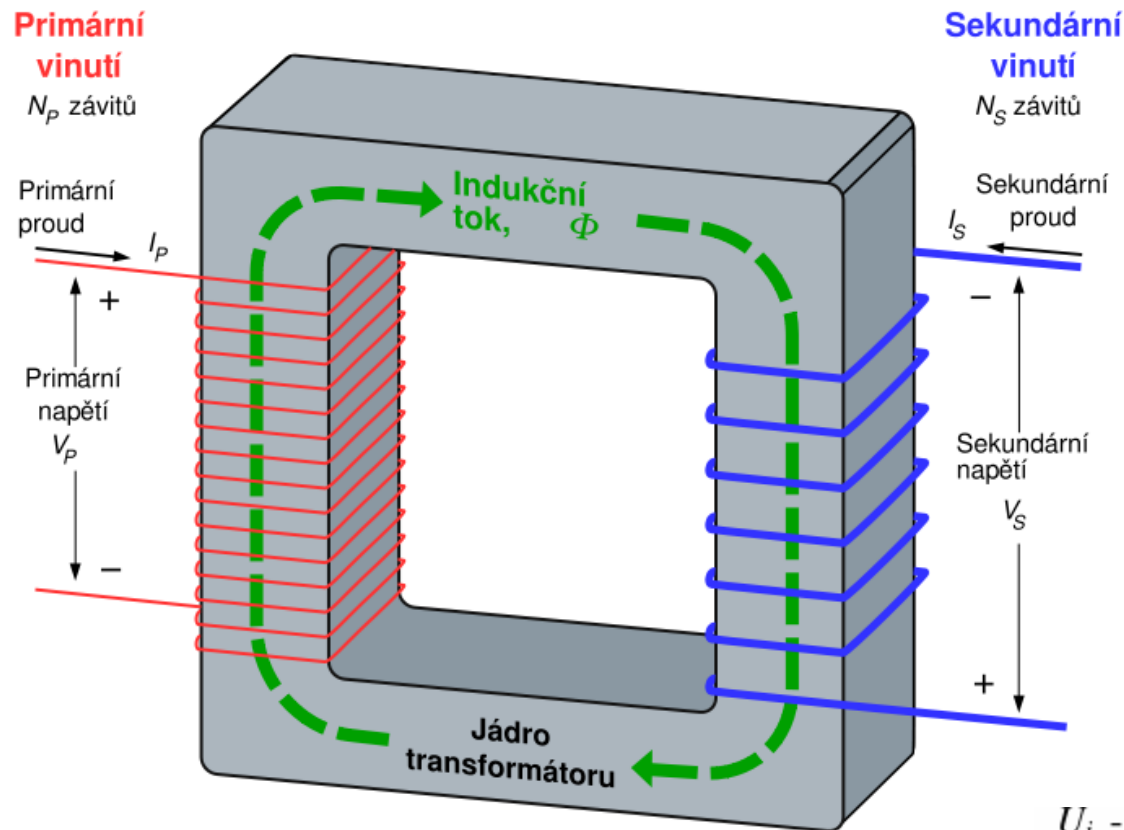


Transformátory (silové)

Miloslava Tesařová

Západočeská univerzita v Plzni
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Princip transformátoru



$$u_i = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$u_i = N d(\Phi_{max} \sin \omega t) / dt$$

$$u_i = N \omega \Phi_{max} \cos \omega t$$

$$U_{max} = N \omega \Phi_{max}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$U_i = \sqrt{2} \pi N f \Phi$$

$$U_i = 4,44 N f \Phi$$

U_i - efektivní hodnota indukovaného napětí,
 N - počet závitů cívky transformátoru,
 f - kmitočet napájecího napětí,
 Φ - magnetizační indukční tok.

Převod transformátoru

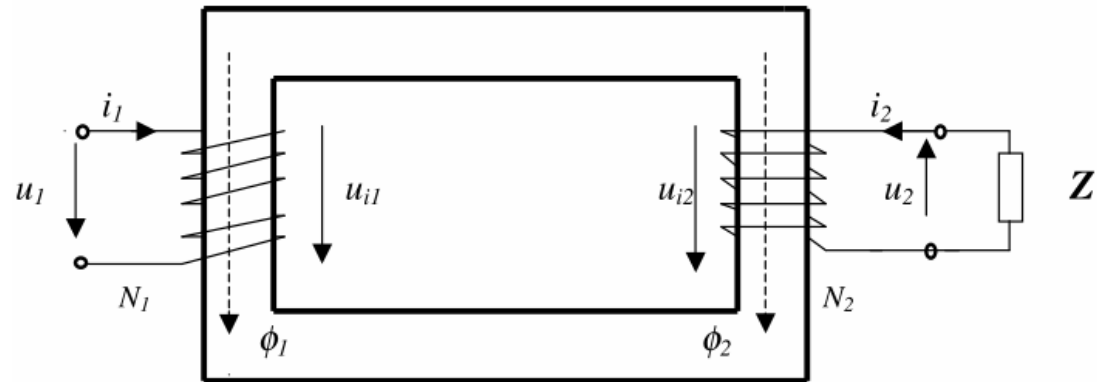
Převod transformátoru:

= podíl indukovaných napětí na primární a sekundární straně

$$U_1 = U_{i1} = \sqrt{2} \pi f \Phi N_1$$

$$U_2 = U_{i2} = \sqrt{2} \pi f \Phi N_2$$

$$P = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2}$$

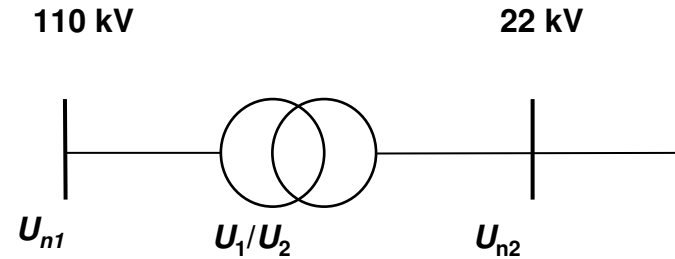


Při zanedbání ztrát na trafu: výkon na primáru = výkon na sekundáru

$$3 \times U_1 \times I_1 = 3 \times U_2 \times I_2 \quad \Rightarrow \quad U_1 / U_2 = I_2 / I_1 \quad \Rightarrow \quad P = \frac{I_2}{I_1}$$

Převod transformátoru

V praxi definujeme tyto převody:



a) **Jmenovitý převod**

- poměr jmenovitých napětí trafo, např. 110/23 kV

$$P = U_1 / U_2$$

- jmen. sekundární napětí U_2 je u snižujících traf o 5% vyšší než jmen. napětí sítě U_{n2} (zčásti se kompenzuje úbytek napětí na trafu, což napomáhá udržení napětí v dovol. mezích v celé síti)

b) **Fiktivní převod**

- poměr jmenovitých napětí sítí, např. 110/22 kV

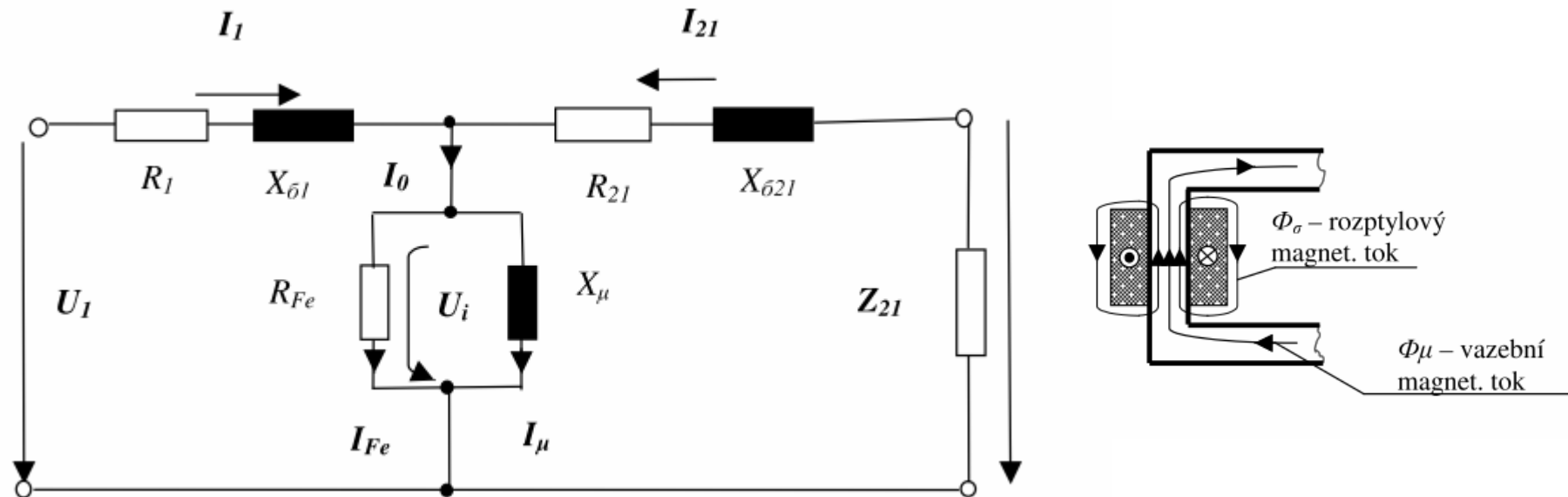
$$P = U_{n1} / U_{n2}$$

c) **Skutečný převod**

- poměr skutečně nastavených závitů pomocí přepínače odboček

$$P = N_1 / N_2$$

Náhradní schéma trafo



U_1 - napájecí napětí primární strany transformátoru
 U_{21} - svorkové napětí sekundární strany přepočtené na primární stranu
 U_i - vnitřní indukované napětí, $U_i = U_{i1} = U_{i21}$
 I_1 - primární proud
 I_{21} - sekundární proud přepočtený na primární stranu
 I_0 - proud naprázdno
 I_μ - magnetizační proud
 I_{Fe} - proud na krytí ztrát v železe

R_1 - odpor vinutí primární cívky
 R_{21} - odpor vinutí sekundární cívky přepočtený na prim. stranu
 $X_{\sigma 1}$ - rozptylová reaktance primárního vinutí
 $X_{\sigma 21}$ - rozptylová reaktance sekundárního vinutí přepočtená na primární
 R_{Fe} - odpor zahrnující ztráty v železe
 X_μ - magnetizační reaktance
 Z_{21} - impedance zátěže

Štítkové hodnoty

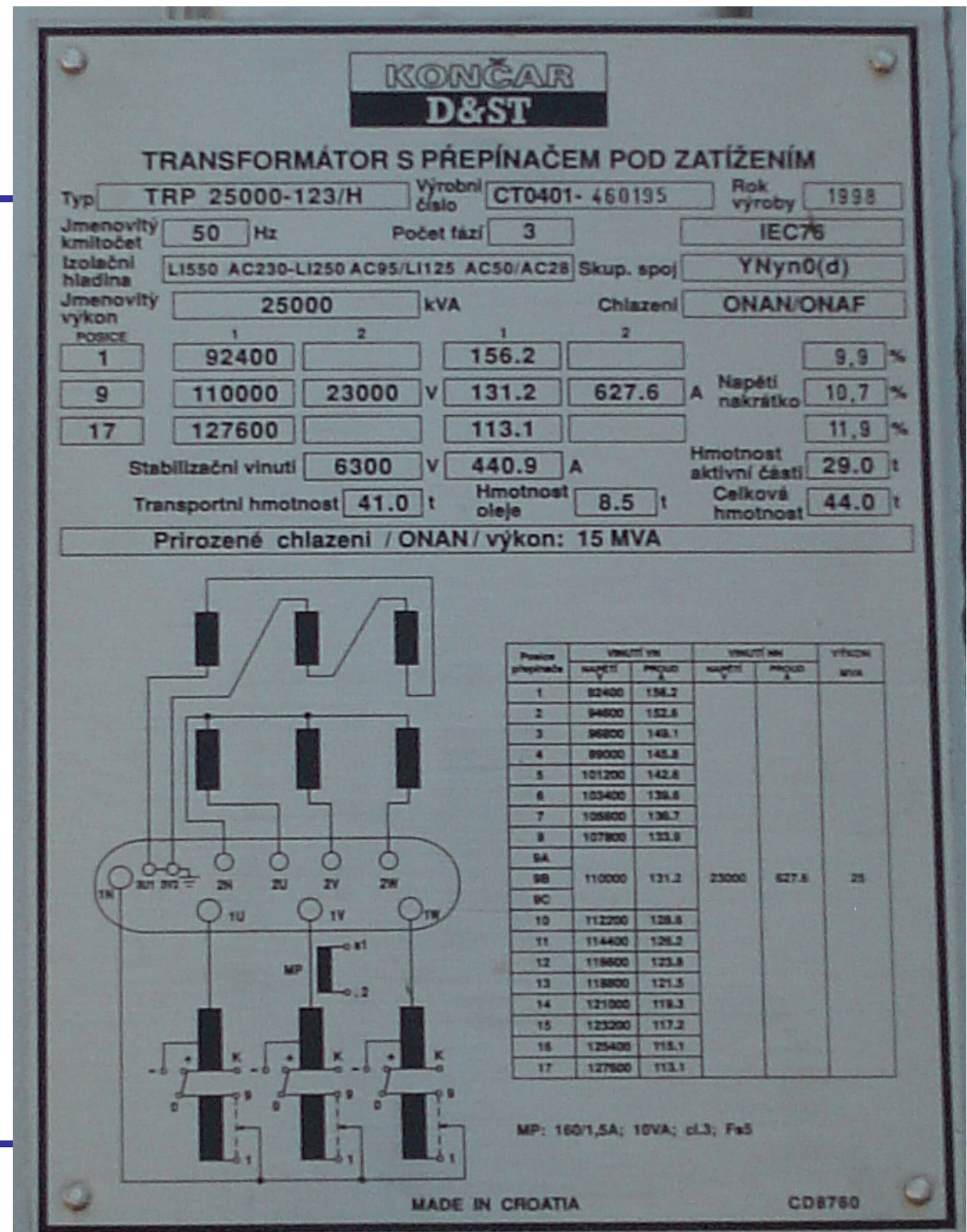
Trafo 110 kV $\pm 8 \times 2\%$ / 23 kV

$S_{nT} = 25 \text{ MVA}$

$u_k = 10,7 \%$

Třífázové trafo

Trojvinut'ové s nevyvedeným
terciárem do trojúhelníka
YN yn 0 (d)



Štítkové hodnoty

Jmenovitá napětí, převod, regulační rozsah

Jmenovitý výkon

vn/nn vyráběné do výkonu 2,5 MVA

110/22 kV do 63 MVA

Napětí (impedance) nakrátko $u_{k\%}$

Proud naprázdno $i_{0\%}$

**Ztráty - nakrátko ΔP_k
- naprázdno ΔP_0**

Zapojení vinutí + hodinové číslo

vv/vv

vv/vn

vn/vn a vn/nn

vn/nn do 400 kVA

YNynd

YNd1(d) nebo YNyn0(d)

Dyn

Yyn0 nebo YZn1

Veličina	Tolerance
Napěťový poměr	Menší z následujících hodnot: a) $\pm 0,5\%$ garantovaného poměru napětí b) $\pm 1/10$ měřené impedance nakrátko na hlavní odbočce.
Impedance nakrátko	$\pm 10\%$ garantované impedance nakrátko
Ztráty naprázdno	$+15\%$ garantovaných ztrát naprázdno
Ztráty při zátěži	$+15\%$ garantovaných ztrát při zátěži
Celkové ztráty (se zátěží i naprázdno)	$+10\%$ garantovaných celkových ztrát (naprázdno i se zátěží)
Proud naprázdno	$+30\%$ garantovaného proudu naprázdno

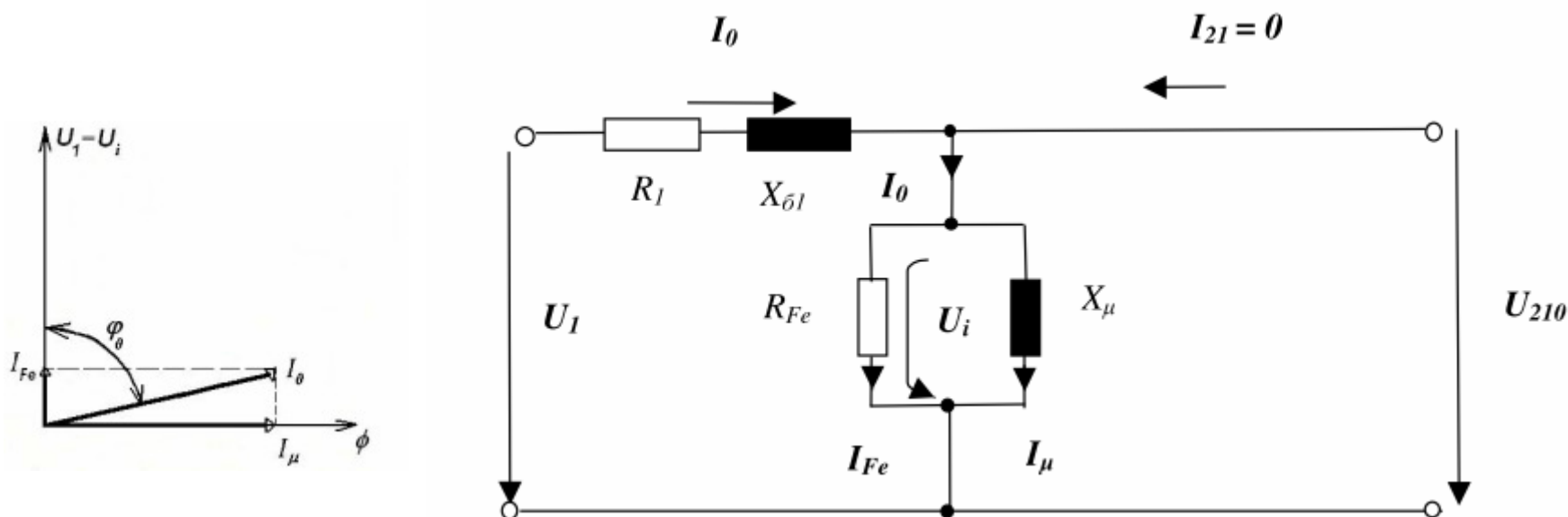
Tabulka 5: Tolerance některých parametrů transformátoru podle IEC 76-1.

Štítkové hodnoty

Proud naprázdno $i_{0\%}$ - cca do 1% I_n

Ztráty naprázdno ΔP_0

- Joulovy ztráty v primárním vinutí (zanedbatelné)
- ztráty v železe – vířivými proudy a hysterézí



Štítkové hodnoty

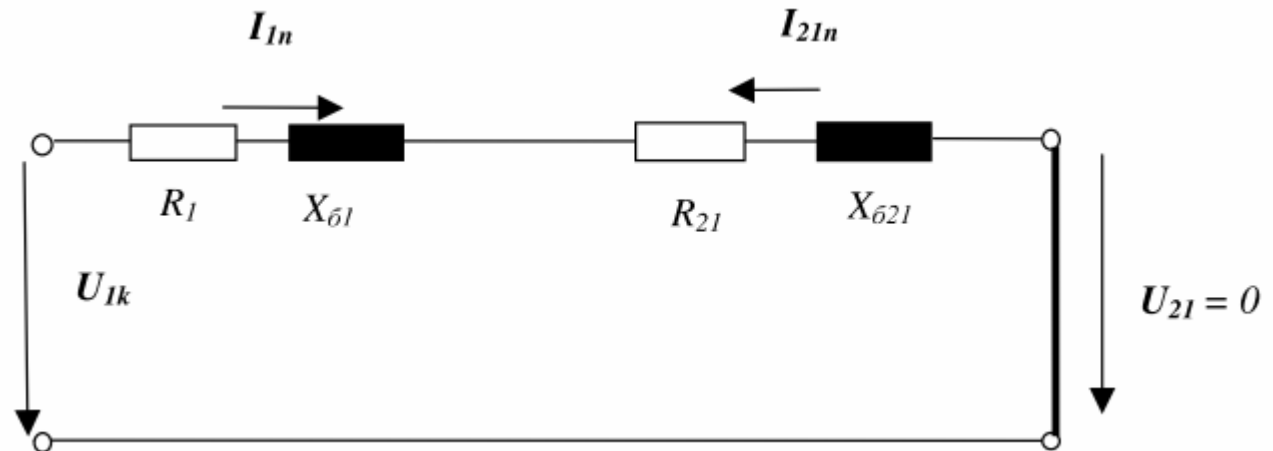
Napětí (impedance) nakrátko $u_{k\%}$

$$u_{k\%} = U_{k1} / U_{n1f} \quad \text{pro } R_T \ll X_T \quad u_{k\%} = U_{k1} / U_{n1f} = (Z_T \cdot I_n) / U_{n1f}$$

vn/nn	4 – 6 %
velká trafa	cca 8 – 15 %

Ztráty nakrátko ΔP_k

– Joulovy ztráty v primárním a sekundárním vinutí



Ztráty transformátoru

Ztráty naprázdno ΔP_0 (v železe)

$$\Delta P_0 = 3 \cdot G \cdot U_f^2 = G \cdot U^2$$

**Omezení ztrát - konstrukcí (lakem izolované plechy o tloušťce do cca 0,5 mm)
- materiálem mag. jádra (tzv. orientované plechy, amorfnní materiály)**

Spékání lakem izolovaných plechů → omezení vibrací a hluku traf

Materiály magnetických jader

- neorientované plechy válcované za tepla (do r. 1960)
 - orientované plechy válcované za studena
 - vysoce orientované plechy, tenké cca 0,2 mm
 - amorfnní plechy (slitina Fe, Si, B, rychlé ochlazení tekutého kovu zamezí růstu krystalického zrna) tenké cca 0,02 mm , až 1/3 ztráty oproti předcházejícím plechům
-

Ztráty transformátoru

Ztráty nakrátko ΔP_k (v mědi) – cca 3 až 4 x vyšší než ΔP_0

$$\Delta P_{kn} = 3 \cdot R \cdot I_n^2$$

Celkové ztráty v závislosti na zatížení trafo – cca 1% S_n

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2, \text{ kde}$$

I – skutečný proud

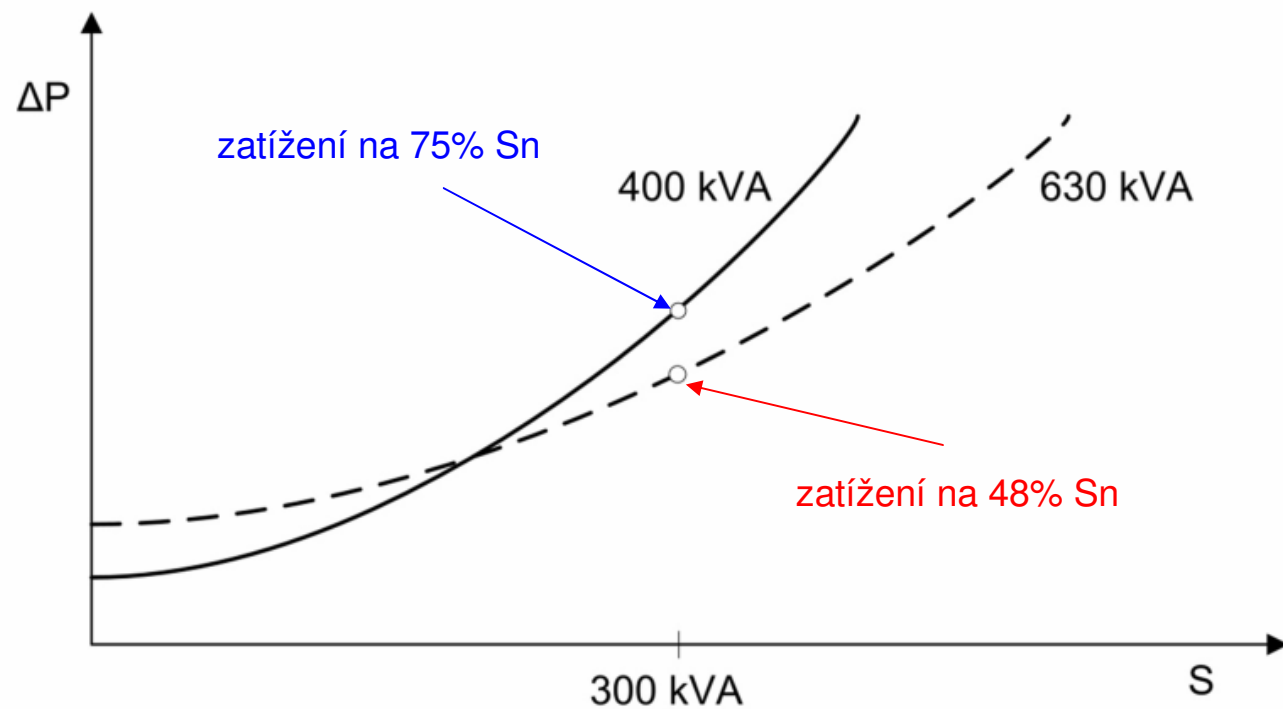
I_n – jmenovitý proud

DTR 22/0,42 kV 400 kVA	TR se standardními ztrátami	TR s redukovanými ztrátami
P_0 (W)	930	610
P_k (W)	6000	4600

Ztráty transformátoru

Optimální zatížení trať

- zatížení trať cca 70% S_n a méně



Dělení transformátorů

Podle počtu fází – třífázové

- jednofázové

- velké 3f transformátory mohou být sestaveny ze tří 1f traf

Podle zapojení do soustavy

- snižovací

- zvyšovací (vyvedení výkonu od generátoru)

tzv. bloková trať – vyvedení bloku elektrárny (mezi G a trafem obvykle zapouzdřené vodiče)

Podle počtu vinutí

– dvojvinut'ové (primární a sekundární vinutí)

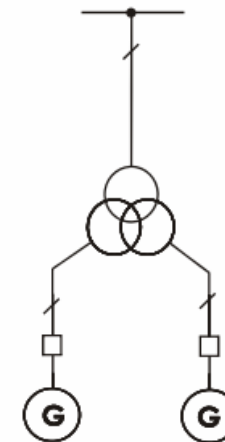
- trojvinut'ové (primární, sekundární a terciární vinutí)

- s vyvedeným terciárem, např. elektrárny

- s nevyvedeným terciárem, např. TR 110/22 kV

terciár do uzavřeného trojúhelníka (omezení nesymetrie)

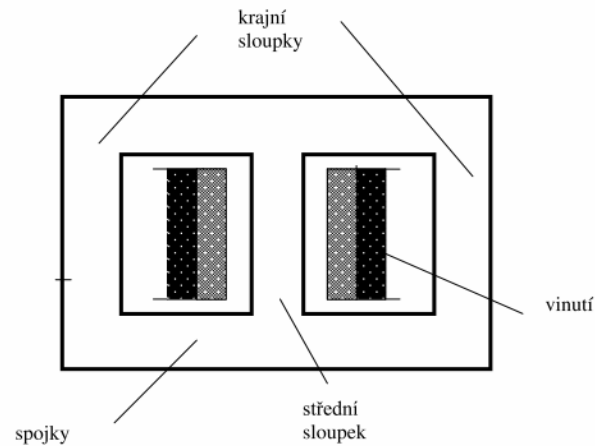
- autotransformátory, např. VVV /VVN



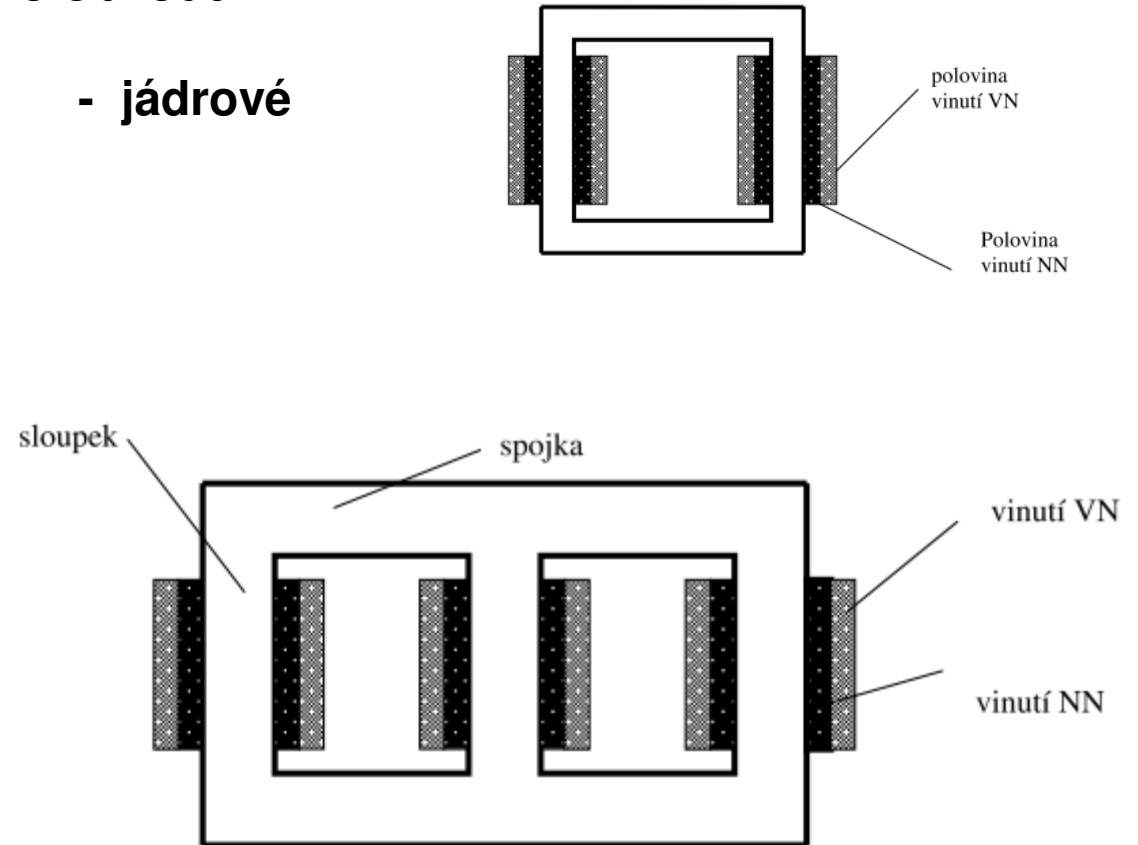
Dělení transformátorů

Podle uspořádání magnetického obvodu

– plášťové



- jádrové



Dělení transformátorů

Podle izolačního média vinutí

- olejové – velké výkony, účinnější chlazení
- suché – menší výkony, lze umístit i v patře či na střeše, vyšší požární bezpečnost



Dělení transformátorů



	Olejový DTR	Suchý DTR
VÝHODY	+Cena +Dlouhá životnost (min. 25 let) +Nízká hlučnost +Nízké ztráty +U hermetického provedení takřka nulové náklady na údržbu +“zelené transformátory” – plněné syntetickým nebo rostlinným olejem -> nízká hořlavost	+Minimální zatížení životního prostředí +Levná montáž a provoz +Menší požární riziko +Vysoká krátkodobá přetížitelnost +Příznivé možnosti zakrytování +Žádné chladicí kapaliny
NEVÝHODY	-Vybudování záchytné olejové jámy nebo vany -Horší montáž	-Vyšší pořizovací náklady -Větší rozměry -Hlučnost
POUŽITÍ	<ul style="list-style-type: none"> • Tam, kde nehrozí nebezpečí vzniku požáru a výbuchu • Mimo chráněné oblasti • Pro venkovní i vnitřní transformační stanice 	<ul style="list-style-type: none"> • Průmyslové i občanské stavby (nemocnice, hotely, divadla, letiště, metra, ...)- tam, kde se netoleruje znečištění ŽP (blízkost zdrojů pitné vody), nebezpečí vzniku požáru a výbuchu • Pro venkovní a sloupové transformační stanice



Dělení transformátorů

Podle umístění

- **venkovní** – velké výkony
- **vnitřní** – menší výkony, hasicí systémy, větrání, oddělení od rozvodných zařízení



Dělení transformátorů

Podle umístění

- **venkovní** – velké výkony
- **vnitřní** – menší výkony, hasicí systémy, větrání, oddělení od rozvodných zařízení



Venkovní dvou-sloupová trafostanice



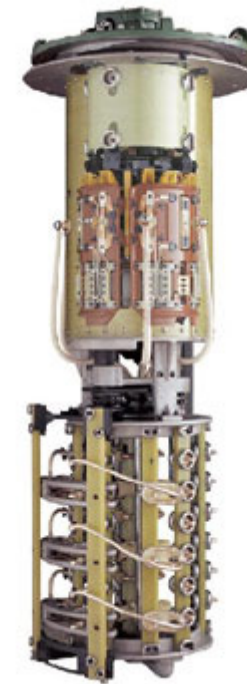
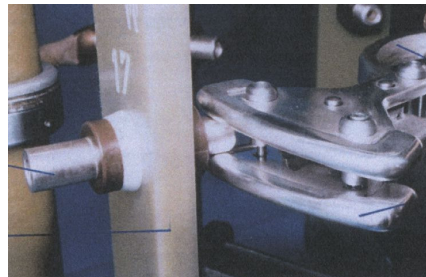
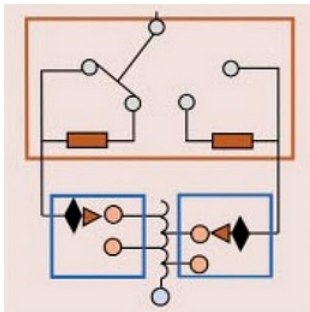
Kiosková trafostanice se 2 transformátory

Dělení transformátorů

Podle řízení napětí

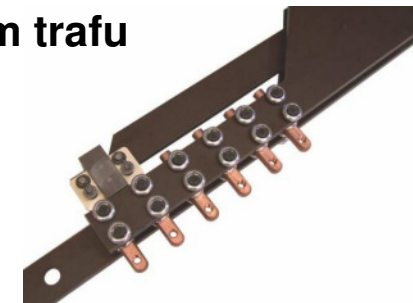
- **regulovatelné pod zatížením**

- přepínač odboček lze přepnout bez vypnutí trafa
- vvn/vvn, 110 kV/vn
- výjimečně i vn/nn – nejméně cca 3x dražší !

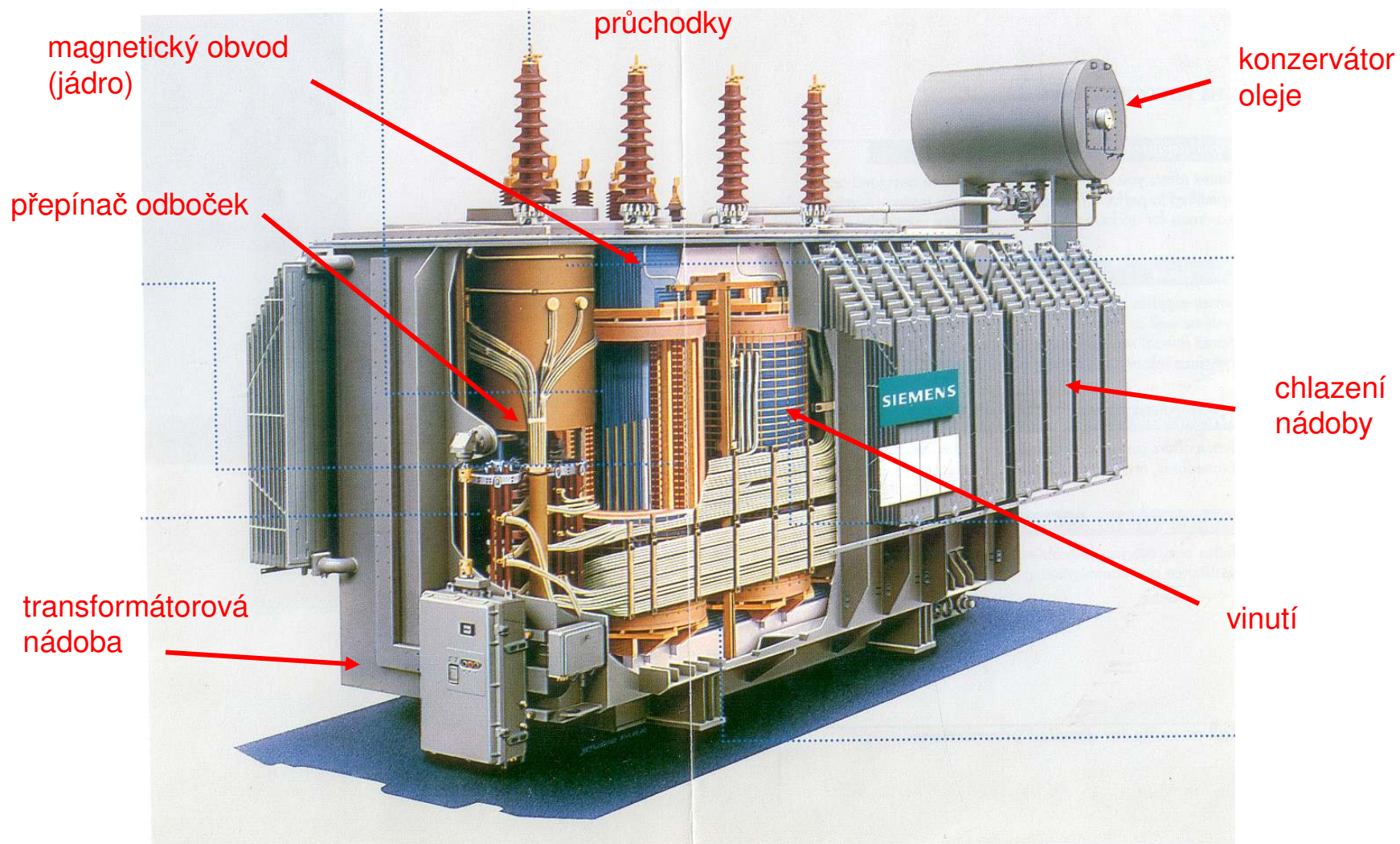


- **regulovatelné bez zatížení**

- přepínač odboček lze přepnout pouze při vypnutém trafu
- vn/vn a vn/nn

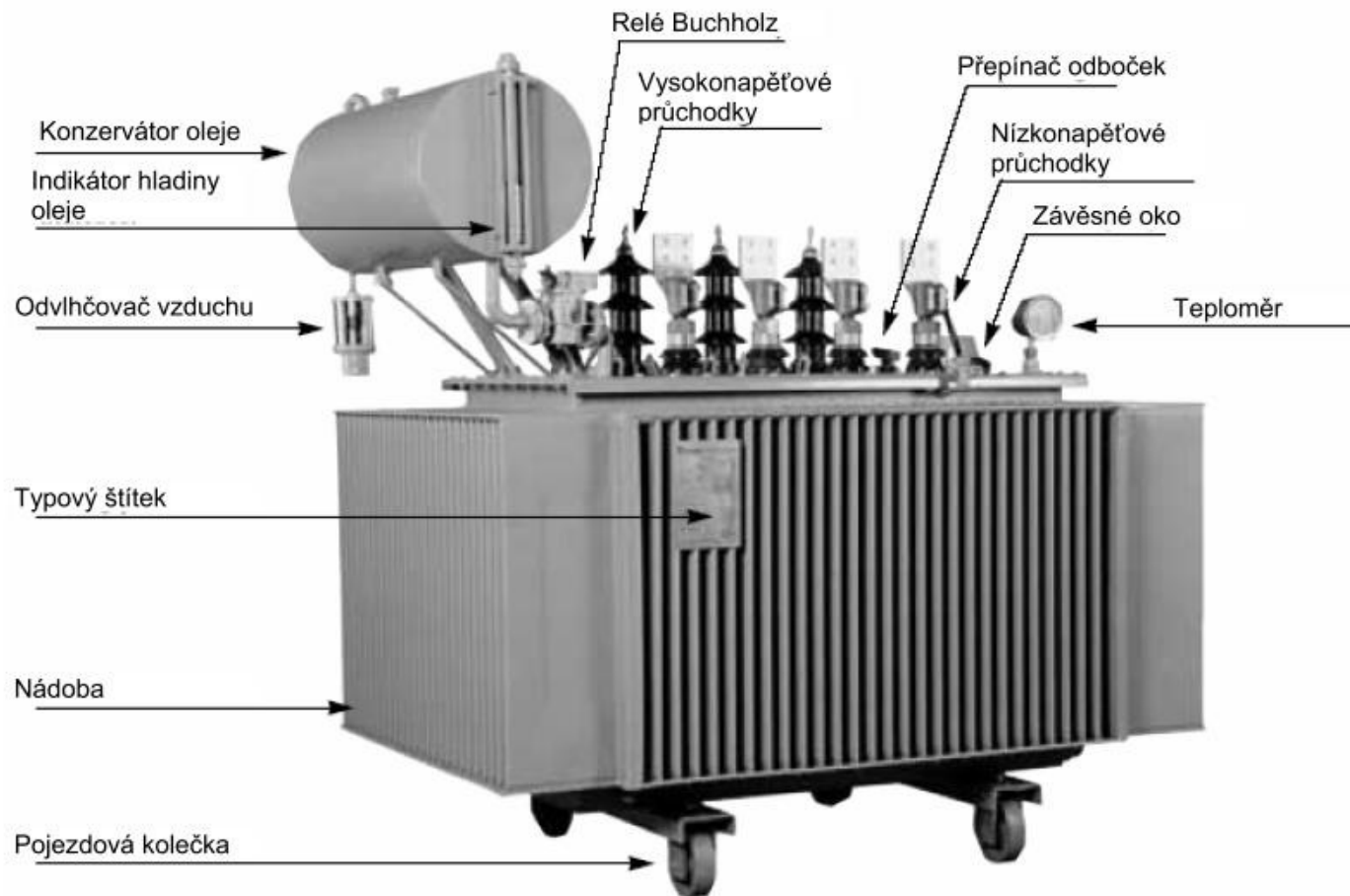


Transformátor 110 kV / vn

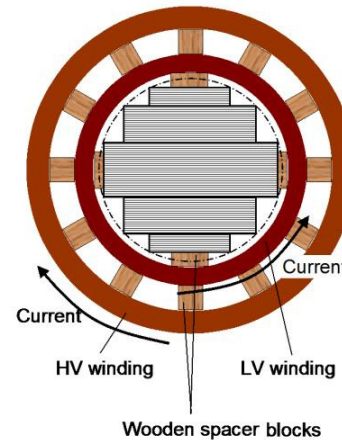
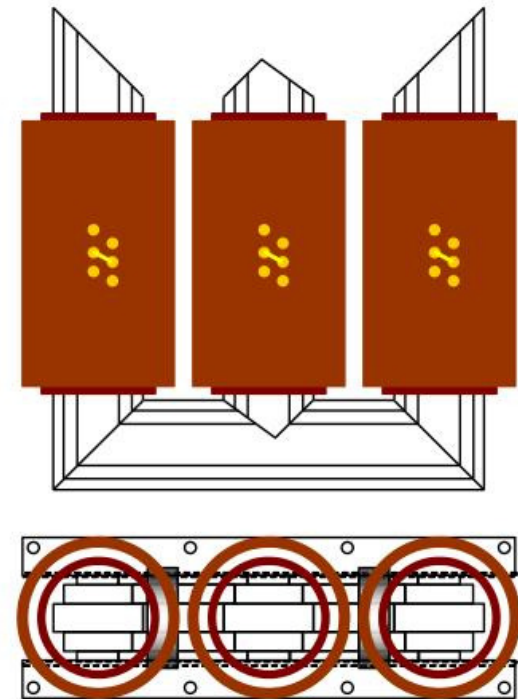
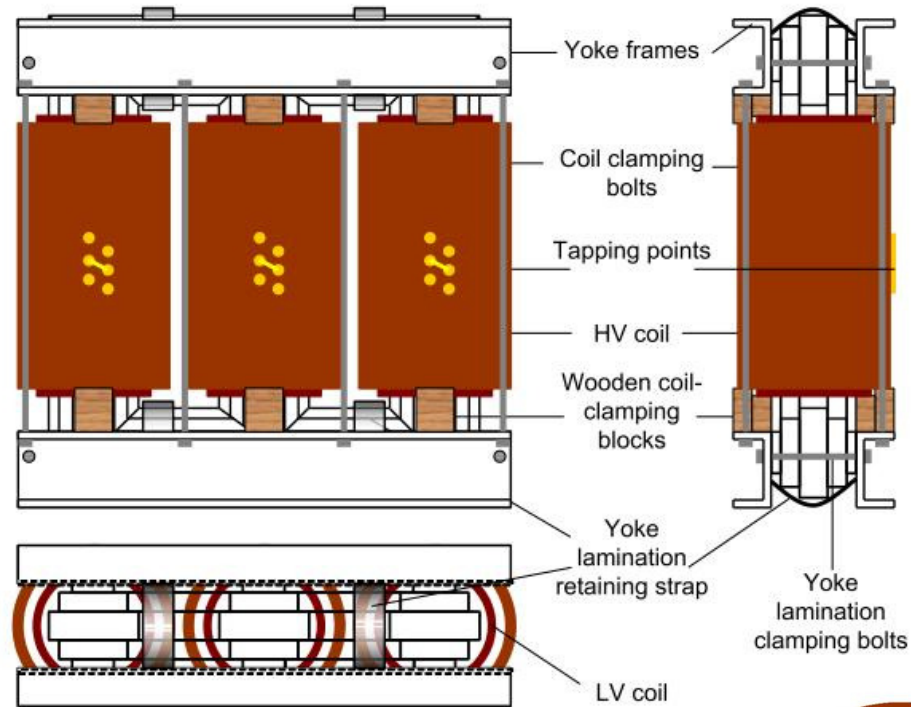


Konstrukce transformátoru

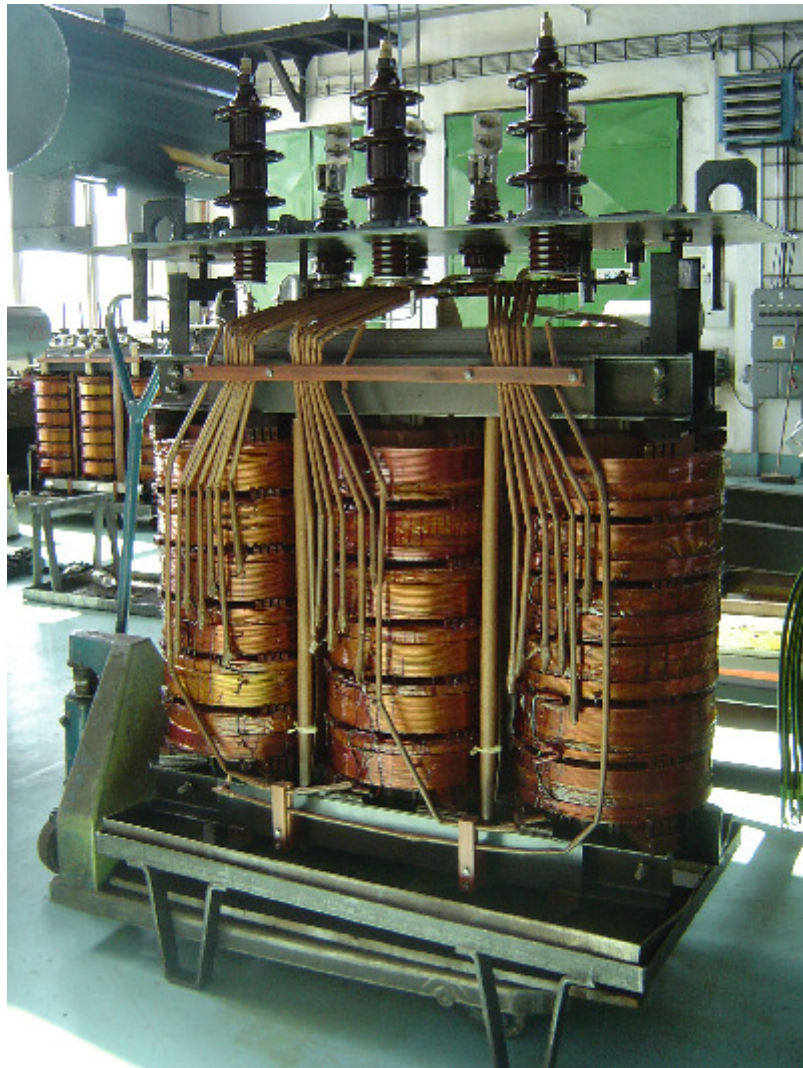
Oleřový distribuční transformátor



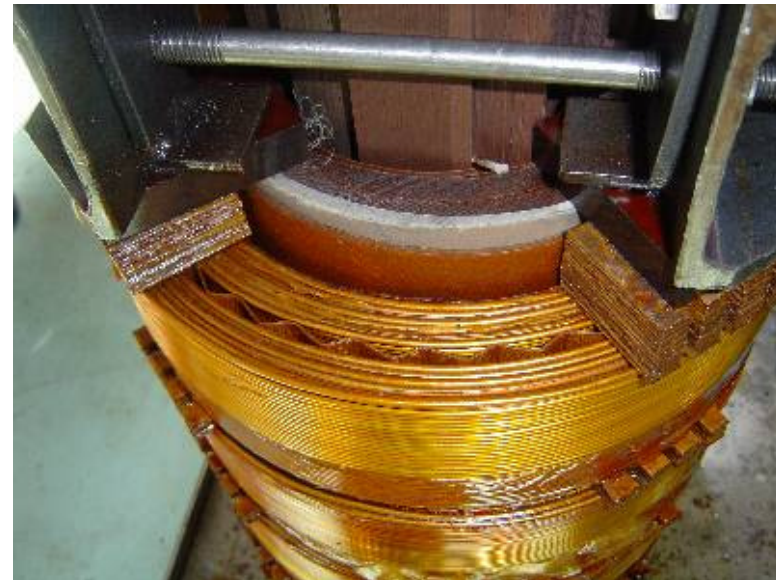
Konstrukce transformátoru



Konstrukce transformátoru



Konstrukce transformátoru



Chlazení transformátoru

4- písmenné označení způsobu chlazení

1. písmeno – vnitřní chladicí médium v kontaktu s vinutím
2. písmeno – způsob oběhu vnitřního chladicího média
3. písmeno – vnější chladicí médium (vnější chladicí soustava)
4. písmeno – způsob oběhu vnějšího chladicího média

Chladicí médium

O	olej
A	vzduch
W	voda
K	jiná kapalina

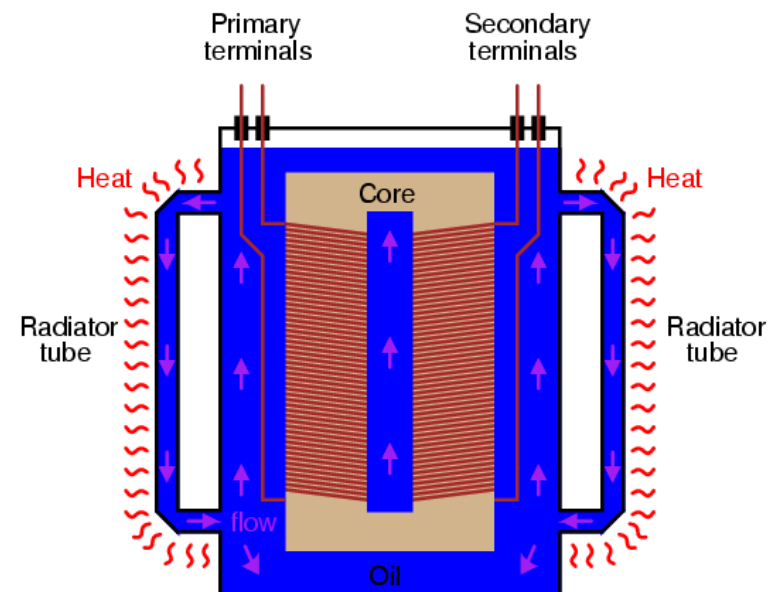
Způsob oběhu

N	přirozená cirkulace
F	nucená cirkulace (čerpadlo, větrák)

ONAN - olejové trafo, nádoba chlazená vzduchem
použití: trafo vn/nn

ONAF - olejové trafo, nádoba ofukovaná vzduchem
použití: velká trafo vvn/vn, vvn/vvn

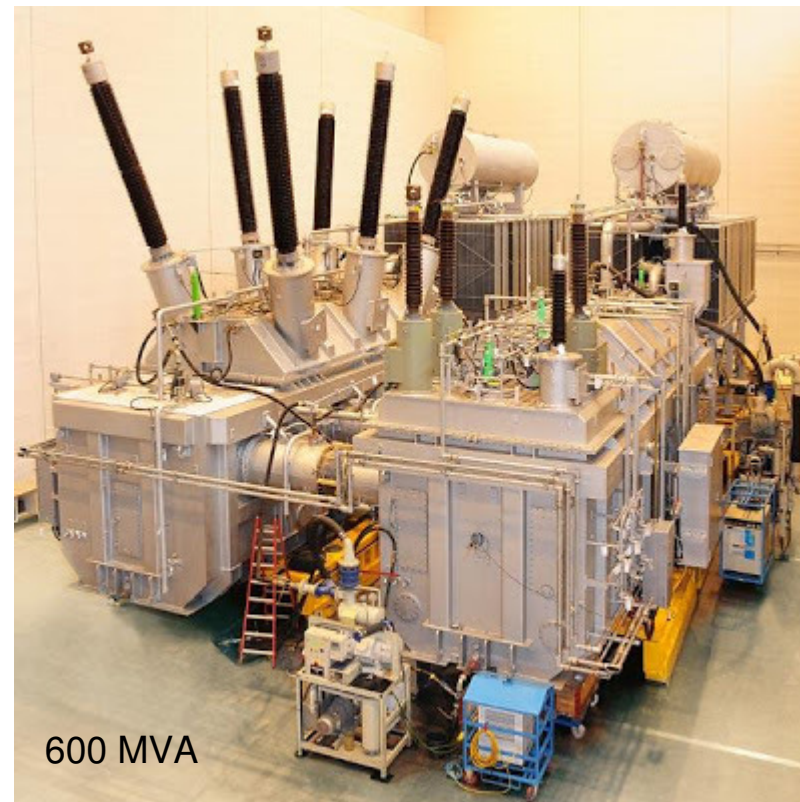
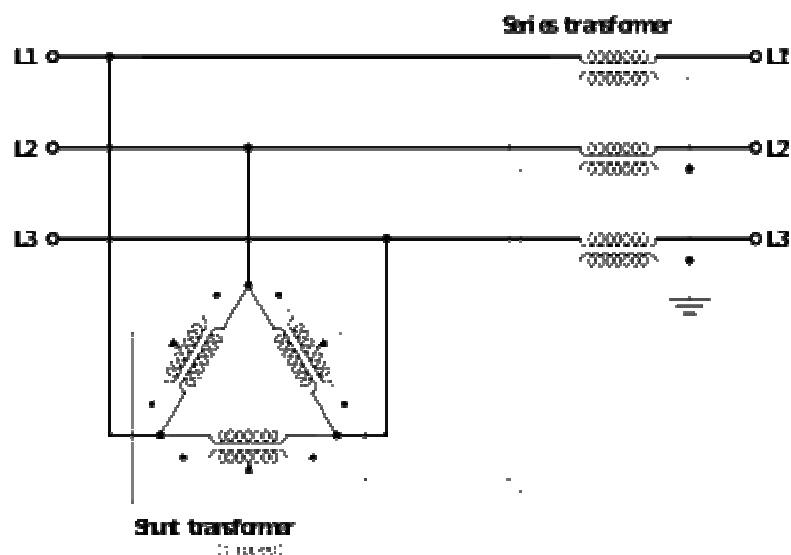
Ofukem pomocí ventilátorů se dá zvýšit zatížení trafo až o 40%



Trendy

Přenosová soustava

Phase shift transformers (PST)



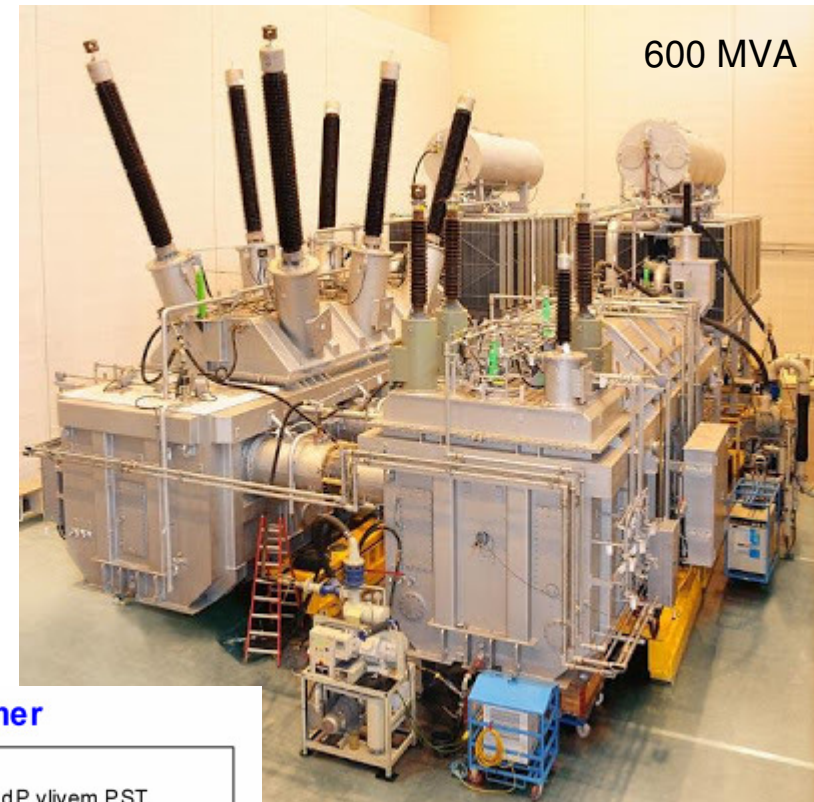
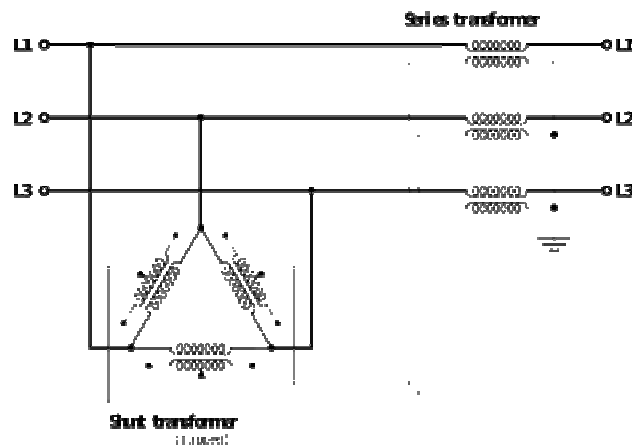
Distribuční soustava

- trať vn/nn regulovatelná pod zatížením (OLTC)
- nn strana – kovová fólie
- olejová hermetizovaná trať – pružná nádoba bez konzervátoru, hermeticky uzavřená, zabránění pronikání vlhkosti a O_2

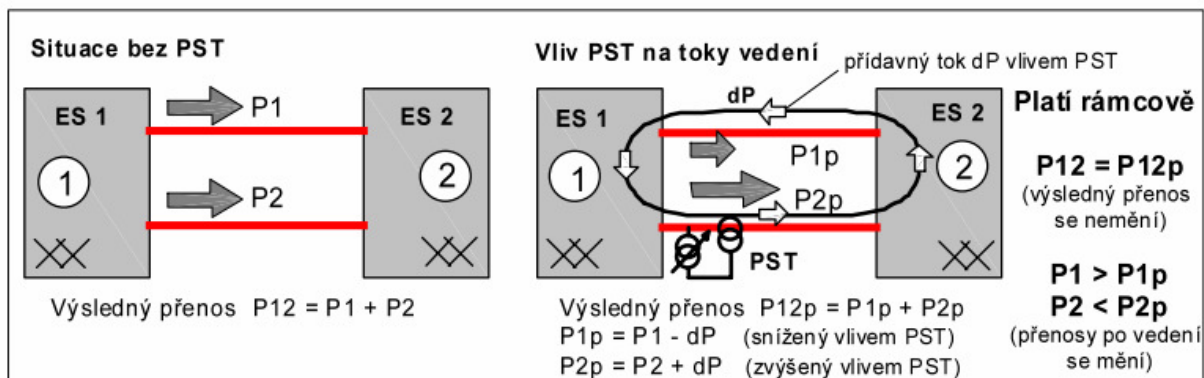


Trendy

Přenosová soustava Phase shift transformers (PST)



Ovlivnění toků po vedeních vlivem Phase Shifting Transformer



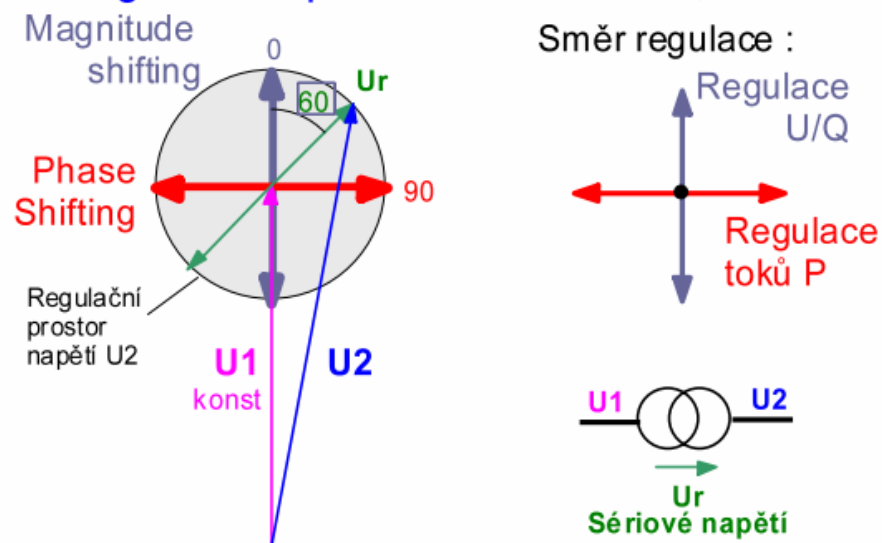
Trendy

Složení Phase Shifting Transformer z jednotek



Při regulaci je možné dosáhnout vlivem modulu a úhlu přidavného regulačního napětí různých výsledných funkcí transformátoru:

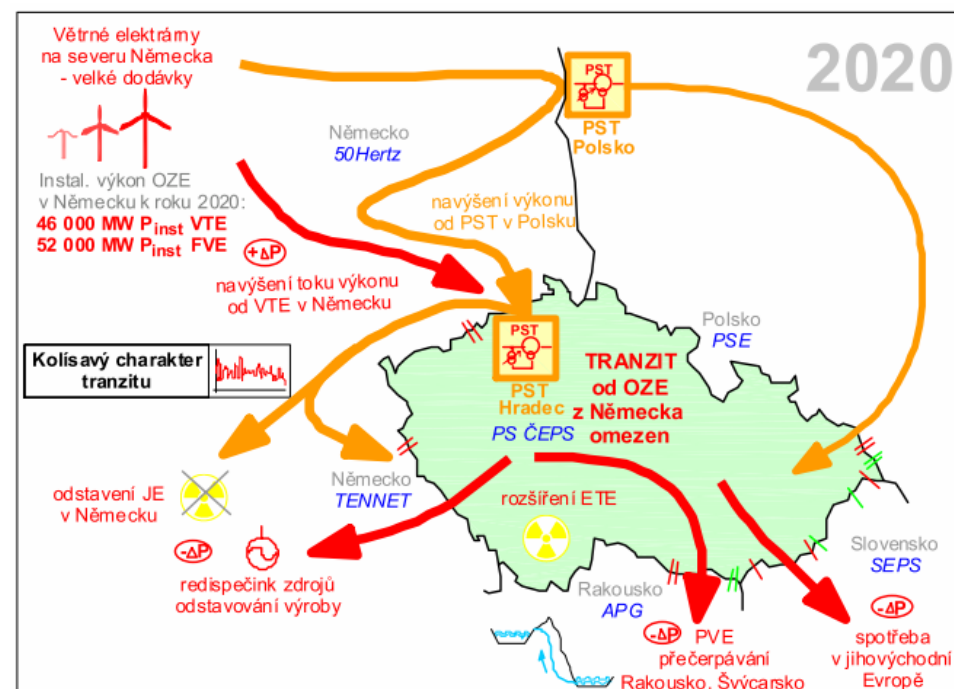
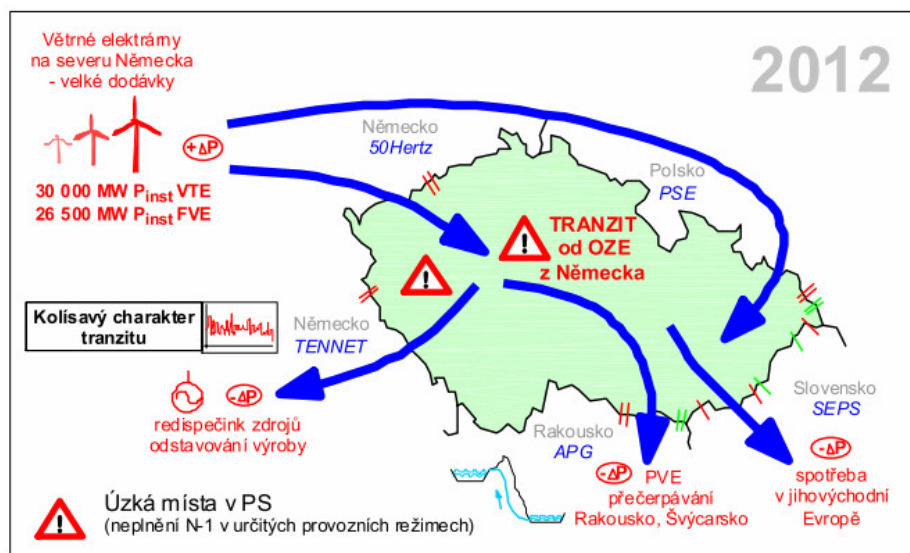
Regulace napětí na PST - modul, úhel



Trendy

Vliv PST na přerozdělení toku výkonu v regionu střední Evropa

Zdroj: OTE



**Děkuji za pozornost,
doplnění prezentovaných informací
a vaše dotazy.**

Miloslava Tesařová

Západočeská univerzita v Plzni
Katedra elektroenergetiky a ekologie
