

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Diagnostika stavu výkonového transformátoru

2023
Kryštof Prejs

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Kryštof Prejs**
Osobní číslo: **D20144**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Diagnostika stavu výkonového transformátoru**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši diagnostických metod poskytujících informace o stavu výkonového transformátoru.
2. Navrhněte diagnostické měření na výkonovém transformátoru.
3. Proveďte měření na výkonovém transformátoru.
4. Data získaná měřením na transformátoru vyhodnoťte.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Mentlík Václav, Trnka Pavel: Diagnostika elektrických zařízení; BEN – technická literatura; 2008; ISBN 978-80-7300-232-9
2. Záliš Karel: Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů; Academia; 2005; ISBN 80-200-1358-X
3. Barták Alexandr, Mravínáč Luděk; Neumann Jacek; Vařák Jan: Diagnostika poruch izolací elektrických strojů; SNTL; 1984

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Sýkora**
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **30. listopadu 2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2023**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.
děkan

Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlašuji:

Práci s názvem Diagnostika stavu výkonového transformátoru jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

Rád bych využil této příležitosti a poděkoval rodině. Dále děkuji firmě Elektrizace železnic Praha a.s. za podporu během mého studia a za zapůjčení přístrojů pro měření. Také bych chtěl poděkovat firmě Trafo CZ, a.s. za poskytnutí prostorů pro měření.

Zvláštní poděkování patří Ing. Petrovi Sýkorovi za věcné rady a cenné připomínky při tvorbě práce. Chtěl bych taky ocenit jeho vstřícnost při zajištění prostorů a zařízení pro zkoušku transformátorů.

Anotace

Práce se v první části zabývá obecným popisem transformátorů a shrnuje důvody pro provádění diagnostických měření. V druhé části se zabývá shrnutím kusových zkoušek transformátorů doporučených příslušnou normou. Vysvětluje použití těchto metod a informuje o postupu měření. Občas uvede jejich výhody a nevýhody. Ve třetí části probírá metodu částečných výbojů, která byla použita pro měření transformátoru. V poslední řadě vyhodnocuje výsledky měření.

Klíčová slova

metoda, diagnostika, transformátor, vinutí, měření, částečné výboje, Omicron

Title [EN]

Power Transformer Condition Diagnostics

Annotation [EN]

The first part of the thesis deals with a general description of transformers and summarizes the reasons for performing diagnostic measurements. In the second part it summarises the unit tests of transformers recommended by the relevant standard. It explains the application of these methods and provides information on the measurement procedure. Occasionally, it lists their advantages and disadvantages. The third part discusses the partial discharge method that has been used for transformer measurements. Lastly, it evaluates the measurement results.

Keywords [EN]

method, diagnostics, transformer, winding, measurement, partial discharge, Omicron

Obsah

Úvod.....	9
1. Výkonové transformátory	10
1.1. Použití transformátoru.....	10
1.2. Rozdělení transformátorů.....	10
1.3. Konstrukce transformátorů.....	11
1.4. Jmenovité hodnoty transformátorů	13
1.5. Havárie transformátorů	14
2. Metody a druhy měření pro diagnostiku transformátorů	15
2.1. Měření činného odporu vinutí.....	15
2.1.1. Průběh měření	15
2.1.2. Výpočet odporu.....	16
2.2. Měření izolačního odporu a polarizačního indexu.....	16
2.2.1. Průběh měření	16
2.2.2. Vyhodnocení naměřených výsledků.....	17
2.3. Zkouška přiloženým napětím.....	17
2.4. Zkouška indukovaným napětím	17
2.5. Kontrola natočení fází	17
2.5.1. Průběh měření	18
2.5.2. Zjištění hodinového úhlu	18
2.6. Ztráty a proud naprázdno	18
2.6.1. Princip metody	19
2.7. Ztráty a napětí nakrátko	19
2.7.1. Postup měření	20
2.7.2. Zjištění napětí, ztrát a účinníku nakrátko.....	20
2.8. Rozbor transformátorového oleje.....	20
2.8.1. Vizuální kontrola oleje.....	21
2.8.2. Karl-Fisherova metoda (titrační metoda).....	21
2.8.3. Viskozita	21
2.8.4. Mezipovrchové napětí.....	21
2.8.5. Průrazné napětí	22
2.9. Měření ztrátového činitele $\text{tg } \delta$	22
2.9.1. Princip metody	22
2.9.2. Určení stavu izolačního oleje.....	23
2.9.3. Určení stavu izolace.....	24
2.9.4. Průběh měření a měřicí přístroje.....	25
2.9.5. Porovnání s ostatními diagnostickými metodami.....	25

3.	Metody měření částečných výbojů	27
3.1.	Rozdělení metod pro částečné výboje	27
3.2.	Neelektrické metody měření částečných výbojů.....	28
3.2.1.	Optická detekce.....	28
3.2.2.	Akustická detekce	28
3.2.3.	Chemická detekce	28
3.3.	Elektrické metody pro měření částečných výbojů	29
3.3.1.	Galvanická metoda měření částečných výbojů.....	29
3.3.2.	Kapacitní a induktivní snímače.....	32
4.	Měření částečných výbojů	33
4.1.	Popis měřicího zařízení	33
4.1.1.	MPD800.....	33
4.1.2.	MCU2	34
4.1.3.	CPL1	34
4.1.4.	CAL 542	35
4.1.5.	RBP1	35
4.1.6.	Vazební kondenzátor	36
4.2.	Software k měřicímu zařízení	36
4.3.	Testovaný transformátor	39
4.4.	Schémata měření	39
4.5.	Průběh měření	42
4.6.	Naměřené hodnoty	43
4.7.	Vyhodnocení naměřených výsledků	43
	Závěr	45
	Zdroje.....	46
	Seznam vzorců.....	48
	Seznam příloh	49

Úvod

V dnešní době si již nejde představit v energetickém odvětví jeho funkčnost bez diagnostiky. Stále se zvětšující požadavky na spolehlivost a bezpečnost zařízení nutí provozovatele buď k pravidelným diagnostickým měřením, nebo k instalování elektroniky, která kontinuálně sleduje a zaznamenává stav sledovaného zařízení. Případné havárie a dlouhé nucené odstávky mají dopad jak energetický, tak i ekonomický.

Diagnostika se ovšem nezabývá jen zařízením, které je již funkční a nasazené na svém místě. Nalezneme ji již ve výrobě zařízení, kde již u výstupu z továrny můžeme navrhnout pokyny pro údržbu tohoto zařízení. Dále bychom měli vědět vše o aktuálním stavu a tím vytvořit následnou prognózu vývoje vlastností.

Z toho vyplývá, že dalším cílem diagnostiky je předpovídat stavy zařízení na základě změn vlastností objektu. Poté z těchto předpovědí měnit například provozní podmínky, plánovat odstávky a údržbové práce na objektu.

Cílem práce je seznámit se s kusovými diagnostickými zkouškami na transformátoru a určit jejich vlastnosti, možnosti a také důvod používání. V poslední řadě změřit částečné výboje transformátoru pomocí galvanické metody a prezentovat výsledky měření. Cílem měření je určit stárnutí izolační náplně transformátoru.

1. Výkonové transformátory

Transformátor je obecně elektrický netočivý stroj, který umožňuje změnu střídavého elektrického napětí a proudu na jinou úroveň. Tato změna se děje na základě elektromagnetické indukce a konstrukčních vlastností transformátoru.

1.1. Použití transformátoru

Transformátor se používá především pro svou schopnost změny vlastností elektrického napětí, kdy frekvence tohoto napětí zůstává stále stejná. Další schopností je galvanické oddělení dvou obvodů od sebe, kdy je mezi obvody při použití transformátoru pouze magnetická vazba. Transformátor při zatížení dosahuje velké účinnosti, která se pohybuje okolo 0,95 až 0,99.

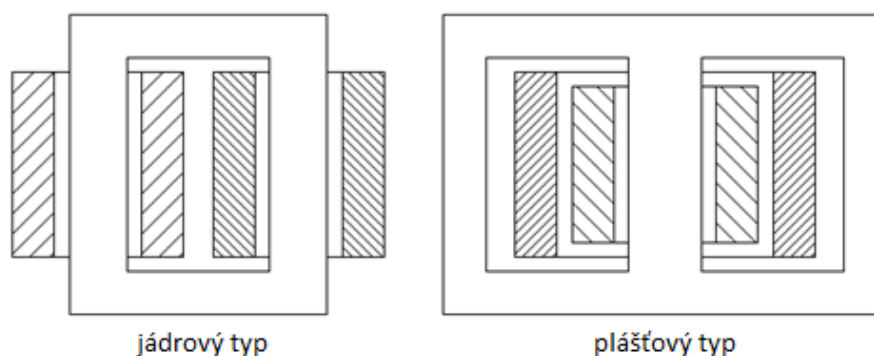
Výkonové transformátory nalezneme hlavně v energetickém odvětví při přenosu elektrické energie. Dále je možné je spatřit při přenosu velkých výkonů, a to například na železničních sítích, kde také slouží k převodu napětí. Ovšem železnice ho využívá i pro uskutečnění fázového posunu napětí, a to například u usměrňovačů. Tím se dosáhne lepšího průběhu napětí na výstupu usměrňovače, kdy napětí bude více vyhlazené. Existují i taková zapojení vinutí, která částečně dokáží eliminovat nesouměrné zatížení trojfázové sítě.

1.2. Rozdělení transformátorů

V první řadě se transformátory rozdělují podle počtu fází. V našich podmínkách většinou nalezneme transformátory jednofázové a trojfázové.

Další rozdělení se opírá o provedení magnetického obvodu. V energetickém odvětví se nejvíce setkáme s plášťovým typem. Méně používaný je typ jádrový. Poslední typ je toroidní, který lze najít v nízkonapěťových aplikacích.

Tvar plášťového a jádrového typu lze vidět na obrázku 1. Plášťový magnetický obvod má výhodu v menších ztrátách vlivem rozptylové indukčnosti. V energetice ale používáme nejčastěji typ jádrový. Na každém sloupku je vždy umístěno primární i sekundární vinutí. Trojfázový transformátor má tedy 3 sloupky. Pokud bychom chtěli použít plášťový typ, musel by mít trojfázový transformátor sloupeků 5.



Obrázek 1 - Typy magnetických obvodů transformátoru [15]

Nejrozšířenějším rozdělením v energetických kruzích je podle druhu chlazení a zároveň izolace. První typ je transformátor chlazený plynem/vzduchem. Druhým typem jsou transformátory, které jsou chlazeny kapalinou/olejem. Typ chlazení velmi ovlivňuje výkonové vlastnosti transformátoru. Ovlivněna je také přetížitelnost. Konstrukce těchto dvou typů se trochu liší. Důležitým faktorem je ale cena údržby transformátoru. Suché transformátory, obzvláště se zalévaným vinutím, jsou prakticky bezúdržbové. Olejový transformátor, a to i když je hermeticky uzavřen, vždy nějakou údržbu vyžaduje. Největším problémem olejového transformátoru je právě olej. [16]

1.3. Konstrukce transformátorů

Konstrukce transformátoru začíná u magnetického jádra. Magnetický obvod je složen z elektrotechnických plechů, které jsou skládány na sebe, ale zároveň od sebe elektricky odděleny. Tímto opatřením se docílí zmenšení ztrát v železe vlivem vířivých proudů.

Okolo sloupku magnetického obvodu je navinuto vinutí. Vinutí je většinou měděný či hliníkový vodič, na kterém je nanesena vrstva izolačního laku. Tím jsou od sebe odděleny jednotlivé závitů ve vinutí. Počet závitů na primárním a sekundárním vinutí určuje převod transformátoru dle vzorce (15), kdy místo primárního napětí dosadíme závitů primárního vinutí a místo napětí sekundárního vinutí závitů sekundárního vinutí. Na jednom transformátoru může být i více než jedno vinutí. Pro třífázový transformátor platí, že sekundární vinutí je vždy umístěné uvnitř, naopak primární vinutí je umístěno na vnější straně. Toto opatření je odůvodněno lépe vycházejícími izolačními vzdálenostmi. Mezi vinutími jsou dále izolační vrstvy papíru, různé plasty nebo kompozity. U olejového transformátoru se vinutí oddělují i olejem v nádobě. Pokud máme transformátor suchý, jsou vinutí oddělena pryskyřicí. Olejový transformátor můžeme vidět na obrázku 2 a suchý transformátor na obrázku 3.



Obrázek 2 - Olejový transformátor



Obrázek 3 - Suchý transformátor

Další část, kterou je nádoba, se týká pouze olejového transformátoru. Nádoba slouží hlavně pro uložení vinutí do oleje. Různě v nádobě jsou většinou uložena čidla pro měření teploty oleje, abychom ji mohli určovat ve více vrstvách. Pokud je nádoba hermeticky uzavřena, jsou na ní pružná žebra, která se roztahují a smršťují dle teploty, respektive roztažení oleje. Na nádobě jsou také umístěny kohouty pro odběr oleje, a to také v různých částech. Na nádobě je umístěno víko nádoby, na kterém najdeme oka pro uchycení víka nádoby. Na některých transformátorech je na nádobě také Buchholzovo relé, které slouží jako ochrana transformátoru. Buchholzovo relé na základě dvou plováků může indikovat tvoření plynu v nádobě vlivem rozkladu oleje při působení elektrického oblouku nebo velkého lokálního přehřívání.

Na víku nádoby se také nachází vysokonapěťové průchodky, které zajišťují bezpečný průchod vodiče z nádoby na výstup. Průchodka je většinou tvořena porcelánovým dutým izolátorem. Prostředkem izolátoru prochází vodič, který je přichycen k výstupní svorce. Na výstupní svorky se připevňují tzv. „klesačky“, což jsou vodiče, které propojují transformátor s přípojnici.

Na transformátoru může být také regulace napětí. Zařízení, které regulaci umožňuje se nazývá přepínač odboček. Ten vyřazuje či zapojuje závity do sekundárního nebo primárního vinutí. Přepínač odboček může být ovládán buď mechanicky, nebo elektricky. Mechanický přepínač najdeme spíše na transformátorech VN/NN. Elektricky ovládaný najdeme na transformátorech, které jsou na hladinách VN nebo VVN.

1.4. Jmenovité hodnoty transformátorů

Jmenovité hodnoty transformátoru jsou napsány na štítku, který je většinou umístěn na nádobě, nebo u suchých transformátorů na izolaci vinutí. Na štítku najdeme jmenovitý výkon pro každé vinutí zvlášť. Tento výkon je uveden v kVA. Také je zde jmenovitý převod, který je zapsán v kV. Najdeme zde i zapojení vinutí, kdy velká písmena značí stranu vyššího a malá nižšího napětí. Zapojení jsou zapsaná písmenky, kde Y je zapojení do hvězdy a D je zapojení do trojúhelníka. Na VN/NN transformátorech můžeme najít i písmeno Z, které značí lomenou hvězdu. Ta se používá hlavně pro vyrovnání nesouměrné zátěže v třífázové soustavě. S těmito písmeny můžeme někde najít i písmeno N, které značí vyvedený střed, tedy nulový vodič. Střed nemůže být vyveden ze zapojení do trojúhelníka. Za všemi těmito písmeny se vždy nachází číslo, které určuje hodinový úhel. Hodinový úhel je dále rozepsán v této práci.

Na štítku je také uvedeno poměrné napětí nakrátko pro každou hladinu zvlášť. Nachází se zde i ztráty nakrátko a naprázdno. Pokud je transformátor olejový, je na štítku uveden typ transformátorového oleje. Dále jsou na štítku uvedeny izolační hladiny jednotlivých vinutí. Pokud má transformátor přepínač odboček, jsou zde uvedena jmenovitá napětí pro jednotlivé odbočky, a to i se jmenovitými proudy. Jako poslední se na štítku nachází rok výroby, výrobní číslo, hmotnost jednotlivých částí (oleje, jádra, vinutí) a materiál vinutí.

1.5. Havárie transformátorů

Příčinou havárií většiny transformátoru je izolační systém. Skládá se totiž z papíru, oleje nebo plastů a kompozitů, pokud se jedná o olejový transformátor. Můžeme zde ale najít i pryskyřici nebo skleněná vlákna, která patří k suchým transformátorům. Tyto látky, a to hlavně papír a olej, jsou velmi náchylné na působení degračních činitelů. Jejich špatný stav může ovlivnit bezporuchový chod stroje. Abychom těmto haváriím zamezili, je dobré vykonávat na transformátorech různá diagnostická měření, která těmto haváriím mohou předcházet. Na základě těchto měření je následně možné dávat podněty k různým odstávkám sloužícím k údržbě. Je také možné na základě výsledků z měření nechat transformátor odstavit a zabránit tak ekonomickým, ekologickým a dalším katastrofám. [17]



Obrázek 4 - Požár transformátoru [18]

2. Metody a druhy měření pro diagnostiku transformátorů

2.1. Měření činného odporu vinutí

Měření odporu vinutí patří do základního souboru stejnosměrných diagnostických metod pro transformátory. Metoda také patří do kusových zkoušek. Pomocí této diagnostické metody můžeme odhalit vady ve vinutí transformátoru. Jsou to například mezizávitové zkraty, které způsobují lokální oteplení v místě zkratu.

Činný odpor můžeme měřit jak pro primární, tak i pro sekundární (a další vinutí). Nesmíme také zapomenout na měření při všech polohách odbočkového přepínače, pokud je tímto zařízením transformátor vybaven. Odpor vinutí by se měl měřit při teplotě transformátoru shodnou s okolím, z důvodu přesného určení teploty při měření. [1, str. 205]

2.1.1. Průběh měření

Odpor vinutí můžeme měřit buď přímou, nepřímou nebo můstkovou metodou. Proud, kterým měříme vinutí, by neměl přesáhnout 0,2 násobek jmenovitého proudu. Abychom snížili dobu ustálení hodnot proudu, doporučuje se použít proud, který lze vypočítat ze vzorce (4). Pokud máme zpřístupněna všechna vinutí, měříme každou fázi zvlášť. Pokud jsou fáze trvale spojeny do hvězdy, nebo trojúhelníku, měříme odpor vždy mezi dvojicemi vinutí. Z naměřených hodnot následně vypočítáme odpory jednotlivých fází. [1, str. 205]

Pokud k měření použijeme nepřímou voltampérovou metodu, doporučuje se použití metody pro měření malých odporů. V dnešní době ale budeme používat spíše metody přímé nebo můstkové, které jsou pro uživatele příjemnější. Dále se doporučuje měřit 3x při různých hodnotách proudu a následně vypočítat průměrnou hodnotu odporu. [8, str. 136]

Při měření mají být neměřená vinutí rozpojena, tedy naprázdno. Stejnosměrný proud nemá na magnetický obvod vliv. Jak již bylo zmíněno, teplota stroje by měla být přibližně stejná, jako teplota okolí. Naměřený odpor při určité teplotě se následně přepočítává na odpor při 20 °C pomocí vztahu (1) pro měděné vinutí nebo podle vztahu (2) pro hliníkové vinutí. [8, str 137]

2.1.2. Výpočet odporu

Vinutí transformátoru mohou být buď zvlášť nebo trvale spojené do trojúhelníku, či hvězdy. U rozdělených vinutí je z měření rovnou zjištěn odpor jedné fáze. U trvalého spojení vinutí jednotlivých fází vždy měříme mezi jednotlivými fázemi a následně vypočítáme střední hodnotu odporu jedné fáze. Střední hodnotu odporu fáze můžeme stanovit jen tehdy, pokud jsou odpory vinutí stejné nebo se moc neliší. Výpočet provedeme podle vzorce (5). [1, str. 205]

2.2. Měření izolačního odporu a polarizačního indexu

Stejně jako odpor vinutí, měření izolačního odporu patří do základních stejnosměrných diagnostických metod transformátoru. Polarizační index i izolační odpor vinutí se řadí do kusových zkoušek transformátoru. Metodou polarizačního indexu, který se stanovuje z časové závislosti odporu na době přiloženého napětí, se může stanovit vlhkost izolace.

Izolační odpor se velmi citlivě mění právě s nejslabším místem na izolačním systému transformátoru. Za pokles naměřené hodnoty může většinou vlhkost či vodivé nečistoty. Při měření provádíme odečet proudu, který nazýváme proudem absorpčním. Dále odečítáme samotný izolační odpor. [1, str 220]

2.2.1. Průběh měření

Abychom mohli zahájit měření a výsledky nebyly velmi zkreslené vnějšími podmínkami, musí být relativní vlhkost ovzduší menší než 90 %. Nesmíme také měřit za deště, mlhy a sněžení. Celková teplota stroje by se měla pohybovat nad 10 °C. Před měřením je nutné transformátor odstavit asi na 2 hodiny. Doporučuje se také uzemnit jeho vývody a tím odvést zbytkový náboj, který by nám mohl ovlivnit výsledky měření. Poté, co začneme měřit, je vhodné dodržovat mezi měřeními vybíjecí interval. [1, str. 220]

Měření provádíme mezi jednotlivými vinutími, následně i vinutí vůči kostře [8, str. 145]. Vinutí, která nejsou měřená se vždy připojí na stínící vývod. Měříme stejnosměrným napětím 2,5 kV, případně menším. Napětí nesmí přesáhnout jmenovité napětí stroje. Napětí na svorkách necháváme 60 s. Při prvních 15 s odečítáme hodnotu absorpčního proudu, kterou odečteme i při 60 s. Z těchto hodnot si následně vypočítáme minutový polarizační index dle vzorce (3). [1, str. 220-221]

2.2.2. Vyhodnocení naměřených výsledků

Při použití této metody můžeme hodnotit jak změnu odporu a indexu od minulého měření, tak i naměřené hodnotu.

Hodnota izolačního odporu by se od minulého měření neměla změnit o více než 40 %. Polarizační index je u nových strojů většinou větší než 1,7. U starších strojů klesá, ale měl by se pohybovat nad hodnotou 1,3. [1, str 221-222]

2.3. Zkouška přiloženým napětím

Při této zkoušce ověřujeme funkčnost izolace vinutí transformátoru vůči uzemněným částem. Transformátor musí být při zkoušce zcela smontován. Napětí o velikosti vrcholové hodnoty podělenou $\sqrt{2}$ přivádíme mezi zkratované vinutí a uzemněné vývody ostatních vinutí. Případně se orientujeme dle normy [9], která přímo udává hladinu napětí, kterou se má zařízení zkoušet. Voltmetrem, či měřícím transformátorem napětí, měříme napětí mezi zkoušeným vinutím a uzemněnou částí. Norma [9] také udává, že zkouška je úspěšná, pokud během měření nedojde k náhlému poklesu zkušebního napětí. [1, str 229]

2.4. Zkouška indukovaným napětím

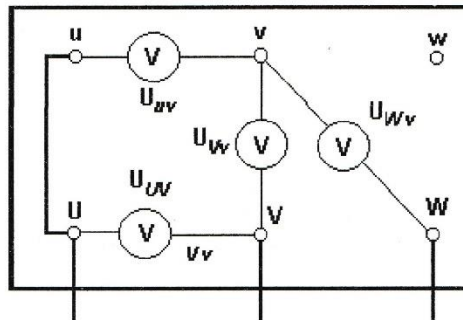
Touto zkouškou ověřujeme hlavně mezizávitovou izolaci vinutí. Abychom nepřesycovali jádro transformátoru, použijeme minimálně 2x vyšší frekvenci, tedy 100 Hz. Tím se na sekundární straně indukují 2x vyšší napětí. Zkouška je úspěšná, pokud nedojde k mezizávitovému zkratu či k jiné poruše. Zkouška se řídí dle normy [9].

2.5. Kontrola natočení fází

Kontrola hodinového úhlu patří ke kusovým zkouškám transformátorů. Měříme ho hlavně z důvodu možnosti paralelního chodu transformátorů, protože je to jedna z hlavních podmínek pro paralelní chod. Je to zároveň kontrola, zda se při výrobě náhodou nezapojilo vinutí jinak, případně zda není zapojen jen opačný konec vinutí na svorky transformátoru. [1, str. 207]

2.5.1. Průběh měření

Nejdříve na transformátoru propojíme 2 vinutí stejné fáze. Schéma je možno vidět na obrázku 5. Víme tedy, že na této fázi je napětí stejné. Následně napájíme primární stranu transformátoru nižším souměrným napětím. Voltmetrem měříme napětí, a to U_{UV} , U_{VW} , U_{UW} , U_{Vv} , U_{Wv} , U_{Uv} , U_{uv} a U_{vw} . [1, str. 208]



Obrázek 5 - Schéma pro měření hodinového úhlu [8]

2.5.2. Zjištění hodinového úhlu

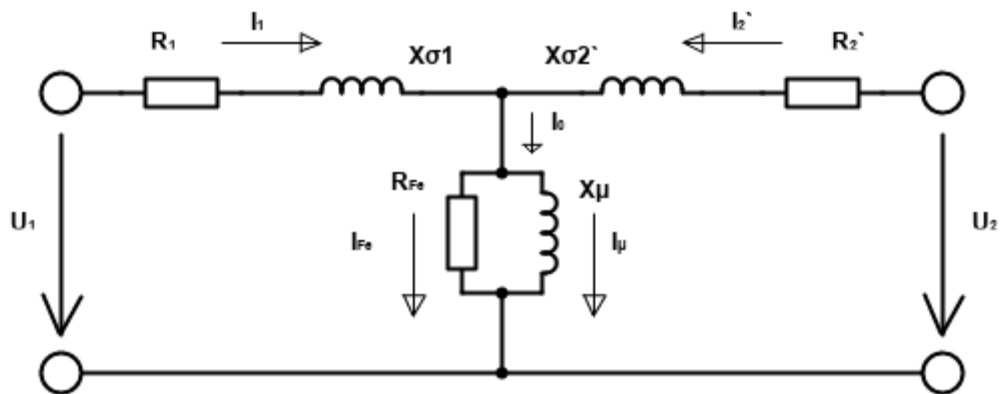
Z naměřených napětí si sestojíme pravotočivý trojúhelník s body U, V a W, kde v měřítku zakreslíme napětí U_{UV} , U_{VW} a U_{UW} . Protože jsme při měření měli svorky U a u propojené, určíme, že se bod U nachází na stejném místě jako bod u. Poté do grafu vyneseme kružnice o poloměru v měřítku napětí. Napětí U_{Ww} a U_{Vv} budou mít počáteční bod ve W. Další dvě napětí, U_{Vv} a U_{Uv} , mají počáteční bod v bodě V. Kde se kružnice napětí U_{Vv} a U_{Ww} protnou, tam bude bod w. Zbylé 2 kružnice určí bod v. Podle natočení malého trojúhelníku, oproti velkému trojúhelníku zjistíme celkový hodinový úhel transformátoru. [1, str. 208-209]

2.6. Ztráty a proud naprázdno

Z této diagnostické metody můžeme zjistit další poruchy vinutí. Měření ztrát a proudu naprázdno patří ke kusovým zkouškám transformátoru. Pokud jsou ztráty naprázdno v transformátoru velké, nejspíše dochází k mezizávitovým zkratům na vinutí a lokálním oteplením vinutí. Jako dalšího viníka lze označit i prodřenou izolaci transformátorových plechů. Chybějící izolace způsobí vznik ztrát díky vířivým proudům. Zvětší se tak ztráty v železe. Na vinně může být i vysoká činnost částečných výbojů, která způsobuje činné ztráty.

2.6.1. Princip metody

Jak již z názvu metody vyplývá, transformátor je při tomto měření na sekundární straně nezatížen. To znamená, že sekundární větví teče nulový proud a ztráty na $X_{\sigma 2}$ a R_2 jsou nulové. Tuto větev tedy zanedbáme. Do transformátoru ovšem teče magnetizační proud, který se skládá ze dvou složek. První je složka induktivní, která představuje proud hlavní impedancí X_{μ} . Druhá složka je činná složka, která reprezentuje ztráty vířivými proudy v železe, tedy proud odporem R_{Fe} , jak je znázorněno na obrázku 6. [1, str. 209-210]



Obrázek 6 - náhradní schéma transformátoru

Proud naprázdno u transformátorů bývá 1,5~10 % jmenovitého proudu. Větší relativní hodnoty proudu naprázdno naměříme u malých transformátorů. Proud naprázdno je většinou jalový. Při tomto měření se také počítá zdánlivý výkon ze vzorce (6) a účinnost ze vzorce (7). Účinnost je také velmi malý a pohybuje se okolo 0,05~0,3. Jako poslední se při měření zjišťuje převod transformátoru, který je vypočten pomocí podílu vstupního ku výstupnímu napětí ve vzorci (8). Pokud měříme na třífázovém transformátoru, určíme hodnotu vstupního napětí ze vzorce (8) jako hodnotu středního napětí. Hodnotu vstupního proudu ze vzorce (9), jako hodnotu středního proudu. [1, str. 210-211]

2.7. Ztráty a napětí nakrátko

Tuto metodu můžeme označovat také jako zjištění ztrát ve vinutí. V kvalitních transformátorech jsou totiž při zapojení nakrátko ztráty v železe P_{FE} zanedbatelné, oproti ztrátám ve vinutí. Metodou se dále určuje i napětí nakrátko, které je velmi úzce spojené se zkratovými poměry, tedy tvrdostí transformátoru. Navíc se tímto určí úbytek napětí při plném zatížení. Jako poslední se také vypočítá účinnost nakrátko. [1, str. 214-215] [8, str 152-153]

2.7.1. Postup měření

Na svorky vinutí transformátoru připojíme regulovaný třífázový zdroj. Zdroj se většinou připojuje na vinutí, které má menší jmenovitou hodnotu proudu, což je zároveň zpravidla vinutí s vyšším jmenovitým napětím. Na tuto stranu do každé fáze dále připojíme ampérmetr, voltmetr a wattmetr. Transformátory, která nemají druhé vinutí spojené do trojúhelníku, se nakrátko spojí tím, že se vinutí spojí s nulovým bodem transformátoru. Na regulovaném zdroji postupně zvyšujeme napětí. Poté, co proud dosáhne jmenovité hodnoty, odečteme napětí mezi fázemi a výkony z wattmetrů. Proud, kterého bychom měli dosáhnout, se vypočítá ze vzorce (10). Důležité je také zmínit, že proudy a napětí by měli být ve všech fázích stejné. Pokud při měření zaznamenáme velké rozdíly, může se jednat o poruchu transformátoru, případně poruchu zdroje. [1, str. 214-215] [8, str 152-153]

2.7.2. Zjištění napětí, ztrát a účinníku nakrátko

U třífázových transformátorů zjišťujeme střední hodnotu napětí nakrátko. Ta se vypočítá jako průměrná hodnota ze tří měřených napětí, a to podle vzorce (11). Z této střední hodnoty následně počítáme procentuální vyjádření napětí nakrátko, tedy poměr mezi střední hodnotou napětí a jmenovitého napětí vinutí. Použijeme vzorec (12). Případně tuto veličinu můžeme počítat pro každou fázi zvlášť. [8, str. 152-153]

Ztráty nakrátko nám určují u kvalitních transformátorů pouze ztráty ve vinutí. Příkon nakrátko vypočítáme pouhým sečtením hodnot všech wattmetrů. U VN transformátorů je nutno dělat korekci, z důvodu ztrát v napěťových cívkách wattmetrů. Na korekci použijeme vzorec (13), který tyto ztráty zohledňuje pomocí napětí, při kterém jsme měřili tuto hodnotu ztrát, a odporu napěťové cívky wattmetru. Následně dostaneme ztráty činné ztráty ve vinutích. [8, str. 254]

Jako poslední určíme účinník nakrátko. K tomu budeme potřebovat střední hodnotu proudu, která se vypočítá stejně jako střední hodnota napětí. Pro výpočet proudu použijeme vzorec (14) a pro účinník vzorec (15). Účinník VN transformátoru nakrátko by se měl co nejvíce blížit 1, protože většina ztrát je právě ve vinutí. [8, str. 154]

2.8. Rozbor transformátorového oleje

Další velkou skupinou diagnostických metod jsou právě různé zkoušky ze vzorku oleje. Ať už jednoduché či komplexní testy dokážou odhalit spousty vad a poskytnout tak náhled do dění

v nádobě transformátoru. Při odebírání vzorku oleje by měly být dodrženy podmínky, které souvisí s počasím. Při odběru by hlavně nemělo pršet, ani sněžit. Objem vzorku by měl být asi 1-2 litry transformátorového oleje. Další podklady pro odběry jsou napsány v normě [11], kde jsou rozepsány i postupy níže předložených metod. [11]

2.8.1. Vizuální kontrola oleje

Předtím, než vůbec pracovník laboratoře začne s olejem manipulovat, si zaznamená barvu, případně i přítomnost pevných částic. Pokud je olej starší, má většinou temnější barvu, zatímco oleje nové jsou světlé. Do oleje se mohou rozpadat izolační části transformátoru. Rozpad má také vliv na barvu. V oleji se mohou vyskytovat i pevné částice právě z izolace. [11]

2.8.2. Karl-Fisherova metoda (titrační metoda)

Metoda se zabývá určením množství vody ve vzorku oleje. Využívá se chemické reakce vody, která se v oleji vyskytuje. Do vzorku se přidají specifická činidla, která tuto reakci s vodou vyvolají. Následně se do roztoku ponoří většinou titanové elektrody, do kterých přes zdroj pouštíme napětí (několik mV až 1,5V). Následně se vynáší závislost velikosti proudu na objemu přidaného titračního činidla. [10]

2.8.3. Viskozita

Viskozita je velmi důležitá pro chladicí funkci transformátoru. Vyznačuje se právě závislosti na teplotě. Měřit ji můžeme například pomocí Stokesova viskozimetru, kde necháme vzorkem padat tělísko o určité hmotnosti. Těleso padá po dráze 100 mm. Měří se čas, za jak dlouho ujede tuto dráhu a následně se počítá viskozita. [1, str. 247]

2.8.4. Mezipovrchové napětí

„Mezipovrchové napětí mezi olejem a vodou poskytuje prostředky pro detekci rozpustných polárních znečišťujících látek a produktů degradace. Tato charakteristika se mění dosti rychle během počátečních stupňů stárnutí, ale ustálí se, když zhoršení je ještě mírné.“ [11, str. 19] Pokud se mezipovrchové napětí sníží velmi rychle, může to být kvůli nekompatibilitě mezi olejem a izolačními částmi. V normě jsou dále uvedeny i mezní hodnoty, do kterých by měla hodnota povrchového napětí spadat. [11]

2.8.5. Průrazné napětí

Měření průrazného napětí oleje určuje jeho izolační vlastnosti. Celý proces probíhá v nádobce, ve které jsou umístěné elektrody. Elektrody musí být dle normy [12] z mosazi, bronzu nebo austenitické korozivzdorné oceli. Elektrody musí být leštěné a mít buď sférický či částečně sférický s určitými rozměry. Mezi elektrodami postupně zvyšujeme napětí, které má frekvenci 50 Hz. Napětí zvyšujeme konstantní rychlostí. Následně sledujeme, při jaké hodnotě nastane průraz olejem. Tuto zkoušku opakujeme dohromady 6x. Mezi jednotlivými zkouškami by měl být časový odstup minimálně 2 minuty. Před každým testem by se dále mělo zkontrolovat, zda v oleji nejsou viditelné vzduchové bublinky. Následně se vypočítá výběrový průměr těchto průrazů v kilovoltech. Olej by měl mít při zkoušení teplotu 40°C. Průrazné napětí se velmi silně mění s nečistotami ve vzorku, proto musíme se vzorkem manipulovat tak, abychom ho neznečistili. [11] [12]

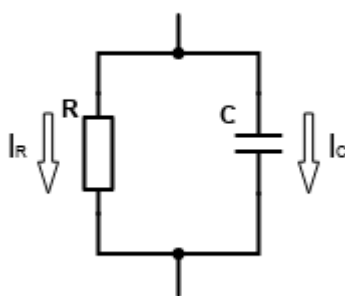
2.9. Měření ztrátového činitele tg δ

Pomocí tohoto měření můžeme testovat izolační schopnost transformátoru. Měřením zjistíme celkový stav izolace. Dále se dají testovat i jednotlivé části transformátoru, a to například zvlášť průchodky a olej. Měření slouží pro zajištění spolehlivosti a bezpečnosti stroje [3].

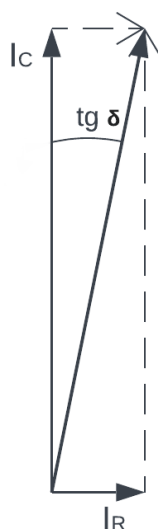
Měření ztrátového činitele lze provést i na vzorku odebraného transformátorového oleje. Tento druh měření se používá pro určení relativní permitivity oleje, která napomáhá určit čistotu transformátorového oleje. [1, str. 257-258]

2.9.1. Princip metody

Ideální izolant se v obvodu chová jako kondenzátor. Protože se v reálném zařízení nenachází ideální, ale skutečné izolanty, mají také svod, jak můžeme vidět na obrázku 7. Zde je svod naznačen odporem, kterým protéká proud I_R . Do kondenzátoru teče proud I_C . Následně dle hodnot proudů můžeme určovat úhel, který svírá proud I_C s celkovým proudem v obvodu, jak je zřejmé z obrázku 8.



Obrázek 7 - zjednodušené schéma izolantu pro potřeby měření ztrátového činitele



Obrázek 8 - Fázorový diagram pro objasnění výpočtu $\text{tg } \delta$ [6]

„Ztrátový činitel $\text{tg } \delta$ vyjadřuje dielektrické ztráty.“ [1, str. 256] Tyto ztráty vznikají vlivem střídavého elektrického pole a vyzáří se ve formě tepla. Pokud se dielektrikum ohřeje, vodivost se zvýší a tím vzroste i celkový procházející proud. Čím je teplota vyšší, tím rychleji stárne izolace, protože se zrychlují fyzikální a chemické pochody. [1, str. 256]

2.9.2. Určení stavu izolačního oleje

Na základě tohoto měření můžeme určovat 2 druhy oleje, a to čistý a zestárlý.

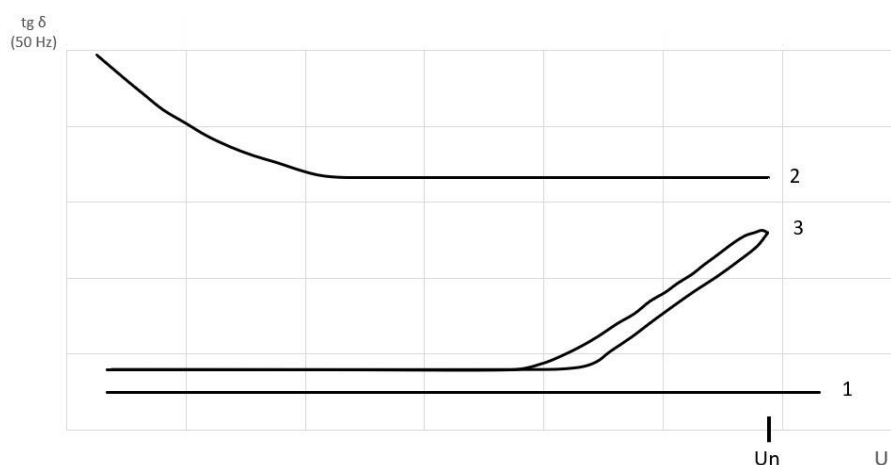
Čisté izolační oleje, které neobsahují nečistoty, vykazují pouze ztráty dielektrické. Tyto ztráty jsou dány pouze vodivostí oleje. Ztráty nejsou velké, tudíž je malý i ztrátový činitel $\text{tg } \delta$.

Čím se teplota oleje bude zvyšovat, tím větší bude vodivost oleje a tím i ztráty. Závislost mezi ztrátovým činitelem a teplotou roste přibližně s kladnou druhou derivací. Ovšem závislost na frekvenci je klesající. [1, str. 256]

U zestárlých izolačních olejů se navíc objevují ztráty polarizační. Ty jsou způsobeny právě nečistotami v oleji. Ztrátový činitel je pak závislý také na frekvenci. V určitém intervalu teplot, a také v určitém intervalu frekvencí, vzniká lokální maximum ztrátového činitele. Závislost na frekvenci je ale stále klesající. Pokud ztrátový činitel poukazuje na přítomnost polárních a iontových složek, tedy nečistot, je možné, že se olej zahřívá. Pokud takto transformátor sledujeme delší dobu a činitel se změnil náhle, znamená to, že mohlo dojít i k přeskoku. [1, str. 256-257]

2.9.3. Určení stavu izolace

Za pomoci naměřených výsledků můžeme určovat izolace kvalitní, navlhle a zestárlé. Dalšími možnostmi jsou kombinace těchto tří stavů. Každý stav se vyznačuje určitou závislostí $\text{tg } \delta$ na přiloženém napětí. Průběhy je možno vidět na obrázku 9.



Obrázek 9 - Průběh $\text{tg } \delta$ v závislosti na přiloženém napětí

Průběh 1 zde představuje izolaci kvalitní. Tento průběh můžeme naměřit u izolací, kde se nevyskytují částečné výboje.

Průběh 3 zaznamenáme také na kvalitní a suché izolaci. Ovšem zde se při zvyšování činitele začínají projevovat částečné výboje. Díky částečným výbojům rostou činné ztráty v izolantu a tím se zvyšuje ztrátový činitel. Křivka začíná stoupat až poté, co zkušební napětí dosáhne hodnoty, kterou norma [5] nazývá „počátečním napětím částečných výbojů“. Se snižováním zkušebního napětí činitel klesá po výše položené křivce a vrátí se na konstantní hodnotu při nižším napětí, které se nazývá „zhášecí napětí částečných výbojů“.

Průběh 2 koresponduje s izolací navlhlou. Již při malém přiloženém napětí jsou činné ztráty velké. Následně dochází k poklesu ztrátového činitele a to z důvodu iontů. „Ionty způsobující činné ztráty se rychle z izolantu odvádí, resp. se soustředí na hraniční ploše.“ [1, str. 222]

2.9.4. Průběh měření a měřící přístroje

Měření probíhá většinou za pomoci můstkové metody. Do měřícího zařízení je vsazen automatický můstek, který je v základu konstruován dle Scheringova můstku. Popřípadě jsou použity jeho varianty.

Zařízení je můstkovou metodou zkoušeno na více hladinách napětí. První hodnota bývá většinou $\frac{2}{10}$ jmenovitého napětí. Tato hodnota napětí je referenční a měla by být pod hranicí počátečního napětí částečných výbojů. Z přístrojů, po vyrovnání můstku, odečítáme přímo $\text{tg } \delta$ a také kapacitu měřeného zařízení. [2, str. 14]

Následně se zkouší střídavým napětím 10kV. Pokud nevyhovuje izolační napětí stroje, použije se menší zkušební napětí, a to hladiny 0,5; 1; 2; 5 kV. Důležité je zmínit, že používáme napětí vždy menší než je izolační hladina. Měření by mělo být prováděno při teplotě zařízení asi 20 °C, což by způsobilo delší odstávku zařízení. Pokud nenecháme zařízení vychladnout na tuto teplotu, je možné si naměřené hodnoty činitele přepočítat dle převodní tabulky, kterou je možno najít v [7]. [1, str. 223]

Dále je možné použít analyzátor dielektrických ztrát, který je také výpovědischopnější. Na vodorovnou osu osciloskopu je přivedeno napájecí napětí. Zatímco na horizontální osu je přiveden signál z můstkového detektoru. Na obrazovce se následně zobrazí obrazec q / U , kde q je náboj zachycených částečných výbojů. Tvar a velikost obrazců je závislý na výbojové činnosti v izolantu. Měření je sice výpovědischopnější, ale výsledek je určen z porovnání s předchozím měření a také zkušenostmi obsluhy. [2, str. 14]

2.9.5. Porovnání s ostatními diagnostickými metodami

Ohrožení vinutí průrazem u můstkové metody je hodnoceno jako malé ohrožení. Výpovědischopnost metody je ohodnocena jako vyšší či střední. Jako poslední se hodnotí kritérium přerušení provozu, které je hodnoceno jako menší. Je totiž nutné rozpojit vinutí a připojit k němu měřící přístroje. [2, str. 15]

Tato metoda se může s určitými omezeními praktikovat i v online formě měření. Musíme se omezit pouze na část transformátoru, kterou je průchodka. Autor článku [4] kontinuálně měřil kapacitu a $\text{tg } \delta$ průchodek transformátoru. Mohl tak pozorovat stárnutí této izolační části v čase. Podařilo se mu také zachytit defekt jedné z průchodek, kdy kontinuální měření zaznamenalo prudké zvýšení kapacity průchodky. Kapacita jakékoli izolační části transformátoru by se neměla po celou dobu životnosti izolantu měnit, obzvláště ne prudce.

V souboru s tímto měření se dále doporučuje provést měření izolačního odporu a polarizačního indexu [1, str. 226]. Tyto metody jsou rozebrány v předložené práci.

3. Metody měření částečných výbojů

Metoda částečných výbojů (dále jen ČV) se začíná více a více objevovat v energetických kruzích. Touto metodou se dají šetřit různá zařízení od vysokonapěťových kabelů až po transformátory.

Částečný výboj je druh výboje, při kterém se nepřeklene celá izolace. Vzniká pouze částečný průraz, který překlene pouze část izolace. Zbytek této izolace má ještě dostatečnou elektrickou pevnost na to, aby napěťové namáhání mezi vodiči vydržela. Obecně částečné výboje v izolačních systémech rozdělujeme na vnější a vnitřní. „Vnější částečné výboje se vyskytují nejčastěji na hranách nebo na malých poloměrech elektrod, které se nacházejí v plynném prostředí.“ [2, str. 36] Tento druh ČV ovšem nemá devastační účinek na izolační systém. Druhý druh, vnitřní, vznikají hlavně v plynech, které jsou obklopeny pevným či kapalným izolantem. Tyto výboje sice nejsou energeticky silné, ale jejich devastační účinek spočívá v neustálém opakování. [2]

Vnitřní ČV mají většinou elektro-erozivní účinky. Účinky mají za důsledek vytváření vodivých drah v pevném izolantu, které se při opakování výbojové činnosti stále prodlužují. Pokud stroj necháme v tuto chvíli v provozu, může dojít k průrazu. Dalším problémem jsou chemické účinky. „Obsahují-li dutinky kyslík, vytvářejí výboje v dutince ozon, který má intenzivní oxidační účinky.“ [2, str. 38] Pokud je teplota vysoká, vzniká kyselina dusičná, která reaguje s izolací a poškozuje ji. V poslední řadě jsou i tepelné účinky, které mohou způsobit lokální přehřátí izolantu, urychlovat celkové stárnutí a napomáhat tak předchozím zmíněným vlivům. [2]

3.1. Rozdělení metod pro částečné výboje

Metody měření částečných výbojů obecně rozdělujeme na metody globální a lokalizační. Globální metodou měření určíme, zda v zařízení vůbec částečné výboje vznikají, případně jaký mají zdánlivý náboj. Lokalizační metoda se používá poté, co se globální metodou zjistí přítomnost ČV. Tím se zjistí, kde se v zařízení ČV objevují. Dále můžeme metody rozdělit podle toho, zda je zařadíme do elektrických či neelektrických. Poslední rozdělení spočívá přímo v použité metodě, která vždy spadá pod přechozí kategorie. [2]

3.2. Neelektrické metody měření částečných výbojů

Jak již z názvu vyplývá, tyto metody nejsou se zařízením elektricky spojeny. Částečné výboje zde vyhodnocujeme na základě optických, zvukových a chemických důsledků. Používá se speciální přístrojová technika, která dokáže tyto jevy zaznamenat a kvantifikovat pro potřeby diagnostiky. [2]

3.2.1. Optická detekce

Pro optickou detekci používáme fotonásobiče, přístroje pro noční vidění a termovize. Při vzniku ČV se emituje do okolí světelné záření a teplo. Záření může být jak viditelného, tak ultrafialového spektra. Detekce je v praxi velmi obtížná pro normální aplikace. Všechny tyto metody jsou hlavně lokalizační. [2] [1]

3.2.2. Akustická detekce

Akustická detekce používá hlavně směrové mikrofony a jiné akustické detektory pro zachycení akustického projevu ČV. Tyto projevy mohou být buď ve slyšitelném či neslyšitelném pásmu. Většina projevu ČV je ovšem v ultrazvukovém pásmu, proto jsou používány ultrazvukové mikrofony se zesilovačem. Mikrofony se připevňují na vnějšík olejové nádoby. [2]

Tato metoda je obzvláště vhodná pro lokalizaci ČV. Na základě rozmístění mikrofonů a zpoždění zvuku v jednotlivých měřicích bodech, můžeme vypočítat přesné místo vzniku akustické vlny. ČV tak můžeme sledovat i za provozu, kdy nás neomezuje velké elektromagnetické rušení. Metoda se také může používat na dlouhodobé sledování zařízení. [2]

3.2.3. Chemická detekce

Poslední uváděnou neelektrickou metodou je metoda chemické detekce. ČV můžeme detekovat za pomoci produktů rozkladu rozpuštěných v plynech nebo oleji testovaného zařízení. Metoda je omezená hlavně časem, po který je zařízení vystavováno ČV. Pokud v zařízení ČV teprve začínají, na vzorku oleje nebo plynu nic nepoznáme. Z toho vyplývá, že jde hlavně o metodu globální. [2]

Základem metody je plynová chromatografie, kdy zjišťujeme plynné látky rozpuštěné v oleji. Dokáže zjistit hodnoty pohybující se v ppm, tedy část na miliontinu objemu. Další výhodou metody je, že elektromagnetické rušení na ni nemá vliv. [2]

3.3. Elektrické metody pro měření částečných výbojů

Velkou a jednou z nejpoužívanějších skupin pro detekci ČV jsou právě elektrické metody. Velkou výhodou je dobrá kvantifikovatelnost a citlivost. Do těchto metod spadá již zmíněná metoda ztrátového činitele, která dokáže zachytit vliv částečných výbojů právě na činitel $\tan \delta$. [2]

Metoda funguje na principu snímání malých a krátkých proudových impulzů v napájecí síti. „Impulzy částečných výbojů v izolantech mají dobu čela T_1 (doba do maxima) několik ns a dobu půltýlu T_2 (doba do poklesu na poloviční hodnotu) několik desítek ns. Impulzy částečných výbojů v kapalných izolantech jsou delší, dobu čela T_1 mají okolo 1 μs a dobu půltýlu několik μs .“ Protože měřicí přístroje jsou většinou digitální snímače, může se nám stát, stejně jako u osciloskopu, že signál podvzorkujeme. Následně stačí změnit frekvenci měření a ČV se objeví. [2]

Dalším rozdělením, které u elektrických metod můžeme zaznamenat, je podle šířky pásma měření. Zde se metody rozdělují na Úzkopásmové a Širokopásmové. Úzkopásmové měřicí přístroje mají výhodu v eliminaci rušení. Šířka pásma Δf se zde pohybuje okolo 10 kHz. Přístroje se dále hodí na zjišťování rezonančních míst v měřicím či testovacím obvodu. Norma [5] doporučuje pro úzkopásmové přístroje používat intervaly šířky pásma od 9 kHz do 30 kHz. Také doporučuje používat mezní frekvenci od 50 kHz do 1 MHz. [2]

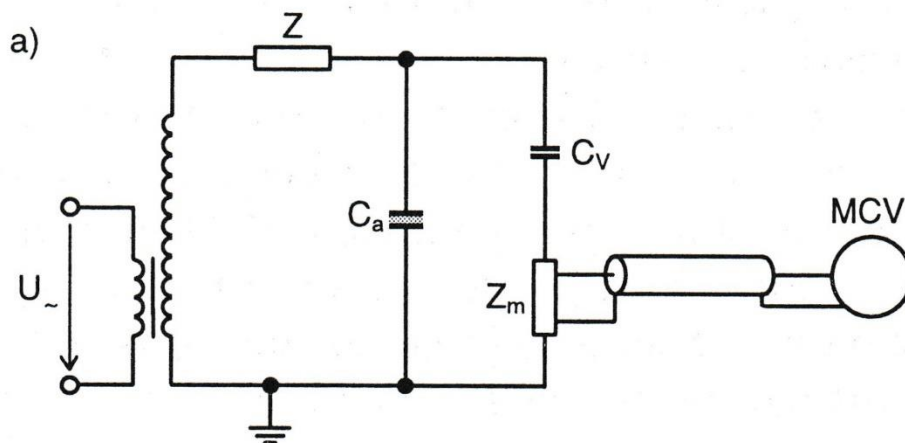
Širokopásmové přístroje dokážou rozeznat jednotlivé ČV. Zároveň určují i jejich polaritu. Dolní frekvence f_1 pro měření se pohybuje okolo desítek kHz. Horní frekvence f_2 je několik stovek kHz. Hodnotu zdánlivého náboje určují pomocí časové integrace proudového impulsu. Norma [5] doporučuje pro širokopásmové přístroje používat intervaly dolní frekvence f_1 od 30 kHz do 100 kHz. Horní interval frekvence f_2 do 500 kHz a šířku pásma Δf od 100 kHz do 400 kHz. [2]

3.3.1. Galvanická metoda měření částečných výbojů

Galvanická metoda je jednou z nejmodernějších metod pro detekci ČV. Používá se pro sledování stavu izolace u zařízení pro vysoká a velmi vysoká napětí. Metoda se řadí ke globálním metodám měření ČV. Je založena na přímém sledování impulzů částečných výbojů. Proudové impulzy, které vnikají při projevu ČV, musí být vhodně odděleny

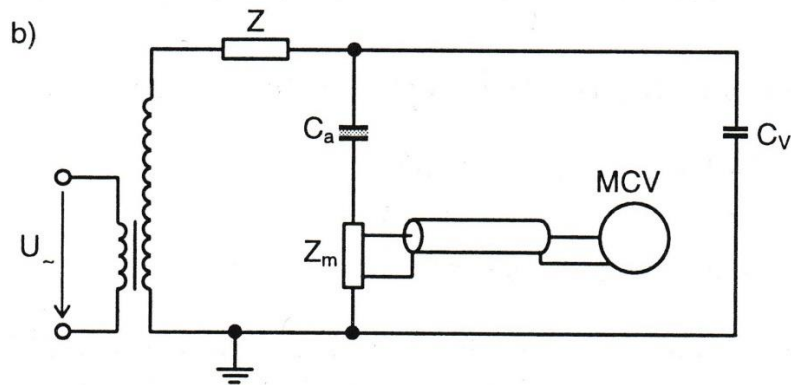
od napájení. Používá se tedy měřicí impedance, která je často řešena RLC členem. Slouží zde jako nízkofrekvenční propust. Vývod od impedance k měřiči je realizován pomocí stíněného koaxiálního kabelu. [2]

Paralelně s testovaným objektem se kromě impedance zapojuje vazební kondenzátor. Tato modifikace umožňuje napěťové snímání proudových impulzů. Další výhodou zapojení je možnost měření na uzemněném objektu. To se vyplatí vždy, když nelze odzemnit vývod. Pokud má měřený objekt velkou kapacitu, je toto zapojení také vhodné. Vazební kondenzátor by neměl vykazovat významnou výbojovou činnost v celém rozsahu měřicího napětí. Schéma zapojení můžeme vidět na obrázku 10. [2] [1]



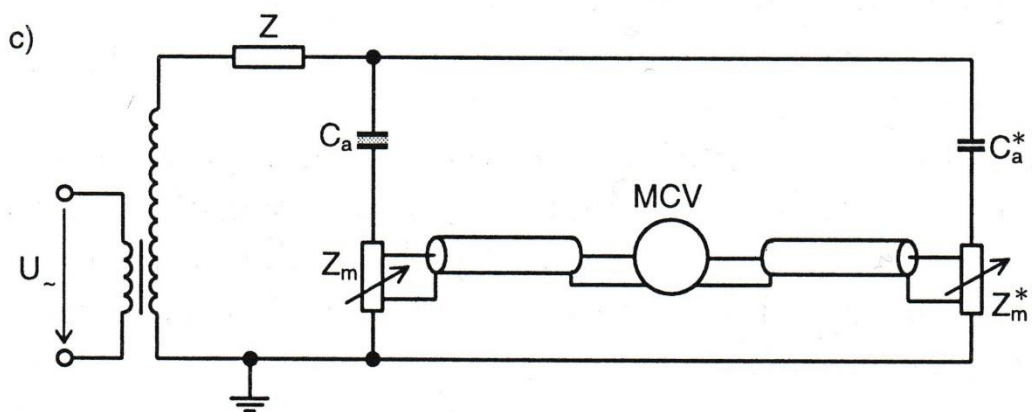
Obrázek 10 - Zapojení měřicí impedance za vazební kondenzátor [2, str. 68]

Další možností je zapojit měřicí impedanci přímo do větve s měřeným objektem. Toto zapojení ovšem předpokládá možnost odzemnění objektu. V tomto obvodu nemusí být řazen vazební kondenzátor, a to za podmínky, že rozptylová kapacita obvodu k zemi je větší než kapacita testovaného zařízení. Tato podmínka je většinou splněna u objektů, které jsou velikostně malé. Zapojení můžeme vidět na obrázku 11. [2]



Obrázek 11 - Zapojení měřící impedance za testované zařízení [2, str. 68]

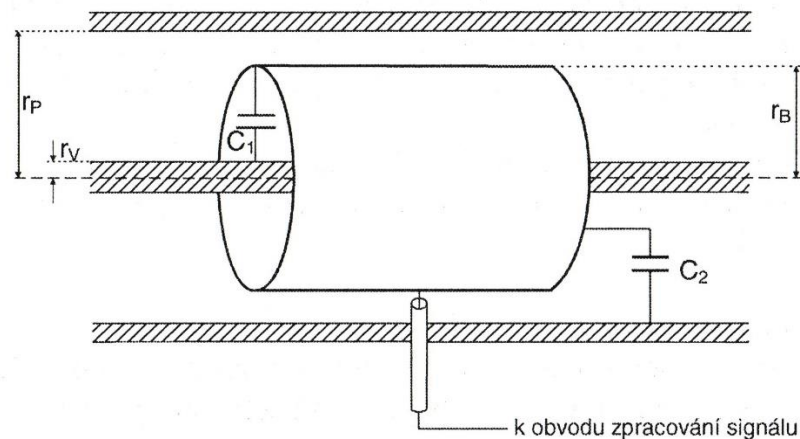
Poslední zapojení pro měření galvanickou metodou může vypadat tak, že měřící impedance jsou jak ve větvi měřeného objektu, tak ve větvi vazebního kondenzátoru. Toto zapojení má výhodu v odrušení, proto se často používá pro provozní (online) měření. Jako vazební kondenzátor, který je na obrázku 12 značen C_a^* , můžeme použít speciální kondenzátor, který by měl mít hodnotu kapacity blízkou hodnotě kapacity měřeného zařízení. Tomuto zapojení se také říká můstkové zapojení. Název vyplývá z možnosti vyrovnat měřící impedance. Pokud jsou na obou stranách impedance vyrovnány, měření je zcela bez rušení. [2]



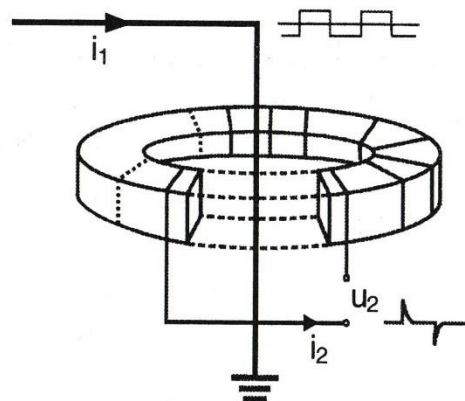
Obrázek 12 - Zapojení nastavitelné měřící impedance do obou větví [2, str. 68]

3.3.2. Kapacitní a induktivní snímače

Sondy se používají pouze jako indikátory vzniku ČV, protože při vytvoření ČV vzniká vysokofrekvenční energie, která je tvořena dvěma složkami, a to složkou elektrickou a magnetickou. Sondy podle zachytávané energie dělíme na kapacitní a induktivní. Největší využití nachází právě při měření online. Nemusíme zde řešit ochranu měřicího systému před přepětím. Také nevyžadují použití měřicí impedance. Velkou nevýhodou je špatná kvantifikace výsledků. Kalibrační křivky nejsou totiž lineární, tudíž z nich velmi špatně zaznamenáváme hodnoty. [2]



Obrázek 13 - Kapacitní sonda [2, str. 77]



Obrázek 14 - Induktivní sonda [2, str. 78]

4. Měření částečných výbojů

Cílem měření částečných výbojů bylo zhodnocení a odhadnutí stavu výkonového transformátoru použitého pro trakční účely. Na základě tohoto měření určit případně velmi hrubě místo, kde mohou ČV vznikat a jaké to má důsledky pro provozované zařízení. Sekundárním cílem bylo naučit se s měřicím přístrojem od společnosti Omicron, která má stálou a dlouholetou zkušenost při diagnostice energetických zařízení. Software pro jednotlivá zařízení je dostupný přímo z jejich webových stránek, ovšem až po uživatelské registraci a následným ověřením, že nějaký jejich produkt používáte.

4.1. Popis měřícího zařízení

Společnost Omicron dodává zařízení, která fungují na principu elektrické ale i neelektrické metody měření částečných výbojů. Mým měřicím zařízením byla celá sestava Omicronu MPD800, který měří na základě elektrické galvanické metody. Celý systém se skládá z 5 malých modulů, jejichž popis je v této práci také předložen. Poslední kus dodaný s aparaturou je samotný vazební kondenzátor.

4.1.1. MPD800

Toto zařízení je hlavním mozkiem celé měřící aparatury. V materiálech Omicronu [13] ji nazývají jako snímací jednotku. Zpracovává signály, měří proudové, respektive napěťové, impulzy a dokáže je oddělit od frekvence zdroje. Do tohoto přístroje lze nahrávat i svoje vlastní přednastavení pro různá měření. V základu je do přístroje nahráno asi 6 základních nastavení. Mezi nimi je i třífázový transformátor nebo vysokonapěťový kabel.



Obrázek 15 - Omicron MPD 800 [13]

Jednotka je osazena konektory pro optické spojení s řídicí jednotkou, případně pro spojení s jinými snímacími jednotkami. Při měření je napájena z battery packu, který je v měřicí sadě také přiložen. Jednotka má na vstupu 2 kanály. Každý z nich je složen z BNC konektorů AC a PD. Na zařízení také najdeme optický výstup TRIGGER, který slouží pro připojení jiných zařízení, které toto spojení potřebují. Pokud k této jednotce nepřipojíme externí kvadrupól (jednotku CPL1), je třeba aktivovat ten vnitřní. Vstup AC v tu chvíli vůbec nezapojujeme. Vstup PD zapojíme přímo na nenapájenou stranu vazebního kondenzátoru nebo na kondenzátorovou průchodku. [13]

4.1.2. MCU2

Je to řídicí jednotka, která může spojit více zařízení MPD800 dohromady. Zpracovává optické signály generované MPD800. Zařízení umožňuje připojení i starší verze snímací jednotky, a to MPD600. Hlavním účelem je oddělení vysokonapěťové strany od měřícího pracoviště, které se realizuje právě optickým spojením. Na jednotce najdeme konektor USB, který slouží pro připojení PC. Výrobce upozorňuje na fakt, že pro plnou funkci MCU2 je nutno použít USB portu minimálně 3.0. [13]



Obrázek 16 - Omicron MCU2 [13]

4.1.3. CPL1

Jednotka je výrobcem nazývána jak externí kvadrupól. Připojuje se přímo k jednotce MPD800. Můžeme na ni najít 2 BNC výstupy, příhodně pojmenované jako PD a AC. Na vstupní straně můžeme najít uzemňovací křídlovou matici. Pokud MPD800 použijeme v kombinaci s CPL1, nemusíme snímací jednotku uzemňovat. Dále se zde nachází 2 banánkové svorky IN a GND.

Svorka GND by se měla propojit s uzemňovací svorkou. Druhá svorka IN se připojuje buď na nenapájenou stranu vazebního kondenzátoru nebo na kondenzátorovou průchodku. [13]



Obrázek 17 - Omicron CPL1 [13]

4.1.4. CAL 542

Toto zařízení slouží pro kalibraci snímací jednotky. Na svorky zkoušeného objektu generuje výboj o určitém náboji. Hodnotu a polaritu generovaného výboje lze nastavit pomocí dvou tlačítek, které jsou umístěné na přístroji. Dále se na jednotce nachází displej, který zobrazuje navolenou hodnotu výboje v pC. Hodnoty lze nastavit na 1, 5, 10, 15, 50 a 100 pC. Tyto hodnoty mohou být nastaveny i se znaménkem minus. [13]



Obrázek 18 - Omicron CAL 542 [14]

4.1.5. RBP1

Dobíjecí battery pack RBP1 slouží pro napájení snímací jednotky MPD800. Na jednotce se nachází 2 speciální konektory INPUT, který je označen modře a OUTPUT, který je značen červeně. Dále se na krabičce nachází displej, který nás informuje o stavu nabití baterie.[13]



Obrázek 19 - Omicron RBP1 [13]

4.1.6. Vazební kondenzátor

Posledním zařízením, které bylo dodáno, je vazební kondenzátor. Kondenzátor má jmenovité napětí 17 kV a kapacitu 2 nF. Z tohoto kondenzátoru snímací zařízení měří napěťové pulzy.

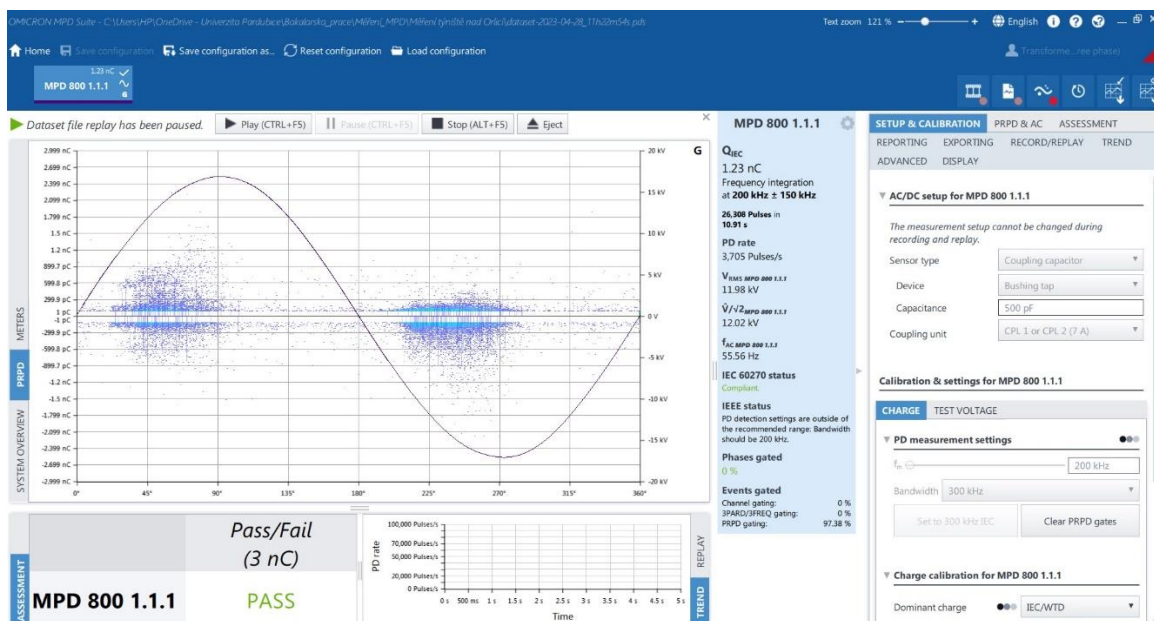


Obrázek 20 - Vysokonapěťový vazební kondenzátor

4.2. Software k měřicímu zařízení

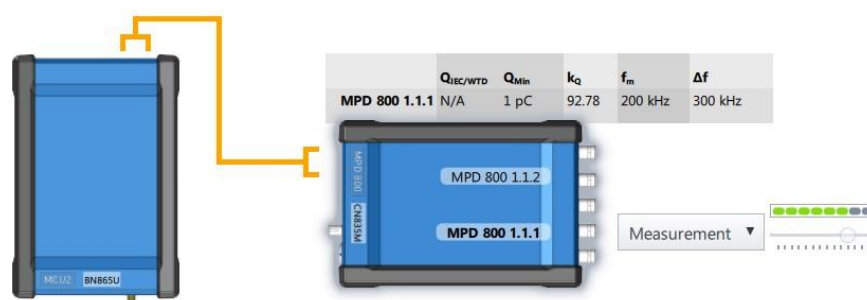
Software k celému měřicímu aparátu je dodáván buď na CD nebo si ho lze stáhnout po registraci přímo na stránkách Omicronu [13], kde lze také najít různé návody, technické listy apod. Software nese název MPD Suite.

Vždy při spuštění softwaru se nejdříve objeví úvodní obrazovka. Pokud máme připojenou jednotku MCU2 a zároveň MPD800, nabídne se nám zvolení uživatelského profilu. Tím si určíme, jak bude naše rozložení oken v softwaru vypadat a zároveň jaké veličiny a grafy budeme moct sledovat. Mým zvoleným profilem byl vždy 3fázový transformátor.



Obrázek 21 - Screenshot programu při měření ČV

Pro profil 3fázového transformátoru máme možnost sledovat zachycení ČV, kdy snímací přístroj určuje i jejich polohu vůči napájecí křivce napětí. Dále můžeme sledovat „analogové“ přístroje, kde jsou zobrazeny veličiny, které si navolíme. Ručičky těchto přístrojů se hýbou v reálném čase přímo při měření. Poslední levou záložkou je přehled měřícího systému. V této záložce jsou zobrazeny připojené jednotky, které mezi sebou komunikují. Přehled zapojení se může velmi rozrůst, protože pokud bychom měli více MPD800, mohli bychom měřit najednou na všech 3 fázích transformátoru. Záložka „system overview“ je na obrázku 22.



Obrázek 22 - Záložka system overview v softwaru MPD Suite

V programu jsou záložky také na pravé straně. První záložkou je nastavení a kalibrace. Zde říkáme, čím částečné výboje měříme. Zda používáme vazební kondenzátor, a také jestli

je MPD800 napojena přímo na kondenzátor, nebo zda je připojena přes CPL1. Následně softwaru určíme i kapacitu kondenzátoru, nebo průchodky.

Pod touto záložkou se také nachází nastavení frekvence měření. Měníme šířku pásma měření a také mezní frekvenci. Po zvolení těchto parametrů přichází na řadu kalibrování, kdy do obvodu pouštíme určitý náboj pomocí CAL 542. Tento náboj je měřen snímacím zařízením, ovšem na PRPD grafu se nezobrazuje v té velikosti jako doopravdy je. Stačí tedy zadat hodnotu kalibračního náboje a software vypočítá kalibrační konstantu, kterou tyto pulzy násobí. Následně můžeme vidět stejnou hodnotu náboje, kterou posíláme do obvodu za pomocí kalibrátoru.

Posledním nastavením na této záložce je testovací napětí. Aby měření napětí probíhalo správně, určuje se také přepočítávací konstanta. Při začátku měření, poté, co je na obvod přiloženo napětí, stačí zadat hodnotu, kterou zkoušíme a software znovu tuto konstantu vypočítá.

Na záložce PRPD & AC můžeme měnit velikost osy náboje ČV. V programu lze měnit i zobrazení osy, kdy máme 4 možnosti. Osa se může zobrazovat unipolárně nebo bipolárně. V kombinaci s přechodným nastavením si následně můžeme měnit osu lineární či logaritmickou. Z této záložky lze spouštět nahrávání ČV. Toto nahrávání vykresluje zaznamenané ČV, ale i rušení, vždy jako tečku v grafu. Lze nastavit i čas, po který se bude nahrávat.

Assesment neboli zhodnocení slouží pro výstup do protokolu. Podle normy [5] by měla technická komise měření stanovit i maximální hodnoty zdánlivého náboje částečného výboje. Na této záložce je poté možno nastavit hranice, které si má software hlídat a už při měření vyhodnocovat, zda určené parametry byly v rámci této hranice, či zda již byly za ní.

Nad těmito záložkami se nachází ikony, které slouží pro zaznamenání měření. Ikona filmové pásky nahrává celé měření. Nejspíše si loguje všechny částečné výboje, které po dobu měření vznikly. Ukládá si také celé nastavení měření. Tento záznam lze spustit například pro vyhodnocovací komisi.

Ikona papíru s křivkou slouží pro záznam do protokolu. Při spuštění se ukládají všechny vzniklé ČV numericky. Celý protokol si poté můžeme měnit tak, aby vyhovoval našim požadavkům. Poslední důležitá ikona je křivka s tečkami. Ta slouží pouze jako zaznamenání ČV na křivce PRPD, kde se při vzniku ČV, či rušení, objeví tečka.

4.3. Testovaný transformátor

Pro testovaný transformátor, se jmenovitými hodnotami v tabulce 1, bylo za úkol změřit částečné výboje v oleji. Tento transformátor je v provozu střídavě se stejným transformátorem. Toto střídání ovšem není zcela pravidelné. Stáří transformátoru jsou aktuálně 3 roky.

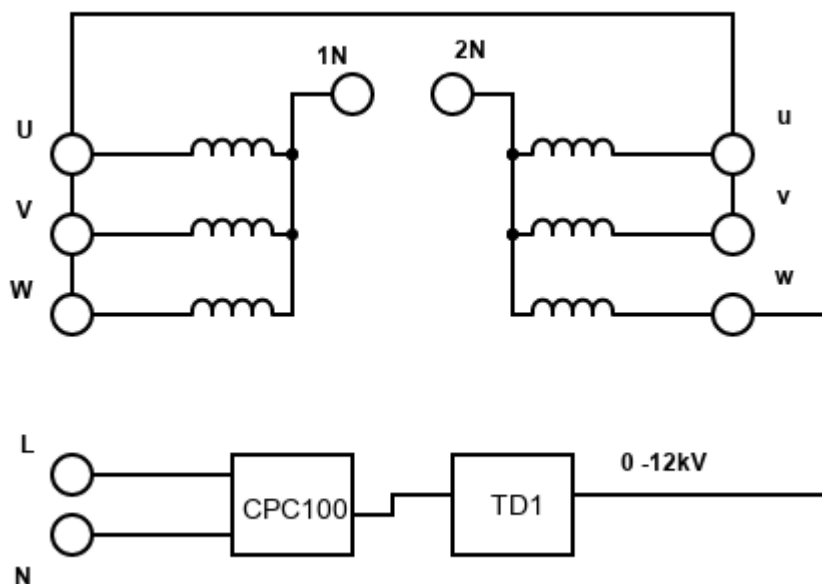
Tabulka 1 - šítkové hodnoty transformátoru VVN

Jmenovitý výkon [kVA]	
VVN 110 kV	16000
VN 23 kV	16000
TN 6,3 kV	5333
Jmenovitý převod [kV]	
110 $\pm 8 \cdot 2$ % / 23 / 6,3	
Zapojení	
YNyn0+d1	

4.4. Schémata měření

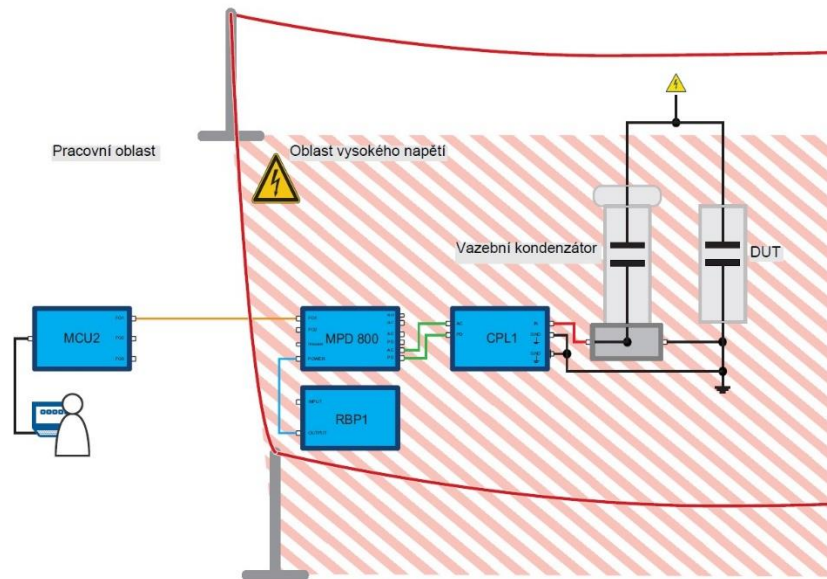
Schéma pro silovou část, na obrázku 23, neobsahuje terciální vinutí transformátoru, které bylo při měření odpojené. Pro zjednodušení schématu nebyl nakreslen přepínač odboček, který se nachází na primárním vinutí transformátoru. Nádoba při měření zůstala uzemněná. Přístroje CPC 100 a TD1 jsou uzemněny. Transformátor byl odpojen od přípojníc na obou stranách.

Přístroje CPC100 a TD1 slouží pro generování sinusového napětí. Hodnota napětí je volitelná a nastavuje se na CPC100. Maximální hodnota je 12 kV. Propojením fází U, V, W, u, v jsme dosáhli toho, že fáze jsou na stejném potenciálu. Při měření nebyly uzemněny.



Obrázek 23 - VN část měření

Pro NN část měření byla použita průchodka transformátoru fáze w jako vazební kondenzátor. Průchodka se omotá ocelovým páskem, provedení je na obrázku 25. Ten se vodivě spojí se svorkou IN v jednotce CPL1. Na schématu je dále DUT, jakožto testované zařízení. Zde si můžeme jeden pól naznačeného kondenzátoru přestavit jako napájené vinutí fáze w. Druhý pól byla nádoba a olej v ní. Tímto zapojením jsme dosáhli toho, že ČV jsou měřeny mezi vinutím w a olejem, resp. nádobou. Zapojení lze vidět na obrázku 24.

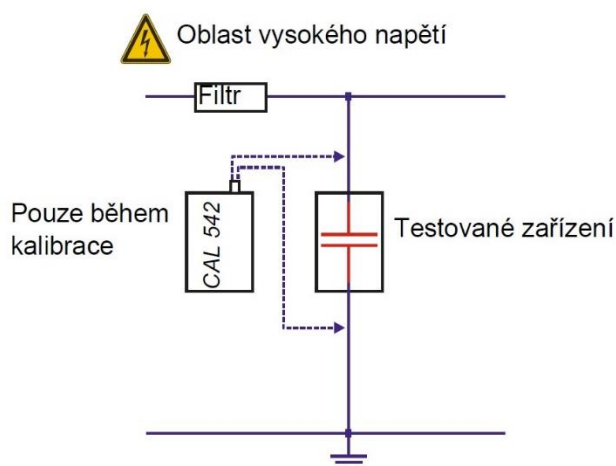


Obrázek 24 - Zapojení měřícího aparátu k transformátoru [13]



Obrázek 25 - Průchodka omotaná páskem

Posledním krokem před začátkem měření je kalibrace hodnoty zdánlivého náboje impulzu ČV [5]. Kalibrační konstanta je zcela nepochybně závislá na druhu připojení měřícího obvodu k zařízení. Další závislostí bude i kapacita případného vazebního kondenzátoru a jiné. Kalibrátor se připojuje přímo na svorky měřeného zařízení. V případě našeho měření byl připojen na fázi w a k nádobě. Před začátkem VN měření se kalibrátor musí odpojit. Schéma doporučeného zapojení je na obrázku 26.



Obrázek 26 - Schéma připojení kalibrátoru [13]

4.5. Průběh měření

Po kalibraci hodnoty zdánlivého náboje můžeme začít s vlastním měřením ČV. Autor [2] doporučuje zvyšovat napětí zdroje po $0,1 U_n$. V měření bylo napětí nejdříve postupně zvyšováno po kroku 2,2 kV, protože měření probíhalo na straně 22 kV. V softwaru sledujeme, zda se ČV začnou projevovat. Nejdříve vidíme pouze rušení, které je většinou dost malé. Na každém bodě měření napětí je důležité chvíli vydržet. Snímací jednotka se totiž synchronizuje s napětím v obvodu a až následně začne ukazovat hodnoty impulzů ČV. Poté, co spatříme v softwaru ČV, zaznamenáme si interval hodnot napětí, při kterém ČV vznikly. Tento interval se nazývá zápalné napětí ČV [2].

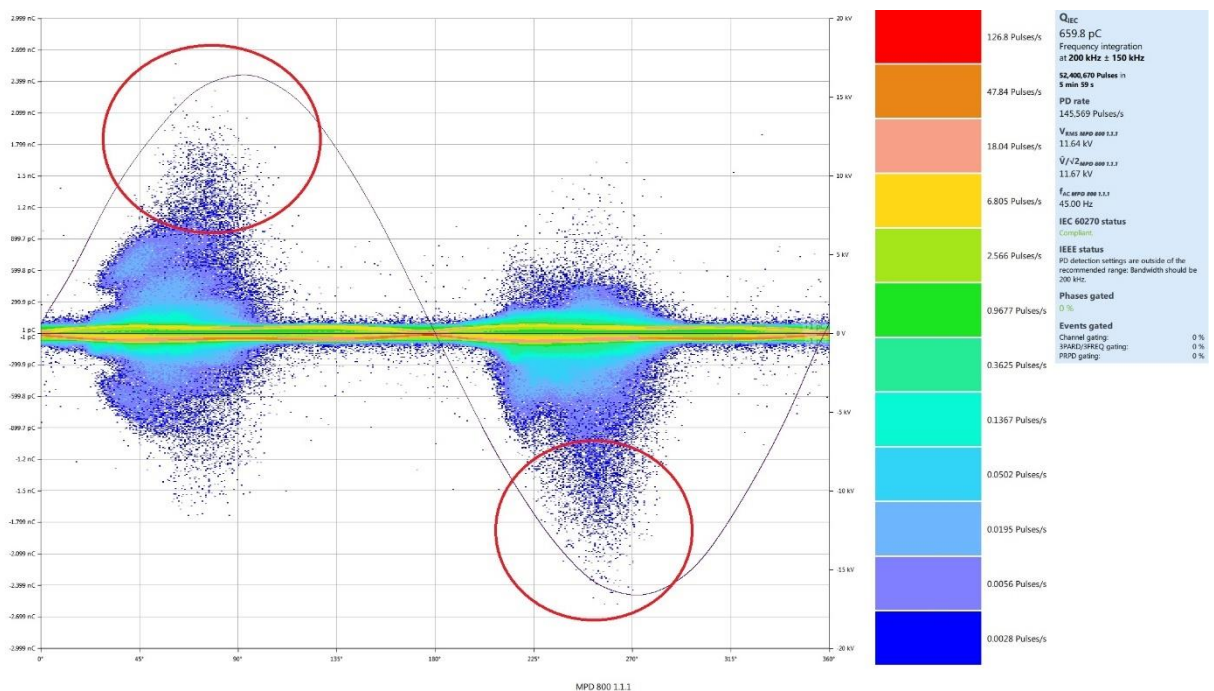
Dále se doporučuje zvýšit napětí na největší hodnotu, kterou můžeme při měření použít. Zde jsem byl omezen zdrojem, který dodával maximální napětí o hodnotě 12 kV. Toto maximální napětí se nechá na stroji působit asi 30 minut. Tento proces se aplikuje právě pro snížení vlivu zahořování, při kterém také dochází ke vzniku ČV. Zahořování by mohlo ovlivnit výsledek měření. [2]

Po 30 minutách zahořování máme mnoho možností, jak pokračovat. Norma [5] má doporučení, kdy po zahořování je dobré snížit napětí a měřit tak při menším napětím, než při kterém bylo zahořováno. Toto doporučení jsem ovšem nerespektoval a ČV měřil na 12 kV. Moje rozhodnutí plyne z faktu, že 12 kV je cca pouze polovina provozního napětí. Omicron [13] doporučuje při offline měření udělat sérii s menší šířkou pásma, a to 300 kHz.

Následně si na každé měření změním střední frekvenci. Začínáme na 250 kHz a zvyšujeme na 500 kHz. Další měření provádíme pro střední frekvenci 1, 2, 3, a 5 MHz. Naše měření bylo pouze testovací s tím, že jsme chtěli odhalit, zda v zařízení vůbec nějaké ČV vznikají. Šířka pásma byla nastavena na 300 kHz. Střední frekvence na 200 kHz. Nastavení bylo použito ze znalosti o délkách pulzů v kapalném dielektriku, o kterých se tato práce také zmiňuje. ČV byly měřeny 6 minut.

4.6. Naměřené hodnoty

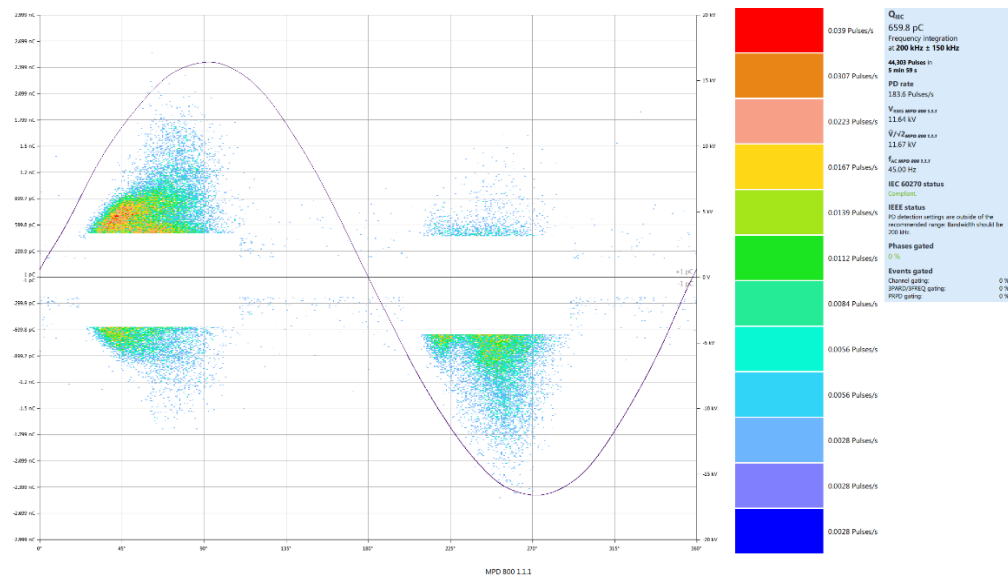
Na obrázku 27 můžeme vidět výsledek měření. Graf PRPD zobrazuje četnost ČV, jejich zdánlivý náboj a polohu vůči sinusovému napájecímu napětí. Tento graf není zproštěn od rušení. Toho si lze všimnout hlavně v blízkosti vodorovné osy, kde je ČV, respektive rušení, zaznamenáno mnoho. Toto rušení lze skrýt za pomocí funkce GATE. Do grafu se přímo nakreslí šedá zóna. Uživatel může měnit její velikost. Můžeme si dokonce určit více těchto zón.



Obrázek 27 - Čistá data z měření s vyznačenými oblastmi ČV

4.7. Vyhodnocení naměřených výsledků

Abychom mohli lépe vyhodnocovat četnost ČV, označíme si za pomocí funkce GATE celé pásmo rušení. Navíc si označíme sytě modré oblasti, které jsou také pouze rušení.



Obrázek 28 - graf PRPD po částečném odstranění šumu

Po částečném odstranění šumu na grafu zůstaly pouze 2 výrazné oblasti. Tyto oblasti nejspíše také obsahují šum, ovšem nad těmito oblastmi to již šum nejspíše není. Jedná se tedy s jistotou pravděpodobností o ČV.

Maximální hodnota zdánlivého náboje je zde cca 2,5 nC. Tento náboj je víceméně v přípustných hodnotách. Náboj je trochu vyšší než obvykle, obzvláště u transformátoru, který je starý 3 roky. S touto vyšší hodnotou se pojí i další doporučení. Na transformátoru by se mělo provádět globální měření ČV jednou za rok. Dalším doporučením je použití lokalizační metody pro určení přesného místa vzniku ČV. [2]

Osobně bych navíc doporučil metodu tg δ , aby se potvrdily ztráty při výbojové činnosti.

ČV vznikají v transformátoru vždy, když napájecí napětí stoupá. To platí jak pro kladnou, tak zápornou půlvlnu. Pulzy jsou navíc v obou půlperiodách stejně velké. Tato výbojová činnost značí buď dutinku v pevném izolantu nebo vzduchovou dutinku v kapalném izolantu. Pro náš případ platí spíše dutinka v kapalném izolantu, protože měření bylo prováděno mezi vinutím a nádobou. V oleji jsou tedy plynové bublinky, případně nečistoty, které také snižují jeho elektrickou pevnost. Z výsledků také vychází, že se může jednat o klouzavý výboj na povrchu pevného izolantu, případně o „ČV mezi dvěma neuzemněnými kovovými částmi (např. mezi dvěma kovovými polepy kondenzátorové průchodky“ [2, str. 54]. [2]

Závěr

Byl zpracován seznam převážně kusových zkoušek transformátorů při výstupní kontrole z výroby. Předpokládá se, že se seznam v následujících letech rozšíří právě o měření částečných výbojů. Toto rozšíření by znamenalo možnost porovnat aktuální stav transformátoru pomocí komparační metody se stavem hned po výrobě.

Měření, za pomoci měřicí soustavy Omicron, je samo o sobě velmi jednoduché. Pokud se ale podíváme na vyhodnocování, je tato metoda velmi náročná. Právě k vyhodnocování je dobré, aby měl pracovník zkušenosti v této oblasti. Vyhodnocování ČV v této práci probíhalo za pomoci knihy. Kniha velmi dobře popsala stavy, které se při měření v transformátorovém oleji objevily. Určitě by bylo vhodné výsledky konzultovat s odborníkem v oboru. Dále je velmi náročné určit šířky pásma a frekvence, na kterých se mají ČV měřit. Pro začátečníky se doporučuje vždy změřit široký rozsah frekvencí. Ovšem nejen pro začátečníky, ale vždy i u transformátoru, kdy nemáme žádné výsledky z předchozích měření.

Dalším doporučením je i použití jiné metody, která globálně odhalí výbojovou činnost, respektive její důsledek. Pro takovéto určení je vhodná právě metoda $tg \delta$. Ta bude na tomto měřeném transformátoru ve velmi krátkém čase provedena. Z uvedeného vyplývá, že výsledek této metody není zatím zcela potvrzen. V závěru se pouze domníváme, že popsané jevy se v transformátoru opravdu dějí. Dle naměřených výsledků četnost a velikost ČV neodpovídá oleji, který je starý 3 roky.

Tato metoda by dále mohla být velmi dobře využita na zjištění ČV mezi dvěma vinutími transformátoru. Zkoumání by se mohlo věnovat vlivu špatného izolačního oleje na četnost a velikost ČV mezi primární a sekundární stranou transformátoru. Jako další bod zkoumání by mohlo být právě vyhodnocení komparační metody a přesné určení dějů v transformátoru. V neposlední řadě by se také mohlo věnovat výzkumu lokalizačních metod a určení jejich možností použití.

Zdroje

- [1] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Vyd.1. Praha: Academia, 2005. Česká matice technická. ISBN 80-200-1358-X.
- [3] What is Tan Delta Test: Its Principle and Modes. *Elcoprus* [online]. [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.elprocus.com/what-is-tan-delta-test-its-principle-and-modes/>
- [4] Experience with Online Monitoring of Capacitance and Tangent Delta of Condensive Bushings. *Treetech* [online]. [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.treetech.com.br/en/experience-with-online-monitoring-of-capacitance-and-tangent-delta-of-condensive-bushings/>
- [5] ČSN EN 60270. *Technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2001.
- [6] ČSN EN IEC 62631-2-1. *Dielektrické a izolační vlastnosti pevných elektroizolačních materiálů - Část2-1: Relativní permitivita a ztrátový činitel - Technické frekvence (0,1 Hz až 10 MHz), střídavé metody*. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [7] IEEE C57.12.90-2015. *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. New York: IEEE STANDARDS ASSOCIATION, 2015.
- [8] BAREŠ, Miloš. *Elektrotechnické měření*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2006. ISBN 80-7194-910-8.
- [9] ČSN EN 60076-3. *Výkonové transformátory - Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti*. Ed 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [10] *Stanovení vody*. Univerzita Pardubice, 2009. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, fakulta chemicko-technologická.
- [11] ČSN EN 60422. *Minerální izolační oleje v elektrických zařízeních - Návod pro kontrolu a údržbu*. Ed. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [12] ČSN EN 60156. *Izolační kapaliny - Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [13] Dokumenty Omicron k testovacím zařízením [online] [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.omicronenergy.com/>
- [14] *Obchod PROTEC: Omicron CAL 542 Charge Calibrator* [online]. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://protecequip.com/products/omicron-cal-542-charge-calibrator>

- [15] MAJLING, Eduard. Transformátor - základní vlastnosti a dělení. *O energetice.cz* [online]. 5. dubna 2015 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni>
- [16] *Elektronická učebnice ELUC* [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/>
- [17] ROZMILER, Jiří. *Návrh kontinuálního monitorovacího systému výkonového transformátoru*. České Budějovice, 2010. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.
- [18] HZS Praha a Milan PACLÍK. V Praze vybuchla trafostanice, třetina města byla bez proudu. In: *Aktuálně.cz* [online]. 19.6.2013 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/regiony/praha/v-praze-vybuchla-trafostanice-tretina-mesta-byla-bez-proudu/r~27ebc266d91511e284450025900fea04/>

Seznam vzorců

- (1) $R_{20} = R_{\theta XS} * \frac{235+20}{235+\theta_x}$; $R_{\theta XS}$ je odpor měděného vinutí při teplotě okolí [Ω] [8]
- (2) $R_{20} = R_{\theta XS} * \frac{245+20}{245+\theta_x}$; $R_{\theta XS}$ je odpor hliníkového při teplotě okolí [Ω] [8]
- (3) $p_{i1} = i_{15}/i_{60}$; i_{15} a i_{60} jsou proudy po 15 a 60 s od začátku měření [A] [1]
- (4) $I_{max} = 2 * \sqrt{2 * I_0}$; I_0 je jmenovitý proud vinutí [A] [1]
- (5) $R_f = \frac{1}{6} * (R_{UV} + R_{UW} + R_{VW})$; R_{xx} jsou odpory mezi jednotlivými vinutími [Ω] [1]
- (6) $S_1 = 3 * U_1 * I_1$; U_1 je fázové napětí [V]; I_1 je fázový proud [A] [1]
- (7) $\cos \varphi_{10} = \frac{P_1}{S_1}$; P_1 je činný výkon [kW]; S_1 je zdánlivý výkon [kVA] [1]
- (8) $U_{10} = \frac{1}{3} * (U_{UV0} + U_{VW0} + U_{UV0})$; U_{xx0} jsou napětí mezi fázemi [V] [1]
- (9) $I_{10} = \frac{1}{3} * (I_U + I_V + I_W)$; I_x jsou fázové proudy [A] [1]
- (10) $I_N = \frac{S}{\sqrt{3} * U_{sn} * 10^3}$; S je zdánlivý výkon [kVA]; U_{sn} je sdružené napětí [V] [8]
- (11) $U_K = \frac{U_{UV} + U_{UW} + U_{VW}}{3}$; U_{xx} jsou napětí mezi fázemi [V] [8]
- (12) $u_k = \frac{U_K}{U_0} * 100\%$; U_k je napětí nakrátko [V]; U_0 je jmenovité napětí [V] [8]
- (13) $P_k = P_k - P_U = P_k - \frac{U_k^2}{R_N}$; P_k je naměřený výkon [W]; P_U je výkon wattmetru [W];
 U_k je napětí nakrátko [V]; R_N je odpor wattmetru [Ω]; [8]
- (14) $I_K = \frac{I_U + I_V + I_W}{3}$; I_x jsou fázové proudy [A] [8]
- (15) $p_u = \frac{U_{10}}{U_{20}}$; U_{10} je napětí primárního vinutí [V];
 U_{20} napětí sekundárního vinutí [V] [1]

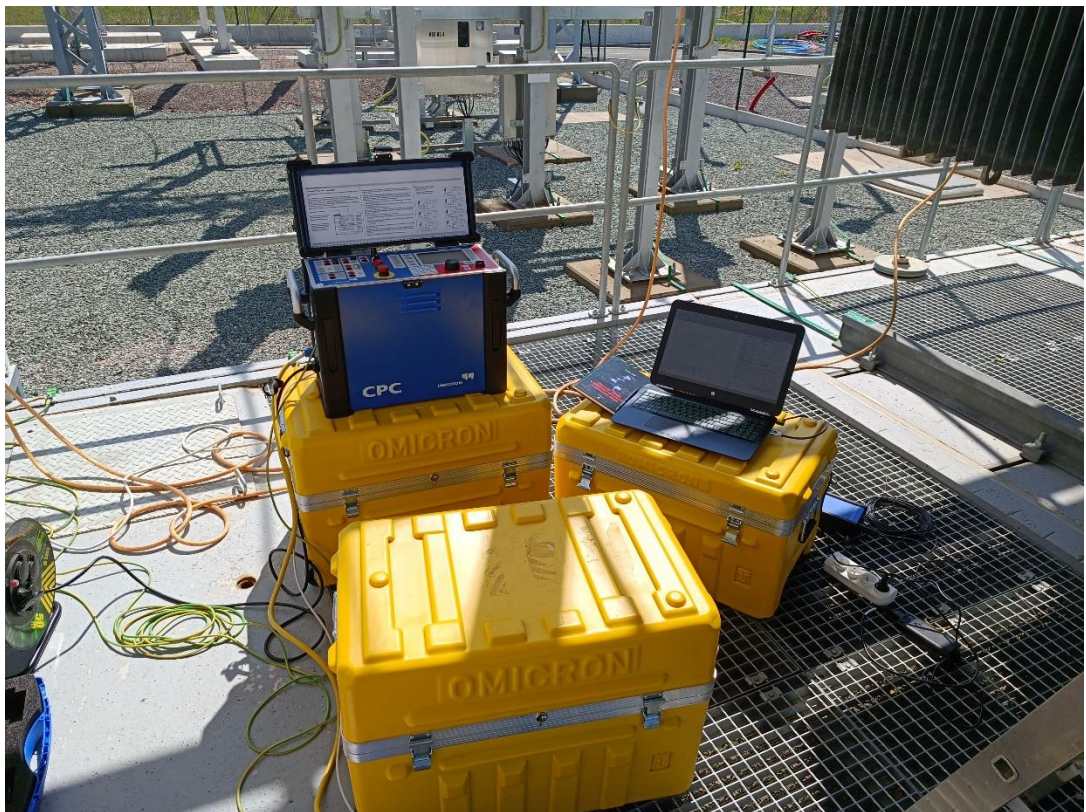
Seznam příloh

Příloha A - Auto naložené potřebnými přístroji a příslušenstvím pro měření ČV	50
Příloha B - Měřicí pracoviště na nízkonapěťové straně.....	50
Příloha C - Umístění přístrojů Omicron na vysokonapěťové straně	51

Příloha A - Auto naložené potřebnými přístroji a příslušenstvím pro měření ČV



Příloha B - Měřicí pracoviště na nízkonapěťové straně



Příloha C - Umístění přístrojů Omicron na vysokonapěťové straně

