svítidla a výstražná zařízení). Pro přehlednost a



možnost vyjádření funkce obvodu mají tato schémata určité uspořádání a používají jednotný způsob kreslení (značky) a označování (popis) prvků dané mezinárodní normou. Označení přístrojů a potenciálů musí být doplněno vzájemnými odkazy umožňující sledování funkcí a návazností jednotlivých výkresů.

Základním stavebním prvkem pro kontaktní logické řízení je stykač nebo relé. Funkce stykače a relé je obdobná, hlavní rozdíl je v tom, že stykače mají hlavní (silové) kontakty, které jsou schopné přenášet mnohem větší výkony než relé.

Stykače jsou nejpoužívanější samočinné spínače, které mají aretovanou pouze jednu polohu (nejčastěji klidovou, tj. ve vypnutém stavu). Umožňují poměrně vysokou hustotu spínání s možností dálkového ovládání (zapínání i vypínání). Jde vlastně o elektromagneticky ovládaný spínač, jenž obsahuje cívku, do které se přivede proud. Tato cívka způsobí přitažení feromagnetického jádra, které sepne kontakty.

Hlavní kontakty stykače jsou určeny pro vedení proudů, a to podle typu od 10 A až do 420 A. Pomocné (ovládací) kontakty stykače jsou určeny pro vedení menších proudů, podle typu zhruba do 20 A.

Kategorie použití stykačů s ohledem na jejich životnost:

AC-1 - Neinduktivní nebo slabě induktivní zátěž (např. odporové pece).

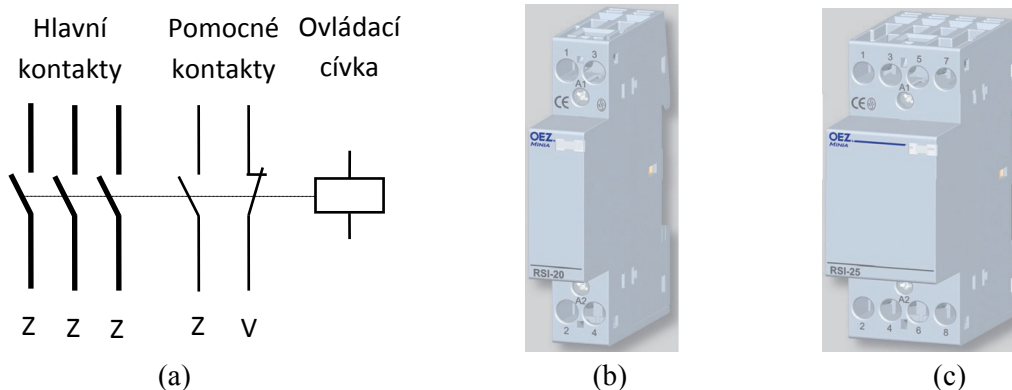
AC-2 - Motory s kotvou kroužkovou (spouštění a reverzace chodu).

AC-3 - Motory s kotvou nakrátko.

AC-4 - Motory s klecovým rotorem (spouštění a reverzace chodu).

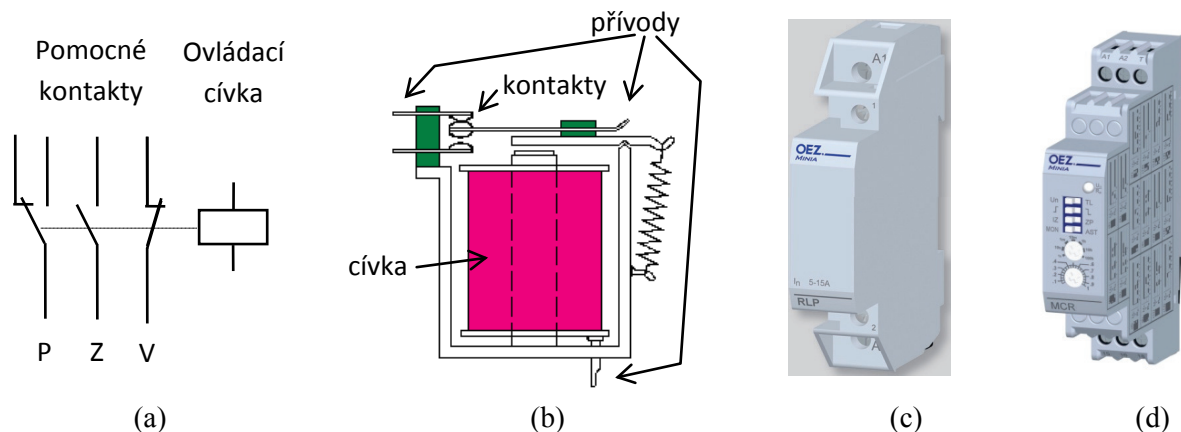
AC-11 - Elektromagnety (cívky stykačů, břemenové).

Na Obr. 2.1 (a) je zobrazena schematická značka stykače, Obr. 2.1 (b) a Obr. 2.1 (c) znázorňuje fyzické provedení 1-fázového a 3-fázového stykače.



Obr. 2.1 (a) Schematická značka stykače, (b) Fyzické provedení 1-fázového stykače, (c) Fyzické provedení 3-fázového stykače

Relé obsahují pouze pomocné kontakty v různé sestavě vypínacích a zapínacích kontaktů. Tyto jsou určeny pro zapojení do obvodů dalších přístrojů (tzv. ovládacích obvodů) a mají malou proudovou zatížitelnost (nejsou tedy určeny ke spínání přenášeného elektrického výkonu). Provedení kontaktů je rovněž obdobné (ZAP, VYP). Často se zde navíc vyskytuje provedení přepínacího kontaktu (P). Schematická značka relé je uvedena na Obr. 2.2 (a). Obr. 2.2 (b) znázorňuje základní funkční části relé a Obr. 2.2 (c) zobrazuje fyzické provedení 1-fázového relé.



Obr. 2.2 (a) Schematická značka relé, (b) Základní funkční části relé, (c) Fyzické provedení 1-fázového relé, (d) Fyzické provedení 1-fázového časového relé

Existují i relé které spínají, nebo rozpínají se zpožděním, takzvaná časová relé, viz Obr. 2.2 (d). Časová relé umožňují dosáhnout časového zpoždění mezi připojením (odpojením) ovládací cívky k napětí a přitahem (odpadem) kotvy elektromagnetu spojené s kontakty, a tím i změny jejich stavu.

Podle funkce je dělíme na časová relé:

- se zpožděným přitahem (kotvy),
- se zpožděným odpadem (kotvy).

U většiny těchto relé lze časové zpoždění nastavit. Provedení těchto relé bývají elektromechanické (např. s hodinovým strojkem) nebo elektronické. Doba zpoždění se u nich dá nastavit od řádově desetin sekund až minut.

Pro jištění proti nadproudům (přetížením) se často používají nadproudová relé - hlavně u asynchronních motorů. Tato relé mívají v sobě popudový článek (v případě trojfázového relé jsou to tři popudové články), které měří proud motorem a pokud tento přesáhne dovolenou hodnotu, tak relé vypne pomocný kontakt. Z principu nerozpojují silový obvod, ale rozpínají pomocné kontakty. Tyto kontakty se potom využívají například pro rozpojení obvodu ovládací cívky stykače. Nadproudové relé zpravidla obsahuje jeden zapínací a jeden rozpínací kontakt. Nadproudové relé vypne například motor tak, že svým pomocným kontaktem vypne stykač, jenž teprve zajistí vypnutí motoru.

V projektové dokumentaci jsou často cívka stykače a jeho kontakty kresleny každý někde jinde, ale ve skutečnosti jde o jeden prvek (jeden modul). Číselným označením lze poznat, která cívka spíná příslušné kontakty. Při zápisu a čtení těchto označení je nutná pečlivost.

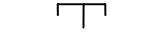
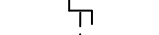
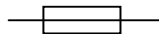
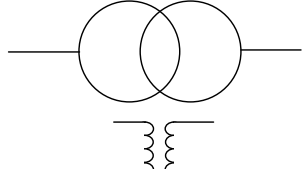
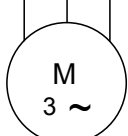
Obvody řízené logickým řízením zpravidla dělíme na dvě části:

Hlavní (také „silový“ nebo „výkonový“) obvod. Slouží k napájení samotného ovládaného stroje. Nejčastěji je trojfázový, ale může být i jednofázový, případně stejnosměrný, podle toho jaký stroj řídíme.

Ovládací (také „řídící“ nebo „pomocný“) obvod. Slouží k ovládání a bývá střídavý jednofázový nebo stejnosměrný. Může být i na menší napětí než hlavní obvod. Používají se střídavá napětí 230V a 24V nebo stejnosměrné napětí 24V, případně i jiné.

Často se kreslí schéma hlavního a ovládacího obvodu na samostatné výkresy. Ovládací obvody se často kreslí do řádků – takzvané řádkové nebo liniové schéma.

V Tab. 1 jsou zobrazeny schematické značky a označení nejčastějších prvků při kontaktním logickém řízení.

		Jakýkoliv zapínací kontakt, ať už stykače, relé, nebo spínače. Písmenné označení na výkrese je stejné jako u prvku, ke kterému kontakt patří. Je doplněné o pořadové číslice kontaktu.
	SQ	Polohový spínač se zapínacím kontaktem.
	SQ	Polohový spínač s vypínacím kontaktem.
	SB	Tlačítkový spínač se zapínacím kontaktem a samočinným návratem.
	SB	Tlačítkový spínač s vypínacím kontaktem a samočinným návratem.
	SA	Otočný spínač se zapínacím kontaktem a bez samočinného návratu.
	KA KM	Ovládací ústrojí (cívka), všeobecná značka: - cívka pomocného relé, - cívka stykače.
	KT	Cívka časového relé se zpožděným odpadem.
	KT	Cívka časového relé se zpožděným přitahem.
	FU	Pojistka.
	FA	Nadproudové tepelné relé (tepelná spoušť).
	HL	Světelné návěstí (signální svítidlo na pultech, velínech, ...).
		Akustické návěstí (houkačka).
	T	Transformátor dvouvinuťový.
	MA	Asynchronní motor s kotvou nakrátko.

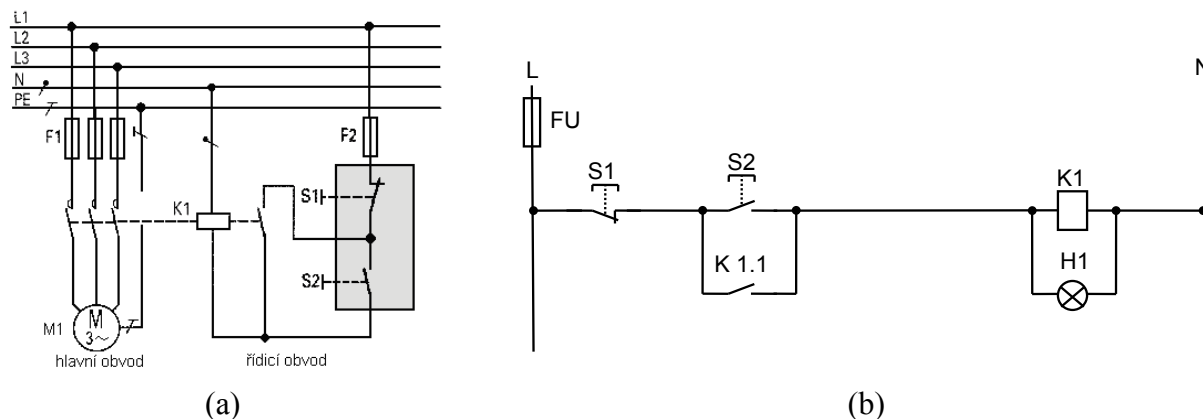
Tab. 1 Schematické značky a označení nejčastějších prvků při kontaktním logickém řízení.



12.2.1.1 Příklady zapojení kontaktních řídicích obvodů

Ovládání motoru nebo jiného spotřebiče dvěma tlačítky (start a stop):

Spínací tlačítko S2 je má funkci start, rozpínací tlačítko S1 má funkci stop. Sepnutím tlačítka S2 se uzavře obvod a cívkou stykače K1 začne protékat proud. Po sepnutí stykače K1 se spojí kontakt K1.1 a proud může protékat i po uvolnění tlačítka S2. V tomto případě se využívá pomocný kontakt stykače k napájení jeho cívk. Stisknutím tlačítka S1 se celý obvod vypne. Na Obr. 2.3 (a) je znázorněno schéma zapojení výkonové a ovládací části. Liniového schéma řídicího obvodu je zobrazeno na Obr. 2.3 (b).

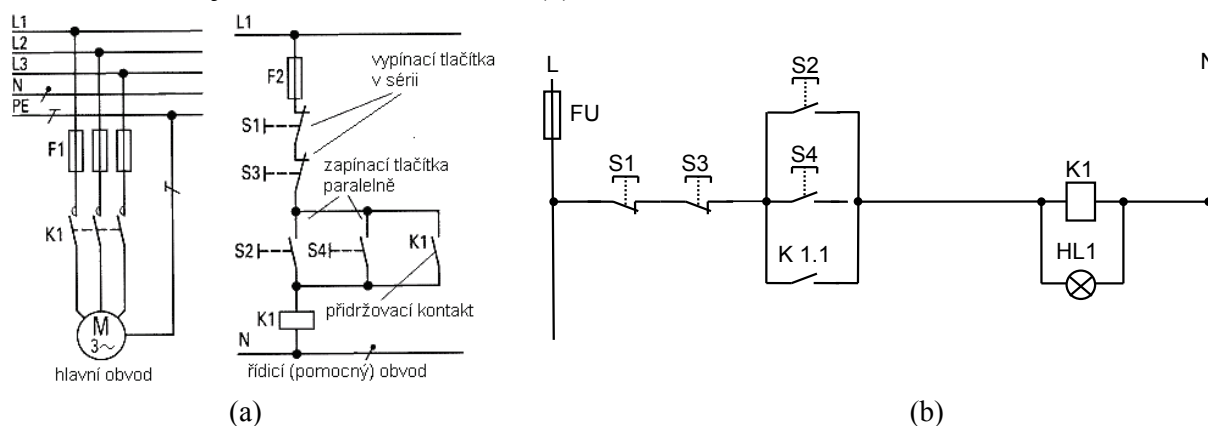


Obr. 2.3 (a) Celkové schéma zapojení, (b) Liniové schéma řídicího obvodu

Ovládání motoru nebo jiného spotřebiče tlačítky ze dvou míst (2x start a 2x stop):

Při tomto zapojení se spínací tlačítka spojují paralelně, vypínací sériově. Počet ovládacích míst lze libovolně rozšířit.

Na Obr. 2.4 (a) je znázorněno schéma zapojení výkonové a ovládací části. Liniového schéma řídicího obvodu je zobrazeno na Obr. 2.4 (b).



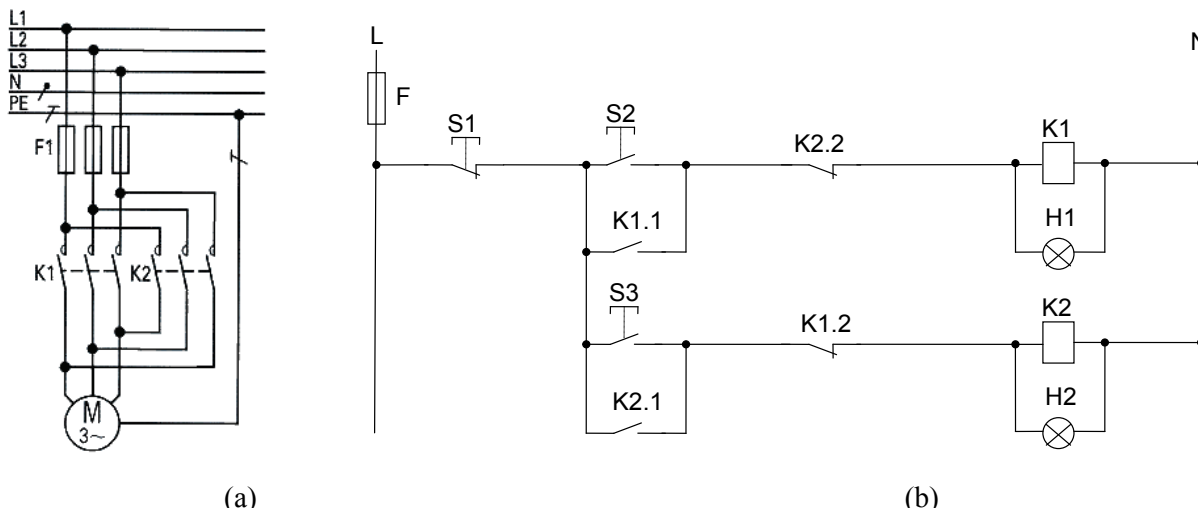
Obr. 2.4 (a) Celkové schéma zapojení, (b) Liniové schéma řídicího obvodu

Ovládání asynchronního motoru pro oba směry otáčení (reverzace):

Změna směru otáčení (reverzace) trojfázového asynchronního motoru se provede záměnou dvou fází napájejících asynchronní motor. Z tohoto důvodu jsou v zapojení použity dva stykače, stykač K1 a K2. Stykač K2 zaměňuje oproti stykači K1 fázi L1 a L3. Oba stykače nesmějí ovšem sepnout současně, jinak by to způsobilo zkrat. Aby k tomu nedocházelo, jsou tyto stykače vzájemně blokovány. Blokování provádí rozpínací kontakty K1.2 a K2.2. Je-li sepnut stykač K1, kontakt K1.2 je rozpojen a stykač K2 nelze v tomto okamžiku sepnout. Stejně tomu je, je-li sepnut stykač K2. V tomto okamžiku je kontakt K2.2 rozpojen a stykač K1 nelze aktivovat.

Na Obr. 2.5 (a) je znázorněno schéma zapojení výkonové části. Liniového schéma řídicího obvodu je zobrazeno na Obr. 2.5 (b).





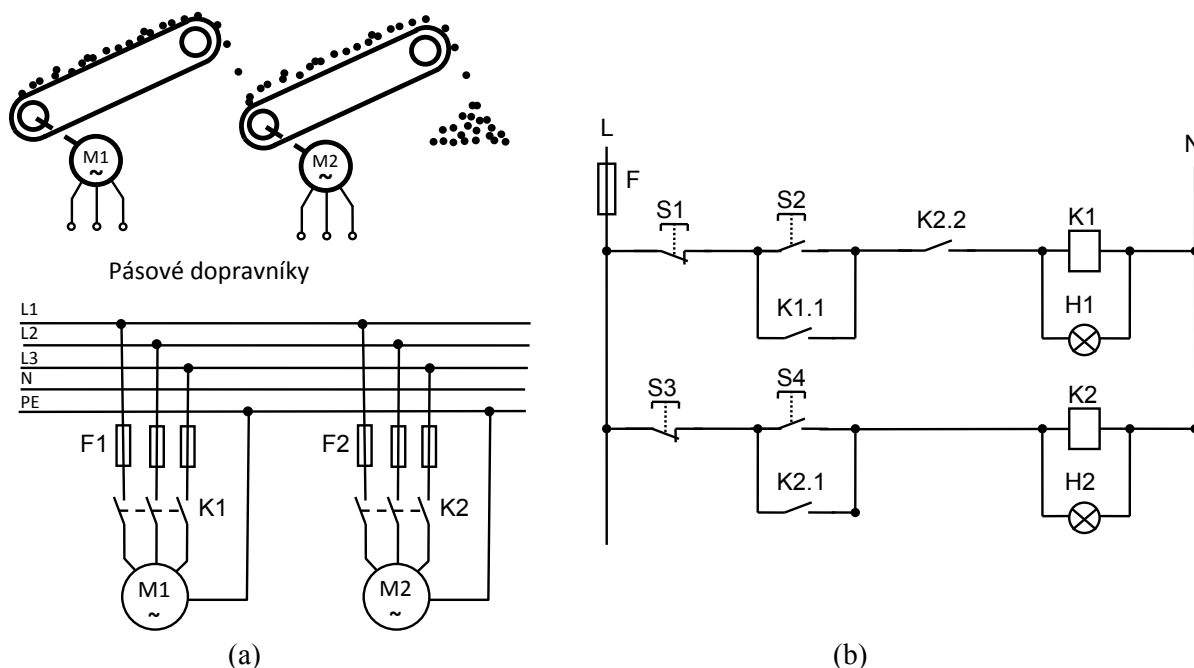
Obr. 2.5 (a) Celkové schéma zapojení, (b) Liniové schéma řídicího obvodu

Blokování se v kontaktním logickém řízení využívá často. Můžeme blokovat i na jiné podmínky než v této úloze, například aby nešly dva motory spustit současně nebo aby nešel spustit stroj, nejsou-li zavřena dvířka nebo kryt stroje (zajistí koncový spínač u dvířek), případně blokování spuštění čerpadla, není-li ve studni voda (zajistí plovákový spínač ve studni) a mnoho jiných podobných podmínek.

Ovládání dvou (a více) na sebe navazujících dopravníkových pásů:

Při této úloze musí být zajištěno, že zastaví-li se jeden z pásů (např. z důvodu nějaké poruchy), musí se zastavit i předcházející pásy, aby se dopravní cesta nezavalila materiálem, jak naznačuje následující obrázek.

Na Obr. 2.6 (a) je znázorněno schéma zapojení výkonové části. Liniového schéma řídicího obvodu je zobrazeno na Obr. 2.6 (b). Z liniového schéma řídicího obvodu lze vidět, že motor M1 je možné aktivovat pouze, když je motor M2 v provozu. Motor M2 lze spustit sepnutím tlačítka S4, které aktivuje stykač K2, jenž sepne kontakty K2.1 a K2.2. Teprve po sepnutém kontaktu K2.2 lze spustit motor M1 tlačítkem S2. Stisknutím rozpínacího tlačítka S1 se zastaví pouze motor M1. Stisknutím rozpínacího tlačítka S3 se zastaví motory M1 a M2 najednou. Tímto způsobem je zajištěno, že se nebude hromadit materiál na pásovém dopravníku, který je řízen motorem M2.



Obr. 2.6 (a) Hlavní obvod, (b) Liniové schéma řídicího obvodu

12.2.2 Bezkontaktní logické řízení

Logická proměnná má tyto dvě hodnoty:

1 ... signál existuje, výrok platí

0 ... signál **ne**existuje, výrok **ne**platí

Algebra dvouhodnotových čísel neboli základní pravidla pro počítání s těmito veličinami se nazývá **BOOLOVA algebra** a je založena na logickém součtu, součinu a negaci a platí pro ni soubor axiomů (Boolovy zákony).

Logická funkce vyjadřuje závislost jedné nebo více výstupních (závisle) proměnných na jedné nebo více vstupních (nezávisle) proměnných.

Určitou logickou funkci pro soubor vstupních proměnných lze zapsat:

- Tabulkou (Logická tabulka je algebraickým vyjádřením logické funkce)
- Algebraickým výrazem
- Blokovým schématem
- Karnaughovou mapou.

Mechanismy, které zpracovávají dle určité funkce signál, se nazývají logické členy (obvody).

12.2.2.1 Kombinační logické obvody

Kombinační logický obvod je takový, u kterého závisí výstup pouze na okamžitých hodnotách vstupů. Můžeme také říci, že výstup je logickou funkcí vstupů a obvod nevykazuje paměťový efekt (pokud zanedbáme zpoždění průchodu signálu obvodem). Nezávisle proměnné nabývají pouze dvou hodnot (0, 1). Nezávisle proměnné n mohou nabývat hodnot 2^n . Jedna nezávisle proměnná ($n = 1$) může nabývat čtyř hodnot.

V logických obvodech platí pravidla poněkud odlišná od pravidel běžných matematických operací. Soubor těchto pravidel se obvykle označuje jako Booleova algebra.

Logická negace (NOT):

Logická negace je nejjednodušší logickou funkcí, přesto je velmi často používána. Negace pracuje s jediným operandem a výsledkem je jeho negace. Tedy k log. 0 vrací log. 1 a naopak. Situaci zachycuje Tab. 3. (e).



Pravidlo dvojí negace:

Pravidlo dvojí negace se používá často při minimalizaci logické funkce. Pokud logickou hodnotu znegujeme dvakrát, dostaneme původní hodnotu. To lze snadno dokázat: první negace log. 1 nám vrátí log. 0, druhá pak log. 1. Podobně to dopadne pro případ log. 0.

Logický součin (AND):

Logický součin pracuje se dvěma nebo více operandy. Výsledkem je log. 1, pokud všechny vstupní operandy zaujímají stav log. 1. V opačném případě (tedy má-li alespoň jeden nebo všechny z operandů hodnotu log. 0) log. 0. Situaci zachycuje Tab. 3. (a).

Logický součet (OR):

Logický součet může být na pochopení komplikovanější. Logický součet pracuje se dvěma nebo více operandy. Výsledkem je log. 1, pokud alespoň jeden ze vstupních operandů zaujímá stav log. 1. Log. 0 je na výstupu jen v případě, pokud mají všechny vstupní operandy hodnotu log. 0. Situaci zachycuje Tab. 3. (b).

Výlučný logický součet, logický komparátor (XOR):

Výlučný logický součet je ještě komplikovanější než logický součet. Výlučný logický součet pracuje se dvěma operandy. Výsledkem je log. 1, pokud se hodnoty obou operandů liší (jeden má hodnotu 1 a druhý 0 či opačně). Log. 0 je na výstupu v případě, že jsou hodnoty obou operandů stejné, viz Tab. 2.

A	B	$Y = A \oplus B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tab. 2 Pravdivostní tabulka funkce XOR

Výlučnost spočívá ve skutečnosti, že výlučný logický součet se od prostého logického součtu liší pouze posledním řádkem v pravdivostní tabulce. Obvod realizující výlučný logický součet se často označuje jako logický komparátor, protože porovnává (komparuje) hodnoty na vstupech. Pokud se hodnoty liší, je výsledkem log. 1, při shodě hodnot vstupů je to log. 0. Operace logického součinu a součtu spolu souvisí natolik, že je možno stanovit převodní pravidla mezi logickým součtem a součinem (tzv. De Morganova pravidla):

$$A + B = \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}} \quad (1)$$

$$A \cdot B = \overline{\overline{A} + \overline{B}} \quad (2)$$

Tato pravidla se používají hlavně při minimalizaci logické funkce. Jednoduchou úvahou lze odvodit dalších pět velmi jednoduchých, ale také velmi důležitých pravidel:

$$\overline{\overline{A}} \cdot A = 0 \quad (3)$$

$$A \cdot A = A \quad (4)$$

$$A \cdot 1 = A \quad (5)$$

$$\overline{\overline{A}} + A = 1 \quad (6)$$

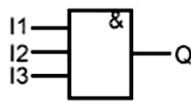
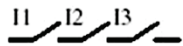
$$A \cdot 0 = 0 \quad (7)$$

Základních typů logických hradel by mělo být právě tolik, kolik je logických funkcí. S ohledem na možnou minimalizaci logické funkce, je těchto typů dvakrát tolik, protože mohou být opatřeny logickou negací na výstupu. Toto množství se ještě dále rozroste, protože hradla realizující logický součet nebo součin mohou mít rozdílný počet vstupů.

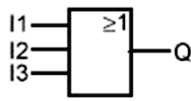
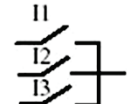


Úloha obvodů NAND a NOR by měla být zřejmá, logický součin (resp. součet) je doplněn negací výsledku. Tyto obvody jsou často používány při minimalizaci logické funkce, lze s nimi realizovat jakoukoli kombinační logickou funkci.

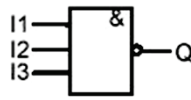
Úloha sledovače může být na první pohled nepochopitelná. Sledovač se používá nejčastěji v případech, kdy je třeba oddělit dvě místa v obvodu. Například proto, abychom nepoškodili průběh logického signálu přílišným zatížením. Každé logické hradlo má omezenou zatížitelnost (obvykle se udává počtem vstupů hradel, které můžeme na výstup připojit). Pokud zatížitelnost překročíme, může dojít k deformaci signálu nebo poškození logické úrovně. Rovněž se vyrábějí speciální sledovače s výkonovým výstupem (můžeme je použít například pro buzení kotvy relé) a také sledovače pro přizpůsobení logických úrovní signálů různých rodin logických obvodů.

Typ	Značka	Logická tabulka	Ekvivalent v kontaktní logice																																				
AND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>I1</th><th>I2</th><th>I3</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	I1	I2	I3	Q	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	 I = 0 klidový stav (rozpojený) I = 1 v činnosti (sepnutý)
I1	I2	I3	Q																																				
0	0	0	0																																				
0	0	1	0																																				
0	1	0	0																																				
0	1	1	0																																				
1	0	0	0																																				
1	0	1	0																																				
1	1	0	0																																				
1	1	1	1																																				

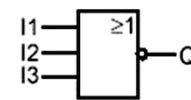
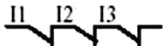
(a)

OR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>I1</th><th>I2</th><th>I3</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	I1	I2	I3	Q	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	 I = 0 klidový stav (rozpojený) I = 1 v činnosti (sepnutý)
I1	I2	I3	Q																																				
0	0	0	0																																				
0	0	1	1																																				
0	1	0	1																																				
0	1	1	1																																				
1	0	0	1																																				
1	0	1	1																																				
1	1	0	1																																				
1	1	1	1																																				

(b)

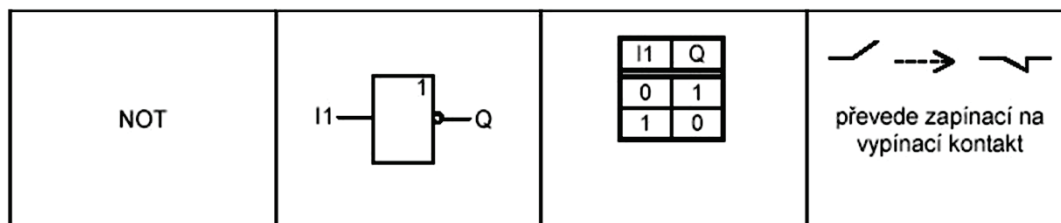
NAND		<table border="1"> <thead> <tr> <th>I1</th><th>I2</th><th>I3</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	I1	I2	I3	Q	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	 I = 0 klidový stav (sepnutý) I = 1 v činnosti (rozpojený)
I1	I2	I3	Q																																				
0	0	0	1																																				
0	0	1	1																																				
0	1	0	1																																				
0	1	1	1																																				
1	0	0	1																																				
1	0	1	1																																				
1	1	0	1																																				
1	1	1	0																																				

(c)

NOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th>I1</th><th>I2</th><th>I3</th><th>Q</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	I1	I2	I3	Q	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	 I = 0 klidový stav (sepnutý) I = 1 v činnosti (rozpojený)
I1	I2	I3	Q																																				
0	0	0	1																																				
0	0	1	0																																				
0	1	0	0																																				
0	1	1	0																																				
1	0	0	0																																				
1	0	1	0																																				
1	1	0	0																																				
1	1	1	0																																				

(d)





(e)

Tab. 3 Přehled základních logických funkcí a členů

Základní parametry logických hradel:**Vstupní odběr (I_{VST}):**

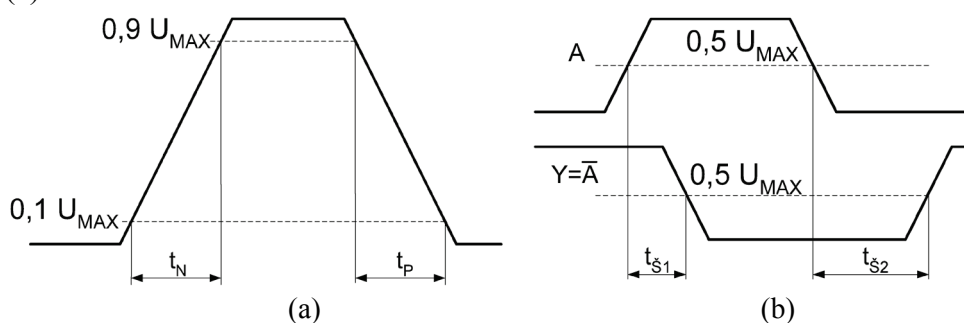
Vstupní odběr je proud odebíraný jedním vstupem logického hradla. Podle typu technologie výroby může být proud v absolutní hodnotě stejně veliký pro log. 0 i log. 1 nebo se může pro oba stavy lišit.

Zatížitelnost výstupu N:

Zatížitelnost výstupu udává maximální možný odběr z výstupu hradla, při kterém jsou zaručovány napěťové úrovně logických stavů a hodnoty dob náběhu a sestupu a šíření signálu ze vstupu na výstup. Zatížitelnost se udává jako počet vstupů hradel, které lze na výstup připojit. Například: $N = 10$ znamená, že na výstup lze připojit 10 vstupů hradel ze stejné rodiny. Výjimečně je zatížitelnost udána v jednotkách elektrického proudu.

Doba náběhu (t_N) a poklesu (t_P):

Doba náběhu udává čas potřebný k náběhu výstupu z 10 % maxima na 90 % maxima. Doba poklesu udává čas potřebný pro pokles signálu z 90 % maxima na 10 % maxima, viz Obr. 2.7 (a).



Obr. 2.7 (a) Znázornění dob náběhu a poklesu, (b) Znázornění doby šíření

Doba šíření (t_s , také doba průchodu či zpoždění signálu):

Doba šíření udává čas potřebný pro reakci výstupu na změnu vstupu. Obr. 2.7 (b) zobrazuje dobu šíření pro případ invertoru (na vstupu přechází signál z log. 0 do log. 1 a zpět, na výstupu je invertován).

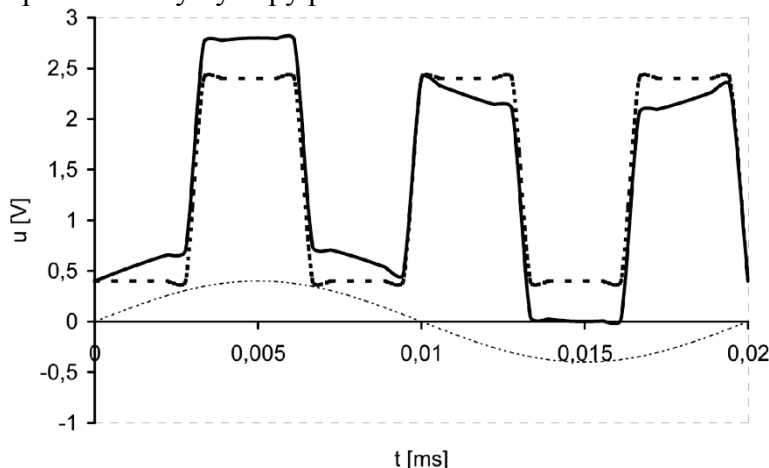
Jak je z Obr. 2.7 (b) patrné, stanovuje se doba šíření mezi body 50 % maxima. Dále je patrné, že z principu může být doba šíření různá při náběžné hraně signálu (přechod z log. 0 do log. 1) a sestupné hraně (přechod z log. 1 do log. 0). V katalogu je pak udáván aritmetický průměr. U některých typů hradel jsou obě doby vyváženy (to je hlavně případ rodiny HCT).

Povolený rozlomit vstupního a výstupního napětí:

Pokud provozujeme jakýkoliv elektrický obvod, neměli bychom opomenout rušení. To může být způsobeno například superpozicí síťového kmitočtu 50 Hz na vodiče v obvodu, viz Obr. 2.8). Dále zde může působit vysokofrekvenční rušení. U nevhodně navržených systémů se může projevat rušení vzniklé samotným přepínáním hradel z log. 0 do 1. Důsledkem



rušení je fakt, že napětíové úrovně přicházející do vstupů hradel se mohou v čase měnit a poškozoval signál produkovaný výstupy předchozích hradel.



Obr. 2.8 Časový průběh vstupního obdélníkového napětí s nasuperponovanou střídavou složkou

Aby se vliv vstupního rušení minimalizoval, může se vstupní napětí pro log. 0 i log. 1 nacházet v jistém rozmezí. Například pro vstupy klasických obvodů TTL je jako log. 0 bráno napětí v rozsahu 0 až 0,8 V jako log. 1 je bráno napětí v rozsahu 2 až 5 V.

Druhé nebezpečí poškození signálu je spojeno se zatěžováním výstupu. Výstup hradla, jako u každého reálného zdroje napětí, vykazuje jistý vnitřní odpor. Rostoucí počet vstupů zatěžujících výstup vede k poklesu výstupního napětí (proto se také udává zatížitelnost). Pro klasické obvody TTL je výstupní napětí pro log. 0 v rozsahu 0 až 0,4 V a pro log. 1 v rozsahu 2,4 až 5 V.

Šumová imunita:

Šumová imunita je taková velikost napětí, která může vniknout do spojů mezi hradly, aniž by došlo k reakci na tento parazitní signál. Šumová imunita může být různá pro log. 0 a 1. Pro log. 0 je šumová imunita dána jako rozdíl mezi nejvyšší hodnotou vstupního napětí pro log. 0 a nejvyšší hodnotou výstupního napětí pro log. 0. Například pro klasické obvody TTL je to hodnota 0,4 V (0,8 - 0,4 V). Pro log. 1 je šumová imunita dána jako rozdíl mezi nejnižší hodnotou vstupního napětí pro log. 1 a nejnižší hodnotou výstupního napětí pro log. 1. Například pro klasické obvody TTL je to hodnota 0,4 V (2,4 - 2,0 V).

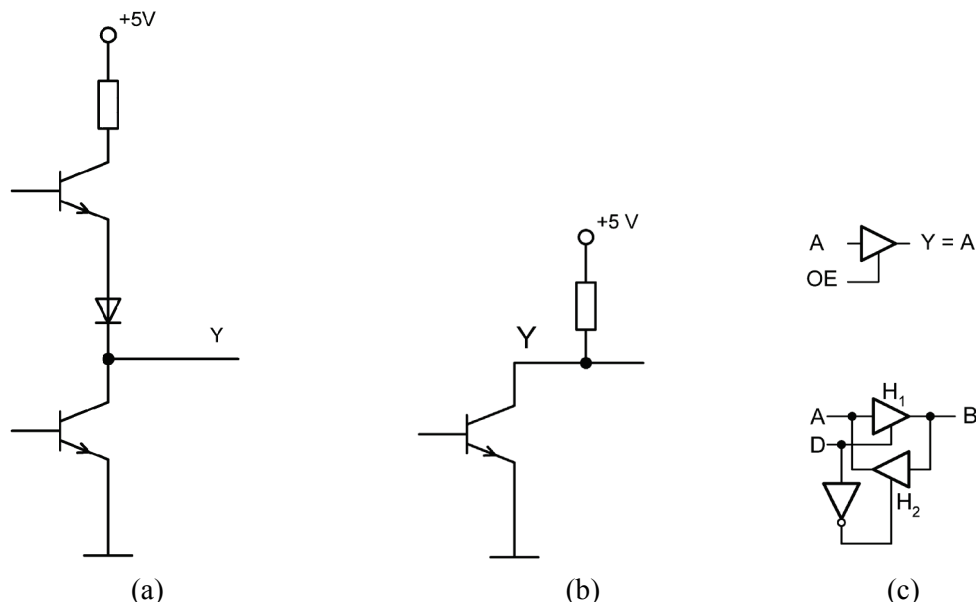
Tři typy provedení výstupu:

Přestože se může zdát, že provedení výstupu je na logických hradlech to nejméně důležité, není tomu tak. Správná volba výstupu je velmi důležitá, především z hlediska dynamických vlastností (hlavně doby náběhu a poklesu).

1) Aktivní výstup

Nejčastějším typem je tzv. aktivní výstup, viz Obr. 2.9 (a). Aktivní výstup znamená, že výstup je směrem k nulovému nebo maximálnímu napájecímu napětí „tažen“ tranzistorem. Ten může být uveden i do nevodivého stavu, takže odpadá trvalý příčný proud koncovým stupněm. Nevýhodou je však příčný proud „tranzistorovým „totemem“ při přepínání hradla (přechodu z log. 0 do log. 1), který zatěžuje napájecí zdroj špičkami a zvyšuje rušení na napájecí sběrnici. Přes velmi nebezpečný vznik přídavného rušení (lze jej eliminovat blokovacím kondenzátorem obvyklé kapacity 100 nF) na napájecí sběrnici, je tento způsob zakončení používán nejčastěji. Důvodem jsou výborné spínací vlastnosti, hlavně nízký dynamický odpor výstupu. Případná parazitní kapacitní zátěž je rychle nabíjena a tento typ výstupu dosahuje nejkratších dob náběhu a poklesu.





Obr. 2.9 (a) Provedení aktivního výstupu klasického pomocí TTL, (b) Výstup s otevřeným kolektorem, (c) Sledovač s třístavovým výstupem

2) Výstup s otevřeným kolektorem

Výstup typu otevřený kolektor znamená, že hradlo spíná tranzistorem výstup směrem k nulovému napětí. Log. 1 je přivedena pomocí zdvihacího rezistoru (pull-up), viz Obr. 2.9 (b). Použití externího rezistoru umožňuje nastavit maximální proud pro odběr v log. 1 podle aplikačních požadavků. Proto jsou tímto typem výstupu obvykle vybavována výkonová hradla.

3) Třístavový výstup

Třístavový výstup lze do jisté míry chápat jako spojení výhod aktivního výstupu a výstupu typu otevřený kolektor. Tento typ výstupu umožňuje spojování výstupů, které je však řízeno pomocným signálem. Výstup vykazuje v běžném provozu stejně dobré dynamické vlastnosti jako aktivní výstup.

Hradlo s třístavovým výstupem může zaujmout jeden ze tří stavů: log. 0, log. 1 a Z (vysoká impedance). Vysoká impedance znamená, že je výstup hradla odpojen od vývodu integrovaného obvodu. Hradlo se chová tak, jako by mezi jeho vnitřní výstup a výstup kontaktovaný na pouzdře byl vřazen rezistor s vysokou hodnotou odporu. Ovládání výstupu je řízeno samostatným vstupem hradla, který je obvykle označen OE (Output Enable). Sledovač s třístavovým výstupem je zobrazen na Obr. 2.9 (c).

12.2.2.2 Sekvenční logické obvody

Sekvenční logický obvod je takový, u něž je výstup závislý nejen na okamžitých hodnotách vstupů, ale také na předchozím stavu obvodu. Sekvenční obvody tedy vykazují paměťový efekt (pamatují si předchozí stav a uvažují jej pro sestavení výstupu). Do skupiny sekvenčních obvodů patří například klopné obvody R-S, J-K a D, čítače, posuvné registry a paměti.

Konstrukční provedení těchto členů (obvodů) je převážně jako integrované obvody. Vlastní řídicí algoritmus vznikne vzájemným pevným spojením jednotlivých členů, což neumožňuje snadnou korekci a ladění tohoto programu.

V případě, že tyto základní další možné funkce nejsou realizovány skutečnými elektronickými obvody, ale programově v zařízení výpočtové techniky, jedná o tzv. volně programovatelné řízení prakticky realizované pomocí tzv. programovatelných automatů PLC (Program Logic Control).

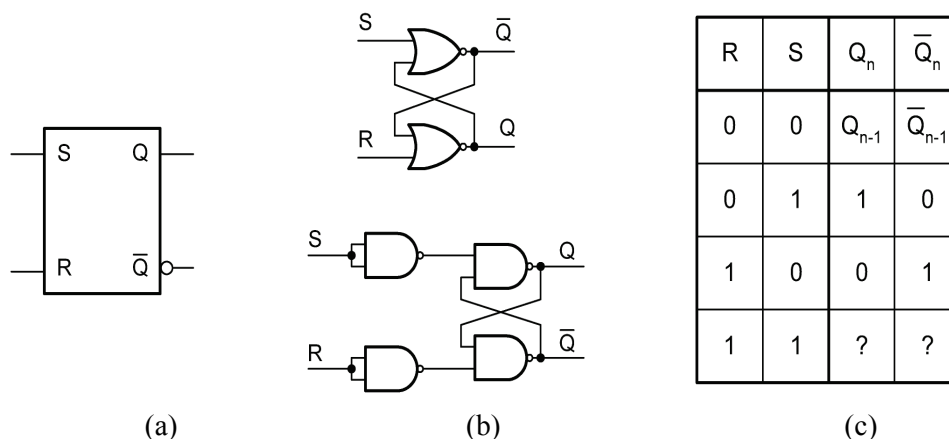


Jak už bylo řečeno, u sekvenčních obvodů je výstup závislý nejen na okamžité hodnotě vstupu, ale také na předchozím stavu výstupu. Obvod vykazuje paměťové účinky. Z toho vyplývá, že popis chování sekvenčních obvodů je obtížnější než popis kombinačních obvodů. Jestli jsme při popisu a realizaci kombinační funkce vystačili s pravdivostní tabulkou (a případně provedli minimalizaci matematickou úpravou nebo pomocí Karnaughovy mapy), v případě sekvenčních obvodů existuje mnohem více způsobů popisu a také realizace.

Základní typy sekvenčních obvodů:

- Klopný obvod R-S

Nejjednodušším sekvenčním obvodem je klopný obvod R-S. Obvod je opatřen dvěma vstupy R a S (některé varianty pracují s negacemi vstupů) a výstupem obvykle označovaným Q, který je případně doplněn negací $\bar{Q}$.



Obr. 2.10 (a) Schematická značka klopného obvodu R-S, (b) Realizace klopného obvodu R-S, (c) Tabulka stavů klopného obvodu R-S

Chování obvodu je popsáno stavovou na Obr. 2.10 (c). Možné realizace z hradel ukazuje Obr. 2.10 (b), schematická značka je na Obr. 2.10 (a). Pro vstupní kombinaci $RS = 00$ setrvává klopný obvod R-S v předchozím stavu. Výstup zopakuje v čase n hodnotu z předchozího okamžiku $n-1$ (viz první řádek na Obr. 2.10 (c)). Je-li $R = 0$ a současně $S = 1$, přechází obvod do stavu „nastaveno“ (na výstupu Q je log. 0). Kombinace $RS = 11$ je zakázanou kombinací, protože její použití způsobuje přechod obou výstupů (Q i $\bar{Q}$) do stejného stavu. Jaká bude nakonec hodnota obou výstupů určuje skutečnost, který ze vstupů je déle držen v log. 1.

Funkci klopného obvodu dle zapojení na Obr. 2.10 (b) si můžete ověřit myšleným připojováním vstupních úrovní a výpočtem logických součtů resp. součinů.

Přes nevýhodu nevhodné reakce na vstupní kombinaci 11 je klopný obvod R-S velmi důležitý, protože je to nejjednodušší zapojení vykazující paměťový efekt. Obvod si při vstupní kombinaci 00 „pamatuje“ předchozí stav výstupu. Tento obvod je základem pro vytvoření klopných obvodů D a jiných sekvenčních obvodů.

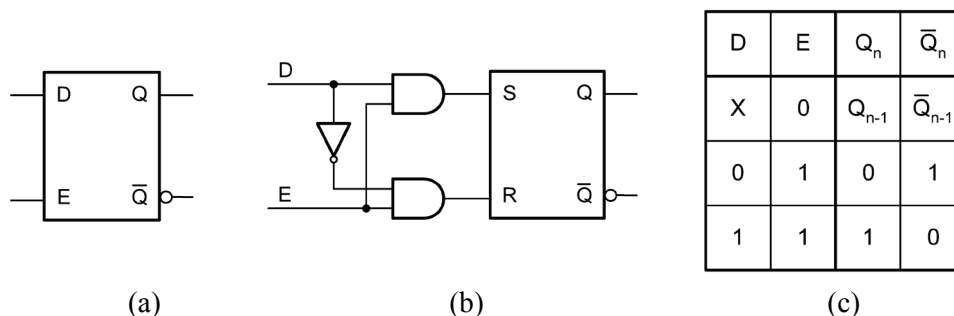
- Klopný obvod D řízený úrovní

Chování klopného obvodu D je velmi podobné paměti. Obr. 2.11 (b) ukazuje realizaci klopného obvodu D řízeného úrovní z klopného obvodu R-S doplněného několika hradly.

Je-li na vstup E (Enable) přivedena log. 0, je na výstupech obou hradel AND log. 0. Tato vstupní kombinace způsobuje přidržení předchozího stavu výstupů, Obr. 2.10 (c).

Pokud bude E připojen na log. 1, závisí výstupní stav hradel AND také na stavu vstupu D (Data). Je-li $D = 0$, je na vstup S připojena log. 0 a na vstup R zase log. 1. Podle Obr. 2.9 (b) dochází k nulování obvodu R-S. Je-li $D = 1$, je na vstup S připojena log. 1 a na vstup R log. 0. Podle Obr. 2.9 (b) dochází k nastavení obvodu. Celá situace je uvedena na Obr. 2.11 (c).





Obr. 2.11 (a) Schematická značka klopného obvodu D, (b) Realizace klopného obvodu D, (c) Tabulka stavů klopného obvodu D

12.3 PROGRAMOVATELNÉ AUTOMATY (PLC - PROGRAMABLE LOGICAL CONTROLLER)

Programovatelný logický automat je relativně malý průmyslový počítač používaný pro automatizaci procesů v reálném čase – řízení strojů nebo výrobních linek v továrně. Pro PLC je charakteristické, že program se vykonává v tzv. cyklech. V moderním pojetí je výraz PLC nahrazován výrazem PAC (z anglického Programmable Automation Controller), i když označení PLC je celosvětově hojně rozšířené a udrží se i nadále.

PLC automaty jsou odlišné od běžných počítačů nejen tím, že zpracovávají program cyklicky ale i tím, že jejich periferie jsou přímo uzpůsobeny pro napojení na technologické procesy. Převážnou část periferií v tomto případě tvoří digitální vstupy (DI) a digitální výstupy (DO). Pro další zpracování signálů a napojení na technologii jsou určeny analogové vstupy (AI) a analogové výstupy (AO) pro zpracování spojitých signálů. S rozvojem automatizace v průmyslu jsou používány i další moduly periferních jednotek připojitelných k PLC, které jsou nazývány funkčními moduly (FM) např. pro polohování, komunikační procesory (CP) pro sběr a přenos dat a další specifické moduly podle výrobce konkrétního systému.

Z hlediska konstrukce PLC se tyto dělí do skupiny „kompaktních“ a „modulárních“ systémů.

Kompaktní systém je takový systém, který v jednom modulu obsahuje CPU (Central Processor Unit), digitální a analogové vstupy/výstupy a základní podporu komunikace, v některých případech i zdroj. Rozšiřitelnost kompaktních systémů je omezena.

Modulární systém je takový systém, kde jsou jednotlivé komponenty celku rozděleny do modulů. Celý systém PLC se potom skládá z modulů: zdroje, CPU, vstupů/výstupů, funkčních modulů. Modulární systém je možno dále rozšiřovat (s ohledem na limity výstavby systému) a to v nepoměrně větším rozsahu než u kompaktních systémů.

První používané PLC byly převážně schopny zpracovávat binární logiku řízení, jejich prvotním cílem byla náhrada reléových automatů. Postupně se s rozvojem polovodičových součástek rozšiřovalo spektrum použitelnosti těchto systémů na zpracování analogových signálů, matematických funkcí (zprvu v pevné řádové čáře, postupně v plovoucí řádové čáře) až po možnost realizace složitých systémů řízení obsahující zpracování binárních signálů, analogových hodnot, komunikaci s jinými systémy, přenos dat, archivaci naměřených hodnot, vlastní diagnostiku, tiskové výstupy atd.

Původně malé počítače pro automatizaci již dorostly do výkonných řídicích systémů, kdy jádro řídicího systému (modul CPU) obsahuje i několik procesorů, z nichž má každý svoji specifickou funkci. Malé a levné jednotky CPU samozřejmě neobsahují veškeré vymoženosti a komfort jako výkonově velké CPU. U velkých CPU je architektura (více procesorů) použita z důvodu zajištění potřebné odezvy a rychlosti zpracování dat v reálném čase. Každé CPU obsahuje jeden „hlavní“ procesor, který zpracovává programový algoritmus řízení (vytvořený programátorem jako uživatelská aplikace) a další procesory, které jsou tomuto podřízeny. Tyto podřízené procesory zajišťují komunikaci po interní sběrnici s jednotkami



vstupu/výstupu, komunikaci s dalšími procesory (např. na síti), sběr dat z decentrálních periférií a další funkce. V dnešní době není výjimkou ani případ, kdy CPU obsahuje WWW server (HTML generátor), tzn., že toto CPU může být připojeno do sítě (zpravidla neveřejné) a být sledováno a řízeno použitím běžného prohlížeče WWW. Řídící jednotky některých modulárních systémů jsou ve skutečnosti klony osobních počítačů v provedení se zvýšenou odolností vůči vnějším vlivům a s upraveným standardním desktopovým operačním systémem.

Umožňují provádět logické funkce i matematické operace, přesuny bloků dat, zpracovávat spojitě signály, diskrétní signály, signály ze speciálních zařízení (např. CCD kamera, impulsní snímače polohy, atd.). Často jsou součástí většího řídicího celku, tzv. distribuovaného řídicího systému, jehož jednotlivé součásti jsou propojeny soustavou sítí.

Jejich jádrem je v podstatě mikropočítač, v jehož paměti je uložen program. K němu jsou připojeny vstupy a výstupy. V nejjednodušším případě jde o digitální vstupy a výstupy kontaktní. Na takový vstup (fyzicky je realizován jako svorka) připojíme kontaktní spínače – např. tlačítka a na výstup připojíme např. relé nebo stykače. Podle naprogramovaného programu pak PLC řídí výstupy v závislosti na vstupech.

Základní vlastnosti PLC:

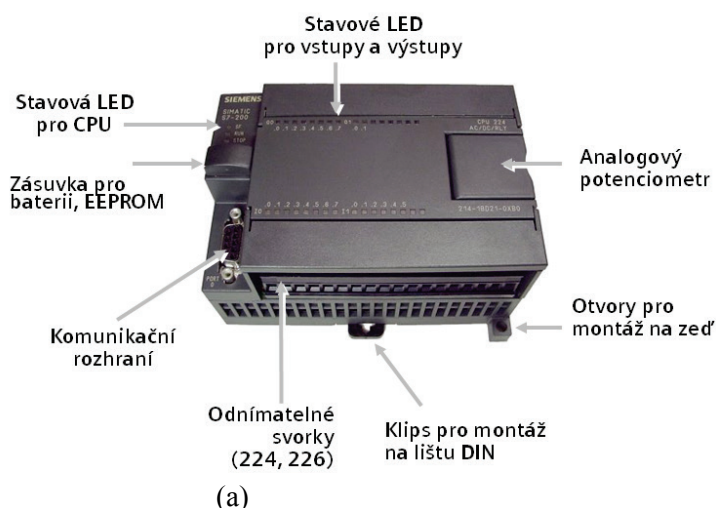
- PLC se vyznačují vysokou spolehlivostí. Výpadek řídicího systému je mnohdy nepřijatelný.
- HW je možné přizpůsobit potřebám uživatele, podle potřeb řízené technologie
- Vyznačují se vysokou odolností proti ztíženým pracovním podmínkám a rušení
- PLC zpracovává instrukce programu jednu po druhé tak, jak jsou uloženy v paměti. Po zpracování poslední instrukce, začíná zpracovávání opět od první instrukce programu (cyklické zpracování programu). Čas nutný pro vykonání všech kroků programu se nazývá **doba cyklu** (typicky 10-200 ms).
- Jednoduché programování pomocí textových, nebo grafických jazyků

Celá řada světových výrobců, např.:

Siemens	- Simatic, LOGO!
Allen-Bradley	- ControlLogix, MicroLogix, FlexLogix ...
Teco s.r.o.	- Tecomat (český výrobce)
Mitshubishi	- Mitshubishi

Programovatelný automat Simatic S7 – 200 firmy Siemens je zobrazen na Obr. 3.1 (a). Na Obr. 3.1 (b) je ukázán kompaktní Siemens LOGO obsahující CPU, 8 binárních vstupů, z nichž 2 mohou být i analogové, 4 binární výstupy a možnost zadávání programu přímo tlačítky na automatu. K tomuto „kompaktu“ je také možné připojit rozšiřující moduly s dalšími vstupy/výstupy.





Obr. 3.1 Programovatelný automat: (a) Simatic S7 – 200 (výrobce Siemens), (b) Logo (výrobce Siemens)

Rozdělení PLC:

- menší systémy bývají řešeny jako kompaktní – obsahuje CPU, MEM, I/O
- větší jako modulární – skládají se z jednotlivých karet

Mikro – jednoduché, levné, jednotky I/O (input/output), velmi jednoduché logické úlohy.

Malé – rychlé, flexibilní, desítky I/O, paměť jednotky kByte, řízení jednoduchých úloh.

Střední – vysoký výkon, všestranné, stovky I/O, paměť desítky kByte, řízení technologického procesu.

Velké – extrémně rychlé provádění instrukcí, robustní, plná podpora pro průmyslové sítě, tisíce I/O, paměť stovky kByte, řízení provozu.

Posledním trendem je distribuované řízení velkých technologických procesů. Místo centrálního řízení velkými PLC, distribuce do menších částí, které spolu komunikují přes průmyslovou sběrnici.

Možnosti vstupů a výstupů:

- Digitální vstupy a výstupy
- Analogové vstupy a výstupy (klasické nebo speciální pro termočlánky a odporové snímače)
- PROFIBUS
- Ethernet
- Modem (komunikace přes telefonní linku, dálkové přeprogramování, zasílání SMS na mobilní telefon)
- Polohovací modul (řízení krokových motorů a inteligentních servomotorů)
- RS232 nebo RS485

Programování programovatelných automatů:

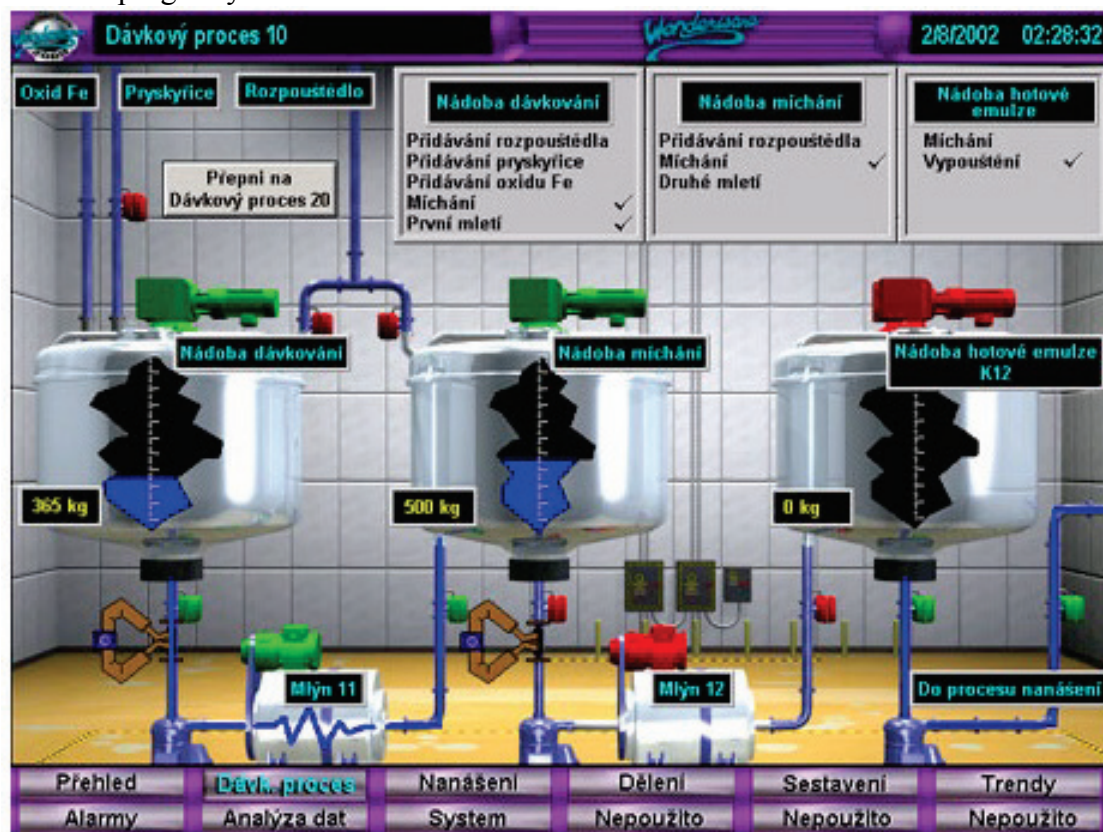
Programování se většinou provádí z počítače PC pomocí speciálního programovacího jazyka, který dodává výrobce PLC. Programovací jazyky mohou být textové nebo grafické (propojování ikon na obrazovce, program pak připomíná liniové schéma řídicího obvodu). Počítač se s automatem propojí nejčastěji pomocí sériové linky RS232.

Některé jednoduché programovatelné automaty je možno programovat tlačítky přímo z jejich čelního panelu (např. LOGO!).

Vizualizace s použitím PLC:



Po připojení PLC k síti je možné tyto ovládat z nadřazeného počítače, nebo alespoň data z nich odečtená na dálku zobrazovat nebo archivovat. To lze využít k dálkovému řízení nebo alespoň monitorování technologického procesu. K tomu se dnes často používají tzv. vizualizační programy.



Obr. 3.2 Příklad vizualizace s použitím PLC

12.4 LITERATURA

Mlčák T., Vrána V.: Základy logického řízení, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Leden 2006.

Kolář V.: Logické řízení, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Listopad 2006.

Matoušek D.: Číslicová technika, BEN – technická literatura, první vydání, Praha 2001, ISBN 80-7300-025-3.

Internet

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

http://cs.wikipedia.org/wiki/Programovateln%C3%BD_logick%C3%BD_automat



Literatura

- Mlčák T., Vrána V.: Základy logického řízení, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Leden 2006.
- Kolář V.: Logické řízení, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Listopad 2006.
- Matoušek D.: Číslicová technika, BEN – technická literatura, první vydání, Praha 2001, ISBN 80-7300-025-3.

Internet

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

http://cs.wikipedia.org/wiki/Programovateln%C3%BD_logick%C3%BD_automat



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Elektrické stroje - transformátory

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

13	ELEKTRICKÉ STROJE - TRANSFORMÁTORY	3
13.1	Úvod	5
13.2	Základní teoretický rozbor dějů v elektrických strojích.....	5
13.2.1	Indukované napětí vzniklé transformací.....	5
13.2.2	Indukované napětí vzniklé pohybem	5
13.2.3	Indukované napětí vzniklé samoindukcí	6
13.2.4	Silové účinky	6
13.3	Hlavní rozdělení elektrických strojů	6
13.4	Provedení a označování elektrických strojů točivých.....	11
13.4.1	Označení provedení elektrických strojů - dle krytí (IP kód).....	12
13.4.2	Označení provedení elektrických strojů - dle provedení chlazení (IC kód)...	12
13.5	Dovolené teploty a oteplení elektrických strojů točivých	14
13.6	Klasifikace účinností u asynchronních motorů	14
13.6.1	Provozní vlastnosti a ekonomika provozu motorů s vyšší účinností.....	15
13.7	Transformátory	16
13.7.1	Princip činnosti ideálního transformátoru.....	16
13.7.2	Princip činnosti skutečného transformátoru	17
13.7.3	Provozní stavy transformátoru	18
13.7.3.1	Transformátor při stavu naprázdno	18
13.7.3.2	Transformátor při stavu nakrátko	18
13.7.3.3	Transformátor při zatížení	20
13.7.3.4	Zatěžovací charakteristika transformátoru	20
13.7.3.5	Účinnost transformátorů.....	20
13.7.4	Konstrukce a provedení transformátorů	20
13.7.4.1	Autotransformátory	22
13.7.4.2	Měřicí transformátory	23
13.7.4.3	Speciální transformátory	24
13.8	Literatura.....	26



13 ELEKTRICKÉ STROJE - TRANSFORMÁTORY



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Základní teoretický rozbor dějů v elektrických strojích

Indukované napětí vzniklé transformací

Indukované napětí vzniklé pohybem

Indukované napětí vzniklé samoindukcí

Silové účinky

Hlavní rozdělení elektrických strojů

Provedení a označování elektrických strojů točivých

Označení provedení elektrických strojů - dle krytí (IP kód)

Označení provedení elektrických strojů - dle provedení chlazení (IC kód)

Dovolené teploty a oteplení elektrických strojů točivých

Klasifikace účinností u asynchronních motorů

Provozní vlastnosti a ekonomika provozu motorů s vyšší účinností

Transformátory

Princip činnosti ideálního transformátoru

Princip činnosti skutečného transformátoru

Pracovní stavy transformátoru

Transformátor při stavu naprázdno

Transformátor při stavu nakrátko

Transformátor při zatížení

Zatěžovací charakteristika transformátoru

Účinnost transformátorů

Konstrukce a provedení transformátorů

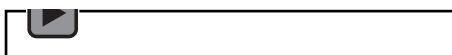
Autotransformátory



**MOTIVACE:**

Elektrické stroje jsou strojní elektromechanická zařízení, sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou (případně opačně), nebo elektrické energie opět na elektrickou, ale s jinými parametry. Elektrické stroje vždy pracují na principu elektromagnetické indukce.

Dělení elektrických strojů je poměrně obsáhlé a zahrnuje především dělení strojů podle rotačních částí, podle způsobu napájení, u střídavých strojů je to dělení podle počtu fázových vodičů, důležité je i dělení z hlediska přeměny energie a také podle způsobu pohonu, atd.

**Audio 13.1 Motivace****CÍL:**

Jakými způsoby lze vytvořit indukované napětí v cívce.

Jaký je princip vznik indukovaného napětí transformací.

Jaký je princip vznik indukovaného napětí pohybem.

Jaký je princip vznik indukovaného napětí samoindukcí.

Vyjmenujte hlavní rozdělení elektrických strojů.

Jaké je označení provedení elektrických strojů - dle tvaru.

Jaké je označení provedení elektrických strojů - dle krytí (IP kód).

Jaké je označení provedení elektrických strojů - dle provedení chlazení (IC kód).

Podle jakých kritérií se klasifikuje účinnost u asynchronních motorů.

Vysvětlete princip funkce transformátoru.

Jaké máme provozní stavy transformátoru.

Vysvětlete princip funkce autotransformátoru.

Kde se využívají měřicí transformátory.



13.1 ÚVOD

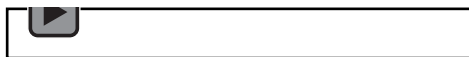
Definice Elektrického stroje (ES):

Elektrické stroje jsou vždy měniče energie, jejichž rozdělení a provedení je závislé na druhu použitého proudu a výstupní formě energie (mechanická, elektrická).

Základním předpokladem pro pochopení principu funkce jsou znalosti základních zákonů o elektromagnetickém poli a vlastnostech magnetických materiálů.



Audio 13.2 Úvod



13.2 ZÁKLADNÍ TEORETICKÝ ROZBOR DĚJŮ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

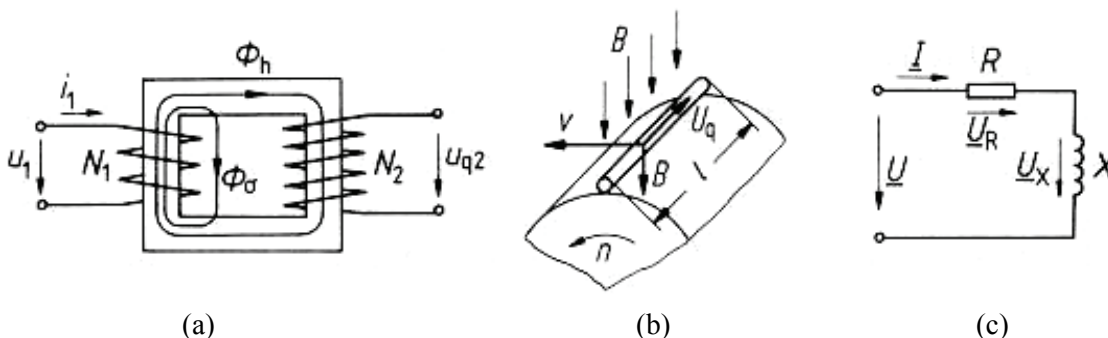
K vytvoření indukovaného napětí v cívce je potřebná změna magnetického toku zpraženého s touto cívkou. Podle způsobu dosažení této změny hovoříme o indukovaném napětí vzniklém

- transformací,
- pohybem,
- samoindukcí.

13.2.1 Indukované napětí vzniklé transformací

Jedná se zde o případ stojícího a časově proměnného magnetického pole Φ_h , jak ukazuje Obr. 2.1 (a), které prochází stojícími cívkami, z nichž jedna je budící (primární) a ostatní jsou sekundární. V sekundární cívce se bude indukovat napětí dané vztahem (1), kde N_2 je počet závitů sekundární cívky.

$$u_{q2} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_h}{dt} \quad (1)$$



Obr. 2.1 (a) Transformační napětí, (b) Indukované napětí ve vodiči

13.2.2 Indukované napětí vzniklé pohybem

Velikost indukovaného napětí je závislá na relativním pohybu magnetického pole a cívky dle vztahu (2).

$$u_q = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{x,t}}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi_x}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

Kde $\frac{d\Phi_x}{dx}$ představuje prostorovou změnu magnetického toku a $\frac{dx}{dt}$ představuje relativní rychlost mezi polem a cívkou. V praxi lze tuto závislost vyjádřit zjednodušeně vztahem (3).



$$u_q = 2 \cdot N \cdot B_x \cdot l \cdot v \quad (3)$$

Kde B_x je indukce v místě x , l je délka vodiče strany cívky a v je rychlost otáčení cívky (dx/dt). Příklad vzniku indukovaného napětí ve vodiči je ukázán na Obr. 2.1 (b).

13.2.3 Indukované napětí vzniklé samoindukcí

V cívce protékané střídavým proudem se bude indukovat napětí dané vztahem (4).

$$u_q = N_2 \cdot \frac{d\Phi_l}{dt} \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Pro případ, že proud cívkou má harmonický průběh, lze velikost indukovaného napětí vyjádřit v komplexní rovině vztahem (5), jak naznačuje Obr. 2.1 (c).

$$U_x = j \cdot X \cdot I = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I \quad (5)$$

13.2.4 Silové účinky

Na vodič protékaný proudem, který se nachází v magnetickém poli, působí síla, jejíž směr je dán tzv. pravidlem levé ruky – viz Obr. 2.2 (a).

Velikost tangenciální složky této síly působící na vodič dle Obr. 2.2 (a) je dána vztahem (6).

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (6)$$

Točivý moment vzniká součtem tangenciálních složek těchto sil působících na ramenu - poloměru.

$$M = \frac{d}{2} \cdot \sum_1^n F_i \quad (7)$$



Obr. 2.2 Silové účinky

13.3 HLAVNÍ ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Elektrické stroje dělíme:

- Podle rotačních částí:
 - Netočivé elektrické stroje - neexistují žádné pohyblivé části, primární vinutí a sekundární vinutí. (transformátor, lineární elektromotor, reproduktor).
 - Točivé elektrické stroje - jedna část je statická (stator), druhá část je rotační (rotor).



- Podle způsobu napájení:
 - stroje na stejnosměrný proud
 - stroje na střídavý proud
- Dělení z hlediska přeměny energie:
 - stroje, které přeměňují mechanickou energii na elektrickou, se nazývají generátory. Jejich úkolem je vytvořit, tedy generovat elektrickou energii.
 - Stroje, které elektrickou energii spotřebovávají, se nazývají elektrické motory, respektive elektromotory. Tyto stroje přeměňují elektrickou energii na mechanickou.

Dělení stejnosměrných strojů:

- Podle přeměny energie:
 - motory (elektromotor)
 - dynamo (elektrický generátor vyrábějící stejnosměrný proud).

Rozdělení způsobu napájení budícího vinutí:

Toto rozdělení je totožné jak pro dynamo, tak i pro motory. Stejnosměrné stroje mají buď cizí budící vinutí, nebo vlastní. Stejnosměrné stroje s vlastním vinutím mohou toto vinutí mít složeno buď z jedné části, nebo ze dvou částí. Pokud je budící vinutí pouze z jedné části, záleží na tom, jak je toto budící vinutí připojeno k vinutí kotvy. Existují pouze dvě možnosti, jak to lze provést. Buď je budící vinutí zapojeno paralelně k vinutí kotvy, pak se jedná o motor (elektromotor) nebo o dynamo s paralelním buzením.

Pokud je budící vinutí zapojeno sériově s vinutím kotvy, pak se jedná o motor (elektromotor) nebo dynamo se sériovým buzením.

Má-li budící vinutí 2 části, pak jedna část tohoto vinutí je zapojena paralelně k vinutí kotvy a druhá je zapojena sériově s vinutím kotvy. Tento typ stejnosměrného stroje se nazývá motor (elektromotor) nebo dynamo se smíšeným vinutím. Ale to stále nejsou vyčerpány všechny možnosti. Pokud má budící vinutí dvě části, tak tyto mohou být zapojeny buď tak, že se svými magnetickými účinky navzájem podporují, pak se jedná o stejnosměrný stroj s kompaudním vinutím. Pokud je budící paralelní vinutí zapojeno tak, že působí proti účinkům sériového budícího vinutí, pak se jedná o stejnosměrný stroj s protikompaudním vinutím.

Dělení strojů na střídavý proud:

- Podle počtu fázových vodičů:
 - třífázové - stroj je připojen na všechny tři fáze (třífázový proud)
 - jednofázové - stroj je připojen pouze na jednu fázi

Další dělení strojů:

- Synchronní
- Asynchronní
- Komutátorové

Synchronní stroje:

- Podle účelu respektive přeměny energie:
 - generátory
 - motory
 - kompenzátory

Synchronní generátory na střídavý proud se označují jako alternátory. Pro všechny synchronní stroje je charakteristické to, že úhlová rychlost rotoru je shodná s rychlostí postupného magnetického pole statoru - rotor se otáčí synchronně s rotujícím magnetickým polem.



- Podle způsobu pohonu:
 - turboalternátory - jsou synchronní generátory s hladkým rotorem. Hladký rotor je takový rotor, který má 1 nebo 2 pólpáry tedy 2 nebo 4 póly. Úhlová rychlost turboalternátorů je nejvyšší možná rychlost synchronních strojů pracujících v dané rozvodné soustavě s pevně daným kmitočtem. V naší rozvodné soustavě s frekvencí (kmitočtem) 50 Hz tzn., že rotor synchronního stroje s jedním pólpárem se za 1 sekundu otočí 50x (50 1/s). Z toho pouhým násobením získáme hodnotu za minutu 3000 1/min. (někdy také zapisováno jako 3000ot./min.). Pro případ stroje s 2 pólpáry je rychlost otáčení rotoru oproti předchozímu případu poloviční, tedy rotor se otočí za 1 sekundu 25x a za 1 minutu 1500x (1500 ot/min.).
 - hydroalternátory - jsou stroje s vyniklými póly. Počet pólových dvojic je podstatně vyšší než u turboalternátorů. Z toho také vyplývá, že úhlová rychlost jejich rotoru je podstatně nižší než u turboalternátorů. Je to dáno především rychlostí proudění vody, která pohání vodní turbínu.

Uvedené skutečnosti mají vliv i na další podstatné rozdíly mezi turboalternátory a hydroalternátory. Turboalternátory mají vodorovnou osu rotace, osa rotace hydroalternátorů je dána konstrukcí vodní turbíny a bývá nejčastěji svislá. Průměr rotoru turboalternátoru činí asi od 1 do 2 metrů, průměr rotoru hydroalternátoru je podstatně větší, a to 6 až 20 metrů. Rozdílné bývají také délky rotorů turboalternátorů a hydroalternátorů. Turboalternátory mají zpravidla delší rotory než hydroalternátory. Zmiňované rozměry tj. průměr rotoru a jeho délka závisí především na elektrickém výkonu generátoru.

Synchronní motory mají stejnou konstrukci jako synchronní generátory. Používají se zpravidla pro pohon zařízení s velkým výkonem, kde se požadují konstantní otáčky a kde se nevyžaduje změna směru otáčení nebo časté spouštění. Vyznačují se velkou účinností (95-98%). Mohou být nabuzeny na hodnotu účinníku $\cos \varphi = 1$, takže potom odebírají ze sítě pouze činný výkon.

Synchronní kompenzátor je synchronní stroj, který je připojen k napájecí střídavé síti a pracuje naprázdno. Jedná se o elektrický stroj s velkým výkonem, aby mohl kompenzovat jalový výkon v elektrizační soustavě. Kompenzaci jalového výkonu dochází zároveň k plynulé regulaci elektrického napětí v rozvodné síti.

Asynchronní stroje:

Asynchronní stroje se od synchronních liší především tím, že úhlová rychlost jejich rotoru je mírně odlišná od rychlosti postupného magnetického pole statoru (asynchronní = nesynchronní). Tento rozdíl rychlostí se uvádí v procentech a nazývá se skluz. Jeho hodnota se pohybuje od 1% (u strojů s velkým výkonem) do 10% (u strojů s malým výkonem). Dříve jsme se s asynchronními stroji mohli setkat převážně u elektromotorů. S rozvojem alternativních zdrojů elektrické energie se s nimi setkáváme také jako s asynchronními generátory. Otáčky rotoru jsou u synchronních generátorů vždy vyšší, než je rychlost postupného magnetického pole rotoru.

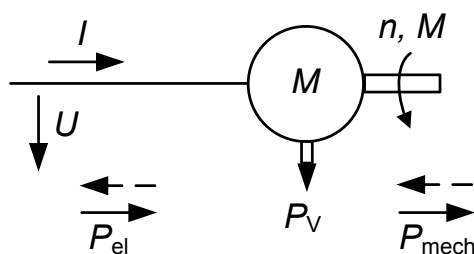


Dělení asynchronních strojů:

- Podle způsobu přeměny energie na asynchronní motory a asynchronní generátory.
- Podle počtu pracovních vodičů je dělíme na:
 - třífázové
 - jednofázové
- Podle konstrukce se asynchronní stroje rozdělují na:
 - stroje s jednoduchou klecí
 - stroje s dvojitou klecí
 - stroje s vírovou klecí a kroužkové.

Elektrické stroje točivé:

Točivý elektrický stroj je zařízení, jehož činnost je závislá na elektromagnetické indukci, které má části schopné vykonávat relativní točivý pohyb, a které je určeno pro elektromechanickou přeměnu energie. Elektrické stroje točivé přeměňují elektrickou (elektromagnetickou) formu energie na mechanickou formu energie (motory) a naopak (generátory). Mechanickým výstupem (vstupem) je otáčivý hřídel s mechanickými a kinematickými veličinami - otáčivá rychlost Ω (otáčky n), moment M , výkon (příkon) P , viz Obr. 2.3.



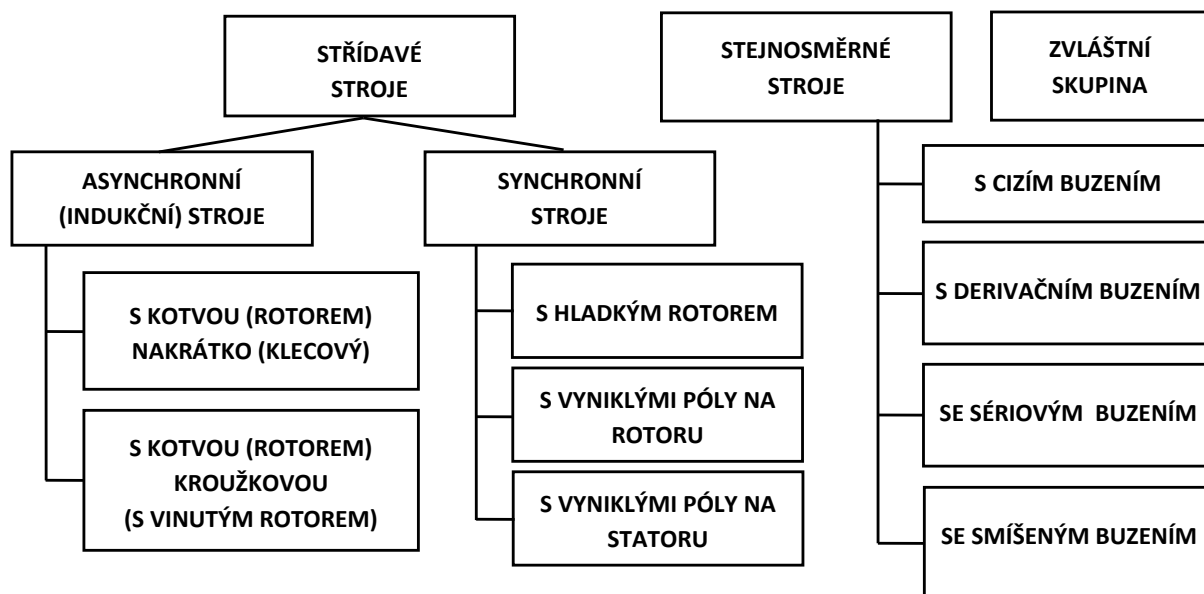
Obr. 2.3 Elektrický stroj točivý – měnič energie

Základní tradiční způsob rozdělení elektrických strojů točivých je odvozen od charakteru napájecího napětí:

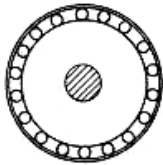
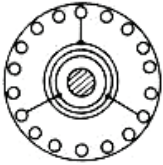
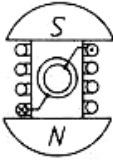
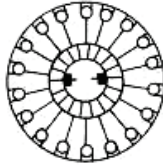
- střídavé stroje (AC stroje)
- stejnosměrné stroje (DC stroje).

Kromě těchto dvou základních skupin strojů existuje ještě řada provedení elektrických strojů točivých, které nelze jednoznačně přiřadit do některé z těchto skupin (např. univerzální, krokové, s elektronickou komutací, atd.) a dále skupina zvláštních strojů. Možné rozdělení strojů do podskupin je odvozeno od různých kritérií (obsažených v názvu) a je znázorněno dále.

V Tab. 1 je uvedeno základní rozdělení elektrických strojů. Příklady základních možných konstrukcí elektrických strojů točivých jsou ukázány v Tab. 2.

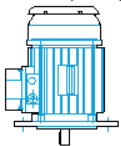


Tab. 1 Rozdělení elektrických strojů

Rotor s Stator s	klecovým vinutím	3-fázovým vinutím s kroužky	vyniklými póly vč. permanentních magnetů	vinutím a s komutátorem
				
3-fázovým vinutím	Asynchronní klecový motor, Asynchronní motor (s kotvou) nakrátko	Asynchronní motor s vinutým rotorem Kroužkový asynchronní motor	Synchronní stroj	Komutátorový motor
vyniklými póly	Motor se stíněným pólem	Synchronní stroj s vyniklými (vyjádřenými) póly	Krokový motor	Stejnusměrný stroj

Tab. 2 Základní konstrukce elektrických strojů točivých



IM 3011 (IM 3031)	IM V1 (IM V3)	přírubový s jedním válcovým koncem hřídele příruba dole (nahore), svislý hřídel	IM 3011 (IM V1) 
IM 1071	IM B8	patkový s jedním válcovým koncem hřídele normální patky nahore, vodorovný hřídel	IM 1071 (IM B8) 

Tab. 3 Tabulka běžných druhů (provedení) motoru

13.4.1 Označení provedení elektrických strojů - dle krytí (IP kód)

Tento kód definuje soubor opatření, které deklaruje stupeň ochrany:

- osob před nebezpečným úrazem osob (první číslice),
- ES před vniknutím cizích předmětů (první číslice),
- ES před vniknutím vody (druhá číslice).

Nejčastěji používané druhy krytí u elektrických strojů podle IP kódu (International Protection):

- uzavřené provedení - IP 44, IP 54, IP 55, IP 56,
- nevýbušné provedení označení Ex,
- otevřené provedení - IP 12, IP 21, IP 22, IP 23.

Pro ES pracující v prostředí s nebezpečím výbuchu platí zvláštní předpisy. Pro druhy nevýbušného provedení se zavedlo označení **EEx** a alfanumerické značení (dle ČSN EN 50014) udávající typ ochrany, skupinu nevýbušnosti a teplotní třídu.

Nejčastěji používané druhy nevýbušných provedení ES jsou s typem ochrany proti výbuchu:

- „d“ - pevný závěr
- „e“ - zajištěné provedení
- „de“ - pevný závěr (motor), zajištěné provedení (svorkovnice).

Příklad označení nevýbušného provedení motoru pro použití“

- mimo hlubinné doly: EEx d II C T4
- v hlubinných dolech: EEx d I C T4

13.4.2 Označení provedení elektrických strojů - dle provedení chlazení (IC kód)

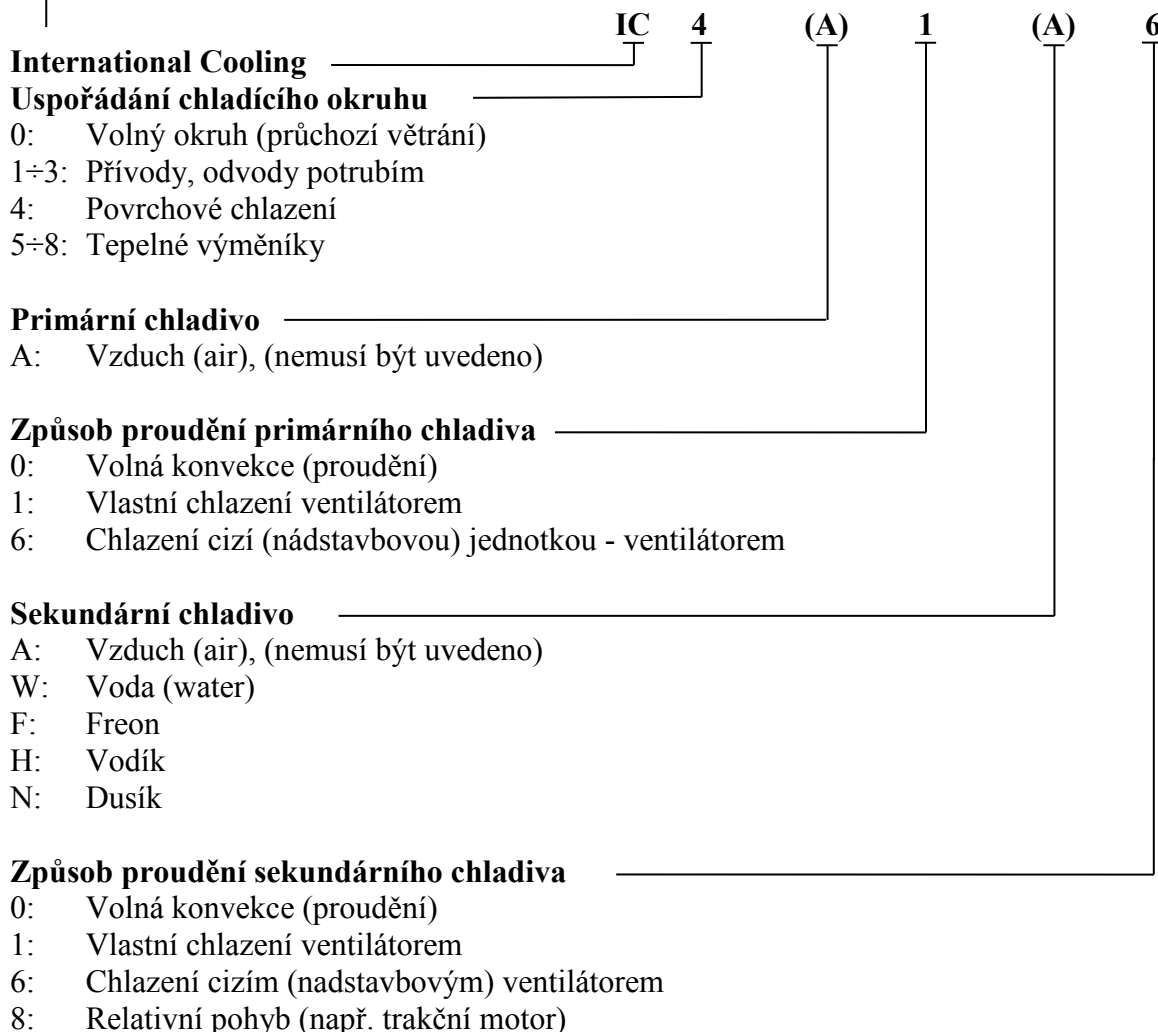
V zásadě mohou být motory s ohledem na způsob chlazení provedeny:

- s přirozeným chlazením (bez jakéhokoliv ventilátoru, chlazení je zde pouze konvekci),
- vlastním chlazením (na hřídeli motoru je ventilátor, účinek je závislý na otáčkách motoru),
- s přirozeným vlastním chlazením (dva okruhy - vnitřní konvekci, vnější s ventilátorem),
- s cizím chlazením (ventilace je od cizího zdroje nezávislého na otáčkách motoru).



Systém označování způsobů chlazení:**IC x A y W y**

- └ sekundární okruh (druh chladiva - W (voda), způsob uvádění chladiva do oběhu
- └ primární okruh (druh chladiva - A (vzduch), způsob uvádění chladiva do oběhu
- └ uspořádání chladicího okruhu (systému okruhů), (charakteristická číslice 0 až 9)



Poznámka: V pořadí první číslice označuje uspořádání chladicího okruhu (systému okruhů) a je platná pro primární i sekundární okruh. V případě zjednodušeného označení se druh chladiva neuvádí, nebo se uvede pouze u sekundárního okruhu na konci označení (vynechá se poslední číslice).

Příklady obvyklých (základních) provedení motorů:

Asynchronní motory nakrátko:

IM B3 (IM 1001) - patkový s jedním válcovým koncem hřídele a s rozměry dle tabulky rozměrů,

IP 54 - motor zavřený, krytí vnějšího ventilátoru je IP 2x dle ČSN EN 60529,

IC 411 (IC 0141) - s vlastním povrchovým chlazením,

IC 411 - úplně uzavřený standardní motor s vlastním povrchovým chlazením ventilátorem,

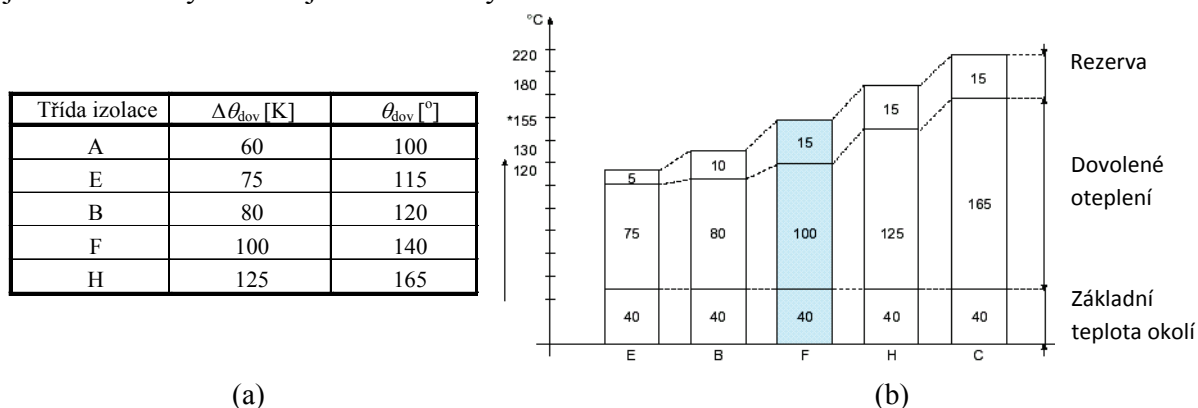
IC 416 - úplně uzavřený motor s přídavným motorem ventilátoru,

IC 01 - otevřené motory.



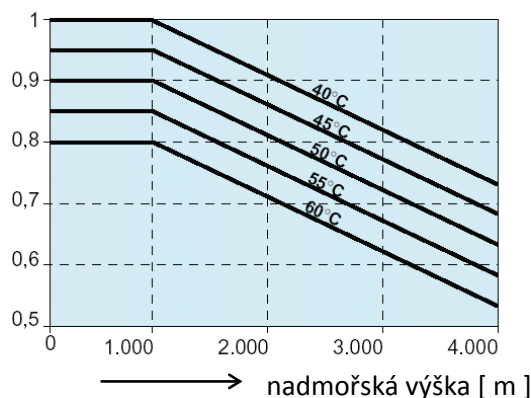
13.5 DOVOLENÉ TEPLOTY A OTEPLENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

Tepelná třída izolace izolačních systémů strojů je dána ČSN 33 0050 (IEC 60085) a musí být vyjádřena písmeny A, E, B, F, H. Dovolené oteplení $\Delta\theta_{\text{dov}}$ a maximální teploty θ_{dov} pro jednotlivé třídy izolace jsou zobrazeny v Tab. 4.



Tab. 4 Dovolené oteplení $\Delta\theta_{\text{dov}}$ a maximální teploty θ_{dov} pro jednotlivé třídy izolace zobrazeno: (a) Tabulkou, (b) Graficky.

Mezní hodnoty oteplení vinutí jsou závislé na způsobu chlazení, druhu chladiva a metodice měření (teploměr, odpor, vložená sonda). Korekci hodnot dovoleného oteplení je nutno provést s ohledem na pracovní podmínky motoru: teplotu okolí (nad 40°) a nadmořskou výšku (nad 1000 m).



Obr. 5.1 Korekční hodnoty s ohledem na teplotu okolí a nadmořskou výšku.

13.6 KLASIFIKACE ÚČINNOSTÍ U ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

Podíl zlepšování účinnosti u elektrických motorů na celkovém snížení spotřeby elektrické energie je dosti významný a představuje cca 18 %. Celková spotřeba elektrické energie by mohla a měla v důsledku zvýšení účinnosti elektromotorů klesnout o cca 3 %.

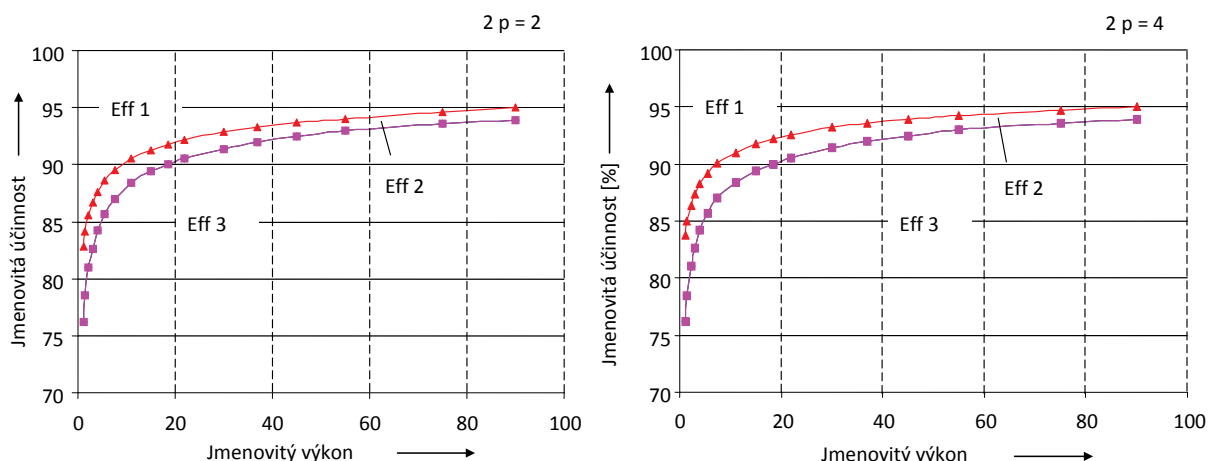
V USA se dle zákona EPCA (Energy Policy and Conservation Act), musí mít 2, 4 a 6-ti pólové motory v rozsahu výkonů (0,7÷150) kW minimální hodnotu jmenovité účinnosti (HE-High efficiency).

V Evropě došlo rovněž k reakcím na uvedené iniciativy. Mezi generálním ředitelstvím Evropské komise a Sdružením evropských výrobců motorů a výkonové elektroniky CEMEP (Comitee of European Manufactures of Electrical Machines and Power Electronics) došlo k dobrovolné dohodě obsahující jednotný způsob členění účinností motorů do klasifikačních

tříd a jejich označování. Všechny 2 a 4-pólové motory standardního provedení, pro napětí 400 V, 50 Hz a druh zatížení S1 jsou v rozsahu výkonů (1,1÷90) kW rozděleny do tří klasifikačních tříd, které jsou označeny na alfanumerickém kódu:

- Eff1** vysoká účinnost (High efficiency),
- Eff2** zvýšená účinnost (Improved efficiency),
- Eff3** standardní účinnost (Standard efficiency),

odpovídající dohodnuté klasifikační stupnici. Označení třídy účinnosti musí být provedeno na štítku motoru a rovněž v technické dokumentaci spolu s uvedením hodnot účinnosti pro jmenovité a snížené (75 %) zatížení. Na Obr. 6.1 jsou znázorněny grafy závislosti mezních účinností motorů.



Obr. 6.1 Závislosti mezních účinností motorů

13.6.1 Provozní vlastnosti a ekonomika provozu motorů s vyšší účinností

Vyšší účinnost motoru kromě energetických úspor dále představuje:

- větší spolehlivost chodu motoru a tím i menší prostoje způsobené jeho poruchami,
- nižší oteplení vinutí a tím i větší možnost přetěžování pohonu,
- odolnost vůči poruchám v napájecí síti (kolísání napětí, fázová nesouměrnost),
- větší toleranci vůči neharmonickému napájecímu napětí.

Zlepšení účinnosti motorů lze dosáhnout snížením jejich ztrát až o cca 42 %. Této vlastnosti se dosáhne použitím kvalitnějších materiálů, změnou konstrukce aktivních a mechanických částí motoru. Toto je ovšem provedeno na úkor zvýšení výrobních nákladů motorů oproti standardnímu provedení, a tím i jejich pořizovací ceny. Z dostupných pramenů vyplývá, že toto zvýšení ceny je nejvyšší u motorů menších výkonů, kde dosahuje cca 25 %. S rostoucím výkonem motorů dochází k poklesu až na cca 5 %.

Pořizovací cena motoru ovšem představuje jen velmi malou část z celkových provozních nákladů zahrnujících i cenu za spotřebovanou elektrickou energii a náklady na údržbu. Při průměrné životnosti motoru cca 15 let bude podíl pořizovacích nákladů u motoru se jmenovitým výkonem 15 kW v rozsahu roční doby provozu (1000÷8000) hod v rozmezí (3 ÷ 0,4) % celkových nákladů.

Určení ročních nákladů na provoz motoru:

$$N_r = \frac{t_p \cdot p \cdot P_N}{\eta_{Mp}} \cdot C_{kWh} \text{ [Kč; hod, kW, Kč/kWh]} \quad (8)$$



kde t_p znamená dobu provozu motoru za rok, P_N je jmenovitý (štítkový) výkon motoru, p udává poměrné zatížení motoru (P/P_N), η_{Mp} je účinnost motoru pro dané poměrné zatížení p a C_{kWh} je jednotková cena elektrické energie.

Určení ročních úspor při použití motoru s vyšší účinnosti - η_{MHeigh} je dáno rovnicí (9).

$$U_r = t_p \cdot p \cdot P_N \cdot C_{kWh} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{Mp}} - \frac{1}{\eta_{MHeigh}} \right) \quad (9)$$

Určení doby návratnosti t_n pořizovacích nákladů (ceny) N_{Mot} na motor s vyšší účinností je dáno vztahem (10).

$$t_n = \frac{N_{Mot}}{U_r} \cdot 12 [\text{mės.; Kč}] \quad (10)$$

13.7 TRANSFORMÁTORY

Transformátory jsou elektrické netočivé stroje, které umožňují změnu velikosti (transformaci) střídavého napětí při konstantním kmitočtu. Rozdělujeme je především podle počtu fází na jednofázové a trojfázové.

Tím, při přenosu přibližně stejného výkonu z primárního do sekundárního obvodu se mění i hodnoty proudů. To umožňuje v energetických soustavách přenášet (distribtovat) elektrickou energii velmi velkých výkonů na velké vzdálenosti z elektráren ke spotřebiteli při přijatelných energetických ztrátách. Ztráty na vedení (ΔP_v) jsou tím menší (a také potřebné průřezy vodičů), čím jsou menší proudy, tzn. čím vyšší je hodnota napětí.

K této činnosti se používají zpravidla jenom trojfázové transformátory velkého výkonu.

Použití transformátorů:

- ke změně hodnot střídavých napětí,
- k elektrickému oddělení obvodů.

Provedení transformátorů:

- vzduchové,
- s železným jádrem (nejčastěji používané v elektroenergetice),
- s feritovým jádrem (vř. technika, zdroje menších výkonů).

13.7.1 Princip činnosti ideálního transformátoru

Vysvětlíme si ho na nákresu ideálního jednofázového transformátoru, který je znázorněn na Obr. 7.1.

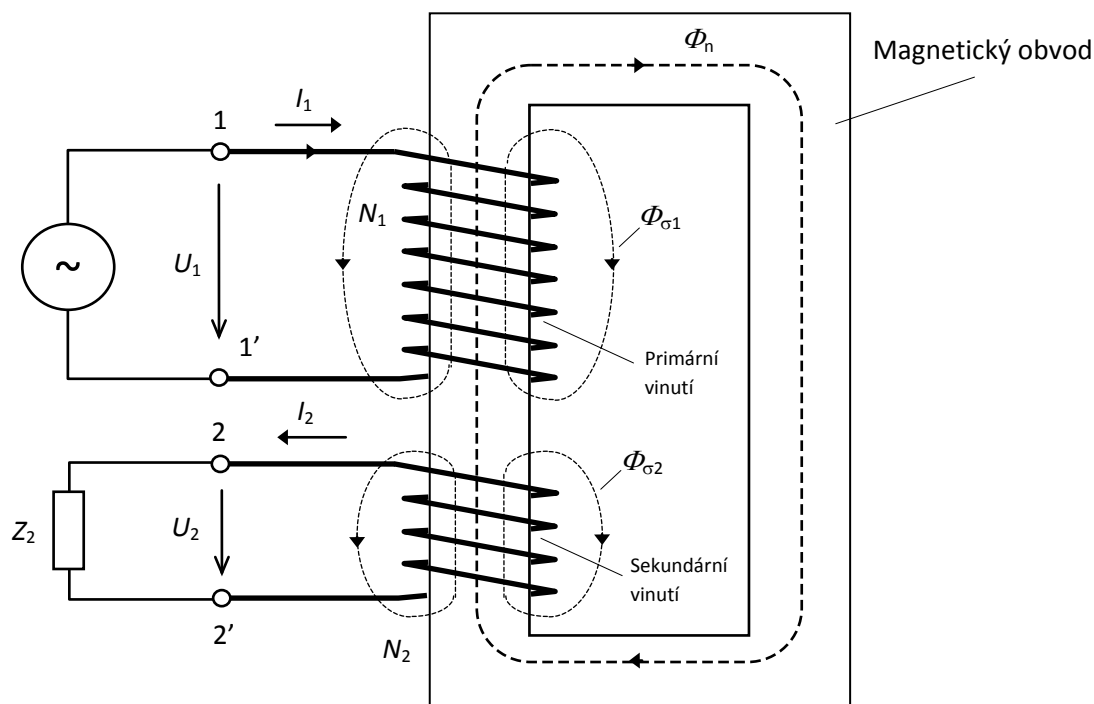
Pro ideální transformátor platí zjednodušení reálného stavu:

1. $\Delta P = 0$, $R_1 = 0$, $R_2 = 0$, tj. celkové ztráty a činné odpory vinutí jsou nulové.
2. Rozptyl je nulový ($\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} = 0$).
3. Celý magnetický tok Φ_m prochází všemi závity primárního a sekundárního vinutí.

Střídavý proud v primárním vinutí I_1 vybudí střídavý magnetický Φ , který svou změnou indukuje ve vinutích transformátoru indukované napětí U_{ind} , závislé na velikosti frekvence primárního proudu f_1 a magnetického toku Φ_m , jak ukazuje rovnice (11).

$$U_{ind} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_m \quad (11)$$





Obr. 7.1 Náčrt jednofázového transformátoru s železným jádrem

Pro jednotlivá vinutí potom platí vztahy:

$$U_{\text{ind1}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_1 \quad (12)$$

$$U_{\text{ind2}} = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m \cdot N_2 \quad (13)$$

kde N_1 a N_2 jsou počty závitů primárního a sekundárního vinutí a Φ_m je maximální hodnota střídavého magnetického toku.

Poměr indukovaných napětí je převod transformátoru K .

$$\frac{U_{\text{ind1}}}{U_{\text{ind2}}} = \frac{N_1}{N_2} = K = \frac{U_1}{U_2} \quad (14)$$

Z předchozího vztahu pro ideální transformátor vyplývá, že velikosti indukovaných napětí jsou přímo úměrné počtům závitů jednotlivých vinutí a odpovídají poměru svorkových napětí U_1 a U_2 na svorkách transformátoru.

Při předpokladu rovnosti příkonu P_1 a výkonu P_2 ($P_1 = P_2$, $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$, $\cos \varphi = 1$, $P_d = 0$) platí:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = K \quad (15)$$

Ideální transformátor je charakterizován jediným parametrem - převodem K .

13.7.2 Princip činnosti skutečného transformátoru

Skutečný transformátor vychází z ideálního transformátoru, doplněného o vedlejší obvodové prvky. Primární napětí U_1 je harmonické a magnetický obvod není nasycen (pracovní oblast v lineární části charakteristiky). Připojením napětí U_1 na primární vinutí jím začne protékat proud I_1 , jehož magnetizační složka vytvoří střídavý hlavní magnetický tok Φ_h , který se uzavírá jádrem a rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$, které se uzavírají vzduchem. Časovou změnou hlavního magnetického toku se indukuje do závitů vinutí (primárního i sekundárního)

indukované napětí $u_{\text{ind}} \approx d\Phi/dt$ a jehož velikost je přímo úměrná počtům závitů N_1 , N_2 jednotlivých vinutí.

Připojením zátěžné impedance Z_2 na svorky sekundárního vinutí (2-2') začne sekundárním obvodem protékat proud I_2 a do zátěže je dodáván výkon P_2 . Skutečný transformátor vykazuje při své činnosti činné ztráty ($\Delta P > 0$) a má také rozptyl kolem vinutí ($\Phi_{\sigma 1} + \Phi_{\sigma 2} > 0$).

13.7.3 Provozní stavy transformátoru

13.7.3.1 Transformátor při stavu naprázdno

Je to takový provozní stav, kdy primární vinutí je připojeno k jmenovitému napětí U_{1N} a svorky sekundárního vinutí jsou rozpojeny ($Z_2 = \infty \Rightarrow I_2 = 0$), transformátor nedodává výkon ($P_2 = 0$) a zároveň

$I_1 = I_{10}$. Příkon, který transformátor odebírá ze sítě, slouží ke krytí ztrát naprázdno, které jsou v železném jádře a ve vinutí.

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{\text{Fe}} + R_1 \cdot I_{10}^2 \quad (16)$$

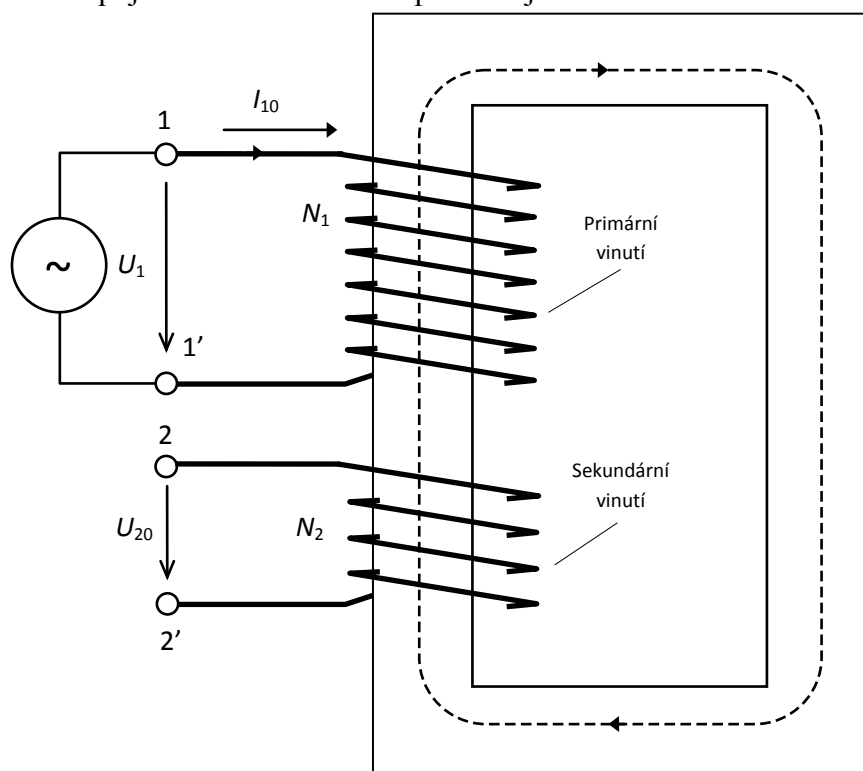
Ztráty v primárním vinutí jsou díky malé velikosti proudu naprázdno I_{10} malé (cca 2 až 10 % I_{1N}) a v praktických výpočtech je zanedbáváme a uvažujeme vztah (17).

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{\text{Fe}} \quad (17)$$

Měřením napětí při stavu naprázdno se určuje převod transformátoru K .

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (18)$$

Náhradní schéma zapojení transformátoru naprázdno je zobrazeno na Obr. 7.2.

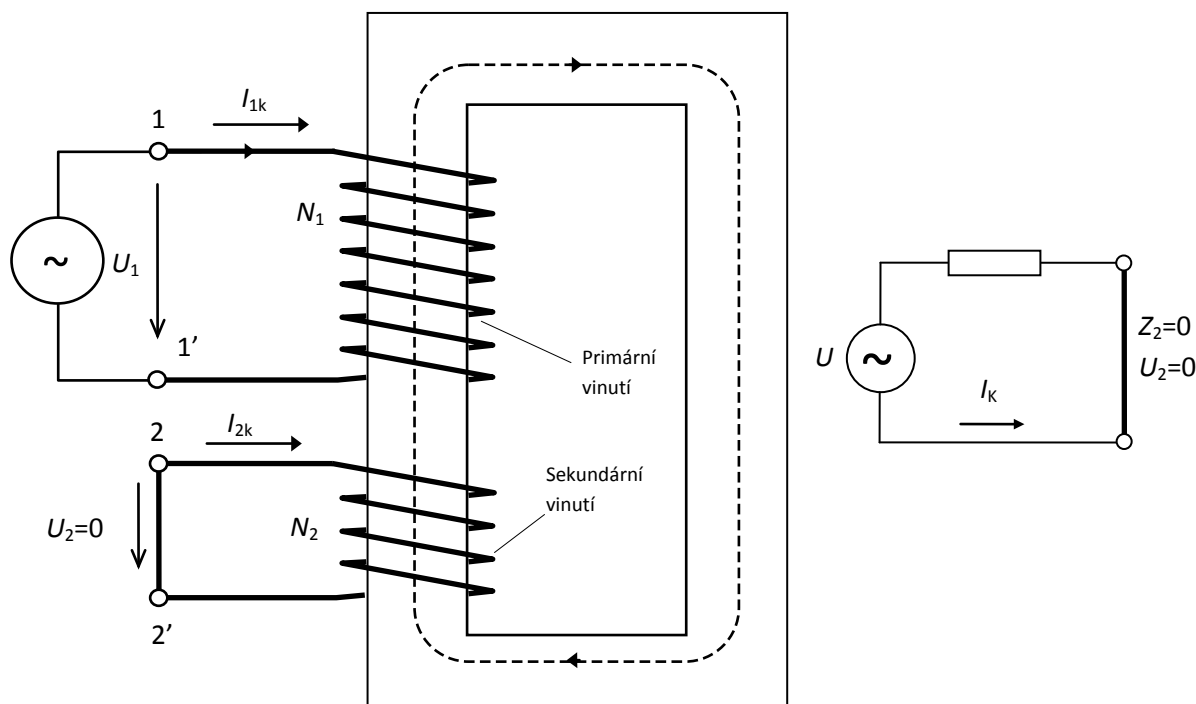


Obr. 7.2 Náhradní schéma zapojení transformátoru naprázdno.

13.7.3.2 Transformátor při stavu nakrátko

Je to nejnepríznivější stav transformátoru. Sekundární vinutí je spojeno nakrátko bez impedanční spojky ($Z_2 = 0 \Rightarrow U_2 = 0$). Zkratový proud je omezen pouze impedancí obvodu - impedancí nakrátko. Náhradní schéma zapojení transformátoru nakrátko je zobrazeno na Obr. 7.3.





Obr. 7.3 Náhradní schéma zapojení transformátoru nakrátko.

Velikost impedance nakrátko Z_{1K} :

$$Z_{1K} = Z_{1N} \cdot u_K = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} \cdot u_K \quad (19)$$

a je tvořena:

$$Z_{1K} = \sum R_{1K} + j \cdot \sum X_{1K} = R_1 + R_2 \cdot K^2 + j(X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2} \cdot K^2) \quad (20)$$

Poznámka: Parametry sekundárního vinutí se musí přepočítat na primární stranu (na stejný počet závitů), což se provádí pomocí napěťového převodu transformátoru K .

Hodnota impedance nakrátko Z_{1K} je malá, neboť je tvořena malými hodnotami parametrů vinutí R_1 , R_2 , $X_{\sigma 1}$ a $X_{\sigma 2}$. Proud I_K je mnohonásobně větší než I_{1N} (7 až 35 krát) a je pro transformátor velice nebezpečný. Celý odebíraný příkon nakrátko P_{1K} , se mění v činné ztráty ΔP (Jouleovy ztráty ve vinutí), přičemž ztráty v železe jsou zanedbatelné. Je to nejnejpříznivější stav transformátoru.

Poměrné napětí nakrátko - u_K , $u_{K\%}$

Je to důležitý parametr, udávající zkratovou odolnost transformátorů. Při jeho zjišťování měření se postupuje tak, že při stavu transformátoru nakrátko se sníží primární napětí U na hodnotu U_K , při níž proud odebíraný ze sítě má hodnotu $I_K = I_{1N}$ (transformátor se nepoškodí).

$$u_K = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} = \frac{Z_{1K} \cdot I_{1N}}{Z_{1N} \cdot I_{1N}} = \frac{Z_{1K}}{Z_{1N}} \quad (21)$$

$$u_{K\%} = \frac{U_{1K}}{U_{1N}} \cdot 100 = \frac{Z_{1K}}{Z_{1N}} \cdot 100 \quad (22)$$

Pomocí $u_{K\%}$ určíme velikost skutečného ustáleného zkratového proudu.

$$I_{1K} = \frac{I_{1N}}{u_{K\%}} \cdot 100 \quad (23)$$



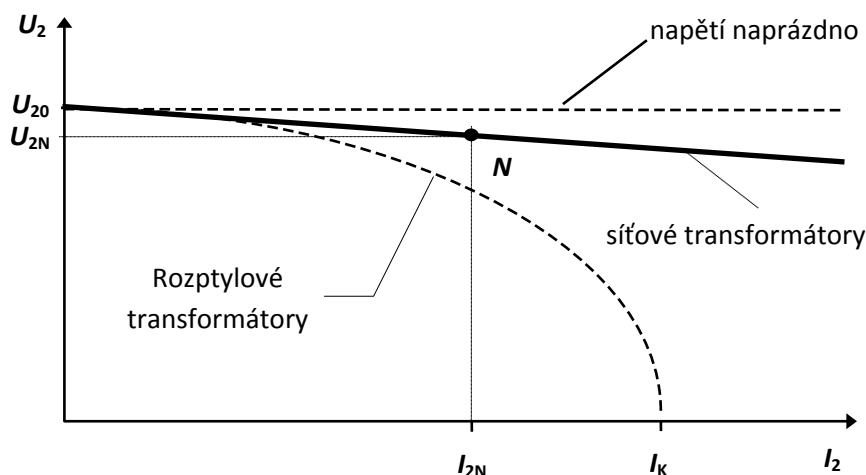
Jouleovy ztráty rostou s druhou mocninou proudu, proto trvalý zkratový proud působí na transformátor destruktivními účinky, kterým zabraňujeme rychlým odpojením transformátoru od sítě.

13.7.3.3 Transformátor při zatížení

Zde patří všechny ostatní stavy, vyjma stavu naprázdno a nakrátko. Vzájemné fázové poměry napětí a proudů lze zobrazit v tzv. fázorových diagramech a přibližně závisí na *charakteru* a *velikosti* zatěžovací impedance Z_2 ($0 < Z_2 < \infty$) a parametrech R a X obou vinutí.

13.7.3.4 Zatěžovací charakteristika transformátoru

Je grafická závislost $U_2 = f(I_2)$ při $\cos \varphi = \text{konst.}$, je velmi důležitá a udává velikost vnitřního úbytku napětí na transformátoru a velikost zkratového proudu na sekundární straně.



Obr. 7.4 Srovnání zatěžovacích charakteristik rozptylových a síťových transformátorů.

Tvrdość (sklon) charakteristiky závisí na velikosti napětí (impedance) nakrátko $u_{K\%}$ a účinníku $\cos \varphi_2$. Čárkovaně je zakreslena zatěžovací charakteristika rozptylového transformátoru, jako zdroje konstantního proudu používaného pro obloukové svařování nebo k napájení výbojek. Proud nakrátko I_K je zde pouze nepatrně vyšší než I_{2N} oproti běžnému transformátoru, kde tvoří několikanásobek proudu I_{2N} . Srovnání zatěžovacích charakteristik rozptylových a síťových transformátorů je zobrazeno na Obr. 7.4.

13.7.3.5 Účinnost transformátorů

Udává se vztahem (24).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (24)$$

kde $\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$ - ztráty v transformátoru
 $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ - činný příkon transformátoru
 $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$ - činný výkon transformátoru

V technické praxi se dosahuje u běžných transformátorů účinnosti 85 až 99 % (transformátory větších výkonů mají vyšší účinnost). Účinnost je závislá na velikosti zatížení a klesá úměrně s velikostí zatížení.

13.7.4 Konstrukce a provedení transformátorů

Základními funkčními částmi jsou magnetický obvod, vinutí a systém chlazení. Jádru bývá složeno z transformátorových plechů, tloušťky 0,5 a 0,35 mm (pro $f = 50$ Hz), k zamezení

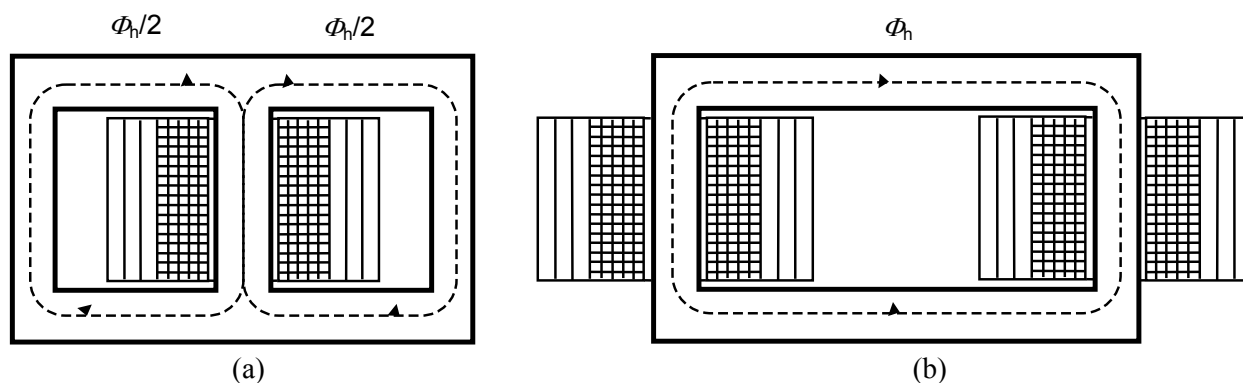


ztrát vířivými proudy jsou plechy navzájem izolovány lakem nebo nevodivou oxidační vrstvou.

Ke snížení hysterezních ztrát se používají ocelové plechy s přídavkem 3,5 - 4,5% křemíku, válcované za studena.

Veškeré ztráty vznikající v transformátoru se mění v teplo, které je třeba odvádět - chladit. Chlazení se zpravidla provádí *vzduchem* nebo *olejem*, u větších a velkých výkonů s nucenou cirkulací. U nejnáročnějších aplikací pak elektronegativním plynem SF_6 (fluorid sírový), který má vynikající izolační a antioxidační účinky. K jeho použití je však nutné hermeticky zapouzdřených chladicích systémů.

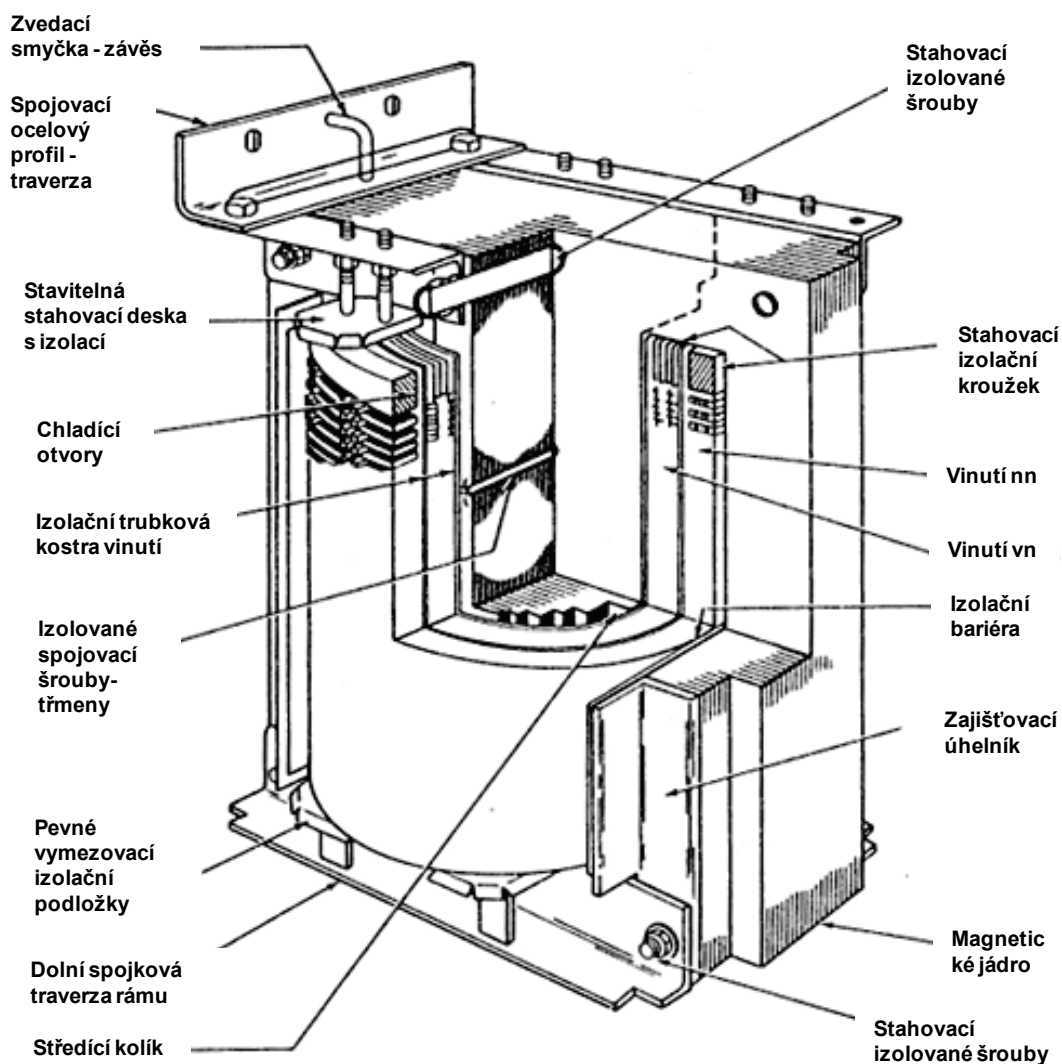
Na Obr. 7.5 je zobrazeno plášťové a jádrové magnetické uspořádání transformátoru.



Obr. 7.5 Magnetické uspořádání transformátoru: (a) Plášťové, (b) Jádrové

V energetických soustavách se pro rozvod elektrické energie používají trojfázové transformátory, které bývají často z hlediska konstrukčního, bezpečnostního a ekonomického rozděleny do několika výkonových jednotek (např. místo jednoho transformátoru se použijí dva s polovičním výkonem, a při poruše jednoho z nich, druhý zajišťuje provoz). Transformátorové jednotky jsou často zapojovány paralelně, což je podmíněno stejnými parametry (napětíový převod, napětí nakrátko, výkon).

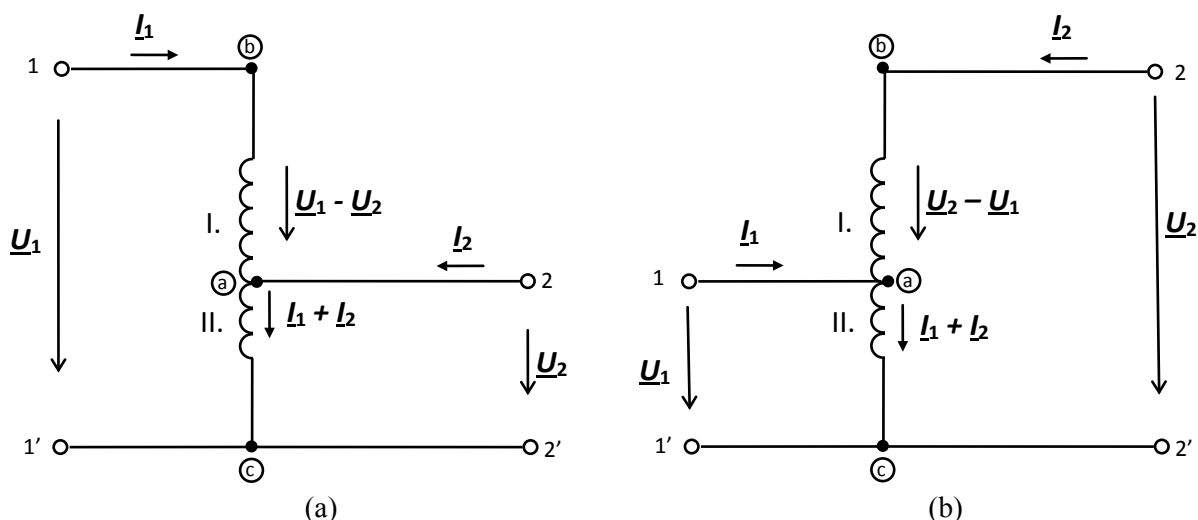
Konstrukce jednofázového transformátoru (nebo jedné sekce - fáze třífázového) je znázorněna na Obr. 7.6. Je zde zobrazen řez jednofázovým distribučním transformátorem s chlazením. Tělo transformátoru je umístěno v ocelové nádobě s transformátorovým olejem. Izolované elektrotechnické plechy jsou staženy dohromady izolovanými šrouby a rámem. Vinutí jsou navzájem izolačně oddělena kostrami z izolačního materiálu, zpravidla trubkového tvaru. V transformátoru na velké výkony musí být zajištěny chladicí otvory pro cirkulaci oleje mezi vn a vn vinutím.



Obr. 7.6 Konstrukce jednofázového transformátoru (nebo jedné sekce - fáze třífázového).

13.7.4.1 Autotransformátory

Mají pouze jedno vinutí, jehož část je společná pro primární i sekundární obvod. Oba obvody, na rozdíl od běžných transformátorů, jsou spojeny nejen magnetickou, ale i elektrickou vazbou. Proto se autotransformátor nesmí použít mezi vysokým a nízkým napětím nebo nízkým a malým napětím.



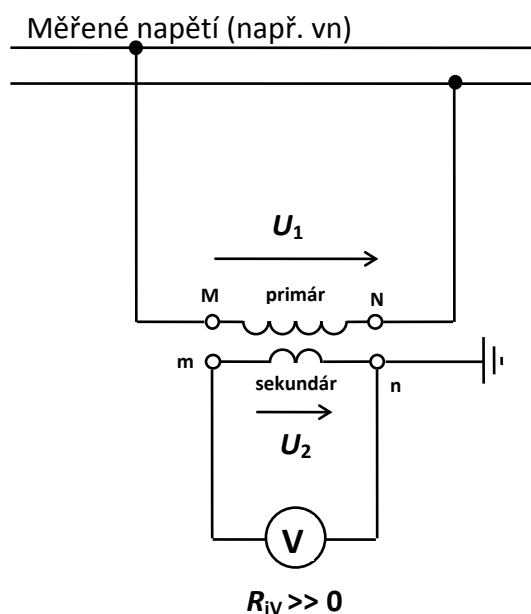
Obr. 7.7 Zapojení autotransformátoru: (a) Pro snižování napětí, (b) Pro zvyšování napětí

Autotransformátory se používají k řízení napětí jako snižovací nebo zvyšovací v jednofázovém i trojfázovém provedení. Účinky zkratových proudů jsou větší než u normálního transformátoru. Zapojení autotransformátoru pro snižování napětí je uvedeno na Obr. 7.7 (a). Zapojení autotransformátoru pro zvyšování napětí je znázorněno na Obr. 7.7 (b).

13.7.4.2 Měřicí transformátory

Patří k příslušenství k měricím přístrojům. Převádějí velká střídavá napětí a velké střídavé proudy na hodnoty vhodné pro měřicí přístroje, při současném galvanickém oddělení měřicího přístroje od měřeného obvodu. Měřicí přístroje se do obvodu nezapojují přímo, ale přes měřicí transformátory MTN a MTP.

Měřicí transformátor napětí MTN - u něj je primární vinutí (velký počet závitů) paralelně připojeno k měřenému obvodu s vysokým napětím (nebo i jiným) a sekundární vinutí (malý počet závitů) k voltmetru s velkým vnitřním odporem R_V , aby MTN pracoval jako při stavu naprázdno.



Obr. 7.8 Zapojení MTN

Pomocí MTN měřené napětí určíme:

$$U_1 = K_U \cdot U_2 \quad (25)$$

$$\text{kde } K_U = \frac{N_1}{N_2} \quad (26)$$

$N_1 > N_2$ a jmenovité sekundární napětí transformátoru (na straně voltmetru) U_2 bývá obvykle 100 V.

Měřicí transformátor proudu MTP - primární vinutí (malý počet závitů, zpravidla jeden) je zapojeno do série s měřeným vysokoproudovým obvodem a sekundární vinutí (velký počet závitů) je připojeno k ampérmetru s co nejmenším vnitřním odporem R_A , aby MTP pracoval ve stavu nakrátko.

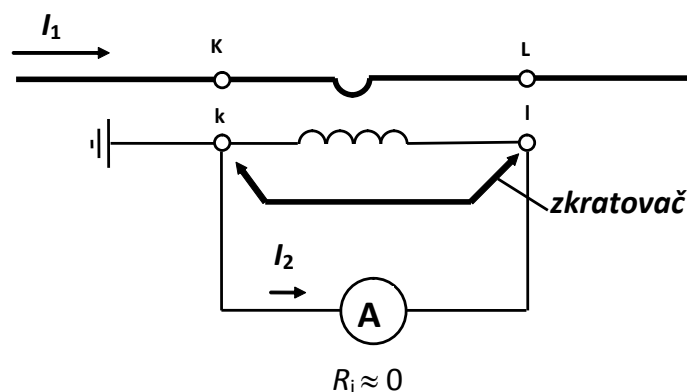
Pomocí MTP měřený proud určíme:

$$I_2 = K \cdot I_1 \quad (27)$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K} \quad (28)$$

$$K = \frac{N_1}{N_2} \quad (29)$$

$N_1 > N_2$ a jmenovitý sekundární proud transformátoru (na straně ampérmetru) I_2 je 5 A, resp. 1 A. MTP mohou mít několik výstupů i pro jistící přístroje. MTP bývá doplněn zkratovačem, neboť se výstupní svorky nesmí nikdy rozpojit!



Obr. 7.9 Zapojení MTP

MTN a MTP lze použít i při měření velkého činného výkonu wattmetrem, MTN v napěťovém a MTP v proudovém obvodu wattmetru. Změřený činný výkon se pak určí:

$$P_1 = K_U \cdot K_I \cdot P_2 \quad (30)$$

13.7.4.3 Speciální transformátory

Kromě transformátorů s popsanými vlastnostmi se konstruují i takové transformátory, které mají odlišné vlastnosti.

Pecní - slouží k vytápění tavicích, žhacích, kalících, smaltovacích a sušících pecí. Dělíme je na:

- odporové* - topné odporové články jsou připojeny na napětí sekundárního vinutí, které se dá řídit,



- b) *obloukové* - transformují vysoké napětí na nízké o velikosti desítek voltů, potřebné k zapálení a k hoření elektrického oblouku. Na straně nízkého napětí jsou proudy až statisíců ampér, proto se řízení napětí provádí na primární straně,
- c) *indukční* - sekundárním vinutím je tekutý prstenec zahříváně látky - kovu. Primární vinutí je podobné jako u běžného transformátoru. Pro menší ohřívání předmětů se používají frekvence 2 - 10 kHz.

Svařovací transformátory - Pro obloukové svařování se používá tzv. **rozptylový transformátor** s uměle zvětšeným rozptylem pomocí jader vložených do rozptylových drah. K zapálení oblouku je třeba sekundární napětí 80 V až 100 V a pro hoření jen 20 V až 30 V. Transformátor se tomu musí rychle přizpůsobit, přičemž se nesmí příliš měnit svařovací proud. Zvětšeným rozptylem vzroste reaktanční úbytek, výstupní napětí klesne a proud se jen málo změní, viz Obr. 7.4.

Odporové svařování na tupo, bodové nebo švové spočívá v tom, že na svařované místo působíme krátkodobě zkratovým proudem 1 kA až 100 kA. K dosažení těchto vysokých proudů (i když krátkodobých) je nutná co nejmenší reaktance transformátoru i přívodů. Na sekundární straně bývá zpravidla pouze jeden závit z mědi. Velikost svařovacího proudu se mění přepínáním odboček na primární straně.



13.8 LITERATURA

Stýskala V.: Transformátory, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Listopad 1998.

Mlčák T., Vrána V.: Transformátory, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Leden 2006.

Mlčák T., Vrána V.: Elektrické stroje – úvod, učební text VŠB TU Ostrava, FEI, kat 452, Leden 2006.

Internet

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

http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A9_stroje



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

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



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Bezpečnost v elektrotechnice,

Ochrana před úrazem elektrickým proudem

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

10 BEZPEČNOST V ELEKTROTECHNICE, OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM	4
10.1 Úvod.....	6
10.2 Organizační opatření pro ochranu před úrazem el. proudem.....	6
10.2.1 Vysvětlení základních pojmů.....	6
10.2.2 Odborná způsobilost pracovníků v elektrotechnice	7
10.2.3 Rozdělení kvalifikací	7
10.2.3.1 Pracovníci bez elektrotechnického vzdělání mohou nabýt kvalifikace: ...	7
10.2.3.2 Pracovníci s elektrotechnickým vzděláním mohou získat kvalifikace:	8
10.2.3.3 Zkoušky a přezkušování.....	8
10.2.3.4 Osvědčení	9
10.3 Elektrická zařízení (EZ) - definice, rozdělení, pojmy, bezpečnostní předpisy	9
10.3.1 Definice elektrického zařízení	9
10.3.2 Rozdělení elektrických zařízení podle různých hledisek	9
10.3.2.1 Rozdělení EZ podle účelu:	9
10.3.2.2 Rozdělení podle druhu proudu (soustavy), na který je EZ připojeno (vyrobena):	10
10.3.2.3 Rozdělení EZ podle nebezpečí úrazu elektrickým proudem.....	10
10.3.2.4 Rozdělení podle kmitočtu (frekvence) - f :	10
10.3.2.5 Rozdělení EZ podle provozní spolehlivosti:	10
10.3.2.6 Rozdělení podle velikosti napětí, na které je EZ připojeno (vyrobena):	10
10.3.3 Poruchy (závady) na EZ, vzniklá nebezpečná a dotyková napětí.....	11
10.3.3.1 Druhy poruch (závad):	11
10.3.3.2 Napětí při poruchách	11
10.3.3.3 Přímý a nepřímý dotyk částí EZ.....	11
10.3.4 Základní požadavky na elektrická zařízení z hlediska jejich bezpečnosti a spolehlivosti	12
10.3.4.1 Základní požadavky na EZ jsou dány řadou právních předpisů a technických norem:.....	12
10.3.4.2 Základní požadavky k zajištění bezpečnosti dle ČSN 33 2000	13
10.3.4.3 Pracoviště s nebezpečím výbuchu.....	14
10.4 Druhy rozvodných sítí a způsob jejich označování.....	14
10.4.1 Příklady označení a zapojení nejčastěji používaných střídavých (AC) rozvodných sítí:	15
10.4.1.1 Jednozdrojové sítě TN.....	15
10.4.1.2 Síť IT	16



10.4.1.3	Síť TT	17
10.5	Vnější vlivy.....	17
10.5.1	Všeobecné kategorie vnějšího vlivu	18
10.5.2	Druhy prostorů:.....	18
10.6	Krytí elektrických zařízení.....	19
10.7	Účinky elektrického proudu na lidský organismus	20
10.7.1	Druh, velikost a kmitočet proudu	21
10.7.2	Impedance lidského těla a dráha proudu	21
10.7.3	Doba průchodu proudu.....	21
10.7.4	Velikost dotykového napětí.....	21
10.8	Ochrana před úrazem elektrickým proudem.....	21
10.8.1	Základní pojmy.....	21
10.8.2	Třídy ochrany elektrických spotřebičů	23
10.8.3	Principy a základní pravidlo ochrany před úrazem elektrickým proudem....	24
10.8.3.1	Základní pravidlo ochrany před úrazem elektrickým proudem:	24
10.8.3.2	Zajištění ochrany z hlediska podmínek provozu.....	25
10.8.4	Koordinace ochrany, technické prostředky k dosažení ochrany před úrazem elektrickým proudem.....	25
10.8.4.1	Prostředky k zajištění základní ochrany.....	26
10.8.4.2	Ochrana při poruše	26
10.8.4.3	Doplňková ochrana.	27
10.8.4.4	Prostředky zvýšené ochrany.....	27
10.8.5	Vybraná ochranná opatření dle použitých prostředků ochrany.....	27
10.8.5.1	Ochrana automatickým odpojením od zdroje	28
10.9	Zásady poskytování první pomoci při úrazu elektrickým proudem.....	29
10.10	Hašení elektrických zařízení	29
10.11	Literatura.....	31



10 BEZPEČNOST V ELEKTROTECHNICE, OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Organizační opatření pro ochranu před úrazem el. proudem

Elektrická zařízení (EZ) - definice, rozdělení, základní pojmy, bezpečnostní předpisy.

Druhy rozvodných sítí a jejich označování.

Vnější vlivy.

Krytí elektrických zařízení.

Účinky elektrického proudu na lidský organismus.

Ochrana před úrazem elektrickým proudem.

Zásady poskytování první pomoci při úrazu elektrickým proudem

Hašení elektrických zařízení



MOTIVACE:

Pro obsluhu elektrických zařízení v laboratorních cvičeních v předmětu Elektrotechnika je potřeba dodržet základní bezpečnostní požadavky, tzv. technicko - organizační opatření, která se používají rovněž v elektrotechnické praxi. V textu jsou popsány způsoby provedení ochrany před úrazem elektrickým proudem, popřípadě před možností vzniku požáru z důvodu poruchy na elektrickém zařízení. Dále je zde popsáno rozdělení elektrických zařízení podle účelu, proudu, napětí, popřípadě podle provozní spolehlivosti.



Audio 14.1 Motivace



CÍL:

Organizační opatření pro ochranu před úrazem elektrickým proudem,
technická opatření pro ochranu před úrazem elektrickým proudem,



poruchy (závady) na elektrických zařízeních, dotyková napětí,
základní předpisy, nařízení a normy,
druhy rozvodných sítí a způsob jejich označování,
krytí elektrických zařízení,
účinky elektrického proudu na lidský organismus,
živá část, neživá část elektrického zařízení,
základní ochrana, ochrana při poruše, zvýšená ochrana, doplňková ochrana



10.1 ÚVOD

Účelem těchto učebních textů je poskytnout základní přehled o zásadách bezpečnosti práce studentů při jejich činnosti na elektrickém zařízení ve školních laboratořích a ochraně před úrazem elektrickým proudem.

Úraz elektrickým proudem může způsobit proud, který protéká tělem postiženého člověka. Ochrana před úrazem elektrickým proudem je souhrnem organizačních a technických opatření, která pomáhají zabránit vzniku úrazu elektrickým proudem. Organizační opatření se vztahují k výběru a odborné elektrotechnické kvalifikaci pracovníků, kteří provádějí činnost na elektrickém zařízení. Technická opatření mají vyloučit, popřípadě snížit riziko úrazu, způsobené elektrickým zařízením, která svým provedením, volbou a umístěním nemusí být vždy naprosto bezpečná.

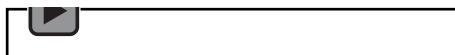
10.2 ORGANIZAČNÍ OPATŘENÍ PRO OCHRANU PŘED ÚRAZEM EL. PROUDEM

10.2.1 Vysvětlení základních pojmů

- **Obsluha elektrického zařízení** – úkony spojené s provozem elektrického zařízení, např. spínání, regulování, čtení trvale namontovaných přístrojů, výměna závitových a přístrojových pojistek, žárovek, prohlídka zařízení apod.



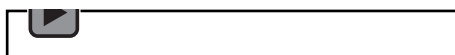
Audio 14.2 Obsluha elektrického zařízení



- **Práce na elektrickém zařízení** – montáž, revize a údržba elektrického zařízení. Sem patří také všechny úkony pro zajišťování pracoviště, jakož i měření přenosnými přístroji.



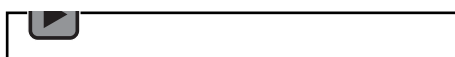
Audio 14.3 Práce na elektrickém zařízení



- **Práce s dohledem** – práce, která se provádí podle podrobnějších pokynů. Před zahájením práce se osoba provádějící dohled přesvědčí, zda jsou provedena nutná bezpečnostní opatření. V průběhu prací občas kontroluje dodržování bezpečnostních předpisů. Při této práci odpovídají za dodržování bezpečnostních předpisů osoby vykonávající pracovní činnost.

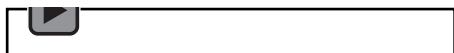


Audio 14.4 Práce s dohledem

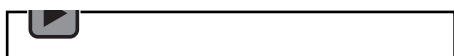


- **Práce pod dozorem** – práce, která se provádí za trvalé přítomnosti osoby, která je pověřena dozorem a která je odpovědná za dodržování příslušných bezpečnostních předpisů.



**Audio 14.5 Práce s dozorem**

- **Práce podle pokynů** – práce, pro kterou jsou dány nejnutnější pokyny. Při této práci odpovídají pracující za dodržování bezpečnostních předpisů. Pokyn by měl vždy obsahovat:
 - zadání pracovního úkolu (vč. rozdělení na jednotlivce),
 - postup a koordinaci jednotlivých na sebe navazujících úkonů,
 - seznámení se stavem zajištění pracoviště,
 - seznámení se způsobem napájení pracoviště,
 - nejbližší zařízení pod napětím a nejbližší živé části zařízení pod napětím.

**Audio 14.6 Práce podle pokynů**

- Předpoklady odborné způsobilosti organizací a podnikajících fyzických osob jsou potřebné technické vybavení a odborná způsobilost jejich pracovníků

10.2.2 Odborná způsobilost pracovníků v elektrotechnice

Odbornou způsobilost v elektrotechnice řeší Vyhláška č. 50/1978 Sb. Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu (se změnami a doplňky dle vyhlášky č. 98/1982 Sb.).

Činnosti na elektrickém zařízení mohou podle náročnosti této činnosti vykonávat pracovníci s příslušnou kvalifikací.

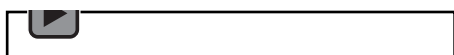
Kvalifikace = vzdělání + praxe.

K nabytí kvalifikace je podle jejího stupně potřebná praxe, která závisí na odborném vzdělání v oboru elektrotechniky. Podle stupně své kvalifikace může pracovník na elektrickém zařízení vykonávat odpovídající činnost. Pokud se týká dodržování vyhlášky, má své povinnosti i zaměstnavatel.

10.2.3 Rozdělení kvalifikací

10.2.3.1 Pracovníci bez elektrotechnického vzdělání mohou nabýt kvalifikace:

§ 3 - pracovníci seznámení jsou ti, kteří byli organizací v rozsahu své činnosti seznámeni s předpisy o zacházení s elektrickými zařízeními a upozorněni na možné ohrožení těmito zařízeními.

**Audio 14.7 § 3**

§ 4 - pracovníci poučení jsou ti, kteří byli organizací v rozsahu své činnosti seznámeni s předpisy pro činnost na elektrických zařízeních, školeni v této činnosti, upozorněni na možné ohrožení elektrickými zařízeními a seznámeni s poskytováním první pomoci při úrazech elektrickým proudem.



Audio 14.8 § 4

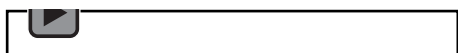


10.2.3.2 Pracovníci s elektrotechnickým vzděláním mohou získat kvalifikace:

§ 5 - pracovníci znalí jsou ti, kteří mají ukončené předepsané odborné vzdělání a po zaškolení složili zkoušku ve stanoveném rozsahu.



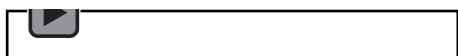
Audio 14.9 § 5



§ 6 - pracovníci pro samostatnou činnost jsou pracovníci znalí s **vyšší kvalifikací**, kteří splňují požadavky na pracovníky znalé, mají alespoň nejkratší požadovanou praxi a složením další zkoušky ve stanoveném rozsahu prokázali znalosti požadované pro samostatnou činnost.



Audio 14.10 § 6



§ 7 a 8 - pracovníci pro řízení (vedoucí pracovníci) jsou pracovníci **znalí s vyšší kvalifikací**,

§ 9 - pracovníci pro provádění revizí jsou pracovníci **znalí s vyšší kvalifikací**, kteří mají ukončené předepsané odborné vzdělání, předepsanou praxi a složili zkoušku před některým z orgánů dozoru.

§ 10 - pracovníci pro samostatné projektování a pro řízení projektování jsou ti, kteří mají odborné vzdělání a praxi určené zvláštními předpisy a složili zkoušku ze znalosti předpisů k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení a z předpisů souvisejících s projektováním.

§ 11 - zvláštní případy jsou určeny pro - absolventy vysoké školy elektrotechnické a přírodovědecké fakulty oboru fyziky, kteří pracují jako asistenti v laboratořích škol, pracovníky vědeckých výzkumných a vývojových ústavů, kteří mají vysokoškolské vzdělání, učitele, kteří používají při výuce na školách elektrická zařízení pod napětím.

Uvedení pracovníci musí buď složit předepsanou zkoušku, nebo musí být v používání zařízení zaškoleni a jejich znalosti musí být pravidelně ověřovány přezkoušením.

10.2.3.3 Zkoušky a přezkušování

Zkoušky pro splnění kvalifikace podle § 5 až § 8 a § 10 a § 11 i přezkušování organizuje zaměstnavatel. Ten jejím provedením pověří svého pracovníka nebo zajistí ustavení vlastní zkušební komise. Pokud toto nemůže splnit, zajistí provedení zkoušky u pracovníka nebo komise jiného zaměstnavatele.



Zkoušky a přezkušování provádí:

§ 5 (znalí)	pracovník, který má některou z kvalifikací podle § 6 až § 9
§ 6 (samostatnou činnost)	tříčlenná zkušební komise, nejméně jeden člen má kvalifikaci podle § 7 až § 9
§ 7 (řízení činnosti)	tříčlenná zkušební komise, nejméně jeden člen má kvalifikaci podle § 8 až § 9
pro § 8 (řízení činnosti dodavatelsky)	tříčlenná zkušební komise, nejméně dva členové mají kvalifikaci podle § 8 až § 9
pro § 10 (projektování)	tříčlenná zkušební komise, jejíž nejméně jeden člen má kvalifikaci podle § 8 až § 9
pro § 11 (učitelé atd.)	tříčlenná zkušební komise, nejméně jeden člen má některou z kvalifikací § 7 až § 9

Přezkoušení pracovníků s kvalifikací podle § 5 až § 8 a § 10 a § 11 se provádí jednou za tři roky.

10.2.3.4 Osvědčení

Organizace (zaměstnavatel) vydá pracovníkům (zaměstnancům) uvedeným v § 6 až § 8 a § 10, kteří složili zkoušku, osvědčení. Pracovníkům (zaměstnancům) uvedeným v § 9 vydá osvědčení příslušný orgán dozoru. V osvědčení se uvede druh a napětí elektrického zařízení, které může pracovník obsluhovat, popř. na něm pracovat.

Přestože následující informace patří do zcela jiné vyhlášky (NV 101/2005), je zde vhodné připomenout, že každé zařízení musí mít nominovanou osobu odpovědnou za elektrické zařízení – jmenovitě odpovědnou za vedení provozní dokumentace, dodržování lhůt revizí, kontrol, údržby a zkoušek a zajištění bezpečného provozu obecně. Tato osoba nemusí mít elektrotechnické vzdělání.

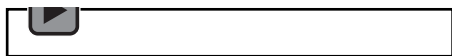
10.3 ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ (EZ) - DEFINICE, ROZDĚLENÍ, POJMY, BEZPEČNOSTNÍ PŘEDPISY

10.3.1 Definice elektrického zařízení

Definice EZ podle ČSN 33 0010: EZ je takové zařízení, které ke své činnosti nebo působení využívá účinků elektrických nebo magnetických jevů.



Audio 14.11 Definice elektrického zařízení

**10.3.2 Rozdělení elektrických zařízení podle různých hledisek****10.3.2.1 Rozdělení EZ podle účelu:**

- **Silová** - slouží k výrobě, přeměně, přenosu a rozvodu el. energie, její transformace (přeměna) na práci popř. na jiný druh energie (jejich účelem je využití elektřiny jako formy energie).
- **Řídící** - slouží k ovládání, řízení, ochraně, měření, sledování, signalizaci a kontrole ostatních elektrických i neelektrických zařízení.
- **Sdělovací** - slouží k přenosu, zpracování, záznamu a reprodukci informací (jejich účelem je využití elektřiny k přenosu nebo zpracování informací).
- **Zvláštní** - k jiným účelům než výše uvedená EZ (např. zdravotnická, laboratorní apod.).



10.3.2.2 Rozdělení podle druhu proudu (soustavy), na který je EZ připojeno (vyrobena):

- **stejnoseměrná: označení:** ss; =; **anglicky DC**
- **střídavá: označení:** st; ~; **anglicky AC**

Střídavá elektrická zařízení se dále dělí podle počtu fází jedno a vícefázové, (nejčastěji jednofázové nebo trojfázové) a podle kmitočtu na nízko, středně a vysokofrekvenční,

10.3.2.3 Rozdělení EZ podle nebezpečí úrazu elektrickým proudem

- silnoproudá - při obvyklém užívání mohou vzniknout proudy nebezpečné osobám, zvířatům a věcem,
- slaboproudá - při obvyklém provozu tyto nebezpečné proudy nemohou vzniknout.

10.3.2.4 Rozdělení podle kmitočtu (frekvence) - f :

název	označení	silová EZ	sdělovací EZ
nízkofrekvenční	nf	$f < 60 \text{ Hz}$	$f < 9 \text{ kHz}$
středofrekvenční	sf	$60 \text{ Hz} < f < 100 \text{ kHz}$	-
vysokofrekvenční	vf	$f > 100 \text{ kHz}$ (do 300 MHz)	$f > 9 \text{ kHz}$ (do 3 THz)

Tabulka 1. Rozdělení podle kmitočtu (frekvence) - f .**10.3.2.5 Rozdělení EZ podle provozní spolehlivosti:**

- se zvýšenou provozní spolehlivostí - výhradním nebo hlavním účelem je zabezpečení lidských životů, zajištění chodu důležitých zařízení nebo objektů s vyloučením selhání - (pokud je to technicky možné a u objektů pokud je to hospodárné),
- s obvyklou provozní spolehlivostí - selhání EZ může způsobit podstatné ohrožení a zastavení výroby, (aniž při tom nastane ohrožení osob),
- jednoduchá zařízení - selhání nemůže způsobit ohrožení osob ani výroby.

10.3.2.6 Rozdělení podle velikosti napětí, na které je EZ připojeno (vyrobena):

Kategorie napětí	Označení	Jmenovité napětí		
		v uzemněné soustavě		v izolované soustavě
		vodič - zem	vodič - vodič	vodič - vodič
I.	mn (MN)	do 50 V, (120 V-ss)	do 50 V (120 V-ss)	do 50 V (120 V-ss)
II	nn (NN)	nad 50V do 600 V	50 - 1000 V (stř) 120 ÷ 1500 V (ss)	50 - 1000 V (stř) 120 ÷ 1500 V (ss)
A	vn (VN)	0,6 kV ÷ 30 kV	1 ÷ 52 kV	1 ÷ 52 kV
B	vvn (VVN)	30 ÷ 171 kV	52 ÷ 300 kV	52 ÷ 300 kV
C	zvn (ZVN)		300 ÷ 800 kV	-----
D	uvn (UVN)		nad 800 kV	-----

legenda
zkratk:
nn-nízké
napětí,
vn-vysoké
napětí,
vvn-velmi
vysoké napětí,
zvn - zvlášť
vysoké napětí,
uvn - ultra
vysoké napětí

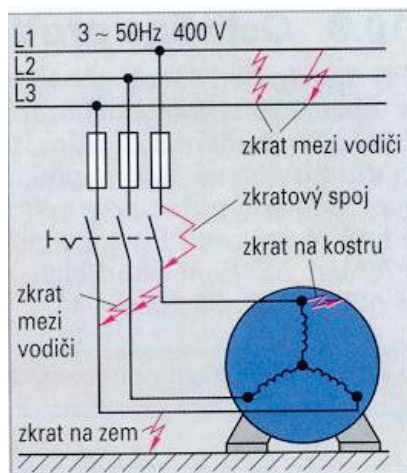
Tabulka 2. Rozdělení podle velikosti napětí, na které je EZ připojeno (vyrobena).



10.3.3 Poruchy (závady) na EZ, vzniklá nebezpečná a dotyková napětí

10.3.3.1 Druhy poruch (závad):

- **zkrat mezi vodiči** – vzájemné vodivé spojení pracovních vodičů,
- **zemní zkrat (zkrat na kostru)** - vodivé spojení mezi částí pod napětím a zemí (kostrou) přes poškozenou izolaci, u sítí s uzemněným uzlem, – viz obr.1.
- **zemní spojení** podobné jako zemní zkrat, avšak u sítí izolovaných.



Obr. 1 Druhy poruch.

10.3.3.2 Napětí při poruchách

- **dotykové (skutečné) napětí** ((effective) touch voltage) je napětí mezi vodivými částmi, kterých se osoba nebo zvíře dotýká současně,
- **předpokládané dotykové napětí** (prospective touch voltage) je napětí mezi současně přístupnými vodivými částmi, když se jich člověk (osoba) nebo zvíře nedotýká,
- **trvale dovolené dotykové napětí** – mezní hranice velikosti napětí, pod níž nedochází k ohrožení osob a zvířat viz tabulka 3,
- **krokové napětí** (step voltage) je napětí mezi dvěma body zemského povrchu vzdálenými od sebe 1 m; - délka kroku člověka (je rozdíl potenciálu mezi dvěma ekvipotenciálními kružnicemi elektrického pole vzdálenými 1 m).

Za bezpečná napětí proti zemi se považují hodnoty napětí nejvýše ve [V]				
v prostorech	střídavá		stejnoseměrná	
	působící			
	trvale	krátkodobě	trvale	krátkodobě
normálních a nebezpečných	25	50	60	120
zvlášť nebezpečných	0	12	0	25
Pojmem krátkodobé působení se myslí působení, když je instalace v poruše do doby, než bude tato porucha odstraněna				

Tabulka 3. Meze konvenčních dotykových napětí.

10.3.3.3 Přímý a nepřímý dotyk částí EZ

Předpisy rozlišují při úrazu elektrickým proudem:



- **Přímý dotyk** – je to dotyk osoby nebo zvířete s aktivní částí EZ pod napětím (např. s neizolovaným vodičem). K zabránění přímého dotyku musí být všechny vodivé části provozovaného zařízení opatřeny krytem, izolací apod.
- **Nepřímý dotyk** – je to dotyk osoby nebo zvířete s tou částí EZ (kostrou nebo krytem), která je v důsledku poruchy pod napětím. K zabránění nebezpečným účinkům musí být provedeno takové opatření, aby nedošlo k možnému úrazu elektrickým proudem.

10.3.4 Základní požadavky na elektrická zařízení z hlediska jejich bezpečnosti a spolehlivosti

Požaduje se, aby veškeré vybavení, tj. zařízení, umístěné v daném prostoru bylo bezpečné, a to pro lidi (obsluhující i ostatní, na provozu zúčastněné i nezúčastněné), hospodářská nebo domácí zvířata, i pro majetek. Elektrické zařízení musí být takové, aby:

- co nejlépe, tj. také spolehlivě plnilo svůj účel,
- nepůsobilo škodlivě na okolí,
- bylo dostatečně odolné vůči působení z okolí (působení vnějších vlivů),
- nežádoucím způsobem nepůsobilo na jiná zařízení a jinými zařízeními nebylo nežádoucím způsobem ovlivňováno,
- zabralo co nejméně místa, tedy aby prostor sloužící danému účelu mohl být co nejmenší,
- spotřebovávalo co nejméně a co nejlevnější elektrickou energii,
- mělo co nejjednodušší přívod elektrické energie,
- bylo snadno ovladatelné a jeho funkce aby se přizpůsobovala okamžitým podmínkám a potřebám jeho provozování,
- montáž zařízení byla co nejsnadnější a nejlevnější.

Přitom je třeba respektovat požadavky zákazníka uvedené ve smlouvě a základní charakteristiky spotřeby a přívodu elektrické energie, prostředí představovaného vnějšími vlivy.

10.3.4.1 Základní požadavky na EZ jsou dány řadou právních předpisů a technických norem:

- Zákon 22/1997, který upravuje způsob stanovování technických požadavků na výrobky, práva a povinnosti osob uvádějících výrobky na trh a stanovuje pravidla tvorby a uplatňování norem.
- Nařízení vlády č. 17/2003Sb., kterým se stanoví technické požadavky na elektrická zařízení nn.
- Vyhláška 48/1982, kterou se stanoví základní požadavky k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení.
- Zákoník práce č. 262/2006 Sb.
- Zákon č. 309/2006 Sb., kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany zdraví při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy.
- ČSN 33 2000 Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení.
- Nařízení vlády č. 378/2001 Sb., které stanovuje bližší požadavky na bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, přístrojů a náradí, s účinností od 1. 1. 2003.
- Vyhláška č. 73/2010 Sb. o stanovení vyhrazených elektrických technických zařízení, jejich zařazení do tříd a skupin a o bližších podmínkách jejich bezpečnosti (vyhláška o vyhrazených elektrických technických zařízeních).
- ČSN EN 50110-1, ed.2 (34 3100)- Obsluha a práce na elektrických zařízeních.



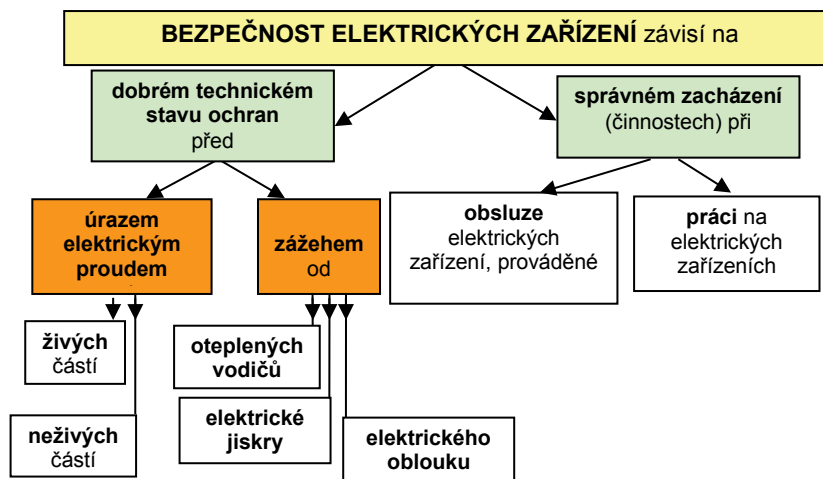
10.3.4.2 Základní požadavky k zajištění bezpečnosti dle ČSN 33 2000

- ochrana před úrazem elektrickým proudem – revize el. zařízení,
- základní ochrana (ochrana před dotykem živých částí) tím, že se:
 - zabrání průchodu proudu tělem osoby nebo zvířete,
 - omezí proud, který může tělem procházet, na bezpečnou hodnotu,
 - zařízení automaticky – ve stanoveném čase – odpojí od zdroje, jakmile dojde k poruše.
- ochrana před tepelnými účinky:
 - uspořádáním zařízení tak, aby vlivem vysoké teploty nebo elektrického oblouku nemohlo dojít k vznícení hořlavých hmot,
- ochrana před nadproudy, které mohou způsobovat nebezpečně zvýšené teploty nebo elektromechanické síly, provedená:
 - automatickým odpojením do doby, než působení proudu bude nebezpečné,
 - omezením nejvyššího nadproudu na bezpečnou hodnotu a bezpečnou dobu trvání,
- ochrana před následky poruchových proudů:
 - použitím takových vodičů a ostatních částí, kterými tyto proudy mohou procházet, aby tyto proudy byly schopny vést, aniž by se nadměrně zahřály,
- ochrana před přepětím vzniklým v důsledku:
 - poruchy mezi živými částmi v obvodech různého napětí,
 - jiných příčin (atmosférickými jevy, spínacími procesy, statickou elektřinou),
- ochrana před požárem – hašení:
 - během provozu EZ nemůže být možnost vzniku požáru vyloučena,
 - při požáru musí být nebezpečné nebo ohrožené části EZ vypnuty, vyjma těch, která slouží k hašení,
 - nebo pokud by jejich vypnutí mohlo způsobit další nebezpečí,
 - při hašení na EZ musí být dodržovány bezpečné vzdálenosti a obsluha hasicích přístrojů a systému musí být proškolená,

Tato uvedená všeobecná pravidla obsažená v normě neplatí pro EZ:

- u jednoúčelových zařízení a ve zvláštních objektech kde platí oddíly části 7 této normy (např. koupelny, bazény, sauny, karavany, zemědělská a zahradní zařízení atd.);
- v místnostech pro lékařské účely (zde platí ČSN 33 2140);
- pro zařízení elektrické požární signalizace;
- u kolejových a silničních vozidel;- v prostředích s nebezpečím požáru nebo výbuchu (plynů, prachů, výbušnin), kde tyto záležitosti řeší jiné směrnice a normy jako např.:
 - u prostorů s výbušnou plynou atmosférou jsou to normy ČSN EN 60079-10,14 (33 2320);
 - u prostorů s hořlavým prachem jsou to normy ČSN EN 50281-1-1,2 (33 2330);
 - u výbušných prostředí v dolech je to norma ČSN EN 1127-2 (38 9622) atd.





Obr. 2 Technicko organizační opatření na el. zařízeních.

10.3.4.3 Pracoviště s nebezpečím výbuchu

Při provádění elektrických prací v místech s nebezpečím výbuchu musí být:

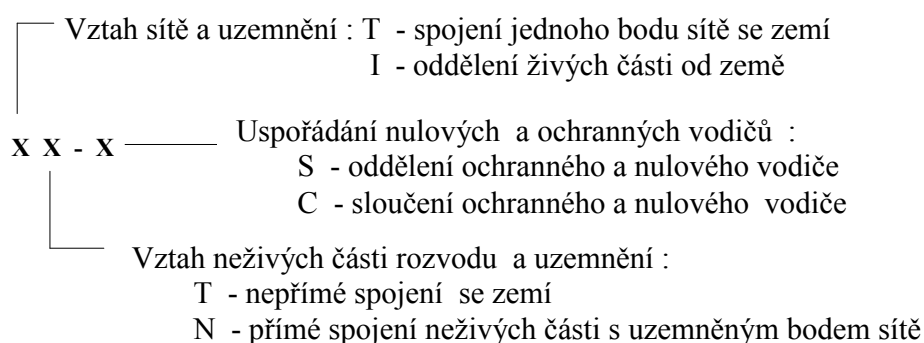
- všechny pracovní činnosti zakázány, nebo zastaveny (do snížení rizika výbuchu),
- prováděna kontrola rizika výbuchu (monitorování ovzduší, větrání, požití jiskrově bezpečných EZ).

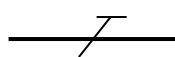
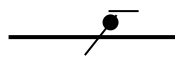
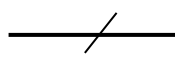
10.4 DRUHY ROZVODNÝCH SÍTÍ A ZPŮSOB JEJICH OZNAČOVÁNÍ

Definice: Elektrickou sítí tvoří soustava obvodů sloužících k napájení připojených elektrických zařízení, napájená z téhož zdroje. Přitom nejde jen o prvotní zdroj (například generátor apod.). Nová síť vzniká i vřazením dalšího (podružného) zdroje (např. transformátoru, měniče kmitočtu apod.). Jehož výstup je spolehlivě oddělen od napájecí soustavy.

Rozdělení:

- dle počtu pracovních vodičů (2, 3, 4), dle druhu proudu (AC, DC),
- dle způsobu uzemnění – písmenový kód označení xx – x (např. TN – C, TN – S, TN-C-S, IT, TT):



	Nulový vodič (N)
	Ochranný vodič (PE)
	Sloučený ochranný a nulový vodič (PEN)
	Fázový vodič (L)

Tabulka 4 Vysvětlivky k označování vodičů ve schématech.

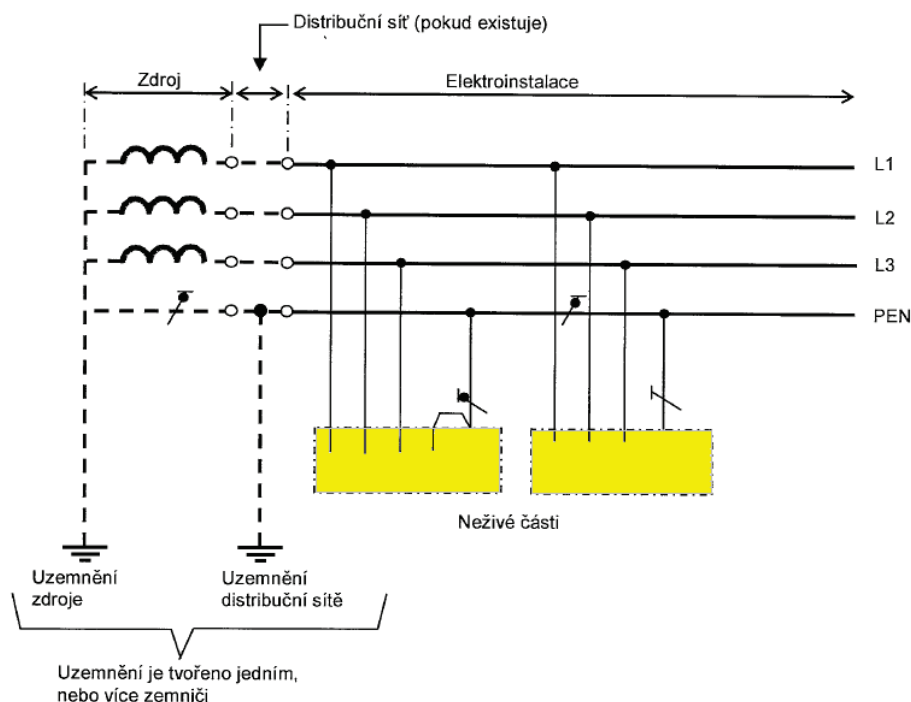
10.4.1 Příklady označení a zapojení nejčastěji používaných střídavých (AC) rozvodných sítí:

10.4.1.1 Jednozdrojové sítě TN

Napájecí sítě TN mají jeden bod přímo uzemněný u zdroje, neživé části elektroinstalace jsou připojeny k tomuto bodu ochrannými vodiči. Rozlišují se tři typy sítí TN podle uspořádání nulových a ochranných vodičů:

- TN-C,
- TN-S,
- TN -C-S.

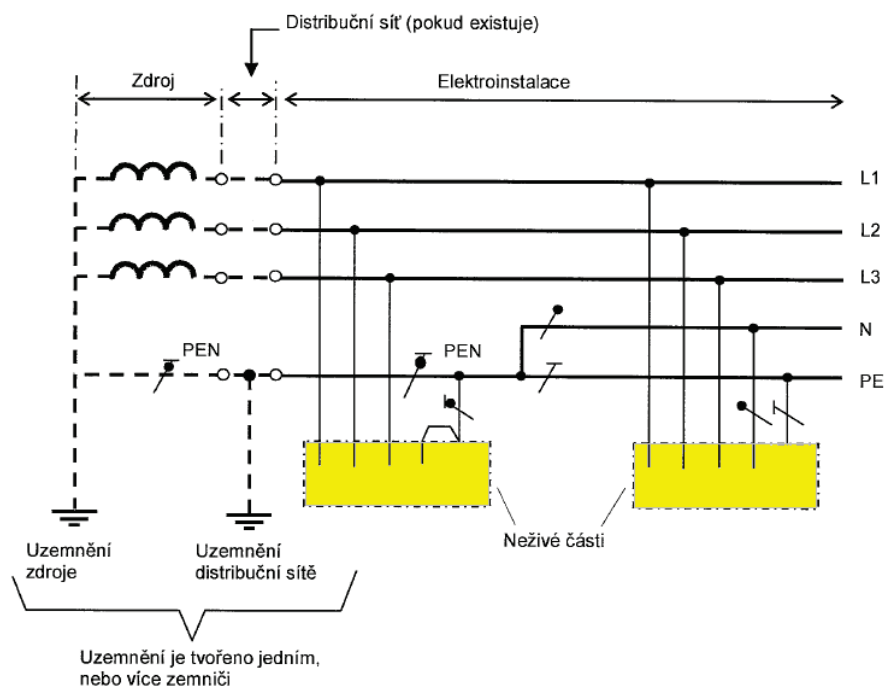
TN-C - funkce nulového a ochranného vodiče je v celé síti sloučena (PEN). Trojfázová čtyřvodičová síť s uzemněným nulovým bodem, ochranný vodič současně plní funkci nulového vodiče (označení PEN). Tím je jednoznačně definováno, že jde o příslušnost k rozvodné soustavě TN-C (viz obr.3).



Obr.3 Čtyřvodičová 3f síť TN-C v níž je vodič s kombinovanou funkcí nulového a ochranného vodiče.

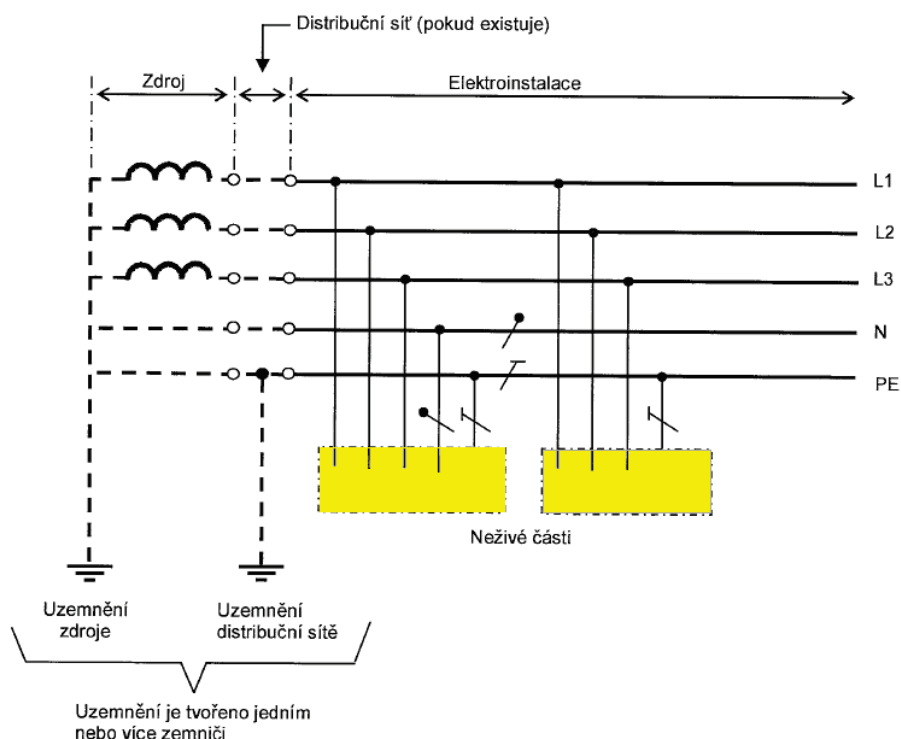
TN C-S - trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem, funkce části nulového a ochranného vodiče je v části TN-C sloučená, od bodu oddělení je pak ochranný vodič PE veden odděleně od středního vodiče N a v další části již nesmí dojít ke spojení těchto vodičů.





Obr.4 Čtyřvodičová 3f síť TN-C-S v části s PEN, který se ve elektroinstalaci dělí na samostatný PE a N.

TN-S Trojfázová pětivodičová síť s uzemněným nulovým bodem, ochranný vodič (PE) a nulový vodič (N) jsou od místa spojení (u zdroje) vedeny odděleně.



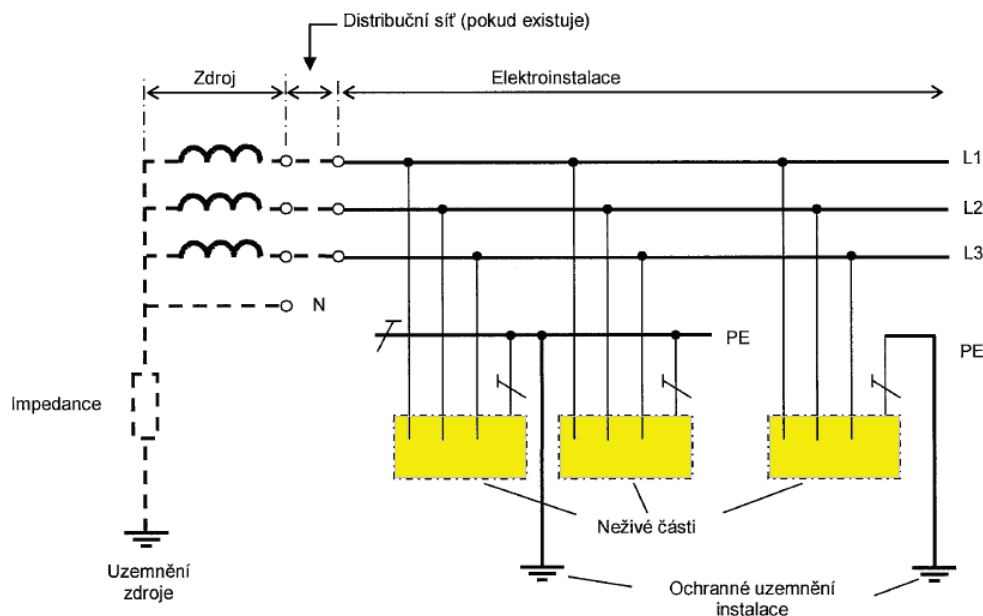
Obr.5 Pětivodičová 3f síť TN-S s odděleným nulovým vodičem a ochranným vodičem.

10.4.1.2 Síť IT

Síť IT má jeden bod uzemněný přes impedanci. Všechny živé části sítě IT jsou izolované od země (průmyslové a důlní sítě). Rozvod nulového vodiče N je možno provést v případě uzlu zdroje (zapojení do hvězdy) a dle potřeby odběratele (možnost připojení jednofázových



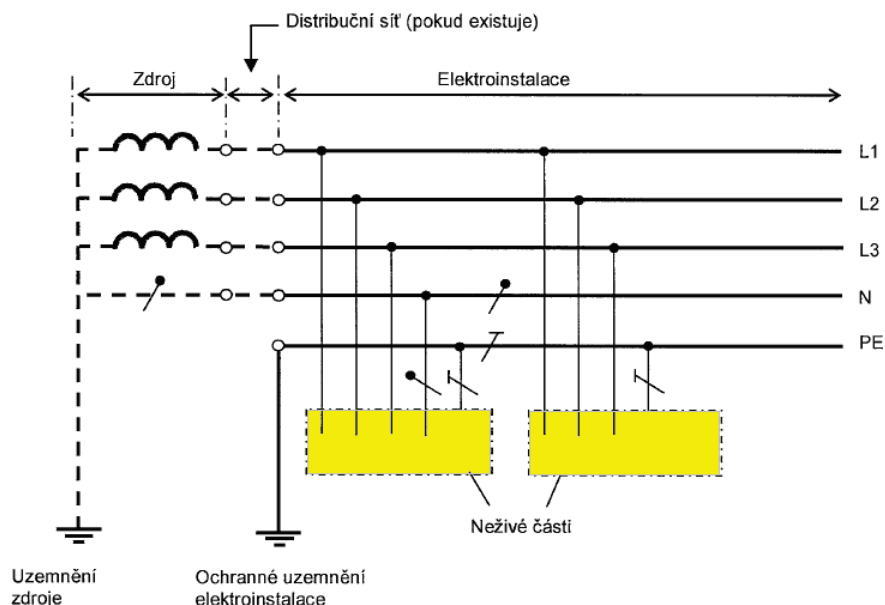
spotřebičů). V síti IT musí být zařízení k hlídání izolačního stavu (k indikaci zemního spojení).



Obr.6 Síť IT s neživými částmi, spojenými s ochranným vodičem, který je centrálně uzemněn.

10.4.1.3 Síť TT

TT síť má jediný bod přímo uzemněný a neživé části jsou uzemněny nezávisle na distribuční síti.



Obr.7 Síť TT s odděleným nulovým vodičem a ochranným vodičem elektroinstalace.

10.5 VNĚJŠÍ VLIVY

Na každé elektrické zařízení působí okolí a naopak. Toto „působení“ je v elektrotechnických předpisech definováno jako vnější vlivy. Vnější vlivy svojí přítomností předurčují jednotlivé prostory **z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem, elektrickým či elektromagnetickým polem**. Elektrická zařízení (jeho náročnosti provedení a zabezpečení elektrických i navazujících zařízení) je možno z hlediska vnějších vlivů rozdělit na zařízení:

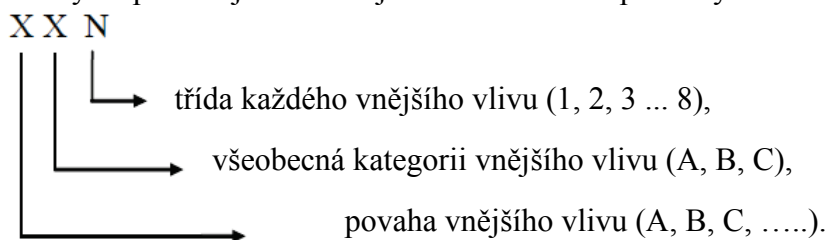


- do **prostředí bez nebezpečí výbuchu** (zpravidla méně náročné provedení a jednodušší požadavky obsažené v souboru základních předpisových norem),
- do **prostředí s nebezpečím výbuchu** (pouze začleněno do obecného třídění vnějších vlivů, vyžaduje náročnější provedení a soubor normativních požadavků opírajících se o speciální legislativu).

K zajištění **základních podmínek bezpečnosti** (osob, užitných zvířat a majetku) **při provozní spolehlivosti** (při určeném způsobu provozu) je třeba, aby elektrické zařízení bylo vybráno a instalováno v souladu s požadavky základního předpisu ČSN 33 2000-5-51 ed.3 Elektrotechnické předpisy.

Třídění a označování vnějších vlivů je provedeno v souladu s ČSN 33 2000-5-51 ed.3 nebo v souladu s ČSN 33 2000 – 4 – 41 ed.2 (Změna 1).

Každý stupeň vnějšího vlivu je kódován dvěma písmeny velké abecedy a číslicí:



10.5.1 Všeobecné kategorie vnějšího vlivu

A.vnější činitel prostředí (dále jen prostředí) - vlastnosti okolí, sledují se: - teplota, vlhkost, nadmořská výška, přítomnost vody, výskyt cizích těles, látek, fluory, fauny, mech. namáhání, působení záření, seismické účinky, atmosférické vlivy.

B.využití - uplatnění objektu dané:

- vlastnostmi (duševními a pohybovými), elektrotechnickými znalostmi osob a odporu lidského těla;
- četností osob a možnost jejich úniku;
- vlastnostmi zpracovávaných látek.

C.konstrukce budovy - souhrn vlastností a provedení budovy, její fixace k okolí

Vnější vlivy ovlivňující provoz zařízení jsou zjednodušeně vzato vnější vlivy kategorie A. Příliš vysoká teplota, vysoká vlhkost nebo přítomnost vody může být pro elektrické zařízení škodlivá. Toto elektrické zařízení může být vnějšími vlivy, na něž není konstruováno zničit, případně se může stát zdrojem úrazu požáru atd. Vnější vlivy, popisujícími jak může elektrické zařízení negativně ovlivnit okolí, jsou vlivy v kategorii B. Na elektrické vláčky určené dětem budou z hlediska bezpečnosti kladeny diametrálně odlišné nároky než na prostor rozvodny, ve které se budou pohybovat pouze osoby znalé. Elektrické zařízení se může stát zdrojem úrazu elektrickým proudem, v některých prostorách může nevhodná volba elektrického zařízení iniciovat požár nebo výbuch.

Jak je patrné vnější vlivy předurčují oblast a podmínky provozu elektrických zařízení. Vnější vlivy ovšem na druhou stranu rozhodně nezahrnují laboratorní podmínky typu teplota $22 \pm 2^\circ \text{C}$, vlhkost $65 \pm 5 \%$. Jsou stavěny v rozumně členěných intervalech tak, aby vystihly předpokládané užití elektrických zařízení. Například rozsah teplot pro vnější vliv AA5 je od $+5$ do $+40^\circ \text{C}$. Vlhkost (vliv AB5) může dosahovat hodnoty od 15 do 85 %.

10.5.2 Druhy prostorů:

- **normální** (vnější vlivy neovlivňují tj. nezvyšují nebezpečí úrazu el. proudem);



- **nebezpečné** (vlivem prostředí je stálé nebo přechodné nebezpečí úrazu);
- **zvlášť nebezpečné** (zvláštní okolnosti nebo vlivy způsobují zvýšené nebezpečí úrazu).

Prostory normální mohou být například obývací pokoj, krejčovská nebo stolařská dílna atd. Avšak například i prostor například laboratoře s nebezpečím výbuchu může být z hlediska úrazu elektrickým proudem prostorem normálním, přestože na elektrická zařízení zde instalovaná platí logicky velmi tvrdé předpisy.

Prostory nebezpečné jsou zejména prostory horké, vlhké, s příležitostným rizikem koroze prostory s častým kontaktem osob s potenciálem země (například kovové lávky, kovové panely, pulty, zábradlí atd.) prostory, kde vlivem zpracování materiálů jsou vibrace (riziko uvolnění šroubových spojů).

Prostory zvlášť nebezpečné jsou prostory zejména mokré, tj. prostory, kde se vyskytuje voda v kapalném skupenství, prostory se silnými rázy a vibracemi a s trvalým rizikem koroze. Určování vnějších vlivů. Vnější vlivy musí být určeny a to ve všech prostorech, kde je umístěno nebo používáno EZ, nebo kde musí být řešena ochrana před nebezpečnými účinky statické elektřiny. Toto určení má dodat majitel (stavitel) objektu. Vlastní určení provede komise, jejíž složení je dle povahy vlivu (např. technolog, bezpečnostní a požární technik apod.).

O určení protokolu o vnějších vlivech musí být písemný doklad - protokol, který je součástí dokladové části dokumentace. Pro prostory, kde jsou vlivy stanoveny jednoznačně technickou normou, nebo předpisem lze provést v protokolu pouze odkaz na normu. Pro prostory považované z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem za normální není nutno zpracovávat protokol.

10.6 KRYTÍ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Krytím elektrických zařízení se snažíme elektrické zařízení chránit před vnikem vody a pevných těles.

Jednak je to ochrana elektrického zařízení před vnějšími vlivy AD (voda) a AE (pevná tělesa). Tedy vnější vlivy jsou příčinou, ochrana krytím je důsledkem – provedením elektrického zařízení tak, aby nebylo těmito vnějšími vlivy ovlivněno. Druhým neméně důležitým významem je ochrana před nebezpečným dotykem živých částí. Jednou ze základních ochran je ochrana krytím.

Pro některé další specifické vnější vlivy je rovněž vyžadován určitý minimální stupeň krytí. Stupeň ochrany krytem je rozsah ochrany ověřený normalizovanými zkušebními metodami, který se označuje mezinárodním IP kódem (IP - Ingress Protection):

I P x x C H → -doplňkové písmeno (nepovinné)

→ -přídavné písmeno (nepovinné)

→ - stupeň ochrany před vniknutím vody s nebezpečnými účinky (číslíce 0 ÷ 6 nebo písmeno X)

→ - stupeň ochrany před vniknutím pevných těles (číslíce 0 ÷ 8 nebo písmeno X)

→ - mezinárodní kód (**I**nternational **P**rotection)

První číslice	Stupeň ochrany
---------------	----------------



	Význam pro ochranu zařízení	Význam pro ochranu osob
	Ochrana před vnikem pevných cizích těles:	Ochrana před dotykem nebezp. částí :
0	bez ochrany	bez speciální ochrany
1	o průměru ≥ 50 mm	hřbetem ruky
2	o průměru $\geq 12,5$ mm	prstem
3	o průměru $\geq 2,5$ mm	nástrojem
4	o průměru ≥ 1 mm	drátem
5	ochrana před prachem	drátem
6	ochrana úplná před prachem	drátem

Tabulka 5 Stručný popis a definice jednotlivých stupňů ochrany proti vniknutí pevných těles.

Druhá číslice	Stupeň ochrany	
	stručný popis	definice
0	bez ochrany	bez speciální ochrany
1	ochrana před svisle kapající vodou	škodlivě nesmějí působit svisle padající kapky
2	padající kapky při náklonu krytu do 15°	děšť dopadající na kryt pod úhlem 15° nesmí škodit EZ.
3	padající kapky při náklonu krytu do 60°	voda v podobě deště dopadající na kryt pod úhlem 60° nesmí škodit EZ
4	ochrana před stříkající vodou	voda stříkající na kryt v libovolném směru nesmí škodit EZ
5	ochrana před proudem vody	tryskající voda v libovolném směru nesmí škodit EZ
6	ochrana proti intenzivně tryskající vodě	intenzivně tryskající voda nesmí vniknout dovnitř a škodit EZ
7	ochrana při ponoření (dočasném)	při ponoření nesmí voda vniknout při určitém tlaku pod kryt a poškodit EZ
8	ochrana při trvalém ponoření	

Tabulka 6 Stručný popis a definice jednotlivých stupňů ochrany proti vniknutí vody.

Stručný popis a definice jednotlivých stupňů ochrany je uveden v tab. 5 a 6. Minimální krytí je IP 00, zařízení není chráněno před vnikem pevných částic a vody, maximální stupeň krytí je IP 68, kdy zařízení je prachotěsné a určené pro trvalý ponor. Za zmínku stojí, že zařízení užívané laiky musí splňovat z důvodu ochrany před dotykem živých částí minimální krytí IP 2X nebo IP XX-B pro svislé části krytů resp. IP4X resp. IP XX-D pro vodorovné části krytů nebo pro místnosti kde se pohybují děti.

10.7 ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU NA LIDSKÝ ORGANISMUS

Účinek el. proudu na lidský organizmus závisí na:

- druhu, velikosti a kmitočtu proudu I ;
- impedanci lidského těla a dráze průchodu proudu tělem;
- době průchodu proudu;



- velikosti dotykového napětí.

10.7.1 Druh, velikost a kmitočet proudu

Působení stejnosměrného proudu je méně nebezpečné než působení střídavého proudu. Oba druhy proudu způsobují rozklad krve i svalové křeče (což vede k neschopnosti okysličování organismu a k zástavě dýchání). Střídavý proud navíc od určité hranice způsobuje tzv. fibrilaci srdce, což vede k zástavě srdeční činnosti. Srdce pracuje vlastně jako krevní pumpa s frekvencí cca 70 tepů za minutu. Při průchodu střídavého proudu (např. s frekvencí 50 Hz) srdce ztrácí schopnost pracovat jako krevní pumpa a dochází pouze ke chvění srdce (srdeční fibrilaci) a tím pak k zástavě srdeční činnosti. Proto je střídavý proud pro lidský organismus nebezpečnější.

10.7.2 Impedance lidského těla a dráha proudu

Velikost impedance lidského těla se pohybuje v rozmezí od $1\text{k}\Omega$ až do $10\text{k}\Omega$ a je rozdílná u každého jednotlivce (je dána fyziologickým stavem organismu). Průměrná hodnota je $2\text{k}\Omega$. Impedance lidského těla mění také v závislosti na jeho psychickém stavu. Se zhoršujícím se psychickým stavem (stavy únavy, duševní deprese apod.) impedance lidského těla klesá (až na hodnotu 400Ω).

Nejnebezpečnější dráhy proudu jsou takové, které zasahují mozkové centrum a srdeční oblast. Např. dráha hlava - ruka, hlava – noha; levá ruka - pravá ruka a levá ruka - levá noha.

10.7.3 Doba průchodu proudu

Delší působení proudu má větší následky než kratší. Bylo prokázáno, že jestliže průchod proudu lidským tělem trvá 0,8s a více, zasáhne minimálně jedenkrát tzv. vulnerabilní fázi srdeční činnosti a srdce mimořádně náchylné k zástavě. Se vzrůstající dobou průchodu proudu klesá impedance lidského organismu a tím následně dochází také ke vzrůstu tělového proudu.

10.7.4 Velikost dotykového napětí

Pokožku si můžeme představit jako nedokonalý izolační obal lidského těla, protože má asi dvacetkrát menší vodivost než sliznice a měkké vnitřní orgány lidského těla. Působením napětí vyšších než asi 60 V však kůže tuto vlastnost velmi rychle ztrácí. Tato skutečnost má podstatný vliv na stanovení meze bezpečných napětí.

Příklad účinků střídavého proudu s kmitočtem 50-60 Hz

Hodnoty jsou uvedeny pro případ průtoku elektrického proudu z levé ruky do obou nohou.

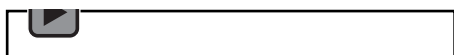
0,0045 mA	pozorovatelné chvění (brnění) jazyku,
1,2 mA	pozorovatelné chvění (brnění) prstů,
6 mA	počátek vzniku svalových křečí u žen,
9 mA	počátek vzniku svalových křečí u mužů,
20 mA	ochabnutí dýchacích svalů,
80 mA	fibrilace srdce, když doba působení proudu je delší než 1s.

10.8 OCHRANA PŘED ÚRAZEM ELEKTRICKÝM PROUDEM

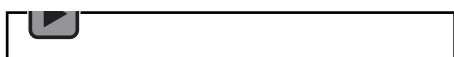
10.8.1 Základní pojmy

Živé části EZ - jsou určeny k vedení proudu nebo mají napětí nebo části s nimi vodivě spojené.

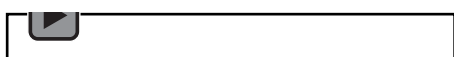


**Audio 14.12 Živé části EZ**

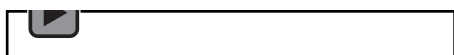
Neživé části EZ - nejsou určeny k vedení proudu a ani na nich není normálně napětí. Napětí se na neživé části elektrického zařízení může vyskytnout při náhodilé poruše (na př. poškozením nebo překlenutím izolace, vadnou manipulaci apod.). Neživé části mohou, ale nemusí být součástí elektrického zařízení (pouzdra, kryty, obaly, kovové konstrukce apod.).

**Audio 14.13 Neživé části EZ**

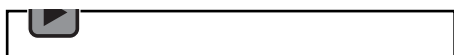
Základní izolace (dříve pracovní izolace) musí být navržena pro jmenovité izolační napětí, které je pro obvod stanoveno, přičemž je nutno brát v úvahu přepětí, které může v zařízení nastat. Je předpokladem spolehlivé funkce zařízení a správné funkce ochrany před úrazem elektrickým proudem.

**Audio 14.14 Základní izolace**

Přídavná izolace musí mít aspoň stejné vlastnosti jako základní izolace. (použitý izolant však může být jiného druhu než je základní izolace).

**Audio 14.15 Přídavná izolace**

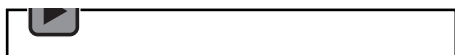
Dvojitá izolace se skládá vlastně se základní a přídavné izolace a musí zajišťovat, aby jakákoliv porucha v základní izolaci nebo přídavné izolaci nezhoršovala zbývající části dvojité izolace.

**Audio 14.16 Dvojitá izolace**

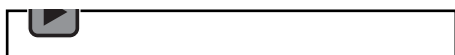
Elektrická zařízení, která mají dvojitou nebo zesílenou izolaci se z hlediska ochrany nazývají zařízení **třídy ochrany II** a označují se značkou .

Uzemnění - neživé části musejí být připojeny k ochrannému vodiči při splnění podmínek pro každý způsob uzemnění sítě. Neživé části současně přístupné dotyku musejí být spojeny se stejnou uzemňovací soustavou jednotlivě, po skupinách nebo společně.



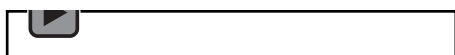
**Audio 14.17 Uzemnění**

Pospojování - vyrovnaní potenciálů všech dostupných vodivých částí na úroveň potenciálu země. Rozlišují se dva druhy pospojování:

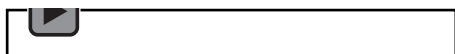
**Audio 14.18 Pospojování**

Hlavní pospojování - navzájem musejí být spojeny tyto vodivé části:

- ochranný vodič a uzemňovací přívod nebo hlavní ochranná svorka,
- rozvody plynu, vody, ústřední topení, klimatizace, kovové konstrukční části.

**Audio 14.19 Hlavní pospojování**

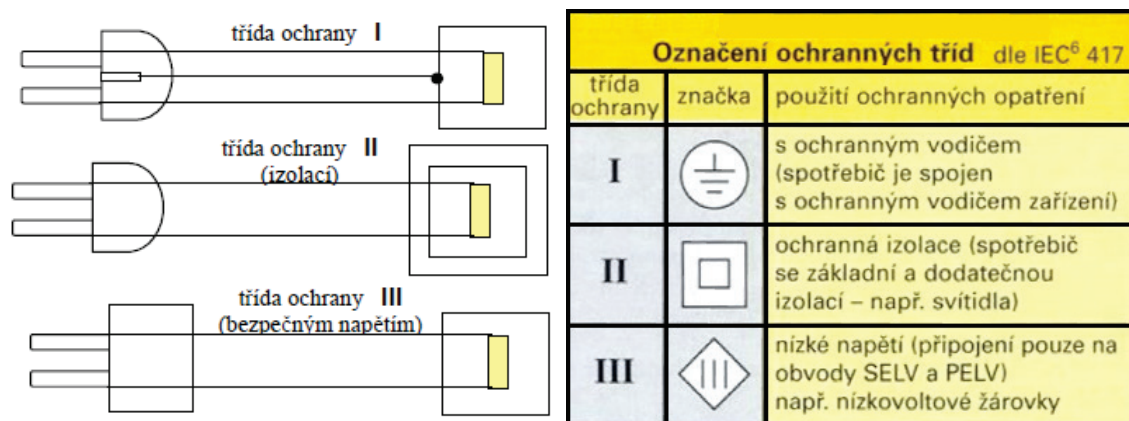
Doplňující pospojování – zahrnuje pospojování veškerých vodivých částí současně přístupných dotyku (elektrických i neelektrických zařízení) jestliže nelze splnit podmínky samočinného odpojení v předepsaném čase.

**Audio 14.20 Doplnující pospojování**

10.8.2 Třídy ochrany elektrických spotřebičů

Elektrická zařízení (zejména spotřebiče) se konstruují ve třídách ochrany. V technické praxi se používají 3 třídy ochrany (tř. I., tř. II, tř. III). Tyto třídy vyjadřují konstrukci zařízení, resp. jakým způsobem bude zajištěna ochrana před úrazem elektrickým proudem.





Obr. 8. Třídy ochrany elektrických spotřebičů a jejich označení.

10.8.3 Principy a základní pravidlo ochrany před úrazem elektrickým proudem

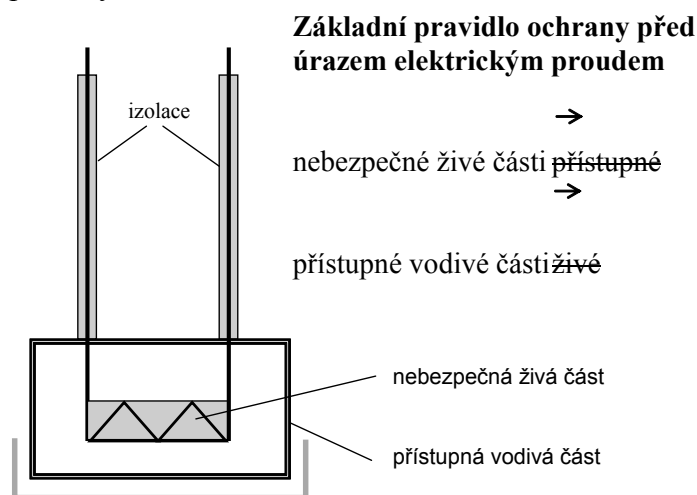
Principy ochrany jsou odvozeny podle normy ČSNEN61140 ed.2. Předpokládá se, že provoz elektrického zařízení probíhá buď

- za normálních podmínek (bezporuchový provoz), nebo
- za podmínek jedné poruchy.

Zároveň v určitých prostorech (např. ve vlhkých a mokrých prostorech) může použití elektrické zařízení zvyšovat nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Přitom musí být vždy dodrženo základní pravidlo ochrany před úrazem elektrickým proudem.

10.8.3.1 Základní pravidlo ochrany před úrazem elektrickým proudem:

Nebezpečné živé části nesmí být volně přístupné a přístupné vodivé části nesmí být nebezpečně živé ani za normálních podmínek (provoz při určeném použití a bez poruchy) ani za podmínek jedné poruchy.



Obr. 9. Objasnění pravidla ochrany před úrazem elektrickým proudem, bezporuchový provoz.

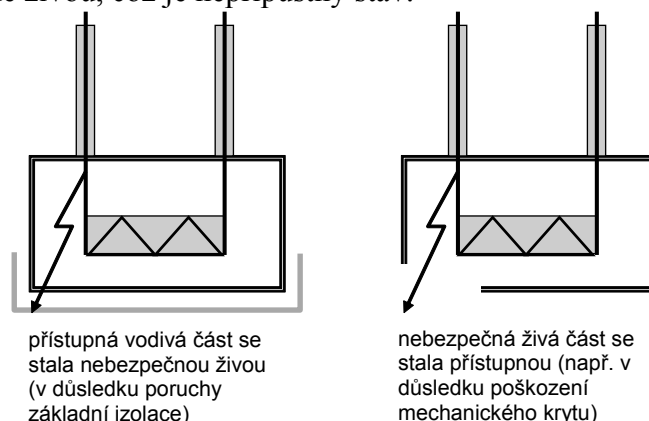
Prakticky to znamená, že

- nebezpečné živé části musí být vždy uzavřeny krytem nebo pokryty izolací tak, aby nemohlo dojít k jejich dotyku;
- neživé části včetně všech vodivých částí, kterých je možno se dotknout se nikdy nesmějí dostat pod napětí.



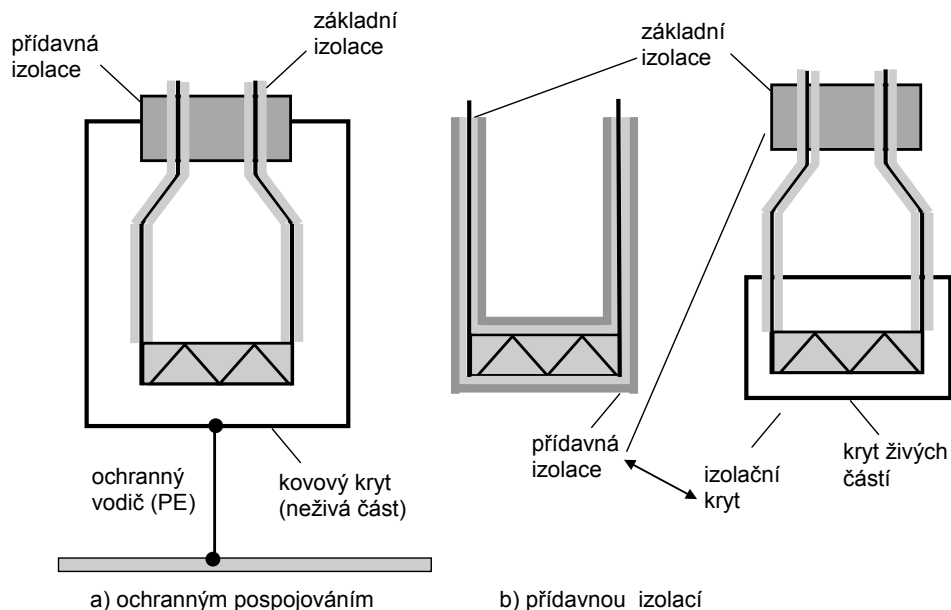
10.8.3.2 Zajištění ochrany z hlediska podmínek provozu

Na obr. 10 je vidět, jaké uvažované poruchy mohou vzniknout. Z hlediska rizika úrazu elektrickým proudem je to poškození krytu (nebo poškození základní izolace), porucha (průraz) izolace na kostru. V tomto případě je již živá část volně přístupná resp. neživá část se stala částí nebezpečně živou, což je nepřijatelný stav.



Obr. 10 Objasnění vzniku poruchy.

Na obr. 11 jsou naznačeny některé ze způsobů, jak zajistit ochranu před úrazem elektrickým proudem v podmínkách jedné poruchy. Jednou z možností je ochranné pospojování (spojení neživých částí s PE vodičem sítě) a to buď realizací automatického odpojení od zdroje (bude rozebráno dále) nebo snížením dotykového napětí pod konvenční mez, druhou zde vyobrazenou možností je nanesení na přídavné izolace na základní izolaci (tím vznikne izolace dvojitá), kdy porušení nebo průraz obou vrstev izolace je nepravděpodobný.



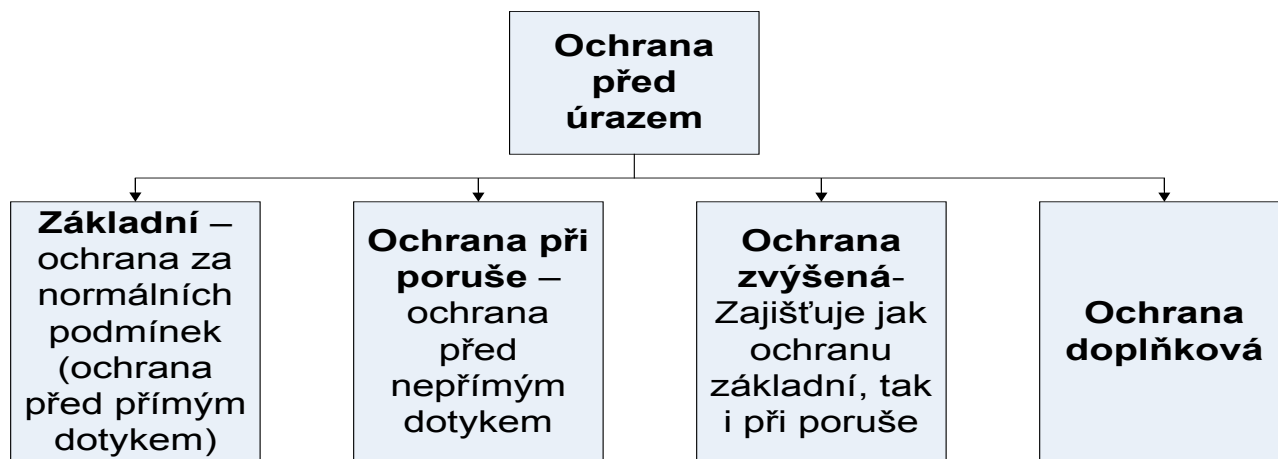
Obr.11 Způsoby jak zajistit ochranu v podmínkách 1 poruchy.

10.8.4 Koordinace ochran, technické prostředky k dosažení ochrany před úrazem elektrickým proudem

Jak bylo objasněno výše, je u elektrických zařízení požadováno, aby ani v podmínkách jedné uvažované poruchy nepředstavovaly bezpečnostní riziko vzniku úrazu elektrickým proudem. Tohoto lze dosáhnout kombinací různých nezávislých technických prostředků ochrany k zajištění bezpečnosti.



Proti dotyku živých částí se aplikuje ochrana **základní** (dříve také nazývaná ochrana před přímým dotykem), proti dotyku neživých částí se aplikuje ochrana **při poruše** (dříve také nazývaná ochrana před nepřímým dotykem). V některých případech se aplikuje ochrana **zvýšená**, která zajišťuje úroveň danou kombinací ochrany základní a ochrany při poruše. Je-li to z bezpečnostního hlediska žádoucí, lze v instalacích nad rámec těchto ochranných aplikovat ochranu **doplňkovou** (což je ochrana pro případ, že selže ochrana základní nebo při poruše).



Tabulka 7 Technické prostředky pro ochranu před úrazem elektrickým proudem.

10.8.4.1 Prostředky k zajištění základní ochrany

Tato ochrana splňuje první podmínku základního pravidla a je určena pro nerušený provoz zařízení a je zaměřena na to, aby živé části nebyly lidem přístupné. Toto je většinou provedeno při vlastní výrobě popřípadě při montáži elektrického zařízení. Prostředky k zajištění základní ochrany jsou:

- **základní izolace**,
- **přepážky, kryty, zábrany**,
- **ochrana polohou** (umístění mimo dosah),
- **omezením napětí** (nepřekročením dovolených mezí),
- **omezení dotykového proudu, náboje** (vybíjecí odpory).

10.8.4.2 Ochrana při poruše

V případě narušení základní ochrany (např. izolace, krytu) musí chránit druhý stupeň ochrany, jejímž principem je spojení neživé části s ochranným vodičem. Tímto opatřením se při poruše izolace na neživé části nevyskytne plné napětí zdroje, ale napětí snížené, jehož velikost je úměrná zemnímu odporu.

Poruchový proud tekoucí obvodem by měl u sítí s uzemněným uzlem způsobit aktivaci předřazeného jističího prvku s následným odpojením od zdroje v době, aniž dojde k ohrožení kohokoliv, kdo se v okamžiku poruchy neživé části dotýkal.

Prostředky k zajištění ochrany při poruše jsou:

- **přídavná izolace** (stejně vlastnosti jako základní izolace),
- **ochranné pospojování** (včetně uzemnění ochranného vodiče a bodu zdroje) a **ochrana automatickým odpojením od zdroje** v případě poruchy,
- **ochranné stínění** (vodivou stínicí mřížkou spojenou s pospojováním),
- **jednoduché oddělení obvodů** (galvanickým oddělením obvodů – transformátorem),
- **nevodivé okolí** (vysokou impedancí proti zemi- 50/100 k Ω).

10.8.4.3 Doplnková ochrana.

Používá se v případě zvýšeného nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Působením dalších vlivů (např. dotyk osoby se zemním potenciálem) je nutno provést další doplňující opatření, mezi které se např. počítá:

doplňující pospojování a ochrana pomocí citlivého proudového chrániče.

10.8.4.4 Prostředky zvýšené ochrany

Pod pojmem zvýšená ochrana rozumíme kombinaci opatření ochrany základní a ochrany. V instalacích prakticky používáme dva druhy těchto ochrany:

- **zesílená izolace** (stejně vlastnosti jako dvojitá izolace),
- **ochranné oddělení obvodů** (izolací, ochranným stíněním),
- **zdroj omezeného proudu,**
- **ochranná impedance** (omezení dotykového proudu na bezpečnou hodnotu).

10.8.5 Vybraná ochranná opatření dle použitých prostředků ochrany

Ochranná opatření jsou kombinacemi ochranných prostředků základní ochrany a ochrany při poruše, které zajišťují kompletní ochranu zařízení, nebo zvýšené ochrany zajišťující oba druhy ochrany.

Ochranné opatření musí sestávat z vhodné kombinace opatření pro zajištění základní ochrany a nezávislého opatření pro zajištění ochrany při poruše, nebo zvýšené ochrany, která zajišťuje jak ochranu základní, tak ochranu při poruše (příkladem zvýšené ochrany je zesílená izolace). Doplňková ochrana je specifikována jako součást ochranných opatření za určitých podmínek vnějších vlivů, na určitých zvláštních místech a ve zvláštních objektech.

V každé části instalace musí být uplatněno jedno ochranné opatření nebo více těchto opatření, přičemž se berou v úvahu podmínky vnějších vlivů.

Všeobecně jsou dovolena tato ochranná opatření:

- automatické odpojení od zdroje,
- dvojitá nebo zesílená izolace,
- elektrické oddělení pro napájení jednoho spotřebiče - malé napětí (SELV a PELV).

S ochrannými opatřeními uplatněnými v elektrické instalaci, se musí uvažovat i z hlediska výběru a montáže zařízení. Pro zvláštní instalace nebo jejich zvláštní umístění se uplatňují speciální ochranná opatření odpovídající příslušné normě.

Ochranná opatření - použití zábran a ochrana polohou (umístěním mimo dosah), se mohou použít pouze v elektrických instalacích přístupných

- osobám znalým nebo poučeným, nebo
- osobám pracujícím pod dozorem nebo dohledem osob znalých nebo poučených.

Následující ochranná opatření se mohou uplatnit pouze, je-li elektrická instalace pod dozorem znalých nebo poučených osob:

- nevodivé okolí,
- neuzemněné pospojování,
- elektrické oddělení pro napájení více než jednoho spotřebiče.

Opatření na ochranu při poruše (ochranu před nepřímým dotykem neboli před dotykem neživých částí) mohou být vynechána u těchto zařízení:

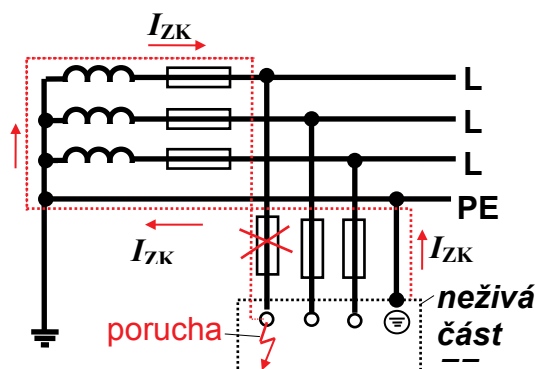
- u kovových konzol pro upevnění izolátorů venkovního vedení, umístěných mimo dosah;



- u nepřístupných ocelí vyztužených betonových sloupů pro venkovní vedení,
- u neživých částí, které pro své omezené rozměry nebo umístění nemohou být uchopeny nebo se dotýkat lidského těla na velké ploše, (obtížné nebo nespolehlivé spojení těchto částí s ochranným vodičem).

10.8.5.1 Ochrana automatickým odpojením od zdroje

Ochrana automatickým odpojením od zdroje je nejobvyklejší (nejběžnější) ochranné opatření v elektrických instalacích. Princip této ochrany pro síť TN je následující. Síť TN je síť, kde jeden vodič sítě (nejčastěji nulový vodič N) je přímo spojen se zemí. Vodič PE u sítě TN-S je spojen s vodičem N sítě. Toto přímé spojení má za následek, že v případě poruchy je poruchový proud I_{ZK} velký, prakticky limitován jen impedancí (odpory) sekundárního vinutí transformátoru, vodiče fázového do místa poruchy a ochranného vodiče zpět. Tato tzv. impedance vypínací smyčky Z_{sm} (obr. 12) je u sítí TN velmi malá, v bytových instalacích typicky pod $1\ \Omega$, v průmyslu ještě méně. Prakticky se tedy jedná o jednofázový zkrat s proudem stovek ampérů až desítek tisíc ampérů. Tento zkratový proud realizuje automatické odpojení od zdroje (přepálení pojistky, vybavení jističe), čímž odpojí vadnou část instalace od napájení. Vypínací čas je v síti TN s fázovým napětím 230V pro koncové obvody do 32A stanoven na 0,4s. Přestože poruchový proud teče vodičem PE do napájecího zdroje, je nutné vodič PE resp. vodič PEN zemnit. Důvodem je riziko plynoucího z přerušení vodiče PE nebo PEN, a v eliminaci rizika tzv. zavlčení potenciálu v síti TN. Z důvodu principu vypínání poruchy je důležité udržovat nízkou hodnotu impedance vypínací smyčky. Použití nevhodných (dlouhých) prodlužovacích šňůr, dlouhého vedení nízkého průřezu zvyšuje impedanci smyčky. Rovněž výměna jističích prvků za prvky s vyšší hodnotou jmenovitého proudu nebo prvky s pomalejší vypínací charakteristikou může vést k selhání ochrany automatickým odpojením od zdroje.



Obr. 12 Princip ochrany automatickým odpojením v síti TN-C.

Požadavky na jednotlivé ochrany:

- základní ochrana je zajištěna základní izolací, přepážkami, kryty apod.
- ochrana při poruše je zajištěna ochranným pospojováním a automatickým odpojením v případě poruchy.

Požadavky na správnou funkci této ochrany jsou zajišťovány

- ochranným uzemněním – neživé části současně přístupné dotyku musí být prostřednictvím ochranného vodiče spojeny se stejným uzemněním;
- ochranným pospojováním – vzájemně se spojí ochranný vodič, uzemňovací přívod a: kovová potrubí (vedení) vstupující do objektu (např. plyn, voda, kanalizace) kovové konstrukční části (např. topení, klimatizace), kovová výztuž betonu (pokud je přístupná).



- odpojením v případě poruchy ochranným (jistícím) přístrojem v předepsané době např.:
v sítích AC 230 V do 0,4 s.

10.9 ZÁSADY POSKYTOVÁNÍ PRVNÍ POMOCI PŘI ÚRAZU ELEKTRICKÝM PROUDEM

Harmonogram a zásady poskytování první pomoci

Při vzniku úrazu elektrickým proudem musí zachránce zachovat klid, nepodléhat panice. Většina postižených je mrtva pouze zdánlivě. Jsou známy i případy, kdy postižený přežil nahodilý kontakt s vedením vysokého napětí 22 kV. Nikdy není možno postiženého zanechat samotného, opustit jej a vyhledávat pomoc. Rovněž sled kroků musí být zachován.

Záchranu postiženého je nutno provádět do příjezdu lékaře, případně do úplného vyčerpání s ohledem na svůj zdravotní stav:

1. vyproštění postiženého z dosahu proudu;
2. jestliže postižený nedýchá, zakloní se hlava, a zkontroluje se průchodnost dýchacích cest;
3. jestliže postižený nedýchá nebo dýchá nepravidelně, příp. jsou-li pochybnosti, zahajujeme nepřímou srdeční masáž případně doplněnou o umělé dýchání (neověřuje se tep na krčních tepnách);
4. zavolat lékaře (tento krok se v případě užití mobilního telefonu zachráncem činí v průběhu kroku číslo 3);
5. informovat vedoucího práce, zaevidovat úraz do knihy úrazů.

10.10 HAŠENÍ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ

Součástí preventivní ochrany před požárem je požární dokumentace:

- požární řád (pro prostory s činností se zvýšeným nebo vysokým požárním nebezpečím),
- požární poplachová směrnice,
- požární evakuační plán.

Požární poplachová směrnice je vyvěšena v každé laboratoři. Je zde uvedeno, co dělat v případě požáru:

- a) zachránit ohrožené osoby,
- b) uhasit požár, zabránit šíření požáru,
- c) ohlásit požár na ohlašovnu požáru tel.: 3111 (vrátnice budova „A“) a uvést:
 - kde hoří,
 - co hoří,
 - kdo volá
 - odkud volá (tel.č.)
 - zraněné osoby
 - položit sluchátko, vyčkat zpětný dotaz u telefonu.

Požární evakuační plán upravuje postup při evakuaci osob a materiálu z objektů ohrožených nebo zasažených požárem.

V případě vzniku požáru je vhodné nejdříve elektrické zařízení prokazatelně vypnout a pak použít hasicích přístrojů, které jsou umístěny v každé laboratoři. Je nutné si uvědomit, že izolace kabelů (PVC - polyvinylchlorid) při hoření vyvíjí značné množství jedovatých zplodin a kouře, což může jednak znesnadnit únik (společně s výpadkem elektrické energie), jednak vyvolat otravu (při hoření PVC je vyvíjen chlorovodík, dioxiny a polychlorované bifenylly).



Toto je nutno mít na zřeteli při hašení elektrických zařízení. Elektrické zařízení pod napětím se smí hasit pouze:

- přístrojem práškovým,
- přístrojem sněhovým (CO₂),
- přístrojem halonovým (ten má omezené využití v nevětraných prostorech).

Použití vodních a pěnových hasicích přístrojů k hašení elektrických zařízení, která jsou pod napětím, je zakázáno. Hrozí nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Při hašení elektrických zařízení je nutné mít v evidenci, že vypnutím hlavního vypínače (rozvaděče, tlačítka nouzového vypnutí atd.) nemusí dojít k vypnutí všech obvodů – jednak přívody do rozvaděčů jsou často pod napětím, dále se jedná o vodiče oranžové barvy.



10.11 LITERATURA

Smejkal J.: Elektrotechnika, VUT Brno,

TKOTZ K.: Příručka pro elektrotechnika: Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Bastian P.: a kolektiv, Praktická elektrotechnika; Europa - Sobotáles cz. s.r.o., 2 vydání

Dudek J.: Bezpečnost v Elektrotechnice, VŠB TU Ostrava, 2010

Kaláb P.: Bezpečná Elektrotechnika, VUT Brno, 2011

Vrána V.: BEZPEČNÝ PROVOZ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ (EZ), VŠB TU Ostrava, učební text, 2007

Elektro v praxi , Solid Team Olomouc, 2009

ČSN 33 2000-5-51 ed.3

ČSN 33 2000-4-41 ed.2

ČSN 33 2000-1 ed.2

ČSN 33 2140

ČSN EN 61140 ed.2

Vyhláška 50/78 Sb.

Zákoník práce 262/2006 Sb.

Internet

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

