

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Optimalizace výkonů transformátorů v distribuční  
soustavě**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Hlavním tématem diplomové práce je výpočet celkových ročních ztrát a posouzení vhodnosti volby výkonu transformátorů zejména z hlediska ekonomického provozu. Výsledkem je navržení metodiky pro rozvoj a obnovu transformátorů.

## **Klíčová slova**

Distribuční soustava, transformátor, ztráty, zatížení, náklady.

## **Abstract**

The thesis deals with the assessment of total annual power transformation losses and the selection of suitable transformer output especially from the economic point of view. The result is the methodology for development and renewal of transformers.

## **Key words**

Distribution power grid, transformer, losses, load, costs.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 7.5.2015

Aneta Hlásková

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Miloslavě Tesařové Ph.D. za věcné připomínky a rady. Poděkování patří i konzultantovi diplomové práce Ing. Danielovi Koubovi, Ph.D. za profesionální podporu při tvorbě diplomové práce.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>1 PARAMETRY TRANSFORMÁTORU.....</b>	<b>11</b>
1.1 JMENOVITÝ VÝKON .....	12
1.2 JMENOVITÝ PŘEVOD A REGULAČNÍ SCHOPNOSTI TRANSFORMÁTORU.....	12
1.3 SPOJENÍ VINUTÍ.....	13
1.4 PROUD NAPRÁZDNO.....	15
1.5 NAPĚTÍ NAKRÁTKO.....	16
1.6 ZTRÁTY TRANSFORMÁTORU .....	17
1.6.1 <i>Legislativa.....</i>	<i>17</i>
1.6.2 <i>Ztráty činné.....</i>	<i>19</i>
1.6.3 <i>Ztráty transformátoru při zatížení .....</i>	<i>22</i>
1.6.4 <i>Vyčíslení ztrát na transformátorech VVN/VN v síti E.ON Distribuce, a.s.....</i>	<i>24</i>
<b>2 KRITÉRIA VOLBY VÝKONU TRANSFORMÁTORU .....</b>	<b>34</b>
2.1 KRITÉRIA TECHNICKÁ.....	35
2.2 METODA DISKONTOVANÝCH NÁKLADŮ .....	35
2.3 HOSPODÁRNÉ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ .....	38
2.4 PARALELNÍ CHOD TRANSFORMÁTORŮ .....	40
<b>3 VÝVOJ ZATÍŽENÍ TRANSFORMÁTORŮ A JEJICH INSTALOVANÝCH VÝKONŮ V DISTRIBUČNÍ SÍTI .....</b>	<b>42</b>
<b>4 METODIKA ROZVOJE A OBNOVY TRANSFORMACE .....</b>	<b>45</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>49</b>
<b>CITOVANÁ LITERATURA .....</b>	<b>50</b>
<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratk

TR	transformátor,
NN	nízké napětí,
VN	vysoké napětí,
VVN	velmi vysoké napětí,
$u_i$	indukované napětí,
N	počet závitů,
$\psi$	spřažený magnetický tok,
$\phi$	magnetický tok,
E	intenzita elektrického pole,
l	délka uzavřené dráhy,
$i_0$	proud naprázdno procentní
$u_k$	napětí nakrátko
PEI	index špičkové účinnosti
$k_p$	činitel zvětšení ztrát vlivem změn struktury materiálu v blízkosti stříhu
$f^i$	frekvence s exponentem i daným typem ztrát
B	magnetická indukce
$m_{Fe}$	hmotnost uvažované části obvodu
$\Delta p_{Fe}$	ztrátové číslo plechů
$\Delta P$	ztráty činného výkonu v transformátoru při určitém zatížení
$\beta$	zatěžovatel
S	zatížení transformátoru
$S_n$	jmenovitý výkon transformátoru
$\Delta P_0$	ztráty činného výkonu naprázdno
$\Delta P_k$	ztráty činného výkonu nakrátko
$\Delta Q$	ztráty jalového výkonu v transformátoru při určitém zatížení
$\Delta Q_0$	ztráty jalového výkonu naprázdno
$\Delta Q_k$	ztráty jalového výkonu nakrátko
k	měrný činitel ztrát, který vyjadřuje ztráty činného výkonu vyvolané 1 kVAr zatížení;
$\Delta P_T$	celkové ztráty činného výkonu vyvolané zatíženým transformátorem v síti
P	činný výkon
Q	jalový výkon



D	diskontované náklady investičního projektu
I	investiční náklady
$V_i$	diskontované roční provozní náklady v i-tém roce (bez odpisů)
$N_i$	náklady v i-tém roce
i	jednotlivé roky životnosti
d	diskontní míra v podobě váženého průměru nákladů na kapitál (wacc)
n	doba životnosti investice
$T_p$	doba provozu
$n_{\Delta}$	měrné náklady na 1kWh
$T_z$	doba plných ztrát
$N_{iT}$	roční náklady odvozené z investičních nákladů,
$n_0$	celkové měrné náklady na ztráty naprázdno
$n_k$	celkové měrné náklady na ztráty nakrátko
$S_{př}$	přechodový výkon

## Úvod

V sítích celé České republiky je provozováno velké množství transformátorů. Vzhledem ke stále se zvyšující poptávce elektrické energie se při plánované výměně obvykle volí stejný nebo i vyšší výkon transformátoru. Obnova a rozvoj transformace energie musí samozřejmě vyhovovat požadavkům vyplývajícím z platné legislativy a musí brát ohled na zajištění spolehlivosti dodávky elektrické energie. Ne vždy se však bere ohled na skutečný průběh zatížení, který velmi úzce souvisí s celkovou cenou transformátoru. Nevhodně zvolený transformátor může znamenat nepřiměřenou pořizovací cenu, ale i ztráty, které se promítnou do nárůstu provozních nákladů.

Tato práce se na základě dlouhodobého měření zabývá statistikou využití distribučních transformátorů VVN/VN. V závislosti na této statistice je v práci navržena metodika rozvoje a obnovy transformace s ohledem na ekonomické hledisko.

## 1 Parametry transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj, sloužící k přenosu elektrické energie mezi dvěma nebo více obvody střídavého proudu. V elektroenergetické soustavě se používá pro změny napětí v elektrických sítích, ale také pro galvanické oddělení jednotlivých obvodů střídavého proudu.

Transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce. Skládá se ze dvou a více od sebe izolovaných elektrických obvodů spřažených jedním magnetickým obvodem. Pokud je na primární vinutí s  $N_1$  závitů přiveden střídavý proud  $i_1(t)$ , vzniká v magnetickém obvodu střídavý magnetický tok  $\Phi$  spřažený se sekundárním (případně dalším) vinutím s  $N_2$ , kde se indukuje střídavé napětí  $u_2(t)$ . V sekundární cívce se indukuje elektrické napětí dle vztahu [1]:

$$\oint E dl = -u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N * \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

$u_i$ ... indukované napětí,	$N$ ... počet závitů,
$\psi$ ... spřažený magnetický tok,	$\phi$ ... magnetický tok,
$E$ ... intenzita elektrického pole,	$t$ ... čas.
$l$ ... délka uzavřené dráhy,	

Transformátory můžeme dělit podle různých hledisek. Například podle počtu fázových vodičů na jednofázové a třífázové či podle typu chlazení na transformátory se vzduchovým nebo olejovým chlazením. Nebo podle použití na energetické, měničové, oddělovací, pecové apod.

Jako energetické transformátory VVN/VN jsou v České republice používány zejména třífázové transformátory s olejovým konzervátorem. Transformátory VN/NN jsou zpravidla hermetizované třífázové olejové. Při volbě druhu transformátoru však záleží na mnoha okolnostech, jako například umístění, požárních hlediska či rozložení stávajících sítí VN a NN.

Základní údaje a technická data, která vymezují použití transformátoru, jsou uvedeny na štítku transformátoru a nazývají se tedy štítkovými hodnotami transformátoru.

## 1.1 Jmenovitý výkon

Jedná se o zdánlivý výkon  $S_n$  [MVA, (kVA)], který vyjadřuje trvalou zatížitelnost transformátoru. Jde o výkon vstupující do transformátoru, neboť na straně výstupního vinutí je hodnota výkonu nižší vlivem ztrát.

Normalizovaná řada výkonů třífázových transformátorů:

0,75 – 1 – 1,6 – 2 – 2,5 – 3,15 – 4 – 5 – 6,3 – 8 – 10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 a jejich násobky 10, 100, 1000, 10000. [2]

Nejčastěji používané výkony v české přenosové a distribuční soustavě se vstupním napětím VVN

400/220 kV:	400; 630 [MVA]
400/110 kV:	200; 250; 330 [MVA]
220/110 kV:	200 MVA (3 x 66 MVA)
110/ 23 kV:	10; 16; 25; 40, 63 [MVA]
110/6,3 kV:	31,5 [MVA]

V síti společnosti E.ON jsou nejčastěji instalovány transformátory 110/23 kV s výkony 25 a 40 MVA. Ve specifických případech jsou instalovány také transformátory 110/23kV s výkony 16, 20, 28 a 43 MVA.

## 1.2 Jmenovitý převod a regulační schopnosti transformátoru

Jmenovitý převod transformátoru udává poměr velikostí vstupního a výstupního napětí. Je určen poměrem počtu závitů jednotlivých cívek a definuje stav naprázdno, kdy není napětí na výstupní straně sníženo o úbytky při zatížení. Kompenzace úbytků na samotném transformátoru je kompenzován samotným jmenovitým převodem.

Úbytek napětí nevzniká pouze na transformátoru, ale také na vedení. Pro zajištění požadovaných parametrů dodávky je nutné napětí regulovat. K tomuto účelu slouží přepínač odboček. Distribuční transformátory VVN/VN mají na vinutí vyššího napětí vyvedeny odbočky nejčastěji  $\pm 8 \times 2 \%$  případně 1,7% od střední odpovídající jmenovitému převodu. Přepínač odboček pro tyto transformátory je konstruován tak, že je při zatížení, tzn. za provozu, schopen spolehlivě přepínat odbočky. Číslování odboček se obvykle provádí od nejnižší, odpovídající nejmenšímu počtu závitů vstupního vinutí a tím i nejmenšímu převodu. Číslo 9 má odbočka střední.

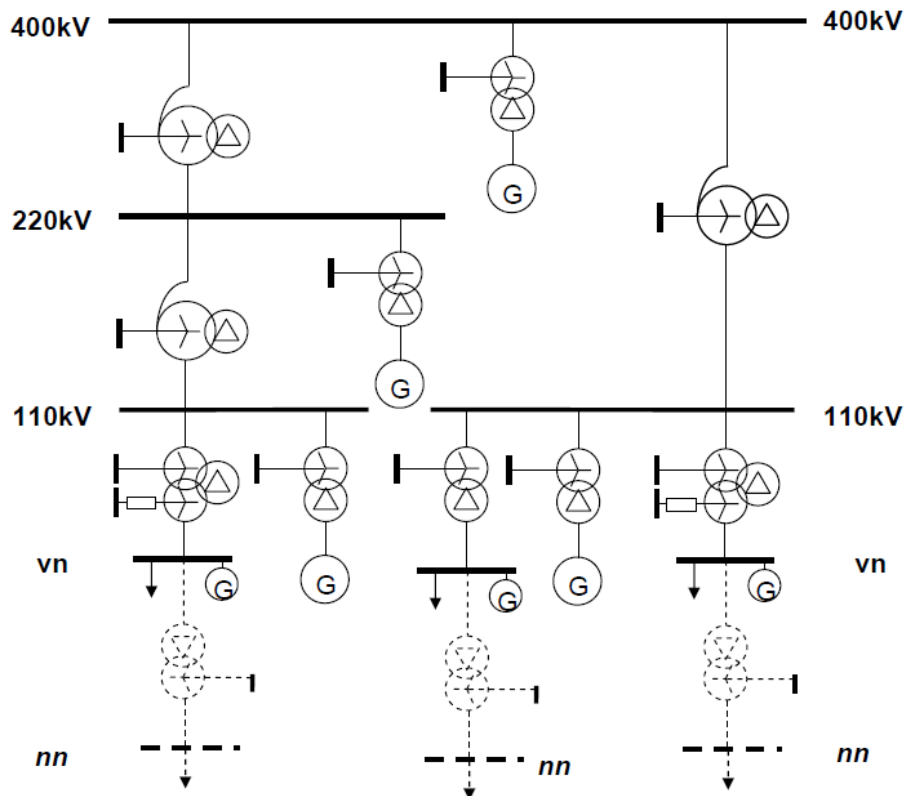
Distribuční transformátory VN/NN, se zpravidla řeší jako regulační bez zatížení. Odbočky, které jsou umístěny na vstupní, vysokonapěťové, straně transformátoru je tedy nutné přepojit mechanicky v beznapěťovém stavu. V dnešní době jsou nasazovány i s transformátory, které mají regulaci při zatížení. Jedná se však o několikrát dražší transformátory, které jsou instalovány spíše ojediněle. V rámci společnosti E.ON je instalováno pouze několik kusů těchto transformátorů.

Regulace slouží k eliminaci úbytků napětí na dlouhých vedeních a ke srovnávání napěťových poměrů za transformátory různě vzdálenými od společného uzlu sítě (rozvaděče, rozvodny). Dříve vyráběné distribuční transformátory mají převod napětí  $22 \pm 5\% / 0,4$  kV. Novější transformátory mají převod  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,4$  kV, případně  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,42$  kV. V některých případech se objevují i transformátory  $22 \pm 2 \times 2,5\% / 0,41$  kV. [2][3] [4]

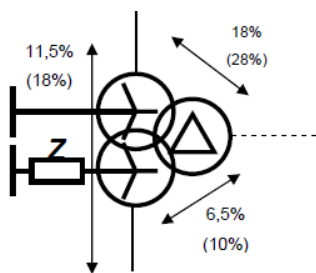
### 1.3 Spojení vinutí

V trojfázové soustavě lze vinutí uspořádat do hvězdy (Y, y), trojúhelníka (D, d) nebo lomené hvězdy (Z, z). Je-li uzel hvězdy či lomené hvězdy vyveden, přidáváme označení N.

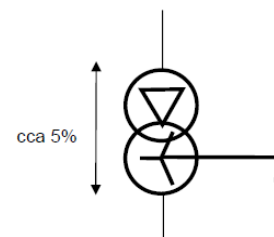
Na obrázku 1 je znázorněna transformátorová koncepce sítí České a Slovenské republiky a návaznost napěťových hladin. V této práci se budeme zabývat pouze transformátory VVN/VN a VN/NN.



Obrázek 1 - Transformátorová koncepce ČR + SR [2]



Závorky pro T110/22kV 63MVA.

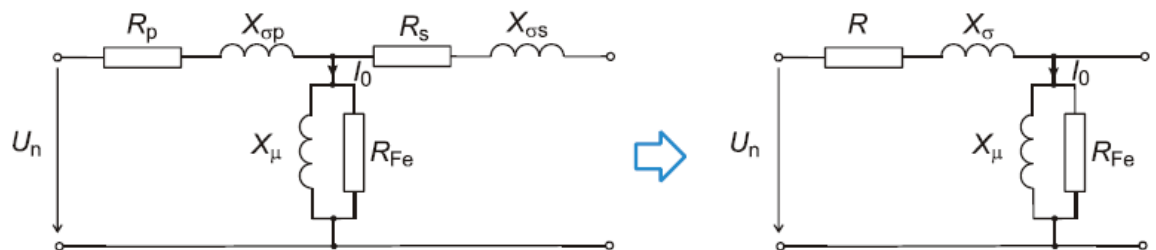
Obrázek 2 - Transformátory  
110kV/vn (22 nebo 35kV) [2]Obrázek 3 - Transformátory  
vn/nn (0,4kV) [2]

Obrázky 3 a 4 ukazují zapojení vinutí transformátorů VVN/VN a VN/NN. Přednosti zapojení do hvězdy spočívají v hospodárnosti pro vyšší hodnoty napětí, možnosti využití nulového bodu vinutí k jeho přímému uzemnění nebo uzemnění přes impedanci. Dále umožňuje umístění odboček vinutí a přepínače odboček u konce vinutí každé fáze. Zapojení do trojúhelníka je hospodárnější pro vinutí s nižšími hodnotami napětí a velkými proudy a zmenšuje v kombinaci s vinutím do hvězdy netočivou impedanci tohoto vinutí. [5]

## 1.4 Proud naprázdno

Stav naprázdno je takový provozní stav transformátoru, kdy je primární vinutí připojeno k jmenovitému napětí  $U_{1N}$  a svorky sekundárního vinutí jsou rozpojeny. Přesto primárním vinutím protéká proud  $I_0$  tzv. magnetizační proud, jenž je nutný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru. Tento proud je složen ze dvou složek, jalové složkou proud  $I_\mu$  a činné složky  $I_{Fe}$ . První složka reprezentuje hlavní indukčnost a tedy i hlavní tok v magnetickém obvodu. Druhá složka představuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy.

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_\mu + \bar{I}_{Fe} \quad (1.4.1)$$



Obrázek 4 - Náhradní schéma transformátoru při stavu naprázdno

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} = \frac{U_n * \sqrt{G_{Fe}^2 + B_\mu^2}}{\sqrt{3}I_n} = \sqrt{g^2 + b^2} = y \quad (1.4.2)$$

Kde  $g$  je poměrná hodnota příčné vodivosti transformátoru

$$g = \frac{Z_n}{R_{Fe}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n R_{Fe}} = \frac{P_0}{S_n} \quad (1.4.3)$$

a  $b$  je poměrná hodnota magnetizační susceptance transformátoru

$$b = \frac{Z_n}{X_\mu} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n X_\mu} \quad (1.4.4)$$

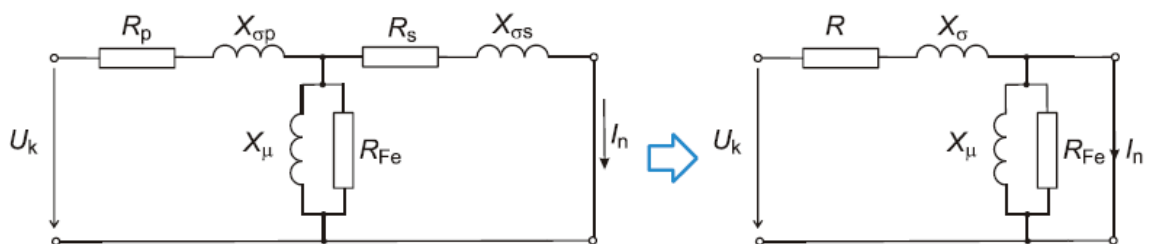
## 1.5 Napětí nakrátko

Stav nakrátko je takovým stavem transformátoru, kdy je primární vinutí transformátoru připojeno ke zdroji napětí a sekundární vinutí je vyzkratováno. Obvodem bude protékat proud nakrátko, nebo také zkratový proud. Hodnota zkratového proudu závisí na velikosti napětí zdroje a impedanci vinutí.

$$I_k = \frac{U_n}{Z} \quad (1.5.1)$$

Proud  $I_k$  kryje především ztráty ve vinutí transformátoru.

Vzhledem k velikosti zkratového proudu odebírá magnetický obvod transformátoru zanedbatelně velký proud  $I_0$  a proto v náhradním schématu neuvažujeme paralelní obvod.



Obrázek 5 - Náhradní schéma transformátoru při stavu nakrátko

$$u_k = \frac{\sqrt{3}U_k}{U_n} = \frac{I_n \sqrt{R^2 + X_\sigma^2}}{U_n} = \sqrt{r^2 + x^2} = z \quad (1.5.2)$$

Kde  $r$  je poměrná hodnota odporu vinutí transformátoru  $R=R_p+R_s$

$$r = \frac{R}{Z_n} = \frac{\sqrt{3}I_n R}{U_n} = \frac{P_k}{S_n} \quad (1.5.3)$$

A  $x$  je poměrná hodnota rozptylové reaktance transformátoru  $X_\sigma = X_{\sigma p} + X_{\sigma s}$

$$x = \frac{X_\sigma}{Z_n} = \frac{I_n X_\sigma}{\sqrt{3}U_n} \quad (1.5.4)$$



Napětí nakrátko  $U_k$  definujeme jako napětí, při kterém protéká vstupním vinutím jmenovitý proud  $I_{1N}$  při zkratovaném sekundárním vinutí. Napětí nakrátko je obvykle udáváno v procentech jmenovitého napětí.

U transformátorů VVN/VN se hodnota poměrného napětí nakrátko  $u_k\%$  nejčastěji pohybuje okolo 10%. Transformátory VN/NN mají hodnotu poměrného napětí nakrátko mezi 4 a 6%.

## 1.6 Ztráty transformátoru

### 1.6.1 Legislativa

V červenci 2015 vstupuje v platnost Nařízení Evropské komise pro navrhování transformátorů s ohledem na ochranu životního prostředí. Nová pravidla mají platit od července 2015 v celé Evropě; další stupeň s přísnějšími minimálními standardy je plánován na rok 2021.

Směrnice stanovuje rámec pro požadavky na ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie. Jejím cílem je zlepšení energetické účinnosti distribučních a výkonových transformátorů a s tím spojené snížení emisí  $CO_2$  [6].

Na základě přípravné studie byly Evropskou komisí stanoveny určité standardy pro ekologii a navrhování transformátorů, které byly nyní akceptovány v novém realizačním nařízení. V zásadě má být realizací nového nařízení dosaženo zvýšení účinnosti o 20 %, v případě použití výkonových transformátorů s jádrem z amorfní oceli až o 50%. [6]

Z této směrnice vyplývá, že transformátory, které budou v Evropském hospodářském prostoru uváděny do oběhu, musí od 1. července 2015 mimo jiné bezpodmínečně odpovídat požadavkům nového Nařízení pro navrhování s ohledem na ochranu životního prostředí, pakliže spadají do rozsahu jeho platnosti. [6] Příklad těchto požadavků je uveden v tabulce 1.

Tabulka 1 – Příklad požadavků na minimální index špičkové účinnosti pro velké výkonové transformátory ponořené do kapaliny [7]

Jmenovitý výkon [kVA]	Stupeň 1 (1.7.2015)	Stupeň 2 (1.7.2021)
	Maximální index špičkové účinnosti [%]	
16 000	99,615	99,663
20 000	99,639	99,684
25 000	99,657	99,700
31 500	99,671	99,712
40 000	99,684	99,724

Kde index špičkové účinnosti PEI je definován jako maximální hodnota poměru přenášeného zdánlivého výkonu transformátoru po odečtení elektrické ztráty k přenášenému zdánlivému výkonu transformátoru.

Metody výpočtu indexu špičkové účinnosti pro střední a velké výkonové transformátory jsou založeny na poměru přenášeného zdánlivého výkonu transformátoru po odečtení elektrické ztráty k přenášenému zdánlivému výkonu transformátoru.

$$PEI = 1 - \frac{2 * (P_0 + P_{c0})}{S_r \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}} \quad (1.6.1)$$

$P_0$ ... ztráty při chodu naprázdno při jmenovitém napětí, kmitočtu a při nastavené jmenovité odbočce

$P_{c0}$ ... příkon chladicího systému při chodu naprázdno,

$P_k$ ... změřené ztráty pod zatížením při jmenovitém proudu, kmitočtu a při nastavené jmenovité odbočce upravené s ohledem na referenční teplotu,

$S_r$  ... jmenovitý výkon transformátoru, k němuž je  $P_k$  vztažen

## 1.6.2 Ztráty činné

Každý reálný transformátor vykazuje při své činnosti ztráty. Ty jsou vyjádřeny výkonem, nebo také v čase energií, a projevují se oteplením.

### 1.6.2.1 Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno jsou normou ČSN EN 60076 definovány jako činný výkon spotřebovaný v transformátoru při přiložení jmenovitého napětí se jmenovitým kmitočtem ke svorkám jednoho vinutí, když jsou druhé nebo ostatní svorky otevřené. Tyto ztráty se někdy označují jako ztráty v železe  $P_{Fe}$ . Jsou to ztráty v magnetickém obvodu transformátoru, pokrývající energii potřebnou k přemagnetování feromagnetického materiálu (hysterezní ztráty) a k pokrytí ztrát způsobených vířivými proudy v železném obvodě transformátoru. Tyto ztráty se s různým zatížením transformátoru nemění.

$$\Delta P_{Fe} = k_p * f^i * B^2 * m_{Fe} * \Delta p_{Fe} \quad (1.6.2)$$

$k_p$ ... činitel zvětšení ztrát vlivem změn struktury materiálu v blízkosti stříhu

$f^i$ ... frekvence s exponentem  $i$  daným typem ztrát

$B$ ... magnetická indukce

$m_{Fe}$ ... hmotnost uvažované části obvodu

$\Delta p_{Fe}$ ... ztrátové číslo plechů

Hysterezní ztráty jsou úměrné obsahu hysterezní smyčky a jsou lineárně závislé na kmitočtu. Pro snížení těchto ztrát je vhodné použití materiálu s úzkou hysterezní smyčkou, označovaný jako magneticky měkký, protože plocha příslušné hysterezní smyčky odpovídá energii potřebné na přemagnetování jednotkového objemu.

Ztráty vířivými proudy jsou způsobeny nerovnoměrným rozložením proudové hustoty po průřezu vodiče v důsledku skin efektu a jsou úměrné druhé mocnině kmitočtu. Ztráty vířivými proudy můžeme zmenšit zvětšením vlastního měrného elektrického odporu materiálu. Toho dosáhneme například přidáním křemíku do

základního materiálu. Největší rezistivitu má křemíková ocel při obsahu 11 % Si. Tato ocel je však velice křehká a tvrdá a je pro výrobu nepoužitelná. V praxi se používají plechy s obsahem křemíku 3,5 až 4,6%. Vyšší zastoupení křemíku vede k nižším magnetickým ztrátám.

Zvýšení elektrického odporu docílíme také prodloužením dráhy vířivým proudům a současným zmenšením průřezu. Toho se docílí složením jádra transformátoru z tenkých plechů, navzájem izolovaných. Jako izolace se používal nejprve papír, dnes se plechy lakují nebo se používají chemické vrstvy. Tenčí vrstvy jsou výhodnější, neboť požadujeme co největší činitel plnění železa. [8]

Plechý jsou charakterizovány ztrátovým číslem (měrnými ztrátami), které udává energii spotřebovanou na magnetizaci v 1kg materiálu při frekvenci 50Hz a při magnetické indukci 1T popř. 1,5T. Magnetická kvalita a praktická využitelnost křemíkové elektrotechnické oceli závisí nejen na obsahu křemíku, tloušťce plechu, ale také technologii jeho výroby.

První skupinou jsou plechy válcované za tepla, které jsou izotropní z hlediska magnetických vlastností. Tyto plechy jsou nejlevnější na výrobu, ale jsou drsnější na povrchu, takže mají horší činitel plnění. Plechy se válcují na tloušťku 0,35, 0,5 nebo 1 mm a jejich měrné ztráty se pohybují od 1,3 do 3,6 W/kg. Druhou skupinou jsou plechy válcované za studena, orientovaně. Takový materiál má výrazně lepší vlastnosti v jednom směru, a to ve směru válcování. V tomto směru klesnou měrné magnetické ztráty na 0,7 až 0,4W/kg. Tloušťka plechů je obvykle 0,5 nebo 0,35 mm. [9]

Třetí skupinou jsou plechy z amorfní oceli. Jedná se poměrně nový materiál. Technologie amorfních plechů je založena na metodě rychlého ochlazení tekutého kovu, která umožňuje vyrábět pásy o tloušťce několika desítek mikronů, řádově 0,02 mm a ve srovnání s doposud nejlepší ocelí pro elektrotechniku mají tyto pásy jen třetinové ztráty. Rychlým ochlazením, vznikne z tekutého amorfního materiálu materiál pevný. K ochlazení dochází na rotujícím válci, na který je nanášen tekutý kov, z něhož vznikne amorfní struktura s velmi odlišnými vlastnostmi v porovnání s typickými kovovými krystalickými látkami. Amorfní magnetické materiály se vyznačují vysokou

permeabilitou a mají nízkou magnetickou anizotropii. Produkty z těchto materiálů mají mnohem menší ztrátový výkon. Pro distribuční transformátory se používají amorfní slitiny na bázi Fe a vyznačují se vysokými hodnotami indukce nasycení  $B_s$  při současně nízkých ztrátách. Tyto materiály mají extrémně nízké magnetizační ztráty 0,16 W/kg (při frekvenci 50 Hz a  $B_{max} = 1,45$  T). V porovnání s magneticky orientovanými plechy mají tedy amorfní magnetické materiály významně nižší měrné ztráty naprázdno. Vzhledem ke specifickým vlastnostem těchto plechů je potřeba použití speciálního designu. Porovnání ztrát transformátorů s amorfním jádrem a nízkoztrátových transformátorů je ukázán v tabulce 2. [10] [9]

Tabulka 2 – Porovnání ztrát transformátorů s amorfním jádrem od společnosti ABB a nízkoztrátových DT pro napěťovou hladinu 22kV [8]

$S_n$ [kVA]	Amorphous		A0Ck	
	P0 [W]	Pk[W]	P0 [W]	Pk[W]
<b>100</b>	75	1250	145	1750
<b>250</b>	110	2350	300	3250
<b>400</b>	170	3250	430	4600
<b>630</b>	270	4800	560	6750
<b>800</b>	325	6000	650	8400
<b>1000</b>	390	7000	770	10500

Minimálního zkreslení magnetického toku v přechodových oblastech jádra se dosahuje optimalizací stříhu jádrových plechů a vzorem jejich překrývání. Plechy jádra jsou nejprve řezány pod úhlem  $45^\circ$ , což umožňuje maximální průtok magnetického toku ve směru válcování, taková cesta toku je preferovaná z důvodu nejnižších ztrát. Poté jsou plechy skládány ve vzájemném přesahu a to buď po jednom, anebo po skupinách. Vzájemné skládání plechů se vzájemným přesahem přináší další výhody v podobě nižších ztrát naprázdno a nižší hladiny akustického tlaku. [8]

Dalším parametrem při výrobě transformátoru je také tvar jádra. Aby byl magnetický tok v dutině cívky maximální, měl by být tvar cívky obdobného tvaru jako jádro. U velkých transformátorů je však čtvercový nebo obdélníkový tvar nevhodný, z důvodu velkých silových účinků, které vznikají např. při zkratu. Z tohoto důvodu je vhodný kruhový tvar cívky a tedy i kruhový průřez jádra. Toho lze docílit

odstupňováním, kdy se obvod skládá z různě širokých plechů. [8] To přináší vysokou flexibilitu pro návrh jádra a umožňuje vybrat ideální individuální sekce jádra, a to i při zachování standardních materiálů a rozměrů.

Plechové tvořící magnetický obvod musí být staženy dostatečně velkou silou, aby mimo jiné nedocházelo při provozu k příliš velkému nepříjemnému hluku. Dříve se plechový svazek stahoval ocelovými svorníky a stahovacími deskami. Použití upínacích šroubů cívek narušují magnetický tok a stahovací tyče zase vyžadují větší nádobu transformátoru. V současnosti se používá bandáž ze skelných tkanic napuštěných vhodnou pryskyřicí a navíc se v některých případech plechy k sobě ještě lepí. [4]

### 1.6.2.2 Ztráty nakrátko

Jsou způsobeny činným odporem  $R$  vodiče tvořícího vinutí primární a sekundární cívky, proto jsou tyto ztráty někdy nazývány jako ztráty v mědi. Při průchodu proudu vodičem dochází k přeměně části energie na Joulovo teplo. Ztráty nakrátko jsou závislé na velikosti protékajícího proudu.

$$P_k = 3 * R * I^2 \quad (1.6.3)$$

Kde  $R$  je součet velikosti činného odporu primární cívky ( $R_p$ ) a sekundární cívky ( $R_s$ ), přepočítané na stejnou hladinu napětí (obrázek 5).

Štítková hodnota ztrát naprázdno je vztažena k jmenovitému výkonu (střední odbočka transformátoru) při teplotě 75°C.

### 1.6.3 Ztráty transformátoru při zatížení

Ztráty činného výkonu transformátoru při určitém zatížení

$$\Delta P = \Delta P_0 + \beta^2 * \Delta P_k \quad (1.6.4)$$

$$\beta = \frac{S}{S_n} \quad (1.6.5)$$

$\Delta P$ ... ztráty činného výkonu v transformátoru při určitém zatížení

$\beta$ ... zatěžovatel

$S$  ... zatížení transformátoru

$S_n$ ... jmenovitý výkon transformátoru

$\Delta P_0$ ... ztráty činného výkonu naprázdno

$\Delta P_k$ ... ztráty činného výkonu nakrátko

Kromě činných ztrát uvažujeme také ztráty jalové. Jalovými ztrátami nazýváme ztráty vyvolané průchodem jalové složky proudu transformátorem.

Ztráty jalového výkonu v transformátoru při určitém zatížení:

$$\Delta Q = \Delta Q_0 + \beta^2 * \Delta Q_k \quad (1.6.6)$$

$\Delta Q$ ... ztráty jalového výkonu v transformátoru při určitém zatížení

$\beta$ ... zatěžovatel

$\Delta Q_0$ ... ztráty jalového výkonu naprázdno

$\Delta Q_k$ ... ztráty jalového výkonu nakrátko

Ztráty jalového výkonu naprázdno:

$$\Delta Q_0 = \frac{i_0}{100} * S_n \quad (1.6.7)$$

$\Delta Q_0$ ... ztráty jalového výkonu naprázdno

$S_n$ ... jmenovitý výkon transformátoru

$i_0$ ... procentní proud naprázdno

Ztráty jalového výkonu nakrátko:

$$\Delta Q_k = \frac{u_k}{100} * S_n \quad (1.6.8)$$

$\Delta Q_k$ ... ztráty jalového výkonu nakrátko

$S_n$ ... jmenovitý výkon transformátoru

$u_k$ ... procentní napětí nakrátko

Celkové ztráty činného výkonu vyvolané zatížením transformátoru v síti:

$$\Delta P_T = \Delta P_0 + \beta^2 * \Delta P_k + k * (\Delta Q_0 + \beta^2 * \Delta Q_k) \quad (1.6.9)$$

$\Delta P_T$ ... celkové ztráty činného výkonu vyvolané zatížením transformátorem v síti

$\Delta Q_0$  ... ztráty jalového výkonu naprázdno

$\Delta Q_k$ ... ztráty jalového výkonu nakrátko

$\Delta P_0$ ... ztráty činného výkonu naprázdno

$\Delta P_k$ ... ztráty činného výkonu nakrátko

$B$ ... zatěžovatel

$k$ ... měrný činitel ztrát, který vyjadřuje ztráty činného výkonu vyvolané 1 kVAr zatížení;

$$k = \frac{P}{Q}, \text{ kde } P \text{ je přenášený výkon činný a } Q \text{ je přenášený výkon jalový}$$

Tabulka 3 - Hodnoty měrného činitele ztrát [5]

Místo instalace transformátoru	k [kW/kVAr]	
	Maximální zatížení sítě	Minimální zatížení sítě
Připojený k přípojnicím v elektrárně	0,02	0,02
V městských nebo průmyslových rozvodnách připojený na vn 6, 10 kV	0,07	0,04
V oblastních sítích 22 až 110 kV	0,15	0,1
Jako v bodě 2 připojené přes oblastní síť vn	0,15	0,1
Jako v bodě 4 s jalovou spotřebou krytou kompenzací	0,05	0,03

#### 1.6.4 Vyčíslení ztrát na transformátorech VVN/VN v síti E.ON Distribuce, a.s.

Na základě dlouhodobého měření, bylo možné provést analýzu celkových ztrát transformátorů VVN/VN. Potřebné naměřené hodnoty činného a jalového výkonu jsou zaznamenávány pro dvě oblasti v síti E.ON Distribuce, a.s., východ a západ. Aby mohly být ztráty vypočítány, bylo nutné nejprve sjednotit vstupní data, neboť v každé oblasti je výsledná tabulka s naměřenými hodnotami zcela odlišná.

Vstupní data činného a jalového výkonu jsou měřené hodinové vzorky, tj. efektivní hodnoty z údajů naměřených v dané hodině. Pro jeden transformátor je tedy



zaznamenáno 8760 údajů, v přestupném roce pak 8784 údajů. Kvůli soudobosti dat je údaj zaznamenán v každou celou hodinu. Pro výpočet ztrát byly použity údaje za rok 2010, 2012 a 2014. Za rok 2010 však nebyly v databázi údaje za obě oblasti a je tedy použita jen dostupná část.

Zkoumaná síť obsahuje celkem 165 transformátorů o jmenovitých výkonech 16, 20, 25, 28, 40 a 43 MVA. Ke každému transformátoru bylo potřeba přiřadit z databáze ztráty naprázdno a nakrátko, napětí nakrátko a rok výroby. Kvůli velmi malým hodnotám proudu naprázdno je jeho měření velmi obtížné a příslušná databáze, tyto hodnoty neobsahovala. Výrobci uvádí hodnotu proudu naprázdno v rozmezí 0,05-0,08%. V souladu s tím byl proudu naprázdno pro tuto analýzu stanoven na hodnotu 0,07% jmenovitého proudu.

Z naměřených hodnot činného výkonu  $P$  a jalového výkonu  $Q$ , byl pro každý transformátor spočítán zdánlivý výkon  $S$  pro každou hodinu, dle vzorce:

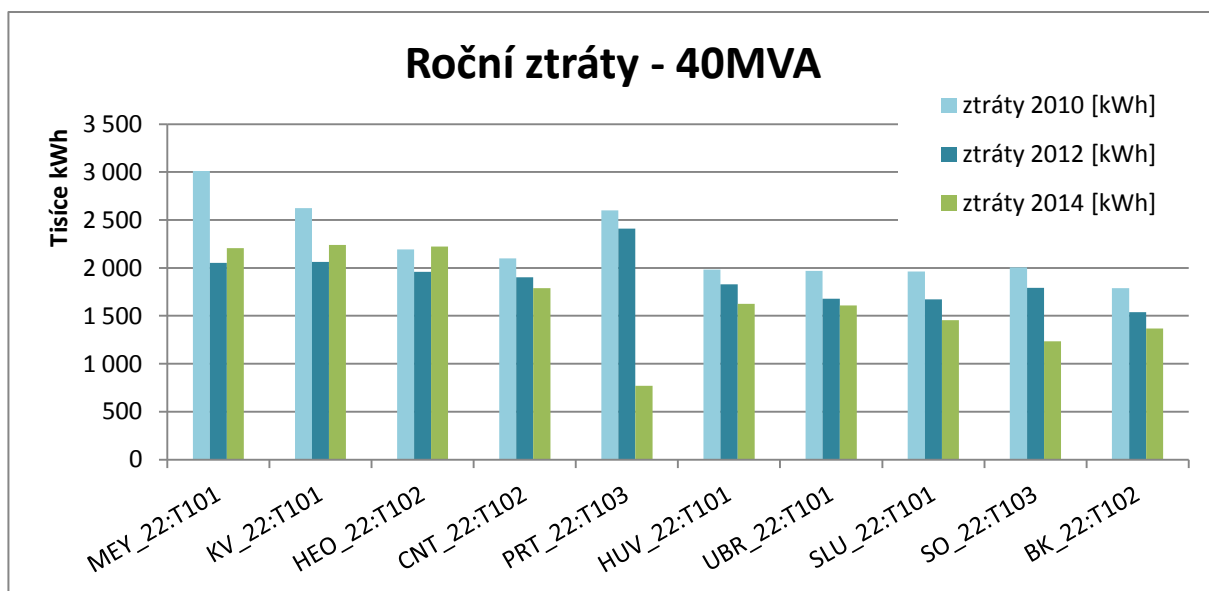
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.6.10)$$

Z takto vypočtených hodnot zdánlivého výkonu  $S$  byl rovněž pro každý transformátor spočítán zatěžovatel  $\beta$  v každé hodině. Ztráty na transformátorech při zatížení byly určeny dle vztahů uvedených v předchozí kapitole.

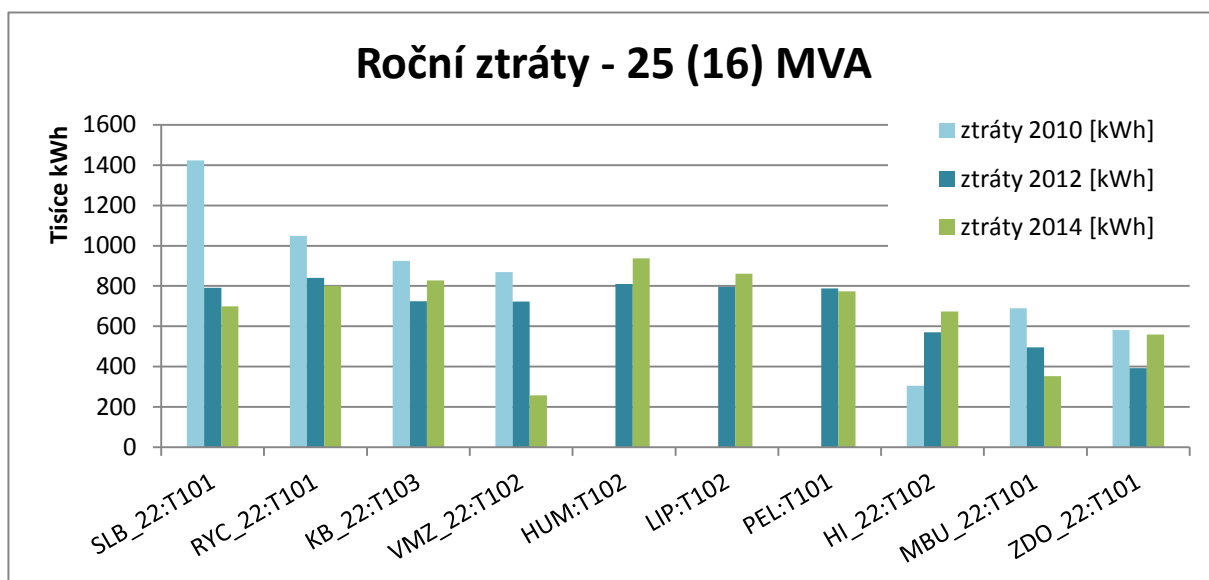
V případě, že byl zároveň činný i jalový výkon v dané hodině roven nule, bylo pro výpočet celkových ztrát předpokládáno, že transformátor nebyl v provozu a tedy i celkové ztráty v danou hodinu byly nulové.

Jak již bylo řečeno, v síti společnosti E.ON Distribuce, a.s. jsou nejčastěji instalovány transformátory 110/23 kV s výkony 25 a 40 MVA. V některých transformovných se však můžeme setkat také s transformátory 110/23kV s výkony 16, 20, 28 a 43 MVA. Vzhledem k malému počtu těchto transformátorů byly tyto transformátory v rámci analýzy přiřazeny do skupiny k transformátorům 25 MVA nebo 40 MVA.

Kvůli celkovému počtu zkoumaných transformátorů, je vybráno deset transformátorů 40MVA (Graf 1), které měli za uvažované tři roky největší celkové ztráty, a 10 transformátorů 25 MVA (Graf 2). Zbývající transformátory jsou znázorněny v grafech uvedených v příloze.



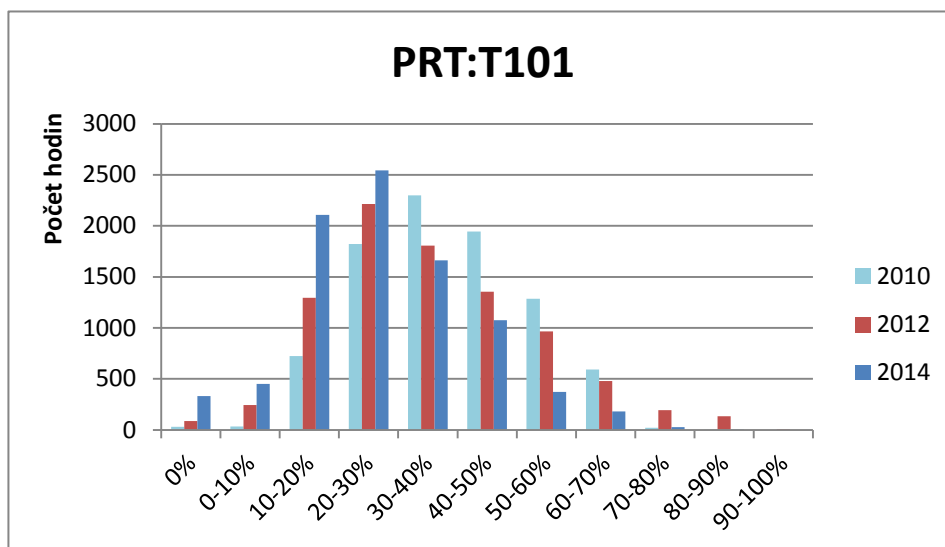
Graf 1: Celkové roční ztráty transformátorů VVN/VN



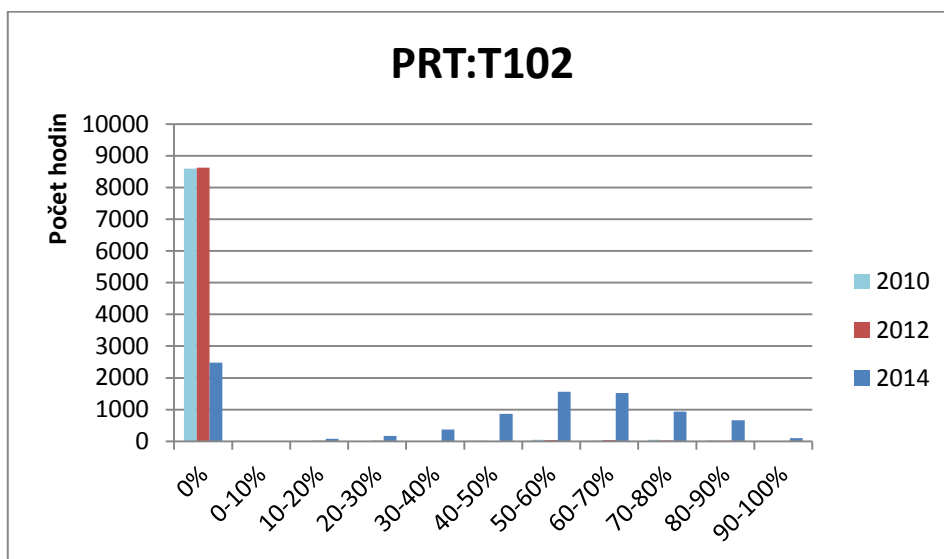
Graf 2: Celkové roční ztráty transformátorů VVN/VN

Velikost celkových ztrát závisí na několika faktorech. Prvním faktorem je doba, po kterou je transformátor v provozu. Druhým z nich je zatížení transformátoru, se kterým souvisí i počet transformátorů v trafostanici.

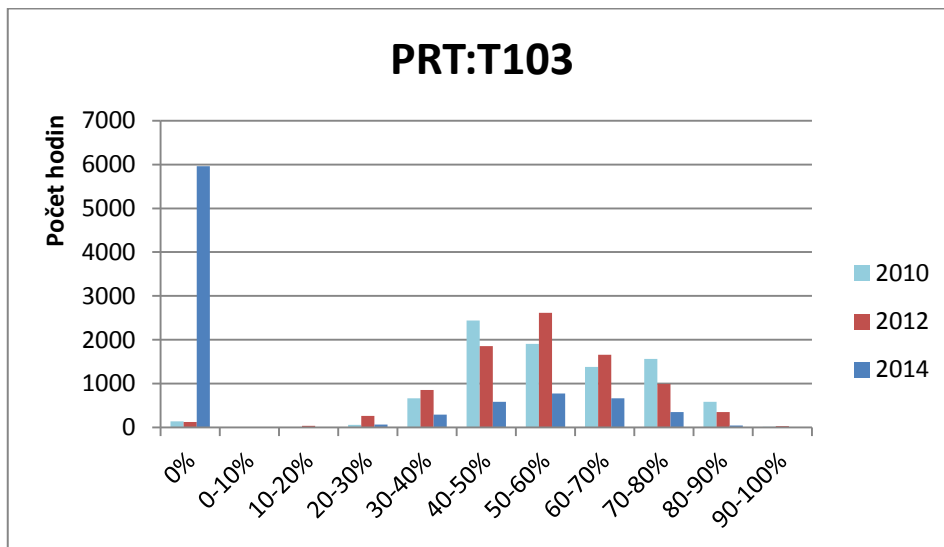
U všech transformátorů je znatelný pokles ztrát v roce 2012 resp. 2014 oproti roku 2010. Podíváme-li se na příklad na rozvodnu Prostějov konkrétně na transformátor PRT T103, můžeme si všimnout, že v roce 2014 má výrazně nižší ztráty než v letech předešlých. Tato skutečnost je dána faktem, že v trafostanici jsou tři transformátory, avšak v roce 2010 a 2012 nebyl TR PRT T102 téměř vůbec v provozu. V roce se 2014 došlo k připojení i tohoto transformátoru, čímž došlo ke snížení a zrovnoměrnění přenášené energie mezi transformátory PRT T102 a PRT T103 jak je vidět v následujících grafech. Pro znázornění doby, kdy transformátor nebyl v provozu, obsahují grafy sloupec s nulovým zatížením.



Graf 3 - rozložení zatížení transformátoru PRT T101

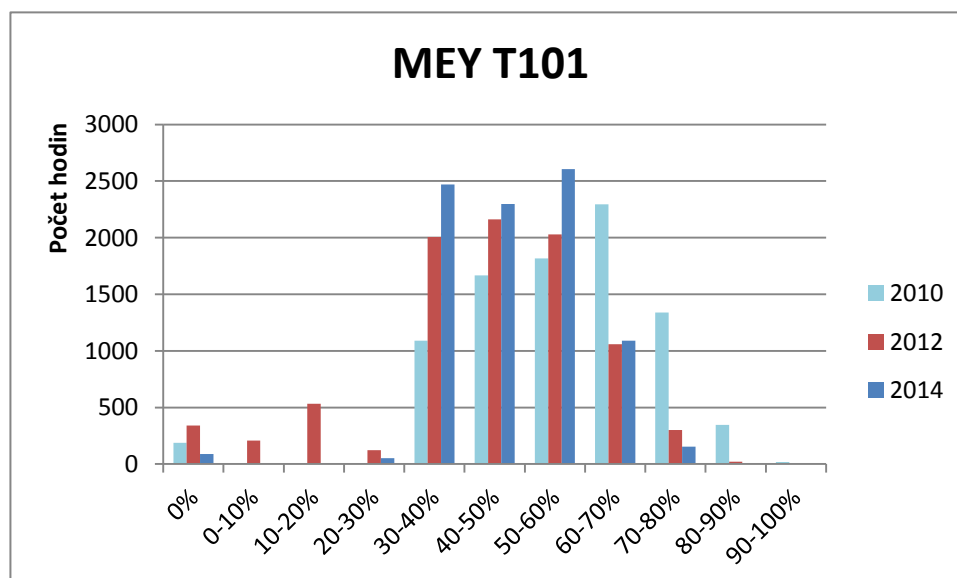


Graf 4 - Rozložení zatížení transformátoru PRT T102

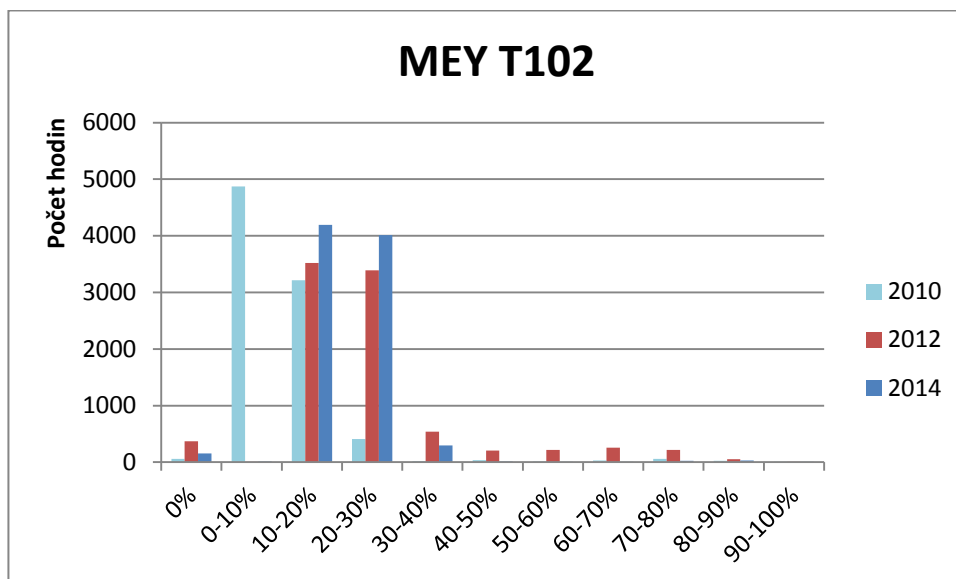


Graf 5 - Rozložení zatížení transformátoru PRT T103

U zbylých transformátorů je důvod buď stejný jako u transformátoru PRT T103, nebo je v dané oblasti celkový pokles přenášeného výkonu. První případ dokládá graf zatížení transformátorů MEY T101 a T102 v rozvodně Medlánky. V trafostanici jsou instalovány dva transformátory a přenášený výkon je přepojen v případě potřeby na druhý z nich, jak je vidět v grafu 6 a 7. Podíváme-li se na rozložení zatížení transformátoru MEY T102, vidíme výrazné zvýšení počtu hodin při zatížení mezi 20 až 30% v roce 2012 a 2014. Naopak u transformátoru MEY T101 je v roce 2012 a 2014 nižší počet hodin pro zatížení 60 až 70%.

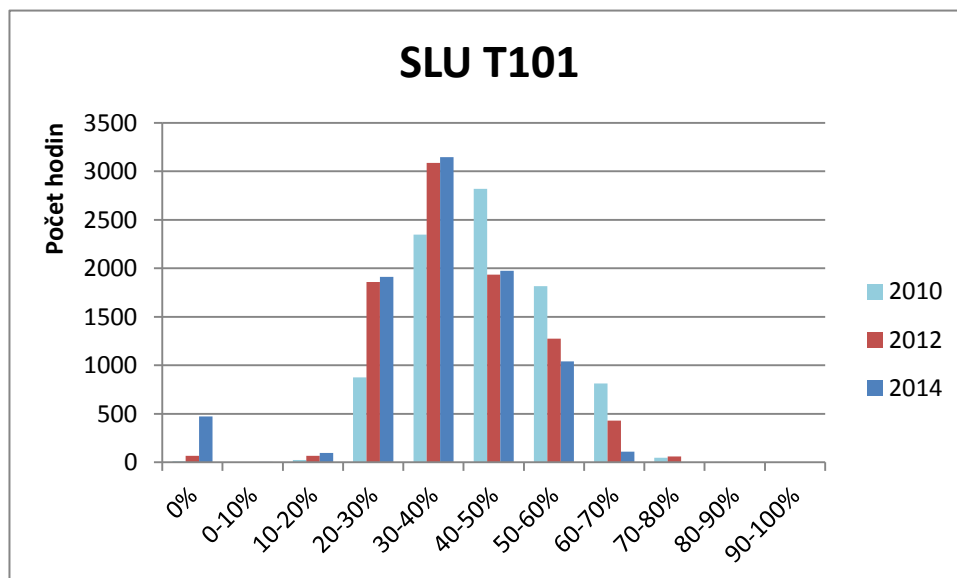


Graf 6 - Rozložení zatížení transformátoru MEY T101



Graf 7 - Rozložení zatížení transformátoru MEY T102

Graf 8 ukazuje rozložení zatížení v rozvodně Slušovice na transformátoru SLU T101. Ačkoliv jsou v trafostanici dva transformátory, transformátor SLU T102 běží s téměř nulovým zatížením a je zde tedy patrné celkové snížení zatížení, a tedy i přenášeného výkonu.



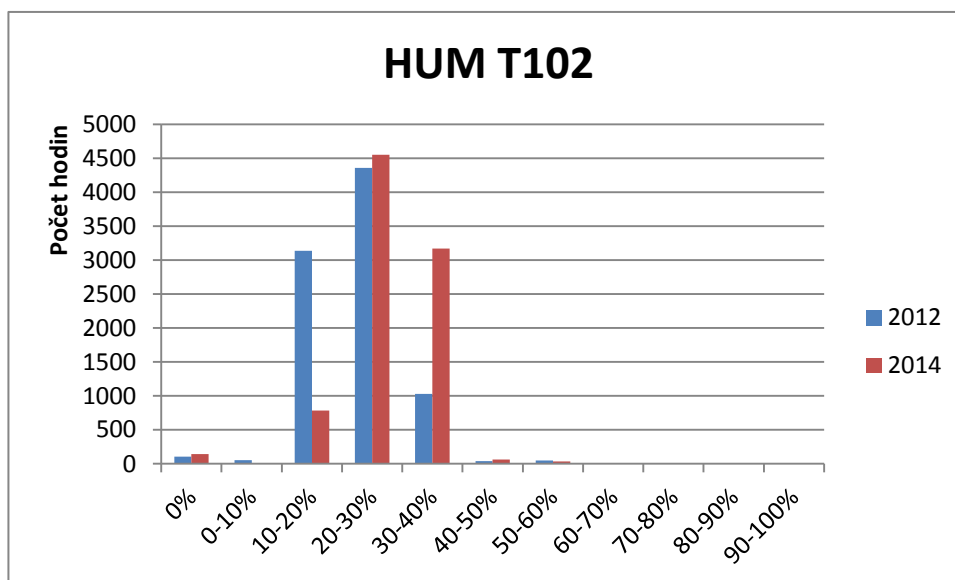
Graf 8 - Rozložení zatížení transformátoru SLU T101

V grafu 2 je vidět, že i přes chybějící údaje z roku 2010, se transformátory HUM 102, PEL 101, a LIP 102 dostaly mezi nejztrátovější. V porovnání s transformátorem HUM 102, který má průměrné roční zatížení okolo 25%, lze TR PEL 101, a LIP 102 zařadit

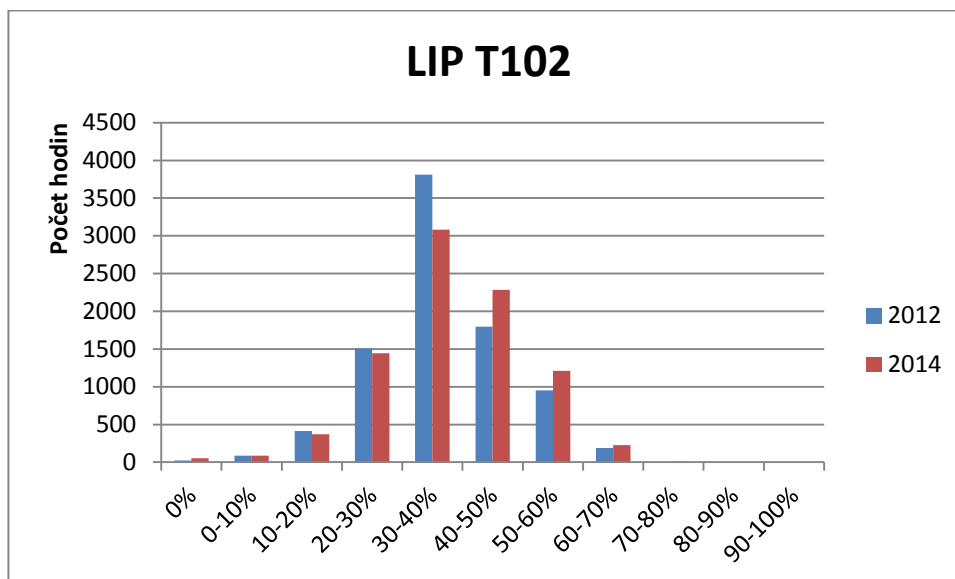
mezi transformátory s vyšším zatížením, jak je vidět v grafu 9 a 10. Vysoké ztráty transformátoru HUM 102 jsou způsobeny vysokými ztrátami nakrátko i naprázdno. Jedná se o starý transformátor z roku 1961, který má v porovnání s nově vyráběnými transformátory přibližně dvakrát větší ztráty nakrátko a skoro pětinasobně větší ztráty naprázdno, (tabulka 4).

Tabulka 4 – Porovnání ztrát transformátorů HUM T102 a LIP 102 (25 MVA)

Transformátor	Rok výroby	P0 [kW]	Pk [kW]
HUM 102	1961	57	194
LIP 102	2010	12	87



Graf 9 - Rozložení zatížení transformátoru HUM T102

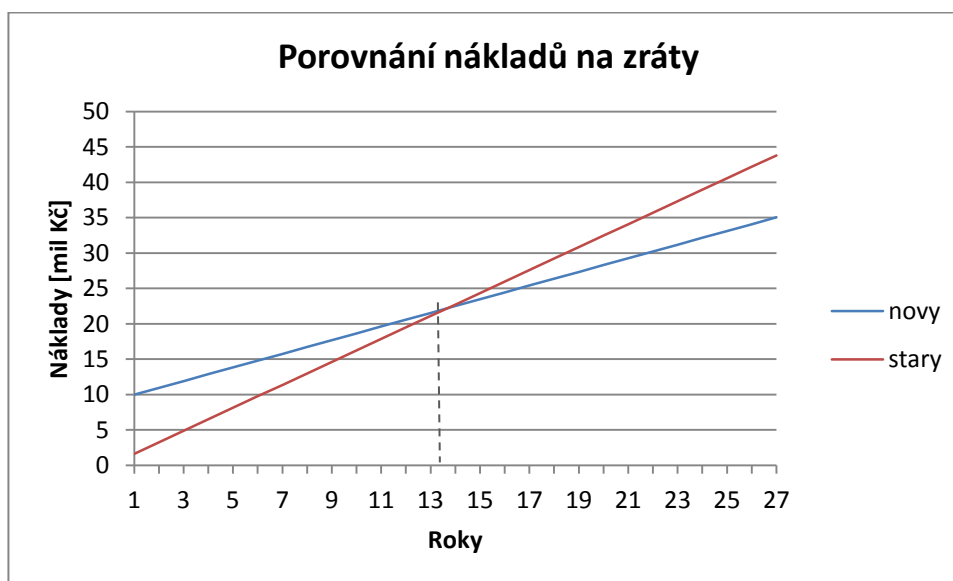


Graf 10 - Rozložení zatížení transformátoru T102

V závislosti na výsledcích výpočtu celkových ročních ztrát těchto dvou transformátorů bylo vytvořeno porovnání nákladů na ztráty transformátoru HUM T102 a nákladů na ztráty a investičních nákladů nově vyráběného transformátoru 25 MVA, Graf 11. Parametry transformátorů použité pro tento výpočet jsou uvedeny v tabulce 4 a 5.

Náklady na ztráty za jeden rok jsou spočítány podle vzorce 2.2.2. pro zatížení 13MVA, tj cca 50% jmenovitého výkonu, kdy cena za 1 MWh se v průběhu let nemění a činí 2000Kč. Graf obsahuje kumulované hodnoty nákladů na ztráty v časové řadě, kdy pro nový transformátor byly pro první rok připočteny investiční náklady.

Z grafu je vidět, instalace nového transformátoru by se začala vyplácet po 13 letech provozu, kdy že se náklady na ztráty starého transformátoru vyrovnají investičním nákladům včetně nákladů na ztráty nového transformátoru. Kdybychom vzali v úvahu i náklady na údržbu staršího transformátoru, mohla by být doba vyrovnání provozních nákladů ještě kratší. Je tedy vhodné zvážit, zda by nebylo výhodnější, provádět výměnu po uplynutí minimální doby životnosti, tj. 30 let.

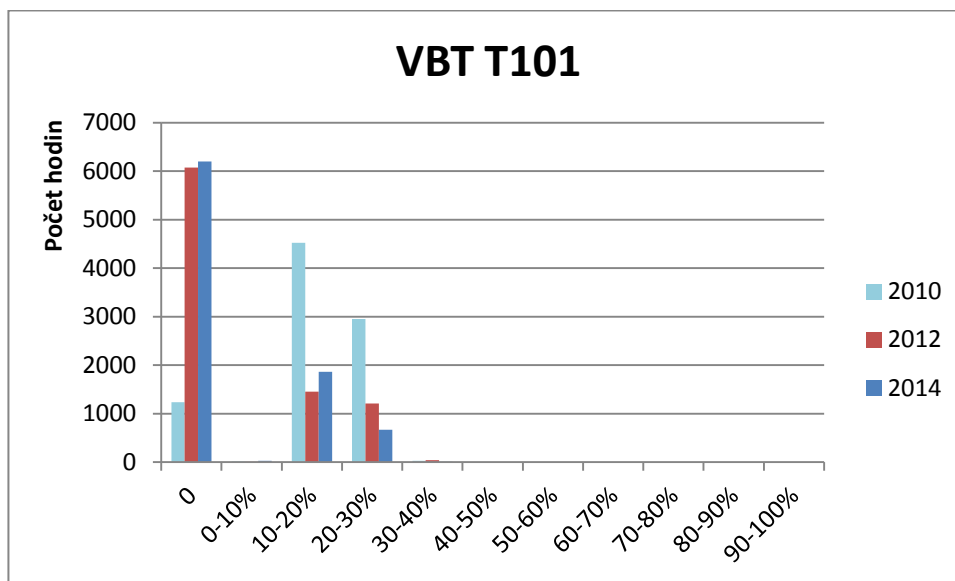


Graf 11 - Porovnání nákladů na ztráty transformátoru HUM T102 a nákladů na ztráty a investičních nákladů nově vyráběného transformátoru za třicet let

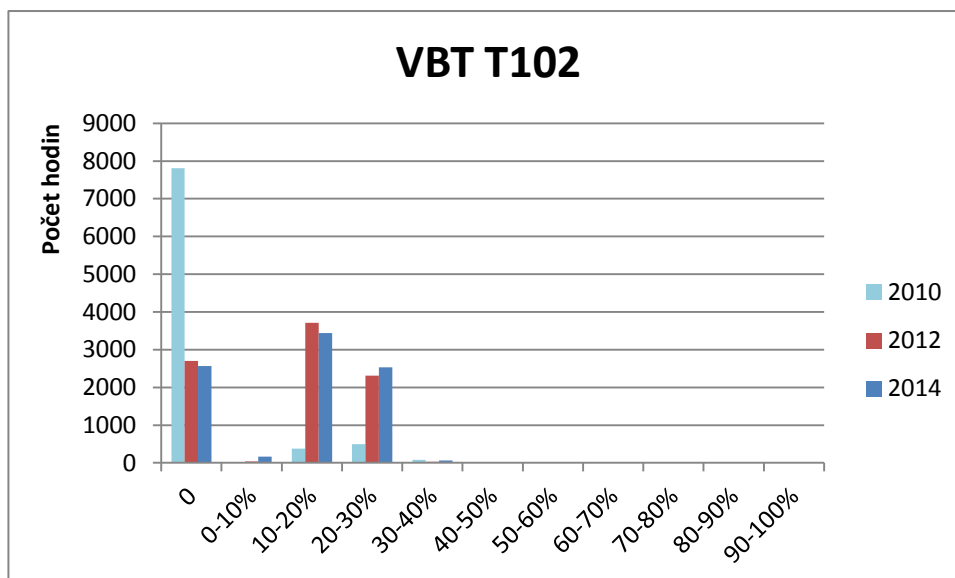
Vzhledem k tomu, že velikost ztrát je závislá na velikosti zatížení, můžeme z vypočtených ztrát vytipovat oblasti, kde je zatížení transformátorů velké nebo naopak místa, kde jsou transformátory s malým zatížením. Při obnově pak můžeme posoudit, zda v těchto oblastech zvolit jiný výkon transformátoru či rozšířit transformovnu o nový transformátor.

Takovým příkladem může být například rozvodna Velká Bíteš, kde jsou instalovány nové transformátory 40 MVA. Tyto transformátory mají velmi malé zatížení a vždy běží pouze jeden z transformátorů. Při zatížení transformátorů pod 30%, je však z hlediska ztrát vhodné přejít na nižší výkonový stupeň. Je však nutné dodat, že vzhledem k životnosti transformátorů je při instalaci nových transformátorů vždy nutné vzít v potaz plánovaný rozvoj oblasti.





Graf 12 - Rozložení zatížení transformátoru VBT T101

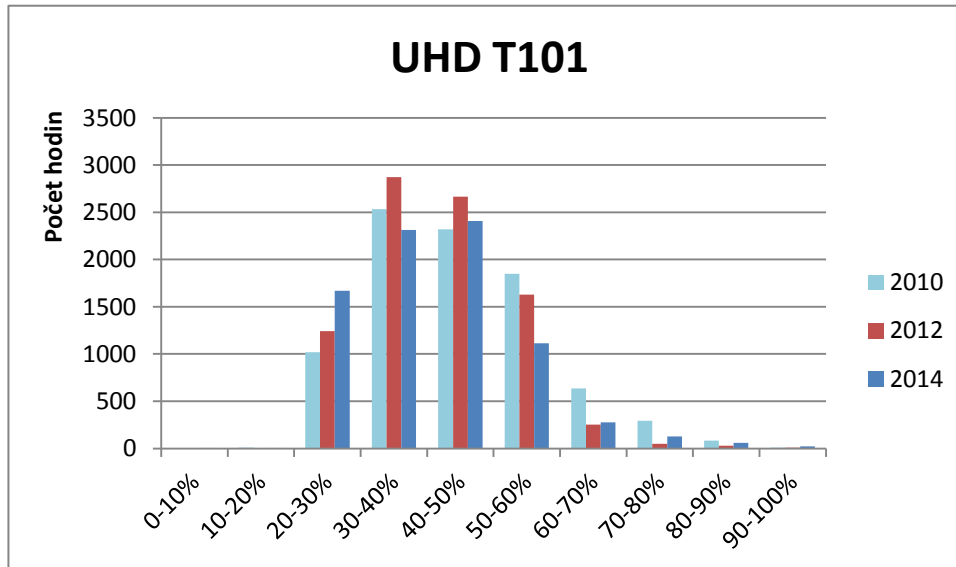


Graf 13 - Rozložení zatížení transformátoru VBT T102

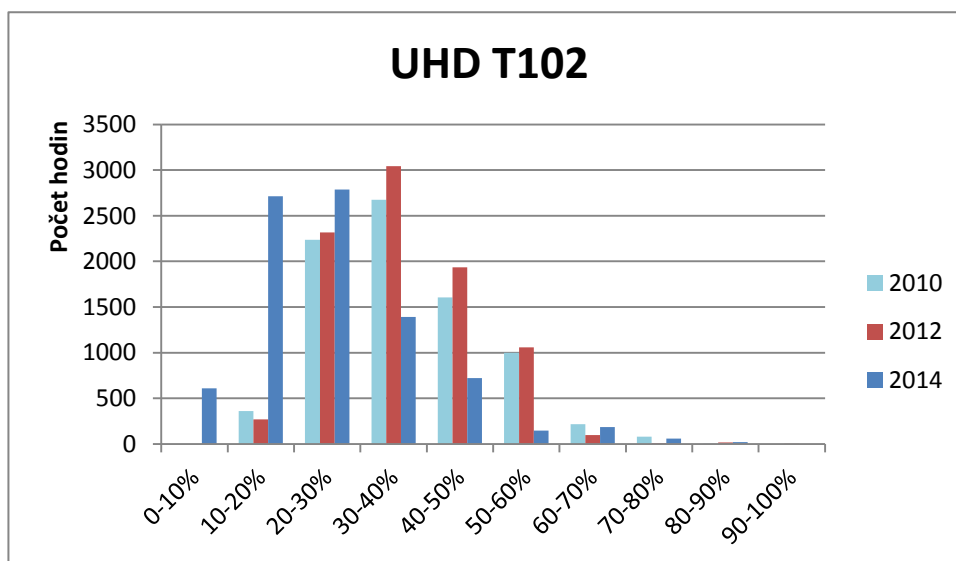
Při výpočtu ztrát se a ze statistiky zatížení jednotlivých transformátorů, se ukázalo, že některé transformátory běží naprázdno nebo jsou zcela odpojeny od sítě. Tyto transformátory slouží zpravidla jako rezervní pro případ odstávky, poruchy případně velkého zatížení.

Opačným příkladem může být rozvodna Uherské Hradiště, kde jsou instalovány opět dva nové transformátory s výkony 40MVA. Z grafů je patrné, že transformátory mnohem více zatěžovány, než TR VBT T101 a T102. V této oblasti je naopak vhodné

uvážit, zda transformovnu nerozšířit o další transformátor, který by převzal část výkonu, čímž by se snížilo zatížení transformátorů a zároveň by se zvýšila rezerva pro případný rozvoj oblasti či výpadku jednoho z transformátorů.



Graf 14 - Rozložení zatížení transformátoru UHD T101



Graf 15 - Rozložení zatížení transformátoru UHD T102

## 2 Kritéria volby výkonu transformátoru

Volba výkonu transformátoru je ovlivněna řadou faktorů, jako jsou zatížení uzlové oblasti a jejího trendu rozvoje. Nejdůležitějším faktorem je však spolehlivost dodávky elektrické energie, ta souvisí jednak se stářím instalovaných transformátorů stejně jako

se zatížením či výskytem zkratů v dané oblasti. Volba výkonu závisí také na jeho hospodárném zatěžování.

## 2.1 Kritéria technická

Impuls pro rozvoj oblasti obvykle přichází ze strany zákazníka, kdy zákazník podá žádost o navýšení výkonu. V případě dostatečné rezervy je zákazník připojen do stávající sítě. V opačném případě je nutné zvážit instalaci nového transformátoru, neboť transformátory nejsou odolné vůči trvalému přetížení. Minimální rezerva výkonu pokrývá předpokládaný celkový nárůst transformace a pohybuje se v rozmezí 10-15% pro jeden transformátor. Celková rezerva výkonu souvisí nejen se zatížením uzlové oblasti, ale také počtem transformátorů v trafostanici. Zatížení transformátorů a tedy i rezerva v transformačním výkonu je každoročně aktualizována na základě měření, které probíhá v zimních měsících, kdy je spotřeba elektrické energie nejvyšší.

Volba výkonu transformátoru může být ovlivněna také množstvím výskytu zkratů v dané oblasti. Velikost zkratového proudu  $I_k$  je dána velikostí jmenovitého proudu  $I_n$  a napětí nakrátko  $u_k$  dle vzorce:

$$I_k = \frac{I_n}{u_k} \quad (2.1.1)$$

Čím větší bude výkon transformátoru, tím větší bude i jeho jmenovitý proud, a tím větší bude i proud zkratový. Tento požadavek je však v rozporu s požadavkem na tvrdost zdroje. V případě potřeby tvrdšího zdroje, a tedy vyloučení nežádoucích poklesů napětí v síti při rostoucím zatížení, budeme volit naopak transformátor s vyšším výkonem.

## 2.2 Metoda diskontovaných nákladů

Metoda diskontovaných nákladů porovnává souhrn všech nákladů souvisejících s realizací jednotlivých variant projektu. Porovnávány jsou investiční náklady a diskontované provozní náklady za určitou dobu životnosti projektu. Aby se náklady za jednotlivé roky mohli sčítat, je nutné je přizpůsobit. Tuto skutečnost zajišťuje

diskontování, které zohledňuje vliv času pro náklady vyskytující se v různých letech životnosti investice. Nejvýhodnější je varianta s nejnižšími diskontovanými náklady. [15]

$$D = I + \sum_{i=1}^n V_i$$

D ... diskontované náklady investičního projektu

I ... investiční náklady

$V_i$  ... diskontované roční provozní náklady v i-tém roce

i ... jednotlivé roky životnosti

n ... doba životnosti investice

Náklady  $N_i$  vypočteme podle vztahu:

$$N_i = (\Delta P_0 + k * \Delta Q_0) * T_p * n_{\Delta} + (\Delta P_k + \Delta Q_k) * \beta^2 * T_z * n_{\Delta} \quad (2.2.2)$$

$T_p$  ... doba provozu

$n_{\Delta}$  ... měrné náklady na 1kWh

$T_z$  ... doba plných ztrát

Náklady v i-tém roce diskontujeme podle vztahu:

$$V_i = N_i * \frac{1}{(1 + d)^n} \quad (2.2.3)$$

Metoda diskontovaných nákladů neumožňuje přímo porovnávat projekty s různou dobou životnosti. Menší úpravou, kterou je převod na stejnou délku životnosti, lze dosáhnout srovnatelnosti projektů i pomocí této metody [15].

Graf 16 znázorňuje diskontované náklady nově vyráběných transformátorů s výkony 16, 25 a 40MVA v závislosti na jejich zatížení. Pro výpočet byla uvažována životnost transformátoru 30 let, což je minimální životnosti uvažované v provozu. Reálně se však transformátory provozují 40 i více.

Požizovací cena transformátoru se odvíjí od současné ceny mědi, pro výpočet diskontovaných nákladů byla uvažována průměrná hodnota a tedy ceny 7 miliónů Kč za

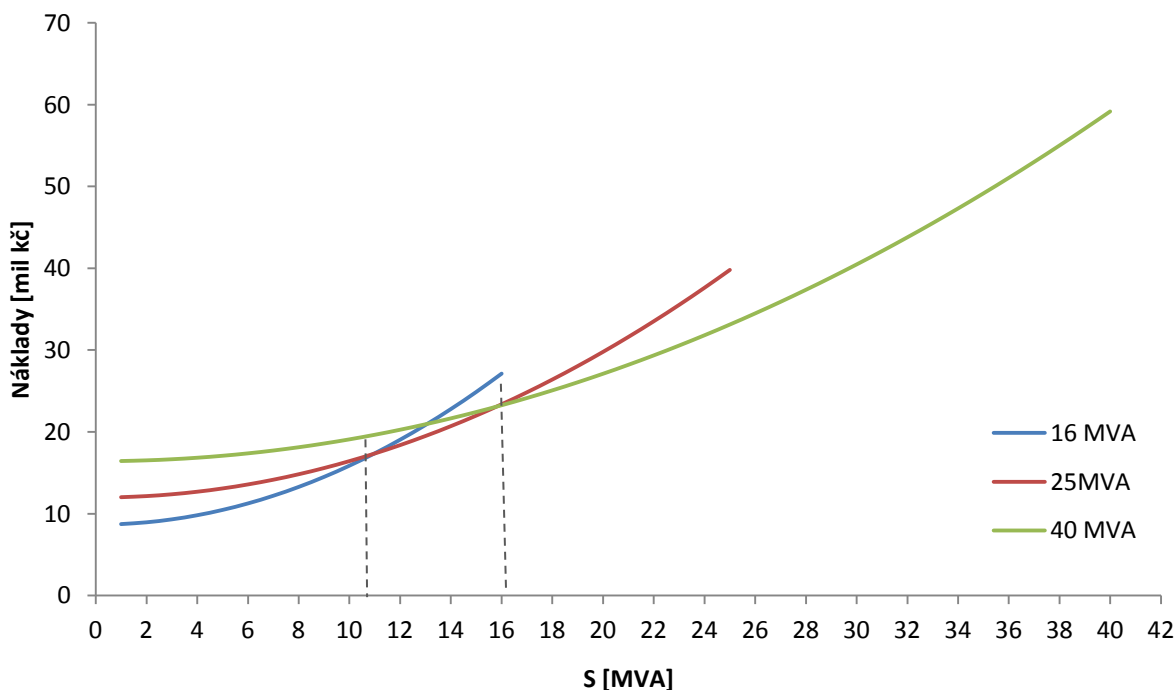
transformátor 16MVA, 9 miliónů Kč za TR 25MVA a 12 miliónů za TR 40MVA. Měrné náklady na 1MWh  $n_{\Delta}$  činí 2000Kč.

Ve výpočtu bylo také uvažováno, že doba provozu  $T_p$  je rovna celému roku, tj. 8760 hodin. A doba plných ztrát  $T_z$  byla stanovena jako 2451hod. V tabulce 5 jsou uvedeny parametry transformátorů použitých pro výpočet.

Tabulka 5 – Parametry transformátorů

Jmenovitý výkon TR [MVA]	16	25	40
Cena transformátoru [mil. Kč]	7	9	12
Pk [kW]	70	90	110
P0 [kW]	7	13	19
uk [%]	11,5	11,5	11,5
i0 [%]	0,07	0,07	0,07

### Optimální zatížení TR 110/22 kV



Graf 16 - Optimální zatížení transformátorů 110/23kV se jmenovitými výkony 16, 25 a 40MVA

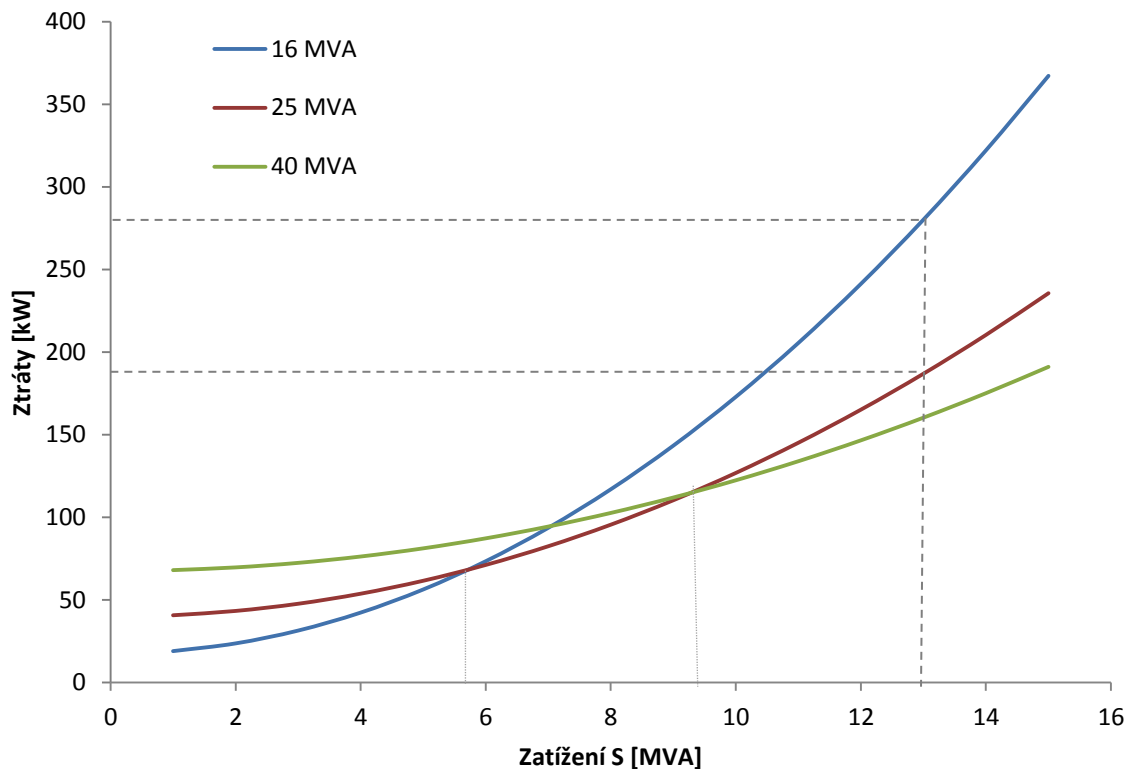
V souladu se vstupními hodnotami pro výpočet diskontovaných nákladů, vychází přechod z výkonu transformátoru 16 MVA na 25 MVA při zatížení mezi 10 a 11 MVA a pro přechod mezi 25 MVA a 40 MVA transformátorem při zatížení přibližně 16 MVA, což odpovídá zatížení transformátoru s nižším výkonem okolo 65%. Transformátor s větším výkonem bude mít při tomto přenášeném výkonu zatížení přibližně 40%.

### **2.3 Hospodárné zatížení transformátorů**

Při malém zatížení se transformátor nachází téměř ve stavu naprázdno a převládají tedy ztráty naprázdno. Se zvyšujícím se zatížením rostou ztráty nakrátko, které se zvyšují s druhou mocninou zatěžovatele. Při velkém zatížení transformátoru s menším jmenovitým výkonem, dosahují celkové ztráty vyšších hodnot než u transformátoru s větším jmenovitým výkonem při stejném zatížení. Tuto skutečnost ukazuje graf 17, ve kterém je znázorněn průběh velikosti ztrát v závislosti na zatížení pro transformátory jmenovitých výkonů 16, 25 a 40 MVA.

Aby bylo možné jednotlivé průběhy porovnat, byly pro výpočet použity hodnoty ztrát nakrátko a naprázdno a napětí nakrátko transformátorů od stejného výrobce se stejným rokem výroby.

## Závislost ztrát traf na zatížení



Graf 17 - Závislost velikosti ztrát transformátorů na jejich zatížení pro jmenovité výkony 16, 25 a 40 MVA.

V grafu je vyznačen rozdíl velikosti ztrát při zatížení transformátorů 16 MVA a 25 MVA, které odpovídá přechodu zjištěného metodou diskontovaných nákladů. Kdybychom posuzovali změnu velikosti transformátoru pouze z hlediska velikosti celkových ztrát, můžeme z grafu určit, že by k přechodu na vyšší výkon mělo dojít při zatížení 5,7 MVA pro TR 16 MVA a při 9,3 MVA pro TR 25 MVA, což odpovídá zatížení přibližně 35%. Otázku optimálního zatížení transformátoru nám může pomoci zodpovědět hospodárné zatížení transformátoru.

Hospodárným zatížením transformátoru rozumíme stav, kdy jsou v transformátoru nejmenší měrné ztráty, tj. nejmenší poměr celkových činných ztrát transformátoru k přenášenému zdánlivému výkonu [13].

Na hospodárné zatížení transformátorů se uplatňují dva různé pohledy. Jednou možností je posouzení transformátoru z hlediska minimálních ztrát výkonu. Tento

pohled lze uplatnit především u repasovaných transformátorů. [14] Optimální zatížení lze určit ze vztahu:

$$S_h = S_n * \sqrt{\frac{\Delta P_0 + k * \Delta Q_0}{\Delta P_k + k * \Delta Q_k}}$$

$S_h$  ... hospodárné zatížení,

$S_n$  ... jmenovitý výkon,

$\Delta P_0$  ... ztráty činného výkonu naprázdno,

$\Delta Q_0$  ... ztráty jalového výkonu naprázdno,

$k$  ... měrný činitel ztrát,

$\Delta P_k$  ... ztráty činného výkonu nakrátko,

$\Delta Q_k$  ... ztráty jalového výkonu nakrátko.

Dalším možným přístupem je optimalizace z hlediska nákladů, což se uplatní především u nových transformátorů. [14] Příslušný vztah je:

$$S_h = S_n * \sqrt{\frac{N_{iT} + (P_0 + k * Q_0) * n_0}{(P_k + k * Q_k) * n_k}} \quad (2.3.2)$$

$N_{iT}$  ... roční náklady odvozené z investičních nákladů,

$n_0$  ... celkové měrné náklady na ztráty naprázdno

$n_k$  ... celkové měrné náklady na ztráty nakrátko

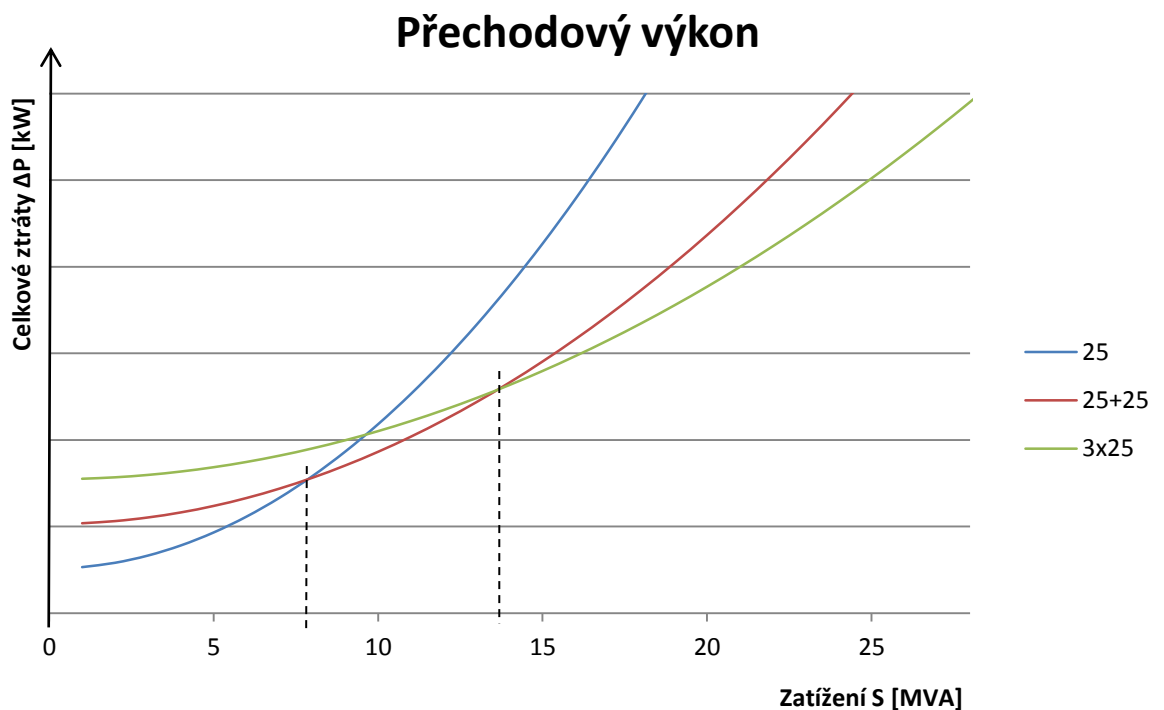
Ocenění ztrát se odvíjí od doby jejich využití a ceny energie apod. Podle toho se také hospodárné zatížení pohybuje v rozpětí mezi 50 a 60% jmenovitého výkonu.

## 2.4 Paralelní chod transformátorů

Paralelní chod transformátorů můžeme rozdělit na dva případy. Prvním je krátkodobí provoz, kdy jeden z transformátorů slouží pouze jako záloha. Druhou možností je trvalý provoz, kdy oba transformátory běží současně. V obou případech by však měli mít oba transformátory dostatečný výkon, aby v případě výpadku jedno z nich mohl druhý sloužit jako náhrada.



V předchozí kapitole jsme pro snížení ztrát v závislosti na zatížení uvažovali změnu velikosti výkonu transformátoru. Podíváme-li se tedy na paralelní chod transformátorů z ekonomického hlediska, vyvstane otázka, zda lze odpojením nebo připojením některých transformátorů zmenšit celkové náklady na ztráty. V případě nízkého zatížení, můžeme odpojením transformátoru ušetřit ztráty naprázdno. Naopak při vysokém zatížení můžeme připojením vhodně velkého transformátoru redukovat celkové ztráty nakrátko, které rostou s druhou mocninou zatížení. Pro určení zatížení, při kterém se vyplatí připojení resp. odpojení transformátoru ze skupiny, slouží přechodový výkon transformátoru.



Graf 18 - Přechodový výkon transformátoru

Průběh celkových ztrát pro jeden, dva a tři paralelně pracující transformátory se stejnými parametry znázorňuje graf 14. Průsečíky křivek udávají výkon, při kterém je vhodné připojit druhý transformátor. Budeme-li při stanovení přechodového výkonu vycházet z nákladů na ztráty a zároveň budeme respektovat jalové ztráty, určí se jeho velikost pro dva stejné transformátory pomocí vzorce:

$$(2.4.1)$$

$$S_{př} = S_n * \sqrt{2 * \frac{(\Delta P_0 + k * \Delta Q_0) * n_0}{(\Delta P_k + k * \Delta Q_k) * n_k}}$$

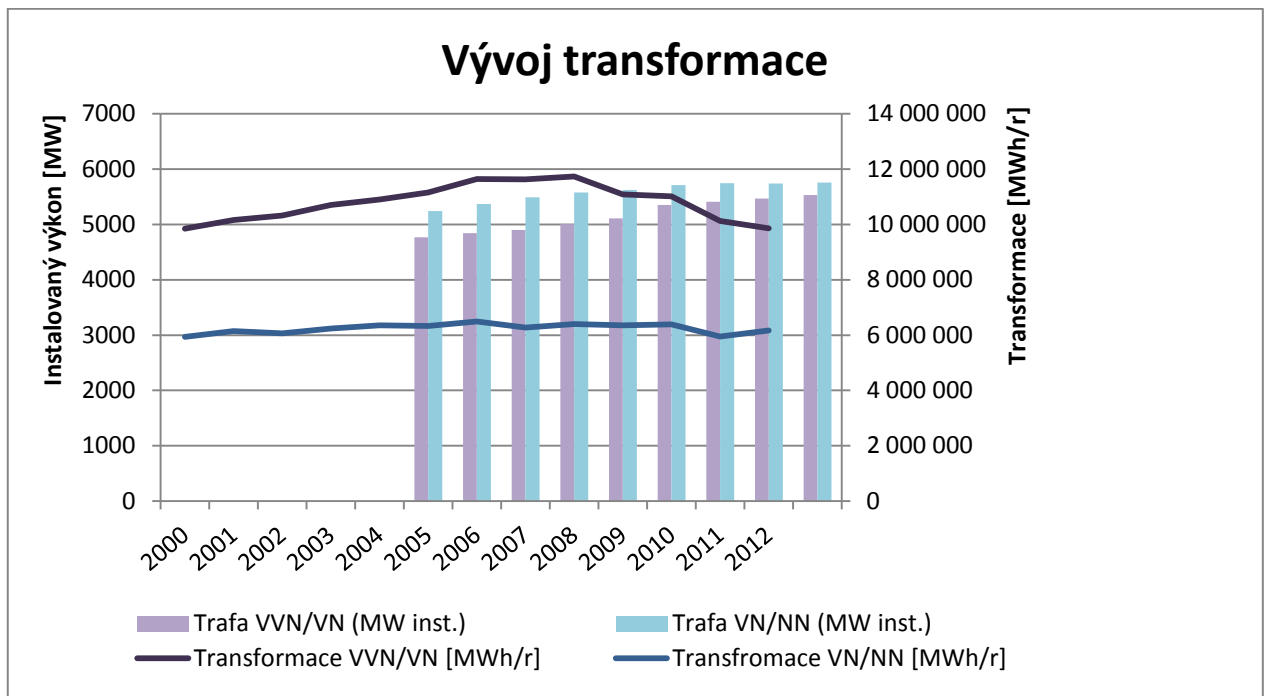
Jestliže bude přechodový výkon větší než námi přenášený přechodový výkon, je lepší využívat jeden transformátor v trvalém provozu a druhý jako zálohu. Musíme si však uvědomit, že připojování transformátorů protéká vinutím zapínací proud, který dosahuje až 20 násobku jmenovitého proudu. Zapínací proud znamená zvýšené namáhání, které spolu s opotřebením přináší riziko poruchy při častých manipulacích.

V síti společnosti E.ON nejsou transformátory provozovány paralelně. Výše uvedené vztahy však neplatí pouze pro paralelní provoz, ale také pro současný provoz transformátorů v jedné trafostanici, kdy transformátory pracují v odděleném provozu a přebírají část celkového zatížení. Rozdělíme-li zatížení rovnoměrně mezi odděleně pracující transformátory, tak zatížení jednotlivých transformátorů je vlastně shodné s paralelním provozem, a vztahy uvedené výše platí i pro oddělený provoz stejných transformátorů s rovnoměrně rozděleným zatížením.

### 3 Vývoj zatížení transformátorů a jejich instalovaných výkonů v distribuční síti

Obnova a rozvoj transformace energie úzce souvisí s množstvím transformované energie. Dlouhodobě se předpokládá růst spotřeby elektrické energie a tedy i přenášeného výkonu. Při výměně dožitých transformátorů za nové se tedy obvykle volí transformátor se stejným nebo větším jmenovitým výkonem. Pro posouzení skutečného průběhu přenášeného množství energie byl vypracován graf vývoje zatížení transformátorů. Pro vypracování tohoto vývoje byly použity údaje z regulačního výkazu společnosti E.ON Distribuce, a.s. a částečně také údaje z Ročních zpráv o provozu ES ČR pro rok 2013.

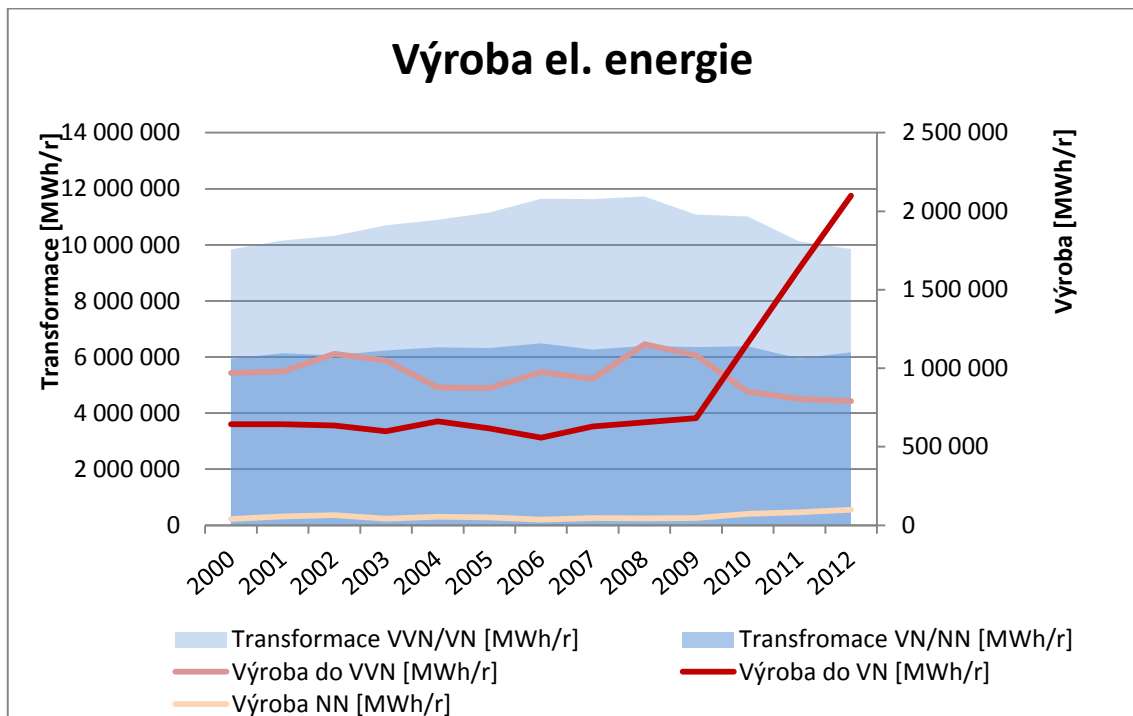
Od roku 2005 je patrný celkový nárůst instalovaného výkonu transformátorů. U transformátorů VVN/VN není od roku 2010 navýšení příliš znatelné ve srovnání s transformátory VN/NN, kde můžeme pozorovat nárůst přibližně 100MW za rok.



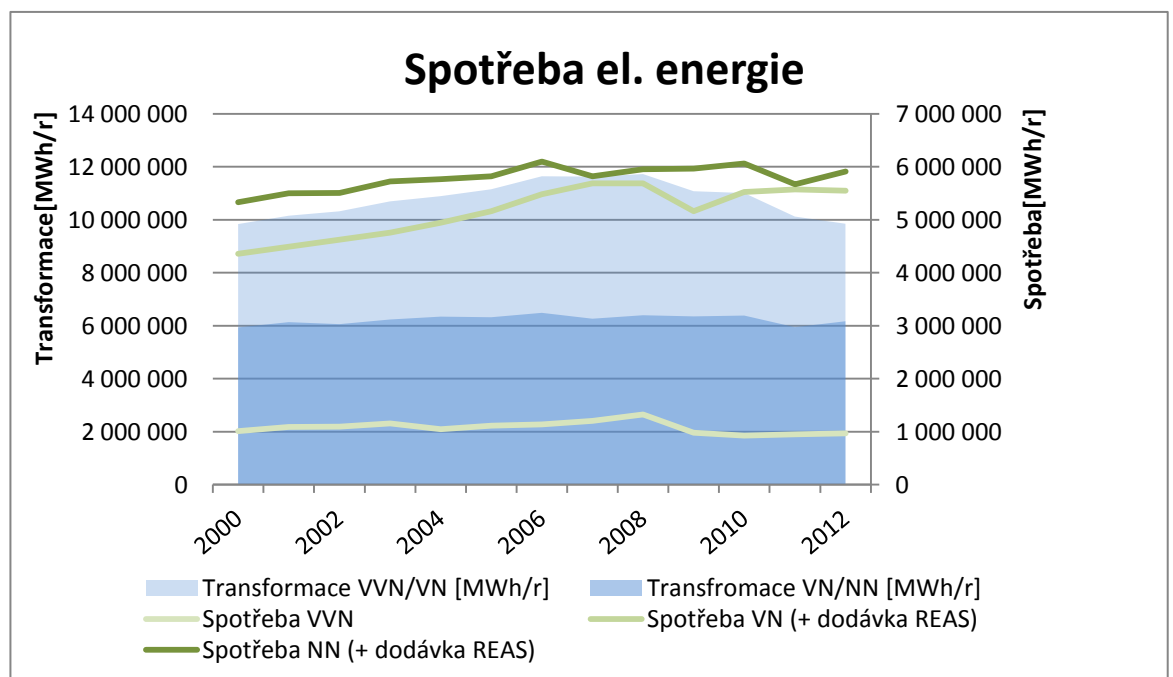
Graf 19 - Vývoj instalovaného výkonu transformátorů VVN/VN a VN/NN a množství transformované energie

Podíváme-li se však množství transformované energie na transformátorech VVN/VN zjistíme, že od roku 2000 do roku 2008 rostlo a od roku 2008 naopak můžeme sledovat výrazný pokles. U transformace z hladiny VN na hladinu NN má v průběhu let 2000 až 2012 jen slabý nárůst či pokles.

Pokles transformované energie z hladiny VVN a VN souvisí s množstvím vyrobené energie do příslušné hladiny napětí, stejně jako s množstvím spotřebované energie. V grafu 20 je zobrazena výroba elektrické energie do sítě VVN, VN a NN. V grafu 21 je naopak spotřeba.



Graf 20 - Vývoj množství vyrobené elektrické energie do jednotlivých hladin napětí



Graf 21 - Vývoj množství spotřebované energie v jednotlivých hladinách

Mezi roky 2008 a 2009, kdy je patrný první pokles transformace na transformátorech VVN/VN, byl zaznamenán také pokles spotřeby na hladinách VVN a VN. Od roku 2009 do roku 2012 můžeme naopak sledovat velký vzestup zdrojů vyrábějících do sítě VN a s ním související pokles transformované energie na

transformátorech VVN/VN. Nárůst výroby je dán rychlým rozvojem obnovitelných zdrojů, především fotovoltaických elektráren.

I když se výroba do hladiny NN lehce zvyšuje, množství transformované energie téměř kopíruje průběh spotřebované elektrické energie.

Z grafů vyplývá, že současný vývoj instalovaného výkonu, neodpovídá skutečnému průběhu množství přenášené energie. Můžeme si tedy položit otázku, zda je vhodné při výměně transformátoru volit větší výkon, či zvyšovat celkový počet transformátorů. Odpověď na tuto otázku nemusí být zcela jasná, neboť je ovlivněna mnoha okolnostmi, které se pokusím nastínit v následující kapitole.

## **4 Metodika rozvoje a obnovy transformace**

Vývoj spotřeby je odrazem hospodářské situace. V posledních letech celková spotřeba elektrické energie spíše klesala, případně stagnovala. Přes současný pokles transformace se v dlouhodobějším měřítku však předpokládá hospodářský růst a sním spojený nárůst spotřeby elektrické energie.

Výhledově lze také očekávat nárůst spotřeby energie v oblasti elektromobilů. Prodej elektromobilů v zahraničí rok od roku stoupá a je tedy předpoklad pro jejich rozšíření i v České republice. Nevýhodou zatím je především vysoká pořizovací cena, výhodou naopak můžou být minimální náklady na údržbu a příznivější bilance vlivu na životní prostředí.

Před rekonstrukcí či rozšířením transformovny je nutné provést ekonomickou analýzu dané oblasti, kde musíme brát v úvahu například výstavbu nových bytových prostor, průmyslových zón či výstavbu nového vedení.

Velikost transformačního výkonu je ovlivňována několika faktory. Kromě vývoje spotřeby v dané oblasti má významný vliv i trend rozvoje obnovitelných zdrojů, které mají velmi nestálou výrobu elektrické energie. Za stavu, kdy množství vyrobené energie příliš nízké, musí být zajištěna dodávka z jiného zdroje. Naopak v případě kdy je výroba

z OZE vysoká může docházet k přetokům do vyšší hladiny napětí. Požadavek na zvýšení transformačního výkonu může být zapříčiněn také úbytkem klasických zdrojů.

Navýšení celkového výkonu transformátorů a obnova zařízení v trafostanicích je prováděna především z důvodu zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu. Tyto dva nejdůležitější parametry jsou ruku v ruce s životností zařízení, tak s ekonomickým provozem a požadavky aktuálních norem a předpisů.

Podíváme-li se na technickou životnost transformátorů, je jejich minimální doba životnosti 30. Transformátor může být sice provozován i déle, avšak jeho stav vyžaduje zpravidla vyšší údržbu, aby bylo zamezeno poruše při provozu. Vzhledem k dnešním technickým pokrokům, je nutno zmínit i nadměrné elektrické ztráty, které úměrně s rostoucí cenou elektrické energie zvyšují provozní náklady zastaralých strojů.

Výměna transformátoru se obvykle provádí až za 40 let provozu. Z hlediska snížení ztrát vzniklých na těchto transformátorech je však vhodné uvážit, zda neprovádět výměnu starých transformátorů za nové dříve.

Dalším faktorem mluvícím ve prospěch výměny starých transformátorů za nové, je vysoká hladina hluku. Ve standardech třídy IEC 60076 a IEC 60726 (v ČR zavedených jako ČSN EN 60076 a ČSN EN 60726) není stanovena úroveň hlučnosti ani velikost ztrát transformátorů. V mnoha zemích jsou však velmi striktní omezení úrovní hluku, který může být generován transformátorem a to jak v městských tak i mimoměstských lokalitách. U nových nízko-hlučných transformátorů VN/NN je konstrukčním řešením dosaženo hlučnosti ve vzdálenosti 1 metru nižší než 30dB. U silových transformátorů je běžný standard 55bB.

Podle vypočtených ztrát je možné zhodnotit, zda v některých oblastech není vhodné při instalaci nových transformátorů zvolit transformátor s menším nebo naopak s větším výkonem či rozšířit transformovnu o další transformátor. Tato skutečnost byla naznačena v kapitole 1.6.4, kde bylo v závislosti na velikosti ztrát vytipováno několik transformoven, ke kterým byla vytvořena statistika rozložení zatížení v průběhu roku.

V souvislosti se ztrátami transformátorů bylo vydáno v roce 2014 Nařízení komise EU č. 548/2014, kterým jsou dány minimální požadavky na ekodesign, pokud se jedná o malé, střední a výkonové transformátory zakoupené po vstupu tohoto nařízení v platnost.

Nově instalované transformátory by měli být voleny také z pohledu ekonomického provozu. Významným faktorem je tedy zatížení transformátoru. Na základě zpracovaného cenového porovnání metodou diskontovaných nákladů, by měl být zatížení větším jak 11MVA transformátor 16MVA nahrazen transformátorem o výkonu 25MVA. Při zatížení větším jak 16MVA by měl být pak transformátor o výkonu 25MVA nahrazen transformátorem se jmenovitým výkonem 40 MVA.

Optimální zatížení transformátorů se pohybuje v rozmezí 50 a 60% jmenovitého výkonu. Zatěžování transformátorů na více jak 70% je zcela nevhodné z hlediska ekonomického provozu. Z normy ČSN 33 2000-5-51:200 navíc vyplývá, že při zatížení nad 75 % je již třeba zvažovat instalaci nebo výměnu transformátoru, pro zatížení přesahující 80 % je výměna či instalace nového transformátoru nutná. Výkon transformátoru by měl být tedy volen jak s ohledem na jeho současném zatížení, tak s ohledem na možný budoucí rozvoj dané oblasti.

Pro snížení zatížení transformátoru můžeme využít paralelní provoz transformátorů, kdy se zatížení rovnoměrně rozdělí mezi oba transformátory. Kvůli zkratovým proudům je však výhodnější, aby transformátory pracovali v odděleném provozu, kdy druhý transformátor přebírá část celkového zatížení. Současný provoz dvou transformátorů může být také využit v místech, kde chceme oddělit venkovní a kabelovou síť.

Ve většině oblastí je nainstalováno více transformátorů. Z výpočtu celkových ztrát je však patrné, že některé transformátory běží naprázdno nebo jsou zcela odpojeny od sítě. I když tyto transformátory slouží jako rezervní, je vhodné posoudit, zda by při výměně nebylo výhodnější zvolit nižší stupeň.

V úvahu by mělo být také bráno množstvím výskytu zkratů, stejně jako posouzení zda v dané oblasti může docházet k nežádoucím poklesům napětí.



## **Závěr**

Na základě poskytnutých naměřených hodnot na transformátorech v síti společnosti E.ON Distribuce a.s. byly vypočteny ztráty na transformátorech VVN/VN. Z vypočtených hodnot je patrné, že nejztrátovější jsou zpravidla transformátory, které mají velké zatížení, případně transformátory se starším rokem výroby.

Podle vypočtených ztrát je možné zhodnotit, zda v některých oblastech není vhodné při instalaci nových transformátorů zvolit transformátor s menším nebo naopak s větším výkonem či rozšířit transformovnu o další transformátor.

Volba výkonu transformátoru je funkcí mnoha faktorů, kde k nejdůležitějším samozřejmě patří spolehlivost a zajištění dodávky. V této práci byla zpracována volba výkonu zejména v závislosti na ztrátách transformátoru, které jdou ruku v ruce s ekonomickým provozem. Z nesprávně zvoleného výkonu transformátoru vznikají zbytečně velké finanční ztráty z hlediska ztrát energie, tak i pořizovacích nákladů.

Na základě ekonomického posouzení, vývoje zatížení transformátorů a jejich instalovaných výkonů v distribuční síti, které neodlučitelně souvisí se spotřebou stejně jako s výrobou elektrické energie. Byla navržena metodika rozvoje a obnovy transformace, kde byly shrnuty všechny aspekty související s volbou výkonu.

Pro volbu výkonu nového transformátoru je však nutné provést ekonomickou analýzu, kde se musí brát v úvahu celkový rozvoj oblasti, jako je například výstavba bytových prostor či průmyslových zón.

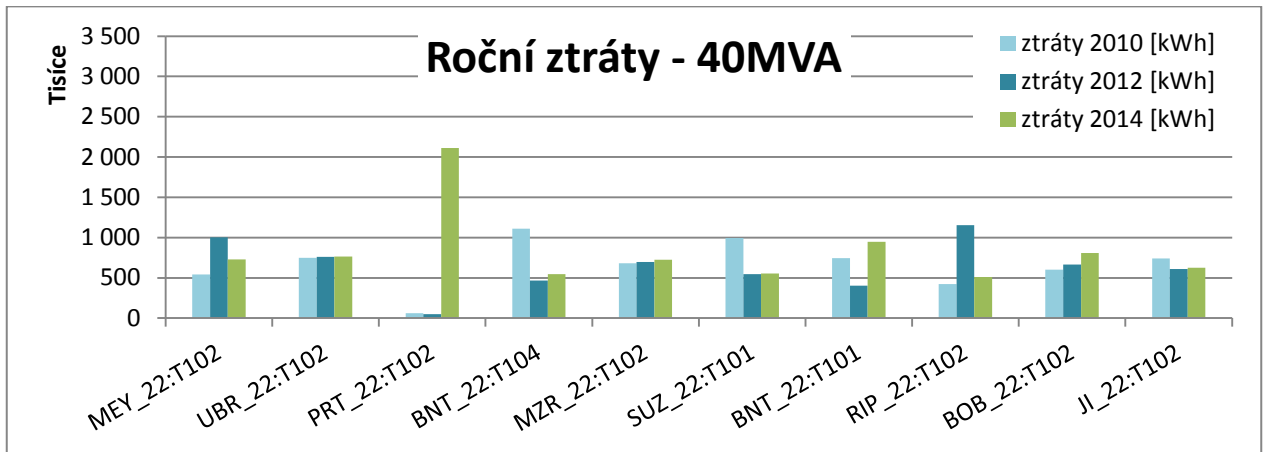
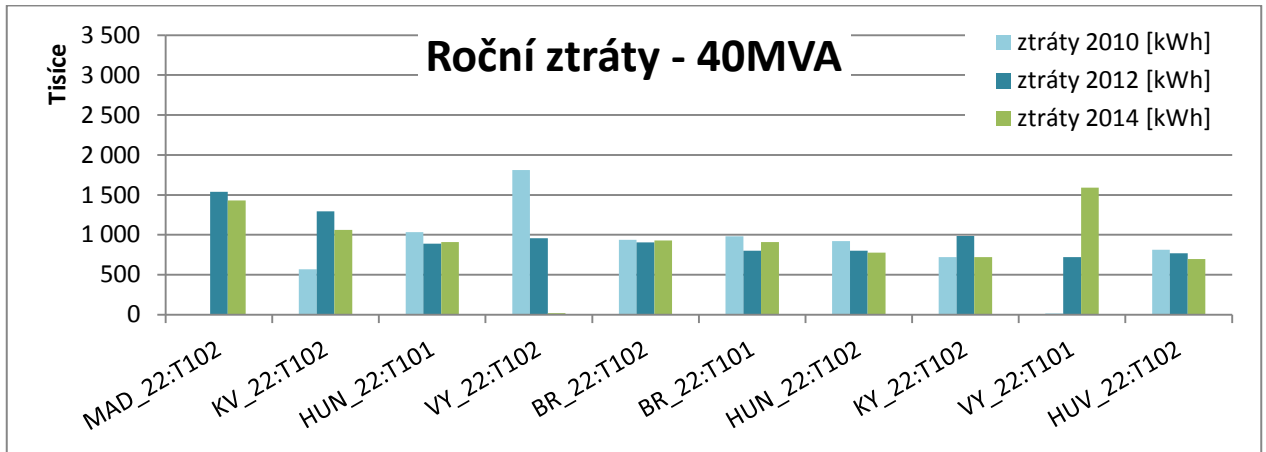
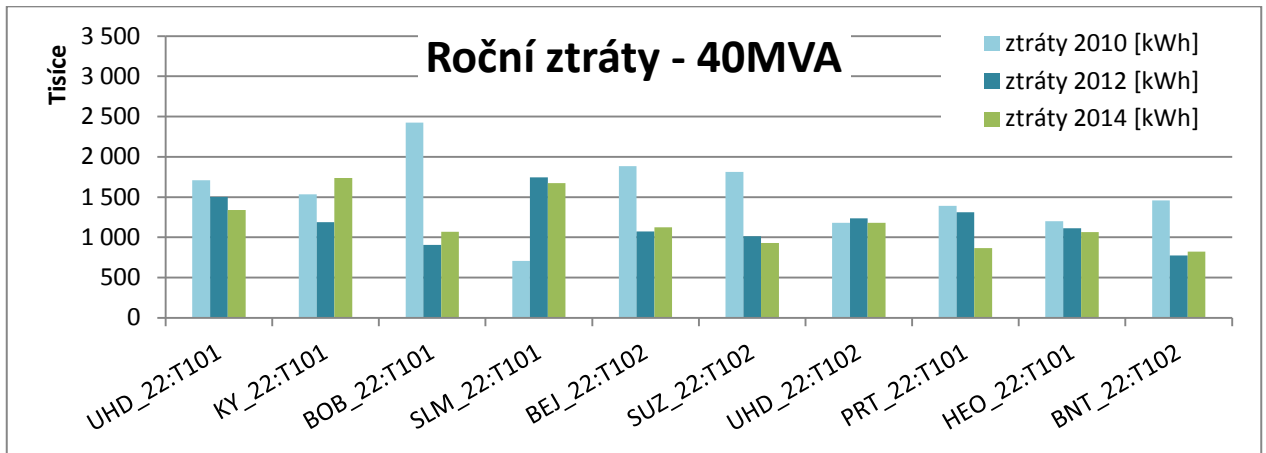
## Citovaná literatura

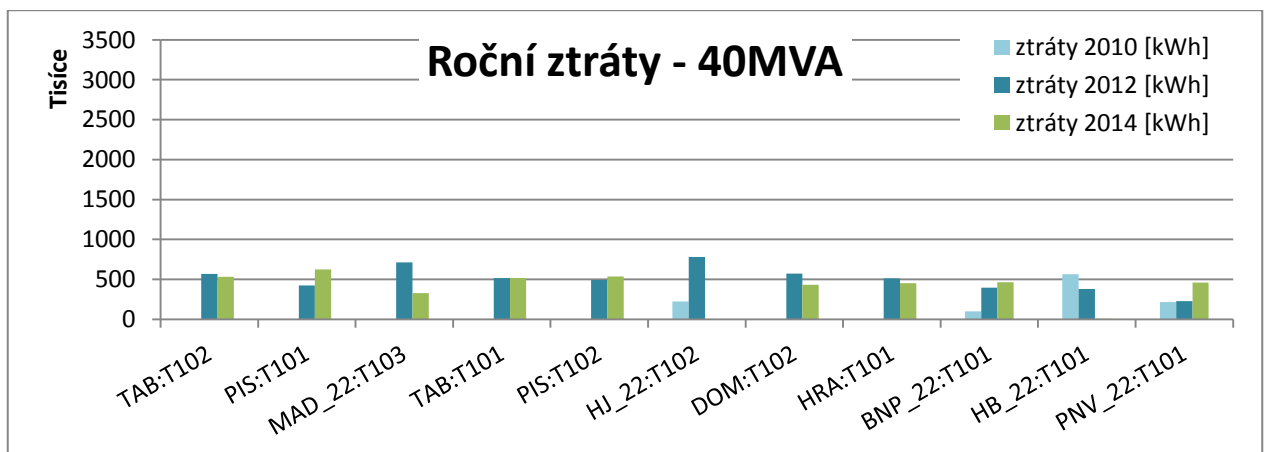
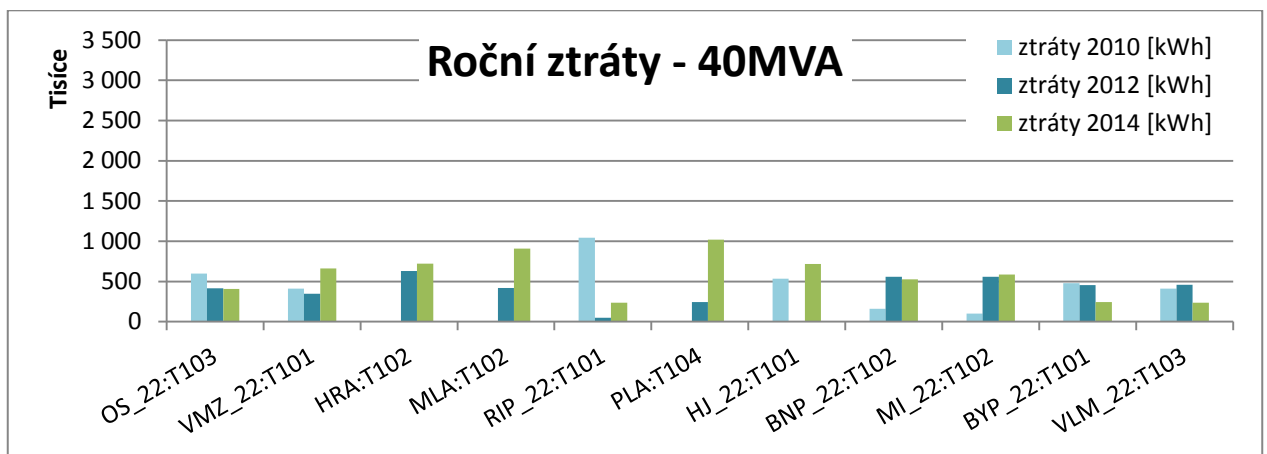
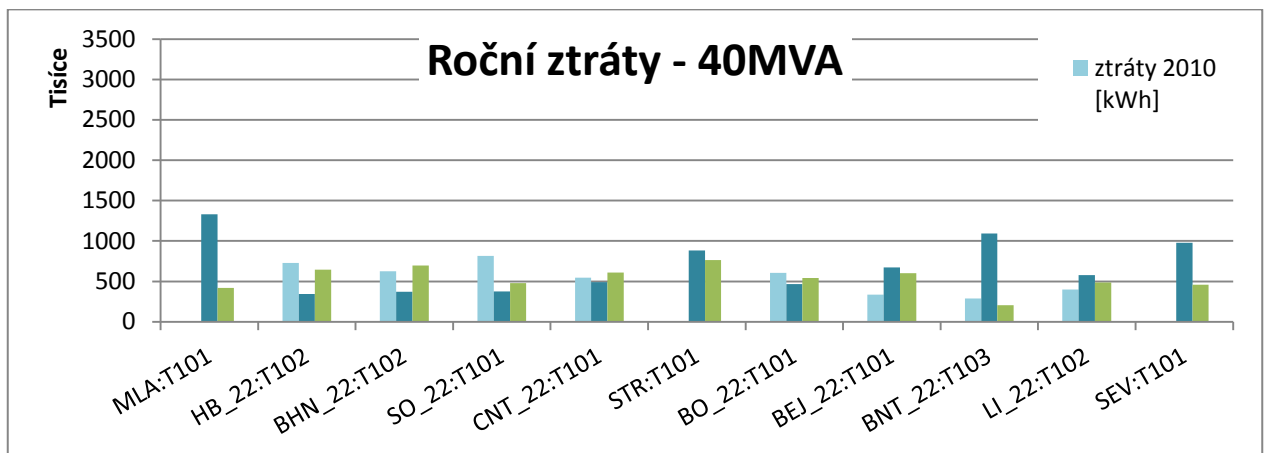
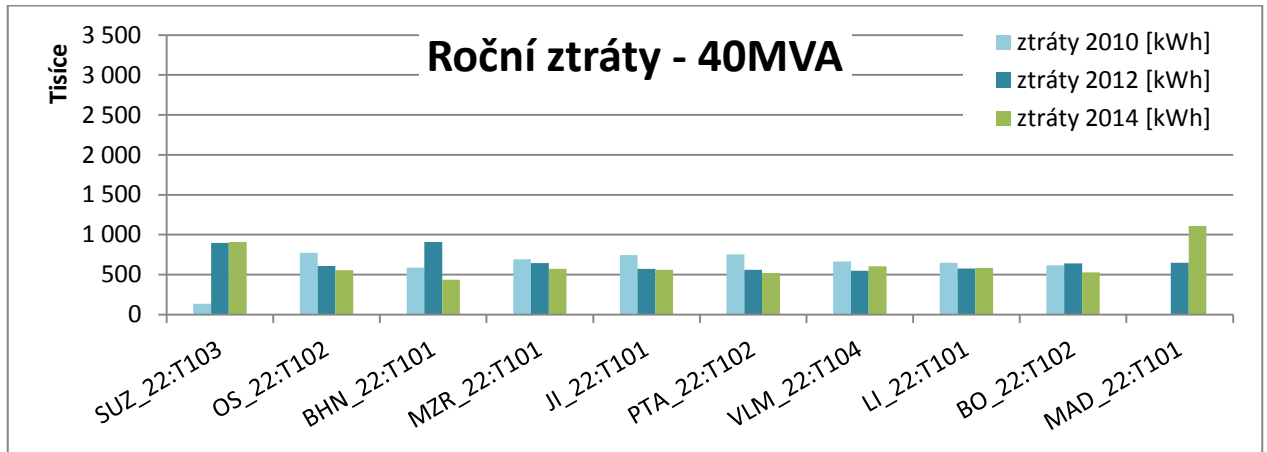
- [1] Š. Feist, Ekonomické a technické parametry transformátorů, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2014.
- [2] J. Mertlová, P. Hejtmánková a T. Tajtl, Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008.
- [3] J. Kulis, Analýzy zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů, Plzeň: ZČU v Plzni, 2013.
- [4] R. Vápeník, „Regulace napětí v distribuční soustavě vn a nn,“ 2011. [Online]. Available: [www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5](http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000599-5a5255b4c5).
- [5] P. Toman, „Provoz distribučních soustav,“ 2011. [Online]. Available: [http://k315.feld.cvut.cz/CD\\_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf](http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf).
- [6] J. Bermann, „Transformátorová koncepce ČR+SR - stále aktuální a potřebná,“ v *CIRE*, Tábor, 2014.
- [7] Siemens AG, „Nové EU-požadavky na transformátory,“ 2014. [Online]. Available: [http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/Transformers/inserts/insert\\_new-eu-requirements-for-transformers\\_ecodesign-directive\\_CZ.pdf](http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/Transformers/inserts/insert_new-eu-requirements-for-transformers_ecodesign-directive_CZ.pdf).
- [8] Evropská komise, „Nařízení komise EU č. 548/2014 ze dne 21.5.2014,“ [Online]. Available: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=OJ:JOL\\_2014\\_152\\_R\\_0001](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=OJ:JOL_2014_152_R_0001).
- [9] J. Červený, Stavba elektrických strojů, Plzeň, 2012.
- [10] Z. Urban, „Amorfní kovy a jejich aplikace v elektrotechnice,“ 2012. [Online]. Available: [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2826/BP\\_Zdenek\\_Urban.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2826/BP_Zdenek_Urban.pdf?sequence=1).
- [11] T. Váňa, „Víte, jak můžete ušetřit při provozu transformátoru?,“ 2013. [Online]. Available: [http://sdeleni.idnes.cz/vite-jak-muzete-usetrit-pri-provozu-transformatoru-pck-/tec\\_sdeleni.aspx?c=A130429\\_085551\\_tec\\_sdeleni\\_ahr](http://sdeleni.idnes.cz/vite-jak-muzete-usetrit-pri-provozu-transformatoru-pck-/tec_sdeleni.aspx?c=A130429_085551_tec_sdeleni_ahr).
- [12] Power-Energo, „Olejové distribuční hermetizované transformátory - řada Amorphous,“ [Online]. Available: <http://www.power-energo.cz/produkty/rada-amorphous-abb.html>. [Přístup získán 2015].
- [13] CG Power System, „Distribuční transformátory,“ [Online]. Available:

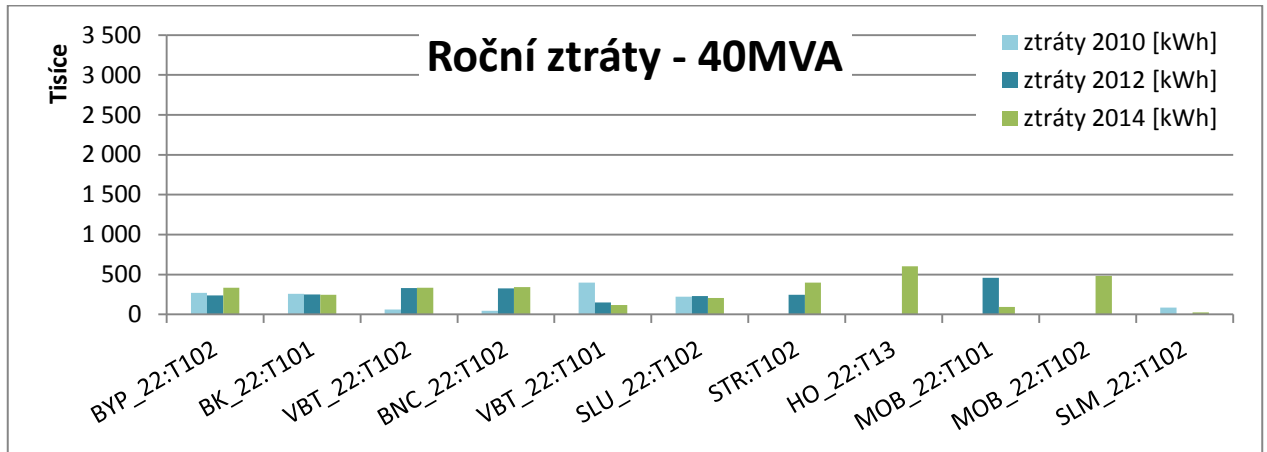
- <http://www.riapower.cz/assets/RIA-files/DT/DT-brochure-CZE.pdf>.
- [14] V. Baláš, Diplomová práce - Hospodárné zatěžování transformátorů VVN/VN, Plzeň: Západočeská Univerzita v Plzni, 2011.
- [15] V. Koudela, „Přehled metod,“ 2011. [Online]. Available: [fast10.vsb.cz/koudela/Ei/Přehled%20metod.doc](http://fast10.vsb.cz/koudela/Ei/Přehled%20metod.doc).
- [16] R. Morawitz, Optimalizace návrhu a provozu sítě NN s využitím dat z inteligentních elektroměrů, Brno: VÚT v Brně, 2008.
- [17] P. Konečný, „Vliv plechů y amorfní oceli na propustnost rušení transformátory,“ [Online]. Available: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=27791](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27791).

## Příloha

### Ztráty na transformátorech 40MVA







**Ztráty na transformátorech 25MVA**

