

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

EKONOMICKÉ A TECHNICKÉ PARAMETRY TRANSFORMÁTORŮ

ECONOMICAL AND TECHNICAL PARAMETRES OF TRANSFORMERS

Autor: Štěpán Feist
Vedoucí práce: Prof. Ing. Oldřich Starý, CSc.

Bakalářská práce

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Feist** Štěpán

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektrotechnika a management

Název tématu:

Ekonomické a technické parametry transformátorů

Pokyny pro vypracování:

1. Princip transformátoru
2. Technické parametry
3. Ekonomické parametry
4. Transformátory v praxi

Seznam odborné literatury:

1. Kulkarni S.V., Khaparde S.A.: Transformer Engineering Design, Technology and Diagnostics Sekond edition. CRC Press Tailor&Francis Group, 2013.
2. Jezierski E.: Transformátory, teoretické základy. Academia, 1973.

Vedoucí bakalářské práce: Prof.Ing. Oldřich Starý, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

Doc.Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

vedoucí katedry



Prof.Ing. Pavel Ripka, CSc.

děkan

V Praze dne 10.2.2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 19.5. 2014

.....

Štěpán Feist

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Prof. Ing. Oldřichu Starému, CSc., za jeho vedení při tvorbě práce a za užitečné připomínky.

Obsah

Úvod.....	8
1. Princip transformátoru.....	9
1.1. Náhradní schéma a výpočet parametrů.....	10
1.2. Fázorový diagram.....	12
2. Technické provedení	13
2.1. Magnetický obvod.....	13
2.1.1. Konstrukční provedení	13
2.1.2. Ztráty	13
2.1.2.1. Hysterezní ztráty.....	13
2.1.2.2. Ztráty vířivými proudy	14
2.1.2.3. Celkové ztráty.....	15
2.1.2.4. Anomální ztráty	15
2.2. Elektrický obvod	16
2.3. Izolace a chlazení	16
2.3.1. Izolace	17
2.3.2. Chlazení.....	17
2.4. Provozní charakteristiky	18
2.4.1. Chod naprázdno.....	18
2.4.2. Chod nakrátko	18
2.4.3. Úbytek napětí a účinnost	19
2.4.3.1. Úbytek napětí.....	19
2.4.3.2. Účinnost.....	19
2.4.4. Hluk.....	20
3. Transformátory v praxi.....	21
3.1. Základní princip.....	21
3.2. Technické parametry	21
3.2.1. Základní parametry.....	21
3.2.2. Klimatické parametry	22
3.2.3. Ztráty	22
3.3. Křivka poruchovosti	22
4. Ekonomické parametry.....	25
4.1. Řízení rizik	25
4.2. Porovnání nákladů.....	26

4.3.	Likvidace/odprodej stávajícího transformátoru.....	27
4.4.	Ekonomická životnost	27
5.	Monitoring.....	29
5.1.	Monitoring izolace.....	30
5.2.	Ekonomický přínos monitoringu.....	33
5.2.1.	Pravděpodobnost	34
5.2.2.	Spolehlivost	36
5.2.3.	Vliv monitoringu na životnost.....	39
6.	Závěr.....	41

Abstrakt

V práci se zabývám ekonomickým rozbořem transformátorů VVN. V první části popisují technické parametry a konstrukční provedení, na což navazuje problematika řízení rizik a jeho vliv na ekonomickou životnost. Je zde ukázán výpočet spolehlivosti a přínos monitoringu z hlediska nákladů. V závěrečné části je popsána ekonomická efektivnost monitoringu a výpočet čisté hodnoty investice.

Abstract

The thesis deals with the economic analysis of EHV transformers. The first part describes the technical specifications and construction, which is related to the issue of risk management and its impact on economic life. There is shown the calculation of the reliability and the benefit of monitoring by reducing cost. The final section describes the economic efficiency of monitoring and calculation of the net value of the investment.

Úvod

Od doby, kdy se pro nižší ztráty začal pro přenos elektrické energie používat střídavý proud, mají transformátory v energetice významnou roli. Jsou součástí přenosové soustavy, která je páteřním rozvodem celé elektrizační soustavy. Investice do těchto zařízení dosahují stovek miliónů korun, což je řadí mezi nejdražší položky. Moderní technologie a design významně snížili ztráty a pozornost se přesunula především na poruchovost a provozní náklady, které mají vliv na výnosnost investice a ekonomickou životnost. Právě pro tyto důvody se do transformátorů instaluje monitoring, jehož účelem je co nejpřesněji určit aktuální stav zařízení měřením různých parametrů a pomocí těchto informací předcházet nežádoucím jevům. Neustálý vývoj v tomto odvětví je nejen žádoucí, ale vzhledem k rostoucí poptávce po elektrické energii i nutný, a z tohoto důvodu nevyhnutelná modernizace technologií a strategie nabízí prostor pro nové myšlenky. Ačkoli energetika prošla dlouhodobým vývojem, stále má daleko k dokonalosti. Zvláště kvůli nerovnoměrnému zatěžování způsobené novodobými tendencemi používat obnovitelné zdroje je zapotřebí věnovat více pozornosti stavu transformátorů. Technické parametry by měli odpovídat ekonomickým požadavkům. V případě monitoringu je komplikovanější výpočet přínosů, jelikož se nedají přímo určit. Proto se přínos počítá z ušetřených nákladů, které by měli být vyšší, než jsou náklady na pořízení a provoz monitoringu. Přínosem je spolehlivost a s ní spojená životnost zařízení, která se projeví na ekonomické efektivnosti.

1. Princip transformátoru

Transformátory mají klíčovou roli v energetickém systému, kde zajišťují, aby mohly všechny části soustavy pracovat v standardizované napěťové hladině. Mezi výrobou a spotřebou elektrické energie se vícekrát podle potřeby mění napěťová hladina. Pro přenos elektrické energie se zvyšuje napětí za účelem snížení ztrát a posléze se snižuje podle účelu spotřeby. Transformátory mohou propojovat systémy s různou napěťovou hladinou. Transformátor má větší účinnost a nižší náklady na údržbu než točivé elektrické stroje.

Transformátor je netočivý elektromagnetický stroj, který bez přispění mechanické energie přenáší elektrickou energii mezi obvody. 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 Φ_h spřažený se sekundárním (případně dalším) vinutím s N_2 , kde se indukuje střídavé napětí $u_2(t)$. Princip je naznačen v obr. 1. Transformátor funguje na principu Maxwell-Faradayova zákona o indukovaném napětí.

$$\oint E \cdot dl = -u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

e_i ... elektromotorické napětí

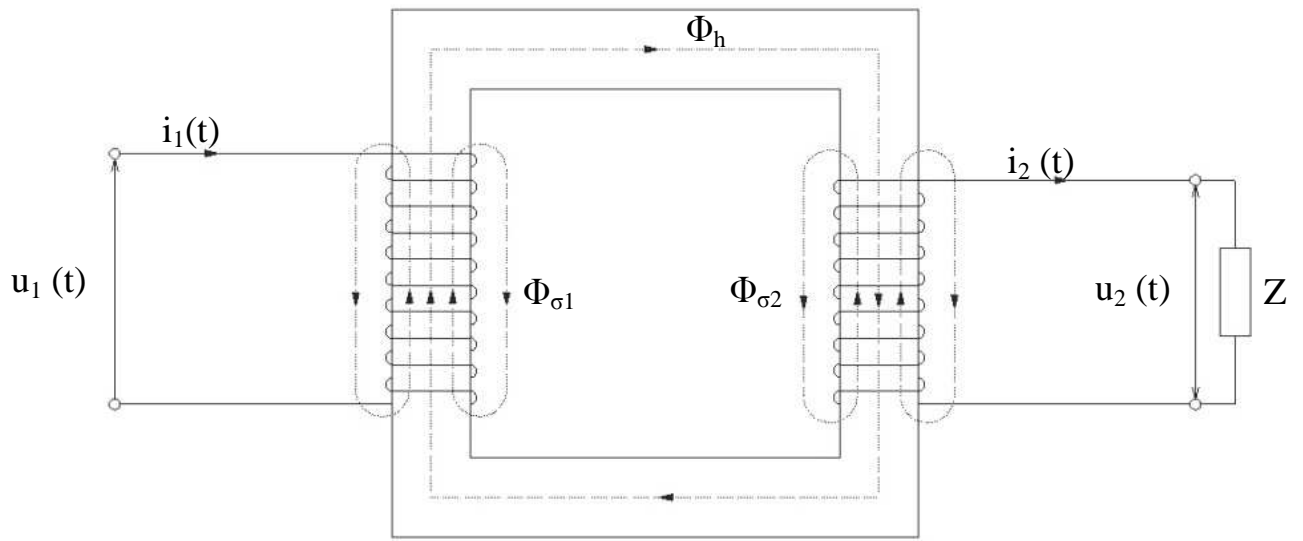
u_i ... indukované napětí

N ... počet závitů

ψ ... spřažený magnetický tok

Φ ... magnetický tok

t ... čas



Obr. 1 Princip transformátoru

Φ_h ... hlavní magnetický tok

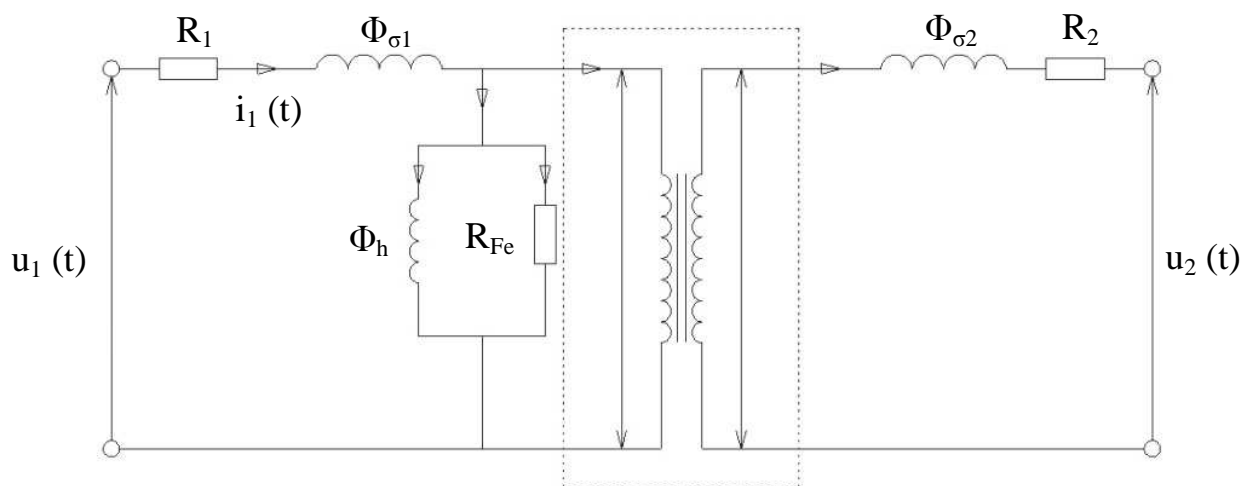
$\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$... rozptylové toky

$u_1(t), i_1(t)$... vstupní napětí a proud

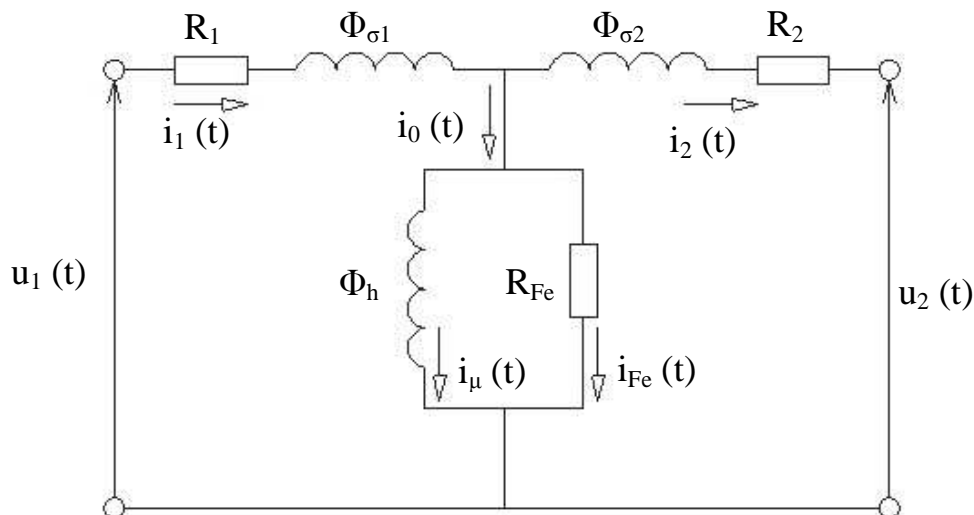
$u_2(t), i_2(t)$... výstupní napětí a proud

Z ... zátěž

1.1. Náhradní schéma a výpočet parametrů



Obr. 2a) náhradní schéma



Obr. 2b) náhradní schéma

Pomocí náhradního schématu na obr. 2a) a 2b) můžeme vytvořit napěťové rovnice obou vinutí.

$$u_1 = R_1 \cdot i_1 \cdot \frac{d\psi_1}{dt}, \quad \psi_1 = L_{11} \cdot i_1 + L_{12} \cdot i_2 \quad (2)$$

$$u_2 = R_2 \cdot i_2 \cdot \frac{d\psi_2}{dt}, \quad \psi_2 = L_{22} \cdot i_2 + L_{21} \cdot i_1 \quad (3)$$

Vzájemné indukčnosti se rovnají $L_{12} = L_{21}$. Magnetický tok se dělí na dvě složky, hlavní Φ_μ a rozptylovou Φ_σ . Jejich uzavřené cesty jsou naznačené v obr. 1. Napěťové rovnice lze přepsat.

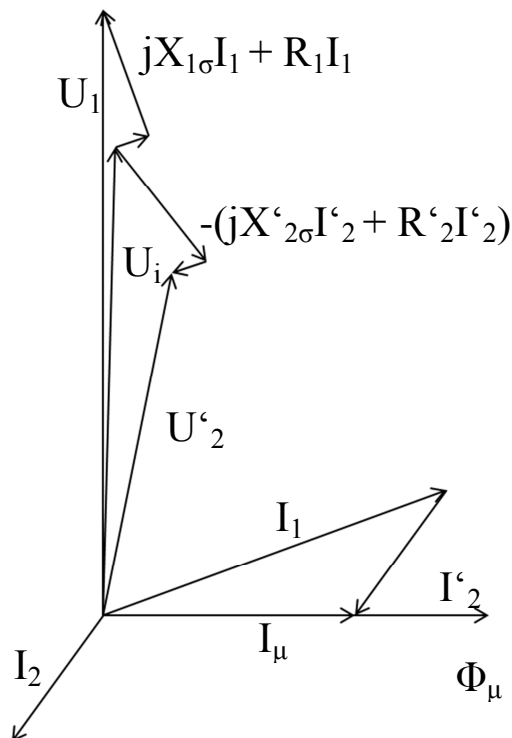
$$u_1 = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + u_{i1}, \quad u_{i1} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot N_1 + \Phi_{max} \quad (4)$$

$$u_2 = -R_2 \cdot i_2 - L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} + u_{i2}, \quad u_{i2} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_1 \cdot N_2 + \Phi_{max} \quad (5)$$

Pro náhradní schéma v T-článku je nutné přepočítat jedno indukované napětí (zpravidla sekundární), aby byly rovné. Pro tento výpočet se používá tzv. převod transformátoru p ze vzorce (6), který je roven poměru indukovaných napětí nebo poměru počtů závitů.

$$p = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

1.2. Fázorový diagram



Obr 3. Fázorový diagram

Vycházíme z fázoru napětí U_1 , kdy je transformátor na výstupu zatížen kombinací činného odporu a reaktance. Fázor primárního proudu I_1 je zpožděn za U_1 o úhel φ_1 . Na základě napěťové rovnice (4) lze sestavit přičtením úbytků indukované napětí. Magnetický tok Φ_μ , který je ve fázi s I_μ , je z definice Maxwell-Faradayova zákona (1) o 90° zpožděn za indukovaným napětím. Pomocí náhradního schématu 2b) lze sestavit I'_2 a z něj následně U'_2 .

2. Technické provedení

2.1. Magnetický obvod

2.1.1. Konstrukční provedení

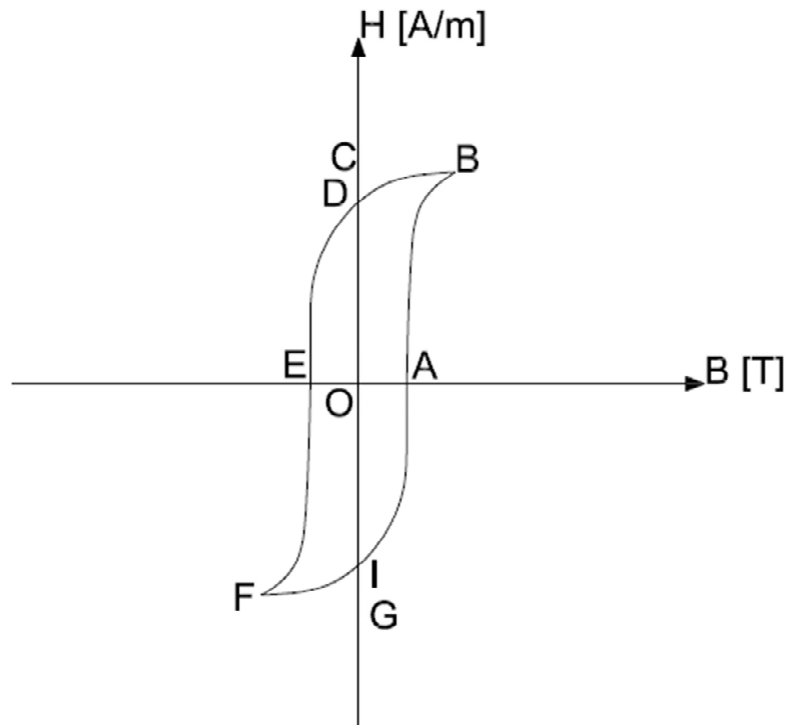
Magnetické jádro je tvořeno z vrstvených křemíkových plechů s malým magnetickým odporem. Vývoj neustále pokračuje a objevují se nové technologie, které nadále optimalizují funkčnost, snižují ztráty a hluk. Nejčastěji používaná technologie je orientované válcování za studena. Přídavek křemíku výrazně zvyšuje činný odpor, který spolu se snižující se tloušťkou plechů minimalizuje ztráty vířivými proudy. Magnetování ve směru válcování výrazně snižuje hysterezní ztráty. Pro zvýšení výkonu lze použít výkonnější design nebo lepší výrobní proces, jako je například skládání plechů pod určitým úhlem atp. Konstrukční materiály, technologie a výrobní procesy patří mezi know-how výrobců a výrobní tajemství.

2.1.2. Ztráty

Za ztráty magnetického obvodu považujeme anomální, hysterezní a ztráty vířivými proudy. Jsou to pečlivě hlídané parametry, které se mění s věkem transformátoru. Ztráty hrají roli ve výpočtu ekonomické životnosti a návratnosti investice.

2.1.2.1. Hysterezní ztráty

Hysterezní ztráty jsou úměrné hysterezní smyčce (křivka $B - H$). Reprezentují výdej energie během jednoho cyklu smyčky. Nedokonalosti v materiálu, jako jsou nečistoty nebo posun v krystalické mřížce, zvyšují výdej energie během magnetizace ve formě vnitřního tření. V prvním kvadrantu plocha OABCD představuje dodanou energii. Indukované napětí a proud jsou kladné na křivce AB. Energie reprezentovaná plochou BCD se vrací ke zdroji, a jelikož mají opačné znaménko, je energie záporná. Tedy plocha OABD zobrazuje ztráty energie v prvním kvadrantu a plocha ABDEFI představuje celkové hysterezní ztráty v jednom cyklu. Ztráty v cyklu mají konstantní hodnotu a jsou přímo úměrné frekvenci.



Obr. 4 Hysterezní smyčka

$$P_h = k \cdot f \cdot B_{mp}^n \quad (7)$$

k je konstanta určená materiálem

B_{mp} je aktuální hodnota amplitudy intenzity magnetického toku

f je frekvence

n je Steinmetzova konstanta, jejíž hodnota se liší podle technologie výroby magnetického jádra. Pro zastudena válcované plechy je více než 2.

2.1.2.2. Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy vznikají kvůli indukovanému napětí ve vrstvách křemíkových plechů. Jsou závislé na druhých mocninách tloušťky plechu, frekvence a efektivní hodnotě (r.m.s.) intenzity magnetického pole.

$$P_v = k \cdot f^2 \cdot T^2 \cdot B_{rms}^2 \quad (8)$$

T je tloušťka plechu

f je frekvence

B_{rms} je efektivní hodnota intenzity magnetického toku

k je konstanta určená materiálem

Aby se snížily ztráty vířivými proudy, rozdělují se vodiče vinutí na množství paralelních vodičů. Vytvářejí síť indukovaného napětí, tím vytvářejí oběžné proudy, které tečou mezi paralelními vodiči a netečou tedy mimo vinutí. Ztráty oběžnými proudy záleží na poloze vodičů v rozptylovém toku. Tyto ztráty mohou být minimalizovány, pokud po celé výšce vinutí jsou vodiče v pozici, kdy vytvářejí stejný rozptylový tok.

2.1.2.3. Celkové ztráty

Celkové ztráty jsou součtem hysterezních ztrát a ztrát vířivými proudy. V praxi se tento výpočet nepoužívá. Místo toho se běžně používají dva výpočty založené na experimentálně získaných datech. Buď je určen celkový konstrukční faktor (9), nebo zvlášť faktor hmotnosti a spojů (10).

$$P_t = W_t \times K_b \times w \quad (9)$$

$$P_t = (W_t - W_c) \times w + K_c \times w \times K_c \quad (10)$$

w je watt/kg pro konkrétní provozní amplitudu intenzity magnetického toku

K_b je konstrukční faktor

W_c značí hmotnost spojů z celkové hmotnosti W_t

K_c značí zvýšení ztráty ve spojích (je větší pro malá magnetická jádra)

2.1.2.4. Anomální ztráty

Jelikož naměřené hodnoty jsou jiné než vypočtené, což je způsobeno matematicky nevyjádřitelnými nedokonalostmi v konstrukčních materiálech, určujeme anomální ztráty, které jsou právě rozdílem mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou. Tato veličina zahrnuje veškeré materiálové nečistoty a defekty.¹

¹ Kulkarni S.V., Khaparde S.A. *Transformer Engineering Design, Technology and Diagnostics Second edition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. ISBN: 978-1-4398-5377-1

2.2. Elektrický obvod

Materiálem vinutí je nejčastěji elektrotechnická měď (ECu, zaručená čistota 99,9%, měrný odpor 0,0172 $\mu\Omega/\text{m}$), méně pak hliník (ALe, zaručená čistota 99,9%, měrný odpor 0,25 $\mu\Omega/\text{m}$). Vinutí je ve formě pásků, které jsou lakovány a přes sebe překládány (typ CTC – continuously transposed cable), aby se minimalizoval skin efekt. Svazek pásků je obalen impregnovaným izolačním papírem, který musí vydržet vysoké teploty, aby byly jednotlivé závity od sebe izolovány. Lepší vlastnosti mají teplotně vylepšené papíry, které zvyšují spolehlivost a životnost v teplotně náročných podmínkách. Vinutí se designuje komplexně s izolací a nadále se vyvíjí, aby vyhovovalo zvyšujícím se požadavkům, nicméně jsou materiálově náročná.

Ztráty v elektrickém obvodu jsou způsobeny odporem vodičů, kdy se část energie mění na teplo, tedy Jouleovy ztráty. Jsou závislé na odporu obvodu a proudu tekoucím obvodem. Dají se změřit zapojením nakrátko.

$$P_j = R \cdot I^2 \quad (11)$$

2.3. Izolace a chlazení

Tato problematika se musí řešit společně, jelikož se jedná o ucelený propojený systém. Stejně jako se zvyšují nároky na elektrický a magnetický obvod, tak je potřeba adekvátně navrhnout systém izolací a chlazení, aby správně fungoval pro elektrický i magnetický obvod a spolehlivě spolupracoval s monitoringem. Izolace a chlazení mají největší vliv na technickou životnost transformátoru. Ta se zkracuje přítomností nežádoucích vlivů, které se s rostoucím věkem transformátoru vyskytují častěji, a je náročnější jim předcházet nebo je eliminovat.

Chlazení musí pracovat neustále a držet teplotu pod kritickou hodnotou. Dlouhodobé přehřívání má neblahé účinky na izolaci a snižuje spolehlivost transformátoru a případně může vést k poruše. Transformátorový minerální olej se pravidelně doplňuje nebo mění. K tomu je ale potřeba transformátor odstavit, což je zvláště u transformátorů VVN komplikovaná a nákladná operace.

Izolace je nejčastějším důvodem ukončení funkčnosti transformátoru. Papírová izolace vinutí se nedá vyměnit ani efektivně opravit. Částečné výboje, vysoká teplota a poruchový

chod urychlují stárnutí izolace, tím ztrácí své izolační vlastnosti. Při porušení izolace může dojít k havárii a celkovému zničení transformátoru.

V tomto systému probíhá řada off-line i on-line měření, které jsou zpracovávány a udávají aktuální stav transformátoru.

2.3.1. Izolace

Dá se označit za nejporuchovější část transformátoru. Se zvyšujícím se napětím rostou nároky na izolaci a tedy i cenu, hmotnost a celkový objem transformátoru. Celý systém je třeba vytvořit ekologicky nezávadný. Na izolační systém působí několik faktorů, které ovlivňují výdrž: průběh provozního napětí, závislost napětí na čase, tvar a povrch elektrod, částečný počáteční výboj, nečistoty, vlhkost atd. Izolace má dva nejdůležitější parametry, dielektrickou pevnost a mechanickou odolnost. Dielektrická pevnost je s rostoucí teplotou téměř konstantní, ale při určité teplotě rapidně klesá. Výrobce musí přijmout normy určující parametry izolace.

Izolace transformátoru může být rozdělena do dvou kategorií, hlavní a vedlejší. Hlavní obsahuje izolaci mezi vinutími, mezi vinutím a magnetickým jádrem, mezi vedením vysokého napětí a zemí. Vedlejší je vnitřní izolace ve vinutí, tedy mezizávitová.

2.3.2. Chlazení

Nejčastější chladící medium je minerální olej, který funguje i jako izolace. Dá se používat pro napětí i větším než 1000 kV. Lepší vlastnosti má silikonový olej, který je nehořlavý, jenže je výrazně dražší, a proto se běžně nepoužívá. Alternativou mohou být plynem chlazené transformátory. Plyn SF₆ je nehořlavý s dobrými izolačními vlastnostmi a plynem chlazené transformátory jsou také mnohem lehčí než chlazené kapalinou. Izolační vlastnosti jsou závislé na tlaku. Nevýhodou je nízká tepelná kapacita a nízká tepelná časová konstanta a může dojít k přetížení. Kvůli ekologickým problémům, těsnění, nižší chladící kapacitě a nákladům na výrobu nejsou plynem chlazené transformátory zatím hromadně používány. Magnetický obvod a vinutí jsou základním zdrojem ztrát v podobě tepla v různých částech transformátoru. Generovaná teplo musí být rozptýleno v izolaci, aniž by překročilo kritickou hranici, při které dochází k zhoršení funkčnosti nebo poškození. Pokud pracuje izolace dlouhodobě ve zvýšené teplotě, podléhá zrychlenému

stárnutí a ztrácí své izolační vlastnosti. Celkově tak snižuje účinnost, spolehlivost a životnost transformátoru.

Maximální teplota oleje a vinutí závisí na teplotě okolí, designu, zatížení a provedení chlazení.

2.4. Provozní charakteristiky

2.4.1. Chod naprázdno

Na jedno vinutí je přivedeno napětí a druhé, z pravidla vinutí nižšího napětí, zůstává rozpojené. Proud naprázdno bývá jen 0,2 až 2 procenta jmenovitého proudu. Pro větší transformátory jsou tato procenta nižší. Rozptylová impedance je mnohem menší než hlavní a tedy úbytek napětí na odporu a reaktanci části nižšího napětí je zanedbatelný oproti jmenovitému napětí. Vstupní výkon změřený wattmetrem obsahuje ztráty v železe a ztráty v odporu primárního vinutí. Pokud je proud naprázdno 1 % jmenovitého proudu při plném zatížení, pak jsou ztráty v odporu primárního vinutí 0,01 % ztrát při zatížení jmenovitým proudem. Tedy ztráty ve vinutí jsou zanedbatelné oproti ztrátám v železe. Ztráty naprázdno se dají vyjádřit:

$$P_c = V_1 I_0 \cos \varphi_0 \quad (12)$$

Tyto ztráty jsou důležitým parametrem a při výběru transformátoru se pečlivě sledují.

2.4.2. Chod nakrátko

Jde o ustálený stav, kdy je na primární vinutí připojeno vstupní napětí a sekundární vinutí je zkratováno. Příčná větev má mnohem větší impedanci než podélné větve a tedy lze zjednodušit výpočet. Impedance nakrátko lze tedy vypočítat:

$$\begin{aligned} R_k &= R_1 + R_2' \\ X_k &= X_{1\sigma} + X_{2\sigma}' \\ Z_k &= R_k + X_k \end{aligned} \quad (13)$$

Impedance naprázdno je řádově větší a tedy lze odvodit, že proud nakrátko je větší než naprázdno. Poměrná impedance nakrátko je rovna poměrnému napětí nakrátko, které je přibližně (0,04 – 0,13), pro transformátory VVN je větší.

$$Z_k = \frac{Z_k}{Z_n} = \frac{Z_k \cdot I_N}{Z_n \cdot I_N} = u_k \quad (14)$$

Napětí nakrátko $U_k = Z_k \cdot I_N$ je napětí na vstupních svorkách při jmenovitém proudu. Proud nakrátko je 8 až 25 krát větší než jmenovitý $I_k = \frac{U_n}{Z_k}$. Chod nakrátko není obvyklý pro transformátor, a proto se považuje za poruchový chod. V chodu nakrátko značně vzrůstají rozptylové magnetické toky, čímž se zvyšují ztráty, nejvíce ztráty vířivými proudy.

2.4.3. Úbytek napětí a účinnost

2.4.3.1. Úbytek napětí

Elektrické přístroje a aplikace fungují nejlépe při jmenovitém napětí, proto je důležité, aby velikost výstupního napětí bylo v určitém limitu při různém zatížení. Regulace napětí je důležitá funkce transformátoru, protože určuje kvalitu dodávaného napětí. Pro určitou zátěž se vypočítá jako změna napětí při odebrání zátěže (zapojení naprázdno), vyjádřeno v poměru k napětí naprázdno.

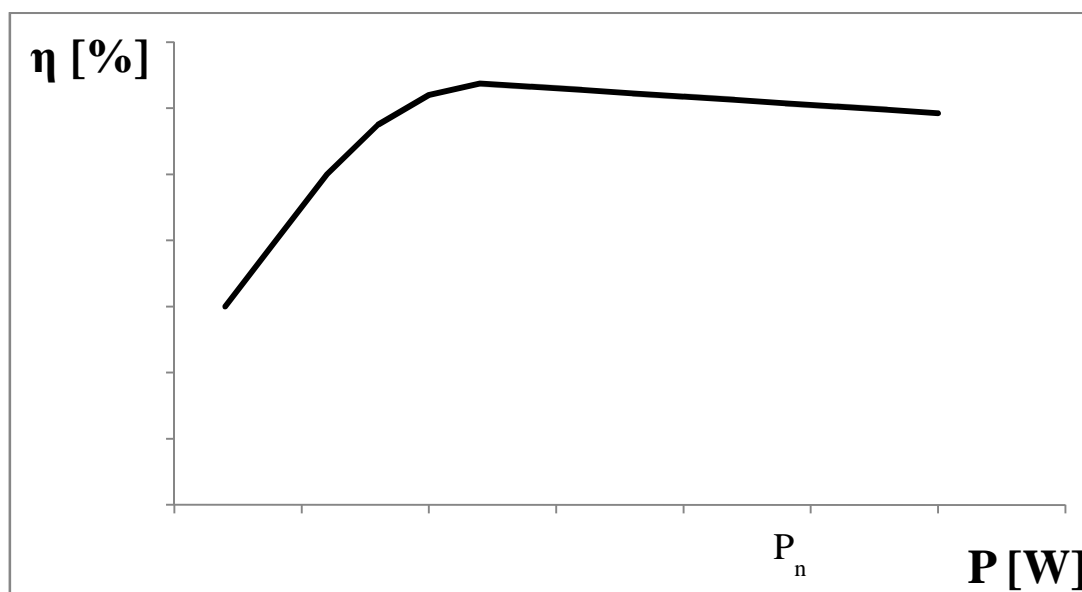
$$\Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} = \frac{U_{1N} - U_2}{U_{1N}} \quad (15)$$

Velikost celkového úbytku napětí zatíženého transformátoru lze určit z fázorového diagramu.

2.4.3.2. Účinnost

Účinnost je jeden z nejdůležitějších parametrů každého stroje. Jako u všech elektrických strojů se vyjádří poměrem výstupní a vstupní energie. $\eta = \frac{\text{výstupní energie}}{\text{vstupní energie}}$. Účinnost se

pohybuje nejčastěji mezi 95 a 99 %, u velkých transformátorů může být až 99,7%. Jelikož se může vyskytnout chyba při měření vstupní a výstupní energie, a tak se určuje pomocí ztrát naprázdno a nakrátko $\eta = \frac{\text{výstupní}}{\text{výstupní+ztráty}} = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi + P_c + P_j}$. Zatížení může mít vliv na vzájemný tok, ale ten je zanedbatelný oproti ztrátám naprázdno. Tedy se dá říci, že účinnost je nezávislá na zatížení. Lze odvodit, že funkce má maximum, když se ztráty ve vinutí se rovnají ztrátám naprázdno. Závislost účinnosti na výkonu má průběh jako v grafu (5) Největší účinnost má transformátor přibližně při polovině jmenovitého výkonu.²²



Obr. 5 závislost účinnosti na výkonu

2.4.4. Hluk

Transformátor musí splňovat hygienické normy, které určují hladinu akustického výkonu zařízení. Proto již při výběru transformátoru je třeba zjistit nedostatky a případně zajistit opatření pro splnění norem. Emise hluku transformátoru je závislá na typu transformátoru, chlazení, rozměrech a akustické pohltivosti vnitřních povrchů. Je potřeba diagnostikovat, kde je emise hluku nejvyšší (větrání, konstrukce) a snížit ji nebo odstínit.

Hlavním zdrojem hluku v samotném transformátoru je magnetické jádro, kde magnetické síly způsobují vibrace, které se pak šíří chladícím olejem a konstrukcí do otevřeného prostoru. Nejhluchnějším prvkem chladicího systému jsou ventilátory, u nichž je hluk závislý na velikosti lopatek a rychlosti otáčení. Hluk tedy roste z výkonem chlazení

²² Doc. Ing. Petr Voženílek, Csc, Doc. Ing. Vladimír Novotný, Csc, Doc. Ing. Pavel Mindl, Csc
Elektromechanické měniče. České vysoké učení technické v Praze, 2011

3. Transformátory v praxi

3.1. Základní princip

Všechny transformátory VVN v praxi jsou objednávané na zakázku, nejčastěji formou veřejné zakázky, kde se určí základní požadované parametry. Výrobci poté nabízejí vlastní produkty s ohledem na jejich technologie a cenu. Důvodem ke koupi transformátoru je nejčastěji konec ekonomické životnosti stávajícího transformátoru, méně často pak navýšení kapacity nebo porucha.

V praxi se používají především autotransformátory, které se liší v provedení vinutí, které je z určité části společné pro primární i sekundární okruh. Zjednodušeně jej lze popsat jako cívku s odbočkami na vstupní a výstupní napětí, kdy společnou částí teče snížený proud $I_1 - I_2$. Díky tomu se na konstrukci spotřebuje méně materiálu, zvláště pak nákladné mědi. Ušetřený materiál na vinutí, izolaci a magnetickém jádře nejen snižuje pořizovací cenu, ale i hmotnost, což značně zjednodušuje dopravu a instalaci zařízení.

3.2. Technické parametry

Technické parametry jsou omezeny použitými materiály a technologiemi. Udávaných parametrů je celá řada, každý jiné důležitosti.

3.2.1. Základní parametry

- Jmenovité převod
- Jmenovitý výkon
- Spojení
- Jmenovitý kmitočet
- Způsob uzemnění soustavy
- Nejvyšší napětí při jmenovitém výkonu
- Nejvyšší napětí při zatížení 20 % nad jmenovitý výkon
- Proud naprázdno
- Napětí nakrátko vztažené na jmenovitý výkon 350 MVA pro jmenovitý převod
- Havarijní přetížení jmenovitého výkon

3.2.2. Klimatické parametry

Jak už bylo řečeno, životnost transformátoru je závislá na teplotě, proto je třeba předem určit, v jakém místě bude instalován a zjistit jaké jsou místní klimatické podmínky, extrémní atd. Každý transformátor má předem určené limity, v jakých může pracovat.

- Maximální teplota okolního vzduchu
- Maximální průměrná teplota okolního vzduchu během 24 hodin
- Minimální teplota okolního vzduchu
- Maximální tloušťka ledu nebo námrazy s hmotností
- Maximální tlak větru
- Maximální nadmořská výška

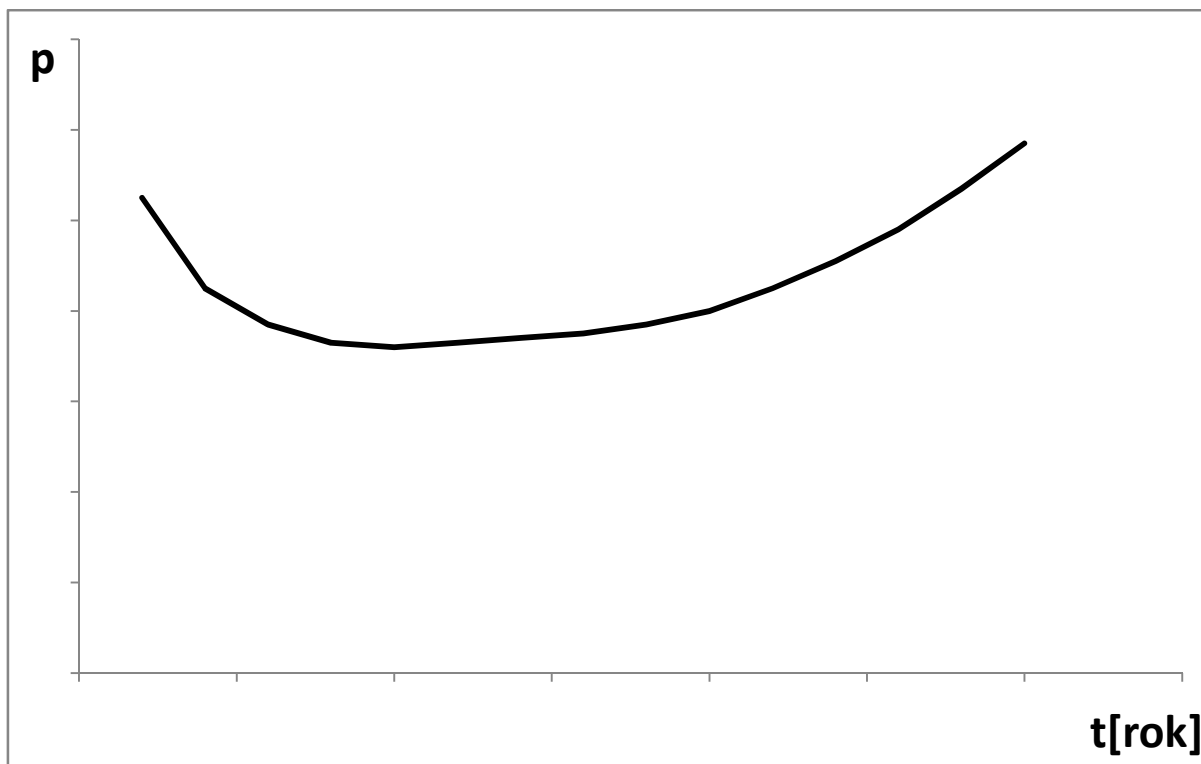
3.2.3. Ztráty

Tyto parametry jsou součástí výpočtů pro řízení rizik a návratnosti investice. Započítávají se do provozních nákladů.

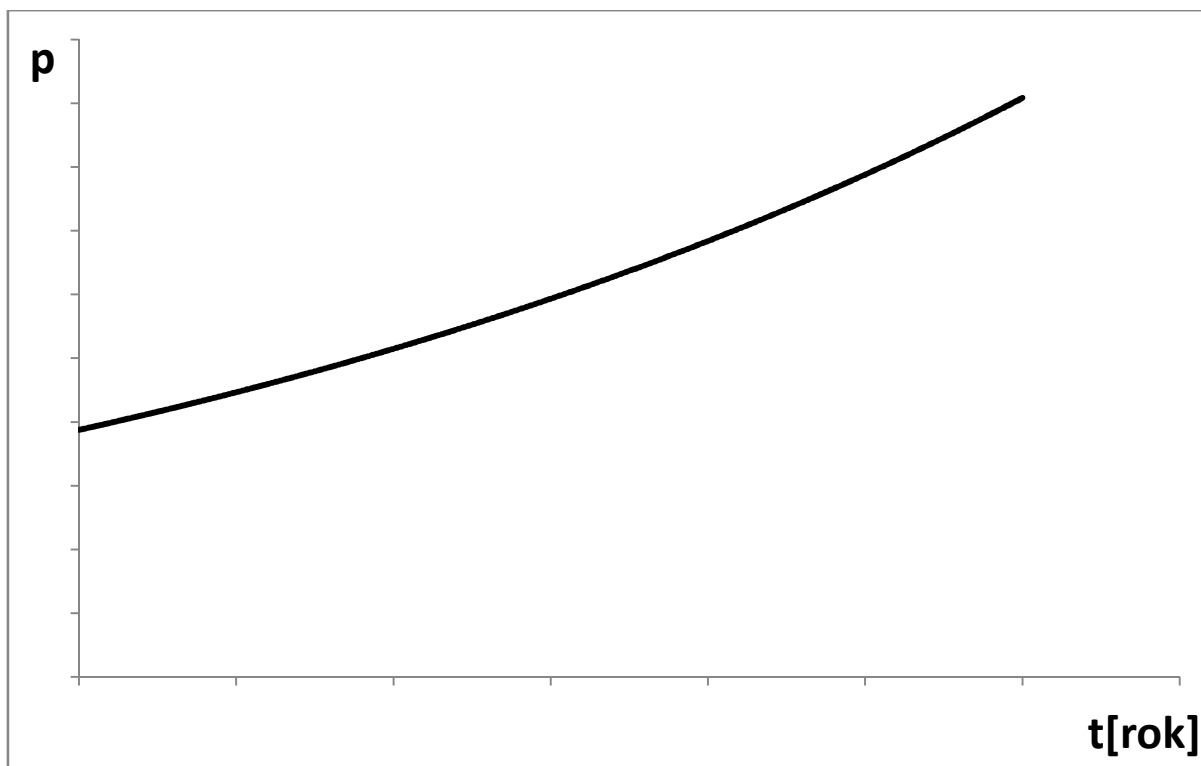
- Ztráty naprázdno
- Ztráty nakrátko
- Ztráty na vlastní spotřebě, které způsobí chladiče nutné k provozu při jmenovitém zatížení transformátoru

3.3. Křivka poruchovosti

Životnost není přímo omezena, ale aby mohl být transformátor provozován, musí splňovat bezpečnostní parametry, a protože není kromě izolace provozem znatelně degradován jeho mechanický stav, je nejčastěji důvod k výměně ekonomický. Pro finanční analýzu se používá kromě investičních nákladů a odpisů také míra poruchovosti zařízení.



Obr 6a) křivka poruchovosti v závislosti na čase



Obr 6b) křivka poruchovosti v závislosti na čase proložená exponenciálou

Křivka poruchovosti se mění v čase t , počítá se v letech od pořízení transformátoru až po jeho odstavení, které je přibližně 30 let. Po instalaci je frekvence poruch větší, než se chod ustálí, pak jsou poruchy méně časté. Náklady vzrůstají až stářím transformátoru a rostou

exponenciálně. Proto má křivka vanovitý tvar jako v obr. 6a). Pro lepší práci s grafem se prokládá exponenciální křivkou jako v obr 6b) a tím se dají porovnávat transformátory mezi sebou a lépe se matematicky zpracovávají. Tato poruchovost je základem pro výpočty řízení rizik.³

³ *Metodika řízení rizik. ČEPS a.s., výňatek SM/83 Příloha č. 4*

4. Ekonomické parametry

Na transformátor se z ekonomického hlediska nahlíží z pohledu nákladů, jelikož je poměrně obtížné rozdělit tržby za přenos na jednotlivé prvky. Hledá se alternativa s nejnižší hodnotou výdajů. Pro ohodnocení investice se používá čistá současná hodnota (NPV), která sleduje vývoj nákladů v průběhu života transformátoru až do konce jeho ekonomické životnosti. Do nákladů na provoz se započítávají revize, ztráty, cena nepřenesené energie a náklady na poruchy. S věkem transformátoru rostou provozní náklady. Pomocí čisté současné hodnoty je možné určit ekonomická životnost.

$$NPV = C_p + \sum_{t=1}^{T_e} N_{pt}(1+r)^{-t} \pm \frac{L}{(1+r)^{T_e}} \quad (16)$$

C_p je pořizovací cena (hodnota investice)

N_p jsou náklady na provoz

L je cena likvidace

T_e je ekonomická životnost

4.1. Řízení rizik

Je založeno na ocenění potenciální míry rizika spojeného s provozem transformátoru. Na této potenciální míře rizik se v případě transformátoru podílí čtyři ohodnotitelné složky (v rámci celého systému řízení rizik se sledují i další rizika spojená nejen s provozem zařízení, která nejsou uchopitelná matematickým nástrojem, a proto nejsou prokazatelně převoditelná do finanční roviny):

- Cena „nepřenesené“ energie N_v , tento údaj je velmi těžko sledovatelný a v případě transformátorů je zaveden etalon, kdy v případě poruchy se nepřenáší výkon o hodnotě 0,75 instalovaného výkonu po dobu T_e , která odpovídá době nalezení optimálního řešení nastalé situace a změny konfigurace zapojení dispečerským zásahem. Výpočet pro finanční ohodnocení nepřenesené energie je komplikovaný a vychází z křivky poruchovosti. Výpočet zahrnuje všechny obnovované prvky a ne jen transformátor

$$N_v = C_e(i) \cdot \left\{ \sum_j f_j(i) \cdot \left(\sum_k W_{nk}(i) \cdot D_k(i) \right) \right\} \quad (17)$$

C_e je cena nepřenesené/nedodané energie v roce i

Σf_j je součet četnosti poruch všech j obnovovaných prvků v roce i

W_{nk} je hodnota nepřenesené energie na k přenosových objektech, u kterých dojde k nepřenesení energie v důsledku poruchy prvku j v roce i

D_k je koeficient důležitosti k přenosovým objektům, u kterých dojde k nepřenesení energie v důsledku poruch prvku j v roce i

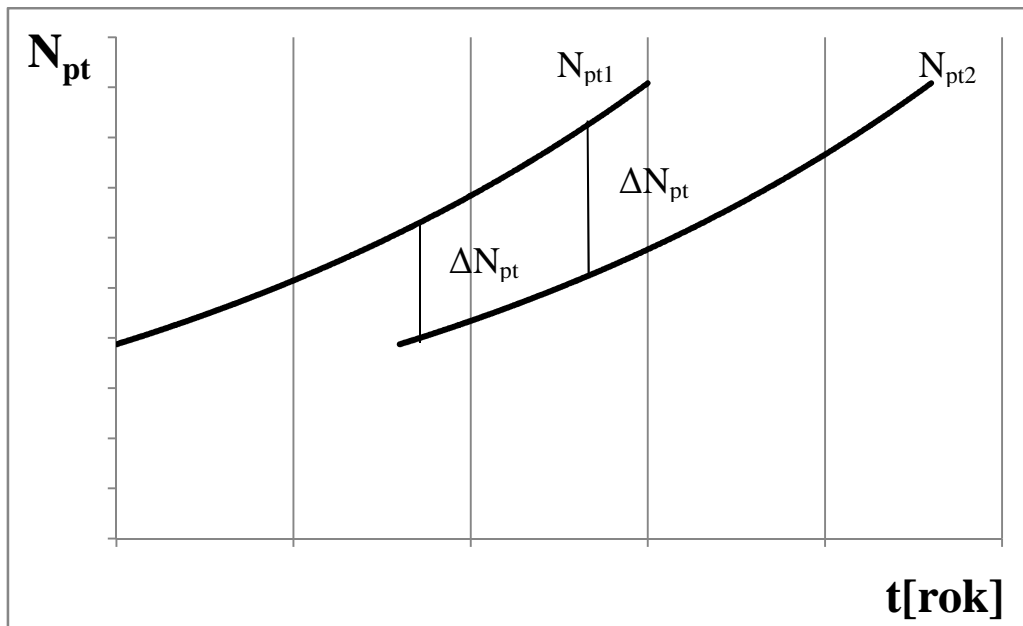
- Ohodnocení nákladů na opravy vzniklé v důsledku poruchy prvku N_{ot} . Vychází z křivky poruchovosti a určuje se z přímých nákladů na opravy způsobené poruchou
- Ohodnocení dopadů ekologických rizik N_{eko}
- Ohodnocení dopadů požárních rizik N_{po}

Náklady ekologických a požárních rizik také vycházejí z křivky poruchovosti a frekvence poruch, jejímž následkem je požár nebo ekologická havárie. Opět zahrnuje přímé náklady na likvidaci havárie.⁴

4.2. Porovnání nákladů

Z řízení rizik a křivky poruchovosti získáme nákladovou analýzu transformátorů, a poté se dá najít ekonomicky nejvýhodnější alternativa.

⁴ Metodika řízení rizik. ČEPS a.s., výňatek SM/83 Příloha č. 4



Obr. 7 Náklady na provoz transformátoru během života. Porovnání nového a starého stroje

V grafu jsou křivky poruchovosti dvou transformátorů. Sleduje se rozdíl nákladů ΔN_{pt} mezi starým už běžícím transformátorem a transformátorem novým. Investice do nového transformátoru je realizována na základě přínosů ze systému hodnocení rizik v přenosové soustavě a úspor za nepřenesenou energii.

4.3. Likvidace/odprodej stávajícího transformátoru

Pokud dosáhne transformátor konce své ekonomické či technické životnosti, je třeba ho řádně podle zákona a norem odstranit. Vlastník je povinen ekologicky recyklovat transformátor podle platných norem, nebo dohlédnout na recyklaci. Běžnou praxí je starý transformátor prodat jako funkční zařízení. To sice není použito pro chod v soustavě, ale materiály se dají dále použít. V případě prodeje i likvidace na vlastní náklady se započítává do hodnoty investice.

4.4. Ekonomická životnost

U každého přístroje je snaha maximalizovat zisk. Jelikož jsou výnosy konstantní, hledá se optimum pomocí minimalizování výdajů, které s věkem rostou. Snížení výnosů z důvodu poruchy se přepočítává do nákladů za nepřenesenou energii, které jsou uvedeny v kapitole řízení rizik. Při výpočtu je potřeba přepočíst cenu na současnou hodnotu v době

ekonomické životnosti T_e pomocí konstantního diskontu r . Hledanou hodnotou je ekonomická životnost T_e , podle které se vzorec optimalizuje.

$$a_{T_e} \cdot \{ [C_p \pm ZC_{T_e} \cdot (1+r)^{-T_e}] + \sum_{t=1}^{T_e} [(N_{pt} + N_{ot})(1+r)^{-t}] + E(N_v + N_{po} + N_{eko}) \} = MIN \quad (18)$$

a_{T_e} je annuita za období T_e

C_p je pořizovací cena

ZC_{T_e} je cena likvidace/odprodeje transformátoru

T_e ekonomická životnost v letech

t čas v letech

N_{pt} jsou náklady na provoz

N_{ot} jsou náklady na opravy z důvodů poruch

$E(x)$ je současná očekávaná hodnota stochastické veličiny x za období T_e ⁵

⁵ Prof. Ing. Oldřich starý, Csc., *Účetnictví a finance* [Prezentace PowerPoint], Praha Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2011

5. Monitoring

Transformátor je základní složka celé přenosové soustavy a nejdražší část rozvodny. Se svým nízkým středním časem mezi poruchami je považován za nejspolehlivější zařízení. Stárnutí a rostoucí zatížení zvyšuje pravděpodobnost poruchy, které mohou vést k neplánované odstávce tedy k velkému narušení provozu systému. Výměna za náhradní jednotku může být dokončena během týdne, avšak výměna za novou jednotku může trvat déle než rok.

Pro snížení rizika neplánované poruchy se používá monitoring, který průběžně vyhodnocuje aktuální stav transformátoru a provozní podmínky. Správně fungující monitorovací systém by měl poskytnout informace o vznikající poruše a odhalit ji dříve, než k ní dojde. Je potřeba zdůraznit, že monitoring není ochrana před havárií, ani jejími následky. Jeho účelem je informovat dispečera na hrozící nebezpečí a ten pak sám musí rozhodnout, jak situaci řešit.

Online provoz těchto metod zjišťuje anomálie, identifikuje problém a vyhodnocuje vážnost stavu. Pro přesnost informací musí být na výběr mezi výsledky z různých metod. Aktivní části transformátoru mají několik podsystémů, které jsou designované a testované, aby udržely elektrický a tepelný systém v operační hladině, díky tomu může spolehlivě pracovat. Transformátory, jakož to jedno z nejspolehlivějších zařízení běžně fungují celý život bez nehody a tedy by bylo zbytečné instalovat externí monitorovací systém, který by v tom případě ukazoval konstantní hodnoty. Ekonomická optimalizace vyžaduje, aby jako první vlna ochrany bylo provedené jednoduché měření pro zjištění primárních problémů a složitější diagnostické metody budou aplikovány na jednotkách se zvýšeným rizikem havárie.

Pro dostatečné informace se používají následující metod:

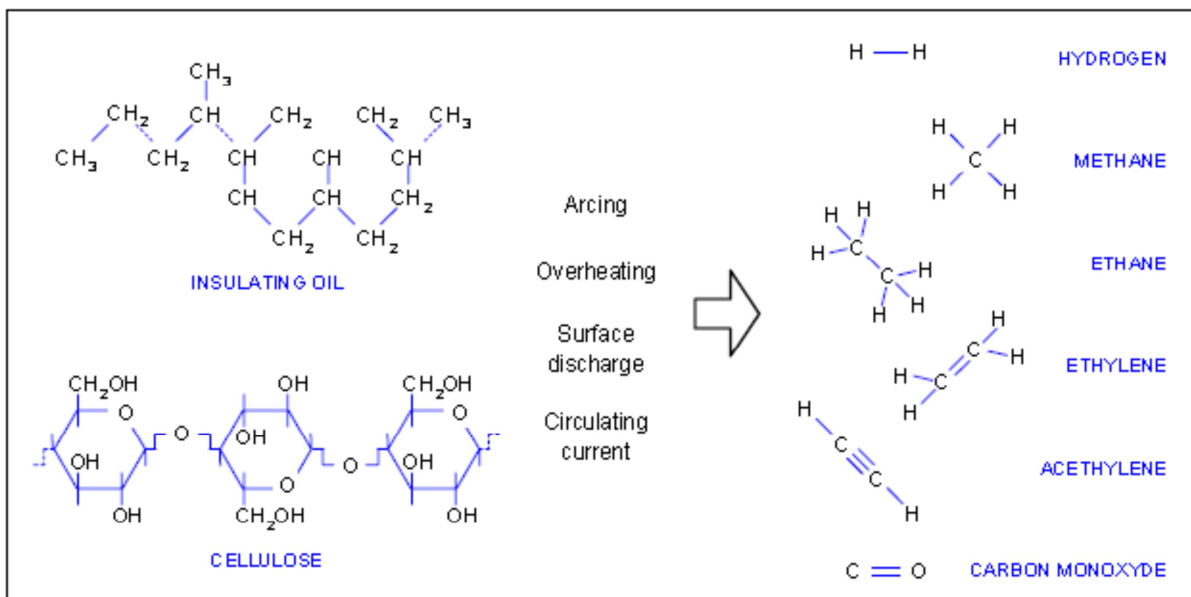
- Měření izolačního odporu
- Měření ztrátového činitele
- Měření částečných výbojů
- Měření a analýza polarizačního spektra
- Zjišťování veličiny C_2/C_{50}
- Metoda frekvenčních charakteristik
- Měření odporu vinutí
- Kondenzátorové průchodky, měření ztrátového činitele a kapacity v provozu

- Stanovení celkového obsahu plynů rozpuštěných v oleji
- Vícenásobná vakuová extrakce s Toeplerovou vývěvou
- Vakuová extrakce při metodě částečného odplynění
- Stripovací extrakční metoda
- Metoda analýzy plynů absorpční plynovou chromatografií
- Metoda stanovení 2-furfuralu a jemu příbuzných sloučenin
- Metoda stanovení průměrného polymerizačního stupně (pps) pevné izolace na bázi celulózy⁶

5.1. Monitoring izolace

Jeden z nejdůležitějších úkolů monitoringu je analyzovat stav oleje a celého izolačního systému, který je, jak už bylo řečeno, nejporuchovější část transformátoru. Hlavním důvodem pro používání monitorovacího systému je proces stárnutí izolace. Proto mimo včasného zjištění poruchy má také za úkol stanovit poškození izolace způsobené stářím. Izolace je kombinace impregnovaného celulózového papíru a oleje. Pokud je izolace vystavena vysoké teplotě nebo elektrickým výbojům, chemické složení se naruší a vytvoří se nové, jak je naznačeno v obr. 7. Tím se tvoří různé plyny. Jakékoliv problémy vzniklé v izolaci vinutí, spojích nebo v jádře zvyšuje výskyt přehřívání a výbojů. V případě, že dojde k nebezpečným změnám, monitoring upozorní dispečera na problém, který se vyvíjí v izolaci. Složení jednotlivých plynů určí, o jaký druh problému se jedná. Úkolem monitoringu je zachytit tyto problémy v raném stádiu, aby se mohli včas odstranit za minimální náklady.

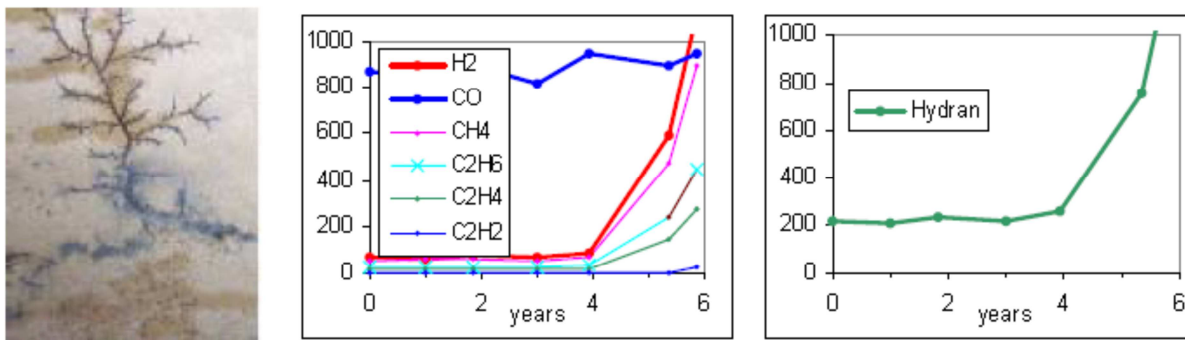
⁶ Miloš Hammer, Jakub Ertl, Oldřich Barvenčík, David Kutálek, *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů 2. Část*, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2011



Obr. 8 Narušení chemických vazeb v oleji, zdroj [6]

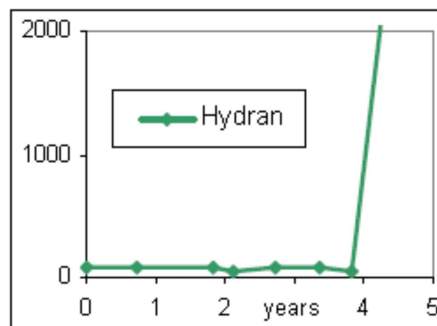
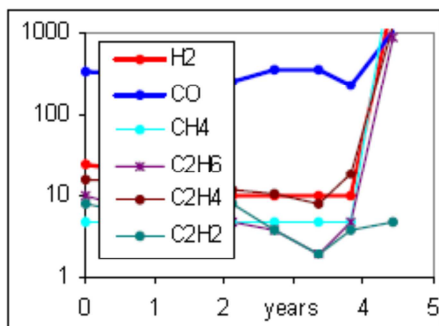
Analýza rozpuštěných plynů v oleji je nejznámější způsob monitorování transformátoru a diagnostiky. Po více než 40 let bylo běžnou praxí odebrat ročně vzorek oleje a poslat ho do laboratoře na plynovou chromatografii. V rané fázi vývoje poruchy, jsou tyto plyny vytvářeny v malém množství a jsou měřeny v částicích na milion (ppm). Různé plyny mohou být vytvořeny, v závislosti na typu poruchy. Druh a vážnost poruchy se určuje z poměru plynů a úrovní jejich tvoření. Nejběžnější druhy selhání jsou srovnávány s běžnou úrovní plynů vytvářených v každém jednotlivém případě.

Vlhkost vnikající do transformátoru má tendenci shromažďovat se ve větším množství v chladnějších částech izolace, tedy v dolní části transformátoru. Blízkost konců vinutí vytváří silné elektrické pole u těchto součástí. Vlhkost snižuje elektrickou pevnost a může podporovat výskyt elektrických výbojů v papírové izolaci a může tak dojít k přeskoku. Elektrické výboje malé energie vytváří převážně vodík (H₂) a metan (CH₄).



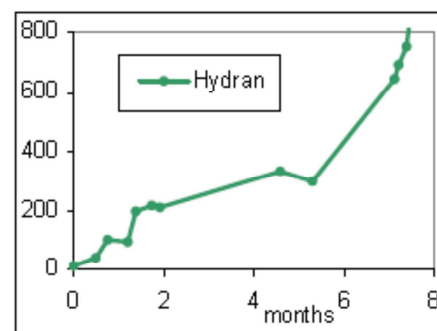
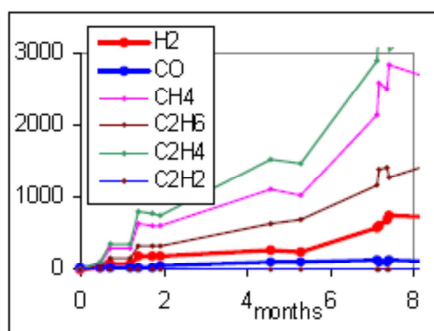
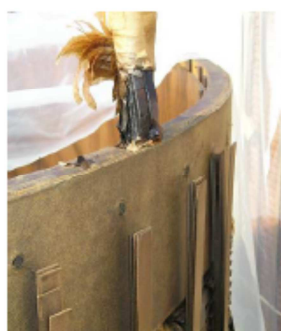
Obr. 9 Narušení chemických vazeb v oleji způsobené vlhkostí, zdroj [6]

Jádro transformátoru je izolováno od nádoby a magnetického pole. Narušení této izolace může vést k oběhovým proudům v jádře a k lokálnímu přehřívání. Tyto defekty převážně vyrábí etylen (C_2H_4) a metanu (CH_4), ale také značné množství vodíku (H_2).



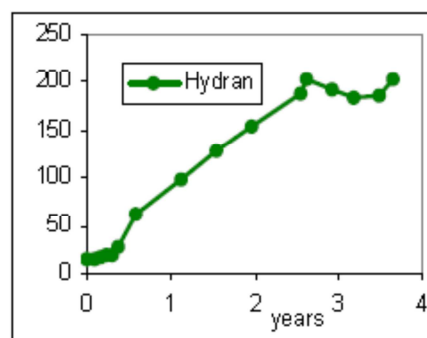
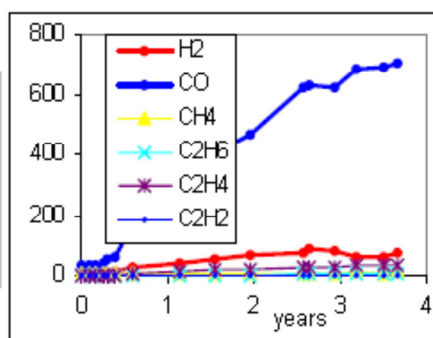
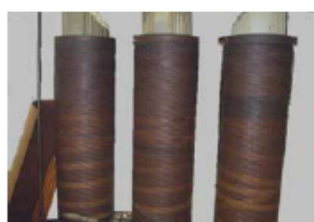
Obr. 10 Narušení chemických vazeb v oleji způsobených narušením izolace mezi jádrem a nádobou, zdroj [6]

Degradace zvlněných a pájených spojů mezi pevným vinutím a pružným kabelem vede k lokálnímu přehřátí, kde se nejdříve tvoří CO_x a později především (C_2H_4) a metan (CH_4).



Obr. 11 Narušení chemických vazeb v oleji způsobených degradací spojů, zdroj [6]

Opakované přetížení nebo nedostatečné chlazení může vést k přehřívání izolace vinutí, tedy termální degradaci izolačního papíru. Tento druh poruchy generuje hlavně oxidy uhlíku (CO_x). Tato degradace je nevratná a ukončuje život transformátoru.



Obr. 12 Narušení chemických vazeb v oleji způsobené nedostatečným chlazením, zdroj [6]

Tyto příklady ukazují několik plynů, které mohou být tvořeny a jsou generovány ve značném množství. Proto jsou používány jako první a často i klíčovou indicií pro odhalení vyvíjející se poruchy v izolaci.

Pro správný výběr on-line sledování pro transformátor je potřeba rozlišit zjištění a diagnostiku poruchy. Tento rozdíl se dá analogicky vysvětlit na přístupu k zdravotním problémům lidského těla: Symptomy → Diagnostika → Léčba. První krok je zachytit symptomy, tedy zaznamenat abnormální stav, přitom je potřeba rozlišit, zda je stav normální, či ne. Druhým krokem je diagnostika problému a určování druhu, vážnosti a odstranění poruchy.

5.2. Ekonomický přínos monitoringu

Napříč elektrotechnickým průmyslem je potřeba u každé investice analyzovat náklady a potencionální zisk. Náklady se dají přímo a jednoduše určit, ale přínosy se velmi složitě vypočítávají a díky faktoru pravděpodobnosti se nedají exaktně určit. Vyhodnocení je založeno na statistických hodnotách z množiny transformátorů (např. na území ČR nebo transformátory patřící společnosti provozující přenosovou soustavu), pravděpodobnosti a podmínkách, v jakých jednotka pracuje nebo bude pracovat. Každý transformátor má vlastní index rizika, který se srovnává s ostatními a určuje jak s měřenými daty pracovat. Výpočet indexu je součin z dvou faktorů, pravděpodobnosti (FP) a následků (FN):

$$I_T = FP \times FN$$

Faktor následků se skládá z maximálních pravděpodobných ztrát ohodnocených v peněžních jednotkách a dopad na přenosovou soustavu (spolehlivost, stabilita). Pravděpodobné ztráty obsahují náklady na opravu nebo výměnu a dále náklady spojené s řízením rizik, jako jsou likvidace ekologických havárií, poškození blízkých zařízení, nedodanou energii, ale i případné soudní výlohy a další výdaje spojené s provozem přenosové soustavy. Ztráty se dají vypočítat pro jakýkoli transformátor na základě historických dat a zkušeností, avšak dopad na soustavu je třeba pro každý transformátor určit individuálně podle jeho úlohy v soustavě.

Pro pravděpodobnost poruchy neexistuje žádná vědecká metoda, jak ji exaktně určit. Ani nelze přesně stanovit technickou životnost transformátoru. Lze určit ze seznamu kritických momentů, která vycházejí ze známých podmínek. Každý kritický moment má vlastní

hodnotu. Celkový faktor pravděpodobnosti se pak vypočítá jako součin jednotlivých kritických momentů:

$$F_P = KM_1 \times KM_2 \times KM_3 \dots \times KM_n$$

Následně se dají vypočítat přínosy rozdílem indexu s monitoringem a bez něj.

$$P_M = I_{TM} - I_{TB}$$

Primární výhodou je včasné rozpoznání vznikající poruchy a tedy ušetření nákladů na opravu poruchy a prevence proti fatální poruše zařízení. Sníží se tak provozní náklady a díky plánovaným odstávkám se minimalizuje nedodaná a nepřenesená energie. Pro vyhodnocení ekonomických přínosů monitoringu je potřeba přesně a v plném rozsahu stanovit vývoj a zaznamenání poruchy.⁷

Je nutné rozlišit pomalu se vyvíjející poruchy, které lze zjistit pravidelným ročním odběrem oleje a jeho analýzy. Tento postup má účinnost přibližně 30%. Naopak některé jsou okamžité a nejsou včas zachytitelné žádným on-line monitoringem. Mezitím jsou poruchy, které lze vhodným zařízením včas vyhodnotit a předejít tak následkům. Výsledky tedy nejsou 100%, přibližná účinnost on-line monitoringu je 60 %. Pro přesnější vyhodnocení je dobré rozdělit poruchy na významné a fatální. Druhý druh poruchy obsahuje porušení nádoby, oheň a následné poškození a kvůli rozdílům v nákladech na opravu musí být uvažovány zvlášť.⁸

5.2.1. Pravděpodobnost

Pro odhad pravděpodobnosti poruchy použijí Bayensovu větu pro podmíněnou pravděpodobnost vzájemně se vylučujících jevů. Budu vycházet z množiny transformátorů rozdělenou do tří skupin podle stavů A, B a C, které odpovídají úrovni poškození. Všeobecná Bayensova věta se dá vyjádřit jako:

$$P(B_j|A) = \frac{P(A|B_j) \cdot P(B_j)}{P(A)} = \frac{P(A|B_j) \cdot P(B_j)}{\sum_i P(B_i) P(A|B_i)} \quad (19)$$

⁷ William H. Bartley P.E., The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, *Life Cycle of Utility Transformer Asset*, Breakthrough Asset Management for the Restructured Power Industry, Salt Lake City, Utah, October 2002

⁸ *Spolehlivost a zabezpečení soustav (A0M15SZS)*, ČVUT Fakulta elektrotechnická, katedra Elektroenergetiky

Budu vycházet z hodnot v tabulce 1. Mohu vypočítat pravděpodobnost:

Stav	A (dobrý)	B	C (špatný)
Poměr (%)	88	10	2
P(F)	1%	3%	5%

Tabulka 1. Zastoupení transformátorů různých stavů

Poměr – zastoupení v množině transformátorů

P (F) pravděpodobnost poruchy

Z ekonomických důvodů by mělo být nejvýhodnější instalovat monitoring do rizikovějších zařízení, proto pro další výpočty budeme uvažovat zařízení ve stavu C, který je považován za rizikový.

$$P(S|F) = \frac{P(F|S).P(S)}{P(F)} = 0,0781 \quad (20)$$

Tím zjistíme pravděpodobnost, že porucha je právě na transformátoru ve špatném stavu. Monitoring by měl tuto pravděpodobnost snížit včasným detekováním stavu a provedením případných opatření. Pro tento příklad budeme předpokládat senzitivitu offline monitoringu 40% a specificitu 90%, tedy že z 90% správně identifikuje poruchu.

Dříve spočtená pravděpodobnost poruchy je $P(F) = 0,0781$ (pro zařízení ve špatném stavu), z toho vyplývá normální stav $P(N) = 0,9219$. Pravděpodobnost detekované poruchy $P(+ | F) = 0,4$ a detekce poruchy při normálním stavu $P(+ | N) = 0,1$. Pravděpodobnost detekce lze tedy vypočítat jako:

$$P(+) = 0,4 \cdot 0,0781 + 0,1 \cdot 0,9219 = 0,1233 \quad (21)$$

Pravděpodobnost, že detekce znamená poruchu, se vypočítá následovně:

$$P(F|+) = \frac{P(+|F).P(F)}{P(+)} = 0,2533 \quad (22)$$

Z čehož vyplývá, že jen přibližně 25 % detekce kritických hodnot znamená poruchu a ze 75 procent se jedná o planý poplach.

Podobně jako ve vzorci (22) lze spočítat pravděpodobnost pro online monitoring, kdy uvažujeme specifickost 60 % a senzitivitu 90 %. V potaz bereme sníženou pravděpodobnost poruchy díky offline monitoringu:

$$P(F) = 0,0469$$

$$P(OK) = 0,9531$$

$$P(+|F) = 0,6$$

$$P(+|OK) = 0,1$$

$$P(+) = 0,0281 + 0,0953 = 0,1234$$

$$P(F|+) = \frac{P(+|F) \cdot P(F)}{P(+)} = 0,228 \quad (23)$$

Ačkoli z toho vyplývá, že monitoring ze 78 % detekuje kritické hodnoty, které nevedou k poruše, přesto se tyto hodnoty dají použít pro další analýzy a případné zefektivnění monitoringu. Zajímavější hodnotou je pro nás snížení pravděpodobnosti poruchy na 1,9 %, z které vychází ekonomická výhodnost monitoringu.⁹

5.2.2. Spolehlivost

Spolehlivost je schopnost přístroje plnit svou funkci po určitou dobu při zachování provozně-technických parametrů a udržet si kvalitu v provozních podmínkách. Vzhledem k předpokladům a historii transformátoru můžeme předpokládat určitou úroveň spolehlivosti, která jde omezeným způsobem zvyšovat zpravidla na úkor nákladů. Proto je třeba vybalancovat tento poměr, protože u investic do spolehlivosti nelze přesně vypočítat přínosy a investice nemusí být vždy výhodná. Mezi základní parametry spolehlivosti patří:

- bezporuchovost
- životnost
- opravitelnost
- udržovatelnost
- bezpečnost

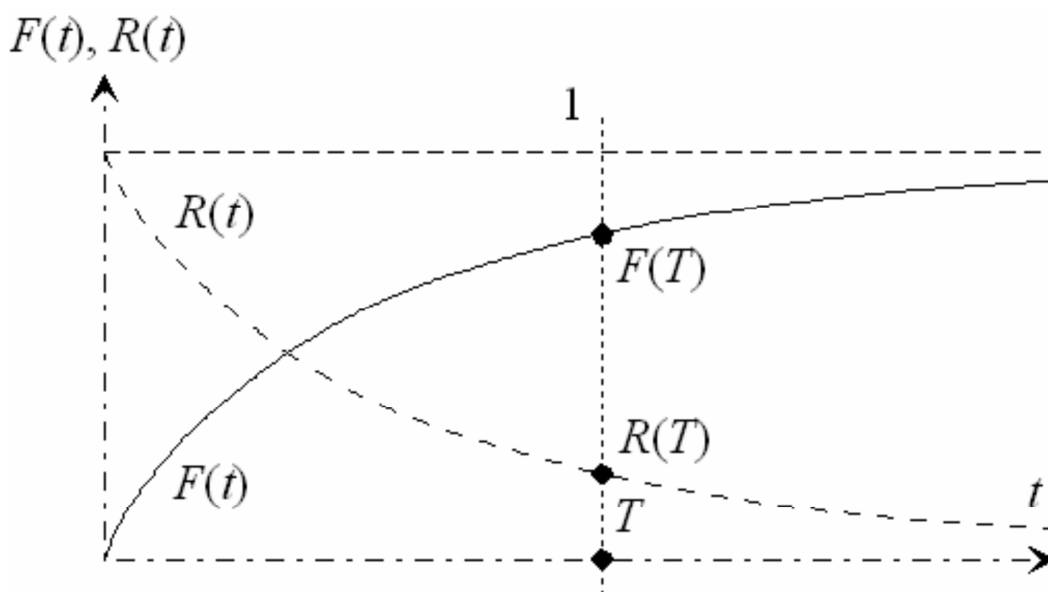
⁹ Pierre Boss, *Economics of Transformer Management*, Cigre, Switzerland

Pro určení spolehlivosti lze použít „dobu do poruchy“. Za předpokladu, že transformátor pracuje od $t = 0$ za podmínek, které se časem nemění, až do doby x , tedy doby poruchy. Pro přenosové transformátory předpokládám, že tato doba je do neopravitelné poruchy, tedy kdy končí jeho životnost a nedá se dále využívat. Distribuční funkce má tvar:

$$F(t) = P(x < t) \quad (24)$$

Tato funkce představuje pravděpodobnost, že v intervalu $(0,t)$ dojde k poruše. Z toho vyplývá vzorec pro spolehlivost:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (25)$$



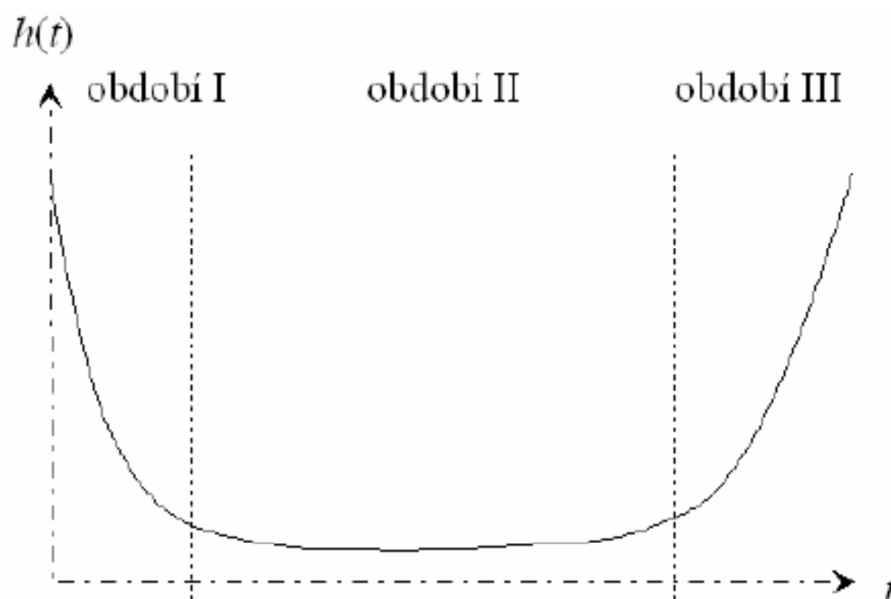
Obr 13. Průběhy funkcí pravděpodobnosti poruchy a spolehlivosti, zdroj [10]

Za předpokladu, že tato křivka je spojitá, lze pomocí derivace podle času určit hustotu poruch:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (26)$$

Poměr hustoty a spolehlivosti vyjadřuje intenzitu poruch a nazývá se rizikovou funkcí.

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{d[\ln(R(t))]}{dt} \quad (27)$$



Obr 14. Průběhy rizikové funkce, intenzita poruch, zdroj [10]

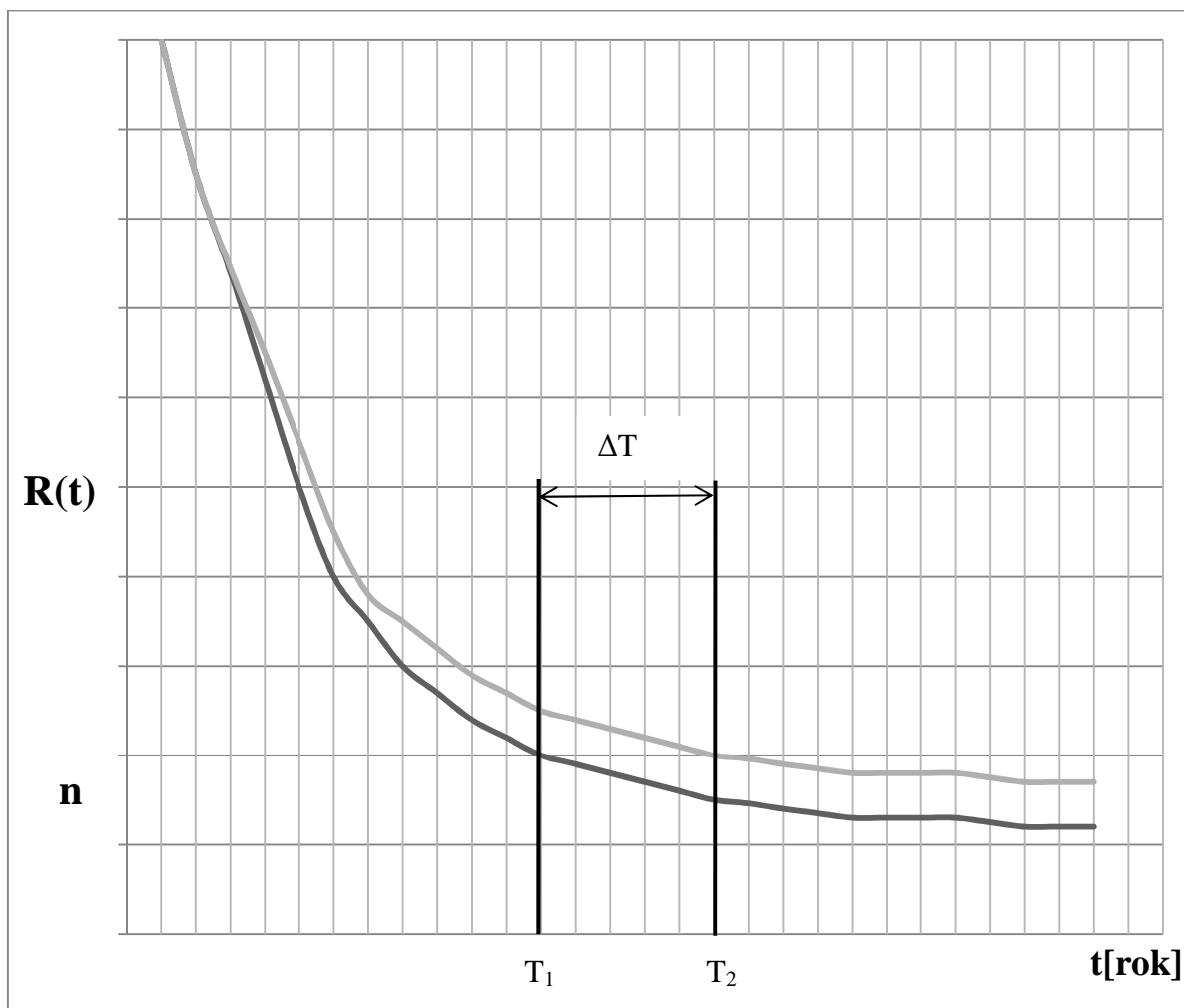
Křivka $h(t)$ má vanový tvar, jak je vidět v obr. 14 a dá se rozdělit do tří částí, kdy v části 1 se jedná o poruchy na začátku provozu, které jsou nejčastěji způsobeny výrobními a montážními vadami nebo chybami v samotném návrhu. Po jejich odstranění nebo přečkání se dostává transformátor do období 2, kdy má nejmenší intenzitu poruch a k poškození dochází nejčastěji z vnějších příčin. V této fázi je provozním zaběhlém stavu. Nárůst poruch v období 3 je způsobeno stárnutím a degradací materiálů. Tato funkce se nedá jednoduše matematicky modelovat a používají se různé funkce v různých obdobích. Funkce $h(t)$ a $F(t)$ mají rozměr $[t^{-1}]$ a v našem případě se udávají v jednotkách 1/rok.

Monitoring má vliv na pravděpodobnost poruchy a tedy snižuje klesání křivky spolehlivosti. Za předpokladu, že transformátor prodělá fatální poruchy při poklesu pravděpodobnosti na zvolenou hodnotu n lze porovnat křivky přístroje s a bez monitoringu. Tím se životnost transformátoru prodlouží na T_2 o ΔT .

Transformátor lze v tuto chvíli považovat za komplexní soubor částí, kdy každá má vlastní spolehlivost. Jelikož může fungovat, jen pokud jsou všechny části provozuschopné, můžeme s nimi pracovat jako se sériově zapojenými prvky. Pak lze vypočítat celkovou spolehlivost jako součin spolehlivostí jednotlivých prvků.¹⁰

$$R = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \dots R_n \quad (28)$$

¹⁰ Spolehlivost a zabezpečení soustav (A0M15SZS), ČVUT Fakulta elektrotechnická, katedra Elektroenergetiky



Obr 15. Prodloužení životnosti na základě vyšší spolehlivosti

5.2.3. Vliv monitoringu na životnost

Aby byla investice do monitoringu rentabilní, je třeba určit, o kolik se sníží provozní náklady a náklady na opravy, ale i nepřenesená energie a další náklady spojené s řízením rizik. Obvykle se započítá cena monitoringu do celkové pořizovací ceny transformátoru a reinvestice se započítávají do provozních nákladů. Monitoring má kratší životnost a tak se musí několikrát za život transformátoru vyměnit. Pro určení výhodnosti lze použít vzorec (18) s připočtením nákladů spojených s monitoringem a analýze změn nákladů na poruchy.

$$a_{T_{eM}} \cdot \left\{ \begin{aligned} & [C_p + C_M \pm ZC_{T_e} \cdot (1+r)^{-T_{eM}}] + \sum_{t=1}^{T_{eM}} [(N_{ptM} + N_{otM} + N_M)(1+r)^{-t}] \\ & + E(N_{vM} + N_{poM} + N_{ekoM}) \end{aligned} \right\} = MIN \quad (29)$$

$a_{T_{eM}}$ je annuita za období T_{eM}

C_p je pořizovací cena

C_{pM} je pořizovací cena monitoringu

ZC_{T_e} je cena likvidace/odprodeje transformátoru

T_{eM} ekonomická životnost s monitoringem v letech

t čas v letech

N_{ptM} jsou náklady na provoz monitoringu

N_M jsou náklady na provoz monitoringu

N_{otM} jsou náklady na opravy poruch

$E(x)$ je současná očekávaná hodnota stochastické veličiny x za období T_{eM}

Pro přesné určení ekonomické efektivity je třeba udělat podrobnou analýzu nákladů a porovnat je s hodnotami provozu bez monitoringu. Hlavní ekonomický přínos je v tom, že se náklady na opravy a provoz nebudou úměrně zvyšovat se stářím transformátoru. Jak už bylo řečeno, monitoring má kratší životnost než transformátor, proto se musí každých pět let měnit. Pořizovací cenu je tedy třeba diskontovat podle roku pořízení.

$$C_M = C_{M1} + C_{M2}(1+r)^{-5} + C_{M3}(1+r)^{-10} + C_{M4}(1+r)^{-15} + C_{M5}(1+r)^{-20} \quad (30)$$

Pokud ohodnotíme přínos z řízení rizik, tedy ušetřené náklady, lze určit čistou hodnotu investice jako ve vzorci (16), kterou je potřeba vypočítat pro transformátor jako celek a určit, kolikrát je potřeba pořídit monitoring během života transformátoru. Za předpokladu, že životnost transformátoru je 25 let a monitoringu 5 let, budeme muset investovat do monitoringu 5 krát.

$$NPV_M = -C_p - C_{M1} + \sum_{s=5,10,15,\dots}^{T_e} \sum_{t=1}^{T_e} \left[\Delta N_{pt}(1+r)^{-t} - \frac{C_{Ms}}{(1+r)^s} \right] \pm \frac{L}{(1+r)^{T_e}} \quad (31)$$

C_p je pořizovací cena (hodnota investice)

C_M je pořizovací cena monitoringu

L je cena likvidace

T_e je ekonomická životnost

ΔN_{pt} je rozdíl provozních nákladů, přínos monitoringu

6. Závěr

V této práci jsem vycházel z technických parametrů závislých na konstrukčním provedení, které se následně projeví v ekonomických parametrech. Nejprve jsem zpracoval metodu řízení rizik, ve které popisuji spolehlivost transformátoru na základě statistických údajů. Z těchto parametrů jsem pak určil ekonomickou životnost, jejíž vzorec byl vystavěn na základě nákladů. Zisk v tomto případě neposkytuje objektivní hodnocení investice, protože transformátor je součástí přenosové soustavy, kde je poměrně složité rozdělit tržby na jednotlivá zařízení. Z toho plyne potřeba minimalizovat náklady. S příchodem lepších technologií se rapidně snížily ztráty a tento pokles zapříčinil velké snížení ekonomické životnosti stávajících transformátorů. Pozornost se poté zaměřila na spolehlivost a efektivnost. S tím je spojeno využívání monitoringu, který by měl provoz zařízení zaznamenávat a poskytovat informace o jeho aktuálním stavu, ze kterého lze nadále optimalizovat provoz. Nejprve bylo třeba vysvětlit, jak monitoring funguje. Monitoring nijak transformátor nechrání ani nepředchází poruchám. Jediným účelem je měřit provozní hodnoty, které se následně vyhodnocují a předávají se dispečerovi, který sám musí rozhodnout, jak v dané situaci pracovat. Včasná informovanost mu tak dává prostor pro vykonání potřebných úkonů a tím předejít v rámci možností poruše, která může mít fatální následky. Pomocí této snížené pravděpodobnosti, jsem na modelu „doba do poruchy“ vyjádřil, jakým způsobem se prodlouží životnost transformátoru. Je třeba poznamenat, že se nejedná o prodloužení životnosti v pravém slova smyslu, jde spíše o zvýšení pravděpodobnosti přežití poruch v závěrečné fázi života zařízení. V závěrečné ekonomické části jsem ve vzorci zohlednil cenu monitoringu a prodloužení životnosti o ΔT a přínosy z rizik jednotlivých monitoringů. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba mít podrobný rozbor nákladů srovnatelných transformátorů s a bez monitoringu.

Použitá literatura a zdroje

- [1] Kulkarni S.V., Khaparde S.A. *Transformer Engineering Design, Technology and Diagnostics Second edition*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2013. ISBN: 978-1-4398-5377-1
- [2] Eugeniusz Jezierski *Transformátory, teoretické základy*. Academia Praha: 1973, z polského originálu přeložil Rudolf Tesař, ISBN: 8320404878
- [3] Doc. Ing. Petr Voženílek, Csc, Doc. Ing. Vladimír Novotný, Csc, Doc. Ing. Pavel Mindl, Csc *Elektromechanické měniče*. České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [4] Prof. Ing. Oldřich starý, CSc. *Účetnictví a finance* [Prezentace PowerPoint], Praha Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2011
- [5] *Metodika řízení rizik*. ČEPS a.s., výňatek SM/83 Příloha č. 4
- [6] J.Aubin, Andre Bourgault, Claude Rajotte, Pierre Gervais, *Power Transformer Life Extension Through Better Monitoring*, GE Energy
- [7] William H. Bartley P.E., The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, *Life Cycle of Utility Transformer Asset*, Breakthrough Asset Management for the Restructured Power Industry, Salt Lake City, Utah, October 2002
- [8] Miloš Hammer, Jakub Ertl, Oldřich Barvenčík, David Kutálek, *Příspěvek k rozboru spolehlivosti výkonových olejových transformátorů 2. Část*, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2011
- [9] Pierre Boss, *Economics of Transformer Management*, Cigre, Switzerland
- [10] *Spolehlivost a zabezpečení soustav (A0M15SZS)*, ČVUT Fakulta elektrotechnická, katedra Elektroenergetiky

Seznam obrázků

1. Princip transformátoru
2. Náhradní schéma
3. Fázorový diagram
4. Hysterezní smyčka
5. Závislost účinnosti na výkonu
6. Křivka poruchovosti, křivka poruchovosti proložená exponenciálou
7. Náklady na provoz transformátoru během života, porovnání nového a starého stroje
8. Narušení chemických vazeb v oleji, zdroj [6]
9. Narušení chemických vazeb v oleji způsobené vlhkostí, zdroj [6]
10. Narušení chemických vazeb v oleji způsobených narušení izolace mezi jádrem a nádobou, zdroj [6]
11. Narušení chemických vazeb v oleji způsobených degradací spojů, zdroj [6]
12. Narušení chemických vazeb v oleji způsobené nedostatečným chlazením, zdroj [6]
13. Průběh funkcí pravděpodobnosti poruchy a spolehlivosti, zdroj [10]
14. Průběhy rizikové funkce, intenzita poruch, zdroj [10]
15. Prodloužení životnosti na základě vyšší spolehlivosti