**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

## Účinnost chladicích systémů transformátorů přenosové soustavy

**Bc. Dominik Harman** **2016**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
**Fakulta elektrotechnická**
Akademický rok: **2015/2016**

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

| | |
|---|---|
| Jméno a příjmení: | **Bc. Dominik HARMAN** |
| Osobní číslo: | **E14N0007P** |
| Studijní program: | **N2612 Elektrotechnika a informatika** |
| Studijní obor: | **Komerční elektrotechnika** |
| Název tématu: | **Účinnost chladících systémů transformátorů přenosové soustavy** |
| Zadávající katedra: | **Katedra technologií a měření** |

Zásady pro vypracování:

1. Popište druhy chladicích systémů transformátorů přenosové soustavy
2. Uveďte možnosti řízení chlazení transformátorů přenosové soustavy
3. Navrhněte metodiku účinnosti chlazení transformátorů přenosové soustavy s využitím monitoringu
4. Zhodnoťte účinnost chlazení transformátorů přenosové soustavy s odlišnými druhy řízení dle navržené metodiky

| | |
|---|---|
| Rozsah grafických prací: | **podle doporučení vedoucího** |
| Rozsah kvalifikační práce: | **40 - 60 stran** |
| Forma zpracování diplomové práce: | **tištěná/elektronická** |

Seznam odborné literatury:

1. **Mentlík, V., et all Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008**
2. **Manuály transformátorů, monitoringů transformátorů dle instrukcí konzultanta**
3. **Elektronické informační zdroje, internetové databáze (sciencedirect.com)**

| | |
|---|---|
| Vedoucí diplomové práce: | **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**<br>Katedra technologií a měření |
| Konzultant diplomové práce: | **Ing. Jan Dončuk, Ph.D.**<br>ČEPS, a.s. Elektrárenská 774/2 Praha |
| Datum zadání diplomové práce: | **15. října 2015** |
| Termín odevzdání diplomové práce: | **16. května 2016** |

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá chladicími systémy transformátorů přenosové soustavy České republiky. Popisuje transformátor, jeho izolační systém a faktory související se životností izolačních systémů. Jelikož nárůst teploty uvnitř stroje výrazně ovlivňuje i jeho životnost vzniká potřeba teplo, vzniklé důsledkem ztrát, odvádět od izolovaných částí a transformátory účinně chladit. Součástí této práce je porovnání chladicích systémů od různých výrobců osazených na transformátorech pracujících v sítích přenosové soustavy.

## Klíčová slova

Přenosová soustava, transformátor, chlazení transformátoru, řízení chlazení transformátoru, chladicí systémy transformátoru

## Abstrakt

This diploma thesis deals with cooling systems of the transformers operated in the transmission system of the Czech Republic. It describes a transformer, transformer's insulation system and factors related to insulation system life. Insulation life is greatly affected by the temperature rise inside the transformer. Temperature rise is mostly caused by the losses and it is necessary to efficiently cool the transformer. A part of this thesis is comparison of the cooling systems from different manufacturers mounted on the transformers operating in transmission system.

## Key words

Transmission system, transformer, transformer cooling, transformer cooling control, transformer cooling systems

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval 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 16.5.2016 Bc. Dominik Harman

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za profesionální rady a zároveň děkuji Ing. Janu Dončukovi, Ph.D. ze společnosti ČEPS a.s. za trpělivost, metodické vedení práce, cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce.

# Obsah

**OBSAH** ..... **8**

**ÚVOD** ..... **9**

**SEZNAM ZKRATEK** ..... **10**

**1 TRANSFORMÁTORY PŘENOSOVÉ SOUSTAVY** ..... **12**

1.1 TRANSFORMÁTOR ..... 13
*1.1.1 Životní cyklus transformátoru* ..... *14*
*1.1.2 Ztráty v transformátoru* ..... *14*
1.2 IZOLAČNÍ SYSTÉM TRANSFORMÁTORU ..... 17
*1.2.1 Degradace izolace* ..... *18*
*1.2.2 Stárnutí a životnost transformátoru* ..... *18*

**2 CHLADICÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ** ..... **24**

2.1 TEPLOTNÍ A PROUDOVÉ LIMITY ..... 25
*2.1.1 Teplota hot-spot* ..... *26*
2.2 ZPŮSOBY PŘENOSU TEPLA ..... 28
2.3 ROZDĚLENÍ CHLADICÍCH SYSTÉMŮ ..... 28
*2.3.1 ONAN* ..... *31*
*2.3.2 ONAF* ..... *33*
*2.3.3 OFAF* ..... *34*
*2.3.4 ODAF* ..... *35*
*2.3.5 OFWF* ..... *36*
2.4 CHLAZENÍ JÁDRA TRANSFORMÁTORU ..... 36
2.5 CHLAZENÍ VINUTÍ ..... 38

**3 MONITORING A MOŽNOSTI ŘÍZENÍ CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORU** ..... **40**

3.1 MONITOROVANÉ VELIČINY CHLAZENÍ ..... 41
*3.1.1 Snímání teploty* ..... *41*
*3.1.2 Snímání teplotního spádu na chladičích* ..... *43*
*3.1.3 Signalizace stavu čerpadel a ventilátorů* ..... *44*
*3.1.4 Snímání cirkulace oleje* ..... *44*
3.2 ŘÍZENÍ CHLAZENÍ ..... 45
*3.2.1 Systém řízení chlazení ONAN / ONAF* ..... *46*
*3.2.2 Systém řízení chlazení ODAF* ..... *49*

**4 HODNOCENÍ ÚČINNOSTI CHLAZENÍ TRANSFORMÁTORŮ PS** ..... **52**

4.1 METODY HODNOCENÍ CHLAZENÍ ..... 52
*4.1.1 Spotřebovaný výkon a ekonomická náročnost* ..... *52*
*4.1.2 Teplotní spád* ..... *53*
*4.1.3 Rovnoměrnost* ..... *53*
4.2 HODNOCENÉ TRANSFORMÁTORY ..... 54
*4.2.1 TR200_1* ..... *54*
*4.2.2 TR200_2* ..... *59*
*4.2.3 TR400_1* ..... *64*
*4.2.4 TR400_2* ..... *69*
4.3 HODNOCENÍ CHLAZENÍ ..... 74

**ZÁVĚR** ..... **80**

**SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ** ..... **82**

**SEZNAM PŘÍLOH** ..... **83**

# Úvod

Přenosová soustava a její prvky jsou řazeny ke klíčové infrastruktuře. Každý den v roce společně s distribuční soustavou zásobují tisíce domácností a institucí elektrickou energií. S narůstající poptávkou po elektrické energii rostou i nároky na spolehlivost a kvalitu její dodávky. Nečekaná mimořádná událost v přenosové soustavě může ochromit chod moderní společnosti rozsáhlým výpadkem elektrické energie tzv. „blackoutem“. Nejen proto je Česká elektro energická soustava provazována dle kritéria (n-1), které zajišťuje, že v případě výpadku jednoho prvku je přenosová soustava schopna udržet stanovené parametry.

Transformátory přenosové soustavy transformují napěťové hladiny 400 a 200 kV vhodné pro přenos elektrické energie na napěťové hladiny 120 kV vhodné pro její distribuci. Během této transformace napětí vznikají v transformátoru ztráty, které způsobují především oteplení stoje. Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje izolační systém stroje, zhoršuje jeho vlastnosti, urychluje a podporuje degradační faktory, čímž přispívá ke zrychlení stárnutí izolace. Vlivem zestárnuté izolace může dojít snáze k poruše, v extrémním případě může dojít k mezi závitovému zkratu na cívce a následné destrukci stroje. Nevhodné chlazení transformátoru tedy přispívá k degradaci izolace zvýšenými teplotami, proto vzniká potřeba transformátory účinně chladit.

Moderní on-line diagnostické systémy dokáží detekovat včas vznikající nestandartní podmínky ve stroji a tím výrazně napomáhají předcházet poruše. Součástí těchto diagnostických a měřících systémů může být i propojení s chladicím systém transformátoru a na základě hodnot snímaných diagnostikou transformátoru může být chladicí systém řízen. Chlazení může být také řízeno přímo na základě teplot ve stroji, kde jsou chladicí zařízení přímo připojena k teploměrům na různých místech transformátoru a jsou spínané dle aktuální teploty. Porovnání těchto dvou řídicích sytému a různých systémů chlazení je věnována čtvrtá kapitola této diplomové práce, jejíž cílem je analyzovat data získána z monitoringu přenosové soustavy a určit jak efektivně tyto chladicí systémy pracují.

# Seznam zkratek

| | |
|---|---|
| **ČEPS** | Česká Elektroenergetická Přenosová Soustava |
| **ČR** | Česká republika |
| **ČSN** | Česká technická norma |
| **DPH** | Daň z přidané hodnoty |
| **Hot-spot** | Označení pro nejteplejší bod v transformátoru |
| **IEC** | International Electrotechnical Commission |
| **IEEE** | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| **Kč** | Koruna Česká |
| **Km** | Kilo metr |
| **kV** | Kilo volt |
| **kW** | Kilowat |
| **kWh** | Kilowatt hodina |
| **MAX** | Maximum |
| **MIN** | Minimum |
| **min** | Minuta |
| **mm** | Milimetr |
| **MST** | Měřící systém transformátoru |
| **MVA** | Megavoltampér |
| **OBR** | Obrázek |
| **ODAF** | Oil directed air forced |
| **OFAF** | Oil forced air forced |
| **OFWF** | Oil force water force |
| **ONAF** | Oil naturaly air forced |
| **ONAN** | Oil naturaly air naturaly |
| **ot** | Otáčky |
| **OTI** | Oil temperature indicator |
| **PPS** | Průměrný polymerační stupeň |
| **PRŮM** | Průměr |
| **PS** | Přenosová soustava |
| **RTD** | Resistor temperature detector |
| **TAB** | Tabulka |
| **vvn** | Velmi vysoké napětí |
| **VYP** | Vypnuto |
| **WTI** | Winding temperature indicator |
| **ZAP** | Zapnuto |
| **zvn** | Zvláště vysoké napětí |

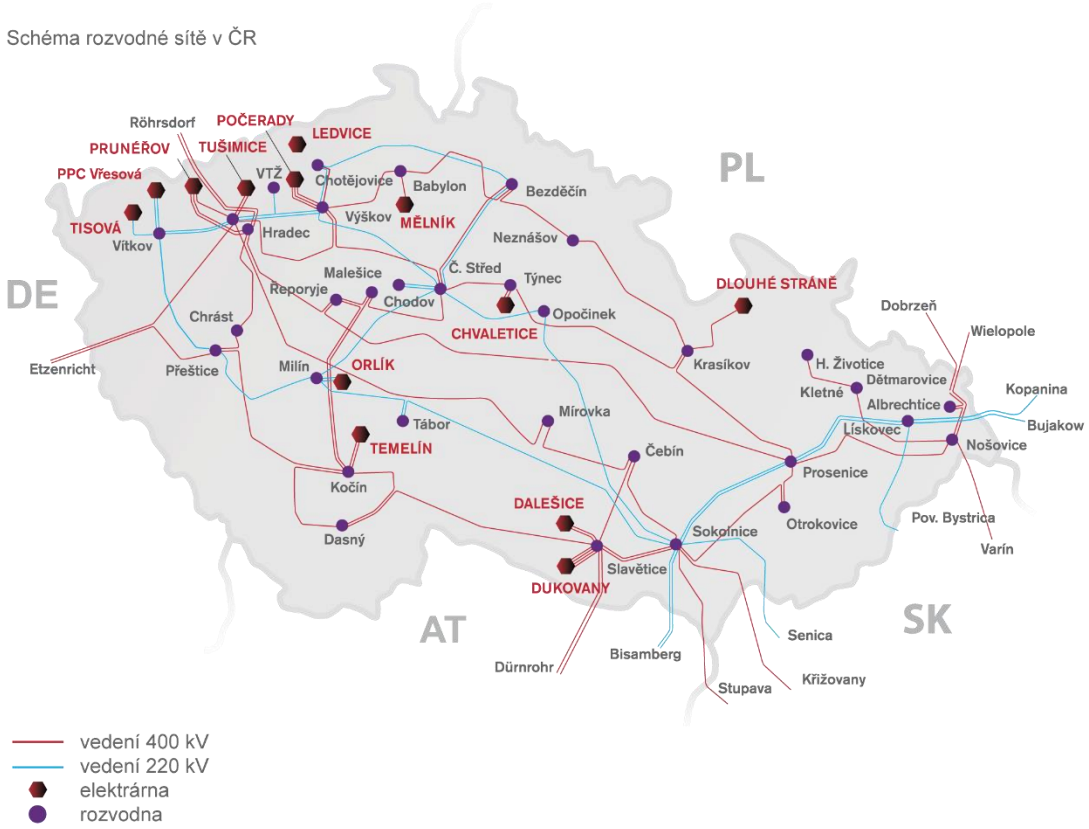
# Seznam symbolů

| | | |
|---|---|---|
| **$** | Dolar | [-] |
| **€** | Euro | [-] |
| $\Delta P_0$ | Ztráty naprázdno | [W] |
| $\Delta P_{Fe}$ | Ztráty v železe | [W] |
| $\Delta P_{FeH}$ | Hysterezní ztráty | [W] |
| $\Delta P_{FeV}$ | Ztráty vířivými proudy | [W] |
| $\Delta P_k$ | Ztráty nakrátko | [W] |
| $\Delta P_k$ | Ztráty nakrátko | [W] |
| ***A*** | Chemické prostředí | [-] |
| **B** | Magnetická indukce | [T] |
| $C_p$ | Měrné teplo | [J/kg °C] |
| $E_a$ | Aktivační energie | [-] |
| $E_c$ | Elektrická energie | [kWh] |
| **f** | Frekvence | [Hz] |
| ***g*** | Rozdíl teplot oleje a vinutí při jmenovitých podmínkách | [K] |
| ***H*** | Činitel hot-spot | [-] |
| ***I*** | Proud | [A] |
| ***k*** | Míra stárnutí izolace | [-] |
| ***K*** | Poměr zatěžovacího proudu | [-] |
| ***m*** | Počet fází | [-] |
| ***m*** | Počet fází | [-] |
| ***m*** | Průtok | [kg/s] |
| ***n*** | Počet chladicích skupin | [-] |
| ***P*** | Příkon | [W] |
| ***Q*** | Tepelný tok | [W] |
| ***R*** | Molární plynová konstanta, | 8.314 J/(K·mol) |
| $R_k$ | Odpor vinutí | [Ω] |
| $R_k$ | Odpor vinutí | [Ω] |
| ***S*** | Zdánlivý výkon | [MVA] |
| ***t*** | Čas | [h] |
| $T_{in}$ | Vstupní teplota oleje | [°C] |
| $T_{out}$ | Výstupní teplota | [°C] |
| **U** | Napětí | [V] |
| $U_i$ | Indukované napětí | [V] |
| ***y*** | Exponent proudu v závislosti na přírůstku teploty | [-] |
| $\Theta$ | Teplota | [K] |
| $\Theta_h$ | Teplota hot-spot | [°C] |
| $\Theta_{oh}$ | Teplota oleje v horní části transformátoru | [°C] |
| $\Theta_{oh}$ | Teplota oleje v horní části transformátoru | [°C] |
| $\Theta_{vh}$ | Teplota horní části vinutí | [°C] |

# 1 Transformátory přenosové soustavy

Elektroenergetická přenosová soustava 400 a 220 kV, často nazývaná „páteřní“, slouží k rozvedení výkonu z velkých elektráren na celé území České republiky a zároveň je součástí mezinárodního propojení Evropy. V rozvodnách je skrze transformátory propojena s distribučními soustavami, které napájí a ty pak rozvádějí elektřinu až ke konečným spotřebitelům. Pomocí přeshraničních vedení je přenosová soustava napojena do soustav sousedních států a s nimi synchronně spolupracuje v rámci celé elektroenergetické soustavy Evropy. [1], [2]

Páteřní přenosová síť byla prakticky dokončena v 80. letech minulého století. V současné době ji tvoří zhruba 3000 km vedení 400 kV. Trasy 220 kV, jejichž výstavba již byla ukončena, dnes plní převážně úlohu záložních a doplňkových vedení. K přenosové soustavě dle [1] patří 41 rozvoden s 71 transformátory pro obě základní napěťové hladiny. [1]

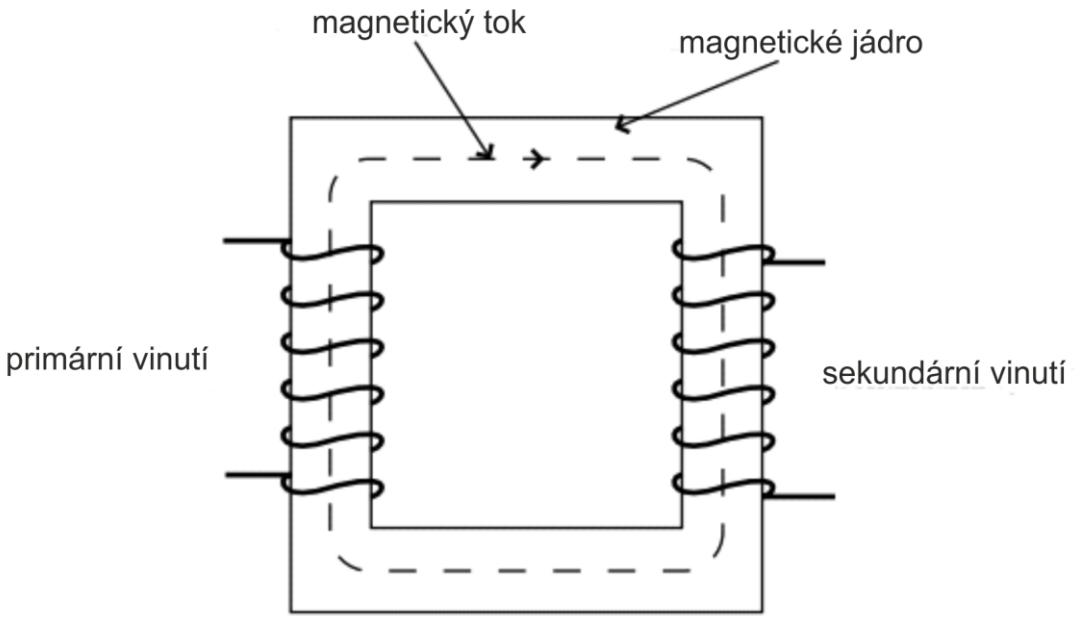



*Obr. 1.1 Schéma přenosové soustavy, převzato z [1]*

## 1.1 Transformátor

Transformátor je statické zařízení, které transformuje elektrickou energii, z jednoho vinutí do druhého pomocí elektromagnetické indukce bez změny frekvence. Transformátor, který umožnuje propojit dva okruhy s různým napětím, je hlavním nástrojem umožňující univerzální využití střídavého proudu pro přenos a distribuci elektrické energie. Různé součásti elektrizační soustavy, jako např.: generátory, přenosové linky, distribuční sítě a zátěže, tak mohou pracovat na nejvhodnějších napěťových hladinách. Historie výkonových transformátorů sahá do počátku 20. století, kdy byly s prudkým nárůstem poptávky po elektrické energii vyrobeny a osazeny první výkonové transformátory. [2]

Transformátor *Obr. 1.2* se obvykle skládá z dvojice vinutí, vstupní vinutí vyššího napětí na straně primární a výstupní vinutí nižšího napětí na straně sekundární.



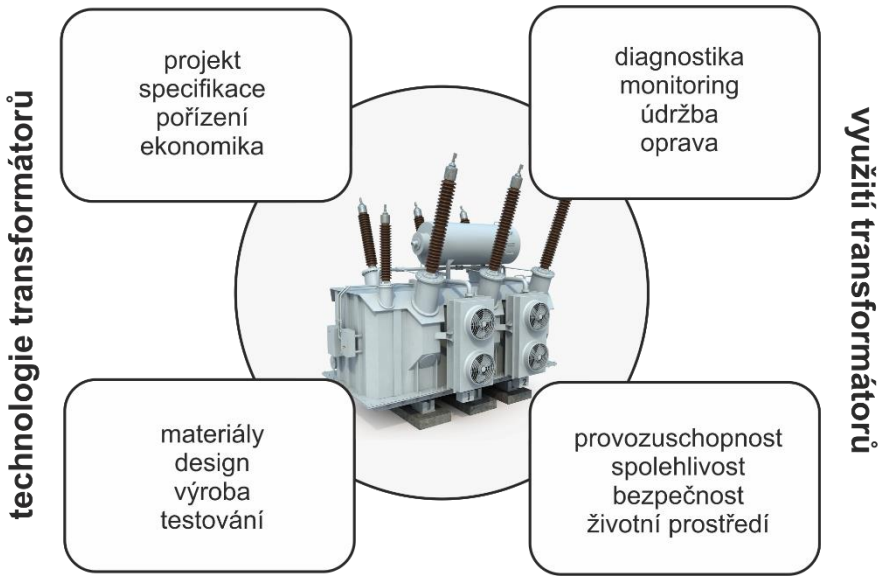

*Obr. 1.2 Princip transformátoru*

Většina transformátorů vvn a zvn přenosové soustavy jsou v provedení venkovní olejové trojfázové, trojvinuťové regulační autotransformátory se jmenovitým převodem 400/121±8x1,5%/10,5 kV, jmenovitým výkonem 350 nebo 250 MVA, nebo se jmenovitým převodem 230/121±6x2%/10,5 kV a jmenovitým výkonem 200 MVA, a s přepínačem odboček pod zatížením. [3]

### 1.1.1 Životní cyklus transformátoru

Očekávána životnost transformátoru se pohybuje kolem 20 – 30 let, někdy i více. Během této doby na transformátor působí řada provozních a degradačních faktorů, které způsobují vyšší namáhání. Na přetěžovaných částech stroje může snadno dojít k poruše. *Obr. 1.3* zobrazuje různé aspekty ovlivňující spolehlivost transformátoru.[4]

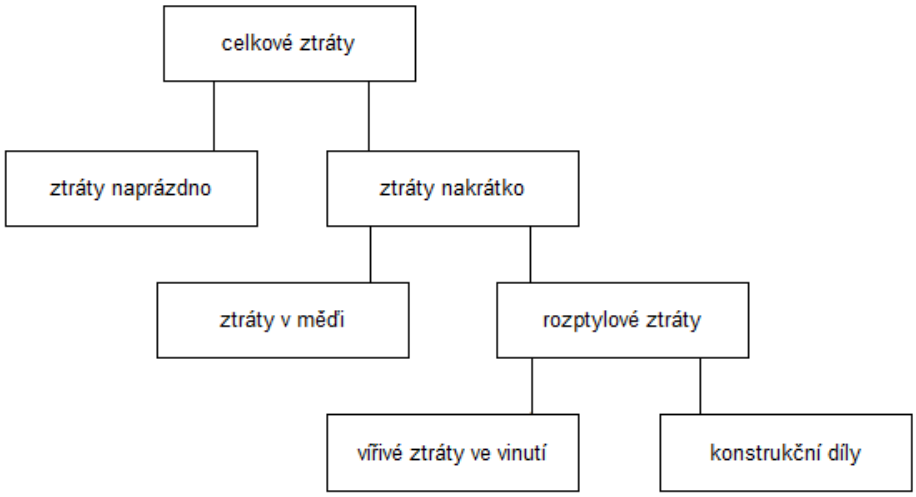
Různé provozní situace, které mohou v soustavě nastat – přepětí, zkrat, přetížení apod., mohou výrazně ovlivnit životnost transformátoru. Životnost nejvíce ovlivňují degradační faktory působící především na izolační systém. Působení těchto degradačních faktorů může být ještě posíleno teplem, které vzniká důsledkem ztrát.




*Obr. 1.3 Životní cyklus transformátoru [3]*

### 1.1.2 Ztráty v transformátoru

Celkové ztráty transformátoru se skládají ze ztrát při zatížení a ztrát bez zatížení. Ztráty při zatížení jsou měřeny v zapojení nakrátko, zatímco ztráty bez zatížení jsou měřeny v zapojená na prázdno. Ztráty, které nejvíce způsobují zvýšení teploty ve stroji, mohou být klasifikovány jako na *Obr. 1.4.* [5], [6]




*Obr. 1.4 Ztráty v transformátoru, které způsobují oteplení [6]*

Ztráty naprázdno je v podstatě výkon potřebný k přemagnetování feromagnetického jádra při střídavém magnetování. Jsou také běžně označovány jako „ztráty v jádře“ a nastanou vždy, když je zařízení pod napětím. Vířivé proudy vznikají na principu Faradayova zákona, jedná se o parazitní jev, při kterém dochází k naindukování napětí v železném jádře transformátoru. V jádře se pak uzavírá obvod a může protékat zkratový proud – vířivý proud. Jelikož jsou vířivé proudy úměrné kvadrátu plochy, vyrábějí se jádra transformátorů z vzájemně izolovaných tenkých plechů. Ztráty naprázdno závisí především na napětí a na frekvenci, takže se za provozních podmínek mění pouze minimálně. Ztráty naprázdno lze vyjádřit následujícími vztahy: [6], [7], [8]

$$\Delta P_0 = \Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeV} + \Delta P_{FeH} \tag{1.1}$$

$$\Delta P_{FeH} \sim B^2 \cdot f \sim U_i^2 \cdot f \tag{1.2}$$

$$\Delta P_{FeV} \sim B^2 \cdot f^2 \sim U_i^2 \cdot f^2 \tag{1.3}$$

Kde

$\Delta P_0$ - ztráty naprázdno [W]

$\Delta P_{Fe}$ - ztráty v železe [W]

$\Delta P_{FeV}$ - ztráty vířivými proudy [W]

$\Delta P_{FeH}$ - hysterezní ztráty [W]

B - magnetická indukce [T]

f - frekvence [Hz]

$U_i$ - indukované napětí [V]

Ztráty nakrátko tvoří ztráty v mědi a rozptylové ztráty. Rozptylové ztráty vznikají důsledkem rozptylu magnetického pole do vodivých částí transformátoru, jakou jsou stěny nádoby, svorky a další konstrukční díly. Tyto dodatečné ztráty mají velmi malý podíl na celkových ztrátách transformátoru, ale za to je velmi těžké je vypočítat, rozptýlené magnetické pole není možné změřit. Rozptylové ztráty se často vyjadřují pomocí 3D modelu transformátoru v simulačním softwaru. [9]

Ztráty v mědi, také nazývané Jouleovy ztráty nebo ohmické ztráty a vznikají v důsledku ohřevu proudem protékajícím ve vinutí. Jsou způsobeny ohmickým odporem měděných vodičů primárního a sekundárního vinutí. Průchodem elektrického proudu vodiči dochází k přeměně části přenášené energie na Jouleovo teplo, které je vyzářeno v podobě tepelné energie a způsobuje oteplení transformátoru. Ztráty nakrátko jsou proměnlivé podle zatížení transformátoru, tedy podle toho jak velký výkon transformátor přenáší, lze je vyjádřit následujícím vztahem: [6], [8], [9]

$$\Delta P_k = m * R_k * I^2 \tag{1.4}$$

Kde

$\Delta P_k$ - ztráty nakrátko [W]

$m$ - počet fází [-]

$R_k$ - odpor vinutí [Ω]

$I$ - proud [A]

## Ekonomické vyjádření ztrát

Ztráty transformátoru představují energii, která nemůže být dodána zákazníkům, a proto mají související provozní náklady. Přílišné snížení ztrát stroje může následně zapříčit zvýšené náklady na jeho provoz. V závislosti na aplikaci se může jednat o ekonomický přínos u transformátoru s vysokou pořizovací cenou a nízkými ztrátami. Hodnocení ztrát, je proces, při kterém se ztráty vyjadřují v peněžní hodnotě a slouží ke kalkulaci celkových

provozních nákladů. Typicky se každému parametru – ztráty při zatížení, ztráty bez zatížení, apod. – přiřadí hodnota dolaru nebo eura za kW ($ / kW, € / kW). Informace získané touto analýzou mohou být použity k porovnání cen od různých výrobců nebo k rozhodnutí o optimálním čase nahrazení transformátoru novým. Ekonomickému vyjádření ztrát se věnuje [8].

## Účinnost transformátoru

Výkonové transformátory mají velmi vysokou účinnost, typicky větší než 99,5 %, to znamená, že reálné výkonové ztráty jsou obvykle menší než 0,5 % výkonu při plném zatížení. Účinnost transformátoru vychází ze jmenovitého výkonu a celkových ztrát. Výpočet účinnosti může být definován jako [8].

$$\text{účinnost} = \frac{jmenovitý\ výkon}{jmenovitý\ výkon + celkové\ ztráty} \cdot 100 \tag{1.5}$$

a obecně mírně klesá s nárůstem zatížení. Celkové ztráty jsou součtem ztrát naprázdno a ztrát nakrátko. [8]

## 1.2 Izolační systém transformátoru

Spolehlivost izolačního systému je pro životnost transformátoru velmi důležitá. Vnitřní poruchy izolace jsou vždy nejzávaznějším a velmi nákladným problémem transformátorů. Poškození nebo zničení izolačního systému vlivem např. vysokých zkratových proudů povede vždy k závažnému poškození transformátoru. Následné ztráty, jakými může být nedodávka elektrické energie nebo nutnost odstavit zdroje elektrické energie, mohou být několikanásobně vyšší než škody na samotném transformátoru.[10], [11]

Izolační systém výkonových transformátoru je tvořen pevnou papírovou izolací a minerálním olejem vyplňujícím prostor nádoby. Prvky pevné izolace, jako je papír, lepenka a kraftový papír, jsou složené převážně z celulózy. Z chemického hlediska je celulóza přirozeně se vyskytující polymer rostlinného původu. Každá molekula obsahuje přibližně 1000 jednotek monomeru podobnému glukóze. Jak molekuly celulózy degradují, dojde k protržení polymerních řetězců a počet jednotek monomeru v každé molekule se sníží. Díky tomu dojde ke snížení mechanické pevnosti buničiny a ke změně křehkosti. V důsledku

tohoto rozkladu dosáhne celulóza bodu, kdy již nebude správně plnit svoji izolační funkci. Všeobecně se pro konec životnosti papírové izolace uvažuje hodnota průměrného polymeračního stupně PPS rovna 200. Pomocí PPS lze také hodnotit stav papírové izolace. [10], [11]

Olej plní v transformátoru několik funkcí. Hlavní funkcí oleje je vytvoření dielektrického prostředí, které působí jako izolace obklopující vodiče transformátoru pod napětím. Olej také tvoří ochranný povlak kovových částí uvnitř zařízení, ten chrání kovové části před chemickými reakcemi, jako je například oxidace. Další důležitou funkcí oleje je chlazení. Díky své dobré tepelné vodivosti a viskozitě je olej vhodným médiem pro odvod tepla ze zahřátých částí transformátoru do chladicích zařízení. Olej také slouží jako diagnostický nástroj, pokud se začnou poruchy vyvíjet v zařízení naplněném olejem, rozptýlí se jejich energie v oleji. Tato energie může způsobit chemickou degradaci oleje, analýzou této degradace můžou být získány informace o poruše. [10], [11]

### 1.2.1 Degradace izolace

Od okamžiku kdy je transformátor uveden do provozu, je izolační systém vystaven degradačním faktorům. Mezi zásadní faktory snižující životnost izolace patří kyslík, voda a kyseliny vznikající při degradaci oleje. Ty podpořené tepelným a elektrickým namáháním zhoršují fyzikální, mechanické a elektrické vlastnosti izolace. Degradační faktory jsou ještě více urychleny teplotou, čím větší je teplota oleje ve stroji, tím více je jeho izolace namáhána. Celkově je izolace namáhána všemi faktory, které se mohou vzájemně ovlivňovat a ještě více urychlovat své působení. [3], [10], [11]

Oxidace a hydrolýza mají největší účinky na rozklad celulózy v papírové izolaci. Tyto reakce jsou závislé na množství kyslíku, vody a kyseliny obsažené v oleji, který je v kontaktu s papírovou izolací. Míra degradace je velmi závislá na teplotě, jak teplota stoupá, rychlost chemických reakcí se zvyšuje. [3], [10], [11]

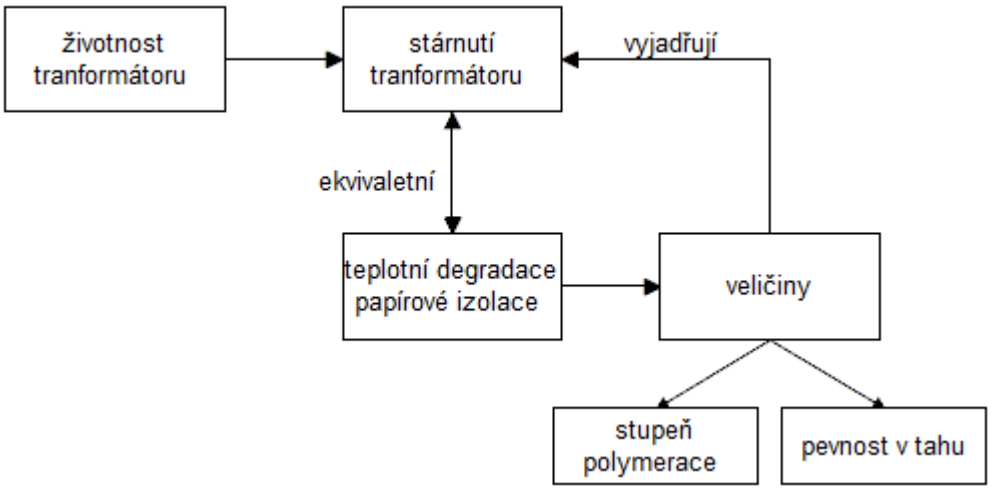
### 1.2.2 Stárnutí a životnost transformátoru

Vyhodnocování životnosti veškerých zařízení přímo souvisí s procesem stárnutí. Životnost zařízení je dána životností jeho nejslabší části, v případě transformátoru se jedná o izolační systém. Řada společností dnes nabízí v rámci „life managemnetu“ služby pro

regeneraci nebo výměnu oleje. Jelikož může být olej snadno zregenerován případně vyměněn, je za nejslabší část izolačního systému považována papírová izolace. [3], [4]

Za předpokladu, že stárnutí izolace, reprezentuje stárnutí transformátoru, může být životnost transformátoru téměř popsána stárnutím izolace, nebo více specificky tepelnou degradací mechanické pevnosti papíru izolace mezi závity vinutí cívek. [6]

Konečnou dobu životnosti transformátoru tedy určuje doba životnosti izolace, zbývající doba životnosti může být popsána vhodně zvolenou veličinou. Takovou veličinou může být stupeň polymerace, nebo také pevnost v tahu. Vztah mezi životností transformátoru a těchto dvou veličin zobrazuje *Obr. 1.5*.




*Obr. 1.5 Vliv stárnutí izolace na životnost transformátorů [6]*

Nezvratné stárnutí nebo zhoršení stavu papírové izolace silně závisí na teplotě, stejně tak jako na vlhkosti, kyselosti a oxidaci. Moderní systémy pro konzervaci oleje již obsahují prvky, které dokáží minimalizovat vlhkost a kyslík v chladicím oleji, výstupní teplota chladicího oleje pak slouží jako určující parametr pro stárnutí izolace. Pro vzduchem chlazené transformátory je stárnutí rovnoměrně ovlivněno vlhkostí a oxidací. Životnost v zatěžovacích charakteristikách pak znamená spíše vypočítanou životnost izolace nežli skutečnou životnost transformátoru, jak je uvedeno v normách IEC [12] a ČSN [13].

Arrheniův zákon tepelné degradace při absolutní teplotě Θ, se běžně užívá k vyjádření stárnutí izolačního materiálu. V důsledku nerovnoměrnosti teploty ve vinutí transformátoru,

část vinutí pracující v oblasti s nejvyšší teplotou, podstupují nejrychlejší degradaci izolace a životnost transformátoru tedy může být odhadnuta podle vztahu (1.6). [14]

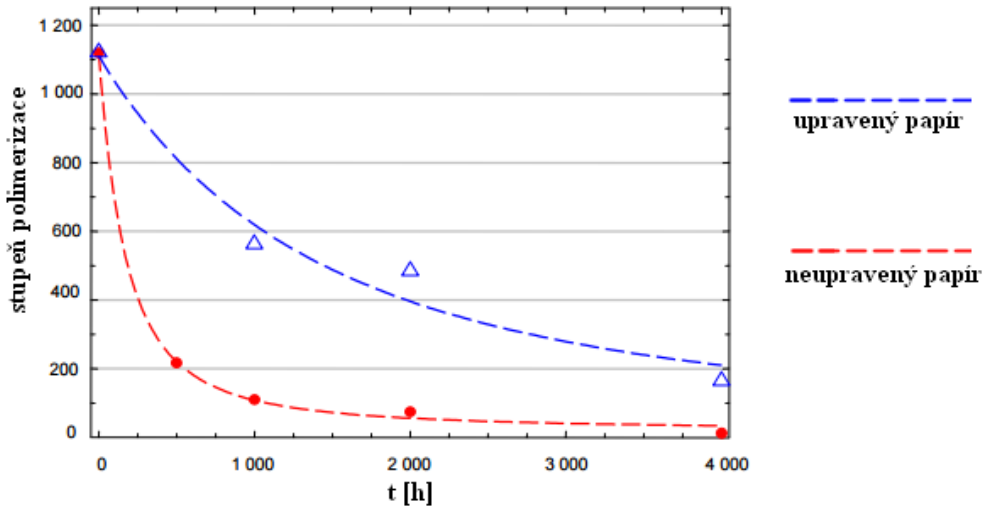
$$k = A \cdot e^{\frac{-E_A}{R\Theta}} \tag{1.6}$$

Kde

| | | |
|---|---|---|
| $k$ | - | míra stárnutí izolace |
| $A$ | - | Chemické prostředí |
| $E_a$ | - | Aktivační energie |
| $R$ | - | Molární plynová konstanta, 8.314 J/(K·mol) |
| $\Theta$ | - | Teplota [K], |

## Izolační papír

Papírová izolace hraje významnou roli v životnosti transformátoru. Proto se také jejímu stálému vylepšování věnuje mnoho pozornosti. Jak uvádí [15] teplotně upravený papír má mnohem lepší vlastnosti než tepelně neupravený. Účelem tepelné úpravy je neutralizovat produkci kyselin způsobenou hydrolýzou materiálu v průběhu životnosti transformátoru. Tato hydrolýza je více aktivní při zvýšených teplotách. Publikované výsledky výzkumu také ukazují, že teplotně upravený papír má vyšší mechanickou pevnost při zvýšených teplotách než teplotně neupravený papír. Stejné výsledky také ukazují změnu stupně polarizace v čase viz.*Obr. 1.6.* [12], [15]




*Obr. 1.6 Stupeň polymerizace teplotně upraveného a neupraveného papíru [12]*

# Životnost dle ČSN a IEC

Jak uvádí normy IEC [12] a ČSN [13], míra stárnutí izolačního teplotně neupraveného kraftového papíru se může až dvojnásobit při zvýšení teploty o 6 K. Toto zvýšení míry stárnutí platí především při teplotách pohybujících se v rozmezí od 90 °C do 110 °C. Proto relativní míra stárnutí *V* může být vyjádřena rovnicí (1.7) na základě referenční teploty 98 °C. Pro teplotně upravený papír je míra stárnutí poměrně nižší než u kraftového papíru a proto bylo navrženo užívat teplotu 110 °C jako referenční (1.8) [12], [13].

$$\mathrm{V} = 2^{\frac{\Theta_\mathrm{h} - 98}{6}} \tag{1.7}$$

$$\mathrm{V} = \mathrm{e}^{\left(\frac{15\,000}{110+273} - \frac{15\,000}{\Theta_\mathrm{h}+273}\right)} \tag{1.8}$$

Kde

$\Theta_h$ - Teplota hot-spot ve °C

Z rovnic je patrné, že relativní doba stárnutí je závislá na teplotě hot-spot, což potvrzuje i tabulka *Tab. 1.I.*

*Tab. 1.I Relativní míra stárnutí papírové izolace v závislosti na teplotě [13]*

| $\Theta_h$ *[°C]* | Teplotně neupravená papírová izolace | Teplotně upravená papírová izolace |
|---|---|---|
| 80 | 0,125 | 0,036 |
| 86 | 0,25 | 0,073 |
| 92 | 0,5 | 0,145 |
| **98** | **1** | 0,282 |
| 104 | 2 | 0,536 |
| **110** | 4 | **1** |
| 116 | 8 | 1,83 |
| 122 | 16 | 3,29 |
| 128 | 32 | 5,8 |
| 134 | 64 | 10,1 |
| 140 | 128 | 17,2 |

Pro teplotně upravený papír také norma navrhuje čtyři kritéria vyjadřující životnost, při referenční teplotě 110 °C. Jak je uvedeno v *Tab. 1.II*, v závislosti na různých kritériích se životnost pohybuje od 65 000 do 180 000 hodin. Běžně se pro stanovení životnosti užívá

spíše stupeň polymerace, protože se snáze měří. Pomocí referenční teploty a relativní míry stárnutí *V*, můžeme snadno odhadnout životnost při dané teplotě.

*Tab. 1.II Normální životnost izolace,(vysušená izolace bez přístupu kyslíku) [13]*

| Základ | Životnost izolace | |
|---|---|---|
| | Hodin | Let |
| 50% zachování pevnosti v tahu izolace | 65 000 | 7,42 |
| 25% zachování pevnosti v tahu izolace | 135 000 | 15,41 |
| 200 zachování stupně polymerace v izolaci | 150 000 | 17,12 |
| Interpretace dat ze zkoušky distribučního transformátoru | 180 000 | 20,55 |

## Životnost dle IEEE

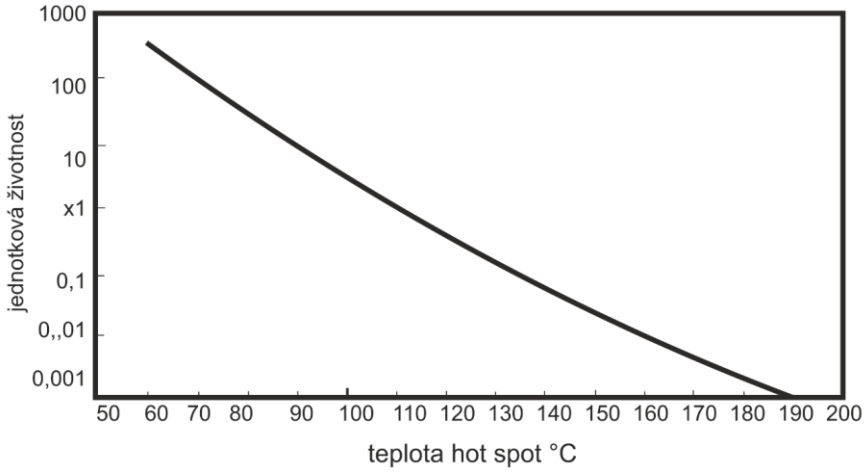
Norma IEEE [14] definuje relativní „jednotkovou životnost“ a „zrychlený faktor stárnutí“ $F_{AA}$, který má stejný význam jako relativní rychlost stárnutí $V$ v IEC [12] a ČSN [13]. Jednotková životnost je založena na referenční teplotě 110 °C a je definována rovnicí (1.9) [14].

$$jednotková\ životnost = 9.80 \times 10^{-18}\, e^{\left(\frac{15\,000}{\Theta h+273}\right)} \tag{1.9}$$

Kde

$\Theta_h$ - Teplota hot-spot ve °C

Jednotková životnost se rovná 1, když teplota nejteplejšího bodu vinutí je rovna 110 °C, je větší než 1 pro teploty $\Theta_h$ pod 110°C a menší než 1 pro teploty $\Theta_h$ nad 110°C. Korelaci jednotkové životnosti a hot-spot zobrazuje *Obr. 1.7.*




*Obr. 1.7 Závislost jednotkové životnosti na teplotě hot-spot [14]*

Celkově vzato, relativní rychlost stárnutí a rovnice vyjadřující životnost (1.6) až (1.8) naznačují, že stárnutí izolace a životnost jsou závislé na teplotě. Teplota hot-spot $\Theta_h$ tedy koresponduje se životností. To je důvod, proč je správné určení teploty hot-spot při návrhu chlazení transformátoru velmi důležité.

# 2 Chladicí systémy transformátorů

Magnetický obvod a cívky jsou zdrojem ztrát, které zapříčiňují nárůst teploty v různých částech transformátoru. Nejvyšší zvýšení teploty uvnitř stroje způsobují Jouleovy ztráty. Ztráty v železe, ztráty ve vinutí, magnetické rozptylové ztráty také způsobují zvyšování teploty uvnitř transformátoru. Může se stát, že uvolněný nebo špatný kontakt způsobí veliký přechodový odpor, což vede k lokálnímu zvyšování teploty. Teplo vznikající v důsledku všech těchto ztrát musí být rozptýleno, aniž by jádro, vinutí a konstrukční části dosáhly teploty, která způsobí degradaci izolace. Je-li izolace dlouhodobě vystavena vyšším než dovoleným teplotám, ztrácí své izolační vlastnosti a její elektrická pevnost se snižuje. [10], [16]

Přesné určení teplot všech částí transformátoru je velmi důležité. Při návrhu transformátoru se určí provozní hustota toku v jádře a proudové hustoty ve vinutí, to napomáhá při kontrole přiměřenosti chladicích režimů pro jádro a vinutí. Napomáhá také ke správnému určení spolehlivého provozu transformátoru, protože doba životnosti může být odhadnuta na základě přetěžování transformátoru a případná nápravná opatření mohou být včas vykonána. [10], [16]

Maximální teploty oleje a vinutí závisí na teplotě okolí, návrhu transformátoru, podmínkách zatěžování a způsobu chlazení. Teploty okolního vzduchu a odpovídající limity pro teploty oleje jsou specifikovány v normě IEC [17]. Jak je uvedeno v [17] je-li maximální teplota okolí 40 °C je maximální dovolená změna teploty oleje o 60 K. V zemích kde je maximální teplota okolí 50 °C je maximální dovolená změna teploty oleje odpovídajícím způsobem snížena na 50 K. V případě, že je místo instalace transformátoru ve výšce >1000 metrů nad mořem, přípustné zvýšení teploty se snižuje dle instrukcí uvedených v normách. S nadmořskou výškou se snižuje hustota vzduchu, snižuje se vztlakový účinek a přenos tepla prouděním a tím se snižuje i účinnost chlazení. [10], [16]

V olejových transformátorech slouží olej jako chladicí medium i jako izolace. Teplo je z jádra, vinutí a konstrukčních dílů odváděno systémem pro cirkulaci oleje, teplo je nakonec předáno do okolní atmosféry – vzduchu, nebo do vody. [10], [16]

## 2.1 Teplotní a proudové limity

Norma IEC [12] udává maximální hodnotu násobku jmenovitého proudu a maximální dovolené teploty pro různé části transformátorů. Tyto limitní hodnoty jsou uvedeny v *Tab. 2.I.* Maximální dovolené teploty jsou pak navýšeny pro krátkodobé a dlouhodobé přetěžování. Tabulka neobsahuje limitní teploty pro krátkodobé přetížení distribučních transformátorů, protože se těžko ovlivní délka tohoto přetěžování. V případě že, teplota oleje překročí 140 °C, můžou se začít tvořit plynové bublinky, které sníží dielektrickou pevnost transformátoru.

*Tab. 2.I Teplotní a proudové limity dle normy IEC [12]*

| Druhy zatěžování | Distribuční transformátory | Středně velké výkonové transformátory <200MVA | Velké výkonové transformátory >200MVA |
|---|---|---|---|
| **Normální cyklické zatěžování** | | | |
| Násobek jmenovitého proudu [-] | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Teplota vinutí a metalických částí, které jsou v kontaktu s celulózovou izolací [°C] | 120 | 120 | 120 |
| Teplota ostatních metalických části, které jsou v kontaktu s olejem, optickými a dalším senzory [°C] | 140 | 140 | 140 |
| Teplota oleje v horní části transformátoru [°C] | 105 | 105 | 105 |
| **Dlouhodobé nouzové zatěžování** | | | |
| Násobek jmenovitého proudu [-] | 1,8 | 1,5 | 1,3 |
| Teplota vinutí a metalických částí, které jsou v kontaktu s celulózovou izolací [°C] | 140 | 140 | 140 |
| Teplota ostatních metalických části, které jsou v kontaktu s olejem, optickými a dalším senzory [°C] | 160 | 160 | 160 |
| Teplota oleje v horní části transformátoru [°C] | 115 | 115 | 115 |
| **Krátkodobé nouzové zatěžování** | | | |
| Násobek jmenovitého proudu [-] | 2 | 1,8 | 1,5 |
| Teplota vinutí a metalických částí, které jsou v kontaktu s celulózovou izolací [°C] | - | 160 | 160 |
| Teplota ostatních metalických části, které jsou v kontaktu s olejem, optickými a dalším senzory [°C] | - | 180 | 180 |
| Teplota oleje v horní části transformátoru [°C] | - | 115 | 115 |

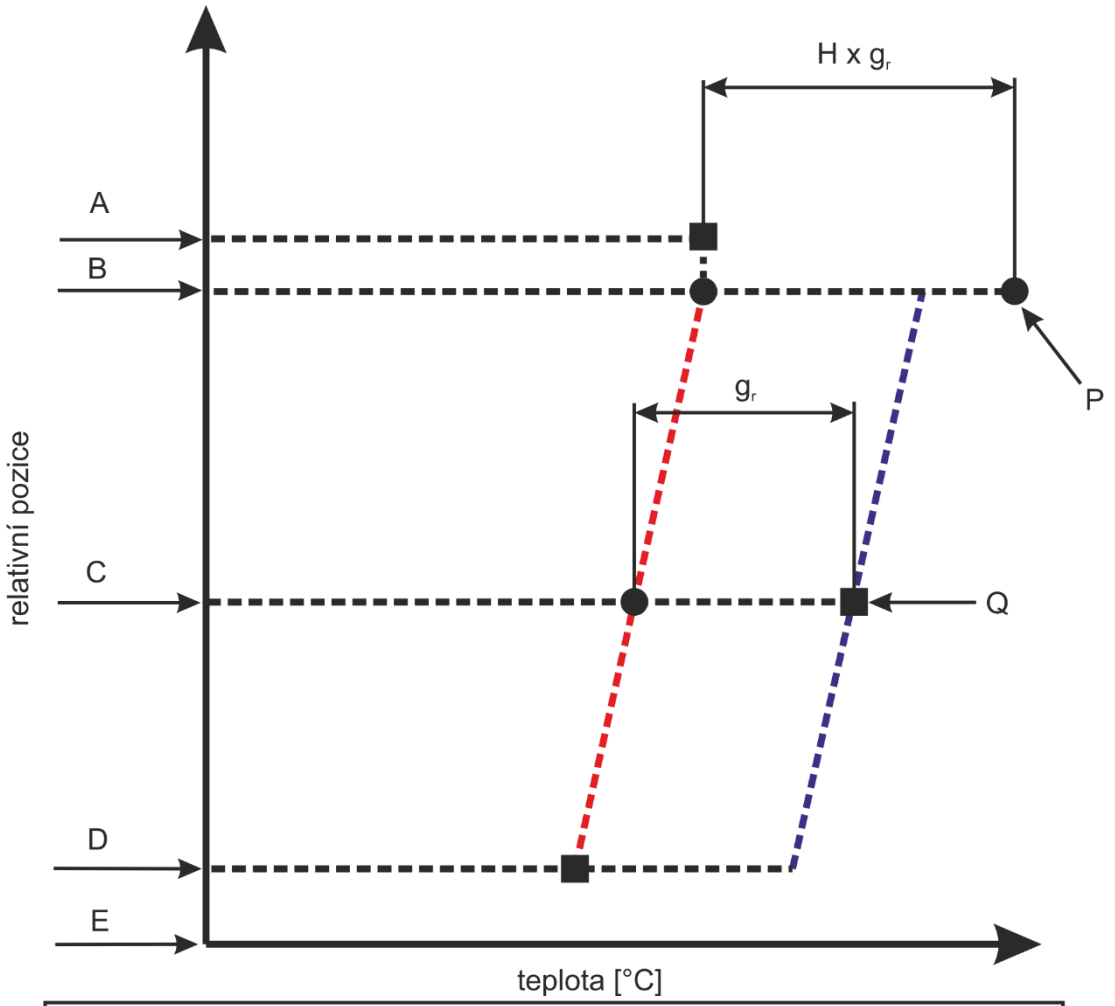
### 2.1.1 Teplota hot-spot

Hot-spot je označení pro nejteplejší místo v transformátoru, v jeho bodě podléhají části transformátoru největšímu tepelnému namáhání. Jeho správně určená hodnota je jedním z nejdůležitějších parametrů při definování tepelných podmínek a maximální přetížitelnosti transformátoru. Jak je uvedeno v *1.2.2* tepelné stárnutí a degradace izolace ovlivňuje a snižuje životnost transformátoru, protože degradace celulózy v izolačním papíru je nevratná. Uvádí se, že při zvýšení teploty o 6 K se degradace izolace zdvojnásobuje. Proto je přesné určení teploty hot-spotu důležité jak pro výrobce, tak pro monitorovací a řídicí systémy. [18]

Existují metody pro měření teploty hot-spot, z nichž jednou jsou teplotní čidla s optickými vlákny umístěných na předpokládané místo hot-spotu, teplotní čidla připojená ke konci optického vlákna jsou obvykle umístěna mezi izolovaným vodičem a distančními vložkami. Přímé měření teploty hot-spot je ale velmi komplikované, protože není předem známa přesná poloha tohoto bodu a životnost teplotního senzoru musí mít stejnou životnost jako transformátor. [18], [19]

## Určení teploty Hot-spot

Jak je uvedeno v normách IEC [12] a IEEE [14], teplotu hot-spot lze určit na základě experimentů založených na modelu rozložení tepla v transformátoru. U těchto modelů se předpokládá, že teplota oleje uvnitř transformátoru roste od spodku vinutí k hornímu konci bez rozdílu použitého druhu chlazení. Zjednodušený model rozložení teplot zobrazuje *Obr. 2.1*.




| | | | |
|---|---|---|---|
| A | výstupní teplota oleje | ----- | teplota oleje |
| B | teplota oleje v horní části nádoby | ----- | teplota vinutí |
| C | průměrná teplota oleje v nádobě | ■ | měřený bod |
| D | teplota oleje, dolní strana vinutí | ● | dopočítaný bod |
| E | dno nádrže | | |
| $g_r$ | rozdíl teploty mezi olejem a vinutím | | |
| H | hot-spot faktor | | |
| P | hot-spot teplota | | |
| Q | průměrná teplota vinutí (stanovená měřením odporu) | | |

*Obr. 2.1 Model rozložení teplot v transformátoru [12]*

Teplota vinutí se zvyšuje souběžně s teplotou oleje s konstantním rozdílem $g$, který je rozdílem mezi střední teplotou vinutí $\Theta_{VS}$ a střední teplotou oleje $\Theta_{OS}$ při jmenovitých podmínkách. Teplota nejteplejšího místa v transformátoru je, ale ve skutečnosti větší než je teplota v horní části transformátoru, rozdíl je způsoben především růstem rozptylových ztrát směrem k hornímu konci vinutí. Číselně teplotu hot-spot $\Theta_H$ (také označovanou jako $T_{H\text{-}S}$) vypočítat dle následujících vztahů [12], [19]:

$$\Theta_H = \Theta_{oh} + H \cdot g \cdot K^y \quad (2.1)$$

Nejsou-li známy výsledky oteplovacích zkoušek transformátoru a není-li tedy znám rozdíl teplot oleje a vinutí při jmenovitých podmínkách, může se k výpočtu hot-spot použít následující rovnice:

$$\Theta_H = \Theta_{oh} + (\Theta_{vh} - \Theta_{oh}) \cdot (H - 1) \quad (2.2)$$

kde

| | | |
|---|---|---|
| $\Theta_H$ | - | teplota hot-spot [°C] |
| $\Theta_{oh}$ | - | teplota oleje v horní části transformátoru [°C] |
| $\Theta_{vh}$ | - | teplota horní části vinutí [°C] |
| $g$ | - | rozdíl teplot oleje a vinutí při jmenovitých podmínkách [K] |
| $y$ | - | exponent proudu v závislosti na přírůstku teploty |
| $K$ | - | poměr zatěžovacího proudu |
| $H$ | - | činitel hot-spot |

Dle výše uvedených vzorců lze vyjádřit teplotu hot-spot, jednotlivé parametry nezbytné pro tento výpočet jsou buď přímo měřitelné, nebo jsou pro různé typy transformátorů stanoveny normami. Další metody výpočtu teploty hot-spot uvádí normy IEC [12] a IEEE [14]. [12], [19]

## 2.2 Způsoby přenosu tepla

Mechanismus přenosu tepla probíhá třemi způsoby: prouděním, vedením a zářením. V olejových transformátorech hraje nejdůležitější roli proudění, nejmenší pak vedení. Přesné vyjádření těchto způsobů přenosu tepla je poměrně složité a při návrhu transformátorů se spíše používají empirické modely. [16]

## 2.3 Rozdělení chladicích systémů

Přirozená cirkulace oleje skrze nádobu transformátoru se označuje jako „termosifonový“ efekt. Teplo je neseno izolačním médiem, dokud není skrze stěny nádoby

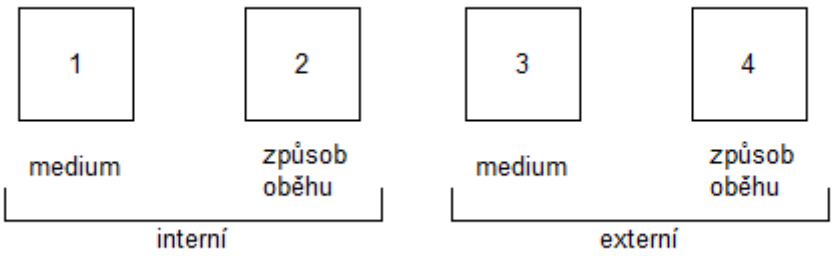
transformátoru přeneseno do vnějšího prostředí. U menších transformátorů můžou být stěny nádoby, pro zvýšení plochy pro přenos tepla do okolí nádoby, upraveny do tvaru žeber nebo trubiček. Radiátory, obvykle odnímatelné, slouží ke zvětšení plochy pro přenos tepla konvekcí do okolního prostředí, bez nutnosti zvětšovat nádobu. Na tyto radiátory mohou být naistalovány ventilátory pro zvýšení průtoku vzduchu skrze radiátory. [10], [16]

Velké transformátory, které již nemohou být účinně chlazeny radiátory a ventilátory spoléhají na čerpadla, která urychlují cirkulaci oleje skrze transformátor a skrze externí tepelný výměník. [10], [16]

Proudí-li chladicí kapalina skrze vinutí transformátoru přirozeně, označujeme toto proudění jako neřízené. V případě, kdy jsou použita čerpadla a je kapalina vtlačována do části nádoby, nebo skrze vinutí, označuje se takové proudění jako „nucené“. U nuceného proudění jsme schopni kontrolovat stupeň průtoku kapaliny skrze vinutí. Rozdíl mezi nuceným a neřízeným průtokem je také v uspořádání vinutí. [10], [16]

Použití přídavných zařízení jako jsou ventilátory a čerpadla s chladiči s nuceným oběhem zvyšuje účinnost chlazení a tím se zvětšuje výkonová zatížitelnost transformátoru bez potřeby zvětšovat nádobu. Obvykle má transformátor několik stupňů chlazení, které se zapínají postupně tak, jak roste teplota vinutí či oleje. [10], [16]

Různé způsoby chlazení pro transformátory s chladicími kapalinami byly rozděleny do chladicích tříd označených čtyřmi písmeny *Obr. 2.2.* Význam jednotlivých písmen uvádí tabulka *Tab. 2.II.*




*Obr. 2.2 Značení chladicích tříd transformátorů*

*Tab. 2.II Značení chladicích tříd [16]*

| | | Písmeno: | Význam: |
|---|---|---|---|
| Interní Chladicí systém | První písmeno (Chladicí medium) | O | Minerální olej nebo syntetická kapalina s bodem vznícení menším než 300°C |
| | | K | Kapalina s bodem vznícení větším 300°C |
| | | L | Kapalina s neměřitelným bodem vznícení |
| | Druhé písmeno (způsob oběhu) | N | Přirozené proudění přes chladicí zařízení a vinutí |
| | | F | Nucený oběh skrze chladicí zařízení, přirozený oběh ve vinutí |
| | | D | Nucená cirkulace skrze chladicí zařízení, nucené proudění ve vinutí |
| Externí Chladicí systém | Třetí písmeno (chladicí medium) | A | Vzduch |
| | | W | Voda |
| | Čtvrté písmeno (Způsob Oběhu) | N | Přirozené proudění |
| | | F | Nucený oběh |

Složená písmena z tabulky *Tab. 2.II* jsou používána pro vytvoření čtyřmístného označení chlazení transformátoru. Tento systém značení je standardizovaný a odpovídá normám IEC [12] a ČSN [13]. Různé způsoby chlazení transformátoru mohou být označovány takto:

**Vzduchem chlazené, suché transformátory**

- AN Air natural přirozené proudění vzduchu
- AF Air Forced nucené proudění vzduchu

**Olejové transformátory:**

- ONAN Oil Natural Air Natural olej přirozený oběh, přirozené proudění vzduchu
- ODAN Oil Directed Air Natural olej řízený oběh, přirozené proudění vzduchu
- ONAF Oil Natural Air Forced olej přirozený oběh, nucené proudění vzduchu
- OFAN Oil Forced Air Natural olej nucený oběh, přirozené proudění vzduchu
- OFAF Oil Forced Air Forced olej nucený oběh, nucené proudění vzduchu
- ODAF Oil Directed Air Foced olej řízený oběh, nucené proudění vzduchu

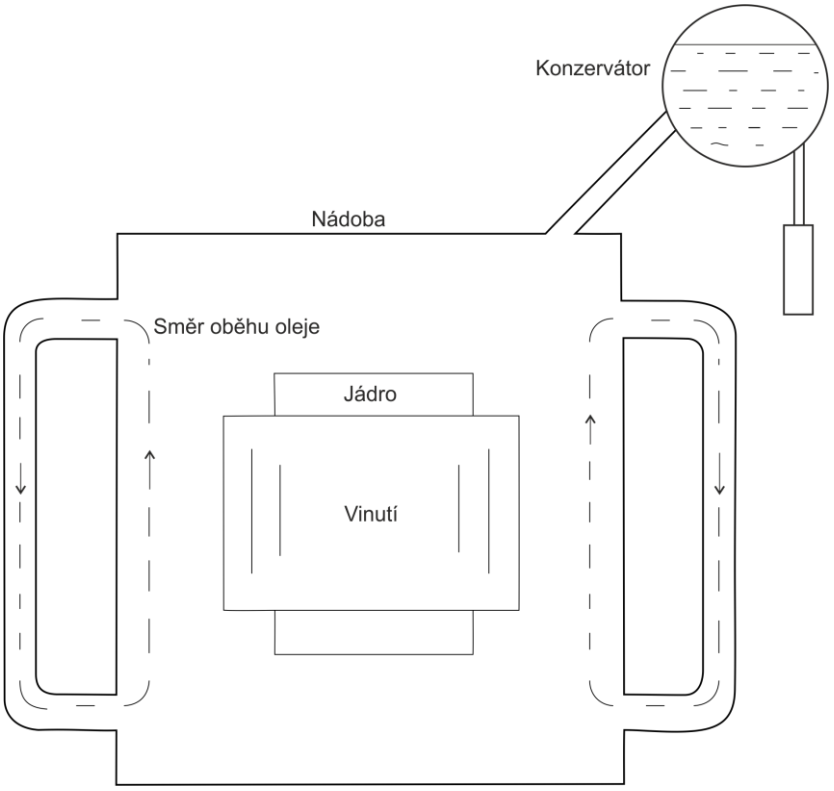
**Olejové transformátory s vodním chlazením**

- ONWF Oil Natural Water Forced olej přirozený oběh, nucený oběh vody
- OFWF Oil Forced Water Forced olej nucený oběh, nucený oběh vody

Následující kapitoly popisují různé možností chlazení výkonových transformátorů přenosové soustavy. Chladicí systém transformátoru je obvykle složen kombinací dvou různých chlazení, nejčastěji se kombinuje chlazení ONAN s jiným chlazením.

### 2.3.1 ONAN

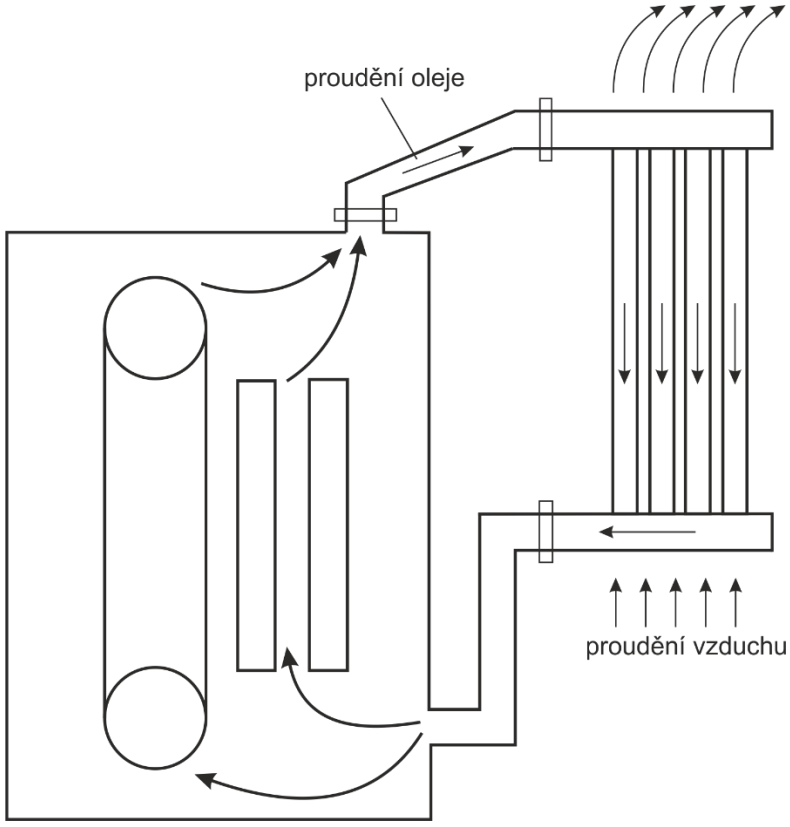
Tato metoda se používá pro olejové transformátory. Teplo generované v jádru transformátoru a ve vinutí se přenáší na olej. Ohřátý olej přirozeným prouděním stoupá směrem vzhůru a po té do radiátoru. Na uvolněné místo z dolní části nádoby do transformátoru proudí zchlazený olej z chladiče. Teplo z oleje se rozptýlí v atmosféře v důsledku přirozeného proudění vzduchu v okolí transformátoru. Tímto způsobem stále cirkuluje olej v transformátoru v důsledku přirozeného proudění a odvádění tepla do okolní atmosféry. Proudění v transformátoru zobrazuje *Obr. 2.3.* [11], [16]




*Obr. 2.3 Chlazení transformátoru ONAN [20]*

U transformátorů s malým výkonem může plocha nádoby postačovat pro rozptýlení tepla přímo do ovzduší. Transformátory s velkým výkonem vyžadují mnohem větší plochy v podobě radiátorů nebo trubic namontovaných přímo na nádobu nebo na samostatnou konstrukci. Pokud je k chlazení použit menší počet potřebných radiátorů, vhodně se namontují přímo na nádobu transformátoru. Pokud je nutné velké množství radiátorů, montují se na speciální podpůrné konstrukce. V tomto případě je nutná kontrola spojů a chladicích zařízení, aby se zabránilo úniku oleje. [16]

Pokud je k chlazení použita konstrukce s radiátory, může být chlazení účinnější zvolením správné výšky podpůrných konstrukcí *Obr. 2.4.* Při montáži vyšší podpůrné konstrukce se změní vztlak, čímž dojde ke zvýšení rychlosti průtoku oleje a rozptylu tepla v chladicím zařízení. [16]




*Obr. 2.4 Zvýšení účinnosti chlazení vyšším postavením radiátorů [16]*

### 2.3.2 ONAF

Odvod tepla může být zlepšen použitím nuceného oběhu vzduchu na radiátory transformátoru. Ventilátory zajišťují vysoký průtok vzduchu skrze radiátory a tím zvyšují rychlost odvodu tepla. Ve větších olejových transformátorech nemusí přirozený oběh poskytovat dostatečné chlazení. Rychle proudící vzduch zajistí účinnější odvod tepla a tím i účinnější chlazení. Všechny ventilátory jsou řízeny automaticky dle teploty, když teplota transformátoru překročí bezpečnou mez, sepnou se. Cirkulační proces oleje je stále přirozený. Tento způsob chlazení poskytuje lepší výkon chlazení než ONAN a umožňuje provozovat transformátor při větším zatížení, ale jsou zde vyšší pořizovací náklady na ventilátory. [16], [17]

V rozhodujícím případě zda zvolit chlazení ONAN nebo kombinované ONAN / ONAF má chlazení ONAN následující výhody:[16] (může ale zabrat více místa)

- Je spolehlivější, nejsou vyžadovány žádné chladiče ani ovládací prvky, vyžaduje menší údržbu
- Nárůst nákladů na pořízení více radiátorů je kompenzován snížením nákladů na pořízení ventilátorů a řídicího systému
- Je vhodný do lokalit, kde je vyžadována nízká úroveň hluku
- Nejsou zde ztráty chladičem
- Snižuje ztráty ve vinutí (avšak jen minimálně), protože změna teploty při chvilkovém jmenovitém zatížení menší v porovnání s kombinovaným chlazením a tím se zvyšuje životnost izolace

Existují dvě typické konfigurace pro montáž ventilátorů. Jedním ze způsob je montáž ventilátorů pod radiátory, které foukají vzduch ze spodu nahoru. Tato montáž dovoluje použít veliké ventilátory, protože je jednoduché pro ně navrhnout podpůrné konstrukce, ty mohou být upevněny na zemi nebo přímo na radiátorech, v tomto případě je třeba dbát na to, aby ventilátory nevytvářely silné vibrace. Hlavní výhodou této montáže je použití menšího počtu ventilátorů, nevýhodou pak může být ofukování ze spodu nahoru, kdy nejrychleji proudí vzduch v chladné dolní části radiátoru a v horní nejteplejší části nemusí být proudění vzduchu dostatečné, především při zanesení radiátoru nečistotami. Při druhém způsobu jsou ventilátory namontovány na straně radiátorů, ventilátory jsou obvykle menší, a proto jich je použito více. Výhodou tohoto namontování je především větší

průtok vzduchu skrze radiátory a větší možnosti řízení výkonu pomocí spínání jednotlivých bloků ventilátorů, hlavní nevýhodou je především větší počet použitých ventilátorů, se kterým vznikají větší pořizovací náklady a vyšší náklady na údržbu, užití většího počtu ventilátorů také může způsobit vibrace, které mohou mít nežádoucí vliv na měřicí přístroje. Obě montáže tedy mají své výhody a nevýhody a je nutné zvážit je již při návrhu transformátoru. [16], [17]

### 2.3.3 OFAF

Tento typ chlazení využívá kombinaci nuceného proudění oleje a nuceného proudění vzduchu. Při využití ONAN systémů je rychlost průtoku uvnitř vinutí relativně nízká. Z tohoto důvodu je tepelné přenosová kapacita nízká. Tato přenosová kapacita může být definována jako:

$$Q = mC_p(T_{out} - T_{in}) \tag{2.3}$$

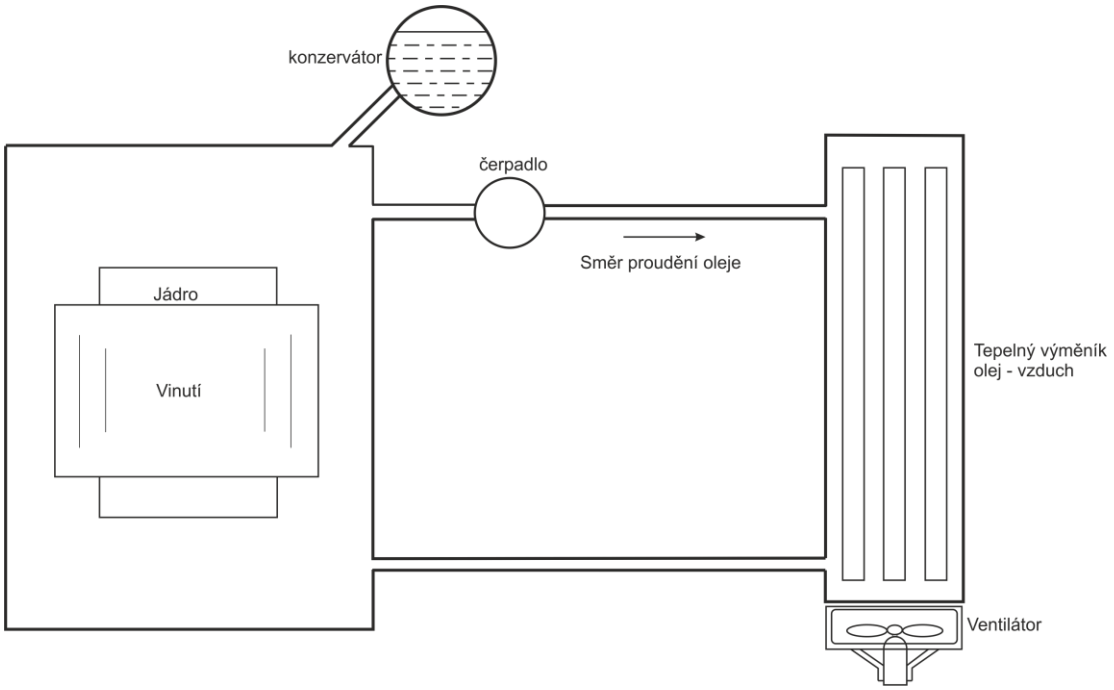
Kde

| | | |
|---|---|---|
| $Q$ | - | tepelný tok [W] |
| $m$ | - | průtok [kg/s] |
| $C_p$ | - | měrné teplo [J/kg °C] |
| $T_{out}$ | - | Výstupní teplota [°C] |
| $T_{in}$ | - | Vstupní teplota oleje[°C] |

Pro dané teploty $T_{in}$ a $T_{out}$, je jediným způsobem jak zvýšit odvod tepla zvýšení rychlosti průtoku oleje, to dosáhneme přidáním čerpadla, které zajistí cirkulaci oleje ve vysoko výkonových transformátorech. Pro zvýšení rychlosti přenosu tepla musí také ventilátory zajistit dostatečný průtok vzduchu skrze radiátory *m*. [10], [11], [16]

Pro cirkulaci oleje se používají dva druhy čerpadel axiální a radiální. Axiální čerpadlo se užívá při kombinovaném chlazení ONAN / ONAF / OFAF, protože klade nízký odpor přirozenému průtoku oleje ve vypnutém stavu. Radiální čerpadlo se užívá pro překonání třecích tlakových ztát. Při vypnutém stavu klade velký odpor přirozenému průtoku oleje, proto se užívá v chladicích systémech s tepelnými výměníky olej-vzduch nebo olej-voda, kde je neustále zapnuté. [10], [11], [16]

V případě využití OFAF systémů je chladicí systém oddělen od nádoby transformátoru. Tento chladič je propojen s transformátorem trubkami v dolní a horní části *Obr. 2.5*. Olej cirkuluje z transformátoru do chladiče přes čerpadlo, které zvyšuje jeho oběhovou rychlost. Chladič je pak vybaven ventilátory, které zajišťují rychlé proudění vzduchu. Kombinací rychlého proudění oleje uvnitř transformátoru a rychlého proudění vzduchu skrze výměník dochází k velmi účinnému způsobu přenosu tepla z jádra a vinutí do okolní atmosféry. Tento typ chlazení je využíván transformátory v rozvodnách a elektrárnách. [10], [11], [16]




*Obr. 2.5 Chlazení transformátoru OFAF [20]*

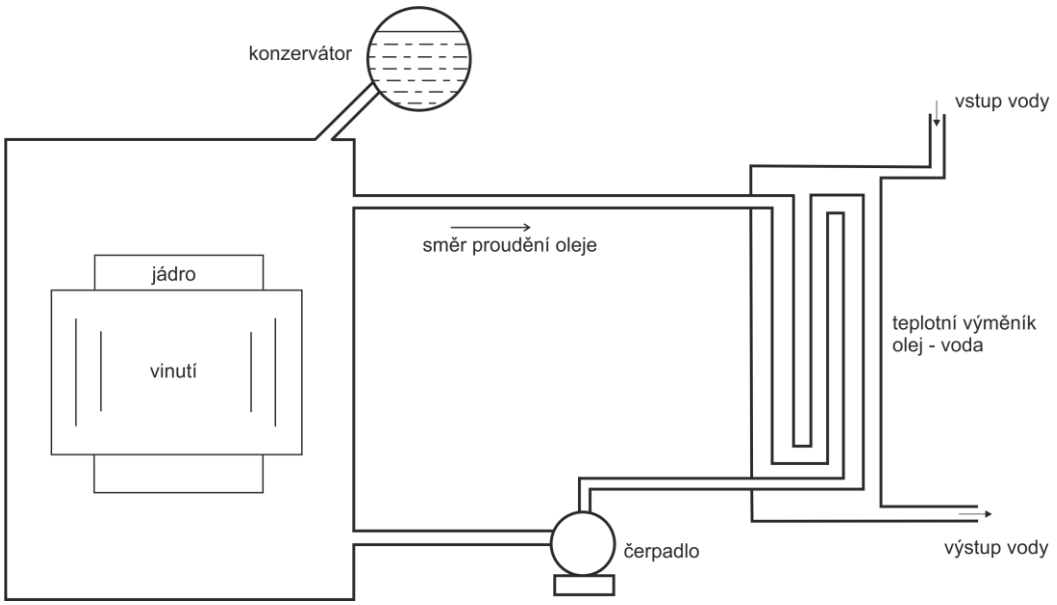
### 2.3.4 ODAF

Když je olej přiveden do transformátoru z chladiče, zahřívá se a stoupá vzhůru cestou nejmenšího odporu. Z toho důvodu nemusí olej protékat skrze vinutí a jádro efektivně a může si vytvořit paralelní cestu okolo. To znamená, že teplota oleje na vrchu nádoby se může snížit, protože se zde promíchává ohřátý olej z jádra, vinutí a studený olej, který přitéká od čerpadla. Nižší teplota oleje, který odchází z transformátoru, snižuje účinnost radiátorů. Rychlost odvodu tepla lze zlepšit, pokud je olej za pomoci čerpadel směrován ve vinutí prostřednictvím předem stanové cesty. Tento typ chlazení je označován jako ODAF – směrovaný průtok oleje, nucené proudění vzduchu. Toto chlazení je využíváno velkými blokovými transformátory. Nevýhodou tohoto systému jsou tlakové ztráty, způsobené směrováním toku oleje. Pro každý typ vinutí je nutné přesně určit potřebný průtok, nižší

průtok může způsobit nepřiměřené zvýšení teploty. Jakákoliv nečistota v oleji může vést ke snížení průtoku, což vede ke zvyšování teploty. [10], [11], [16]

### 2.3.5 OFWF

Tento typ chlazení využívá tepelný výměník, v němž je teplo z transformátorového oleje předáno chladicí vodě. Chladicí voda je čerpána do oddělené části chladičů, ve které je zchlazena a přečerpána zpět do systému. Během provozu je velmi důležité, aby tlak oleje byl větší než tlak vody, aby se zamezilo možnosti úniku vody do olejového potrubí. Proudění kapalin při využití systému OFWF zobrazuje *Obr. 2.6*. Je známo, že voda má nižší teplotu než vzduch při stejných atmosférických podmínkách, proto je schopna absorbovat více tepla, chlazení je pak účinnější a je možné použít menší radiátory. Olej je z transformátoru, stejně jako u OFAF systému, čerpán shora do tepelného výměníku kde se vodou zchladí a poté je čerpán zpět do transformátoru spodní propojovací trubicí. Tento typ chlazení je využíván především transformátory u vodních elektráren, kde je zajištěn dostatečný přísun vody a také velkými transformátory o výkonu stovek MVA. [10], [11], [16]

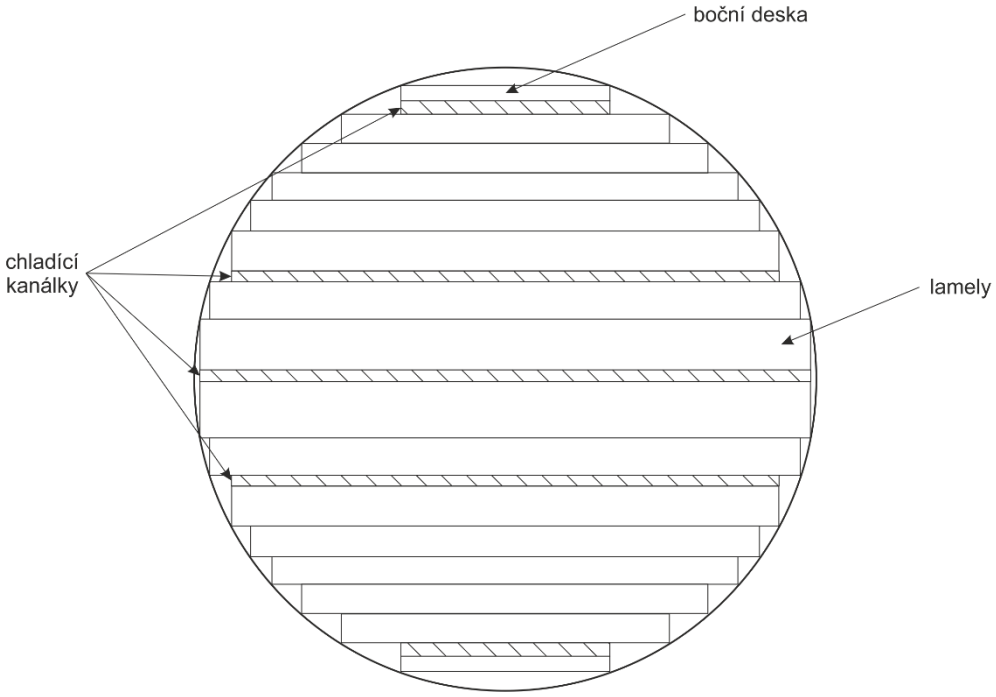



*Obr. 2.6 Chlazení transformátoru OFWF [20]*

## 2.4 Chlazení jádra transformátoru

S narůstající velikostí jádra transformátorů je nutné správné rozložení chladicích kanálků. Tyto chladicí kanálky *Obr. 2.7* snižují povrchový nárůst teploty jádra vzhledem

k teplotě oleje a také nárůst teploty vnitřního prostoru transformátoru vzhledem k okolní teplotě. [16]




*Obr. 2.7 Chladicí kanálky v jádře transformátoru [16]*

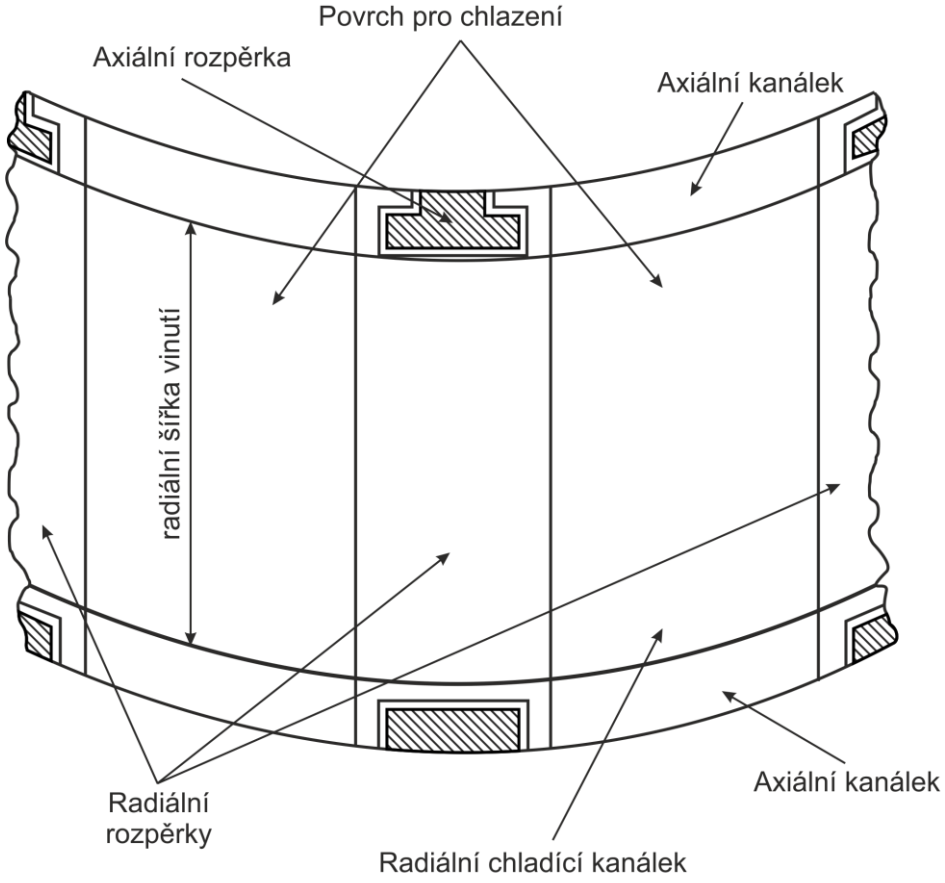
Oblast jádra (železné plochy) by měla být co největší, aby byl design jádra optimální. Chladicí kanálky snižují plochu jádra a počet lamel, proto by měl být jejich počet co nejmenší. To vyžaduje přesné určení teplotního profilu jádra a efektivní umístění chladicích kanálků. Komplikovaná geometrie mezi hraniční plochou jádra a oleje a tepelná vodivost plechů jsou faktory, které výrazně ovlivňují výpočty. Obecná formulace je dvourozměrná. Problém rozložení teploty v obdélníkových jádrech vystaveným mezním podmínkám je popsán v [21]. Metoda popsaná v [22] řeší dvourozměrný problém převedením Poissonovi rovnice na Laplaceovu rovnici. Tepelné vlastnosti jádra jsou anizotropní ve smyslu, že se tepelná vodivost v rovině plechů liší od vodivosti kolmé k rovině plechů. [10], [16]

Povrch jádra je obvykle ve styku s izolací mezi jádrem a rámem, z tohoto důvodu je teplotní limit na povrchu jádra stejný jako u vinutí. Pro vnitřní části jádra, které jsou v kontaktu pouze s olejem je limit 140°C. Ve většině případů je rozdíl mezi povrchem a vnitřkem jádra 15 až 20 °C. [16]

## 2.5 Chlazení vinutí

Vinutí produkuje velké množství tepla, které musí být odvedeno. Chladicí olej má vysokou hodnotu měrné tepelné kapacity 2 $Jkg^{-1}K^{-1}$ , zatímco měď má zhruba 0,4. Přepravní kapacita oleje pro rozptýlené teplo je tedy vysoká, ale pro správné chlazení je nutné, aby olej protékal speciálními chladicími kanálky ve vinutí. [23]

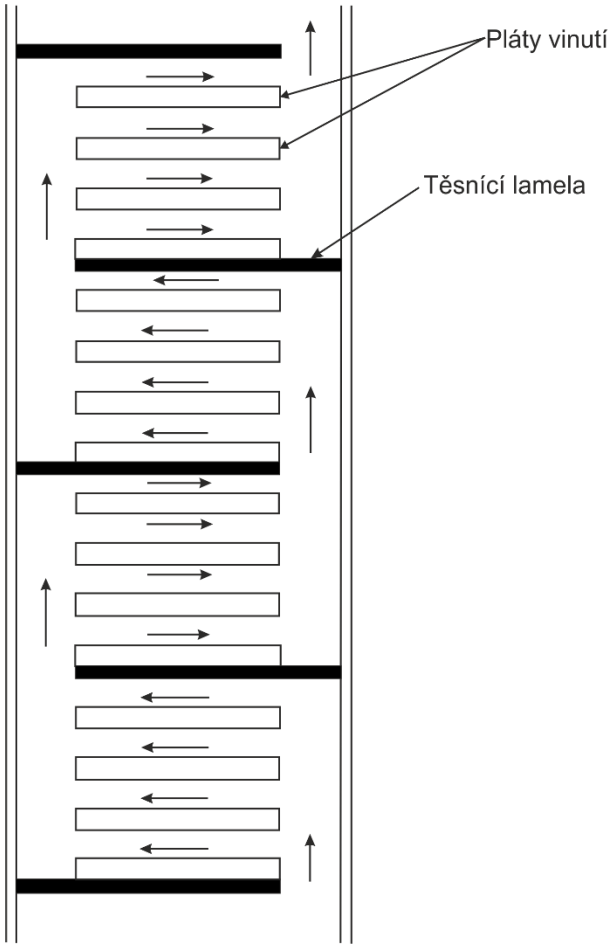
Radiální distanční sloupky (spacery) pokrývají 30 až 40 % povrchu vinutí a zakrytá plocha je nevhodná pro chlazení prouděním. Rozložení zobrazuje *Obr. 2.8*. Teplo ze zakryté oblasti vinutí se převede do části odkryté, a tím dochází ke zvětšování zatížení na nekrytých plochách. Požadovaná tloušťka rozpěrky úzce souvisí se šířkou vinutí. Při užití příliš nízkých rozpěrek olej proudí více axiálními kanálky, což vede ke zvyšování teploty na střední části vinutí. Pokud je šířka vinutí větší, dva axiální kanálky na vnitřním a vnějším průměru disku závitů nemusejí poskytovat dostatečné chlazení. Proto někteří výrobci přidávají další kanálek ve středu šířky vinutí. [16]




*Obr. 2.8 Rozložení chladicích kanálků ve vinutí [16]*

Axiální kanálky hrají důležitou roli v odvodu tepla z vinutí. Čím větší je jejich šířka, tím větší je průtok oleje, to nejvíce platí u vinutí bez radiálních chladicích otvorů mezi disky závitů. Ve velkých transformátorech velikost axiálních a radiální kanálků rozhoduje o rychlosti proudění oleje ve vinutí a tím i o rychlosti odvodu tepla. Axiální kanálky na vnějším průměru mají šířku obvykle 10 až 12 mm, šířka na vnitřním průměru je obvykle 8-12 mm z důvodu zachování dielektrické pevnosti. [16]

Ve výkonových transformátorech se k chlazení vinutí používá řízený průtok oleje. Řízeného průtoku se ve vinutí dosáhne za pomoci těsnicích lamel *Obr. 2.9*. Tyto těsnicí lamely musejí být nařezány na přesné rozměry a utěsnění v požadovaných místech eliminuje únik oleje. Musejí být také pevně upevněny na vnitřním vodiči (vnitřní průměr), nebo na vnějším vodiči (vnější průměr). Umístění a počet těsnicích lamel zkoumá např. [21].




*Obr. 2.9 Umístění těsnících lamel [16]*

# 3 Monitoring a možnosti řízení chlazení transformátoru

Ze spolehlivostního hlediska patří transformátory ke klíčovým prvkům přenosové soustavy. K zajištění jejich bezporuchového provozu významně přispívá technická diagnostika. Ta během provozu sleduje diagnostikované veličiny. Dnes jsou již všechny veličiny měřeny online systémy, které jsou trvale připojeny k diagnostikovanému objektu, ty jsou obecně nazývány jako monitorovací systémy.

Pro včasné zachycení nejvíce závad by měli být monitorovány ty části transformátoru, u kterých je největší pravděpodobnost vzniku závady, především aktivní části – vinutí a magnetický obvod. K degradaci oleje a rozkladu celulózového papíru přispívají všechny uvedené činitele, za hlavní parametr se pro zatěžování transformátoru se považuje teplota. Teplota také slouží k odhadnutí stárnutí transformátoru a k výpočtu životnosti. Nejčastěji měřené parametry jednotlivých komponentů transformátorů zobrazuje *Tab. 3.I.* [19]

*Tab. 3.I Nejčastěji měřené parametry jednotlivých komponentů transformátorů PS [3]*

| Součást | Měřená veličina |
|---|---|
| Provoz | Doba provozu |
| | Napětí VN, NN |
| | Proudy VN, NN, TN |
| | Okolní teplota |
| Izolační systém aktivní části | Teplota vrchní vrstvy oleje |
| | Teplota spodní vrstvy oleje |
| | Plyny rozpuštěné v oleji |
| | Vlhkost oleje |
| | Plyn v Buchholzově relé |
| OLTC - přepínač odboček | Pozice odbočky |
| | Počet provedených operací |
| | Teplota oleje OLTC |
| | Vlhkost oleje OLTC |
| | Součet spínaných proudů přepnutí |
| | Průběh výkonu motorem pohonu |
| Průchodky | Změna kapacity průchodky |
| | Napětí na vývodu průchodky |
| Chladicí systém | Teplota oleje na vstupu chladiče |
| | Teplota oleje na výstupu chladiče |
| | Chod čerpadla ZAP/VYP |
| | Chod ventilátoru ZAP/VYP |
| | Doba provozu motoru ventilátoru |

## 3.1 Monitorované veličiny chlazení

Sledované parametry je vždy nutné zvážit s ohledem na potřeby, stáří a velikost transformátoru. Čím větší bude množství monitorovaných parametrů, tím dražší bude i samotný monitorovací systém.

### 3.1.1 Snímání teploty

Teplota je uvnitř transformátoru snímána v několika bodech nejčastěji v horní a dolní části nádoby, v přepínačích odboček, teplota před a za chladičem a v některých strojích je monitorována i teplota vinutí. Pro správné řízení chlazení jsou aplikovány i teploměry pro snímání teploty v okolí stroje. [24], [25]

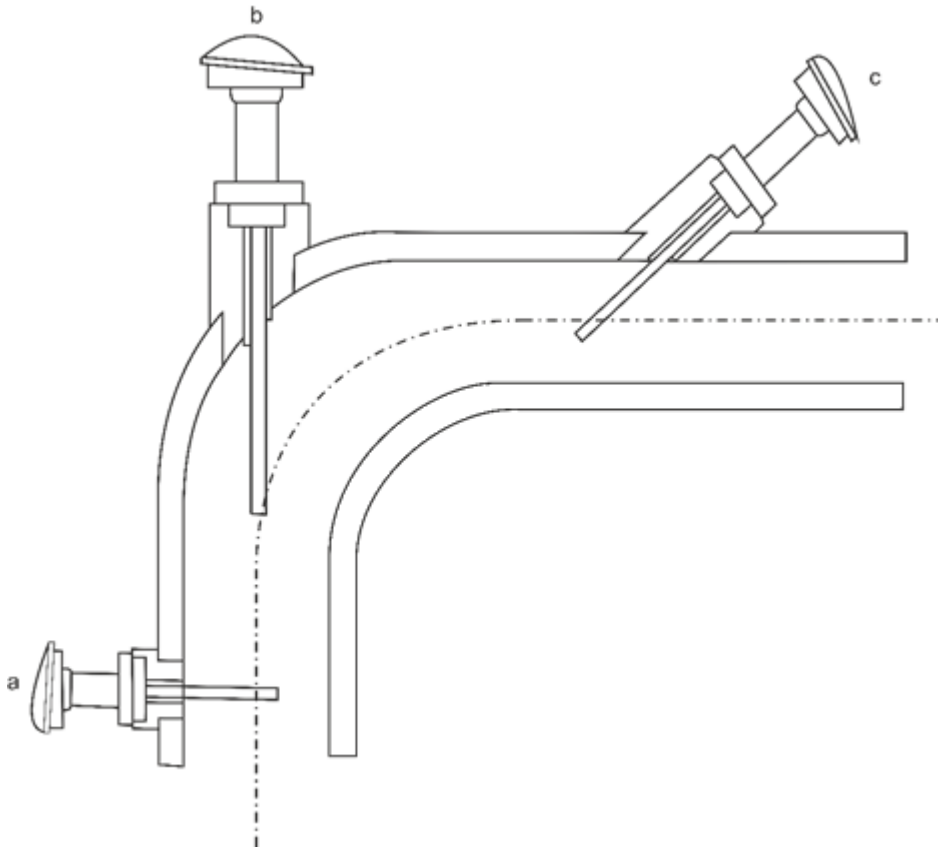
#### Měření teploty oleje

Pro měření teploty oleje a okolí se nejčastěji užívají odporové jímkové teploměry typu Pt100 *Obr. 3.1* umístěné na horní a dolní části nádoby, před a za chladičem. Ty se řadí mezi kontaktní snímače a musejí tedy být v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Jejich princip je založen na změně odporu v závislosti na teplotě a v případě senzoru Pt100 je změna 0,35 Ω/K [26]. Při 0°C je odpor roven 100 Ω [24]. Měřený rozsah tohoto teploměru je od -250 °C do +850 °C s přesností 0,1 °C na digit [25]. V případech kdy na chladiči nelze využít tyčové teploměry mohou být využity speciální magnetické s pracovním rozsahem -50 až +200°C.

*Obr. 3.1 Senzor teploty Pt100, převzato z [25]*

Pro komunikaci je signál z teploměru převáděn převodníkem na unifikovaný proudový signál 4 – 20 mA, více se však pro přenos dat využívá přenos v digitální formě, kdy se teploměr připojí do RTD převodníku, který změnu odporu převádí na digitální signál, ten lze přenášet na velmi velkou vzdálenost i v zarušeném prostření. [19]

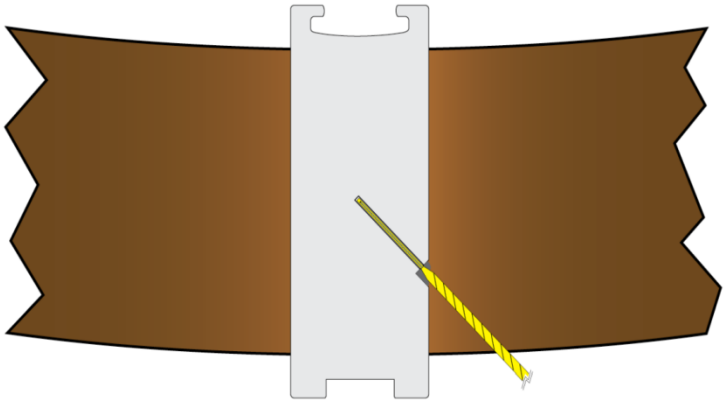
Pro správné měření teploty v olejovém potrubí se čidlo teploměru umisťuje do místa s nejvyšší rychlostí průtoku, nikoliv do rohů či koutů bez proudění. Čidlo musí zasahovat přibližně do osy potrubí. U potrubí s velkými průměry (nad 200 mm) se čidlo zpravidla umisťuje kolmo na směr proudění *Obr. 3.2a,* v případě kdy jsou použita potrubí s menšími průměry (pod 200 mm), umisťuje se teploměr pod úhlem 45° šikmo proti směru proudění *Obr. 3.2c*, případně do kolena přímo proti směru proudění *Obr. 3.2b*. [19]




*Obr. 3.2 Příklady uložení teploměru v olejovém potrubí [19]*

### Měření teploty vinutí

Teplota vinutí je sledována pomocí optických teplotních senzorů umístěných v distančních vložkách mezi jednotlivými pláty vinutí *Obr. 3.3*. Tyto senzory pracují na různých principech, nejčastěji se používají polovodiče GaAs, které mění absorpční spektrum v polovodiči v závislosti na teplotě. Přímé měření teploty může poskytovat údaje, které mohou posloužit k minimalizaci požadavků na údržbu, prodloužení životnosti a k včasnému odhalení závady ještě před jejím vznikem. [19]



*Obr. 3.3 Optický senzor umístěný v distanční vložce, převzato z [27]*

Optické senzory mohou být užity také k přímému měření v jádře nebo v průchodkách transformátoru, v praxi se však využívá spíše ve speciálních případech. [19]

Teplotu vinutí lze také určit nepřímo pomocí převodníku ZT-F2. Sekundární proud přístrojového transformátoru proudu je přímo úměrný proudu ve vinutí. Tento proud napájí vyhřívací odpor v převodníku teploty ZT-F2 a způsobí zvýšení teploty oleje měřené převodníkem. Zvýšení teploty je úměrné gradientu teploty vinutí vůči chladicí kapalině. [19]

### 3.1.2 Snímání teplotního spádu na chladičích

Snímání teplotního spádu může sloužit jako jedna z řídicích veličin u transformátorů s nuceným oběhem oleje. Mimo horní teploty v nádobě se měří teplota ve zpětném potrubí z chladičů a na základě těchto dvou teplot lze kontrolovat efektivitu chlazení, tedy teplotní spád na chladičích. Každý výrobce udává potřebnou intenzitu chlazení pro různé provozní teploty, regulace chlazení se provádí automaticky řídícími prvky transformátoru na základě teploty v horní části nádoby. Intenzitu chlazení také lze vyhodnotit na základě teplot oleje

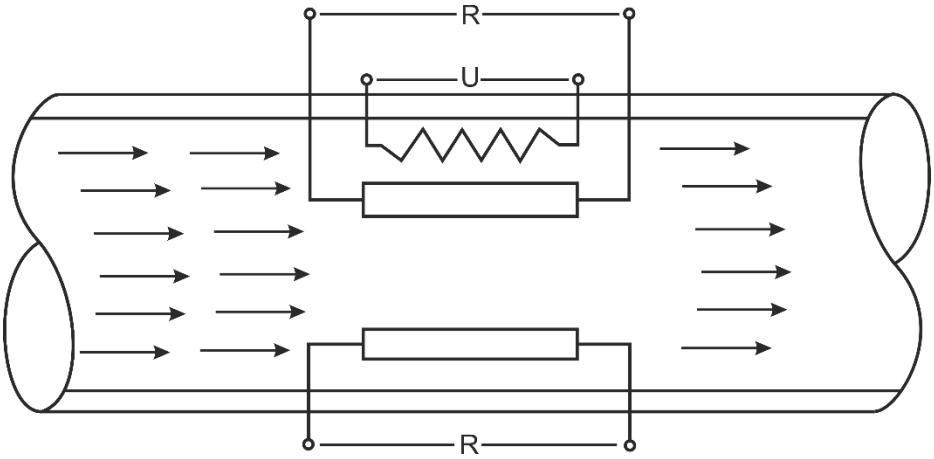
na vstupu a výstupu chladiče, v tomto případě je nutné na vstup a výstup chladiče přidat odporové jímkové teploměry. [19]

### 3.1.3 Signalizace stavu čerpadel a ventilátorů

Ventilátory a čerpadla jsou napájeny z rozvodné skříně transformátoru. Spínací stykače obsahují pomocné kontakty, ze kterých se získává informace o jejich stavu. Jsou podloženy DC napětím pro signalizaci a signál se přivádí na digitální terminál, ve kterém dochází k převodu na 1 bitovou signalizaci zapnuto / vypnuto. [25], [26]

### 3.1.4 Snímání cirkulace oleje

Velké olejové transformátory jsou chlazeny cirkulací oleje, pohyb chladicího media je možné sledovat pomocí průtokoměrů *Obr. 3.4*. Stanovením rychlosti průtoku je možné zjistit funkčnost čerpadel zajišťujících nucený nebo řízený oběh oleje. Snímač funguje na základě kalorimetrického měřícího principu. Obsahuje dva teplotně závislé odpory, připojené k měřícímu můstku. Jeden je závislý na teplotě oleje a druhý je v tepelném kontaktu s topným článkem. Přivedeme-li na topný článek napětí, vzniká mezi odpory rozdíl teplot, který je konstantní, pokud je chladicí medium v klidu. Proudí-li medium přes měřicí odpory, dochází k odvádění tepla z topného článku a teplota na zahřátém měřicím odporu začne klesat. Teplotní rozdíl mezi odpory se změní a dojde i ke změně napětí na měřicím můstku, na základě rozdílů napětí lze určit aktuální stav proudění. [19]




*Obr. 3.4 Snímač cirkulace oleje [19]*

## 3.2 Řízení chlazení

Moderní řídicí systémy spolupracují s monitorovacími a diagnostickými systémy transformátoru. Nepřetržitě snímají a vyhodnocují změny v chladicím systému a s daty okamžitě pracují. Systémy pro řízení chlazení mohou být použity na všech typech transformátorů a oproti neřízenému chlazení mají značné výhody. Zvládají nezávisle ovládat šest skupin ventilátorů, čímž redukují produkovaný hluk a udržují stabilní teplotu uvnitř transformátoru. Ventilátory jsou spínány na základě naměřených hodnot, teploty hot-spot, ale také pomocí vypočtené prognózy pro teplotu hot-spot na základě aktuálního zatížení a okolní teploty transformátoru. Systémy zabraňují soustavnému zatěžování jedné skupiny ventilátorů tím, že monitorují dobu běhu, a vždy první spínají ty ventilátory, které jsou nejméně namáhány. [24]

Z bezpečnostních důvodů se každý týden spínají všechny chladiče na deset minut, po deseti minutách pokračují jen ty, které jsou nutné k chlazení. Tato zkouška se provádí, aby se u déle nevyužitých chladičů předešlo problémům s korozí nebo s ložisky. Při náhlém spuštění je systém schopen spínat chladiče postupně v 10 vteřinových časových prodlevách, jednak se tím omezí proudová špička, která by mohla způsobit v případě havárie selhání záložních zdrojů, ale také se tím omezí tlakový impulz v oleji z prudkého zchlazení, který by mohl poškodit přetlakové ochrany. [24]

V případě, že systém sepne novou skupinu ventilátorů, avšak do jedné minuty neobdrží zpětnou vazbu o sepnutí ventilátorů, ihned se pokusí sepnout ventilátory jiné. Pokud systém selže nebo není schopen posílat signály řídící jednotce chlazení, pak řídicí jednotka vydá pokyn k sepnutí všech chladičů a při návratu do normálního provozu opět systém převezme kontrolu nad chlazením. Pokud selže řídicí systém i řídicí jednotka chladičů, chlazení by mělo být aktivováno podle přednastavené teploty v horní vrstvě transformátoru. [24]

### 3.2.1 Systém řízení chlazení ONAN / ONAF

Tento způsob chlazení využívá přepínání mezi ONAN a ONAF systémy. Systém chlazení může být řízen MST, který snímá řadu veličin a na základě algoritmu vyhodnocuje aktuální stav, podle kterého spíná ventilátory, nebo může být systém chlazení řízen přímo na základě teplot.

#### Řízení chlazení pomocí MST

Chlazení řízené MST přepíná režim ONAN / ONAF na základě algoritmu, který počítá se zatížením, teplotou oleje a teplotou okolí. Systém monitoringu sleduje aktuální zatížení a současně předpovídá budoucí vývoj zatížení, včetně krátkodobé přetížitelnosti, teplota oleje je snímána v horní části nádoby a pro měření teploty okolí je instalován externí teploměr. Systém neustále monitoruje a dopočítává zmíněné veličiny a dle nich spíná chladicí skupiny. Systém rozděluje jednotlivé ventilátory do třech skupin po čtyřech. Jednotlivé skupiny ventilátorů I, II, III jsou pak spínány podle tabulky *Tab. 3.II*. Souběžně také systém vypočítává aktuální teplotu hot-spot, k tomu využívá metody uvedené v normách IEC [12] a IEEE [14]. Podle vypočítané hodnoty hot-spot mohou také být spuštěny ventilátory. Teplota hot-spot také slouží k určování krátkodobé přetížitelnosti. Zapojení tohoto řídicího systému zobrazuje schéma v příloze *Obr. P- 1*.[24], [28]

Společnost ABB pro ofuk radiátorů u 220 kV transformátorů využívá ventilátory Ziehl-Abegg FC 125–NDL.7Q.3. Jmenovitý výkon motoru je 0,89 kW, jmenovité napětí 3 ~ 400 V ± 10 % a jmenovitý proud 3,3 A. Ventilátor je schopen zajistit průtok vzduchu 9.0 $m^3$/s a vytváří hluk o intenzitě 79 db(A). Na radiátory u 400 kV transformátorů jsou namontovány ventilátory Ziehl-Abegg FC 125–NDL s jmenovitým výkonem motoru 0,7 kW, jmenovitým napětí 3 ~ 400 V ± 10 % a jmenovitým proudem 2,3 A. Tento ventilátor zajišťuje průtok vzduchu 7.5 $m^3$/s přičemž vytváří hluk o intenzitě 74 db(A). Schéma zapojení motorů je na obrázku *Obr. P- 2* v příloze.[28]

*Tab. 3.II Limitní teploty pro spínání ventilátorů [28]*

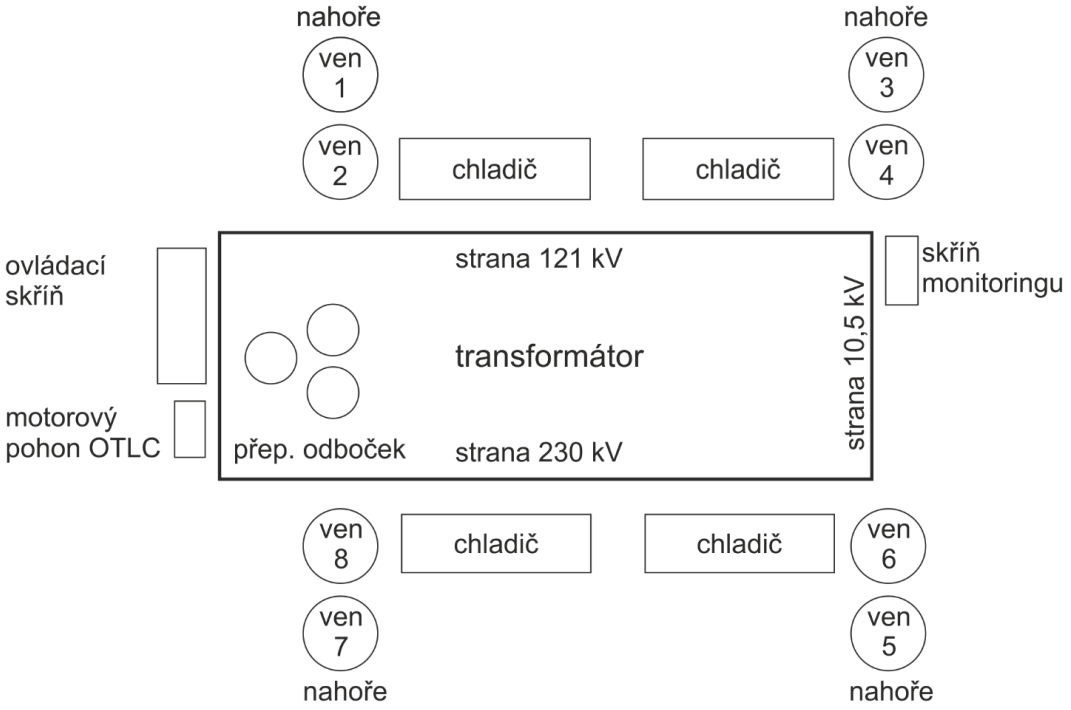
| | Prvek | teplotní limit pro 200kV transformátory [°C] | teplotní limit pro 400kV transformátory [°C] |
|---|---|---|---|
| Limity pro teplotu oleje | Ventilátory I vyp | 47 | 65 |
| | Ventilátory I zap | 50 | 70 |
| | Ventilátory II vyp | 57 | 73 |
| | Ventilátory II zap | 60 | 78 |
| | Ventilátory III vyp | 67 | 80 |
| | Ventilátory III zap | 70 | 85 |
| | Výstraha | 95 | 95 |
| | Vypnutí | 105 | 105 |
| Limity pro nejteplejší místo vinutí | Ventilátory I vyp | 67,8 | 65 |
| | Ventilátory I zap | 70 | 70 |
| | Ventilátory II vyp | 75,3 | 73 |
| | Ventilátory II zap | 78 | 78 |
| | Ventilátory III vyp | 82,8 | 80 |
| | Ventilátory III zap | 85 | 85 |
| | Výstraha | 115 | 115 |
| | Vypnutí | 130 | 130 |

## Řízení chlazení pomocí teplot

Jiný druh řízení chlazení transformátorů ONAN / ONAF využívá přímé řízení na základě teplot. Jednotlivé chladiče tohoto systému jsou tvořeny čtyřmi radiátory a dvěma ventilátory. Teploty jsou třemi senzory měřeny na vinutí 400 kV (případně 220 kV), 121 kV a 10,5 kV, měří se i teplota v horní části nádoby. Na základě těchto teplot jsou spínány dvě chladicí skupiny vždy po čtyřech ventilátorech. Chladicí skupinu 1 tvoří ventilátory umístěné v horní části radiátorů – ventilátor 1, 3, 5, 7. Druhou chladicí skupinu tvoří ventilátory umístěné v dolní části radiátorů – ventilátor 2, 4, 6, 8. Rozmístění chladičů a ventilátorů v jednotlivých chladicích skupinách zobrazuje *Obr. 3.5*. Jednotlivé limitní teploty pro spínání chladicí skupin ventilátorů, teploty pro spuštění výstrahy a vypnutí transformátoru zobrazuje *Tab. 3.III*. [29]

*Tab. 3.III Limitní teploty pro spínání chladicích skupin [29]*

| | Vinutí 400 kV [°C] | Vinutí 121 kV [°C] | Vinutí 10,5 kV [°C] | Teplota oleje v horní části [°C] |
|---|---|---|---|---|
| Chladicí skupina 1 | 45 | 45 | 45 | 40 |
| Chladicí skupina 2 | 75 | 75 | 75 | 60 |
| Výstraha | 113 | 113 | 113 | 95 |
| Vypnutí | 125 | 125 | 125 | 110 |




*Obr. 3.5 Rozložení chladičů na nádobě transformátoru [29]*

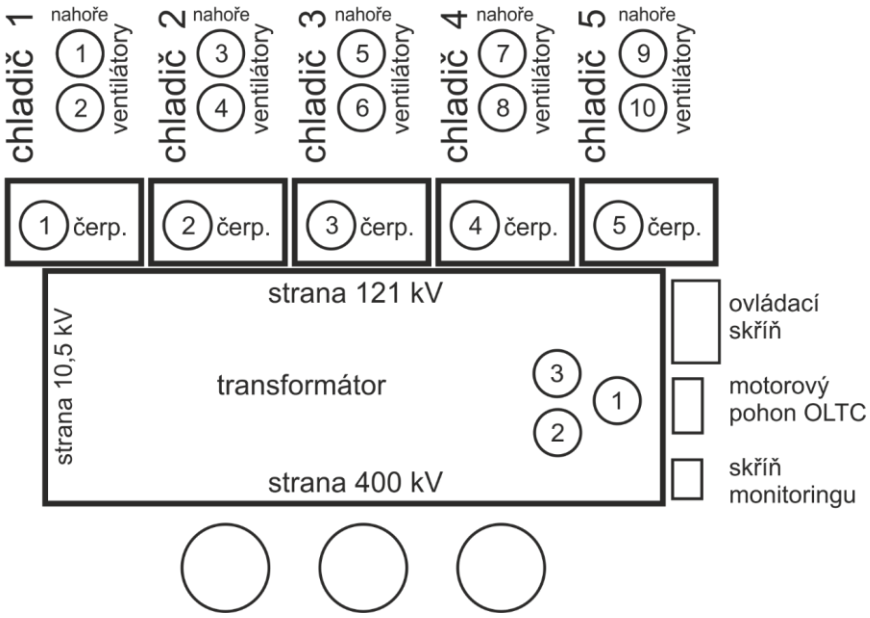
Na základě teplot uvedených v tabulce *Tab. 3.III* jsou ventilátory spínány přes motorové stykače ovládající jednotlivé chladicí skupiny. Stykače jsou vybaveny řídicím kontaktem, který určuje, zda daná skupina ventilátorů bude sepnuta jako první, nebo až při dalším zvýšení teploty jako druhá. Tím zabezpečuje, aby obě skupiny byly zatěžovány souměrně. Schéma zapojení tohoto řídicího systému zobrazuje *Obr. P- 3* v příloze, kde WTI1 – WTI3 jsou ukazatele teploty vinutí Messko XK2464, OTI je ukazatel teploty oleje v horní části nádoby Messko XK 2454, K1 a K2 jsou motorové stykače a Q1 – Q2 jsou ochranné motorové jističe. [29]

Výrobce tohoto chlazení Siemens používá vlastní ventilátory Siemens 2CT2 805-5EA13 s jmenovitým výkonem 600 W, jmenovitým napětím 3 ~ 400 (+6/-10 %) V a jmenovitým proudem 1,6 A. Ventilátor pracuje při otáčkách 450 ot/min a zajišťuje průtok vzduchu 4 $m^3$/s. Schéma zapojení motorů je na obrázku *Obr. P- 4* v příloze. [29]

### 3.2.2 Systém řízení chlazení ODAF

Systém využívá na pěti chladičích chlazení ONAN / ODAF. Olej protéká při chlazení ODAF chladiči řízeně a vzduch je skrze radiátory foukán ventilátory. Pět chladičů je rozděleno do tří chladicích skupin viz tabulka

*Tab. 3.*V. Rozložení těchto skupin závisí na pozici přepínače S5. Každý chladič tvoří jedno čerpadlo a dva ventilátory. První skupina chladičů je spínána hlavním spínačem transformátoru. Další skupiny chladičů jsou spínány na základě teplot na 400 kV, 121 kV a 10,5 kV vinutí nebo podle teploty oleje v horní části nádoby uvedených v tabulce *Tab. 3.IV*. Rozložení chladičů a řídicích prvků na nádobě transformátoru je vyobrazeno na obrázku *Obr. 3.6*.




*Obr. 3.6 Rozmístění chladicích prvků [29]*

*Tab. 3.IV Limitní teploty pro spínání chladicích skupin [29]*

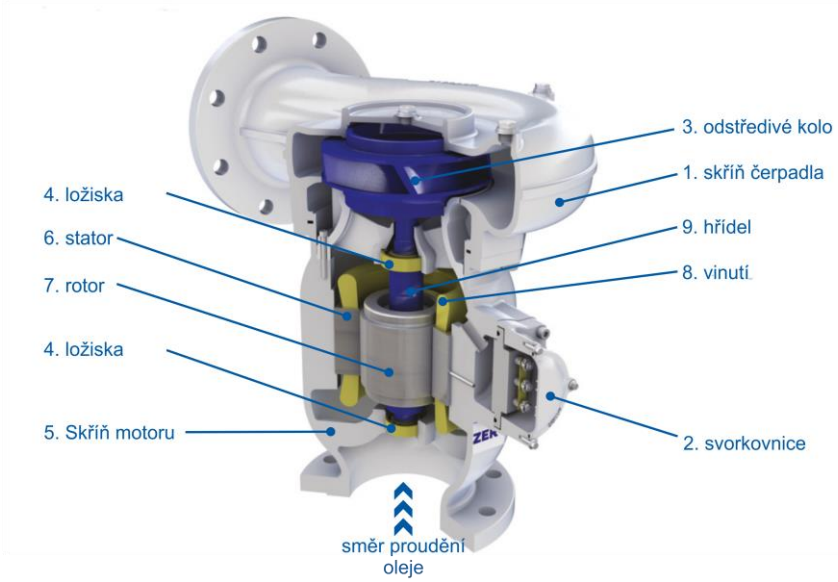
| | Vinutí 400 kV [°C] | Vinutí 121 kV [°C] | Vinutí 10,5 kV [°C] | Teplota oleje v horní části [°C] |
|---|---|---|---|---|
| Chladicí skupina 2 | 45 | 45 | 45 | 40 |
| Chladicí skupina 3 | 75 | 75 | 75 | 60 |
| Výstraha | 113 | 113 | 113 | 95 |
| Vypnutí | 125 | 125 | 125 | 110 |

Z obrázku *Obr. 3.6* je patrné, že každý chladič má své vlastní čerpadlo, toto čerpadlo je vždy spínáno společně se skupinou daných ventilátorů. Moderní čerpadla jsou odstředivého typu v provedení vakuová a odolná proti úniku oleje.

*Tab. 3.V Rozdělení chladicích skupin v závislosti na poloze přepínače S5[29]*

| pozice přepínače S5 | chladicí skupina 1 (zap/vyp hlavním spínačem transformátoru | chladicí skupina 2 (zap/vyp pomocí WTI/OTI 1. kontakt) | chladicí skupina 3 (zap/vyp pomocí WTI/OTI) 2. kontakt | | záložní chladič |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | chladič 1 | chladič 2 | chladič 3 | chladič 4 | chladič 5 |
| 2 | chladič 2 | chladič 3 | chladič 4 | chladič 5 | chladič 1 |
| 3 | chladič 3 | chladič 4 | chladič 5 | chladič 1 | chladič 2 |
| 4 | chladič 4 | chladič 4 | chladič 1 | chladič 2 | chladič 3 |
| 5 | chladič 5 | chladič 1 | chladič 2 | chladič 3 | chladič 4 |

Motor a všechny pohyblivé části v čerpadlech jsou zcela uzavřeny ve skříni motoru a skříni čerpadla, které tvoří společnou utěsněnou jednotku. Konstrukce takového čerpadla je vyobrazena na obrázku *Obr. 3.7*, kde Oběžné kolo čerpadla je přímo namontováno na hřídeli motoru. Skříň čerpadla (1) a skříň motoru (5) jsou vyrobeny z litiny a jsou spojeny pomocí šroubů. Spoj je utěsněn O - kroužkem. Stator (6) a vinutí (8) jsou namontovány přímo ve skříni motoru. Hřídel motoru (9), na níž je upevněn rotor (7), a oběžné kolo čerpadla (3) jsou uloženy v kuličkových ložiskách ve dvou rotorových kolech. Kuličková ložiska (4) mají tlumicí pružiny, které brání poškození, když je rotor v klidu a skříň motoru je namáhána vibracemi. Oběžné kolo čerpadla je z lehké slitiny a je pečlivě a vyváženo. [29]




*Obr. 3.7 Olejové čerpadlo, převzato z [29]*

Jmenovité napětí čerpadla je 400 V, jmenovitý proud 21 A a jmenovitý výkon 3,8 kW, pracuje při otáčkách 1435 ot/min. Pokles tlaku přes čerpadlo v klidovém stavu je cca. 5 kPa na 6 l/s a 15 kPa při 12 l/s. Výkon čerpadla a vstupní výkon motoru vždy závisí na hustotě a viskozitě oleje.

Motory ventilátorů mají jmenovité napětí 400 V, jmenovitý proud 2,73 A a jmenovitý výkon 550 W a otáčky ventilátoru jsou 460 ot/min. Schéma zapojení motorů a čerpadel je vyobrazeno na *Obr. P- 6* v příloze.

Schéma na obrázku *Obr. P- 5* v příloze zobrazuje zapojení řídicího systému chlazení, kde WTI1-WTI3 jsou ukazatele teploty vinutí Messko XK2464, OTI je ukazatel teploty oleje v horní části nádoby Messko XK 2454. Spínač S3 umožňuje volit režim mezi automatickým a ručním řízením chlazení, v automatickém modu je chlazení řízeno na základě teplot v transformátoru a při přepnutí na ruční řízení je možné spouštět jednotlivé chladiče pomocí spínačů. Spínač S6 přepíná mezi letním a zimním provozem chlazení. Při zimním chlazení je přes stykač K6 připojeno pomocné čerpadlo 6, které v chladném zimním období zvyšuje rychlost průtoku oleje. Spínač S5 určuje posloupnost spínání chladicích skupin, tak aby všechny ventilátory byly spínány pravidelně a nebyla tak přetěžována jen jedna skupina chladičů. Jednotlivé rozdělení chladicích skupin v závislosti na pozici spínače S5 je uvedeno v tabulce *Tab. 3.V.*

# 4 Hodnocení účinnosti chlazení transformátorů PS

Následující kapitola je věnována hodnocení chladicích zařízení čtyř transformátorů přenosové soustavy. Dva z těchto strojů pracují v síti 200 kV, v této práci jsou označeny jako TR200_1 a TR200_2, druhé dva stroje pracují v sítí 400 kV a jsou označené jakou TR400_1 a TR400_2.

Stroje TR200_1 a TR400_1 jsou osazené chladicím systémem Siemens a stroje TR200_2 a TR400_2 jsou osazené systémem chlazení ABB.

## 4.1 Metody hodnocení chlazení

Z monitoringu transformátorů přenosové soustavy ČR byla zaznamenána data v pětiminutových intervalech o výkonech, teplotách ve stroji a data o spínání ventilátorů a čerpadel ve sledovaném období 1. 1. 2015 – 31. 12. 2015. Data k analýze poskytla společnost ČEPS a.s., výhradní provozovatel české přenosové soustavy. Vzhledem k ochraně firemního tajemství jsou skutečné názvy analyzovaných strojů změny na TR200_1, TR200_2, TR400_1 a TR400_2

### 4.1.1 Spotřebovaný výkon a ekonomická náročnost

Monitoring přenosové soustavy zaznamenává pro chladicí skupiny data o jejich sepnutí a vypnutí. Sepnutí chladicí skupiny označuje jako „VZNIK“ a vypnutí jako „ZÁNIK“. Pomocí těchto dat lze určit dobu běhu jednotlivých chladicích skupin. Z návodů pro provoz transformátorů je znám příkon jednotlivých ventilátorů a čerpadel, proto je možné pomocí rovnice (4.1) spočítat celkovou spotřebovanou elektrickou energii chladicích zařízení za sledované období.

$$E_c = \sum_{0}^{n} P \cdot t \tag{4.1}$$

kde

$E_c$ - celková spotřebovaná elektrická energie [kWh]

$P$ - příkon chladicí skupiny [W]

$t$ - doba běhu chladicí skupiny [h]

$n$ - počet chladicích skupin [-]

Náklady na elektrickou energii spotřebovanou chladicími prvky lze vyjádřit pomocí vztahu (4.2), kde *cena za 1 kWh* je průměrná cena 1 kWh za rok 2015[1]. Průměrná cena v roce 2015 byla 4 Kč za 1 kWh.

$$cena = E_c \cdot cena\ za\ 1kWh_{2015} \tag{4.2}$$

Pomocí spotřebované energie a z ní vyjádřených nákladů na spotřebovanou energii chladicími prvky lze určit efektivitu chlazení. Dobře navržený transformátor nepotřebuje často spínat chladicí prvky a při nízkém zatížení postačuje chlazení oleje ONAN. Naopak horší konstrukce transformátoru může vést k častému spínání chlazení, což při životnosti transformátoru desítky let vede ke značnému navýšení provozních nákladů.

### 4.1.2 Teplotní spád

Jak je uvedeno v kapitole *3.1.2* intenzitu chlazení také vyhodnotit na základě teplot oleje na vstupu a výstupu chladiče. Transformátory TR200_2 a TR400_2 nejsou vybaveny snímačem teploty za chladičem, proto u těchto dvou strojů nebude hodnocen teplotní spád. Ani na jednom stroji není chlazení řízeno pomocí teplotního spádu, teplotní spád slouží jako varovný indikátor pro monitoring transformátorů.

### 4.1.3 Rovnoměrnost

Jak bylo uvedeno výše teplota ve stroji velmi důležitým faktorem ovlivňujícím degradaci izolačních prvků. Udržování stále teploty ve stroji vede ke snížení degradačních vlivů na izolační materiály. Např. při nízkých teplotách se voda usazuje do spíše papírové izolace a při vyšších teplotách se rozpouští v oleji.

[1] Průměrná cena 1 kWh byla počítána jako průměrná z tarifu C02d podle ceníků distributorů ČEZ a E.ON platných pro rok 2015. Uvedená cena zahrnuje ceny za distribuci a související služby pro rok 2015 dle Cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 2/2014 a č. 3/2014 ze dne 25. listopadu 2014 a cenu za dodávku elektřiny. Cena je bez DPH.

## 4.2 Hodnocené transformátory

### 4.2.1 TR200_1

Jedná se o třífázový autotransformátor se jmenovitým výkonem 200 MVA a se jmenovitým převodem 230 / 121 / ±6x2.0% / 10,5 kV. Transformátor je osazen chladicím systém Siemens se čtyřmi chladiči, z nichž každý je tvořen čtyřmi radiátory a dvěma ventilátory. Ventilátory jsou rozdělené do dvou chladicích skupin po čtyřech. První skupina ventilátorů je umístěna v horní části jednotlivých chladičů a druhá pod nimi v dolní části chladičů. Příkon jednoho ventilátoru je 600 W, celé chladicí skupiny 2,4 kW. Chlazení stroje je řízeno přímo na základě teplot ve stroji, měřených odporovými teploměry Pt100. Princip tohoto chlazení je popsán v kapitole *0*, schéma zapojení řídicího systému je na obrázku *Obr. P- 1* v příloze.

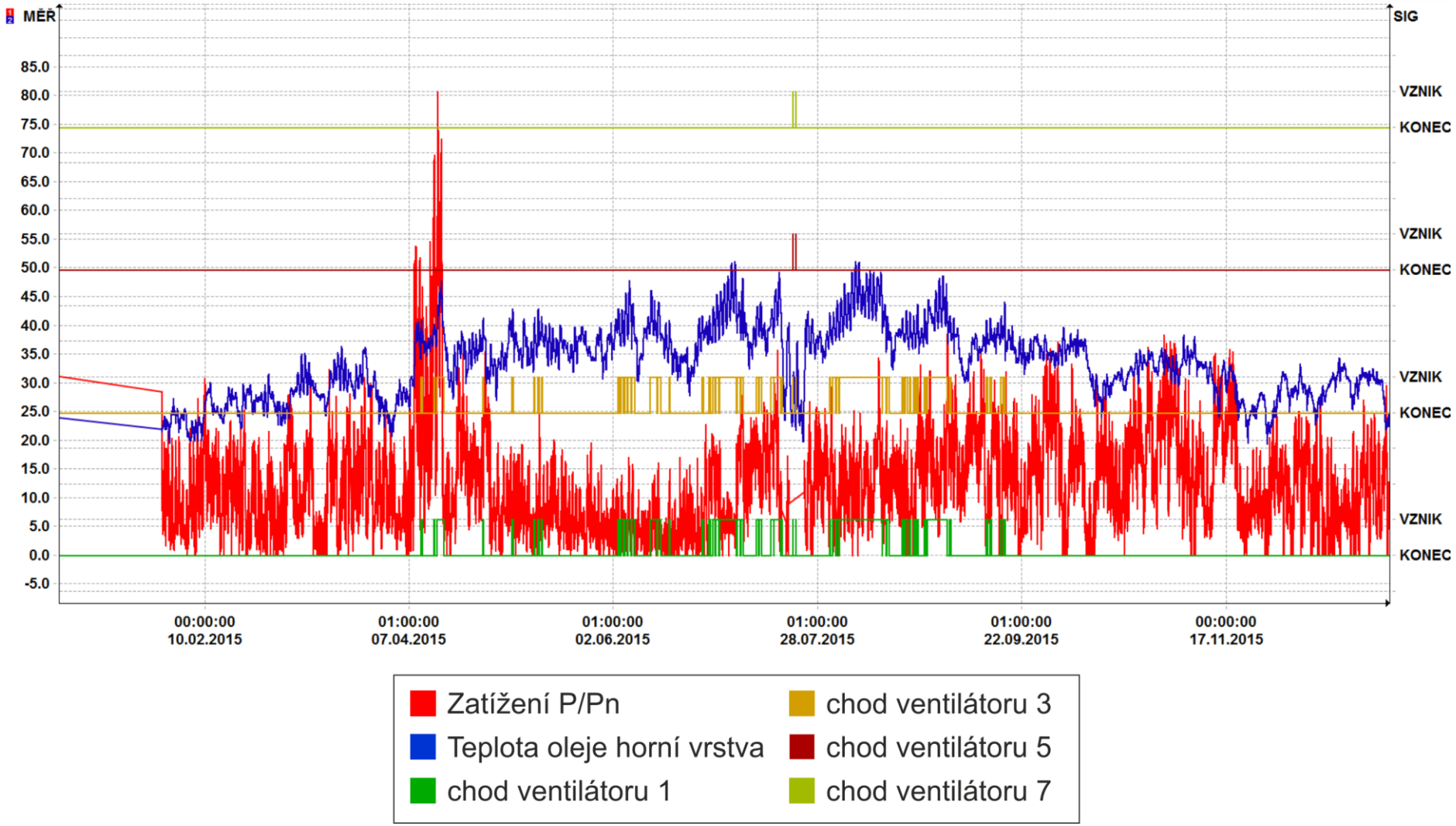
Ve sledovaném období bylo na tomto stroji sledováno zatížení poměrné zatížení $P/P_n$, teplota oleje v horní vrstvě, teplota okolí, teplota na vstupu / výstupu chladiče, chod skupiny ventilátorů 1-4 a chod skupiny ventilátorů 5-8. Počet záznamů monitoringu pro jednotlivé veličiny zobrazuje *Tab. 4.I*. Minimální, maximální, průměrné hodnoty výkonu a teplot a četnost spuštění společně dobou běhu ventilátorů v jednotlivých měsících zobrazuje *Tab. 4.II*. Graficky je pak průběh veličin vyobrazen na obrázku *Obr. 4.1* a grafu na *Obr. 4.2*.

*Tab. 4.I Počet záznamů monitoringu na TR200_1 ve sledovaném období*

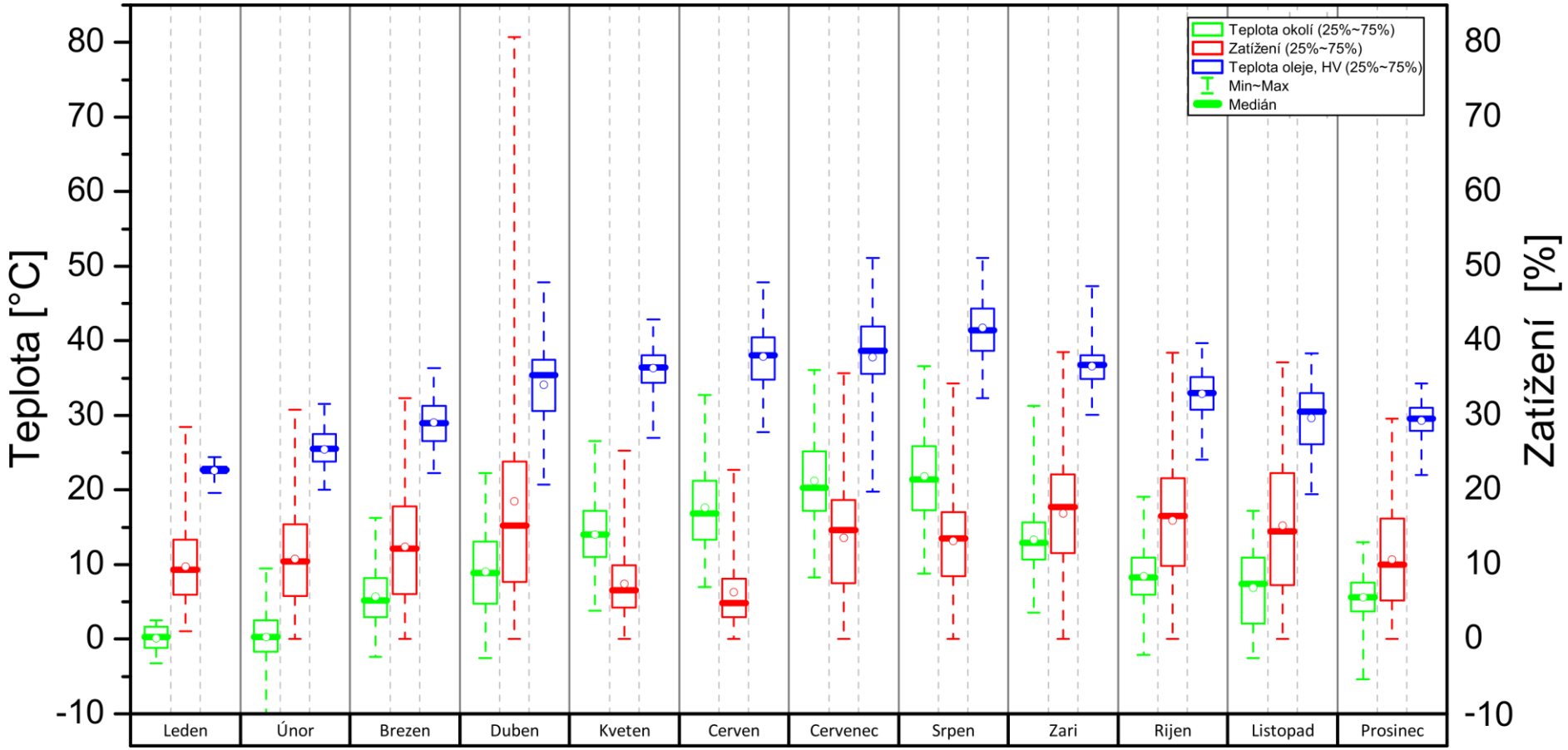
| Veličina | Zatížení P/Pn | Teplota oleje | Teplota Okolí | Chod skupiny ventilátorů 1-4 | Chod skupiny ventilátorů 5-8 | Chladiče vstup / vystup | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Počet záznamů | 91365 | 65126 | 75288 | 133 | 57 | 72 005 | 70714 | 68804 | 72061 |

*Tab. 4.II Analyzované hodnoty transformátoru TR200_1 během sledovaného období*

| | Relativní zatížení P/Pn [%] | | | Teplota oleje horní vrstva [°C] | | | Teplota okolí [°C] | | | Chod skupiny ventilátorů 1-4 | | Chod skupiny ventilátorů 5-8 | | Teplotní spád [K] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | min | prům | max | min | prům | max | min | prům | max | četnost sepnutí | doba běhu [H] | četnost sepnutí | doba běhu [H] | chladič 1 | chladič 2 | chladič 3 | chladič 4 |
| leden 2015 | 1,1 | 9,7 | 28,5 | 19,6 | 22,6 | 24,4 | -3,2 | 0,1 | 2,5 | - | - | - | - | 12,7 | 15,7 | 15,8 | 14,7 |
| únor 2015 | 0,0 | 10,8 | 30,8 | 20,0 | 25,5 | 31,5 | -10,9 | 0,3 | 9,5 | - | - | - | - | 17,2 | 16,5 | 17,3 | 16,5 |
| březen 2015 | 0,0 | 12,4 | 32,3 | 22,3 | 29,1 | 36,3 | -2,4 | 5,7 | 16,3 | - | - | - | - | 14,8 | 15,4 | 15,9 | 15,1 |
| duben 2015 | 0,0 | 18,5 | 80,7 | 20,7 | 34,1 | 47,8 | -2,5 | 9,1 | 22,3 | 4 | 63:14:02 | - | - | 15,7 | 14,7 | 16,5 | 15,3 |
| květen 2015 | 0,0 | 7,4 | 25,3 | 27,0 | 36,3 | 42,9 | 3,8 | 14,0 | 26,6 | 4 | 32:34:34 | - | - | 14,6 | 14,9 | 15,8 | 15,0 |
| červen 2015 | 0,0 | 6,3 | 22,7 | 27,8 | 37,9 | 47,8 | 7,0 | 17,6 | 32,7 | 12 | 204:34:36 | - | - | 13,1 | 13,6 | 14,5 | 13,5 |
| červenec 2015 | 0,0 | 13,6 | 35,7 | 19,8 | 37,8 | 51,1 | 8,3 | 21,3 | 36,1 | 15 | 253:50:30 | 5 | 0:00:46 | 10,6 | 11,3 | 11,8 | 11,3 |
| srpen 2015 | 0,0 | 13,1 | 34,3 | 32,3 | 41,7 | 51,1 | 8,8 | 21,9 | 36,6 | 12 | 546:48:38 | - | - | 11,8 | 12,5 | 13,1 | 12,4 |
| září 2015 | 0,0 | 16,9 | 38,5 | 30,1 | 36,6 | 47,3 | 3,6 | 13,3 | 31,3 | 5 | 51:03:09 | - | - | 13,7 | 14,3 | 15,0 | 14,1 |
| říjen 2015 | 0,0 | 15,9 | 38,4 | 24,1 | 32,9 | 39,7 | -2,1 | 8,5 | 19,1 | - | - | - | - | 14,8 | 15,4 | 16,0 | 15,1 |
| listopad 2015 | 0,0 | 15,2 | 37,1 | 19,4 | 29,6 | 38,3 | -2,5 | 6,9 | 17,2 | - | - | - | - | 13,8 | 14,2 | 15,3 | 14,3 |
| prosinec 2015 | 0,0 | 10,7 | 29,6 | 22,0 | 29,3 | 34,3 | -5,4 | 5,6 | 13,0 | - | - | - | - | 14,8 | 15,3 | 16,1 | 15,3 |
| průměr / suma | 0,1 | 12,6 | 36,1 | 23,8 | 32,8 | 41,0 | 0,2 | 10,4 | 21,9 | 52 | 1152:05:29 | 5 | 0:00:46 | 14,0 | 14,5 | 15,3 | 14,4 |
| celková doba | - | | | | | | | | | 1152:06:15 | | | | - | | | |



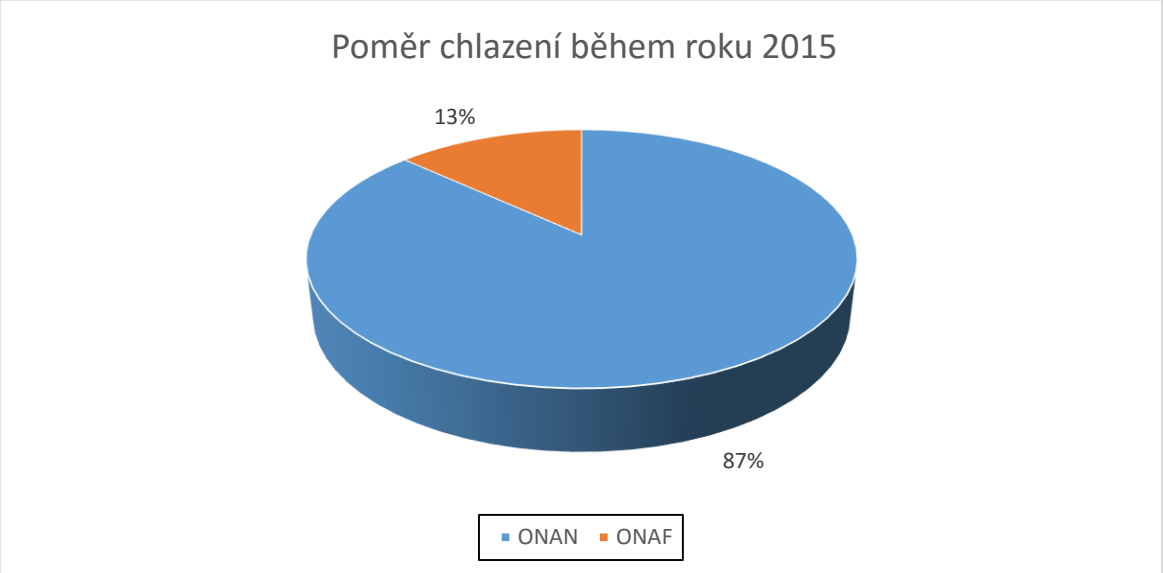

*Obr. 4.1 Průběh zatížení, teploty oleje a chodu ventilátorů na transformátoru TR200_1*




*Obr. 4.2 Graf hodnot zatížení, teploty okolí a teploty oleje na transformátoru TR200_1*

Z tabulky *Tab. 4.II* je patrné, že nejvyšší teploty byly ve stroji v měsíci dubnu, červenci a srpnu. V červenci bylo průměrné poměrné zatížení 13,63 % a nejvyšší 35,67 %, průměrná teplota okolí byla 21,26 °C a maximální 36,1 °C. Při těchto hodnotách se průměrná teplota oleje v horní vrstvě pohybovala okolo hodnoty 37,6 °C a maximální hodnota 51,1 °C. V srpnu bylo průměrné poměrné zatížení 13,14 % a nejvyšší 34,29 %, průměrná teplota okolí byla 21,26 °C a maximální 36,6 °C. Při těchto hodnotách zatížení a teploty okolí se průměrná teplota oleje v horní vrstvě pohybovala okolo hodnoty 41,73 °C a maximální hodnota 51,1 °C V tomto měsíci byla nevíce aktivní skupina ventilátorů 1 a byla sepnuta po dobu 546 hodin a 48 minut. Průběh zatížení, teplot a sepnutí skupin ventilátorů zobrazuje obrázek *Obr. 4.1*.

Během sledovaného období byla první skupina ventilátorů sepnuta celkem 52x a v provozu celkem 1152 hodin. Chladicí skupina 1 spotřebovala během sledovaného období 2765 kWh elektrické energie. Vlivem nízkého zatěžování transformátoru nebyla během sledovaného období téměř vůbec aktivní skupina ventilátorů 2. Celkové náklady na provoz chladičů tak dosáhly 11 084 Kč. Poměr doby, kdy byly chladiče sepnuty a kdy byly v klidu, tedy poměr chlazení ONAN / ONAF zobrazuje *Obr. 4.3*.




*Obr. 4.3 Graf poměru chlazení ONAN/ONAF během roku 2015 na TR200_1*

### 4.2.2 TR200_2

TR200_1 je třífázový autotransformátor se jmenovitým výkonem 200 MVA, jeho jmenovitý převod je 230 kV / 121 kV ± 6 x 2 % / 10.5 kV. Pro chlazení oleje je transformátor vybaven chladicím systémem ABB tvořeným třemi radiátory, z nichž každý je osazen dvěma ventilátory. Příkon jednoho ventilátoru je 0,89 kW. Tyto ventilátory jsou řízeny pomocí monitorovacího systému transformátoru MST. Systém řízení pomocí MST je popsán kapitole *0.* Schéma zapojení řídicího systému je vyobrazeno na obrázku *Obr. P- 3* v příloze.

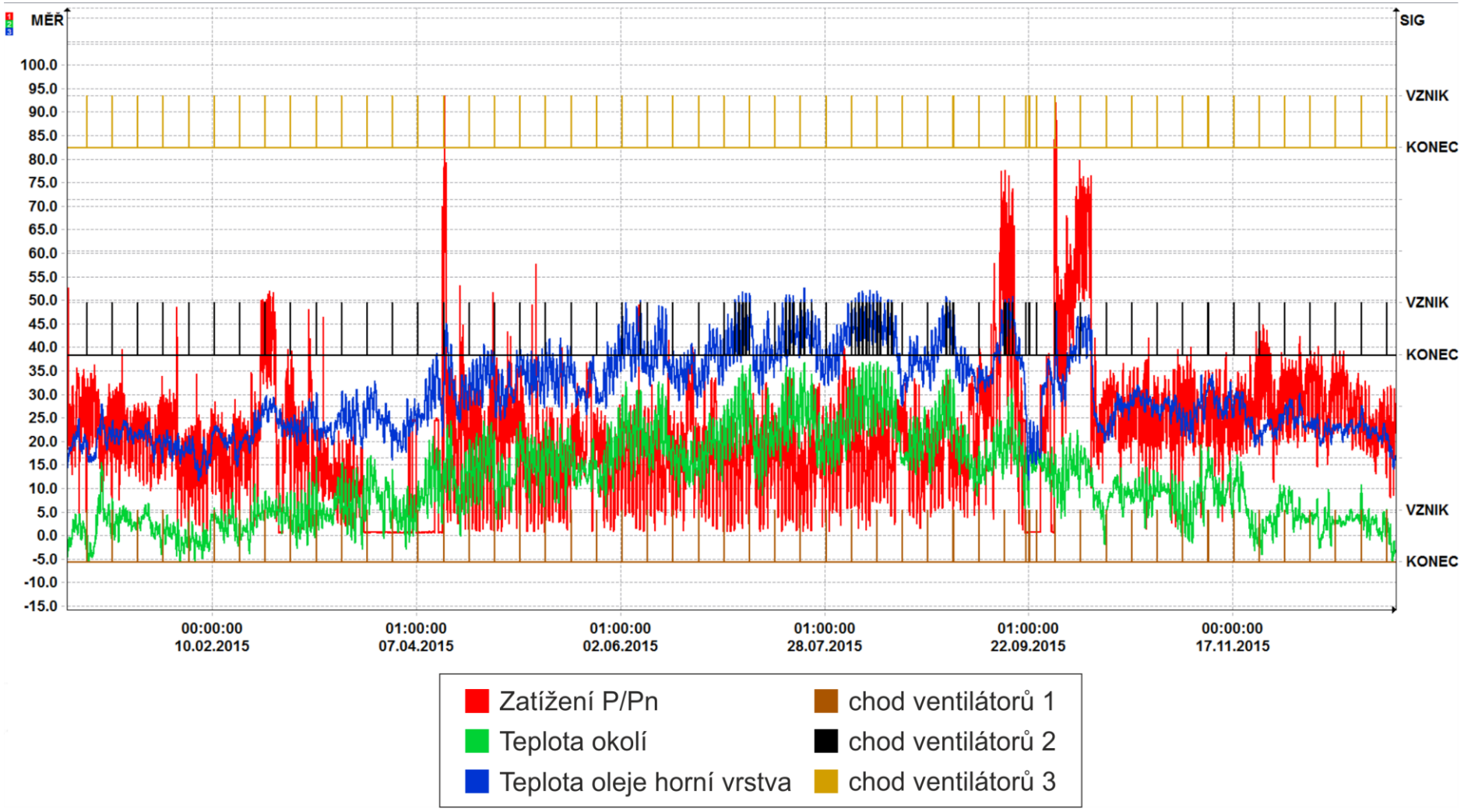
Ve sledovaném období bylo na tomto transformátoru sledováno poměrné zatížení $P/P_n$, teplota oleje v horní vrstvě, teplota okolí, chod skupiny ventilátorů 1 - 3. Počet záznamů monitoringu pro jednotlivé veličiny během sledovaného období zobrazuje *Tab. 4.III.* Minimální, maximální, průměrné hodnoty výkonu a teplot a četnost spuštění společně dobou běhu ventilátorů v jednotlivých měsících zobrazuje *Tab. 4.IV.* Graficky je pak průběh veličin vyobrazen na obrázku *Obr. 4.4* a grafu na *Obr. 4.5*.

*Tab. 4.III Počet záznamů monitoringu na TR200_2 ve sledovaném období*

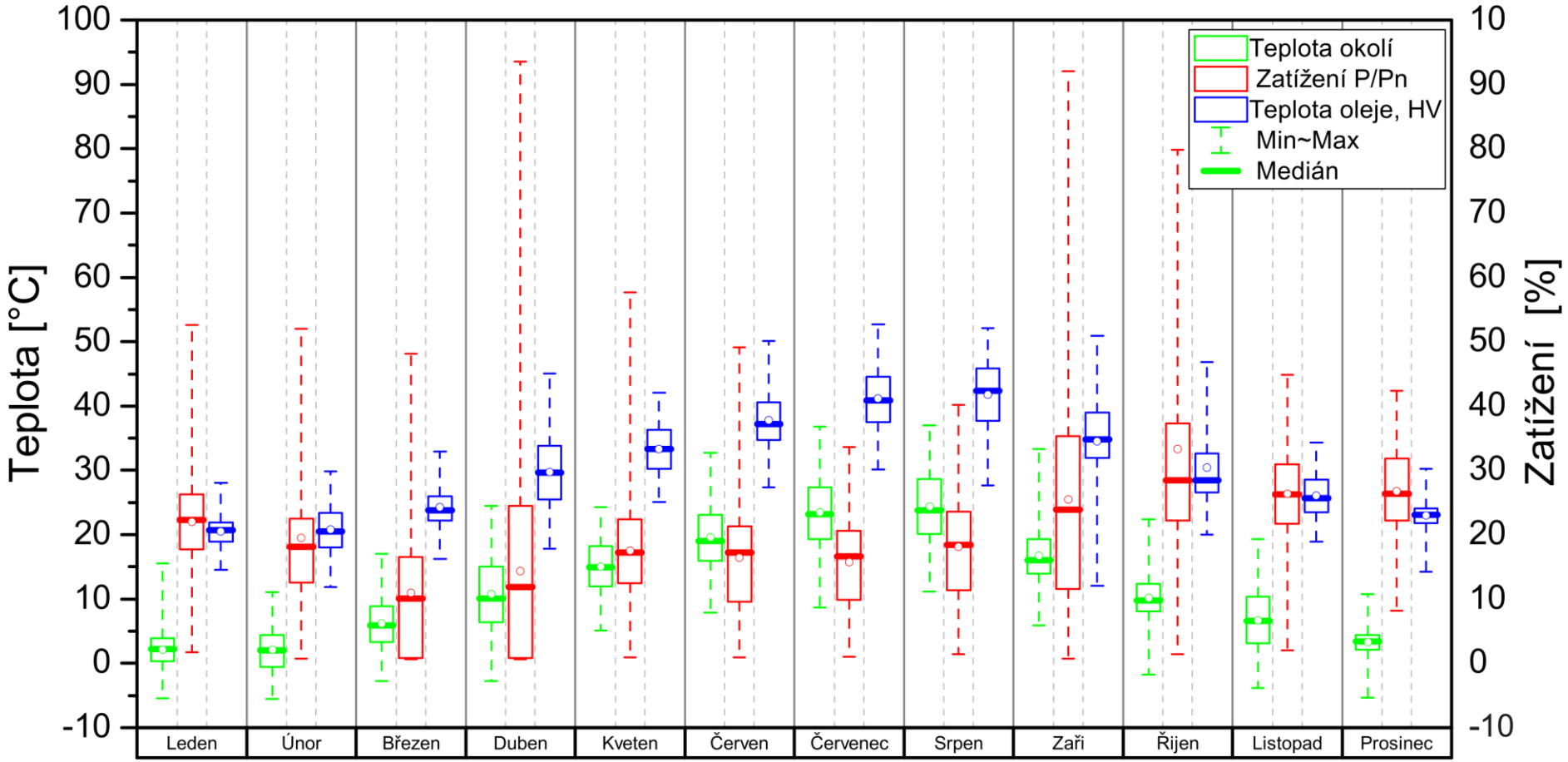
| Veličina | Zatížení P/Pn | Teplota oleje | Teplota Okolí | Chod skupiny ventilátorů 1 | Chod skupiny ventilátorů 2 | Chod skupiny ventilátorů 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Počet záznamů | 105 111 | 105 111 | 105 111 | 1491 | 1545 | 1491 |

*Tab. 4.IV Analyzované hodnoty transformátoru TR200_2 během sledovaného období*

| | Relativní zatížení $P/P_n$ [%] | | | Teplota oleje horní vrstva [°C] | | | Teplota okolí [°C] | | | Chod skupiny ventilátorů 1 | | Chod skupiny ventilátorů 2 | | Chod skupiny ventilátorů 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | min | prům | max | min | prům | max | min | prům | max | četnost sepnutí | doba běhu [H] | četnost sepnutí | doba běhu [H] | četnost sepnutí | doba běhu [H] |
| leden 2015 | 1,76 | 22 | 52,6 | 14,5 | 20,5 | 28 | -5,47 | 2,08 | 15,5 | 4 | 0:40:34 | 4 | 0:40:14 | 4 | 0:39:33 |
| únor 2015 | 0,74 | 19,6 | 52 | 11,9 | 20,8 | 29,8 | -5,49 | 2,08 | 11,1 | 4 | 0:40:35 | 4 | 0:39:35 | 4 | 0:39:36 |
| březen 2015 | 0,68 | 10,9 | 48,1 | 16,3 | 24,3 | 32,9 | -2,75 | 6,22 | 17,1 | 5 | 0:51:17 | 5 | 0:50:17 | 5 | 0:48:58 |
| duben 2015 | 0,67 | 14,4 | 93,5 | 17,8 | 29,8 | 45,1 | -2,79 | 10,7 | 24,5 | 4 | 0:40:15 | 4 | 0:39:54 | 4 | 0:39:35 |
| květen 2015 | 0,91 | 17,5 | 57,7 | 25,1 | 33,3 | 42,1 | 5,07 | 15,1 | 24,3 | 4 | 0:40:55 | 4 | 0:39:35 | 4 | 0:39:55 |
| červen 2015 | 0,97 | 16,5 | 49,1 | 27,4 | 37,8 | 50,1 | 7,92 | 19,6 | 32,7 | 5 | 0:49:57 | 6 | 2:39:58 | 5 | 0:48:36 |
| červenec 2015 | 0,99 | 15,7 | 33,7 | 30,1 | 41,1 | 52,7 | 8,64 | 23,5 | 36,9 | 4 | 0:39:54 | 15 | 45:39:18 | 4 | 0:38:54 |
| srpen 2015 | 1,42 | 18,2 | 40,2 | 27,7 | 41,8 | 52,1 | 11,1 | 24,4 | 37,1 | 4 | 0:40:57 | 16 | 57:32:26 | 4 | 0:40:17 |
| září 2015 | 0,72 | 25,5 | 92 | 12,1 | 34,6 | 50,9 | 5,93 | 16,7 | 33,3 | 9 | 0:56:20 | 12 | 8:19:10 | 9 | 0:54:58 |
| říjen 2015 | 1,45 | 33,3 | 79,8 | 20 | 30,4 | 46,9 | -1,77 | 10,2 | 22,4 | 4 | 0:40:13 | 4 | 0:39:54 | 4 | 0:39:12 |
| listopad 2015 | 2,07 | 26,3 | 44,8 | 18,9 | 26 | 34,3 | -3,86 | 6,73 | 19,3 | 4 | 0:41:14 | 4 | 0:40:33 | 4 | 0:39:34 |
| prosinec 2015 | 8,15 | 26,7 | 42,4 | 14,2 | 23 | 30,2 | -5,32 | 3,28 | 10,8 | 5 | 0:51:18 | 5 | 0:50:36 | 5 | 0:49:59 |
| průměr / suma | 1,71 | 20,6 | 57,2 | 19,7 | 30,3 | 41,3 | 0,94 | 11,7 | 23,7 | 56 | 8:53:29 | 83 | 119:51:30 | 56 | 8:39:07 |
| celková doba | - | | | | | | | | | 137:24:06 | | | | | |



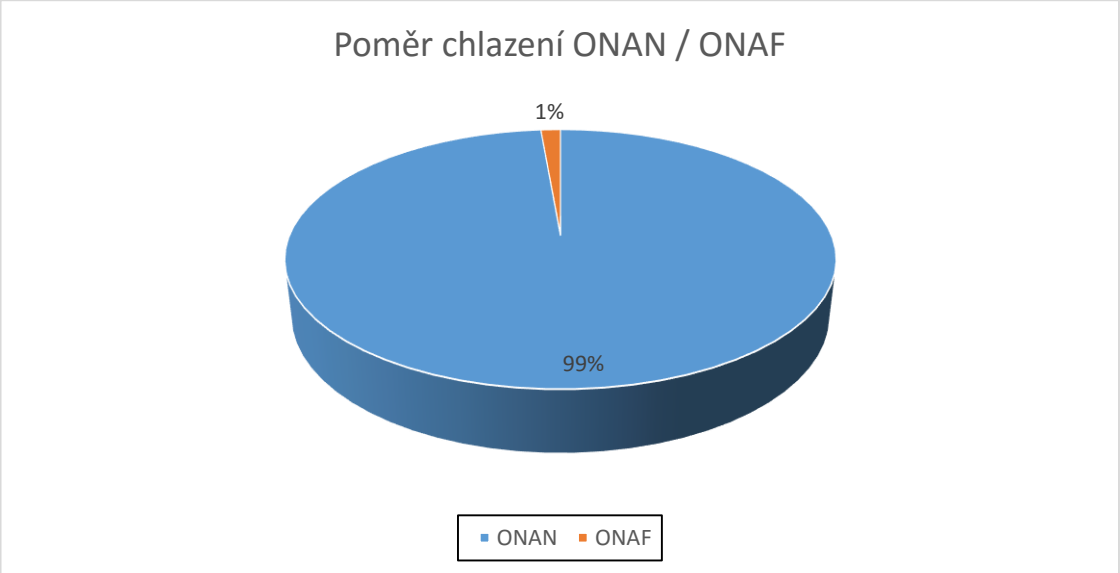

*Obr. 4.4 Průběh zatížení, teploty okolí, teploty oleje a chodu ventilátorů 1-3*




*Obr. 4.5 Graf hodnot zatížení, teploty okolí a teploty oleje na transformátoru TR200_2*

Dle údajů v tabulce *Tab. 4.IV* bylo nejvyšší zatížení na transformátoru v měsících září – prosinec. Na zatížení však příliš nereagovali teploty uvnitř stroje, nevyšší teplota oleje byla v červnu, červenci a srpnu což je patrné i z grafu na *Obr. 4.5.* Průměrná teplota oleje se v červenci a srpnu pohybovala okolo 40 °C, při průměrném relativním zatížení 17 % během těchto měsíců byla nejaktivnější skupina chladičů 2 a byla sepnuta po dobu 45 hodin v červenci a 57 hodin v srpnu. Při větším zatížení v září – prosinec 25 – 33 % se průměrné teploty ve stroji pohybovaly okolo 30 °C.

Ve sledovaném období byla primárně spínána skupina ventilátorů 2, byla sepnuta 83x a byla v provozu nejvíce ze všech tří chladicích skupin, celkem 120 hodin. Chladicí skupina 1 a 3 byly spínány jen minimálně a každá byla sepnuta celkem 56x a v provozu téměř 9 hodin. Systém MST je naprogramován tak, že 1x týdně testuje a spíná všechny ventilátory na dobu 10 minut. Celková doba běhu a počet sepnutí chladicích skupin 1 a 3 odpovídá přesně těmto testovacím sepnutím. Pro chlazení ONAF tedy byla využita jen chladicí skupina 2. Poměr doby chlazení ONAN a ONAF během sledovaného období zobrazuje graf na *Obr. 4.6,* z tohoto grafu je patrné, že pro chlazení toho transformátoru během sledovaného období probíhalo výhradně systém ONAN a jak již bylo zmíněno chladiče byly spínány pouze minimálně, tomu odpovídá i velmi nízká spotřebovaná elektrická energie 244 kWh a velmi nízké náklady na energie 977 Kč.




*Obr. 4.6 Graf poměru chlazení ONAN/ONAF během roku 2015 na TR200_2*

### 4.2.3 TR400_1

Jedná se o třífázový olejový regulační autotransformátor se jmenovitým výkonem 350 MVA a jmenovitým převodem 400 kV / 121 ±8x1.5% kV / 10,5 kV. Transformátor pracuje se systémem chlazení Siemens ONAN / ODAF, který je řízen na základě teplot ve stroji. Systém chlazení je složen celkem z pěti chladičů. Každý chladič je tvořen radiátorem, dvěma ventilátory a olejovým čerpadlem. Ventilátory a čerpadla jednotlivých chladičů pracují vždy současně a příkon jednoho chladiče je 4,9 kW. Systém řízení chlazení ONAN / ODAF je popsán v kapitole *3.2.2*, schéma zapojení řídicího systému chlazení je na obrázku *Obr. P- 5* v příloze.

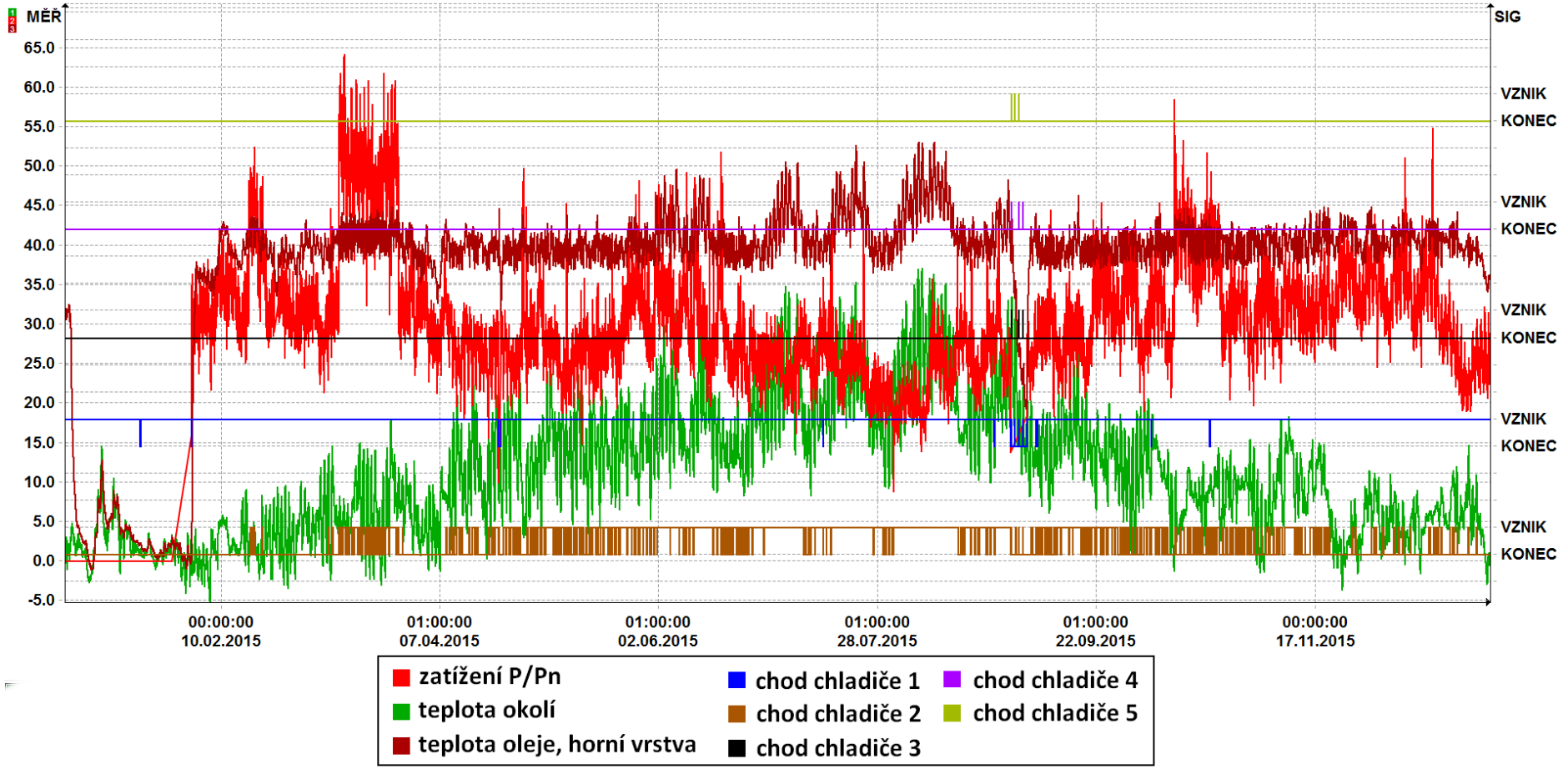
Ve sledovaném období bylo na tomto stroji sledováno poměrné zatížení $P/P_n$, teplota oleje v horní vrstvě, teplota okolí, chod skupiny chladičů 1-5, teplota na vstupu / výstupu chladiče. Počet záznamů monitoringu pro jednotlivé veličiny během sledovaného období zobrazuje *Tab. 4.V.* Minimální, maximální, průměrné hodnoty výkonu a teplot a četnost spuštění společně dobou běhu ventilátorů v jednotlivých měsících zobrazuje *Tab. 4.VI.* Graficky je pak průběh veličin vyobrazen na obrázku *Obr. 4.7* a grafu na *Obr. 4.8.*

*Tab. 4.V Počet záznamů monitoringu na TR400_1 ve sledovaném období*

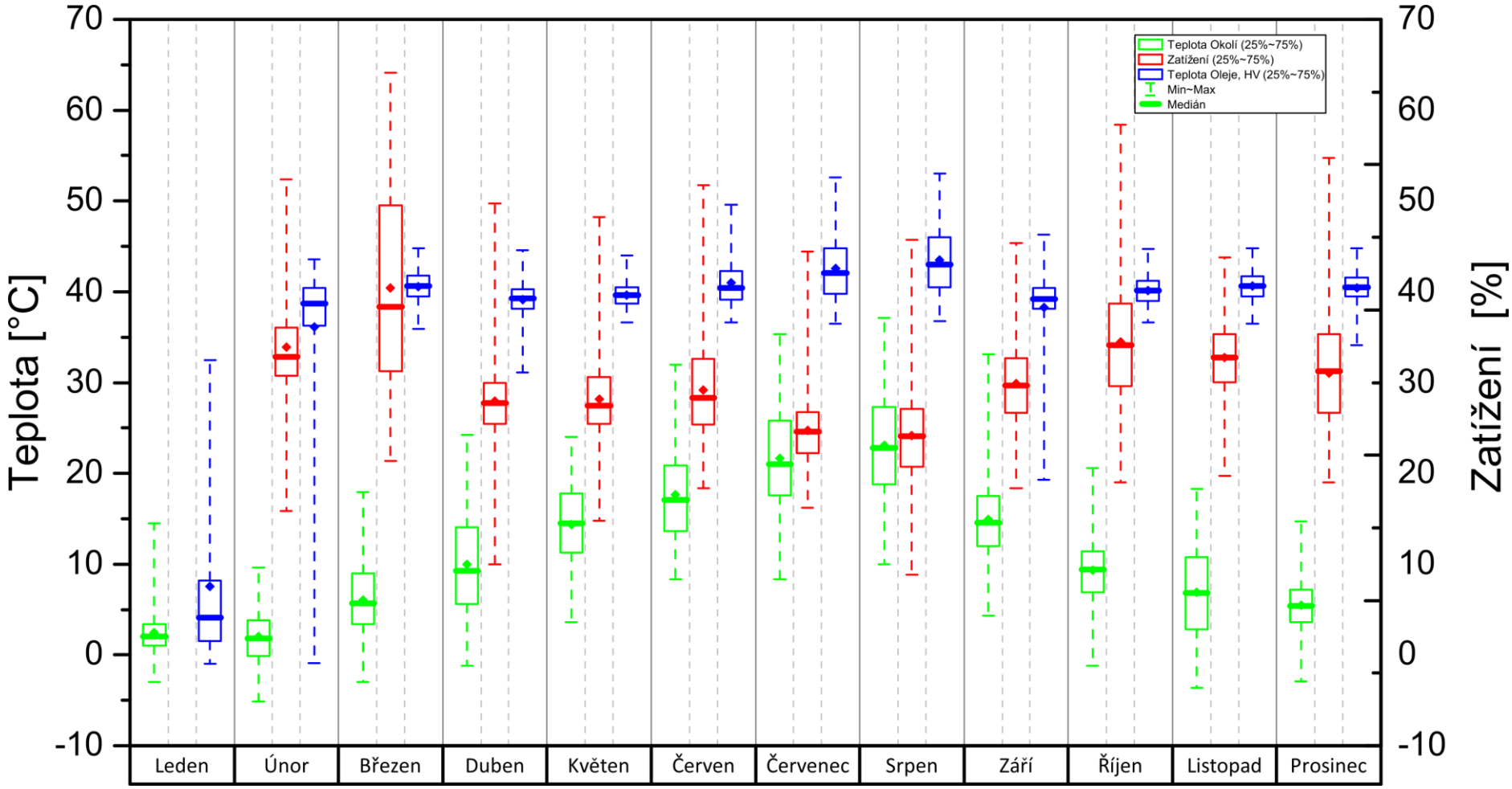
| Veličina | Zatížení P/Pn | Teplota oleje | Teplota Okolí | Chod chladicí skupiny | | | | | Vstup / výstup chladiče | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Počet záznamů | 93 911 | 46 360 | 67 167 | 74 | 738 | 27 | 27 | 21 | 58582 | 67744 | 81712 | 78716 | 80812 |

*Tab. 4.VI Analyzované hodnoty transformátoru TR400_1 během sledovaného období*

| | zatížení P/Pn [%] | | | Teplota oleje horní vrstva [°C] | | | Teplota okolí [°C] | | | skupina chladičů 1 | | | skupina chladičů 2 | | | skupina chladičů 3 | | | skupina chladičů 4 | | | skupina chladičů 5 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | min | prům | max | min | prům | max | min | pům | max | četnost | doba běhu [H] | teplotní spád [K] | četnost | doba běhu [H] | teplotní spád [K] | četnost | doba běhu [H] | teplotní spád [K] | četnost | doba běhu [H] | teplotní spád [K] | četnost | doba běhu [H] | teplotní spád [K] |
| leden 2015 | 0 | 4,6 | 27,3 | -1,0 | 7,5 | 32,5 | -3,0 | 2,5 | 14,5 | 1 | 312:36:47 | 0,2 | - | - | 1,6 | - | - | -1,2 | - | - | -1,4 | - | - | -1,3 |
| únor 2015 | 15,9 | 33,9 | 52,4 | -0,9 | 36,1 | 43,6 | -5,1 | 2,0 | 9,6 | 3 | 633:35:29 | 2,6 | 7 | 6:35:14 | -4,0 | - | - | 0,8 | - | - | -0,7 | - | - | -1,3 |
| březen 2015 | 21,4 | 40,4 | 64,1 | 35,9 | 40,6 | 44,8 | -3,0 | 6,1 | 17,9 | 1 | 743:59:00 | 2,6 | 54 | 235:11:09 | -2,6 | - | - | -0,6 | - | - | -0,8 | - | - | -1,7 |
| duben 2015 | 9,98 | 27,9 | 49,7 | 31,1 | 39,1 | 44,6 | -1,2 | 10,0 | 24,2 | 9 | 708:12:15 | 2,4 | 25 | 184:52:30 | -1,0 | - | - | 0,7 | - | - | 0,0 | - | - | -1,3 |
| květen 2015 | 14,8 | 28,2 | 48,2 | 36,6 | 39,7 | 44,0 | 3,6 | 14,4 | 24,0 | 1 | 743:59:00 | 1,5 | 42 | 476:45:29 | 1,5 | - | - | -2,8 | - | - | -2,8 | - | - | -3,2 |
| červen 2015 | 18,4 | 29,1 | 51,8 | 36,6 | 41,0 | 49,6 | 8,3 | 17,6 | 32,0 | 1 | 719:59:00 | 1,3 | 31 | 597:35:18 | 0,3 | - | - | -2,6 | - | - | -2,5 | - | - | -2,8 |
| červenec 2015 | 16,2 | 24,7 | 44,5 | 36,5 | 42,6 | 52,6 | 8,3 | 21,7 | 35,3 | 1 | 743:59:00 | 1,0 | 13 | 695:55:05 | -0,6 | - | - | -1,8 | - | - | -1,9 | - | - | -2,1 |
| srpen 2015 | 8,85 | 24,2 | 45,7 | 36,8 | 43,5 | 53,0 | 10,0 | 23,1 | 37,1 | 3 | 727:10:55 | 1,0 | 15 | 670:28:07 | -0,6 | 1 | 0:00:32 | -1,3 | 1 | 0:00:30 | -1,4 | 1 | 0:00:29 | -1,4 |
| září 2015 | 18,4 | 29,9 | 45,4 | 19,3 | 38,3 | 46,3 | 4,3 | 14,9 | 33,1 | 13 | 635:19:46 | 1,6 | 51 | 400:53:14 | 0,8 | 6 | 0:08:06 | -1,7 | 6 | 0:08:00 | -2,0 | 3 | 0:07:37 | -2,3 |
| říjen 2015 | 19 | 34,5 | 58,4 | 36,6 | 40,1 | 44,7 | -1,2 | 9,3 | 20,6 | 8 | 743:52:33 | 1,4 | 71 | 339:04:11 | 2,4 | - | - | -2,9 | - | - | -3,7 | - | - | -3,8 |
| listopad 2015 | 19,7 | 32,8 | 43,8 | 36,5 | 40,6 | 44,8 | -3,6 | 6,9 | 18,3 | 1 | 719:59:00 | 1,5 | 32 | 196:04:49 | -0,5 | - | - | 0,9 | - | - | -0,7 | - | - | -2,2 |
| prosinec 2015 | 19 | 31,0 | 54,7 | 34,1 | 40,4 | 44,8 | -2,9 | 5,5 | 14,7 | 1 | 743:59:00 | 1,6 | 28 | 55:17:52 | 2,4 | - | - | -0,8 | - | - | -2,4 | - | - | -3,3 |
| průměr / suma | 15,1 | 28,4 | 48,8 | 28,2 | 37,5 | 45,4 | 1,2 | 11,2 | 23,4 | 43 | 8176:41:45 | 1,6 | 369 | 3858:42:58 | 0,0 | 7 | 0:08:38 | -1,1 | 7 | 0:08:30 | -1,7 | 4 | 0:08:06 | -2,2 |
| celková doba | | | | | | | | | | | 12035:49:57 | | | | | | | | | | | | | |



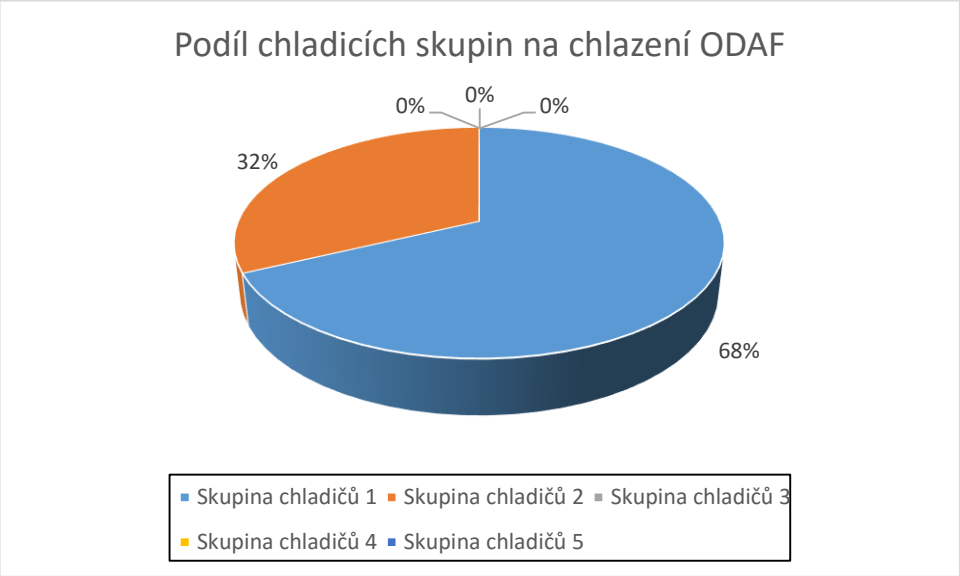

*Obr. 4.7 Průběh zatížení, teploty okolí, teploty oleje a chod chladičů 1-5 na stroji TR400_1*




*Obr. 4.8 Graf hodnot teploty oleje, teploty okolí a poměrného zatížení na transformátoru TR400_1*

Z údajů v tabulce *Tab. 4.VI* a průběhu na *Obr. 4.7* je patrné, že poměrné zatížení se během roku velmi měnilo od 8 do 50 %, ve špičce dosahovalo 60 %. Teploty oleje uvnitř stroje i přes velkou variabilitu, ale zůstávaly velmi konstantní a průměrně se pohybovaly výhradně v rozmezí 41 – 44 °C. Vyšší teploty byly naměřeni pouze v letních měsících, kdy byla oproti ostatním měsícům vyšší průměrná teplota okolí, i tak ale teplota vystoupala maximálně na teplotu 54 °C. Velmi stabilní průběh teploty je patrný z grafu na *Obr. 4.8*.

Na chlazení ODAF se podílely chladicí skupina 1 a 2, přičemž první skupina byla sepnuta neustále a druhá byla spínána dodatečně s nárůstem teplot ve stroji. Chladicí skupiny 3,4 a záložní chladicí skupina 5 nebyly během sledovaného období využity a sepnuty byly pouze během krátké odstávky transformátoru. Podíl chladicích skupin na chlazení ODAF zobrazuje graf na obrázku *Obr. 4.9*.




*Obr. 4.9 Podíl chladicích skupin transformátoru TR400_1 na chlazení ODAF*

Celková doba běhu chladicích skupin byla 12 035 hodin. Vlivem nepřetržitého provozu chladicí skupiny 1, byla celková spotřebovaná energie chladicích prvků 58 975 kWh a celkové náklady na provoz prvků tedy dosáhly 235 665 Kč.

### 4.2.4 TR400_2

TR400_2 je třífázový autotransformátor jehož jmenovitý výkon je 350 MVA a jmenovitý převod 400 kV / 121 kV ± 8 x 1.5 % / 10.5 kV. Je stejně jako transformátor TR200_2 vybaven chlazením ONAN / ONAF od společnosti ABB. Chlazení stroje tvoří 3 chladiče. Každý chladič se skládá z jednoho radiátoru a dvou ventilátorů. Příkon jednoho ventilátoru je 0,7 kW. Systém chlazení je řízen pomocí MST. Schéma zapojení tohoto řídicího systému je na obrázku *Obr. P- 1* v příloze.

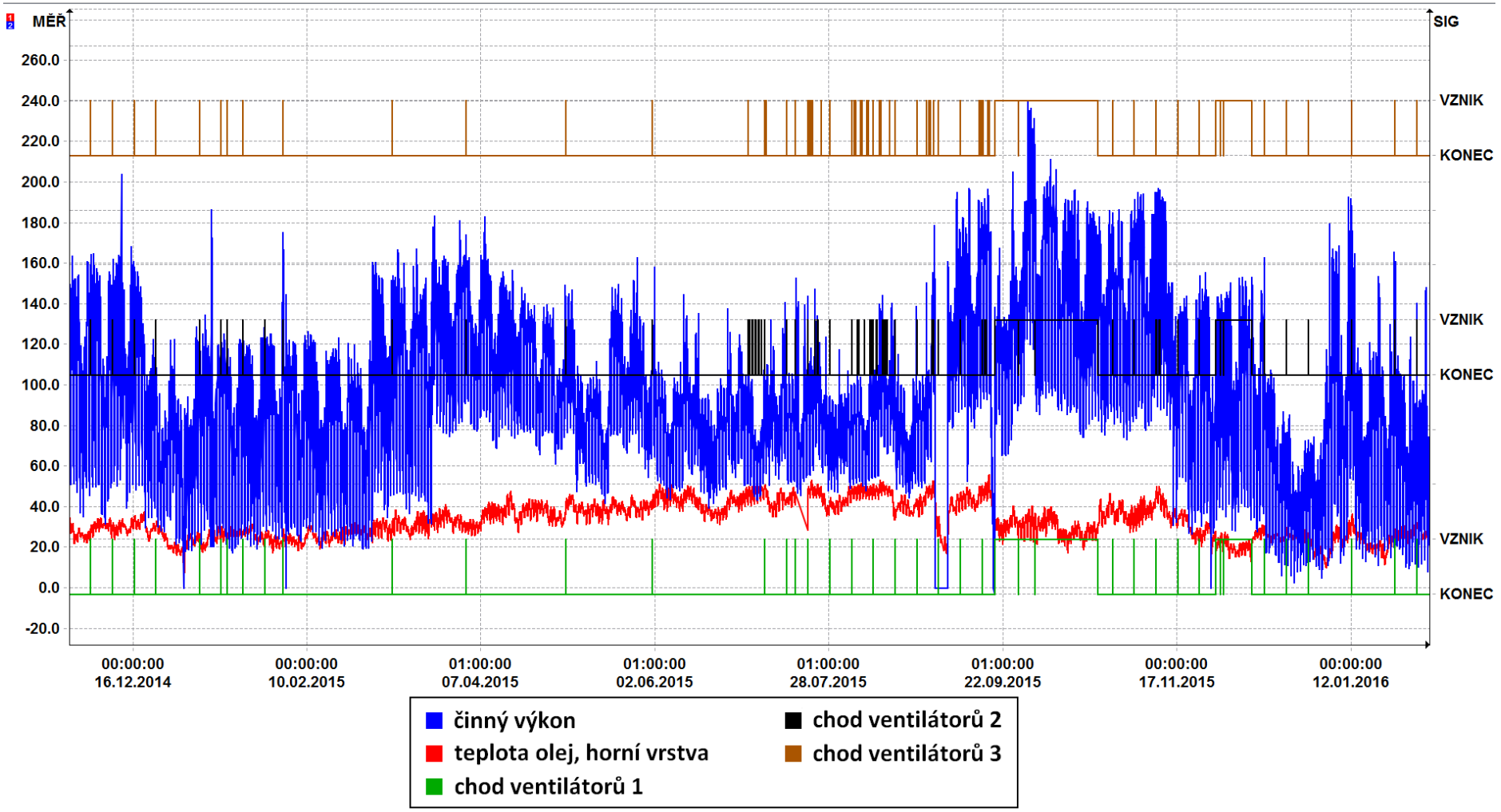
Ve sledovaném období bylo na tomto stroji sledován výkon S, teplota oleje v horní vrstvě, teplota okolí, chod skupiny ventilátorů 1-3. Počet záznamů monitoringu pro jednotlivé veličiny během sledovaného období zobrazuje *Tab. 4.VII.* Minimální, maximální, průměrné hodnoty výkonu a teplot a četnost spuštění společně dobou běhu ventilátorů v jednotlivých měsících zobrazuje *Tab. 4.VIII.* Graficky je pak průběh veličin vyobrazen na obrázku *Obr. 4.10*Obr. 4.7 a grafu na *Obr. 4.11*.

*Tab. 4.VII Počet záznamů monitoringu na TR400_2 ve sledovaném období*

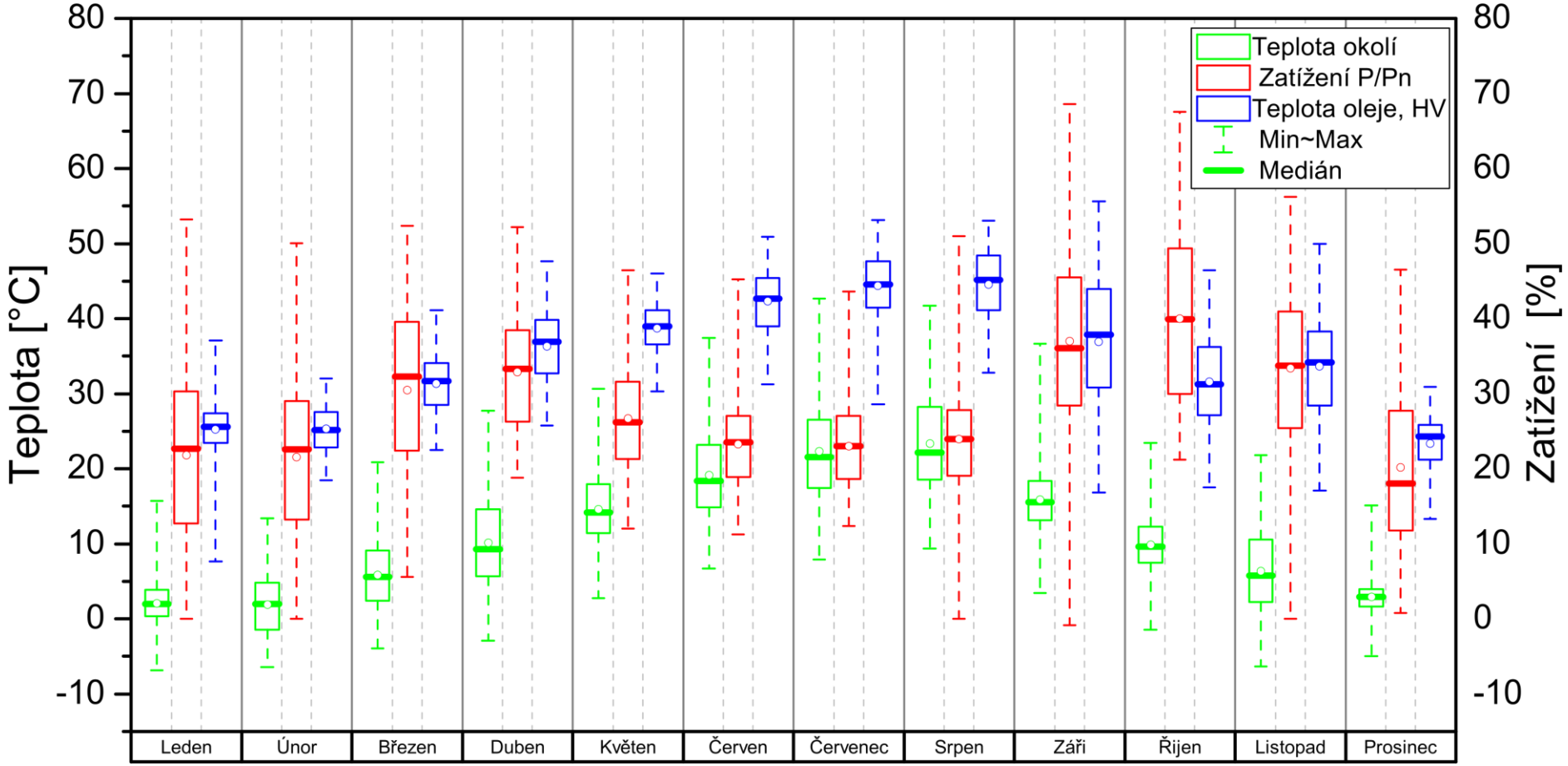
| Veličina | Zatížení P/Pn | Teplota oleje | Teplota Okolí | Chod skupiny ventilátorů 1 | Chod skupiny ventilátorů 2 | Chod skupiny ventilátorů 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Počet záznamů | 103 605 | 103 403 | 103 403 | 998 459 | 998 507 | 998 487 |

*Tab. 4.VIII Analyzované hodnoty transformátoru TR400_2 během sledovaného období*

| | Výkon S [MVA] | | | Teplota oleje horní vrstva [°C] | | | Teplota okolí [°C] | | | Chod skupiny ventilátorů 1 | | Chod skupiny ventilátorů 2 | | Chod skupiny ventilátorů 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | min | prům. | max | min | prům. | max | min | pům. | max | četnost sepnutí | doba běhu | četnost sepnutí | doba běhu | četnost sepnutí | doba běhu |
| leden 2015 | 0 | 76,3 | 186,3 | 7,67 | 25,21 | 37,11 | -6,82 | 2,04 | 15,71 | 5 | 1:39:54 | 5 | 1:39:12 | 5 | 1:28:50 |
| únor 2015 | 0 | 75,4 | 175,3 | 18,49 | 25,36 | 32 | -6,4 | 1,94 | 13,44 | 1 | 0:59:24 | 1 | 0:59:44 | 1 | 0:59:45 |
| březen 2015 | 19,64 | 106,8 | 183,2 | 22,52 | 31,37 | 41,11 | -3,89 | 5,81 | 20,87 | 1 | 0:57:59 | 2 | 0:57:43 | 1 | 0:57:59 |
| duben 2015 | 65,76 | 115,0 | 182,7 | 25,76 | 36,35 | 47,65 | -2,86 | 10,17 | 27,74 | 1 | 0:37:30 | 1 | 0:37:14 | 1 | 0:37:13 |
| květen 2015 | 41,99 | 93,6 | 162,6 | 30,33 | 38,7 | 46,04 | 2,76 | 14,61 | 30,67 | 1 | 0:54:36 | 1 | 0:54:21 | 1 | 0:54:21 |
| červen 2015 | 39,43 | 81,4 | 158,2 | 31,27 | 42,29 | 50,94 | 6,75 | 19,13 | 37,41 | 1 | 0:57:21 | 1 | 0:57:22 | 1 | 0:57:21 |
| červenec 2015 | 43,42 | 80,7 | 152,7 | 28,58 | 44,36 | 53,15 | 7,95 | 22,37 | 42,63 | 6 | 1:01:16 | 17 | 35:05:03 | 9 | 31:06:15 |
| srpen 2015 | 0 | 83,8 | 178,6 | 32,83 | 44,59 | 53,09 | 9,35 | 23,39 | 41,74 | 4 | 0:41:16 | 13 | 67:25:33 | 13 | 69:37:39 |
| září 2015 | 0 | 129,6 | 240,2 | 16,85 | 36,92 | 55,66 | 3,44 | 15,87 | 36,69 | 5 | 273:18:31 | 7 | 284:17:39 | 8 | 295:21:49 |
| říjen 2015 | 74,34 | 140,1 | 236,5 | 17,51 | 31,58 | 46,44 | -1,44 | 9,89 | 23,44 | 2 | 524:02:14 | 2 | 524:02:13 | 1 | 524:02:14 |
| listopad 2015 | 0 | 116,8 | 196,7 | 17,12 | 33,66 | 50 | -6,33 | 6,33 | 21,78 | 5 | 38:30:29 | 7 | 43:15:08 | 5 | 38:28:28 |
| prosinec 2015 | 2,68 | 70,8 | 162,8 | 13,32 | 23,36 | 30,9 | -4,93 | 2,92 | 15,08 | 7 | 244:09:13 | 7 | 244:08:52 | 7 | 244:08:34 |
| průměr / suma | 23,68 | 97,51 | 184,6 | 21,85 | 34,48 | 45,34 | -0,2 | 11,21 | 27,27 | 39 | 1087:49:43 | 64 | 1204:20:04 | 53 | 1208:40:28 |
| celková doba | - | | | | | | | | | 3500:50:15 | | | | | |

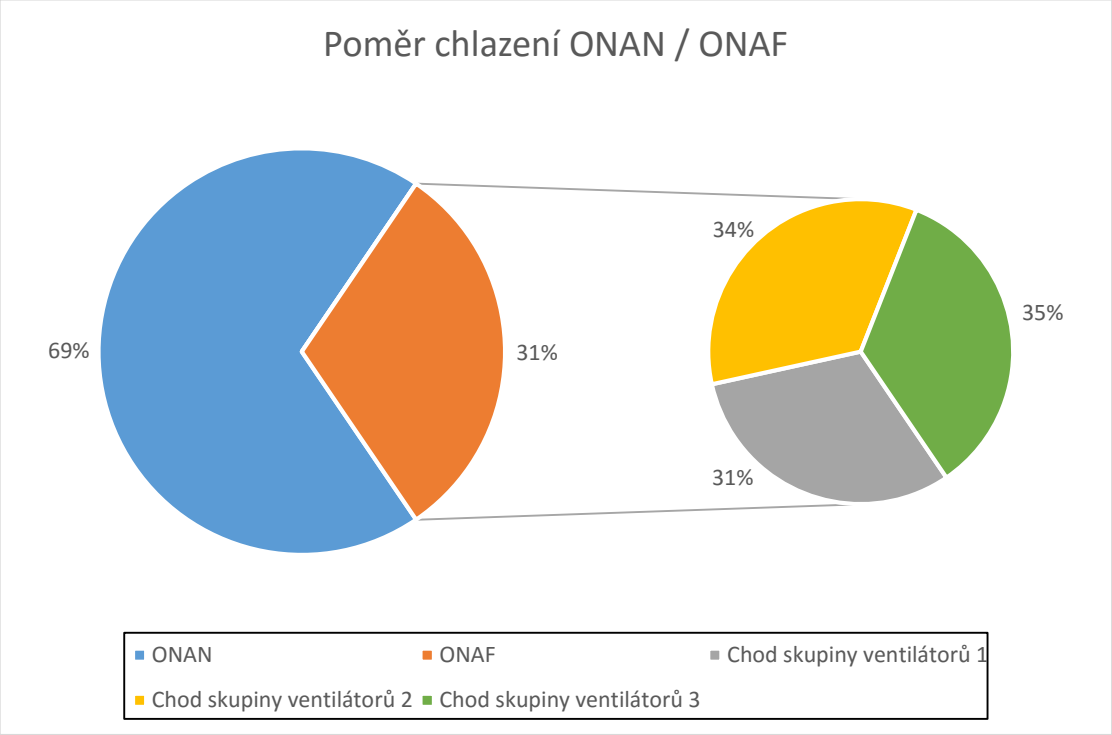



*Obr. 4.10 Průběh zatížení, teploty okolí, teploty oleje a chodu chladiče 1-3 na transformátoru TR400_2*




*Obr. 4.11 Graf hodnot zatížení, teploty okolí a teploty oleje na transformátoru TR400_2*

Z dat v tabulce *Tab. 4.VIII* a grafu na *Obr. 4.11* je patrné, že největší výkon procházel přes transformátor TR400_2 v září a v říjnu, kdy průměrný přenášený výkon byl 130 MVA, v těchto měsících byly nejaktivnější všechny tři chladicí skupiny, které pracovaly téměř souběžně. Během září každá z chladicích skupina byla v chodu přibližně 290 hodin, v říjnu pak všechny tři skupiny pracovaly po dobu 524 hodin. Velmi aktivní bylo chlazení také v prosinci, kdy každá skupina pracovala po dobu 244 hodin. Nejvyšší teploty ve stroji byly v měsíci červenci a srpnu, průměrně 44 °C. Poměr chlazení ONAN a ONAF a poměr doby běhu jednotlivých chladicích skupin během sledovaného období zobrazuje *Obr. 4.12*.

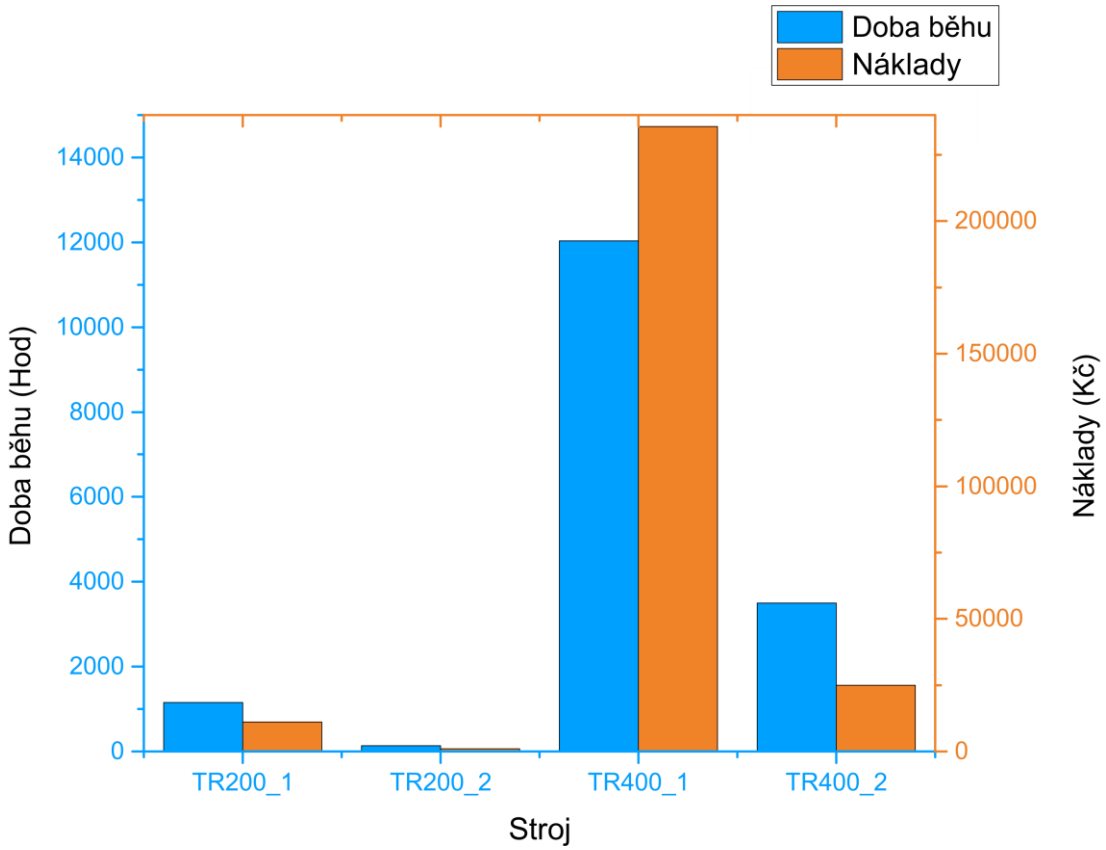



*Obr. 4.12 Poměr chlazení ONAN / ONAF a rozložení doby běhu jednotlivých chladicích skupin*

Celkově bylo chlazení rozloženo mezi všechny chladicí skupiny. Doba běhu všech tří chladicích skupin byla 3500 hodin, přičemž spotřebovaná energie byla 6231 kWh. Náklady na provoz chladicích zařízení tak byly 24 900 Kč.

## 4.3 Hodnocení chlazení

Transformátory přenosové soustavy jsou díky kritériu „N-1“ zatěžovány průměrně na 30 – 50 % svého jmenovitého výkonu, tak aby v případě výpadku jiného stroje byly schopny přebrat jeho funkci. Tomu odpovídá i průběh teplot v horní části nádoby, které se v transformátorech pohybují výhradně v rozmezí 30 – 50 °C. Z grafu na obrázku *Obr. 4.13* je patrný rozdíl mezi chlazením 200kV a 400kV během sledovaného jednoročního období. Stroje v síti 400kV spínají chladicí prvky častěji a po delší pracovní dobu. Přes téměř totožné průměrné zatížení 30% na 400 kV strojích je velký rozdíl mezi TR400_1 TR400_2, kde vlivem chlazení ODAF u TR400_1 a nepřetržitého provozu jeho chladiče 1 dosáhly náklady na energie u tohoto stroje 235 665 Kč, oproti tomu transformátor TR400_2, který je osazen chladicím systémem ONAN / ONAF spotřeboval elektrickou energii v hodnotě 24 900 Kč.




*Obr. 4.13 Náklady na energie a doba běhu chladičů sledovaných transformátorů*

Rozdíl mezi dobou běhu chladicích zařízení je patrný i strojů pracujících v síti 200 kV. I ty jsou zatěžovány velmi podobně a průměrné relativní zatížení se na obou strojích pohybuje nejvíce okolo hranice 15%. Chladiče na TR200_2 byly spínány výhradně jen MST pro ověření jejich funkčnosti, pro chlazení stoje byly využity jen minimálně a transformátor

byl v 99 % chlazen systémem ONAN. Oproti tomu na TR200_1 byly chladiče spínané daleko častěji, cože je patrné z *Obr. 4.13.*

Pokud budeme uvažovat periodické zatěžování transformátorů, může se v dlouhodobém horizontu jednat o výrazný rozdíl v nákladech na provoz chladicích zařízení. Transformátory TR200_1 a TR400_1 vybavené chladicím systémem Siemens spotřebují oproti TR200_2 a TR400_2 vybaveným chladicím systémem ABB přibližně 10x více elektrické energie pro zajištění chlazení. Rozdíl v těchto nákladech v horizontu 5, 10, 15 a 20 let je patrný z tabulky *Tab. 4.IX*.

*Tab. 4.IX Dlouhodobé náklady na provoz chladicích zařízení*

| Transformátor | Rok | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| TR200_1 | 11 049 Kč | 55 245 Kč | 110 489 Kč | 165 734 Kč | 220 979 Kč |
| TR200_2 | 977 Kč | 4 886 Kč | 9 772 Kč | 14 658 Kč | 19 544 Kč |
| TR400_1 | 235 665 Kč | 1 178 327 Kč | 2 356 655 Kč | 3 534 982 Kč | 4 713 309 Kč |
| TR400_2 | 24 901 Kč | 124 504 Kč | 249 009 Kč | 373 513 Kč | 498 018 Kč |

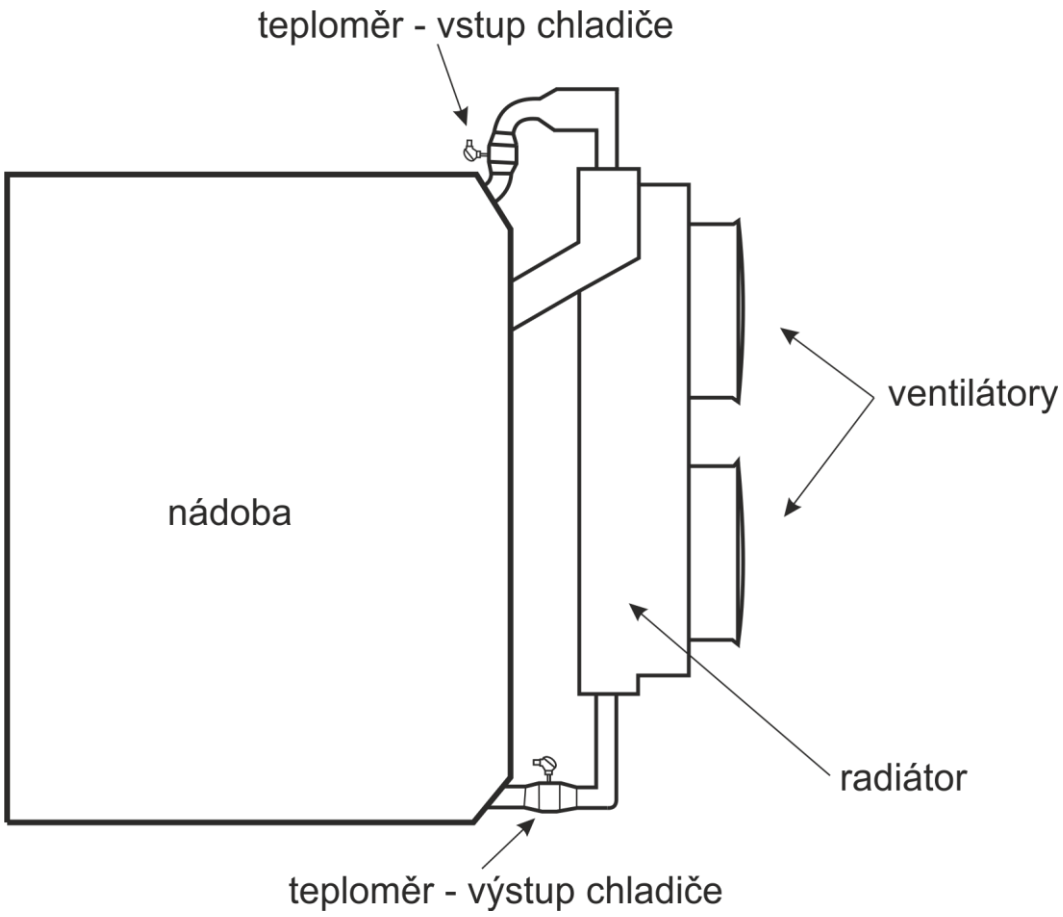
*Tab. 4.X Celková doba běhu chladicích zařízení, spotřebovaná energie a náklady na energie*

| Transformátor | Doba běhu [h] | Spotřeba energie [kWh] | Náklady [Kč] |
|---|---|---|---|
| TR200_1 | 1152:06:15 | 2765 | 11 048,94 Kč |
| TR200_2 | 137:24:06 | 245 | 977,19 Kč |
| TR400_1 | 12035:49:57 | 58975 | 235 665,45 Kč |
| TR400_2 | 3500:50:15 | 6231 | 24 900,89 Kč |

Data naměřená monitoringem umožňují hodnotit teplotní spád pouze na stojích Siemens, které jsou osazeny teploměry na vstupu a výstupu chladiče. U stroje TR200_1 byl teplotní spád v každém okamžiku na všech 4 chladičích téměř totožný. Souměrnost teplotního spádu zajišťuje spínání chladicí skupiny 1, která současně sepne horní ventilátory na jednotlivých chladičích. Z jednotlivých chladičů tak do transformátoru proudí olej o přibližně stejné teplotě. Hodnoty teplotního spádu na TR200_1 jsou uvedeny v tabulce *Tab. 4.II.*

U transformátoru TR400_1 je průměrný teplotní spád nepřetržitě zapnutého chladiče spád 1,6 K, u druhého chladiče je průměrný teplotní spád 0 K a u ostatních nespínaných chladičů je průměrný teplotní spád záporný -1,1 K na třetím chladiči, -1,7 K na čtvrtém a -2,2 na pátém záložním chladiči. Teplotní spád se na tomto stroji pohyboval velmi blízko 0 K, kladnou hodnotu nabýval u chladičů se sepnutými čerpadly a na chladičích kde byly

ventilátory a čerpadla vypnuta nabýval zápornou hodnotu, tím větší, čím byla větší vzdálenost od chladiče se sepnutým čerpadlem. Takto nízký teplotní spád byl výsledkem výších naměřených teplot oleje na výstupu z chladičů. U chladiče 3, 4 a 5 byla naměřená teplota oleje na výstupu chladiče velmi často vyšší než na jeho vstupu. Měření teploty na výstupu chladiče je tak zřejmě ovlivněno blízkou polohou teploměru u nádoby transformátoru. Umístění tohoto teploměru je na obrázku *Obr. 4.14*.




*Obr. 4.14 Umístění teploměrů na vstupu a výstupu chladiče transformátoru TR400_1 [29]*

Průměrné teploty na jednotlivých transformátorech uvádí *Tab. 4.XI.* Z dat je patrné, že průměrná teplota se u 200 kV strojů pohybuje kolem hranice 31 °C, u 400 kV strojů pak kolem hranice 35 °C.

*Tab. 4.XI Minimální, průměrné a maximální teploty na transformátorech*

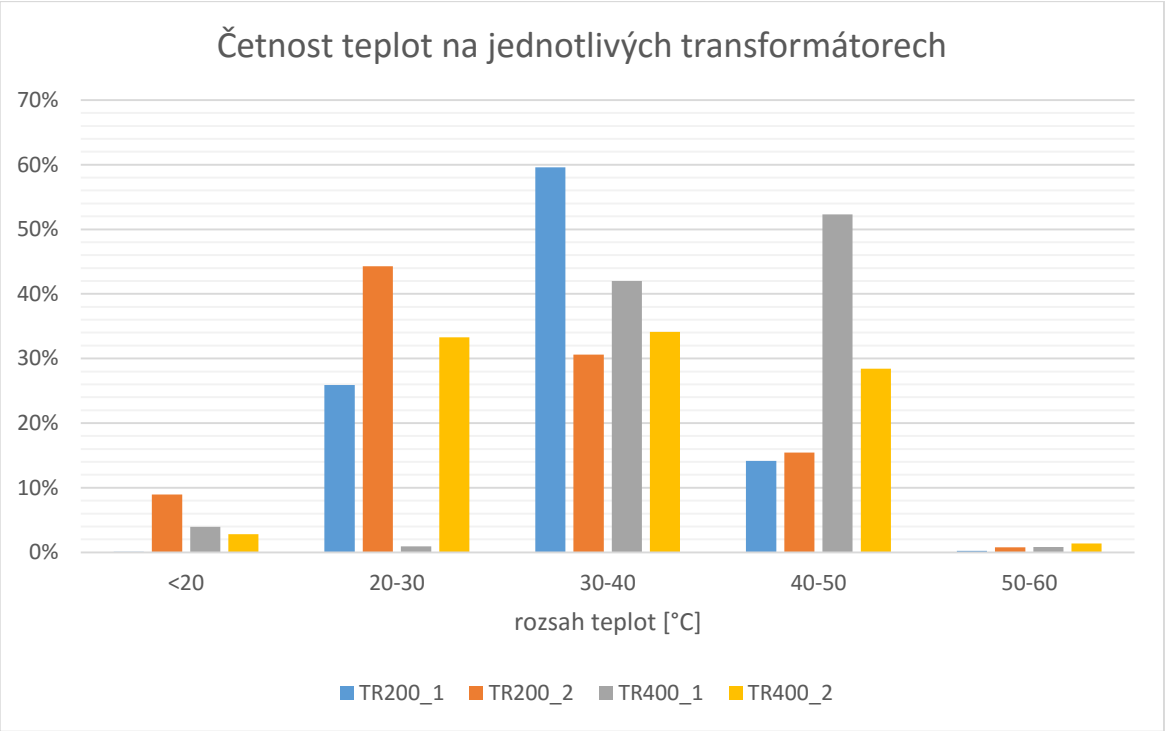
| Transformátor | Průměrná teplota oleje [°C] | | | Variační koeficient |
|---|---|---|---|---|
| | min | prům | max | |
| TR200_1 | 19,4 | 32,8 | 51,1 | 17% |
| TR200_2 | 11,9 | 30,3 | 52,7 | 29% |
| TR400_1 | 19,3 | 37,5 | 53 | 20% |
| TR400_2 | 7,67 | 34,5 | 55,6 | 25% |

Tabulka *Tab. 4.XII* uvádí počet naměřených teplot v horní vrstvě nádoby rozdělených do teplotních intervalů. U TR200_1 teplota pohybovala nejvíce mezi 30 a 40°C, v noci nebo při nižších zatíženích pak nejvíce byla teplota 20 – 30 °C, za hranicí 50 °C byla teplota indikována pouze výjimečně. U TR200_2 se teplota nejčastěji pohybovala v intervalu 20 – 40 °C, Stejně jako u TR200_1 15 % naměřených hodnot překročilo hranici 40 °C, u stroje TR200_1 byla častěji detekována teplota nad 50°C. Udržovat ve stroji konstantní teplotu nejlépe zvládl chladicí systém transformátoru TR400_1, 94 % všech naměřených hodnot bylo v rozmezí 30 – 50 °C, rovnoměrný průběh teploty je také patrný z průběhu na obrázku *Obr. 4.7*. U stoje TR400_2 se teploty pohybovaly rovnoměrně od 20 do 50 °C, hranici 50 °C stejně, jako u ostatních strojů, teplota překročila jen výjimečně.

*Tab. 4.XII Četnost monitorovaných teplot*

| Transformátor | TR200_1 | | TR200_2 | | TR400_1 | | TR400_2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Teplota [°C] | počet | % | počet | % | počet | % | počet | % |
| <20 | 40 | 0% | 9400 | 9% | 1824 | 4% | 2929 | 3% |
| 20-30 | 16879 | 26% | 46539 | 44% | 422 | 1% | 34398 | 33% |
| 30-40 | 38823 | 60% | 32153 | 31% | 19471 | 42% | 35270 | 34% |
| 40-50 | 9224 | 14% | 16210 | 15% | 24248 | 52% | 29396 | 28% |
| 50-60 | 160 | 0% | 808 | 1% | 394 | 1% | 1409 | 1% |

U strojů TR200_1 a TR400_1 s chlazením Siemens je menší variabilita teplot než na transformátorech TR200_2 a TR400_2 s chlazením ABB. To svědčí o lepším udržování stabilní teploty uvnitř stroje. Udržování stabilní teploty uvnitř stroje prospívá izolačnímu systému. Rozložení naměřených teplot v jednotlivých intervalech pro všechny 4 analyzované stroje zobrazuje graf na *Obr. 4.15*




*Obr. 4.15 Četnost naměřených teplot na jednotlivých transformátorech*

Transformátor TR400_1 má oproti ostatním stojům osazené na chladičích čerpadlo pro oběh oleje. Tento transformátor měl oproti ostatním strojům extrémní náklady na elektrickou energii, to zapříčiňuje především nepřetržitě zapnutý chladič 1. Chladič 2 byl spínán jako druhý, pro udržení konstantních teplot uvnitř stroje. V chladičích 3, 4 a 5 probíhalo chlazení pouze přirozeným oběhem oleje a chladicí prvky nebylo potřeba spínat. Chladicí systém zvládá nejlépe udržovat konstantní teploty ve stroji a vytváří tak nejideálnější podmínky pro dlouhou životnost izolačního systému. Teplotní spád na tomto stroji vykazuje teploty blízké 0 K, ty jsou zřejmě způsobeny blízkou pozicí teploměru na výstupu chladiče u nádoby transformátoru.

Na transformátoru TR400_2 probíhalo během sledovaného období z celkové roční doby chlazení ONAN z 66%, chladicí prvky tak byly spínány pouze v potřebných chvílích a žádný z prvků nemusel být v nepřetržitém chodu tak jako u stroje TR400_1. Konstantní teplotu oleje nezvládá tento chladicí systém udržet tak dobře jako systém u TR400_1, avšak energetické náklady na provoz chladicích zařízení jsou u tohoto stoje desetinásobně nižší, jak již bylo zmíněno, v dlouhodobém hledisku se jedná o rozdíl několika milionů korun. Ze získaných dat nebylo možné hodnotit teplotní spád na chladičích tohoto stroje.

Jelikož hlavní toky v přenosové soustavě tečou přes 400 kV vedení, slouží 200 kV soustava spíše jako pomocná či záložní. Tomu odpovídají i průběhy výkonů na transformátoru TR200_1 a TR200_2, které byly během roku několikrát odstaveny.

13 % z celkového chlazení na transformátoru TR200_1 probíhalo systémem ONAF, zbylých 87 % času ze sledovaného období probíhalo systémem ONAN. Chladicí prvky tak byly spínány na základě překročení teplot uvnitř stroje. Chladiče udržovali konstantní teplotní spád 15 K ± 3 K.

Na transformátoru TR200_2 probíhalo chlazení výhradně systémem ONAN, téměř 99 % doby ze sledovaného období. Chladicí prvky byly pro chlazení spínány zcela výjimečně. Do doby běhu ventilátorů chlazení jsou započítány i testovací sepnutí MST, který spíná všechny chladiče na 10 minut jednou týdně pro zajištění jejich správně funkčnosti. I přes tyto testovací sepnutí byla celková doba běhu nejnižší na všech sledovaných stojích a tomu odpovídaly i nejnižší náklady na energie, tyto náklady lze ještě více snížit přenastavením MST na spínání v měsíčních nebo ve čtrnáctidenních intervalech.

Z výše uvedených dat lze říci, že transformátory vybavené chladicími systémy Siemens TR200_1 a TR400_1 zvládají lépe udržovat rovnoměrné teploty ve stroji, tím zpomalují degradační faktory působící na izolační systém stroje a prodlužují tak jeho životnost. To je ale vykoupeno vyššími náklady spojenými s energiemi na provoz ventilátorů a v případě TR400_1 i na provoz čerpadel. Transformátory vybavené chladiči od ABB TR200_2 a TR400_2 zvládají pracovat daleko úsporněji, reagují na změny teploty uvnitř stroje způsobené zatížením, teplota oleje v horní vrstvě se zvyšuje spíše s narůstající teplotou okolí.

# Závěr

Cílem této práce je hodnocení a porovnání chlazení čtyř transformátorů přenosové soustavy osazených různými chladicími systémy a také různými řídicími systémy chlazení. Dva z těchto hodnocených strojů pracují v síti 200 kV a dva pracují v síti 400 kV. Účinnost chlazení byla porovnána mezi chladicími systémy dvou výrobců osazených na transformátorech přenosové soustavy. K hodnocení účinnosti byla použita data získána z monitoringu přenosové soustavy za uplynulý rok 2015. Hlavním hodnotícím kritériem byly náklady spojené s provozem chladicích zařízení vyjádřené v Kč. Chladicí systémy také byly hodnoceny z hlediska schopnosti zachovat stálou teplotu uvnitř stroje.

Nejnižších provozní nákladů dosáhl transformátor TR200_2, který s nejnižší dobou běhu chladičů 137 hod, spotřeboval i nejméně elektrické energie. Naopak nejvyšší provozních nákladů dosáhl transformátor chlazený systémem ODAF TR400_1, vlivem nepřetržitého sepnutí chladiče 1 byla celková doba běhu chladicích zařízení 12 035 hodin. Porovnáme-li mezi sebou 400 kV a 200 kV stroje můžeme dle výše analyzovaných dat říci, že chladicí zařízení ABB na transformátorech TR200_2 a TR400_2 mají oproti chladicím zařízení Siemens osazených na TR200_1 a TR400_1 téměř 10x nižší energetické náklady na provoz chladicích zařízení. Při životnosti transformátoru 30 a více let se pak může jednat o rozdíl několika milionů korun. Během analýzy dat byl také zjištěn záporný nulový až záporný teplotní spád na chladičích na stoji TR400_1, ten je zřejmě dán špatnou pozicí teploměru na výstupu chladiče, který je umístěn příliš blízko nádoby.

Monitoring na stojích TR200_2 a TR400_2 zaznamenává data ze strojů přibližně v pětiminutových intervalech, tomu odpovídá přibližně 105 120 záznamů za jeden kalendářní rok. Při zaznamenávání teplot byly pětiminutové intervaly dodrženy a počet záznamů o teplotách na těchto dvou strojích byl zmíněných 105 000. Přitom počet záznamů na transformátoru TR400_2 o chodu chladičů 1, 2 a 3 byl téměř 1 000 000 pro každou skupinu chladičů, monitoring tak zaznamenává řadu duplicitních dat o chodu chladičů, často i v setinových intervalech. Oproti tomu monitoring na strojích TR200_1 a TR400_1 zaznamenal spíše změnu stavu chladičů a počet záznamů se pohyboval v řádu 100.

Analyzovaná data ukazují na to, že chlazení transformátorů Siemens zvládá udržet ve stroji stabilnější teploty, to je ale vykoupeno vysokou cenou provozních nákladů. Oproti tomu transformátory s chlazením ABB nespínají tak často chladicí prvky a transformátor zavládají uchladit jen systémem ONAN a výrazně tak šetří provozní náklady. Z celkového příkonu 4,9 kW jednoho chladiče transformátoru TR400_1 tvoří 3,8 kW příkon čerpadla. Optimalizací spínacího procesu chlazení např. nejdříve sepnout ventilátory a až s dalším nárůstem teploty čerpadlo, může dojít k úspoře nákladů na provoz chladiče.

# Seznam literatury a informačních zdrojů


[1] *ČEPS, a.s.* [online]. Praha, 2015 [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/

[2] KUBÍN, Miroslav. *Přenosy elektrické energie ČR: v kontextu evropského vývoje*. Praha: ČEPS, 1995.

[3] DONČUK, Jan. *Monitoring výkonových transformátorů přenosové soustavy* Plzeň, 2014, Disertační Práce. ZČU

[4] ALSTOM. *Transformer lifecycle management*. Francie, 2012, 20 s.

[5] CIGRE Working Group. *Thermal aspects of transformers*, 1995.

[6] WU, Wei. *CFD CALIBRATED THERMAL NETWORK MODELLING FOR OIL-COOLED POWER TRANSFORMERS*. Anglie, 2011, 185 s.

[7] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-704-3444-9.

[8] JACOBSEN, Roger & Working group, *IEEE Loss Evaluation Guide for Power Transformers and Reactors* [online]. 1992, , 28. DOI: 10.1109/IEEESTD.1992.114388.

[9] KRALJ, Lenart a Damijan MILJAVEC. Stray losses in power transformer tank walls and construction parts.*The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010* [online]. IEEE, 2010, , 1-4DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5607891. ISBN 978-1-4244-4174-7. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5607891

[10] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2004, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-1704-5

[11] HEATHCOTE, Martin J a D FRANKLIN. *The J: a practical technology of the power transformer*. 13th ed. Burlington, MA: Newnes, 2007, xiv, 974 p. ISBN 978-075-0681-643.

[12] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.*Power transformers: Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers*. 1. Švýcarsko: IEC 60076-7, IEC, 2005, 113 s.

[13] ČSN IEC 60076-7. Výkonové transformátory: Část 7: Směrnice pro zatěžování olejových výkonových transformátorů. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[14] *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers* [online]. In: . 1996. DOI: 10.1109/IEEESTD.1996.79665. ISBN 978-0-7381-0883-4

[15] *Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid – IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Expo*, Oct. 28 – Nov. 02, 2001, Atlanta, GA, IEEE 0-7803- 7257-5/01.

[16] KULKARNI, S a S KHAPARDE. *Transformer engineering: design and practice*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004, xiv, 476 p. ISBN 08-247-5653-3.

[17] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.*Power transformers: Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*. 1. Švýcarsko: IEC 60076-2, IEC, 2011, 95 s.

[18] ISHA, Mohd Taufiq a Zhongdong WANG. Transformer hotspot temperature calculation using IEEE loading guide. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*[online]. IEEE, 2008, , 1017-1020 [cit. 2016-02-15]. DOI: 10.1109/CMD.2008.4580455. ISBN 978-1-4244-1621-9

[19] MENTLÍK, Václav, Josef PIHERA, Radek POLANSKÝ, Pavel PROSR a

Pavel TRNKA. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.

[20] *Transformer Cooling System and Methods | Electrical4u* [online]. [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: http://www.electrical4u.com/transformer-cooling-system-and-methods/

[21] Higgins, T.J. Formulas for calculating temperature distribution in transformer cores and other electrical apparatus of rectangular cross section, *AIEE Transactions—Electrical Engineering*, Vol. 64, April 1945, pp. 190–194.

[22] Rele, A. and Palmer, S. *Cooling of large transformer cores, IEEE Transactionson Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, No. 4, 1972, pp.1527–1535.

[23] ABB. *Transformer Handbook*. Švýcarsko, 2004, 213 s.

[24] ABB. *Intelligent monitoring system, type TEC Technical Guide*. Švédsko, 2008, 60 s.

[25] MS 3000: *Comprehensive online condition monitoring, diagnostics and expert system for power transformers*. Manual 1.0, Revision date 14. 3. 2012. ALSTOM Grid, Moenchengladbach, Německo, 2012. 262 s.

[26] ABB. *Temperature handbook*. Švédsko, 2008, 247 s.

[27] BÉRUBÉ, J.N., B.L. BROWELEIT a J. AUBIN. *OPTIMUM TRANSFORMER COOLING CONTROL WITH FIBER OPTIC TEMPERATURE SENSORS*. 2009, 8.

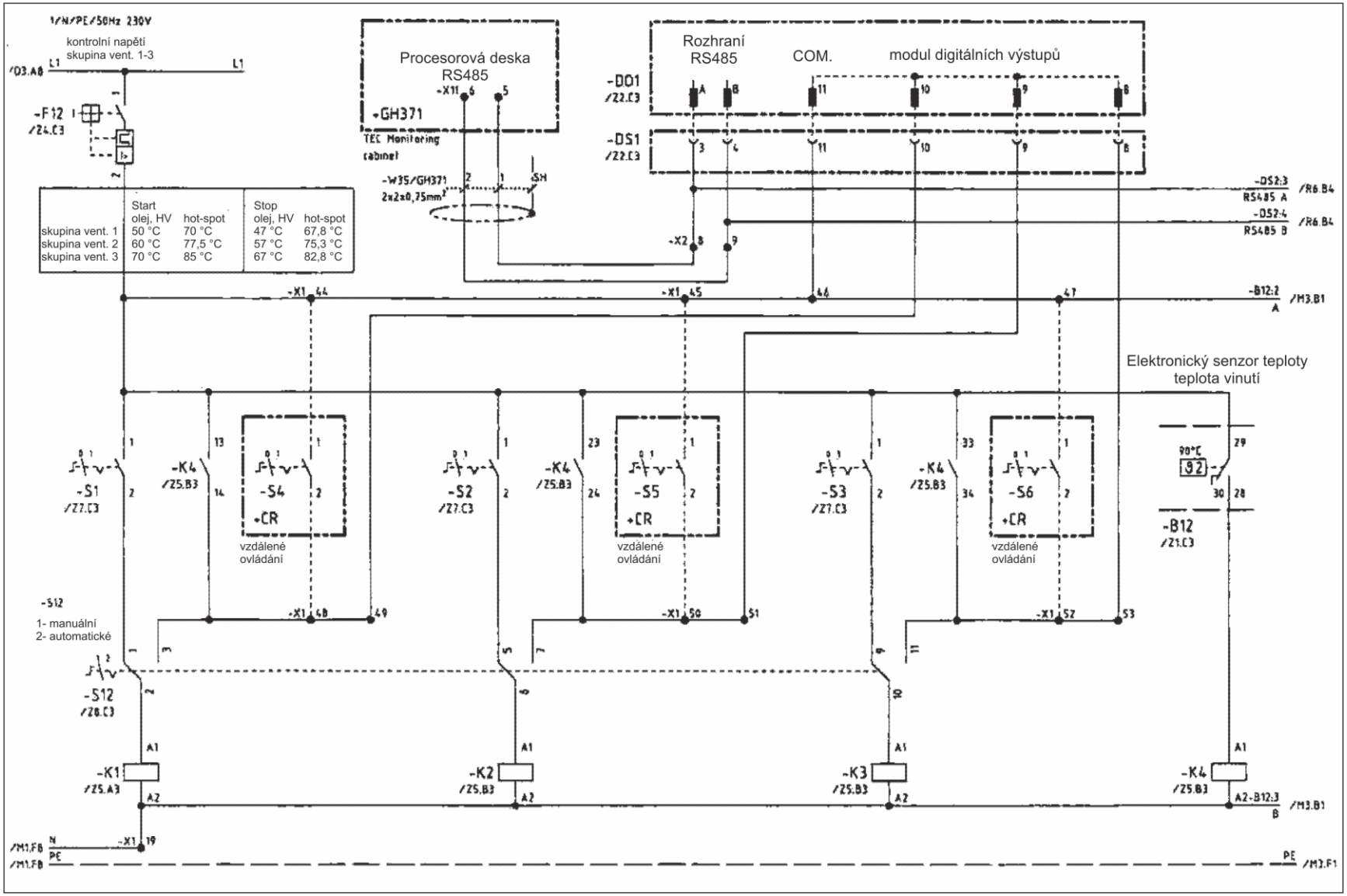
[28] ABB. *Pokyny pro provoz a údržbu, Třífázový autotransformátor.* Halle, Německo: ABB Transformatoren GmbH, 2004, 110 s.

[29] SIEMENS KONČAR. *Návod k provozu a údržbě transformátoru*. Záhřeb, Chorvatsko: Siemens Končar Power Transformers, 2012, 1151 s.

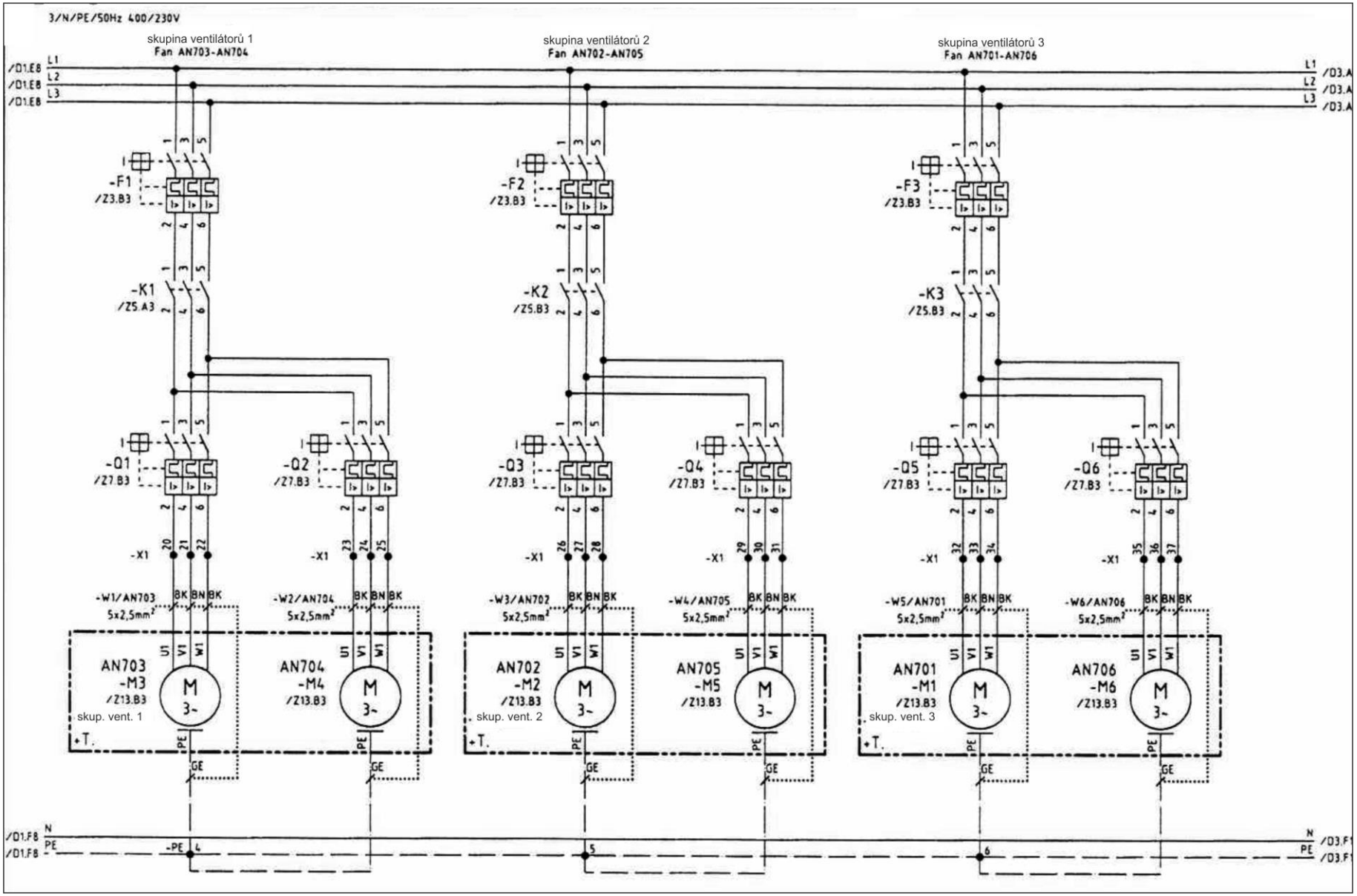
# Seznam příloh

**Příloha 1** Schémata zapojení řídicích systémů chlazení

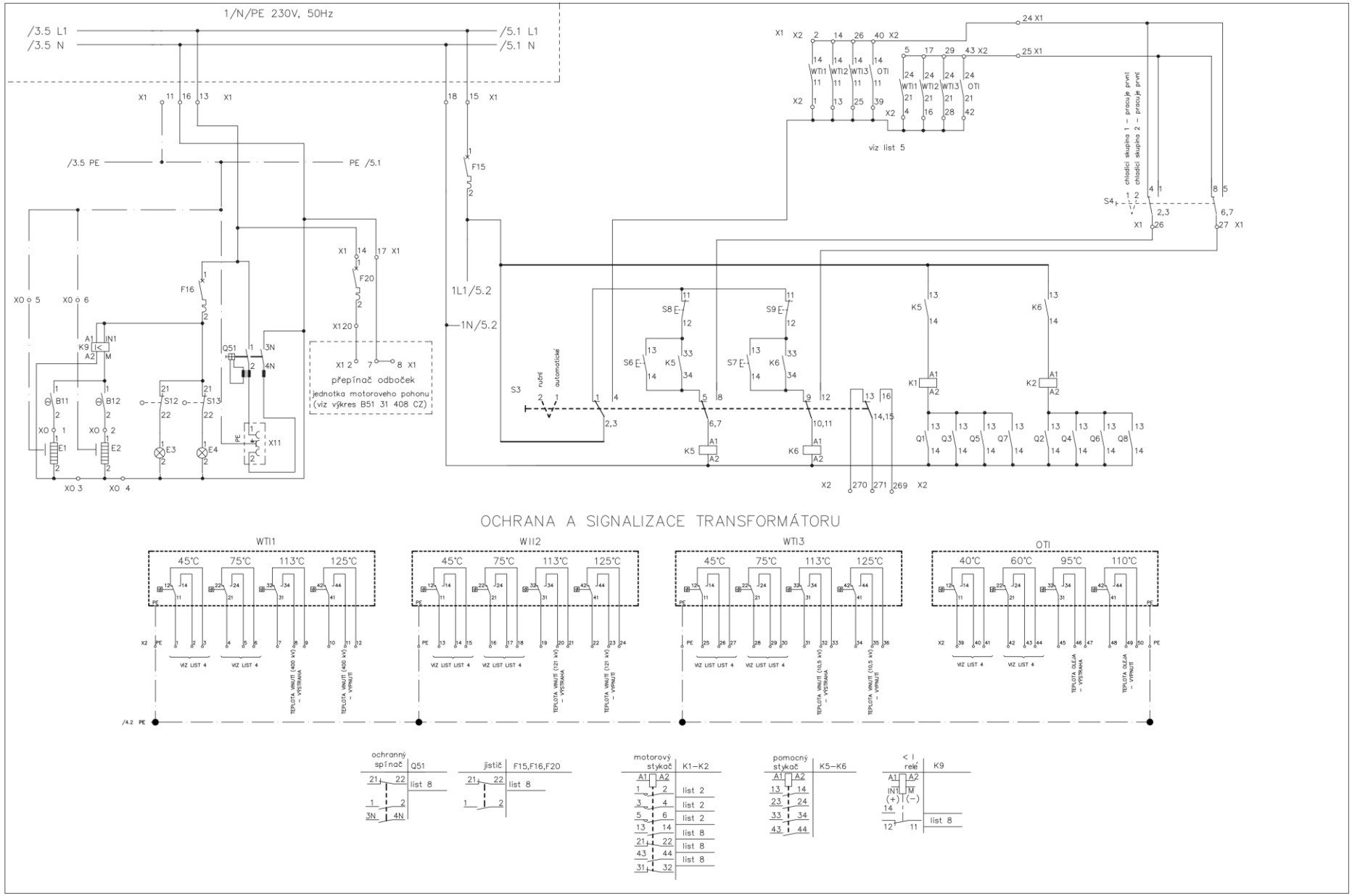
# Příloha 1



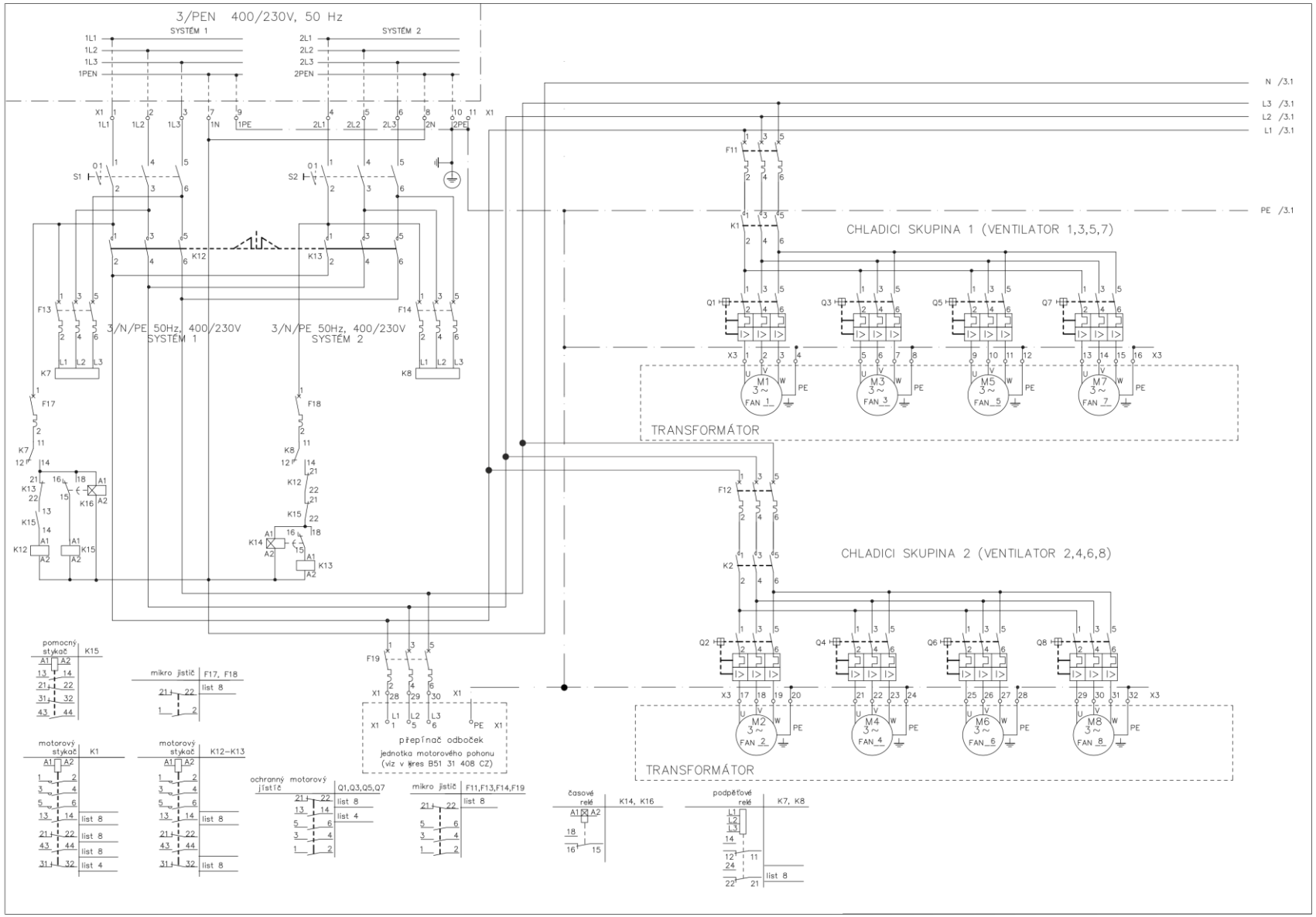

*Obr. P- 1 Schéma zapojení ovládacích prvků chlazení řízených MST, převzato z [28]*



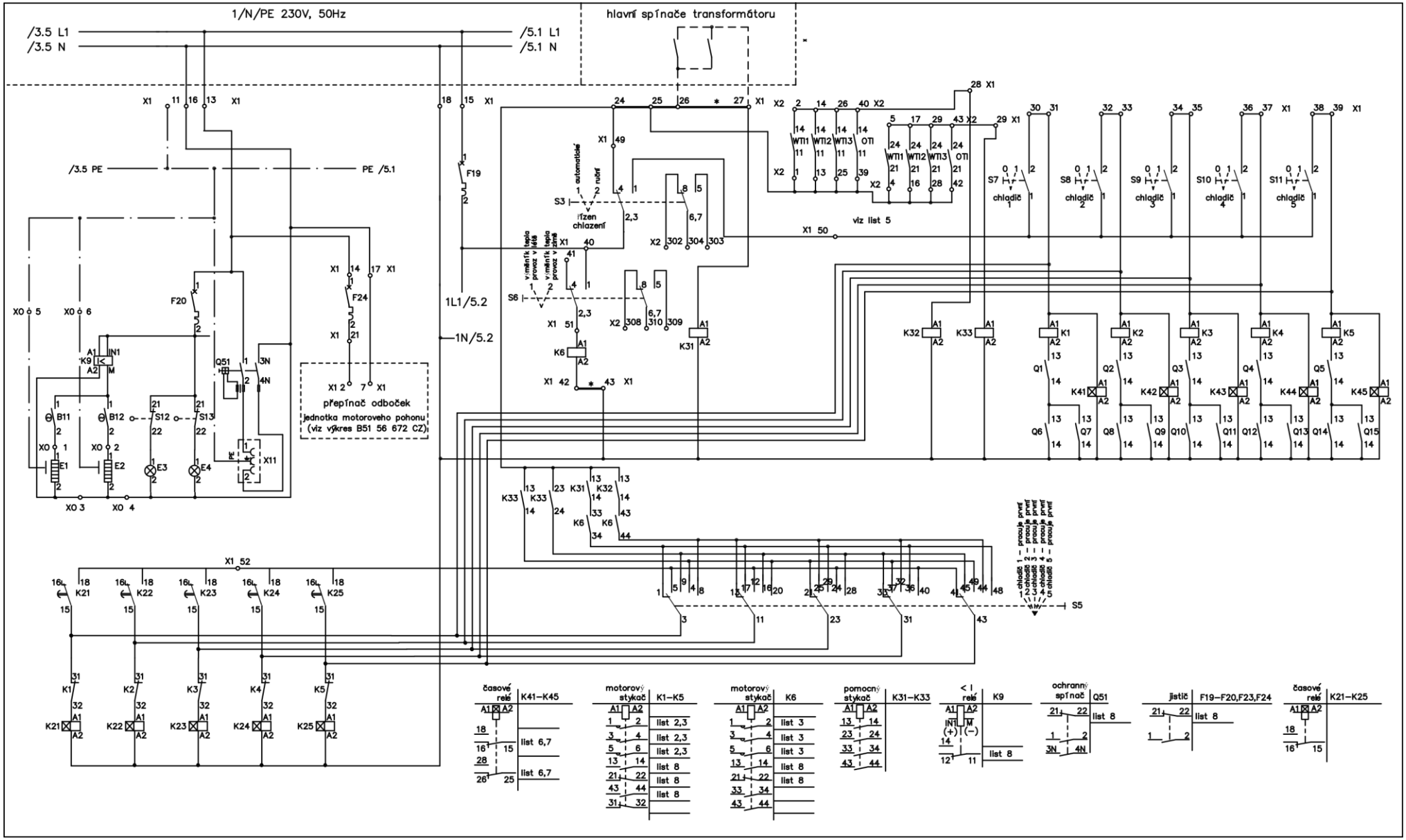

*Obr. P- 2 Schéma zapojení motorů ventilátorů řízených MST, převzato z [28]*



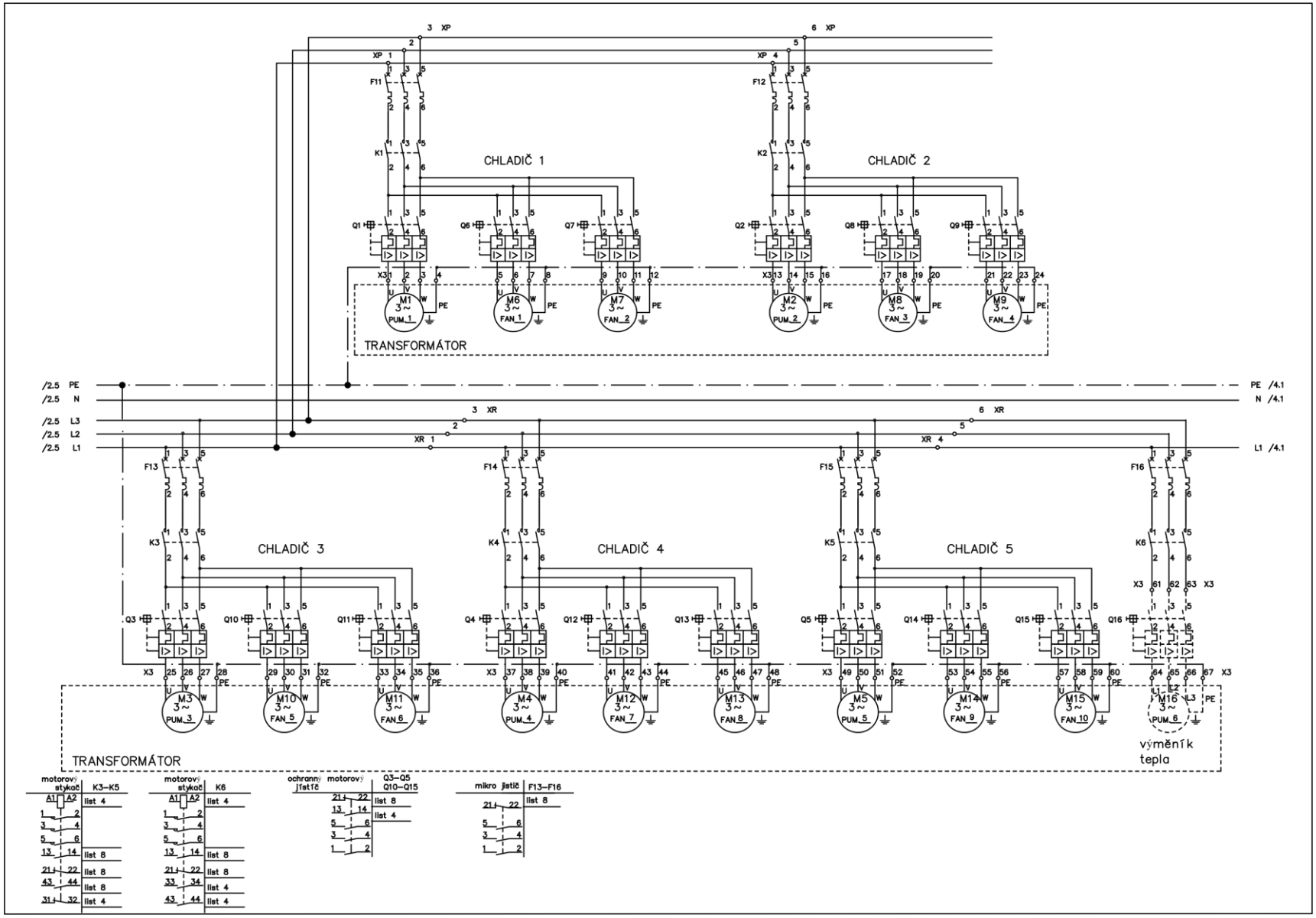

*Obr. P- 3 Schéma zapojení řízení chlazení ONAF řízeného na základě teplot ve stroji, převzato z [29]*




*Obr. P- 4 Schéma zapojení motorů ventilátorů řízených na základě teplot, převzato z [29]*




*Obr. P- 5 Schéma zapojení ovládání chlazení ODAF řízeného na základě teplot ve stroji, převzato z [29]*




*Obr. P- 6 Schéma zapojení motorů a čerpadel chlazení ODAF, převzato z [29]*