

TRANSFORMÁTORY

Přenos elektrické energie na velké vzdálenosti je hospodárný jen při vysokém napětí a malém proudu.

Transformátory přeměňují střídavá napětí a proudy na vyšší nebo nižší hodnoty o stejné frekvenci.

Rozlišujeme malé transformátory (výkon do 16kVA) a velké transformátory (výkon od 16kVA do 20MVA).

1. KONSTRUKCE A PRINCIP ČINNOSTI

Transformátory mohou být konstruovány jako **jednofázové** nebo **trojfázové**. Sestávají se ze dvou nebo více cívek, které jsou od sebe elektricky odděleny (výjimkou jsou autotransformátory).

Cívky jsou magneticky vázány společným železným jádrem. Připojíme-li vstupní cívku ke střídavému napětí, vytvoří proud procházející touto cívkou v železném jádře střídavé magnetické pole, které indukuje napětí v závitích výstupní cívky. Frekvence výstupního napětí je stejná jako frekvence vstupního napětí.

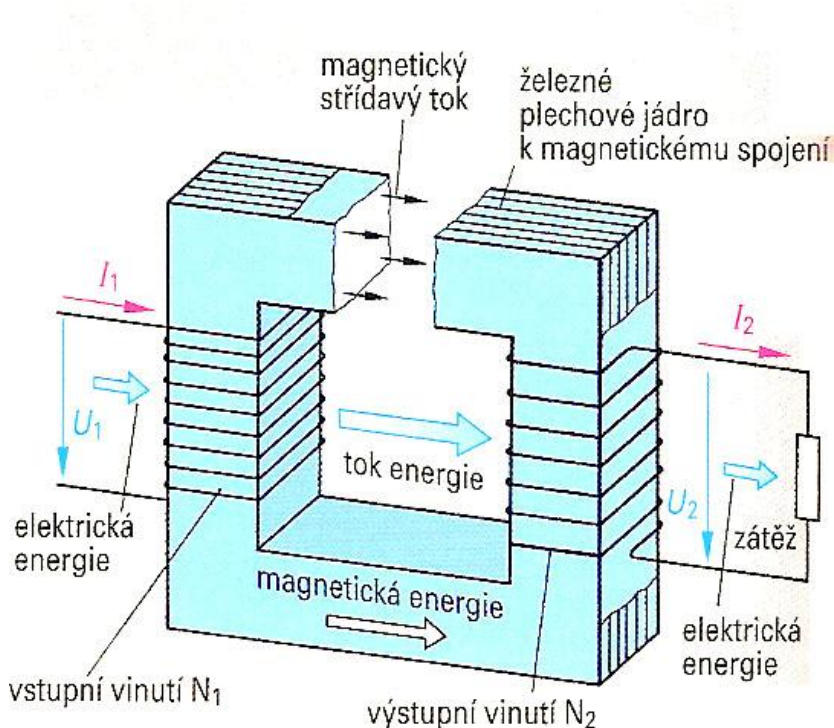
Poměr vstupního napětí U_1 k výstupnímu napětí U_2 je **převod p transformátoru**.

Při zanedbání úbytků (ideální transformátor) odpovídá převod poměru počtu závitů.

$$p = \frac{U_1}{U_2} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

U_1, N_1, I_1 – napětí, počet závitů a proud ve vstupní cívce (primární)

U_2, N_2, I_2 – napětí, počet závitů a proud ve výstupní cívce (sekundární)



Rozlišujeme transformátory **jádrové** a **plášťové**. Plášťové transformátory mají železné jádro, na němž jsou umístěna obě vinutí (vstupní i výstupní). Malé transformátory mají jádra tvaru M a EI.

Aby se minimalizovaly ztráty vířivými proudy, vyrábějí se jádra transformátorů z transformátorových plechů, které jsou vzájemně izolovány.

Obr. 1 Konstrukce transformátoru

Tvary plechů se volí podle výkonu transformátorů:

M – jednofázové transformátory do výkonu 200VA

EI – jednofázové transformátory do výkonu 1600VA

UI – jednofázové transformátory do výkonu 12kVA

EI – trojfázové transformátory do výkonu 50kVA

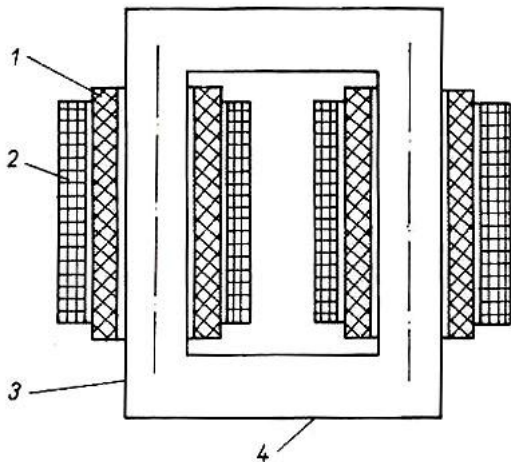
Pro větší výkony nejsou tvary normalizovány.

Pro všechny normalizované tvary (DIN) jsou odpovídající jádra tvořena **navinutými plechy**. Jsou to orientované plechy o tloušťce většinou 0,1 mm. Tato jádra mají značně menší ztráty než jádra vrstvená. Plechy jsou navinuty do bloku a zabroušeny. Jádra jsou párově označena tak, aby nedošlo k záměně a k obrácení. Zatímco jádra z transformátorových plechů mají mag. indukci asi 1,2 T (tesla), mají vinutá jádra mag. indukci 1,6 až 1,8 T.

Větší magnetické využití umožňuje zmenšení rozměrů. Nevýhodou je vyšší cena. Používají se tam, kde je požadavek na malou hmotnost a malé rozměry, např. u přenosných přístrojů.

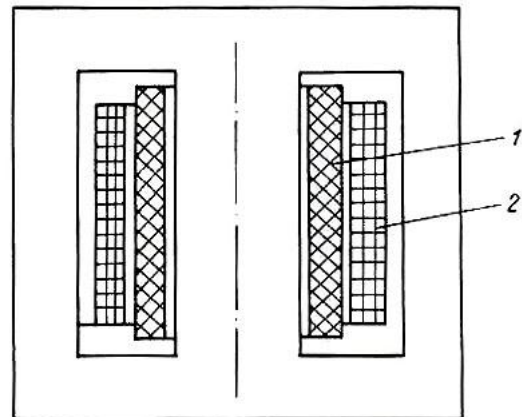
Obr. 2 Jednofázový jádrový transformátor

1 - vinutí nn, 2 - vinutí vn, 3 - jádro, 4 - spojka



Obr. 3 Jednofázový plášťový transformátor

1 - vinutí nn, 2 - vinutí vn



2. ZTRÁTY TRANSFORMÁTORŮ

Ztráty transformátorů jsou tvořeny *ztrátami v železe*, které jsou nezávislé na zatížení a ze *ztrát ve vinutí*, které závisí na zatížení.

Část odebraného výkonu se přemění v odporu vinutí na teplo, část výkonu kryje ztráty způsobené *hysterezí* (přemagnetováním) a *vířivými proudy*. Výstupní napětí je proto při zatížení menší než napětí naprázdno. Aby se tento úbytek napětí vyrovnal, má výstupní cívka zvětšený počet závitů. To znamená, že výstupní napětí U_2 má jmenovitou hodnotu jen při jmenovitém zatížení; bez zatížení má hodnotu vyšší, tzv. *napětí naprázdno*.

Úbytek napětí činí u transformátoru 5VA asi 35%, u transformátoru 50kVA asi 1,5%.
Výstupní napětí transformátoru je tedy závislé na zatížení.

3. ČINNOST NAPRÁZDNO A ZATÍŽENÍ

1. Transformátor naprázdno

Činnost naprázdno transformátoru je činnost s buzením vstupu bez zátěže na výstupu. Pro budící zdroj je **induktivní zátěží**.

Při buzení sinusovým **napětím** vzniká o 90° zpožděný sinusový **magnetizační proud** a ve fázi s ním **indukční tok**. Důsledkem střídavého magnetického toku je sinusové napětí na výstupní cívce, fázově zpožděné o 90° za indukčním tokem.

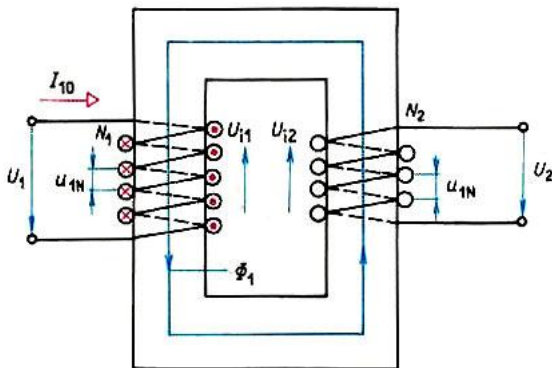
Reálný transformátor odebírá i v nezátěženém stavu nepatrný výkon, který ohřívá jádro hysterezními ztrátami a vířivými proudy a vinutí úměrně činnému odporu. Proud I_0 **naprázdno** má oproti vstupnímu napětí nepatrně menší fázové posunutí než **magnetizační** proud I_m , neboť přemagnetizace železného jádra **ztrátovým** proudem I_v představuje **ztrátový výkon**. **Účinník** při běhu naprázdno je asi 0,2.

Proud naprázdno je způsoben jenom **ztrátami**. Kvůli chybějící zátěži je malý **účinník** (poměr činného a celkového zdánlivého výkonu).

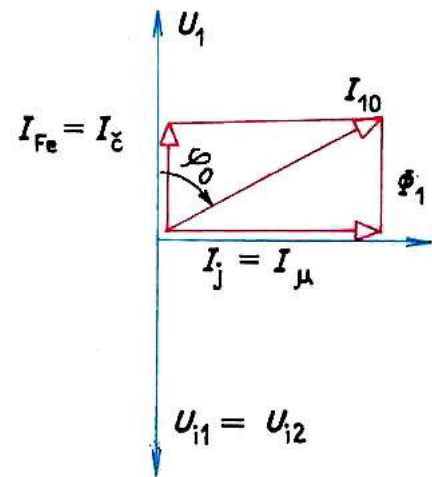
Nezátěžený transformátor se chová jako **cívka s velkou indukčností**.

Připojíme-li vstupní vinutí na střídavé napětí U_1 a na výstupní vinutí nepřipojíme žádnou zátěž, říkáme, že transformátor pracuje naprázdno.

Obr. 4 Transformátor při chodu naprázdno



Obr. 5 Fázorový diagram transformátoru při chodu naprázdno



Transformátor v tomto případě odebírá proud I_{10} , který je fázově posunut za napětím U_1 téměř o 90° , neboť transformátor představuje pro síť indukční zatížení.

Proud I_{10} podle fázorového diagramu má dvě složky. Magnetizační proud $I_\mu = I_j$, jehož fázor je kolmý k fázoru napětí U_1 , a činný proud $I_{Fe} = I_\xi$, který je ve fázi s napětím U_1 . Proud I_{Fe} kryje ztráty v magnetickém obvodu a ve vstupním vinutí. Magnetizační proud I_μ budí střídavý indukční tok Φ_1 . Časovou změnou indukčního toku Φ_1 se ve vstupním vinutí indukuje napětí U_{i1} a ve výstupním vinutí napětí U_{i2} . Obě napětí, U_{i1} a U_{i2} , jsou za indukčním tokem Φ_1 zpožděna o 90° , takže jsou v protifázi s napětím U_1 (jak je znázorněno ve fázorovém diagramu). Na svorkách výstupního vinutí je napětí $U_2 = -U_{i2}$. Indukované napětí v jednom závitě u_{1N} je stejně velké ve vstupním vinutí jako ve výstupním vinutí.

Indukovaná napětí U_{i1} a U_{i2} jsou přímo úměrná počtu závitů N_1 a N_2 , takže

$$U_{i1} = u_{1N} N_1 \quad a \quad U_{i2} = u_{1N} N_2$$

Poměr indukovaných napětí

$$\frac{U_{i1}}{U_{i2}} = p$$

se nazývá převod nebo také transformační poměr.

Protože při chodu transformátoru naprázdno platí $U_{i1} = U_1$ a $U_{i2} = U_2$, je převod dán také poměrem

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Napětí jsou přímo úměrná počtu závitů.

Do fázorového diagramu zakreslujeme tzv., výstupní napětí přepočítané na vstupní stranu. Kdybychom do něho vynášeli skutečné výstupní napětí, byl by např. při převodu transformátoru $p = 22\,000/400 = 55$ je fázor výstupního napětí mnohem menší než fázor vstupního napětí, což by činilo potíže při kreslení fázorového diagramu. Přepočítané napětí označujeme čárkou.

Pro výstupní napětí platí

$$U'_{i2} = \frac{N_1}{N_2} U_{i2}$$

V okamžiku připojení nezatíženého transformátoru k síti vznikne proudový náraz, který může být až 15krát větší, než je jmenovitý proud, protože impedance transformátoru je malá. Po vybuzení magnetického toku (tj. během několika period) se proud transformátoru při chodu naprázdno ustálí a činí asi 3% až 10% jmenovitého proudu. Menší hodnoty platí pro větší transformátory. Proud je za vstupním napětím časově posunut téměř o 90° , takže účinník $\cos \varphi_0$ je malý (0,05 – 0,1).

2. Zatížený transformátor

Činnost při zatížení je činnost při odběru proudu ze sekundárního (výstupního) vinutí transformátoru. Zatěžovací proud protékající vinutím sekundární cívky zeslabuje podle Lentová pravidla příčinu svého vzniku, tj. střídavé magnetické pole. Vstupní proud proto narůstá, zatímco magnetický tok zůstává přibližně konstantní.

V nezatíženém transformátoru prochází téměř veškerý magnetický tok železným jádrem. Při zatížení vytváří proud ve výstupu vinutí opačně orientovaný (sekundární) **magnetický tok**, který oslabí primární magnetický tok vstupního vinutí. Vstupní proud pak stoupne tak, že magnetický tok se opět zvýší. Část magnetického toku neprochází jádrem, ale okolím a nazývá se **rozptylový magnetický tok** a vytváří se kolem každé cívky s jádrem.

Kvůli rozptylovému toku transformátoru je nutné ve sdělovací technice jejich **odstínění**. Cívka, kterou prochází rozptylový tok, působí jako **tlumivka**. Transformátor se z pohledu svého výstupu chová jako zdroj střídavého napětí, jehož vnitřní odpor (**impedance**) je tvořen činným odporem a indukčností.

Výstupní napětí transformátoru je závislé na velikosti zatěžovacího proudu a na typu zátěže. Výstupní napětí klesá při činné a při indukční zátěži, ale narůstá při kapacitní zátěži.

Na obrázku jsou znázorněny poměry při zatíženém transformátoru. Výstupní napětí U_2 vyvolá ve vnějším obvodu proud I_2 , který prochází také vinutím N_2 a v jádru budí indukční tok Φ_2 . Podle Lenzova pravidla působí tento indukční tok vždy proti toku Φ_1 . Oba toky se vektorově skládají ve výsledný indukční tok Φ . Při odlehčení transformátoru se zmenší proud I_2 a tím se zmenší i tok Φ_2 , což způsobí, že se na okamžik zvětší výsledný tok Φ , který ve vstupním vinutí indukuje vyšší napětí U_{i1} . Toto napětí působí proti svorkovému napětí U_1 , které potom protlačí vinutím menší proud. Tím zase výsledný indukční tok Φ poklesne na původní hodnotu. Při větším zatížení je tomu naopak. To znamená, že při každé změně zatížení se vstupní proud vždy přizpůsobuje nastalé změně, a to tak, aby se vyrušil magnetizační účinek výstupního proudu.

U ideálního transformátoru (tj. transformátoru beze ztrát) se zdánlivý příkon

$S_1 = U_1 I_1$ rovná zdánlivému výkonu $S_2 = U_2 I_2$ a za tohoto předpokladu je potom převod

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Za předpokladu, že je stejná hustota proudu ve vstupním i výstupním vinutí, platí

$$J = \frac{I_1}{S_{v1}} = \frac{I_2}{S_{v2}}$$

a z toho

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{v2}}{S_{v1}} = p$$

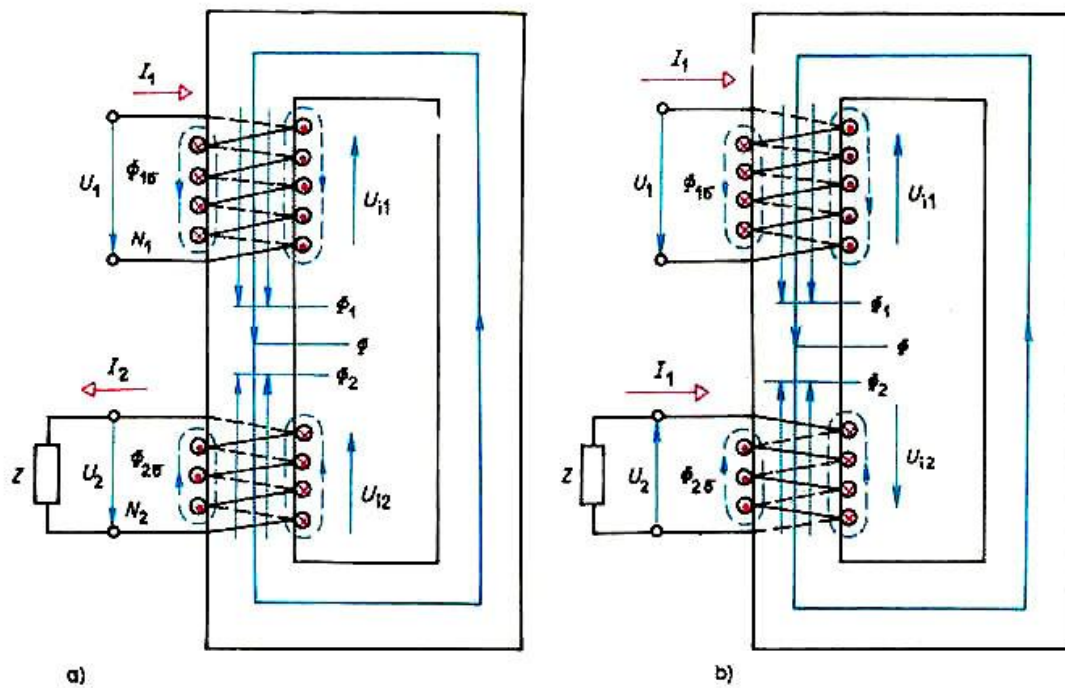
kde S_{v1} je průřez vodiče vstupního vinutí,
 S_{v2} průřez vodiče výstupního vinutí.

Proudy a průřezy vodičů vinutí jsou v převráceném poměru k napětí i k počtu závitů. Vodič vinutí, které má větší počet závitů, je pro vyšší napětí, prochází jím menší proud, má menší průřez a naopak.

Na obr.a jsou obě vinutí pravotočivá a pro lepší přehlednost jsou nakreslena nad sebou. Při souhlasném směru vinutí mají i indukovaná napětí U_{i1} a U_{i2} souhlasnou orientaci. Je-li směr vstupního vinutí a výstupního vinutí opačný (obr.b), mají i indukovaná napětí U_{i1} a U_{i2} opačnou orientaci.

Dosud jsme předpokládali, že se indukční toky Φ_1 a Φ_2 buzené proudy I_1 a I_2 uzavírají jádrem transformátoru. Ve skutečném transformátoru vznikají ještě rozptylové toky $\Phi_{\sigma 1}$ a $\Phi_{\sigma 2}$, které se uzavírají vzduchem mimo jádra a částečně i nádobou, popř. nosnou konstrukcí transformátoru (obr.b).

V každém transformátoru vznikají úbytky napětí, a to vinou činného odporu a reaktance vinutí. Odečteme-li tyto úbytky od napětí U_1 , dostaneme tzv. vnitřní napětí, které je menší než indukované napětí při chodu naprázdno. Po odečtení úbytků na výstupní straně od U_{i2} dostaneme svorkové napětí U_2 transformátoru při zatížení.



Obr. 6 Transformátor při zatížení

a) Obě vinutí jsou pravotočivá

b) Vstupní vinutí je pravotočivé, výstupní vinutí je levotočivé

4. ZKRATOVÉ NAPĚTÍ A ZKRATOVÝ PROUD – CHOD NAKRÁTKO

Zkratové napětí, nebo také napětí **nakrátko**, je ukazatelem proměnlivosti výstupního napětí při změnách zatěžovacího proudu. Napětí nakrátko je takové vstupní napětí, při kterém protéká vstupním vinutím jmenovitý proud I_{1N} při zkratovaném výstupním vinutí.

U velkých transformátorů (nad 16kVA) je napětí nakrátko udáváno na štítku transformátoru a to většinou v procentech jmenovitého napětí.

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} 100 \quad (\%)$$

u_k – relativní napětí nakrátko v %

U_k – naměřené napětí nakrátko ve V

U_N – jmenovité vstupní napětí

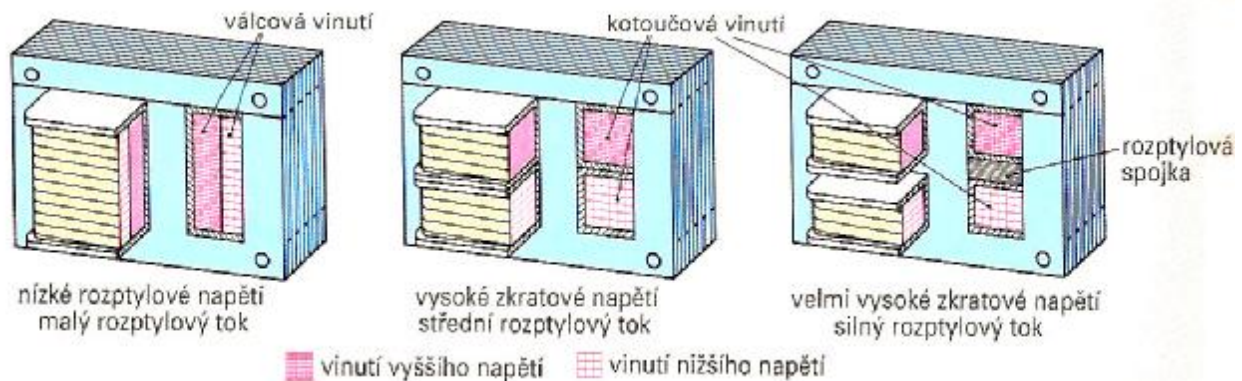
Velikost napětí nakrátko je také ukazatelem **zdánlivého vnitřního odporu** transformátoru.

Nízké relativní napětí nakrátko (u_k v %) je známkou malého vnitřního odporu, což znamená, že výstupní napětí při zatížení jen málo poklesne.

Transformátory s malým zkratovým napětím jsou **tvrdé zdroje napětí**. Transformátory s velkým zkratovým napětím jsou **měkké zdroje napětí**.

Ovlivnění napětí nakrátko

Odpor vinutí nemůže být (ve snaze o malý průřez) příliš veliký s ohledem na tepelné ztráty. Naproti tomu lze rozptyl (indukčního toku) konstrukčním řešením přizpůsobit účelu použití, a to hlavně různým uspořádáním **vinutí**.



Obr. 7 Ovlivnění zkratového napětí transformátoru uspořádáním vinutí

Zkratové napětí

Měřicí transformátory do 1%

Trojfázové transformátory

- do 200kVA	4%
- 250kVA až 3150kVA	6%
- 4MVA až 5MVA	8%
- nad 6,3MVA	10%

Jednofázové transformátory

- bezpečnostní tr.	15%
- zvonkové tr.	40%
- zkušební tr. (vzájemně propojitelné)	70%
- zapalovací tr. (cívka)	100%

Napětí naprázdno

Je napětí na výstupní straně bez zátěže, tj. bez odběru proudu. U transformátorů se jmenovitým výkonem přes 16kVA je napětí naprázdno udáváno jako jmenovité napětí.

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

$$\frac{2p}{\sqrt{2}} = 4,44$$

U_0 – napětí nakrátko

\hat{B} - magnetická indukce (špičková hodnota)

A – plocha průřezu jádra

f – kmitočet

N – počet závitů

Zkratový proud

Dojde-li na výstupní straně transformátoru ke spojení se zanedbatelným odporem nastane tzv. **zkrat**. Transformátor pak dává **zkratový proud**.

Trvá-li zkrat déle než jednu periodu střídavého napětí, mluvíme o **trvalém zkratovém proudu** I_{kd} .

Zkratový proud je u transformátorů s malým zkratovým napětím velký a u transformátorů s velkým zkratovým napětím malý. Velké zkratové proudy mohou zničit vinutí transformátoru, vypínače, rozváděče, sběrnice a zařízení.

Výstupní proud, který teče okamžitě po vzniku zkratu, se nazývá **rázový zkratový proud** I_s , který může být až dvakrát větší, než trvalý zkratový proud.

Velikost (intenzita) rázového zkratového proudu závisí na hodnotě trvalého zkratového proudu a na okamžité hodnotě střídavého napětí při vzniku zkratu. Zvláště nepříznivá situace nastane při zkratu v okamžiku, kdy je okamžitá hodnota výstupního napětí nulová. V tomto okamžiku má magnetizační proud i magnetická indukce svou maximální hodnotu. Podle Lentová pravidla se snaží zkratované výstupní vinutí zachovat podle stejné intenzity (jaká byla v okamžiku zkratu). Po několika periodách poklesne zkratový proud na úroveň trvalého zkratového proudu.

$$I_{kd} = 100\% \cdot \frac{I_n}{u_k}$$

$$I_s = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{kd} = 2,55 \cdot I_{kd}$$

I_{kd} – trvalý zkratový proud

I_n – jmenovitý výstupní proud

U_k – relativní napětí nakrátko v %

I_s – rázový zkratový proud

Spínací proud

Při zapínání transformátoru mnohdy tečou velké proudy na vstupu, i když transformátor není zatížen. Spínací proud může dosáhnout více než desetinásobku jmenovitého proudu. Obzvláště nevhodné je, když je vstupní síťové napětí v okamžiku zapnutí nulové a v železném jádře přetrvává zbytkový magnetismus. V okamžiku zapnutí se musí změnit magnetický tok, aby se indukovalo napětí. Má-li zbytkový magnetický tok stejnou orientaci jako vznikající tok, je železo brzy nasyceno a požadované napětí může být indukováno jen hodně velkým magnetizačním proudem. Jmenovitý proud pojistek na vstupu transformátoru musí být proto zhruba dvojnásobný než jmenovitý proud transformátoru.

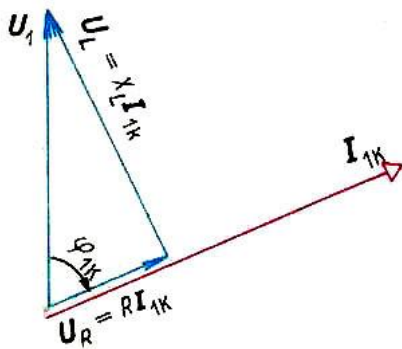
Transformátor nakrátko

Výstupní svorky transformátoru nakrátko jsou spojeny bezodporovou spojkou. Výstupní napětí U_2 se rovná nule a celé vstupní napětí U_1 se spotřebuje ve vinutí transformátoru. Ustálený proud nakrátko

$$I_{1k} = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U_1}{Z} \quad a \quad \cos \varphi_{1k} = \frac{R}{Z}$$

kde Z je impedance transformátoru.

Běžné transformátory mají malou impedanci. Úbytky napětí jsou malé, a proto jejich zkratové proudy jsou velké a pro transformátory nebezpečné, neboť namáhají vinutí jak tepelně, tak i mechanicky. Jejich vinutí musí být dobře upevněno a staženo, aby vydrželo první náraz dynamických sil při zkratu. Fázorový diagram transformátoru nakrátko je na obr.7. Zde je třeba si ujasnit rozdíl mezi pojmy proud nakrátko a zkratový proud. Zkratový proud je časově proměnný proud po náhlém spojení transformátoru nakrátko při určitém napětí; proud nakrátko je ustálený proud transformátoru při stavu nakrátko.



Obr. 8 Fázorový diagram transformátoru nakrátko

Impedanci transformátoru a tzv. napětí nakrátko zjišťujeme měřením na transformátoru spojeném nakrátko. Napětí nakrátko U_{1k} je napětí na vstupní straně, při kterém prochází vstupním vinutím transformátoru jmenovitý proud I_{1N} , jsou-li jeho výstupní svorky spojeny nakrátko. Napětí nakrátko se udává v procentech jmenovitého vstupního napětí U_{1N} a říká se mu procentní napětí nakrátko.

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1N}} 100 \quad (\%)$$

Procentní napětí nakrátko je udáno na štítku transformátoru a je důležité pro určení ustáleného proudu nakrátko a pro paralelní spojování transformátorů.

5. ÚČINNOST TRANSFORMÁTORŮ

Účinnost je poměr odevzdaného k přijatému činnému výkonu. Odevzdaný výkon je oproti přijatému výkonu menší o ztráty v železe (v jádře) a ztráty v mědi (ve vinutí).

$$h = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + P_{VFe} + P_{VWi}}$$

η – účinnost
 P_{ab} – vydaný výkon
 P_{VFe} – ztráty v železe
 P_{VWi} – ztráty ve vinutí

Magnetický tok v železném jádře nezávisí na zatížení, proto jsou ztráty v železe vždy stejné. Proud tekoucí ve vinutí je závislý na zatížení a ztráty ve vinutí jsou úměrné druhé mocnině proudu ($R \cdot I^2$). Jsou závislé na vstupním proudu a tím i na zdánlivém výkonu připojených spotřebičů a ne pouze na jejich činném výkonu.

Čím menší je účinník připojených spotřebičů, tím menší je také **účinnost** transformátoru.

V nezatíženém transformátoru nevznikají ztráty ve výstupním vinutí a ve vstupním vinutí vznikají jen velmi malé ztráty, které lze zanedbat. Výkon odebíraný transformátorem naprázdno (s nezatíženým výstupem) je prakticky roven **ztrátám v železe**.

Ztráty v železe se u transformátoru měří při **běhu naprázdno**.

Při měření zkratového napětí tečou ve vinutích jmenovité proudy a nazývají se **ztráty ve vinutí** (ztráty v mědi). Při měření zkratového napětí je při malých napětích velmi malý magnetický tok v jádře a tím téměř žádné ztráty v železe. Výkon odebíraný transformátorem při měření zkratového napětí je prakticky roven **ztrátám ve vinutí**.

Ztráty ve vinutí se u transformátoru měří při **zkratovaném výstupu**.

6. MALÉ TRANSFORMÁTORY

Jsou to transformátory se jmenovitým výkonem do 16kVA pro sítě do 1000V a do 500Hz. Malé transformátory musí být zvláště zabezpečeny proti úrazu el. Proudem, protože s nimi přicházejí do styku osoby neznalé.

Jádra malých transformátorů se skládají z transformátorových plechů normovaných tvarů a velikostí. Podle tvaru rozeznáváme plechy tvaru: EI, M, UI a L. Používají se i jiné tvary, jakož i jádra vinutá z plechového pásku (C-jádra). Ke spojení se používají šrouby nebo nýty izolované od plechů. Vnější plochy plechů musí být chráněné izolací a proti korozi např. impregnačním lakem. Transformátory s vinutými **C-jádry** mají malý rozptyl a velmi malé ztráty v železném jádře.

Vinutí a izolace transformátorů

K vinutí se používají většinou měděné vodiče, které jsou izolovány lakem.

Cívky malých transformátorů se lisují z termoplastů (např. polyamid). Větší cívky se vyrábějí v krabicovém tvaru. Jsou z lisovaného nebo tvrdého papíru. Jádra s nasazenými cívkami se většínou impregnují ve vakuu lakem a vytvrzují v peci při teplotě 120⁰C. Tím se dosáhne velké mechanické pevnosti, vysoké elektrické pevnosti, dobré ochrany před vlhnutím vinutí a dostatečné ochrany jádra před korozí. Kromě toho se impregnováním zmenší brum plechů jádra.

Válcové vinutí se navíjí podélně na cívku. Pro vysoká napětí se po každé vrstvě, pro nízká napětí se po každé třetí nebo čtvrté vrstvě, vkládá izolační fólie. Tím se zabrání vniknutí do sousední nižší vrstvy. Pokud je vstupní a výstupní vinutí na jedné cívce, je nutná ještě jedna přídatná mezivrstva izolace.

Do navinutých cívek se vkládají plechy jádra. U jader s malým rozptylem se plechy zasunují střídavě, aby nevznikla mezi jádrem a jhem vzduchová mezera. Jádra z plechů zmenšují ztráty vířivými proudy. Plechy se oxidují a jednostranně lakují.

Zkoušení malých transformátorů:

Izolační odpor se měří stejnosměrným napětím 500V. Naměřené hodnoty nesmí být nižší než:

- 2MΩ mezi částmi pod napětím a kostrou
- 7MΩ při zesílené izolaci, např. u ochranných transformátorů
- 5MΩ mezi vstupní a výstupní částí

Elektrická průrazná pevnost se měří vysokonapět'ovou zkoušečkou. Při zkoušce vinutí mezi sebou a proti jádru transformátoru, popř. jeho vodivému krytu, nesmí dojít k elektrickému průrazu.

Nejvyšší dovolené výstupní napětí je:

- u přenosných oddělovacích transformátorů 1000V
- u ochranných oddělovacích transformátorů 500V
- u přenosných oddělovacích transf. a transf. pro zásuvky holicích přístrojů 250V
- u ochranných transformátorů 50V
- u transformátorů pro hračky a zvonky 25V

Označování malých transformátorů:

Transformátory odolné proti zkratu mají velké zkratové napětí. Jejich zkratový proud je tak malý, že nepoškodí transformátor ani při trvalém zkratu.

Transformátory jištěné proti zkratu mají buď jen tavnou pojistku nebo nadproudový či tepelný jistič.

Oddělovací transformátory mají galvanicky oddělená primární a sekundární vinutí a toto oddělení bývá jištěno tak, že obě vinutí jsou na různých oddělených cívkách nebo vedle sebe (ne přes sebe)) oddělené na jednom cívkovém tělese (kostře). Přenosné transformátory musí mít ochrannou izolaci.

Přístrojové transformátory slouží k napájení ovládacích galvanicky oddělených obvodů přístrojů, např. jističů.

Síťové transformátory slouží k získání většinou několika různých galvanicky oddělených napětí z napětí síťového, která jsou po usměrnění napájecími napětími pro elektrické obvody elektronických přístrojů, počítačů, televizorů apod.

Zapalovací transformátory slouží k zapálení plynu nebo topného oleje v automaticky řízených ohřívačích a topných systémech. Vinutí jsou galvanicky oddělená a transformátory jsou odolné proti zkratu.

Ochranné transformátory slouží jako zdroje malého bezpečného napětí. Jejich jmenovitý výkon je nejvýše 10kVA, jmenovitý kmitočet maximálně 500Hz. Jmenovité výstupní napětí je menší než 50V (např. 6V, 12V, 24V). Ochranné transformátory musí být proti zkratu odolné nebo jištěné. Vinutí vyššího a nižšího napětí musí být od sebe oddělena natolik bezpečně, aby nedošlo ke galvanickému spojení mezi primárním a sekundárním vinutím ani při porušení izolace vinutí (přehřátím), ani při uvolnění některého kovového dílu. Ochranné transformátory, které jsou zdrojem síťového napětí v bezpečných sítích SELV a PELV, musí mít ověřovací značku EZU.

Bezpečnostní transformátory

- **Transformátory pro hračky** jsou předepsány pro hračky napájené ze síťových zdrojů. Jmenovité výstupní napětí je nejvýše 24V, výkon nesmí přesáhnout 100W. Transformátor pro hračky musí mít ochrannou izolaci.
- **Zvukové transformátory** nesmějí mít výstupní napětí vyšší než 24V a musí být odolné proti zkratu. Výstupní svorky musí být přístupné a použitelné, aniž by bylo nutno odnímat nějakou součást.
- **Transformátor pro ruční svítilny** musí mít ochrannou izolaci, izolaci proti stříkající vodě, nebo musí být vodotěsný.
- **Rozmrazovací transformátory** slouží k rozmrazování zamrzlých kovových vodovodních vedení. Jmenovité napětí smí být nejvýše 250V/24V. Rozmrazovací transformátory musí být jištěné proti zkratu a s ochrannou izolací.
- **Transformátory pro lékařské přístroje** smějí mít výstupní jmenovité napětí nejvýše 24V, pokud napájený přístroj přichází do styku s lidským tělem zevně. Pokud je napájený přístroj zaváděn dovnitř lidského těla, může být jmenovité výstupní napětí nejvýše 6V. Transformátory pro lékařské přístroje musí mít ochrannou izolaci.

7. ZVLÁŠTNÍ TRANSFORMÁTORY

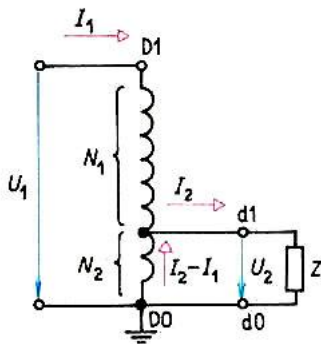
1. Autotransformátory

Autotransformátor je tvořen jedním vinutím s odbočkou, která rozděluje vinutí na paralelní a sériovou část. paralelní část vinutí je vinutím menšího napětí a při transformaci směrem dolů je zapojena paralelně se zátěží. Celé vinutí je vinutím většího napětí.

Autotransformátorem lze transformovat napětí dolů i nahoru.

Jedna část vinutí s N_1 závitů je spojena do série s druhou částí vinutí s N_2 závitů. Část vinutí s N_2 závitů je společná pro vstupní i výstupní stranu a prochází jí rozdíl proudů $I_2 - I_1$. **Převod autotransformátoru**

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$



Obr. 9 Schéma jednofázového autotransformátoru

Autotransformátor neodděluje galvanicky výstupní obvod od vstupního – nelze ho použít jako zdroj bezpečného napětí. Autotransformátor je úsporný z hlediska hmotnosti jádra i vinutí.

Účinnost autotransformátoru je při rozdílu primárního a sekundárního napětí do 10% až 99,8%.

Zkratové napětí je většinou nízké, náklady na izolaci jsou na vstupní i výstupní straně tytéž.

Autotransformátory jsou často používány v oblasti větších výkonů, protože mají velmi malé ztráty a jsou tvrdými zdroji napětí při kolísavém zatížení.

Autotransformátory se používají jako předřadné prvky k sodíkovým výbojkám, jako rozběhové transformátory pro trojfázové motory, jako regulační transformátory v sítích vysokého napětí a k transformaci vysokého napětí, např. z 230kV na 400kV.

Autotransformátory slouží většinou k napěťovému přizpůsobení spotřebičů na jiné síťové napětí v místní síti (nejčastěji 230V/120V). Ochranný i nulový vodič je průchozí a ochranný systém místní sítě tak zůstává zachován.

Autotransformátor je vlastně **indukčním děličem** tvořeným jedním vinutím s odbočkou.

U autotransformátoru rozlišujeme dva výkony. **Výkon průchozí** (vnější), který se přenáší ze vstupní strany na výstupní stranu

$$S_p = U_1 I_1 = U_2 I_2$$

a **výkon typový** (vnitřní), který se přenáší transformací,

$$S_t = I_1 (U_1 - U_2) = I_1 U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right)$$

$$S_t = S_p \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right)$$

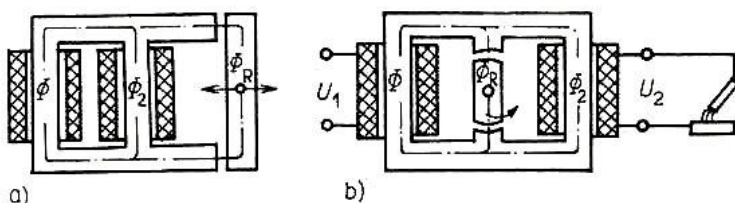
Podle typového výkonu se volí velikost transformátoru. Autotransformátory se používají ke snižování nebo i ke zvyšování napětí. Nesmíme je však použít k transformaci vysokého napětí na nízké napětí nebo nízkého napětí na malé napětí, protože při přerušení společného vinutí N_2 by se nebezpečné napětí dostalo na stranu nižšího napětí. Proto ho také nelze použít jako bezpečný transformátor, který musí mít vstupní obvod oddělený od výstupního.

Trojfázové autotransformátory se používají ke spouštění asynchronních a synchronních motorů, k regulaci napětí na konci rozvodných sítí nebo ke vzájemnému spojování sítí s různým napětím.

2. Rozptylové transformátory

Jsou to měkké zdroje napětí odolné proti zkratu. Při velkých zatěžovacích proudech rychle vzrůstá úbytek napětí na indukčním jalovém odporu, takže při zkratu již proud tolik nenaroste. Rozptylové transformátory mívají často v jádře přestavitelnou spojku k nastavení rozptylu magnetického toku.

3. Svařovací transformátory



Obr. 10 Podstata transformátoru pro obloukové svařování
a) S oddalováním jádra
b) S vysouváním nebo natáčením jádra

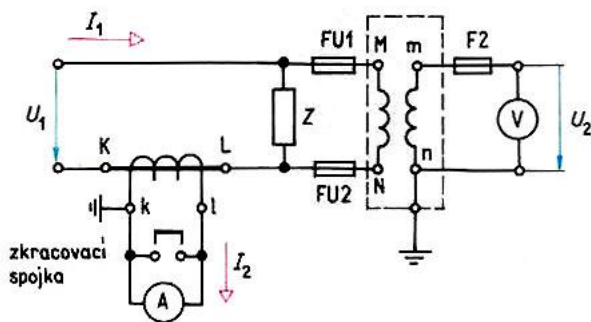
Obloukové svářečky obsahují kromě vlastního transformátoru ještě zařízení pro regulaci svářecího proudu. Napětí naprázdno může být maximálně 70V a při sváření uvnitř menších ocelových nádob jen 50V. Krátkodobě (do 0,2s) smí napětí dosáhnout i vyšších hodnot.

Svářecí transformátor musí vydržet zkrat při kontaktu před vytažením oblouku. Proto mají svářecí transformátory zapojenou sériově tlumivku, nebo jsou provedeny jako transformátory rozptylové. Účinník $\cos \varphi$ je proto velmi malý.

4. Měřicí transformátory

Převádějí vysoká napětí a velké proudy na hodnoty akceptovatelné pro relé, elektroniku nebo měřicí přístroje.

Při naprosto přesném převodu hodnot umožní bezpečné měření přístroje mimo dosah zařízení vysokého napětí a velkých výkonů, ve kterých např. nelze kvůli měření proudu rozpojovat měřené obvody.



Obr. 11 Schéma zapojení měřicích transformátorů proudu a napětí

a) Napěťový měřicí transformátor (indukční voltmetr)

Převádí měřené vysoké napětí v udaném poměru na napětí měřitelné běžným voltmetrem. Má velmi malé rozptylové pole a přesně udaný převodní poměr v celém pracovním rozsahu. Výkon bývá podle napětí a konstrukce od 5VA až do 300VA.

Převodní poměr bývá volen tak, aby se dal použít k měření voltmetr s rozsahem do 100V (nebo 110V).

Na straně vysokého napětí je transformátor jištěn pojistkami (proti nadproudu při zkratu na výstupu). Na sekundární straně je pojistka jen v jednom vývodu.

K jištění měřicích přístrojů musí být uzemněn kryt transformátoru i vedení k přístroji. Při průrazu izolace vysokým napětím dojde ke zkratu na zem a pojistky pak zařízení odpojí.

Napětový měřicí transformátor smí být provozován jen s malým zatížením nebo bez zatížení. Přetížení může transformátor zničit.

b) Proudový měřicí transformátor (indukční ampérmetr)

Slouží k připojení ampérmetru nebo proudového vedení (např. k wattmetru). Vstupní svorky (K a L) se připojují na vodič, ve kterém měříme proud. K výstupním svorkám (k a l) se připojuje ampérmetr.

Pomocí proudového měřicího transformátoru mohou být měřeny velké proudy v sítích nízkého napětí nebo z bezpečnostních důvodů proudy v zařízeních vysokého napětí.

Jmenovitý výstupní proud proudového měřicího transformátoru je (maximálně) 1A nebo 5A (přízpůsobený rozsahům měřicích přístrojů). Jmenovitý výkon je podle velikosti a napětí od 5VA do 120VA.

Ampérmetr i vedení mají velmi malý odpor a výstupní vedení transformátoru je tak prakticky zkratováno a není nijak jištěno.

Při výměně nebo odpojení ampérmetru je nutno výstupní svorky transformátoru zkratovat. Při velkém vstupním proudu by se totiž při běhu naprázdno naindukovalo na výstupním vinutí tak velké napětí naprázdno, že by mohlo dojít k průrazu izolace.

Proudový měřicí transformátor smí být připojen na vedení jen se zatíženým nebo zkratovaným výstupem. Provoz s výstupem naprázdno je zakázán.

Klešťový indukční ampérmetr má rozevratelné jádro ve tvaru kleští. Obejmou-li čelisti kleští vodič protékající proudem, působí tento vodič jako vstupní vinutí proudového měřicího transformátoru. Klešťovým indukčním ampérmetrem je možno měřit velké střídavé proudy, aniž by bylo nutno rozpojovat měřený obvod.

Průvlečný indukční ampérmetr pracuje na stejném principu jako klešťový přístroj, avšak vodič je nutno rozpojit a provléct. Rozsah a citlivost lze zvýšit tak, že vodič provléčeme jádrem měřicího transformátoru několikrát.

8. TROJFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

1. Konstrukce a princip

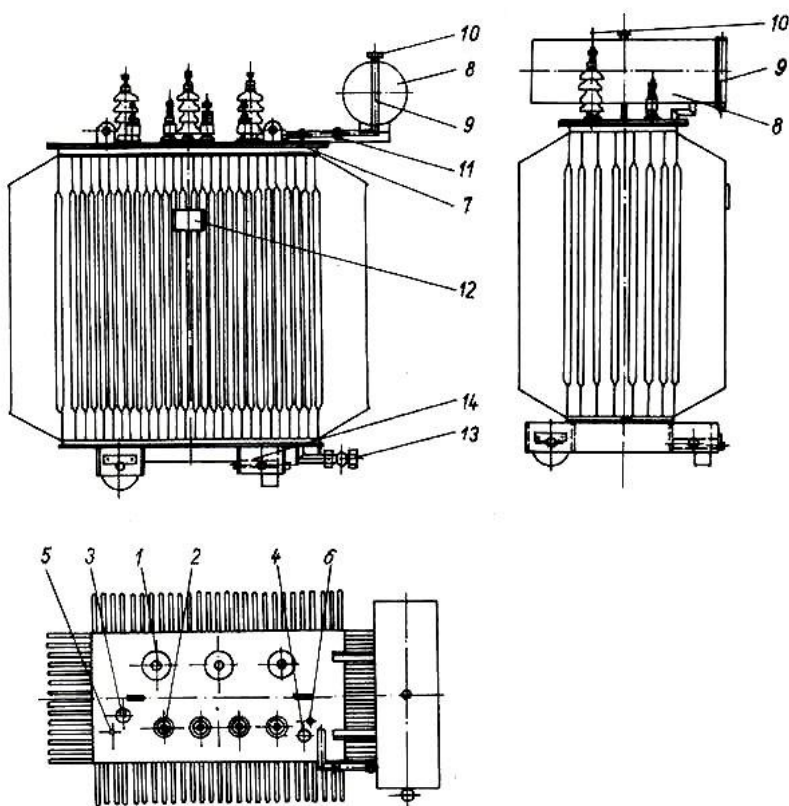
Trojfázové střídavé napětí se dá transformovat třemi stejnými jednofázovými transformátory, jsou-li jejich vstupní a výstupní vinutí mezi sebou propojena do trojúhelníku nebo do hvězdy. Je proto účelné použít jeden trojfázový transformátor se společným železným jádrem pro všechna tři vinutí. Trojfázové transformátory se stavějí na výkon od 10kVA do 1000kVA.

Železné jádro

Trojici železných jader pro trojfázový proud je možno si představit v hvězdicovém uspořádání. Ve třech jádrech působí tři magnetické toky, které jsou ve fázích se třemi střídavými proudy, fázově posunutými o 120° . Při symetrickém zatížení fází je součet magnetických toků ve středovém sloupcu jádra roven nule. Proto může být středový sloupek vynechán. Dáme-li zbývající sloupky do jedné roviny, dostaneme nejběžnější trojfázové jádro.

Vinutí

Zkratové napětí by mělo být u trojfázových transformátorů (velkého výkonu) co nejmenší. Proto jsou vinutí na jednotlivých sloupcích trojsloupkového (trojramenného) jádra uspořádána ve dvou válcových vrstvách tak, že vinutí s nižším napětím je vždy blíže jádru, aby bylo menší riziko průrazu vyššího napětí na uzemněné jádro.

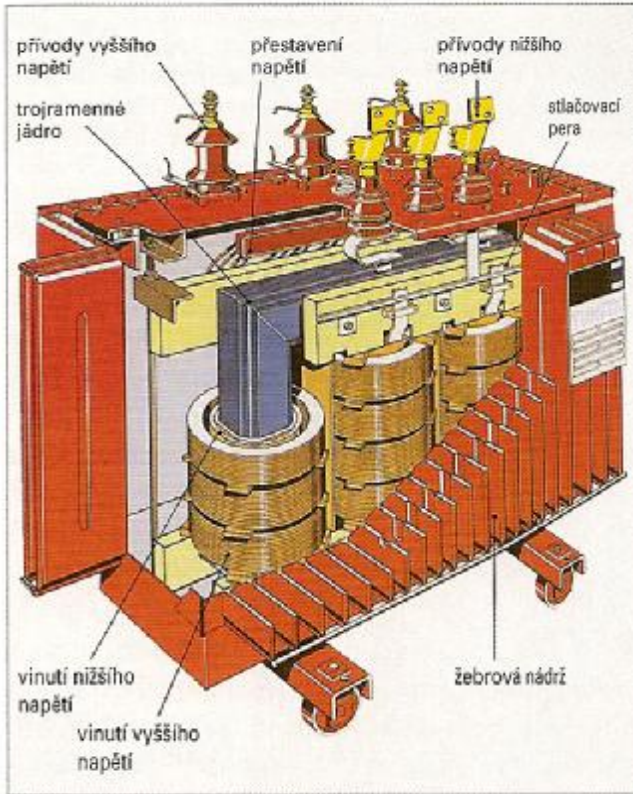


Při *vinutí vodiče po jednotlivých vrstvách* leží vždy nad prvním závitem jedné vrstvy poslední závit další vrstvy a je zde velké napětí mezi závity a na izolaci mezi vrstvami jsou zde kladeny velké nároky na odolnost proti průrazu. Proto je drátové vinutí po jednotlivých vrstvách používáno jen u malých transformátorů.

Při *fóliovém vinutí* je vinutí navinuto z izolované hliníkové fólie podobně jako u kondenzátorů. Protože je každá vrstva tvořena jen jedním závit, jsou nároky na izolaci mezi vrstvami menší.

Obr. 12 Trojfázový transformátor v nádobě z vlnitého plechu

1 - průchodky vn, 2 - průchodky nn, 3 - čtyřhran přepínače odboček, 4 - nálevka oleje, 5 - jímka pro teploměr, 6 - jímka pro dálkový teploměr, 7 - závěsné oko, 8 - dilatační nádoba, 9 - olejznak, 10 - odvodušnění dilatační nádoby, 11 - místo pro plynové relé, 12 - štítek, 13 - výpust oleje, 14 - uzemňovací svorka



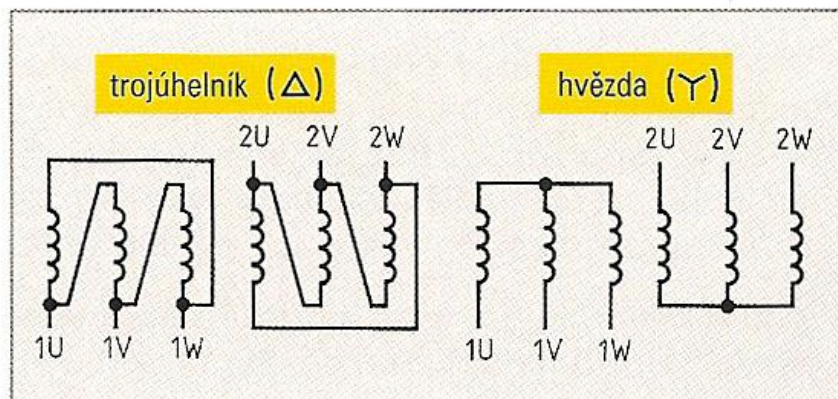
Chlazení

Trojfázové transformátory velkých výkonů bývají umístěny v nádrži naplněné chladicím olejem. Olej chladí lépe než vzduch, lépe také izoluje a zabraňuje přístupu vlhkosti. Pro zmenšení nebezpečí požáru je k chlazení používán silikonový olej. V budovách se používají suché transformátory, např. zalévané fóliové transformátory.

Obr. 13 Trojfázový transformátor 400 kVA s olejovým vhlazením a žebrovou nádrží

2. Zapojení trojfázových transformátorů

Na straně vyššího napětí jsou tři vinutí, která mohou být zapojena do trojúhelníku nebo do hvězdy. Podobně může být zapojena i strana menšího napětí. Zvláštním druhem zapojení do hvězdy je zapojení do *lomené hvězdy*, které se používá jen na straně nižšího napětí.



Obr. 14 Možnosti zapojení do trojúhelníku a hvězdy

Pro zapojení do trojúhelníku a pro zapojení do hvězdy jsou dvě možnosti:

- jsou-li vinutí primární i sekundární strany zapojena stejně, je fázový posun mezi primární a sekundární stranou 0° nebo 180° ;
- je-li zapojení primární a sekundární rozdílné, např. je-li strana vyššího napětí zapojena do trojúhelníku a strana nižšího napětí do hvězdy, bude fázové posunutí 150° nebo 330° .

Toto fázové posunutí je udáváno jako charakteristika a je udáváno čísly hodinového ciferníku, která odpovídají úhlu fázového posunu. Např. Dy5 odpovídá úhlu $5 \times 30^0 = 150^0$. Při vyvedeném středu hvězdy je označení rozšířeno o písmeno n nebo N (neutrální vodič). Dyn5 znamená, že strana vyššího napětí je zapojena do trojúhelníku, strana nižšího napětí do hvězdy, neutrální vodič je vyveden a fázový posun je $5 \times 30^0 = 150^0$.

Transformační poměr je u trojfázových transformátorů nekrácený poměr fázových napětí, např. 20000V/400V. Fázové napětí jsou na vinutích pouze v zapojení Dd. V zapojení Yy jsou na vinutích napětí ve vzájemně stejném poměru, ale $\frac{1}{\sqrt{3}}$ krát větší (tj. $\sqrt{3}$ krát menší).

Pro **transformační poměr** platí $p = \frac{N_1}{N_2}$, pokud jsou obě strany trojfázového transformátoru stejně zapojeny.

Jsou-li strany 3f transformátoru zapojeny různě, platí tento převodní poměr jen pro napětí na vinutích.

Trojfázové napětí lze transformovat také pomocí dvou jednofázových transformátorů v **zapojení do V**. Na výstupní straně je trojfázové napětí v trojvodičové soustavě. Při hodnotách vyššího napětí nad 400kVA jsou 3f transformátory vytvářeny spojováním jednofázových transformátorů.

Volba typu zapojení

Volba se uskutečňuje podle velikosti požadovaného napětí a výkonu. Vinutí vyššího napětí může být zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku. Při zapojení do hvězdy je počet závitů sice menší, ale průřez vodičů větší než při zapojení do trojúhelníku, takže zapojení do hvězdy je více používáno při menších výkonech do 500kVA, jakož i při vysokých napětích.

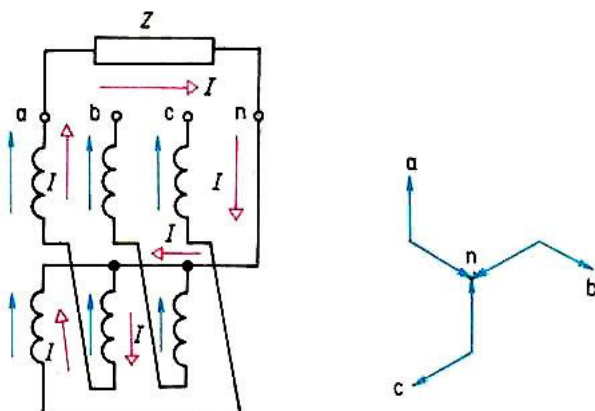
Vinutí nižšího napětí může být také zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníku. Zapojení do trojúhelníku na straně menšího napětí u síťových transformátorů je však vyloučeno, protože by nebylo možno připojit **nulový vodič**.

Nesymetrické zatížení trojfázových transformátorů

V elektrických sítích dochází často k nestejnému a nesymetrickému zatěžování jednotlivých fází a tím i jednotlivých vinutí transformátoru, způsobenému jednofázovými přípojkami domácností na síť nízkého napětí.

Ve zvláštních případech se zapojují transformátory i do jednofázové sítě, např. transformátor pro vyhřívání kolejových výhybek.

Obr. 15 Vinutí trojfázového transformátoru spojené do lomené hvězdy



Je-li transformátor se zapojením typu **Yyn6** jednofázově zatěžován, vzroste proud v odpovídající větvi vinutí vyššího napětí transformátoru a protéká zpět přes nezatíženou větev. V těchto větvích pak velmi vzroste magnetická indukce a také rozptyl. Následkem toho vzroste napětí v nezatížených vinutích a v zatíženém vinutí naopak poklesne.

U trojfázového transformátoru se zapojením typu **Dyn5** je jednofázové zatížení možné, neboť na straně vyššího napětí protéká proud jen ve vinutí zatěžované větve.

Jednofázové zatěžování je u transformátoru zapojeného na straně vyššího napětí do hvězdy možné, je-li každé vinutí strany nižšího napětí rozděleno rovnoměrně do dvou větví. Vektorový diagram nižších napětí má tvar zalomené třícípé hvězdy. Proto se zapojení nazývá **zapojení do lomené hvězdy**. Jednofázový proud se při tomto zapojení rozdělí lépe do vinutí na straně vyššího napětí.

Autotransformátory pro trojfázové napětí jsou většinou zapojeny do hvězdy. Jejich transformační poměr je většinou malý, např. 400kV/230kV. Průchozí výkony mohou být však do 1000MVA.

Vždy jsou dvě možnosti provedení zapojení do hvězdy, trojúhelníku nebo do lomené hvězdy. Kombinace dvou z těchto zapojení, např. Dy, se označuje jako typ zapojení.

Fázové posunutí mezi vyšším a nižším napětím je udáváno číslem v označení. Počet teoreticky možných kombinací je velký, ale prakticky se používají jen některé kombinace zapojení.

Je-li v nějakém zařízení používán jediný transformátor, není jeho zapojení vzhledem k oddělení soustav vyššího a nižšího napětí tak důležité.

Je-li však v nějakém zařízení třeba propojit paralelně více transformátorů, je nezbytné, aby měly stejné charakteristické číslo – **stejnou charakteristiku**.

Transformátory typu Yy0 jsou používány v sítích vysokého napětí jako malé rozdělovací transformátory. Při **zapojení Yyn0** smí být nulový vodič zatížen maximálně 10% přenášeného výkonu.

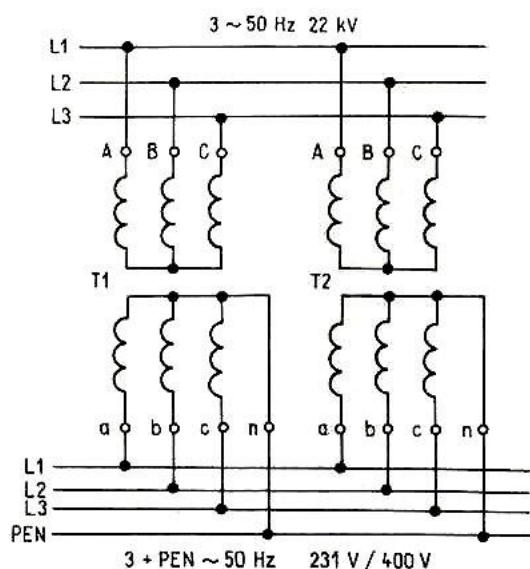
Zapojení Dy5 se používá pro místní sítě. Hodí se pro velké výkony a nulový vodič je plně zatížitelný.

Zapojení Yd5 se používá pro hlavní transformátory velkých elektráren a měníren.

Zapojení Yz5 se používá v místních sítích malého a středního výkonu. Neutrální vodič je plně zatížitelný a zapojení se hodí pro jakákoliv nesymetrická zatížení. Počet závitů výstupní strany je asi o 15% vyšší než u zapojení do hvězdy. Kvůli větší ceně vinutí jsou **transformátory Yz** používány jen výjimečně, např. na sloupech pro zásobení odlehlých domů.

3. Paralelní spojování transformátorů

Nestačí-li výkon jednoho transformátoru, spojují se transformátory paralelně. Paralelně spojené transformátory musí mít stejné okamžité hodnoty napětí a jejich napětí se musí při zatížení měnit stejným způsobem.



Obr. 16 Paralelní spojení transformátorů

Paralelní spojování jednofázových transformátorů

Mají-li jednofázové transformátory stejná jmenovitá i zkratová napětí, je možno je spojovat paralelně. Pokud nejsou fáze na sekundární straně v souladu, je třeba je správně přepojit. Kontrolu je třeba učinit voltmetrem.

Mezi svorkami, na které připojujeme na výstupní straně tentýž vodič, nesmí být žádné napětí.

Paralelní spojování trojfázových transformátorů

V nízkonapětových rozvodnách bývají paralelně spojovány trojfázové transformátory. Správné připojení fází na jednotlivé sběrnice se kontroluje voltmetrem.

Dále je třeba dodržet tyto *podmínky*:

- *vyšší i nižší napětí* musí být u všech transformátorů stejná, aby nebyly rozdíly při *běhu na-prázdko*;
- *zkratová napětí* se mohou lišit maximálně o 10%. Tím se zabrání, aby při zkratu přebral na sebe transformátor s menším zkratovým napětím příliš velkou zátěž a poškodil se. Při větší než 10% odchylce je možno zkratové napětí zvýšit předřadnou indukčností;
- *poměr jmenovitých výkonů* by měl být menší než 3:1. Při větších poměrech mohou vyrovnávací proudy způsobit fázový posun mezi výstupními napětími;
- čísla označení zapojení charakterizující *fázový posun* mezi vstupním a výstupním napětím musí být stejná, aby se polohy výstupních fází na vektorovém diagramu kryly a nedošlo tak ke zkratu (výjimku tvoří případ, kdy se čísla v označení liší o 6 – tedy fáze se liší o 180° . V tomto případě však musíme přehodit výstupní svorky – přepólovat napětí tak, abychom napětí otočili o 180°).

Mají-li paralelně zapojené transformátory stejná zkratová napětí, rozdělí se celkový výkon na jednotlivé transformátory v poměru jmenovitých výkonů. Jsou-li zkratová napětí různá, je transformátor s menším zkratovým napětím relativně více zatěžován. Poměr zatěžování pak neodpovídá poměru jmenovitých výkonů.

ŘÍZENÍ NAPĚTÍ TRANSFORMÁTORU

Napětí transformátoru můžeme řídit změnou převodu, který je dán poměrem

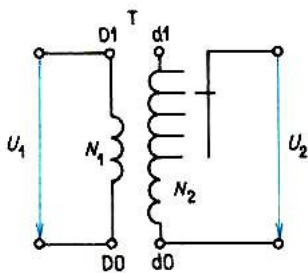
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Z toho výstupní napětí

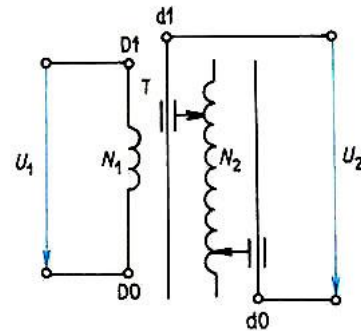
$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}$$

Z uvedeného vztahu vidíme, že zmenšováním počtu závitů výstupního vinutí snižujeme výstupní napětí; zmenšováním počtu závitů vstupního vinutí zvyšujeme výstupní napětí.

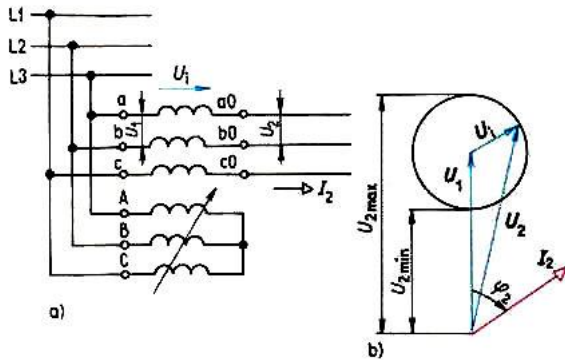
Řízení napětí může být buď stupňové, nebo plynulé. Stupňového řízení napětí se dosáhne přepínáním odboček na vinutí, téměř plynulého řízení se dosáhne u sběračového transformátoru a plynulého řízení se dosáhne natáčecím transformátorem.



Obr. 17 Schéma jednofázového transformátoru s odbočkami na vinutí



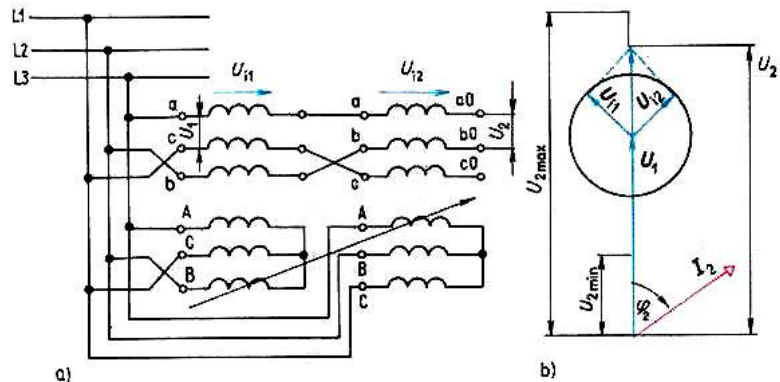
Obr. 18 Schéma jednofázového sběračového transformátoru



Obr. 19 Natáčivý transformátor
a) Schéma zapojení
b) Fázorový diagram

Obr. 20 Dvojitý natáčivý transformátor

a) Schéma zapojení
b) Fázorový diagram



VÝPOČET SÍŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU

Při výpočtu transformátoru vycházíme z daného vstupního napětí U_1 , z požadovaných střídavých napětí U_2 , U_3 atd. na výstupní straně a z odebíraných výstupních proudů I_2 , I_3 atd. Z těchto zadaných údajů vypočítáme odebíraný výkon na výstupní straně podle rovnice

$$P = (U_2 I_2 + U_3 I_3 + \mathbf{K}) \quad (\text{W})$$

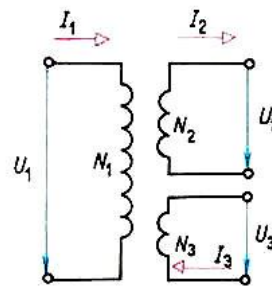
Příkon odebíraný ze sítě je

$$P_1 = \frac{P}{\eta} \quad (\text{W})$$

kde η je účinnost a volí se podle tab. 1.

Obr. 21 Schéma pro výpočet transformátoru

P_1 (W)	η	k	k_1
1 – 3	0,60	1,30	1,15
3 – 5	0,65	1,25	1,15
5 – 12	0,70	1,20	1,12
12 – 28	0,75	1,16	1,12
28 – 50	0,80	1,10	1,10
50 – 60	0,82	1,09	1,10
60 – 95	0,84	1,08	1,08
95 – 150	0,85	1,07	1,08
150 – 250	0,87	1,06	1,05
250 – 1000	0,90	1,05	1,05



Tabulka 1. Hodnoty pro výpočet transformátorků

Průřez magnetického obvodu (jádra)

$$S_j = k \sqrt{P_1} \quad (\text{cm}^2)$$

Součinitele k volíme podle příkonu z tab. 1.

Skutečný průřez jádra z izolovaných plechů je

$$S = \frac{S_j}{0,95} \quad (\text{cm}^2)$$

Potřebný počet závitů na 1 V vypočítáme ze základní rovnice

$$N_{1V} = \frac{10^4}{4,44 f B S_j}$$

Pro $B = 1 \text{ T}$ a $f = 50 \text{ Hz}$ je

$$N_{1V} = \frac{45}{S_j}$$

Počet závitů pro jednotlivá vinutí

$$N_1 = N_{IV} U_1$$

$$N_2 = k_1 N_{IV} U_2$$

$$N_3 = k_1 N_{IV} U_3$$

M

Počet závitů výstupního vinutí musíme upravit činitelem k_1 , který volíme z tab. 1, abychom na výstupní straně dostali požadované napětí, neboť snížení výstupního napětí je způsobeno rozptylem magnetického toku a úbytky napětí vlivem odporu výstupních vinutí. Počet závitů na vstupní straně neupravujeme, protože bychom tím změnili velikost magnetické indukce v jádru.

Vstupní proud je

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1}$$

Výstupní proudy jsou dány.

Vinutí	Transformátory	
	malé	velké
vstupní $J \text{ (A . mm}^{-2}\text{)}$	3	2
výstupní $J \text{ (A . mm}^{-2}\text{)}$	4	2,5

Tabulka 2. Hustota proudu pro výpočet transformátorů

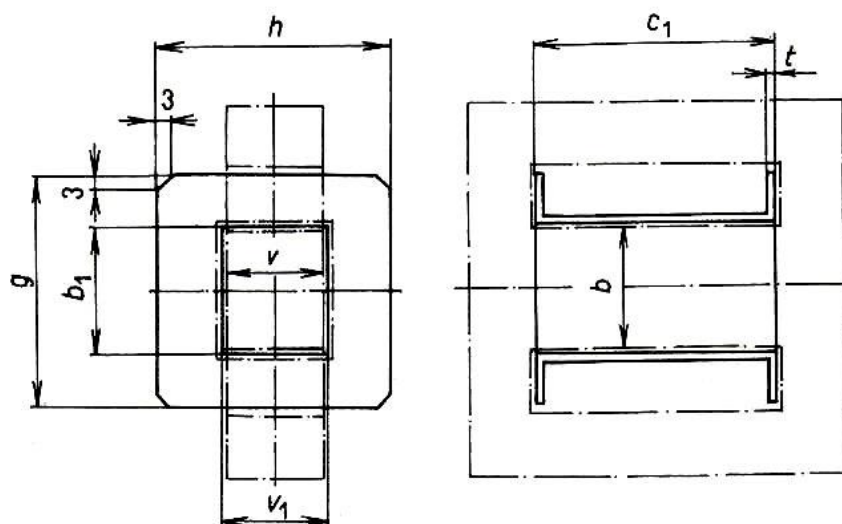
Hustota proudu $J \text{ (A . mm}^{-2}\text{)}$	2	2,5	3	3,5	4
Průměr drátu $d \text{ (mm)}$	$0,8 \sqrt{I}$	$0,7 \sqrt{I}$	$0,65 \sqrt{I}$	$0,6 \sqrt{I}$	$0,55 \sqrt{I}$

Tabulka 3. Vzorce pro výpočet průměru vodiče vinutí

Průměry vodičů vypočítáme z velikosti proudu, který jimi prochází, a ze zvolené hustoty proudu J . Hustota proudu závisí na velikosti ochlazovací plochy vinutí a na teplotě prostředí, ve které transformátorek pracuje. Pro výpočet ji volíme podle tab. 2.

Průměry vodičů vypočítáme podle vzorce v tab. 3. Vypočítané průměry zaokrouhlíme na normalizované průměry.

Obr. 22 Cívkové tělísko pro vinutí transformátorku



Typ plechů a rozměry jádra stanovíme z rozměrů cívkového tělíska. Průřez jádra je

$$S = vb \quad (\text{mm}^2)$$

$$v = \frac{S}{b} \quad (\text{mm})$$

Při stanovení průřezu jádra postupujeme takto: Vypočítáme např., že $S = 8 \text{ cm}^2 = 800 \text{ mm}^2$. Nejprve uvažujeme čtvercový průřez

$$b = \sqrt{S} = \sqrt{800} \text{ mm} = 28,28 \text{ mm}$$

Taková šířka plechu neexistuje, a proto se volí normalizovaná šířka $b = 25 \text{ mm}$.
Výška jádra

$$v = \frac{S}{b} = \frac{800}{25} \text{ mm} = 32 \text{ mm}$$

Počet plechů

$$n = \frac{v}{t_p}$$

kde t_p je tloušťka použitých plechů.

Počet závitů v jedné vrstvě vinutí

$$N_{vr} = \frac{c_1 - 2t}{D_v}$$

kde c_1 a t jsou zřejmé z obr.22,
 D_v je průměr vodiče s izolací.

$$\text{Počet vrstev} = \frac{\text{celkový počet závitů vinutí}}{\text{počet závitů v jedné vrstvě}}$$

Tloušťka vinutí t_v = počet vrstev x průměr vodiče s izolací + izolace mezi vrstvami

Pro izolaci mezi vrstvami u vinutí na cívkovém tělísku s čely lze použít libovolný prokladový materiál. Proklady děláme z prokladového papíru nebo z vláknitého (popř. syntetického) materiálu. Tloušťka prokladu je 0,03 mm u vodiče s průměrem do 0,25 mm, 0,05 mm pro vodič s průměrem 0,25 až 0,65 mm a 0,1 mm pro vodič s průměrem větším než 0,65 mm. Izolaci mezi vinutími děláme dvěma závity (vrstvami) lesklé lepenky tloušťky 0,1 mm. Střední délku závitu vypočítáme podle obr.22.

Pro vinutí s N_3 závity platí

$$l_{s13} = b_1 + 2t + t_{v3}$$

$$l_{s23} = v_1 + 2t + t_{v3}$$

Střední délka závitu pro vinutí s N_3 závity je

$$l_{s3} = 2(l_{s13} + l_{s23})$$

Pro vinutí s N_2 závity platí

$$l_{s12} = l_{s13} + t_{v3} + t_{v2}$$

$$l_{s22} = l_{s23} + t_{v3} + t_{v2}$$

$$l_{s2} = 2(l_{s12} + l_{s22})$$

Podobně vypočítáme střední délku závitu pro vinutí s N_1 závity

$$l_{s1} = 2(l_{s11} + l_{s21}) \quad (mm)$$

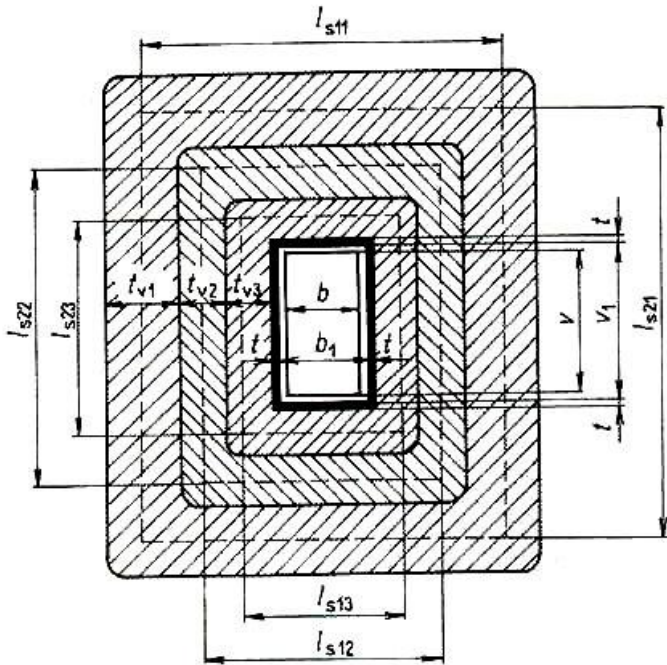
Délka drátu na vinutí l = střední délka závitu x počet závitů.

$$l_1 = l_{s1}N_1$$

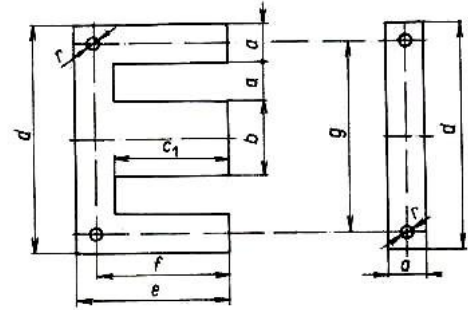
$$l_2 = l_{s2}N_2$$

$$l_3 = l_{s3}N_3$$

Kontrola plochy okénka S_0



Obr. 23 Řez vinutím transformátorku pro výpočet středního závitu



Obr. 24 Transformátorový plech tvaru EI

Plocha okénka musí být větší než 1,5 násobek součtu ploch průřezu všech vinutí sečtený s plochou průřezu cívkového tělesa nebo se musí této ploše rovnat.

$$S = c_1 [1,5(t_{v1} + t_{v2} + t_{v3} + \mathbf{K}) + t]$$

$$S \leq S_0$$

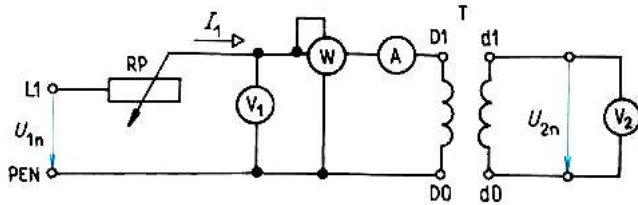
$$S_0 = ac_1$$

Činitel 1,5 upravuje průřez vinutí s ohledem na vyklenutí závitů po jeho navinutí, na mezery mezi závitů a na ochrannou pásku horního vinutí.

MĚŘENÍ NA JEDNOFÁZOVÉM TRANSFORMÁTORU

a) Měření na transformátoru při chodu naprázdno

Při chodu transformátoru naprázdno není výstupní vinutí vůbec zatíženo. Schéma zapojení pro měření je na obr.25.



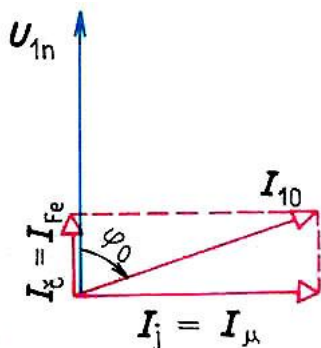
Obr. 25 Schéma zapojení měřicích přístrojů pro měření na jednofázovém transformátoru při chodu naprázdno

Wattmetrem W naměříme činný příkon P_0 , který transformátor odebírá na krytí ztrát v magnetickém obvodu, protože ztráty ve vstupním vinutí jsou zanedbatelné. Při jmenovitém vstupním napětí U_{1N} přečteme na voltmetru V_2 jmenovité výstupní napětí U_{2N} a vypočítáme převod transformátoru

$$p = \frac{U_{1N}}{U_{2N}}$$

Účinník při chodu naprázdno vypočítáme ze vztahu

$$\cos j_0 = \frac{P_0}{U_{1N} I_{10}}$$



Pak sestrojíme fázorový diagram ve vhodném měřítku. Fázor napětí U_{1N} nakreslíme podle obr.26 posunutý o úhel φ_0 před fázorem proudu I_{10} . Fázor proudu rozložíme na dvě složky. Na složku činného proudu I_ξ , který je ve fázi s napětím U_{1N} , a na složku jalového proudu I_j , kolmou k napětí U_{1N} . Činný proud $I_\xi = I_{Fe}$ kryje ztráty v železném magnetickém obvodu a jalový proud $I_j = I_\mu$ je magnetizační proud.

Obr. 26 Fázorový diagram transformátoru při chodu naprázdno

Z fázorového diagramu plyne

$$I_{Fe} = I_{10} \cos j_0$$

$$I_m = I_{10} \sin j_0$$

Postup při měření

1. Žáci se nejdříve seznámí s konstrukcí a technickými údaji transformátoru. Údaje na štítku si zapíší do předem připravené tabulky; do ní zapíší i soupis použitých měřicích přístrojů.
2. Nejsou-li svorky transformátoru označeny, vyhledají žáci konce vinutí kontrolní žárovkou a svorky označí.
3. Podle schématu žáci zapojí přístroje, učitel zkontroluje zapojení a žáci v jeho přítomnosti zahájí měření.
4. Předřadný rezistor RP žáci nastaví na největší hodnotu a transformátor připojí k síti.
5. Napětí na vstupním vinutí žáci postupně zvyšují na hodnotu o 25% větší, než je jmenovité napětí, např. po 20 V, aby četli hodnoty na přístrojích alespoň desetkrát.
6. Z naměřených a vypočítaných hodnot sestrojí křivky

$$I_1 = f(U_1), \quad P_0 = f(U_1), \quad \cos j = f(U_1)$$

b) Měření na transformátoru při chodu nakrátko

Transformátor nakrátko má svorky výstupního vinutí spojené bezodporovou spojkou, např. ampérmetrem. Schéma zapojení přístrojů je stejné jako pro měření transformátoru při chodu naprázdno, pouze voltmetr V_2 nahradíme ampérmetrem A_2 . Při spojení transformátoru nakrátko může vstupním vinutím procházet maximálně jmenovitý proud I_{1N} .

Příkon naměřený wattmetrem se rovná ztrátám ve vinutí transformátoru. Říkáme jim ztráty nakrátko a označujeme je ΔP_j . Ztráty v magnetickém obvodu při chodu transformátoru nakrátko se neuvažují. Při malém napětí je i malá magnetická indukce a ztráty v železe klesají s druhou mocninou magnetické indukce, takže jsou zanedbatelné.

Při měření nakrátko zjišťujeme napětí nakrátko U_{1k} , které je jednou z důležitých podmínek pro paralelní chod transformátorů. Procentní napětí nakrátko je dáno na štítku stroje a je důležité pro určení ustáleného proudu nakrátko.

Z úměry plyne

$$\frac{I_{1k}}{I_1} = \frac{U_1}{U_{1k}}$$
$$I_{1k} = I_1 \frac{U_1}{U_{1k}}$$

Dosadíme-li za

$$U_{1k} = \frac{u_k U_{1N}}{100}$$

dostaneme

$$I_{1k} = \frac{100 I_{1N}}{u_k}$$

Ze vztahu vidíme, že čím větší je procentní napětí nakrátko, tím menší je ustálený zkratový proud. Účinnost transformátoru při jmenovitém napětí U_{1N} určíme ze vztahu

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P_z}{P_1}$$

kde P_z jsou celkové ztráty v transformátoru.

Celkové ztráty se skládají ze ztrát v železe $\Delta P_{Fe} = P_0$, které jsme zjistili měřením naprázdno, a ze ztrát ve vinutí $\Delta P_j = P_{1k}$, určených měřením nakrátko.

Celkové ztráty transformátoru

$$\Delta P_z = \Delta P_{Fe} + \Delta P_j$$

Postup při měření

1. Po měření na transformátoru při chodu naprázdno vyměníme voltmetr V_2 na výstupních svorkách za ampérmetr A_2 , a tím svorky spojíme nakrátko.
2. Regulačním reostatem nastavíme napětí s hodnotou asi 3% napětí U_{1N} .
3. Potom regulačním reostatem postupně zvětšujeme napětí tak, že se proud I_1 zvětšuje asi o 1/10 jmenovitého proudu, až k hodnotě o 25% větší, než je jmenovitý proud. Pro každou nastavenou hodnotu I_1 změříme napětí U_1 a příkon P_1 . K jmenovité hodnotě I_{1N} změříme napětí nakrátko U_{1k} a příkon P_{1k} . Z naměřených hodnot vypočítáme

$$\cos j_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1N}}$$

a sestrojíme fázorový diagram.

Napětí U_{1k} rozložíme do dvou složek. Úbytek napětí U_R daný činným odporem vinutí je ve fázi s proudem I_{1N} a úbytek napětí U_L daný reaktancí vinutí je kolmý k I_{1N} .

Podle fázorového diagramu

$$U_R = U_{1k} \cos j_{1k}$$

$$U_L = U_{1k} \sin j_{1k}$$

Celkový činný odpor transformátoru

$$R = \frac{U_R}{I_{1N}}$$

a celková reaktance

$$X_L = \frac{U_L}{I_{1n}}$$

Impedance transformátoru je

$$Z = \frac{U_{1N}}{I_{1N}} = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

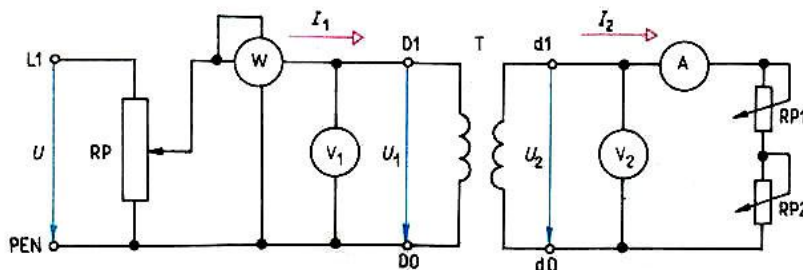
Naměřené a vypočítané hodnoty zapíšeme do tabulky a sestrojíme křivky

$$U_1 = f(I_1), \quad \Delta P_j = f(I_1), \quad \cos j_1 = f(I_1)$$

c) Měření na transformátoru při zatížení

Schéma zapojení přístrojů pro měření je na obr.34. Účelem měření je

- určit převod transformátoru,
- určit účinnost,
- určit ztrátový výkon,
- určit oteplení transformátoru,
- sestrojit charakteristiky.



Obr. 27 Schéma zapojení měřicích přístrojů pro měření na jednofázovém transformátoru při zatížení

Postup při měření

Po zapojení měřicích přístrojů a jejich soupisu se přesvědčíme, zda jsou zatěžovací reo-

staty RP1 a RP2 z obvodu vyřazeny. Pak potenciometrem RP (místo potenciometru lze použít říditelný transformátor) nastavíme jmenovité napětí U_1 a přečteme hodnoty na všech přístrojích. Teprve potom začneme transformátor zatěžovat tak, že proud I_2 zvětšujeme o 1/10 jmenovitého proudu, až k hodnotě o 25% větší, než je jmenovitý proud.

Z naměřených hodnot vypočítáme:

převod transformátoru

$$p = \frac{U_1}{U_2}$$

výkon transformátoru

$$P_2 = U_2 I_2$$

Ztrátový výkon (celkové ztráty)

$$\Delta P_z = P_1 - P_2$$

Účinnost

$$h = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

Oteplení vypočítáme ze vztahu

$$R_J = R_{20}(1 + a \Delta J)$$

změříme-li odpor R_{20} vinutí před začátkem měření a odpor R_θ vinutí na konci měření.
Z naměřených a vypočítaných hodnot sestrojíme grafy

$$U_2 = f(I_2), \quad h = f(I_2), \quad \Delta P_z = f(I_2)$$

Celkové ztráty se skládají ze ztrát v železe ΔP_{Fe} a ze ztrát ve vinutí ΔP_j . Ztráty ΔP_{Fe} jsou stálé a v grafu je znázorníme rovnoběžkou s osou I_2 , která vytíná na ose ΔP_z úsečku rovnou ΔP_z při proudu $I_2 = 0$ A.

Ostatní postup při měření je obdobný jako při měření na transformátoru při chodu naprázdno nebo nakrátko.

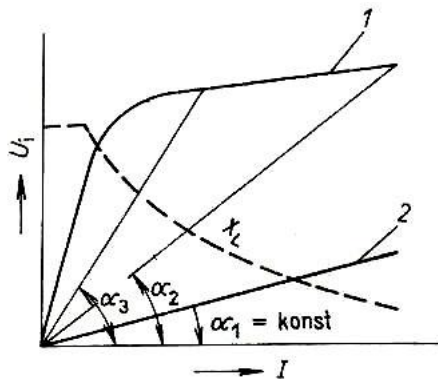
TLUMIVKY A TRANSDUKTORY

Tlumivka se konstrukčně podobá transformátoru, ale má pouze jedno vinutí a zapojuje se do elektrického obvodu, aby zvětšila jeho indukčnost. Střídavý proud procházející tlumivkou je proud magnetizační a vytváří v jádru tlumivky střídavý indukční tok, který ve vinutí tlumivky indukuje napětí U_i . Toto napětí se rovná úbytku napětí na tlumivce, takže způsobuje snížení napětí za tlumivkou.

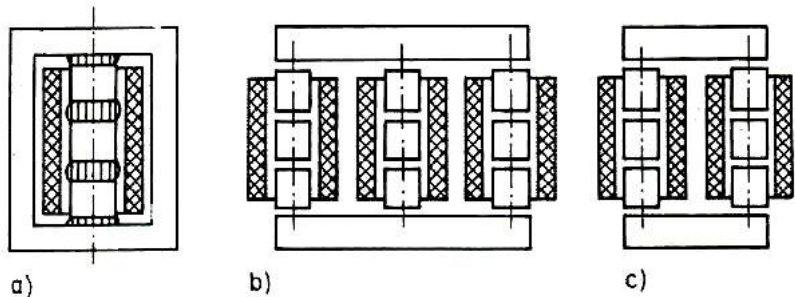
Závislost změny indukovaného napětí U_i na proudu I nazýváme charakteristika tlumivky. Má-li tlumivka jádro z elektrotechnických plechů, sleduje charakteristika tlumivky tvar magnetizační křivky (obr.28). Tlumivka bez jádra anebo s jádrem z nemagnetického materiálu má charakteristiku přímkovou. Tlumivky mají malý činný odpor, takže jej můžeme zanedbat. Reaktance tlumivky je potom

$$X_L = \frac{U_i}{I}$$

Podle charakteristiky na obr.29 mají tlumivky se železným jádrem hned zpočátku velkou reaktanci. Teprve za kolenem křivky U_i začíná reaktance klesat. Čím více je jádro syceno, tím je reaktance menší. U tlumivek bez jádra je reaktance stálá, ale poměrně malá.



Obr. 28 Charakteristika tlumivky
1 - tlumivka se železným jádrem, 2 - tlumivka bez jádra



Obr. 29 Magnetický obvod tlumivky se železným jádrem s mezerami z nemagnetického materiálu

- a) Jednofázový plášťový
- b) Trojfázový jádrový
- c) Jednofázový jádrový

U tlumivek se železným jádrem je změna úbytku napětí úměrná proudu jen v malém rozmezí, tj. pouze v přímkové části charakteristiky. Aby změna úbytku napětí byla úměrná proudu v širokém rozsahu, vyrábějí se železná jádra tlumivek s nemagnetickými mezerami (obr.29). Magnetická indukce bývá 0,6 T až 1 T. Charakteristika je přímková.

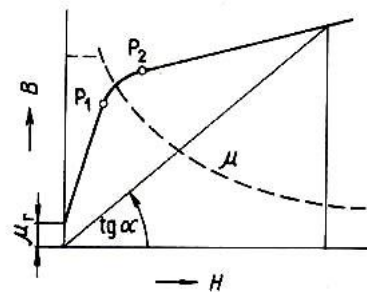
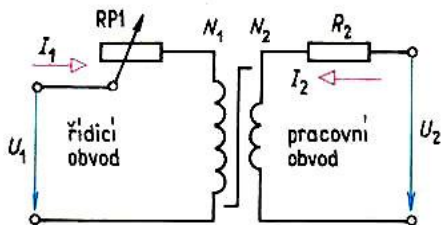
Tlumivky se železným jádrem se používají např. ke snížení napětí na spotřebiči, ke zmenšení proudových nárazů při spouštění střídavých motorů, předřazují se transformátorům s menším napětím nakrátko při paralelním chodu nebo se paralelně připojují k vedení vvn pro kompenzaci kapacitních nabíjecích proudů.

Tlumivky používané k omezení zkratových proudů v sítích nebo v elektrických zařízeních jsou vždy bez jádra a nazývají se reaktory. Jejich vinutí se zhotovuje z měděných nebo hliníkových pásů nebo kabelů a musí být velmi dobře zajištěno proti dynamickým účinkům sil při zkratu (např. se zalijí do betonu). Vyrábějí se jednofázové nebo trojfázové, vzduchové nebo olejové. Vzduchové provedení se používá do napětí 35 kV, olejové pro vyšší napětí nebo pro venkovní montáž.

Transduktory

Podstatou transduktoru je **přesytka**. Je to tlumivka s feromagnetickým jádrem bez vzduchové mezery, u které můžeme měnit indukčnost sycením jádra stejnosměrným proudem.

Obr. 30 Schéma přesytka



Obr. 31 Magnetizační křivka

Na obr.30 je schéma přesytka. Na jejím jádru jsou umístěna dvě vinutí.

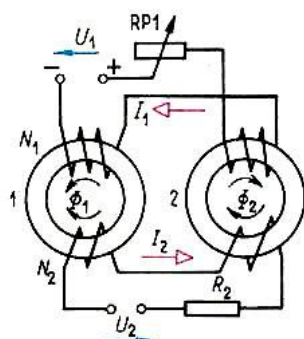
Jedno vinutí má velký počet závitů N_1 a je připojeno na zdroj stejnosměrného napětí U_1 . Říkáme mu řídicí (budicí) vinutí. Druhé vinutí, tzv. pracovní, má N_2 závitů a je připojeno na zdroj střídavého napětí U_2 . Stejnosměrným proudem můžeme dosáhnout nasycení jádra, které odpovídá na magnetizační křivce (obr.31) až části sycení za kolenem, tj. za bodem P_2 , a proto takové tlumivce říkáme přesytka.

Nejprve uvažujme, že přesytku připojíme pouze na zdroj střídavého napětí U_2 . Potom bude pracovním vinutím N_2 procházet střídavý proud $I_2 = U_2/X_L$, zanedbáme-li činný odpor přesytka. Indukční reaktance $X_L = \omega L$ a $L = \lambda N^2$. Magnetická vodivost $\lambda = \mu_0 \mu_r S/l$, kde $\mu_0 \mu_r = \mu = B/H = \text{tg } \alpha$. Z uvedených vztahů plyne a z magnetizační křivky vidíme, že čím větší je intenzita magnetického pole H , tím menší je permeabilita μ a tím je menší i magnetická vodivost. Čím menší je magnetická vodivost jádra, tím menší je indukčnost přesytka, a tedy i indukční reaktance a tím větší je střídavý proud I_2 .

Zapojíme-li do série s pracovním vinutím spotřebič s odporem R_2 , můžeme změnou intenzity magnetického pole, tj. změnou stejnosměrného proudu I_1 ovládat pracovní střídavý proud I_2 .

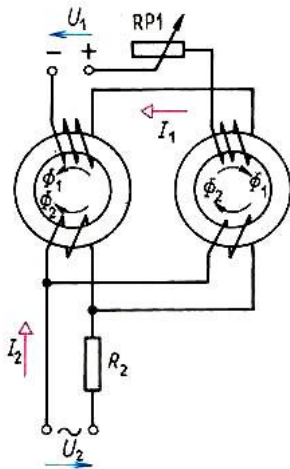
Střídavý proud však v magnetickém jádru budí střídavý magnetický tok, který v řídicím vinutí indukuje napětí. Protože toto vinutí má velký počet závitů, aby stačil malý regulační výkon, je transformační převod velký a indukované napětí je vysoké. Toto indukované střídavé napětí by mohlo jednak zničit zdroj stejnosměrného proudu, jednak nežádoucím způsobem ovlivnit výslednou permeabilitu. Abychom tomu zabránili, spojíme vhodně dvě přesytka v jeden celek. Takovému uspořádání říkáme **transduktor**.

Obr. 32 Schéma sériového transduktoru



Na obr.32 je schéma **sériového transduktoru**, který se skládá ze dvou přesytek s prstencovými jádry. Na každém jádru je řídicí vinutí N_1 a pracovní vinutí N_2 . Jsou zapojena do série. Do střídavého obvodu je zapojena zátěž R_2 a do stejnosměrného obvodu regulační rezistor $RP1$. Střídavý proud budí střídavý tok Φ_2 se souhlasným směrem v obou jádrech, zatímco magnetický tok Φ_1 , buzený stejnosměrným proudem, má v jádru 2 opačný směr než v jádru 1. Směr střídavého toku se periodicky mění.

Během jedné půlperrody se v jednom jádru stejnosměrný magnetický tok a střídavý magnetický tok sčítají, zatímco v druhém jádru se odečítají. V druhé půlperrodě je tomu naopak. Dále vidíme, že je vinutí N_1 na obou jádrech zapojeno proti sobě, takže napětí indukované střídavým tokem Φ_2 do vinutí N_1 se navzájem ruší.



Na obr.33 je schéma **paralelního transduktoru**, u něhož jsou pracovní vinutí zapojena na střídavé napětí paralelně.

Na obr.34 je schéma **transduktoru se stejnosměrným vinutím společným pro obě jádra**. Transformační účinek střídavého vinutí na stejnosměrné vinutí se ruší magneticky.

Obr. 33 Schéma paralelního transduktoru

Obr. 34 Schéma transduktoru se společným stejnosměrným vinutím

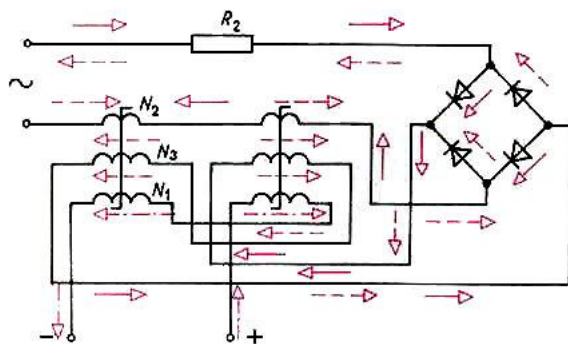
Z mnoha druhů transduktorů se nejčastěji používá transduktor s úsporným vlastním buzením.

Podstata vlastního buzení spočívá v tom, že

se část výstupního obvodu použije k buzení.

Na obr.35 je schéma **transduktoru s úsporným vlastním buzením**. Pracovní vinutí se ve schématu kreslí normalizovaným znakem vinutí se dvěma obloučky. Budicí vinutí a vinutí vlastního buzení se kreslí rovnoběžně pod pracovní vinutí znakem vinutí se třemi obloučky. Má-li transduktor několik budících vinutí, zakreslí se každé třemi obloučky pod pracovní vinutí. Transduktory se používají pro výkony od několika desetin wattu až do několika set kilowattů. Nemají žádné pohyblivé části a nevyžadují téměř žádnou údržbu. Nevýhodou je, že mají poměrně velkou hmotnost a že mají delší dobu odezvy v porovnání s polovodičovými zesilovači.

Transduktory jsou vhodné tam, kde se vyžaduje dlouhý technický život, robustnost, přetížitelnost a značná spolehlivost. Osvědčily se např. při řízení teploty a výkonů elektrických pecí, při řízení otáček stejnosměrných motorů a u stmívacích jednotek pro jevištní techniku. Pro jiné aplikace jsou vytlačovány tyristorovými zesilovači, které pracují rychleji a jsou menší a lehčí.



Obr. 35 Schéma transduktoru s úsporným vlastním buzením