

MONITOROVACÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ – PROBLEMATIKA, TEORIE, SOUVISLOSTI, OB- VYKLÁ ŘEŠENÍ

Pavel Korbel, TECHSYS – HW a SW, a.s.

Monitorovací systémy transformátorů (MST) patří k řešení, která mohou výrazným způsobem zlepšit efektivitu jejich diagnostiky a následně i provozu, správy a údržby, s pozitivním vlivem na spolehlivost procesů výroby, přenosu i distribuce elektrické energie a také důrazem na zvýšení ochrany investic. Společnost TECHSYS – HW a SW, a.s. vyvinula a svým zákazníkům nabízí dvě základní řešení MST, založené na vlastním matematickém modelu transformátoru. Kombinace tohoto modelu a zpracování celé řady vstupních hodnot – elektrických analogových i stavových veličin, měření teplot i diagnostiky plynů v oleji – vytváříme komplexní on-line obraz o stavu stroje. Dvě základní řešení nabízí dva přístupy k realizaci nejen samotného MST, ale také jeho využití v komplexu funkcí monitorování, řízení a automatizace v procesech energetických společností.

1. ÚVOD

Podnětem k sepsání tohoto článku byl fakt, že se ve společnosti TECHSYS – HW a SW, a.s., touto problematikou zabýváme poměrně již dlouhou dobu. Monitorovací systémy transformátorů a tlumivky jsou součástí našeho portfolia produktů a tróujeme si tvrdit, že naši lidé jsou odborníky na tuto problematiku.

Monitorování zařízení primární technologie v elektroenergetice patří mezi ty funkce, které umožňují zvýšit spolehlivost a kvalitu dodávek elektrické energie, snížit provozní náklady a optimalizovat využití drahé technologie.

Z hlediska spolehlivosti energetické soustavy patří transformátory ke klíčovým prvkům. Pro zajištění jejich bezporuchového provozu má zásadní význam technická diagnostika:

- Off-line diagnostika měření na stroji, který je za tímto účelem dočasně vyřazen z provozu.
- On-line diagnostika, která je prováděna trvale, za provozu zařízení.

Následující text je zaměřen na on-line diagnostiku výkonových transformátorů. K tomuto účelu slouží monitorovací systém, který zajišťuje nejen měření a záznam výsledků, ale zejména včas upozorní na rozvíjející se poruchu v jejím raném stadiu.

Využití prostředků on-line diagnostiky má význam především pro silové transformátory a tlumivky v sítích přenosové a distribuční soustavy, blokové transformátory elektráren, hutní transformátory a důležité napájecí transformátory v průmyslu.

Z hlediska provedení lze monitorovací systémy rozlišit dle rozsahu poskytovaných funkcí:

- Komplexní systémy pro sledování více důležitých částí transformátoru.
- Jednoduché monitory sestávající zpravidla z analyzátoru rozpuštěných plynů v oleji a doplněné měřením základních veličin – teploty oleje a zatížení.

2. ZÁKLADNÍ OSNOVA ČLÁNKU O MST

Komplexní systémy pro sledování více důležitých částí transformátoru

- Popis komplexních MST
- Funkční specifikace
- Systémové řešení
- Technické řešení

Jednoduché monitory

- Základní charakteristika
- Přínosy online monitoringu

- Struktura systému
 - MST Měřené veličiny, přehled vstupů
 - MST Ostatní V/V rozhraní
 - Přehled výpočetních modelů MST
 - Příklady DGA analyzátorů
 - Příklad instalace MST
 - Funkce centrály CSMT
 - CSMT – možnosti řešení
- Příklady prezentace dat MST

2.1. KOMPLEXNÍ SYSTÉMY PRO SLEDOVÁNÍ VÍCE DŮLEŽITÝCH ČÁSTÍ TRANSFORMÁTORU

Komplexní systémy pro sledování více důležitých částí transformátoru jsou určeny především pro velké transformátory přenosové soustavy 400 a 220 kV. Jde o stroje s výkonem stovek MVA. V rámci komplexního systému lze rozlišit tyto úrovně monitorovacích systémů:

- MST – Monitorovací systém transformátoru. Jde o soubor zařízení, která jsou osazena na nádobě transformátoru. Systém provádí základní funkci měření, v některých případech počítá dodatečné veličiny pomocí za tím účelem vyvinutých modelů, archivuje a zjednodušeným způsobem poskytuje data do centrálního monitorovacího systému transformátorů pomocí LAN/WAN.
- CMT – Centrální monitorovací systém transformátoru, který integruje jednotlivé MST do intranetu zákazníka. U jednoduchých MST může být v prostředí CMT realizována také nadstavba využívající data z řídicího systému rozvodny. CMT z hlediska uživatelů unifikuje data z MST různých výrobců a zajišťuje dlouhodobou archivaci dat.

2.1.1. Popis komplexních MST

V této kapitole je jako příklad technického řešení popsán monitorovací systém transformátorů MST TECHSYS v provedení pro transformátory přenosové soustavy.

2.1.1.1. Funkční specifikace

Monitorovací systém transformátorů TECHSYS je určen pro provozní on-line diagnostiku transformátorů a tlumivek. Funkce systému, včetně integrovaných výpočetních modelů, jsou dlouhodobě ověřeny praktickým provozem na transformátorech 400 a 220 kV.

Monitorovací systém průběžně sleduje důležité provozní veličiny transformátoru, stavy zařízení a provádí expertní výpočty. Systém lze upravit s ohledem na charakter monitorovaného stroje a preference zákazníka, řešení lze v řadě případů významně zjednodušit.

Měření a sledování stavů zařízení, výstupy	
Teploty	Teploty oleje v horní a v dolní části nádoby
	Teplota oleje přepínače odboček
	Venkovní teplota
	Teploty oleje vstupů a výstupů chladičů
Elektrické veličiny	Proudy vinutí transformátoru
	Napětí na měřicích vývodech průchodek
Stav a poloha zařízení	Chod čerpadel chladicího systému
	Chod ventilátorů chladicího systému
	Poloha přepínače odboček transformátoru
Rozpuštěné plyny v oleji nádoby (dle analyzátoru)	Vodík / kompozitní hodnota
	CO v oleji
	Vlhkost oleje
	Případně další plyny DGA, je-li osazen přísluš-

	ný víceplynový monitor (Kelman, Serveron,...)
Kontaktní výstupy	Alarmové a ovládací výstupy
Ostatní veličiny	Možnost rozšíření o měření a signalizace

Výpočetní modely	
Zatížení a ztráty transformátoru	Zatížení transformátoru
	Okamžité ztráty transformátoru
	Doba provozu transformátoru
Výpočet stárnutí IEC 60076-7:2005	Hot-spot teploty jednotlivých vinutí (výpočet)
	Rychlost stárnutí transformátoru
	Spotřebovaná životnost transformátoru
Vlhkost izolace Formace bublin	Orientační hodnota vlhkosti papírové izolace vinutí
	Teplota tvorby bublin v oleji
	Rozdíl teploty počátku tvorby bublin a teploty oleje transformátoru
Průchodky	Indikace změn kapacit kondenzátorových průchodek
Chladicí systém	Teplotní spád na chladičích, účinnost chlazení
	Provozní doba čerpadel
	Provozní doba ventilátorů
Přepínač odboček	Poloha přepínače odboček
	Odhad možné míry opotřebení výkonových kontaktů přepínače
	Rozdíl teploty oleje výkonové části přepínače a oleje v nádobě transformátoru
Trendy	Výpočet z vývoje veličin
Alarmy	Překročení mezí hodnot, trendů, doby chodu

2.1.1.2. Systémové řešení

- Centrála monitorovacího systému zpracovává sledované hodnoty, provádí expertní výpočty, dlouhodobě archivuje a agreguje data v SQL databázi.
- Hodnoty z centrály jsou prezentovány na pracovních stanicích v intranetu uživatele.
- Okamžité veličiny a výstupy výpočetních modelů mají podobu přehledných grafických sestav s živými daty.
- Nebezpečné situace jsou indikovány formou nastavitelných alarmů a výstrah, podobně jsou signalizovány změny stavových veličin a překročení uživatelem nastavitelných mezí veličin.
- Historie a trendy jsou zobrazeny formou grafů a tabulek. V grafu lze zobrazit více veličin s různým měřítkem, použít lupu, zobrazit meze. Tabulky lze exportovat do jiného prostředí.
- Sestavy lze tisknout a exportovat do různých formátů.
- Údržbu zjednodušuje vzdálená diagnostika výstroje skříně monitorovacího systému až na úroveň komponenty.

2.1.1.3. Technické řešení

- Centrála monitorovacího systému, včetně měřících a signalizačních vstupů, je umístěna ve skříně na nádobě transformátoru. Ve skříně je zakončena kabeláž čidel, přístrojů a sítě LAN.
- Konstrukce zařízení odpovídá jeho použití ve venkovním prostředí s vysokou mírou rušení.

- Typ analyzátoru plynů v oleji lze zvolit dle aplikace a preference zákazníka. K dispozici jsou jak jednoduché, tak komplexní DGA analyzátoři GE Energy, Kelman, Morgan Schaffer.
- Čidla, snímače, přístroje a kabeláž jsou v provedení vhodném pro montáž na transformátoru.

Rozhraní skříně monitorovacího systému	
Teploty	Čidla PT100, PT1000, 20 mA
Proudy vinutí	Vstupy 1 / 5 A AC Návrkové sondy pro instalaci bez přerušení proudového okruhu Vstupy 20 mA pro převodníky AC / DC
Napětí obecně	Vstupy 100 / 230 V AC Vstupy 20 mA pro převodníky AC / DC
Obraz napětí na průchodkách	Měření prostřednictvím adaptéru připojeného na měřicí konektor průchodky
Signalizace stavu a polohy zařízení	Signalizační napětí 24, 110, 220 V DC, 230 V AC
Kontaktní výstupy	6 A AC / DC
Napájení	110 až 230 V AC / DC
Sériová komunikace	RS232, RS485 s galvanickým oddělením
LAN	Ethernet, optika a metalika

Příklad instalace a řešení komplexního MST na transformátoru 400/110kV 350 MVA



2.2. JEDNODUCHÉ MONITORY

Jedná se o zjednodušené monitorovací systém olejových transformátorů typicky 110/35-22-10kV s výkonem do 100 MVA.

MST je tedy především určen pro transformátory distribuční soustavy.

2.2.1. Popis jednoduchých MST

2.2.1.1. Základní charakteristika

- Typové a cenově zajímavé řešení pro stroje s výkonem desítek MVA

- Jednoduchá instalace na transformátoru (vypnutí transformátoru 1 den)
- Jednoduchá instalace systému, čidel a DGA bez zásahu do nádoby

2.2.1.2. Přínosy online monitoringu

- Včasná indikace hrozící poruchy
- Zvýšení bezpečnosti provozovaných zařízení
- Eliminace nedodávek
- Optimalizace údržby (úspora nákladů)
- Přečhod na stavově orientovanou údržbu
- Prodloužení intervalu odběru vzorků oleje pro chromatografické analýzy
- Optimalizace pravidelných kontrol dle aktuálního stavu stroje
- Zohledňování stáří a opotřebenění strojů v procesech údržby a servisu (významné pro hodně zatížené stroje)
- Uživatelé monitoringu: provozovatelé strojů, servis a údržba, dodavatele strojů (záruční servis).

2.2.1.3. Struktura systému



- MST část na transformátoru: Storm-01 pro monitoring, čidla, DGA
- Integrované modely
- CSMT Twister – archivace, vizualizace dat, alarmy
- Dodávka serveru se SW Twister nebo cloudová služba v TECHSYS

2.2.1.4. MST Měřené veličiny, přehled vstupů

- Teplota oleje v horní a v dolní části nádoby
- Teplota oleje v OLTC
- Poloha přepínače odboček
- Běh regulace přepínače odboček
- Proud vinutí jedna fáze HV
- Chladicí zařízení
- Chod ventilátorů skupina 1, skupina 2

- Přenos měření z DGA analyzátoru (IEC870-5-101/104, DNP3.0 TCP, Modbus RTU, Modbus TCP)
- Analogové vstupy 0-10V/0-20mA a digitální vstupy pro obecné použití

2.2.1.5. MST Ostatní V/V rozhraní

- Připojení na centrálu pro vizualizaci a archivaci CSMT
- ETH
- Mobilní komunikace
- Připojení do systému zákazníka
- ETH IEC870-5-104, DNP3.0 TCP, Modbus TCP
- COM IEC870-5-101, Modbus RTU
- Alarmové výstupy MST
- 2 kontaktní výstupy – Alarm 1, Alarm 2
- Vlastnosti alarmů lze nastavit
- Výstup alarmů na kontakty a do komunikace

2.2.1.6. Přehled výpočetních modelů MST

- Okamžité zatížení a ztráty transformátoru
- Doba provozu transformátoru
- Výpočet stárnutí dle IEC 60076-7 (35 1001)
- Hot spot teplota vinutí
- Rychlost stárnutí a spotřebovaná životnost transformátoru
- Vlhkost papírové izolace vinutí
- Podmínka – DGA měření H₂O v oleji transformátoru
- Teplota formace bublin
- Teplota formace bublin
- Rozdíl mezi hot spot teplotou a teplotou formace bublin
- Doba provozu chladících skupin
- Alarmy
- Překročení mezí, trendů a doby chodu zařízení

2.2.1.7. Příklady DGA analyzátorů

DGA analyzátory jsou přístroje pro měření obsahu rozpuštěných plynů v oleji.

Význam indikace plynů v oleji transformátoru je následující:

- H₂ – elektrická závada
- CO – tepelné namáhání papírové izolace
- H₂O – vlhkost oleje

Zpracování dat z DGA analyzátorů:

- Výpočet trendů vývoje veličin
- Alarmování neobvyklých stavů

MESSKO MSense (H₂, H₂O, CO)



Qualitrol Serveron DGA 150(H₂)



Vaisala MHT 410 (H₂, H₂O)



2.2.1.8. Příklad instalace MST



MST je umístěno v přístrojové skříni transformátoru

Náročnost instalace:

- Vypnutí stroje cca 12 hodin
- 2 pracovníci instalace na stroji cca 8 hodin
- Podmínkou je kvalitní příprava instalace

Technické řešení

- MST Storm-01 je umístěno v přístrojové skříni transformátoru
- 3 ks teploměrů PT100 jsou magneticky uchyceny na nádobě
- Analyzátor plynů v oleji je instalován do jímky na víku nádoby a propojen komunikací s MST Storm-01
- Proud vinutí je měřen pomocí návlkové sondy (bez přerušení proudového okruhu PTP) v přístrojové skříni nebo na transformátoru
- Signalizace jsou získávány z přístrojové skříně
- Anténa mobilní komunikace je umístěna vně skříně
- Napájení MST z přístrojové skříně

2.2.1.9. Funkce centrály CSMT

Dlouhodobá archivace dat (LTA) a agregace v SQL DB po dobu životnosti stroje

Nastavitelné alarmy a výstrahy – nebezpečné situace, změny stavových veličin, překročení uživatelem nastavených mezí, vyhodnocení trendů. Možnost vyslání e-mailu nebo SMS.

Zobrazení historie formou grafů a tabulek. V grafech lze zobrazit více veličin s různým měřítkem, použít lupu, zobrazit meze. Tabulky lze exportovat do jiného prostředí.

Zajištění vzdálené správy MST na transformátorech.

Zobrazování dat uživatelům prostřednictvím Internetu

Zobrazování okamžitých i archivovaných na PC Windows formou schémat, tabulek a grafů

Možnost využití mobilních zařízení

Přístup uživatelů dle oprávnění

2.2.1.10. CSMT – možnosti řešení

Cloudová služba

- Centrála v TECHSYS, provoz 7 x 24
- Přístup uživatelů prostřednictvím Internetu
- Hradí se aktivace a měsíční pronájem

Dodávka serveru pro intranet zákazníka

- Dodávka aplikačního SW včetně HW a instalace
- Možnost instalace aplikačního SW do virtualizačního prostředí zákazníka (MS Windows, Linux)

2.3. PŘÍKLADY PREZENTACE DAT MST

K prezentaci dat slouží pracovní stanice uživatelů v intranetu zákazníka. Dále jsou uvedeny vybrané sestavy s živými (okamžitými) provozními hodnotami a grafy průběhu hodnot.

Přístup k MST z klientských PC stanic uživatelů

- Zobrazení živých sestav
- Pokročilá práce s alarmy
- Pokročilé možnosti práce s archivovanými hodnotami (grafy, tabulky, exporty dat)
- Poskytování dat systémům uživatele

Online zobrazení hodnot MST na mobilních telefonech.

Vyslání SMS nebo e-mailu při vzniku mimořádného alarmu.

TRAFO ZAP

alarm	druh veličiny	mez
	Elektrické veličiny	
	Přepínač odboček	
	Teploty	
	Chlazení	
	Plyny, vlhkost v oleji	
	Ostatní veličiny	
	Deník	
	Alarmy	
	MST	
doba provozu [hod]	67 137,1	87 600
spotřeb.životnost za rok [hod]	0,6	150
rychlost stárnutí IEC	0,002	
<div style="display: inline-block; background-color: red; color: white; padding: 5px; margin-right: 20px;">Výstraha MST</div> <div style="display: inline-block; border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #f0f0f0;">MST mimo provoz</div>		



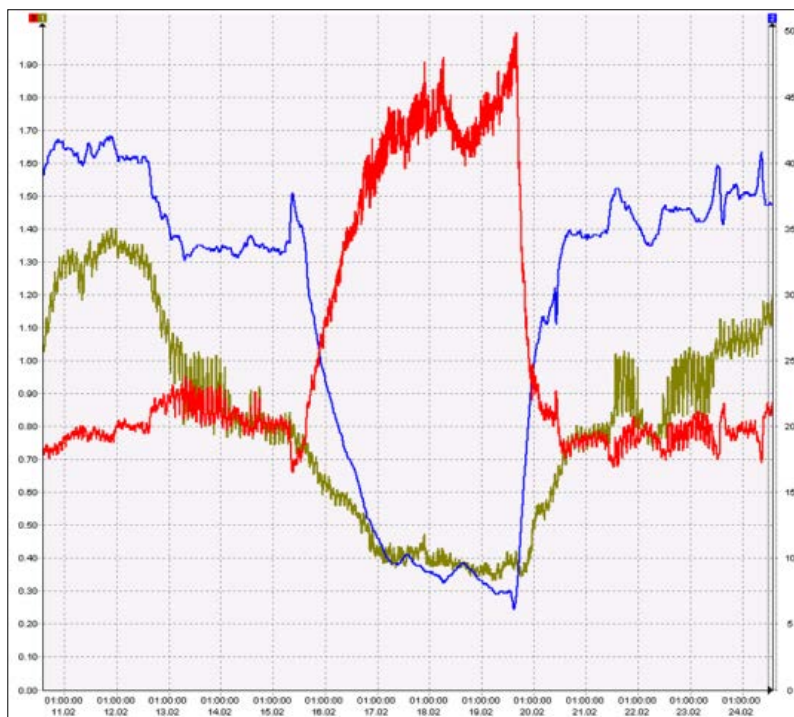
Odpojit

Okamžité hodnoty hlavních sledovaných veličin

Přehled	Přepínač	Teploty	Modely	Ostatní	Chlazení	Servis
HV U [kV] mez I [A] mez L1 415,0 440 180,8 600 L2 415,4 440 180,5 600 L3 415,6 440 177,6 600		LV U [kV] mez I [A] mez L1 119,2 130 622,4 2 000 L2 119,3 130 616,0 2 000 L3 119,3 130 608,8 2 000		TV I [A] mez L1 5,1 6 000 L2 4,4 6 000 L3 5,1 6 000		
Chlazení Stav Teplota - chladič 1 Čerpadlo ■ vstup 57,7 °C Ventilátory ■ výstup 57,1 °C 2 Čerpadlo □ vstup 57,3 °C Ventilátory □ výstup 40,0 °C 3 Čerpadlo □ vstup 47,4 °C Ventilátory □ výstup 39,0 °C 4 Čerpadlo □ vstup 57,3 °C Ventilátory □ výstup 39,7 °C 5 Čerpadlo □ vstup 52,4 °C Ventilátory □ výstup 40,0 °C 6 Čerpadlo □ vstup 53,4 °C Ventilátory □ výstup 39,4 °C		Zatížení zatížení 130,0 MVA 350 % zatížení 35,81 % 100 Přepínač poloha odbočky 13 Buchholz relé množství plynu 0 % 0 Calisto obsah vodíku 63,0 ppm 100 vlhkost v nádobě 13,0 ppm 30		MST výstraha Celková ■ Servisní výstrahy Calisto ■ MST jednotky ■ MST skřín ■		
		Teploty teplota okolí 23,4 °C 40 50 teplota horní vrstvy oleje 56,1 °C 80 80 teplota dolní vrstvy oleje 45,4 °C 80 80				

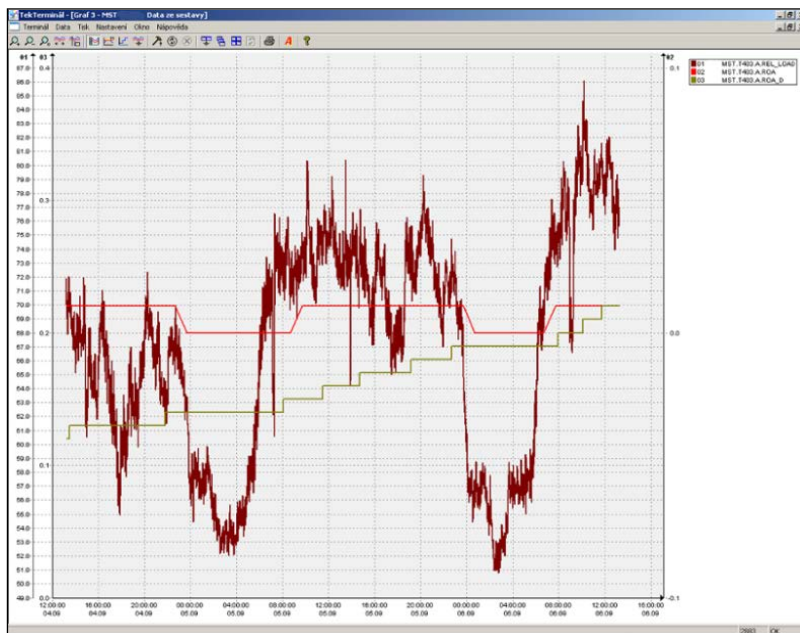
Sestava zobrazuje důležité měřené veličiny včetně stavu chladicí soustavy. Hodnoty mezí zadává uživatel, v případě překročení mezí jsou generovány alarmy. Klikem na vybranou hodnotu lze zobrazit její historii.

Výpočet vlhkosti papírové izolace transformátoru



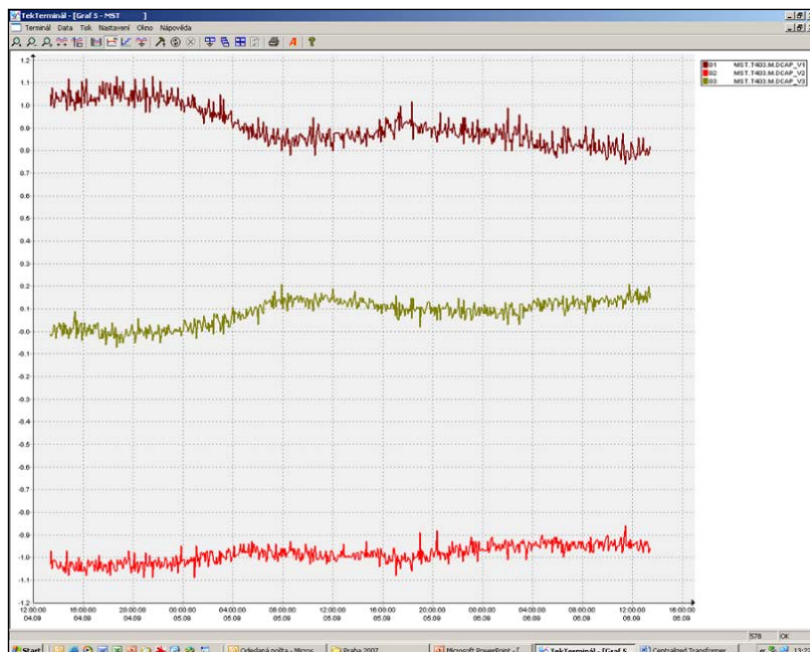
Výstup modelu výpočtu vlhkosti papírové izolace – červená křivka. Modrá křivka je měřená teplota oleje, zelená křivka je měřená vlhkost oleje.

Zatížení, rychlost stárnutí, spotřebovaná životnost



Spotřebovaná životnost je v grafu zobrazena jako schody v barvě khaki, rychlost stárnutí je červená křivka. Obě hodnoty závisí na zatížení transformátoru. Graf ukazuje poměry při hot-spot teplotě cca 50°C, tj. transformátor stárne v tomto případě velmi pomalu.

Monitoring průchodek

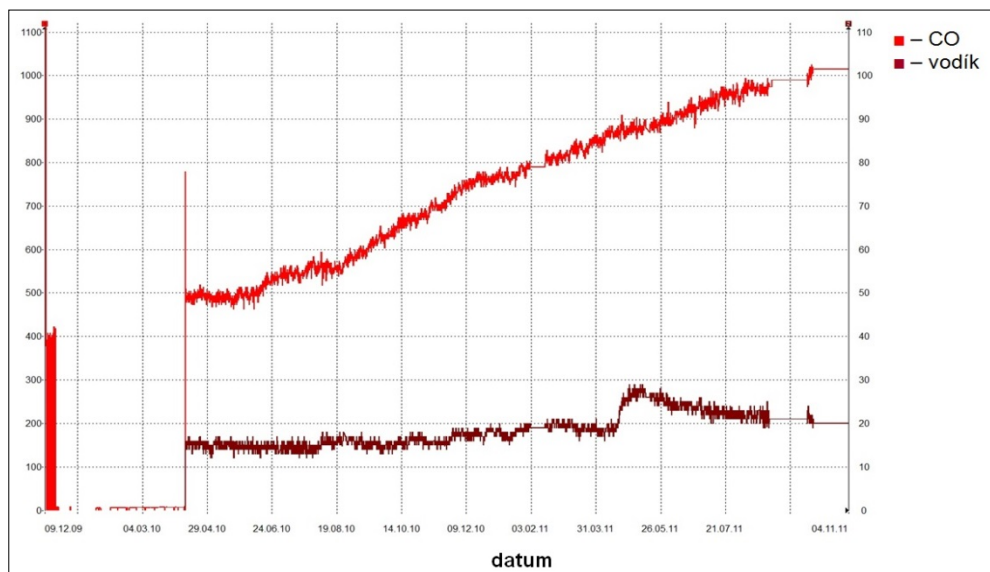


Graf ukazuje relativní odchylku napětí mezi měřícími vývody průchodek. To signalizuje možné porušení (dílní průraz polepů kapacitní části průchodky). Z hlediska uživatele jde o poměrně jednoduché a transparentní řešení, nicméně z realizačního hlediska jde o dosti náročnou záležitost.

2.3.1. Vyhodnocování stavu zařízení na základě rozborů archivovaných dat

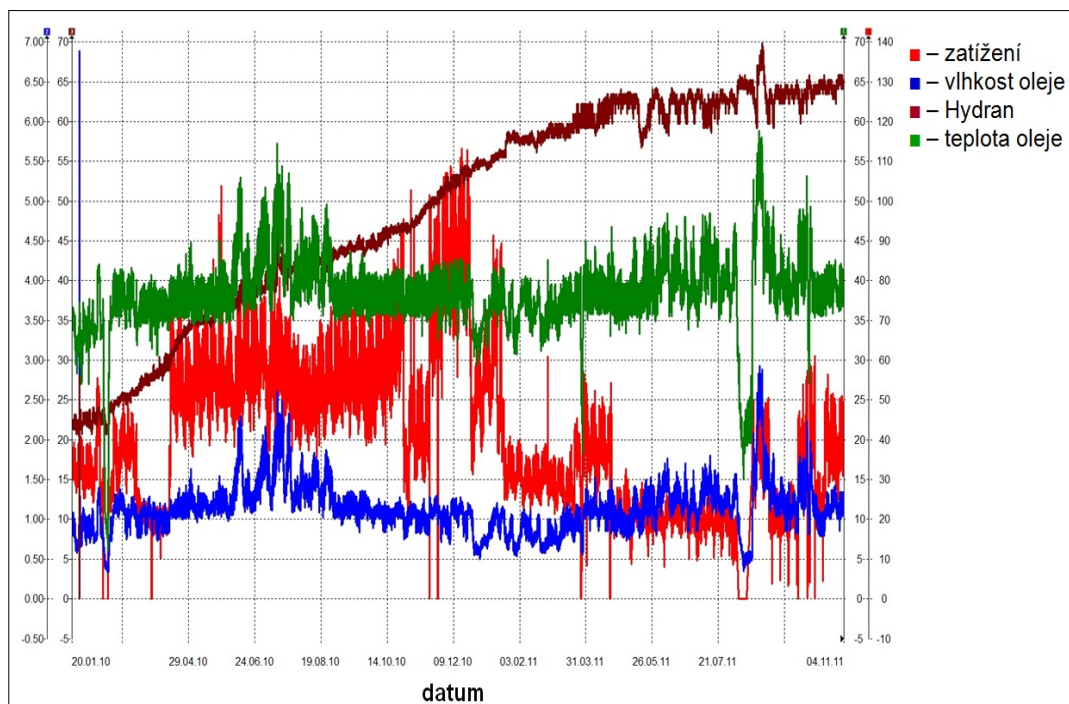
Kvalifikovaným rozбором archivovaných dat lze získat představu o probíhajících fyzikálních jevech v transformátorech a v řadě případů lze optimalizovat provoz a údržbu stroje. V dále uvedených sestavách je zachycen vývoj vybraných provozních hodnot během necelých dvou let.

Vývoj hladiny CO v oleji transformátoru



Vývoj CO (červená křivka) ukazuje na tepelnou vadu v transformátoru 200 MVA. S touto vadou lze transformátor provozovat za předpokladu jeho on-line sledování.

Vývoj kompozitní hodnoty plynů v oleji transformátoru



Mírný nárůst hladiny kompozitní hodnoty rozpuštěných plynů v oleji (hnědá křivka) nesignalizuje poruchu. Transformátor lze provozovat se zvýšeným dohledem a častější chromatografickou analýzou oleje.

3. ZÁVĚR

Praktické zkušenosti prokazují přínos monitorovacích systémů transformátorů.

Okamžité hodnoty a hodnoty získané na základě zpracování krátkodobých archivů jsou jistě zajímavé z hlediska indikace hrozící poruchy. Význam těchto hodnot není v běžné praxi doceňován vzhledem k tomu, že transformátory patří mezi velmi spolehlivá zařízení a že většina transformátorů pracuje v režimu nízké zátěže.

Dlouhodobě archivovaná data a jejich kvalifikovaný rozbor nám může poskytnout představu o pomalých jevech probíhajících ve sledovaném stroji. Lze tak odhalit na první pohled nezřetelné degradační procesy. V řadě případů lze přijmout účinná preventivní opatření a dosáhnout bezproblémového provozu.

Využití on-line diagnostiky je důležité zejména pro tyto stroje:

- Transformátory s plnou zátěží, kde hraje významnou roli efekt stárnutí.
- Transformátory strategického významu (elektrárny, významné distribuční transformátory, důležitý průmysl), kde hrozí v případě poruchy zcela mimořádné ztráty a škody.

Monitoring transformátorů s modely lze doporučit jako rozumné řešení. Pro jednotlivé případy lze nalézt monitorovací systém s optimálním poměrem cena / výkon.

4. LITERATURA

- [1] Projektová dokumentace TECHSYS.
- [2] Uživatelská dokumentace TECHSYS.
- [3] Katalogové listy TECHSYS.
- [4] Prezentace Monitorovací systém transformátorů pro stroje do 100 MVA TECHSYS.
- [5] Ing. Ivo Ullman, Ph.D., Ing. Jiří Velek, Ing. Zdeněk Paukner, Monitoring transformátorů, Poděbrady 2012
- [6] On-line monitorování průchodek transformátorů VVN, Ing. Jiří Velek, 2014



Ing. Pavel Korbel

V r. 1996 ukončil studium na ČVUT, elektrotechnické fakultě v Praze, obor Radioelektronika, se zaměřením na digitální rádiovou komunikaci.

Od r. 1996 pracuje ve společnosti TECHSYS – HW a SW, a.s., www.techsys.cz, kde prošel různými pozicemi v oddělení výroby a servisu. Rovněž vedl nebo byl členem realizace těch nejvýznamnějších projektů.

Od r. 2015 je členem managementu, vrcholného vedení společnosti a představenstva, se zodpovědností za výrobní a provozní činnosti.

Kontakt: Tel.: +420 222 541 896, e-mail: korbel@techsys.cz