

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika transformátorů – výrobní zkoušky

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub PRYTOLUK**
Osobní číslo: **E13B0214P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Diagnostika transformátorů - výrobní zkoušky**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište výkonový transformátor, uveďte a charakterizujte jeho příslušenství
2. Popište jednotlivé podsystémy transformátoru a charakterizujte je z hlediska výrobních zkoušek.
3. Popište průběh zkoušek během výroby a finální zkoušky výkonových transformátorů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Svoboda**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na objasnění základních diagnostických metod využívaných u výkonových transformátorů. Jsou zde popsány základní části výkonových transformátorů. Dále jsou popsány podsystemy transformátoru z hlediska zkoušek. Nejobsáhlejší část práce je zaměřena na výrobní zkoušky – zkoušky prováděné během výroby a finální zkoušky.

Klíčová slova

Výkonový transformátor, diagnostika transformátorů, výrobní zkoušky, podsystemy transformátoru

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on description of the basic diagnostic methods used in power transformers. The thesis describes the components of power transformers. The thesis also includes their subsystems. The most extensive part is focused on factory testing – tests during manufacture and final testing.

Key words

Power transformer, transformer diagnostics, factory testing, transformer subsystems

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Jakub Prytoluk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Svobodovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 POPIS VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORU	11
1.1 JÁDRO	11
1.2 VINUTÍ	12
1.3 NÁDOBA	15
1.4 VÍKO	16
1.5 KONZERVÁTOR	16
1.6 OLEJ	18
1.7 PŘEPÍNAČ - PŘEPOJOVAČ ODBOČEK	19
1.8 VÝVODY	19
1.9 PŘÍSLUŠENSTVÍ	19
2 PODSYSTÉMY TRANSFORMÁTORU	22
2.1 KONSTRUKČNÍ	22
2.2 MAGNETICKÝ	23
2.3 ELEKTRICKÝ	24
2.4 IZOLAČNÍ	25
2.5 CHLADICÍ	27
3 ZKOUŠKY TRANSFORMÁTORŮ	30
3.1 ZKOUŠKY BĚHEM VÝROBY	30
3.1.1 <i>Kontrola plechů magnetického obvodu</i>	30
3.1.2 <i>Magnetizace magnetického obvodu transformátoru</i>	31
3.1.3 <i>Izolační odpor kostry transformátoru</i>	32
3.1.4 <i>Testy nádoby</i>	32
3.1.5 <i>Zkoušení cívek před nasazením na jádro</i>	33
3.1.6 <i>Zkoušky za sucha</i>	34
3.1.7 <i>Měření odporu izolace</i>	34
3.1.8 <i>Kontrola spojení vinutí</i>	36
3.1.9 <i>Měření odporů vinutí</i>	36
3.1.10 <i>Měření převodu napětí a ověření fázového posunu</i>	37
3.1.11 <i>Zkouška sníženým přiloženým napětím z cizího zdroje</i>	38
3.1.12 <i>Měření naprázdno při sníženém napětí</i>	38
3.1.13 <i>Zkouška těsnosti</i>	38
3.1.14 <i>Kontrola kompletnosti transformátoru</i>	39
3.2 FINÁLNÍ ZKOUŠKY	39
3.2.1 <i>Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko</i>	41
3.2.2 <i>Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno</i>	42
3.2.3 <i>Zkoušky přepínačů odboček</i>	43
3.2.4 <i>Kontrola izolace jádra a kostry</i>	43
3.2.5 <i>Oteplovací zkouška</i>	43
3.2.6 <i>Stanovení hladiny zvuku</i>	46
3.2.7 <i>Měření ztrátového činitele ($\tan \delta$) a kapacit vinutí</i>	47
3.2.8 <i>Měření nulové složky impedance</i>	48
3.2.9 <i>Zkratová zkouška</i>	49
3.2.10 <i>Dielektrické zkoušky</i>	50
3.2.11 <i>Měření částečných výbojů</i>	53
ZÁVĚR	55
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	56

Seznam symbolů a zkratek

k	Kostra
N1.....	Počet závitů na primárním vinutí
N2.....	Počet závitů na sekundárním vinutí
NN.....	Vinutí nižšího napětí
SN	Vinutí středního napětí
VN.....	Vinutí vyššího napětí
YN.....	Zapojení do hvězdy
ZN	Zapojení do lomené hvězdy

Úvod

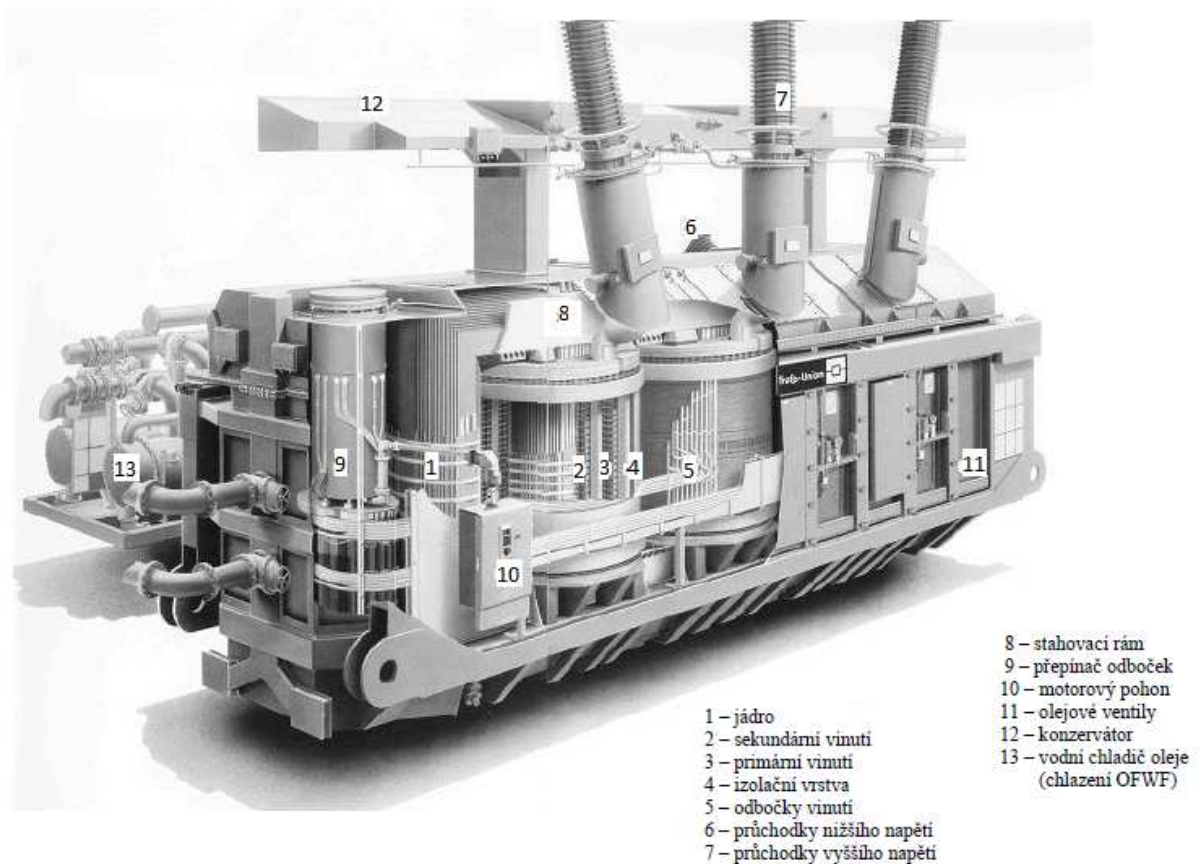
Transformátory jsou ve své podstatě jednoduchá a spolehlivá zařízení, která umožňují přenos elektrické energie na velké vzdálenosti. Vynález transformátoru byl klíčovým pro rozvoj elektroenergetiky, jelikož nahradil dříve používané točivé měniče napětí, a tím umožnil snadnou přeměnu velikosti střídavého napětí. Zvyšování elektrického napětí se využívá zejména pro účely přenosu a distribuce elektrické energie. Naopak výkonové transformátory se používají k transformaci vysokého napětí z distribuční sítě (vysokého napětí) na nižší napětí.

Měření na transformátorech tvoří samostatný obor, neméně obsažný než měření na točivých strojích. I když u strojů netočivých odpadají všechny jevy vyvolané otáčením rotoru, přistupují zde nová měření. Bakalářská práce je zaměřena převážně na výrobní zkoušky výkonových transformátorů.

Text je rozdělen do tří částí. V první části své práce se zabývám popisem jednotlivých částí transformátoru. V druhé části popisuji transformátor z hlediska podsystémů. Třetí a také nejrozsáhlejší část práce je věnována nejdůležitějším výrobním zkouškám – zkouškám prováděné během výroby a finálním zkouškám.

1 Popis výkonového transformátoru

Transformátor je elektrický netočivý stroj, který přenáší elektrickou energii na dlouhé vzdálenosti. Používá se většinou pro přeměnu střídavého napětí (např. z nízkého na vysoké nebo naopak). Jmenovité výkony a napětí transformátorů se proto pohybují ve velice širokých mezích od zlomků voltampérů a voltů až do stovek megavoltampérů a stovek kilovoltů. Na výkonu, napětí a účelu transformátoru závisí i jeho konstrukce. Výkonový transformátor se používá pro transformaci vysokého napětí z distribuční sítě (vysokého napětí) na nízké napětí. [1]



Obr. 1.1 Konstrukce výkonového transformátoru (upraveno z [2])

1.1 Jádro

Jádro se skládá z tenkých pásů ušlechtilé oceli, tzv. plechů, které jsou elektricky oddělené tenkou vrstvou izolačního materiálu. Vinutí je postaveno buď integrálně kolem jádra, nebo je postaveno samostatně a montováno kolem jednotlivých sekcí jádra. Ocelové plechy mohou být válcované za tepla nebo za studena, orientované nebo neorientované, dokonce mohou být i laserově upraveny pro nižší ztráty. [3, 4]

Tloušťka se pohybuje v rozmezí od 0,23 mm do 0,36 mm [3]. Průřez jádra může být

kruhový nebo obdélníkový. Obdélníková jádra se používají pro menší výkony nebo jako pomocné transformátory používané ve výkonovém transformátoru. Typ oceli a uspořádání závisí na výkonu transformátoru a jeho požadavcích na náklady, práci a provedení.

Stejně jako na ostatní komponenty v transformátoru i teplo, generované v jádru, musí být dostatečně rozptýleno. Zatímco ocel může být schopna odolávat vyšším teplotám, izolace takovou odolnost vůči vysokým teplotám nemá. Proto jsou používány chladicí kanálky uvnitř jádra pro dodatečnou cirkulaci tepla v prostoru a elektroplechy, které mohou být použity na snížení ztrát v konkrétním místě.

Jádro je izolované od mechanických konstrukcí a je uzemněno v jednom bodě. Uzemnění jádra je obvykle umístěno na nějakém snadno přístupném bodě uvnitř nádoby nebo také může být vyvedeno průchodkou na stěně nebo na víku nádoby. Tento uzemňovací bod by měl být odnímatelný pro účely testování (kontrola neúmyslného uzemnění jádra). Pokud jádro nechtěně naváže kontakt s uzemněnou kovovou konstrukcí, může poskytnout cestu k úniku proudů, čímž se vytváří koncentrace ztrát a vzniká teplo. [3, 4]

1.2 Vinutí

Vinutí jsou navinuta z vodičů, které musí být dobře odizolované (papírovou anebo lakovanou izolací).

Materiály používané pro vodiče vinutí výkonového transformátoru jsou měď a hliník. Zatímco hliník je lehčí a obecně levnější než měď, hliníkový vodič musí mít větší průřez pro přenos proudu s podobným výkonem než měď. Měď má vyšší mechanickou pevnost a je používán téměř výhradně ve všem, ale má menší rozměr než hliníkové vodiče. V případech, kde se vyskytují extrémní síly, se může použít měď s příměsí stříbra pro ještě větší pevnost.

Vodiče používané ve výkonových transformátorech jsou obvykle pletené do obdélníkového průřezu. Několik paralelních vodičů může být vzájemně spojeno na koncích vinutí, ale v tom případě je nezbytné transponovat vodiče v různých místech po celém vinutí, aby se zabránilo vyrovnávání proudů. Řádná transpozice paralelních vodičů ruší rozdíly napětí mezi vodiči a odstraňuje nebo výrazně snižuje vyrovnávací proudy. [3, 5]

V jádrových transformátorech jsou vinutí obvykle uspořádána soustředně kolem sloupku jádra, jak je znázorněno na *Obr. 1.2*, který ukazuje vinutí překrývané přes další vinutí na jednom sloupku jádra třífázového transformátoru. [5]



Obr. 1.2 Soustředné uspořádání - vnější cívka je nasazena na sloupek jádra přes vnitřní cívku (převzato z [5])

Plášťové transformátory používají prokládané uspořádání. S prokládaným uspořádáním jsou jednotlivé cívky skládány na sebe, odděleny izolačními bariérami a chladicími kanálky. Cívky jsou obvykle propojeny tak, že vnitřní strana jedné cívky je připojena k vnitřní straně přilehlé cívky a podobně i vnější strana jedné cívky je připojena k vnější straně přilehlé cívky. Sady cívek jsou sestaveny do skupin, které pak tvoří primární nebo sekundární vinutí. [3]

S ohledem na soustředné vinutí je obecně chápáno, že kruhové vinutí mají vyšší mechanickou pevnost než obdélníkové vinutí, zatímco obdélníkové mají nižší pracovní náklady a náklady na spojové materiály. Obdélníkové vinutí umožňují účinnější využití prostoru, ale jejich použití je omezeno na malé výkonové transformátory nebo na malý rozsah středně výkonových transformátorů, kde vnitřní síly nejsou tak vysoké. Jak se hodnoty výkonu zvyšují, tak se síly výrazně zvětšují a pak je potřeba zpevnění vinutí. Proto se používají kruhové cívky nebo plášťové provedení konstrukce. V některých speciálních případech se používají elipticky tvarované vinutí. [3, 6]

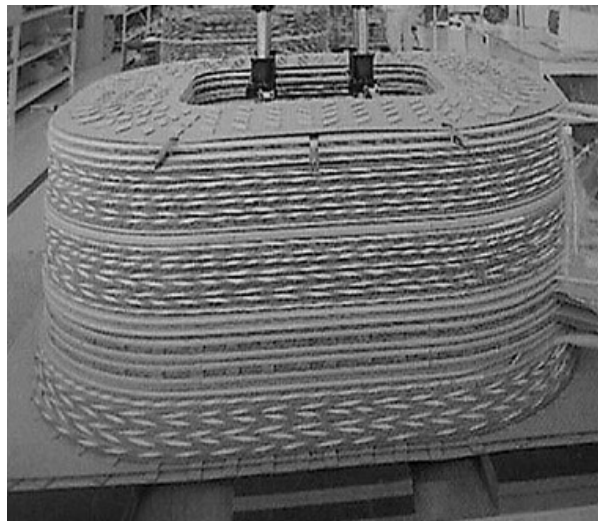
V průběhu let bylo používáno mnoho různých typů vinutí ve výkonových transformátorech. Větší a těžší cívky mohou být navinuty na sloupek vertikálně, nebo mohou být navinuty horizontálně a umístěny na sloupek po dostavění. [3]

- **Diskové vinutí**



Obr. 1.3 Diskové vinutí během procesu navíjení (převzato z [5])

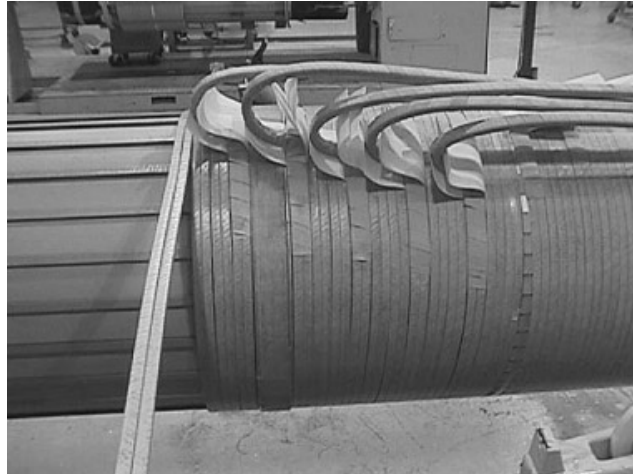
Několik typů vinutí jsou běžně označovány jako diskové vzhledem k uspořádání vodičů do disků. Nicméně tento typ vinutí se používá výhradně v plášťových konstrukcích transformátorů. Vodiče jsou navinuty kolem obdélníkové formy na nejširším povrchu vodiče orientovaných vodorovně nebo svisle. Obr. 1.3 a Obr. 1.4 ukazují, jak jsou tyto cívky obvykle navinuty. [3, 5]



Obr. 1.4 Diskové vinutí skládané na sebe (převzato z [5])

- **Vrstvové vinutí**

Vrstvová vinutí patří mezi nejjednodušší vinutí v tom, že vodiče jsou navinuty přímo vedle sebe kolem válce a klínů. Některé vrstvy může být navinuto v radiálním směru, přičemž tyto vrstvy jsou odděleny pevnou izolací a kanálky nebo jejich kombinací. [3, 5]

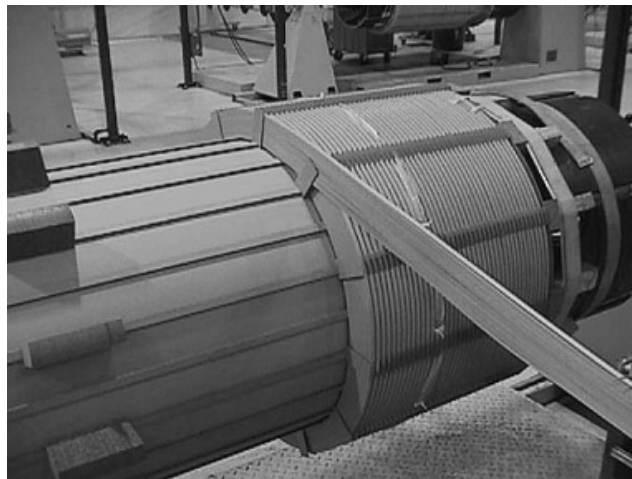


Obr. 1.5 Vrstvové vinutí (převzato z [5])

- **Šroubovicové vinutí**

Šroubovicové vinutí se skládá z několika až do stovky paralelních vodičů, které jsou navíjeny na válec vhodnými transpozicemi k minimalizování vyrovnávacích proudů. [3]

Cívka se podobá vývrtce. Obr. 1.6 ukazuje šroubovicové vinutí během procesu navíjení. Šroubovicové vinutí je využíváno pro vysoké proudy pro cívky nižšího napětí [5].



Obr. 1.6 Šroubovicové vinutí během montáže (převzato z [5])

1.3 Nádoba

Nádoba transformátoru se svařuje z ocelových plátů a stěny nádoby jsou vyztuženy ocelovými profily. Obvykle bývají zaobleny rohy zásobníků tak, aby se snížila hmotnost transformátoru bez nutnosti snížení spolehlivosti a kvality. Uzemňovací svorky bývají připevněny v blízkosti rohů nádoby. Cílem bývá co nejvíce zmenšit velikost a hmotnost, což následně usnadňuje přepravu, manipulaci, montáž a instalaci na místě. [6, 7]

Všechny nádoby jsou navrženy tak, aby odolaly úplnému vakuu, a jsou vyrobeny z vysoce kvalitních ocelových plechů. Na každé nádobě transformátoru je umístěno příslušenství pro zvedání, nadzdvížení a tažení. Montážní a revizní otvory jsou umístěny tak, aby vnitřní komponenty, jako jsou například přípojovací průchodky či přepínače odboček, byly snadno přístupné. Základny nádob jsou buď ploché, nebo mají konstrukční prvky, které umožňují posun transformátoru ve dvou směrech – příčném i podélném. Vnitřní povrch nádoby je natřen barvou odolnou proti oleji. Vnější povrch nádoby se natírá z důvodu klimatických podmínek a okolního prostředí. [6, 7]

1.4 Víko

Víko nádoby se vyrábí z ocelového plátu. Víko je opatřeno přírubami pro upevnění průchodek nižšího a vyššího napětí. Také je vybaveno kapsami pro zasunutí čidel. Dále má víko otvory umožňující inspekci horních částí transformátoru a umožňující přístup ke zvedacím okům aktivních částí transformátoru (např. k vinutí a jádru). Těsnění mezi nádobou a víkem zajišťuje oleji vzdorná guma obdélníkového průřezu. Víko je propojeno zemnicím spojem s nádobou. [7]

1.5 Konzervátor

Konzervátor umožňuje expanzi transformátorového oleje. Konzervátor v transformátoru s přepínačem odboček je složen ze dvou komor: jedna komora pro expanzi oleje z nádoby a druhá komora pro expanzi oleje z přepínače odboček. Oba prostory konzervátoru jsou vybaveny:

- magnetickým indikátorem hladiny oleje
- vysoušečem se silikagelem
- plnicím/vypouštěcím ventilem
- ventilem pro vypouštění sedimentu
- inspekčním otvorem [7]

Konzervátor transformátoru, který je vybaven pouze s přepojovačem bez zátěže, je složen jen z jedné komory připojené k nádobě trubkami přes Buchholzovo relé a uzavíracími ventily. Konzervátor je umístěn na víku anebo na nádobě transformátoru. [7]



Obr. 1.7 Konzervátor s ukazatelem hladiny oleje pro hlavní nádrž (převzato z [6])

- **Olejový systém**

Standardně se ke konzervaci využívá olejový konzervátor. Technické výhody systému dvou uzavřených nádrží a automatického přetlakového olejového konzervátoru jsou:

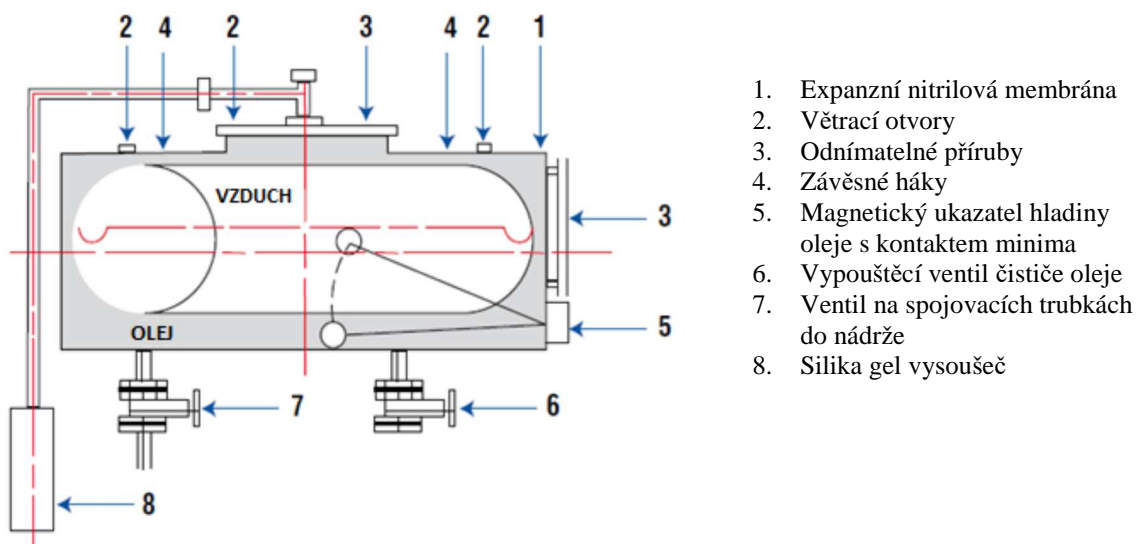
1. vysoká dielektrická integrita
2. pozitivní statický tlak na jednotku po celý čas
3. nízká údržba
4. možnost použití Buchholzova relé ke shromažďování plynů. [6]

Systém konzervace využívá expanzní nádobu, z níž a do které proudí transformátorový olej volně podle toho, jak se zvětšuje nebo smršťuje v důsledku změn teplot. Tento systém vždy zajistí dostatečnou výšku oleje v hlavní nádobě a udržuje ji zcela zaplněnou. Indikátor hladiny je umístěn v konzervátoru a ukazuje změnu hladiny. [6]

Roztažnost oleje v přepínači odboček pod zatížením je zcela izolována od transformátorového oleje. Izolovaný prostor je připevněn k hlavnímu konzervátoru. Vysoušeč je naplněn silika gelem, který odstraňuje veškerou vlhkost a prachové částice ze vzduchu. [6]

- **Těsnění**

Hlavní konzervátor je opatřen nitrilovou membránou, která brání kontaktu okolního vzduchu s transformátorovým olejem. Tím je snížena pravděpodobnost průniku vlhkosti do transformátorového oleje a oxidování oleje v konzervátoru. Na konzervátoru může být připevněn detektor úniku, který může signalizovat porušení membrány. Nitrilovou membránu u přepínače odboček pod zatížením nelze použít v důsledku produkování plynů každou akcí přepínače odboček. Ze stejného důvodu nemůže být opatřen Buchholzovým relé prostor přepínače odboček, toto speciální ochranné relé, které nemůže být testováno tlakem plynu nebo pružinovým tlakovým relé, je totiž navrženo se systémem citlivého tlumení olejového přepětí. [6]



Obr. 1.8 Náskres konzervátoru (upraveno z [6])

1.6 Olej

Izolační olej ve výkonovém transformátoru je obecně známý jako transformátorový olej. Ten je normálně získán destilací a následným zpracováním ropy. To je důvod, proč tento olej je také známý jako minerální olej. Transformátorový olej se používá především ze dvou důvodů. Jedním je, že slouží jako kapalná izolace v elektrickém transformátoru a druhým je, že odvádí teplo z transformátoru, takže působí jako chladivo. Kromě toho, ten olej slouží k dalším dvěma účelům, pomáhá chránit jádro a vinutí, neboť ty jsou zcela ponořeny v oleji. A tím důležitým účelem tohoto oleje je, že zamezuje přímému kontaktu atmosférického kyslíku s papírovou izolací vinutí vyrobenou z celulózy, která je citlivá na oxidaci. [8]

Obecně existují dva typy transformátorových olejů používaných v transformátorech:

- **parafinické** oleje jsou chemicky stálé a mají dobrou viskozitní křivku. Mají vysoký bod vzplanutí a jsou obvykle tuhnoucí při nulových teplotách,
- **naftenické** oleje mají nižší bod tuhnutí než parafinické oleje, ale jsou chemicky méně stálé. [9]

Naftenický olej se snadněji oxiduje než parafinický olej. Ale oxidační produkt, tj. kal, naftenického oleje je rozpustnější než parafinického oleje. Tím pádem kal naftenického oleje se nesráží na dně transformátoru. A proto nebrání cirkulaci oleje a to znamená, že nenarušuje chladicí systém transformátoru. Ale v případě parafinického oleje, ačkoli míra oxidace je nižší než u naftenického oleje, je oxidační produkt, neboli kal nerozpustný a sráží se na dně nádrže. Zabráňuje tak správné funkci chladicího systému transformátoru. [8]

1.7 Přepínač - přepojovač odboček

Přepínač odboček se používá pro změnu převodu napětí během provozu transformátoru a přepojovač odboček je určen pro změnu převodu napětí po odpojení transformátoru od sítě na obou stranách (na straně vyššího i nižšího napětí). [7]

Přepínač může být instalován v nádrži společně s vypínačem svodiče v jeho vlastním prostoru na olej tak, aby nedocházelo ke kontaminaci transformátorového oleje následkem elektrického oblouku při spínání, nebo může být upevněn na hlavní nádrži. Pro zamezení napěťových rázů na přepínači odboček v průběhu spínání může být nainstalována ochrana proti přepětí. [6, 7]

1.8 Vývody

Vývody VN a NN jsou ukončeny porcelánovými, pásovými nebo konektorovými průchodkami, které jsou umístěny na víku transformátoru. [10]

1.9 Příslušenství

Existuje mnoho různých příslušenství používaných pro sledování a ochranu výkonových transformátorů, z nichž některé jsou považovány za standardní funkce a některé se používají na základě různých požadavků. Několik základních doplňků je zde stručně popsáno.

- **Indikátor hladiny kapaliny**

Indikátor hladiny je standardní doplněk u nádrží transformátorů plněných kapalinou od té doby, kdy kapalně médium je rozhodující pro chlazení a izolaci. Tento indikátor je umístěn na straně nádrže s plovákem a plovákovým ramenem, který indikuje výšku hladiny kapaliny v konzervátoru číselníkovým ukazatelem. [3, 7]

- **Přetlakové zařízení**

Přetlakové zařízení se montují na nádrže transformátorů k uvolnění nadměrných vnitřních tlaků, které by mohly narůstat při provozních podmínkách. Tato zařízení jsou určena k vyvarování se poškození nádrže a chrání transformátor před případnou explozí v důsledku rychlého a prudkého nárůstu vnitřního tlaku. Na větších transformátorech může být vyžadováno několik přetlakových zařízení kvůli velkému množství oleje, protože tento ventil umožňuje rychle vypustit velké množství oleje z nádoby a udržet hodnotu vnitřního tlaku na bezpečné úrovni. [3, 7]

- **Indikátor teploty kapaliny**

Indikátory teploty měří teplotu kapaliny v místě blízkosti horní hladiny za použití sondy vložené a připevněné na stěně nádoby transformátoru. [3]

- **Indikátor teploty vinutí**

Metoda simulace teploty vinutí se používá k přiblížení nejteplejšího bodu ve vinutí. Přiblížení je potřeba z důvodu obtížnosti přímého měření teploty vinutí. Tato metoda, používaná pro výkonové transformátory, zahrnuje proudový transformátor, který se používá pro přivedení úměrného proudu k zátěžovému proudu přes transformátor.

Proudový transformátor napájí obvod, takže v podstatě dodává teplo do horní hladiny, kde je odečet teploty kapaliny. Ten se přibližuje hodnotě odečtu teploty vinutí. Tato metoda, která závisí na konstrukci nebo na zkušebních údajích teplotních rozdílů mezi kapalinou a vinutím, se nazývá gradient vinutí. [3]

- **Tlakové relé**

Tlakové relé je určeno pro indikování rychlého nárůstu vnitřního tlaku, který se může objevit, když nastane vnitřní porucha. Tato relé mohou být upevněna na horní nebo boční straně transformátoru, nebo mohou působit v kapalném nebo plynném prostoru. [3, 7]

- **Vysoušeč**

Vysoušeč používá materiál jako je silikagel (křemičitý gel) a chrání olej před vniknutím vlhkosti do konzervátoru. To způsobí, že olej stárne pomaleji. Transformátor je opatřen jedním vysoušečem pro odvlhčení vzduchu nad hladinou kapaliny uvnitř hlavní komory konzervátoru a druhým vysoušečem, který je určen pro komoru přepínače (pokud je transformátor opatřen přepínačem) pro absorbování vlhkosti ze vzduchu nad hladinou kapaliny uvnitř přídatné komory konzervátoru. [3, 7]

2 Podsystemy transformátoru

2.1 Konstrukční

Z konstrukčního hlediska je transformátor ze všech střídavých strojů nejjednodušší. Oproti točivým elektrickým strojům nemá mechanické ztráty a má jednodušší magnetický obvod (bez drážek pro vinutí), který je složený z plechů s menšími měrnými ztrátami. Energetická účinnost transformátoru je proto značně větší než u všech ostatních elektrických strojů. [11]

Hlavní části výkonového transformátoru jsou:

- magnetický obvod, tzv. jádro
- vinutí – primární a sekundární
- zařízení zajišťující chlazení – nejčastěji vzduchové nebo olejové
- mechanické, konstrukční a izolační součásti

Magnetický obvod vysokonapěťových transformátorů jádrového typu je tvořen sloupky a spojkami a skládá se z transformátorových křemíkových plechů. Na sloupcích je umístěno izolovaně vinutí nižšího napětí a vinutí vyššího napětí. [3, 11]

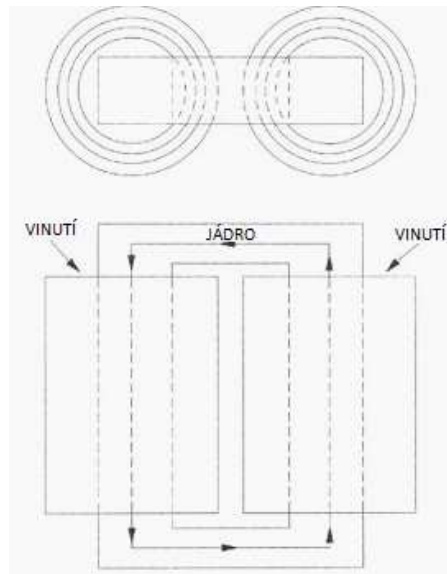
Takto vyrobený transformátor se vloží do nádoby, která se pak naplní olejem. Olej je znám, že dobře odvádí vznikající teplo a zvětšuje elektrickou pevnost. Pro lepší chlazení se nádoba opatřuje chladicími trubkami, popř. žebry nebo radiátory. Na víku nádoby jsou umístěny porcelánové průchodky pro vyvedení konců vinutí, přepínač odboček a konzervátor spojený trubkou s olejovou náplní. Olej při ohřívání transformátoru zvětšuje svůj objem a přechází do konzervátoru. Olej se v konzervátoru stýká se vzduchem jen na své malé hladině, a tak je omezeno jeho znehodnocování oxidací a vlhkostí. Mezi nádobu transformátoru a konzervátor se vkládá plynové relé signalizující poruchu (přehřívání) transformátoru. [5, 7, 11]

Celý transformátor se připevňuje k podvozku, který u velkých transformátorů umožňuje plynulý pohyb (obvykle po kolejích). [7, 11]

2.2 Magnetický

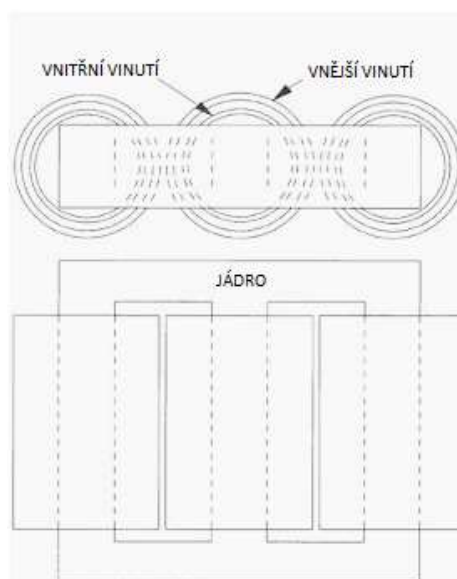
Magnetický obvod se skládá ze sloupků a spojek. Existují dva druhy magnetických obvodů používané ve výkonových transformátorech: jádrový a plášťový. [1, 3]

V **jádrové** konstrukci jednofázového transformátoru je jen jedna cesta magnetického obvodu. Vinutí jsou usazena na dvou jádrech a zapojují se sériově nebo paralelně. To se provádí z důvodu omezení magnetických toků, které mají magnetickou vazbu pouze s jedním vinutím. [3, 4, 12]



Obr. 2.1 Schéma jednofázové jádrové konstrukce (upraveno z [4])

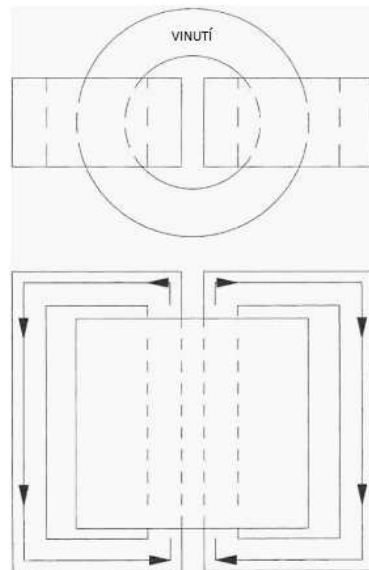
Trojfázové transformátory se většinou konstruují jako jádrové [12]. V trojfázovém jádrovém transformátoru odpovídá každé fázi jedno jádro, to je znázorněno na Obr. 2.2. Všechna jádra jsou magneticky spojena dvěma spojkami a fázové magnetické toky tvoří



Obr. 2.2 Schéma třífázové jádrové konstrukce (upraveno z [4])

trojfázovou hvězdu fázorů. Vinutí jsou konstruována odděleně od jádra a jsou při jejich montáži umístěny na příslušných sloupcích jádra. [1, 3, 4]

V **plášťové** konstrukci je rozvětvený magnetický obvod, který částečně zakrývá vinutí. Vinutí se umísťuje na střední sloupek. Magnetický tok procházející středním sloupkem se souměrně rozděluje do spojek a krajních sloupků. Výhodou tohoto uspořádání je souměrné rozdělení magnetického toku a omezení rozptylových toků. Nevýhodou je zvýšení hmotnosti. Pro omezení vířivých proudů se používají tenké navzájem izolované plechy. [3, 12]



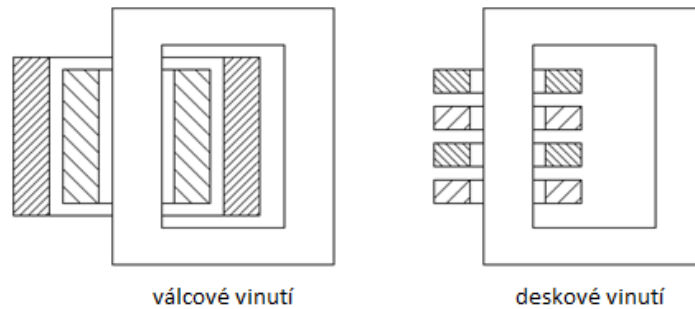
Obr. 2.3 Schéma jednofázové plášťové konstrukce (upraveno z [4])

Trojfázový plášťový transformátor je tvořen ze tří jednofázových plášťových transformátorů postavených vedle sebe. Vinutí fází jsou zapojena tak, aby součet všech fázových toků ve spojkách magnetického obvodu nezvětšoval celkový magnetický tok. Proto je ve střední fázi zapojeno vstupní i výstupní vinutí obráceně. V tomto případě budou toky ve všech místech spojek rovny polovině toku v jádře. [1]

2.3 Elektrický

Pod elektrický podsystem se řadí části stroje, které umožňují průchod elektrického proudu. Průchod elektrického proudu zajišťuje vinutí stroje.

Každá fáze transformátoru se tvoří primárním a sekundárním vinutím (některé transformátory mají více sekundárních vinutí). Vinutí se může dělit na dva základní typy – deskové a válcové. Deskové vinutí se skládá ze střídajících se kotoučů cívek primárního a sekundárního vinutí. V případě válcového vinutí jsou cívky navinuty po celé délce jádra, kdy je na jádře navinutá cívka jedna a ní pak druhá. [13]



Obr. 2.4 Dva základní typy vinutí (převzato z [13])

Počet závitů na primární a sekundární cívice, respektive jejich poměr, udává převod transformátoru (také nazýván transformační poměr). Lze jej vyjádřit jako poměr primárního a sekundárního napětí.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (2.1)$$

kde hodnoty N_1 a N_2 udávají počet závitů na primárním a sekundárním vinutí. Napětí je transformováno v poměru stejném, proud v opačném. [13]

2.4 Izolační

Spolehlivý provoz výkonových transformátorů vyžaduje dodržování určitých provozních podmínek: udržování dovolených teplotních cyklů, nepřekročení přípustných napěťových hladin, zachování kvality transformátorového oleje. Nedodržení těchto podmínek vede hlavně ke ztrátě elektrických a mechanických vlastností izolace transformátoru. Pro zvýšení spolehlivosti provozu transformátoru je potřeba, kromě kontroly kvality izolace, udržovat v dobrém stavu chladicí zařízení, přepínač odboček vinutí transformátoru a jiná pomocná zařízení. [14]

Vysokonapěťovou izolaci výkonových transformátorů je možné rozdělit na vnější a vnitřní.

Vnější izolaci tvoří vzduch a je to izolace:

- mezi jednotlivými vývody různých vinutí,
- podél průchodek transformátoru (mezi vývodem a uzemněnou nádobou transformátoru).

Vnitřní izolace transformátoru tvoří:

- izolace vinutí,
- izolace vývodů,
- izolace pomocných zařízení (např. přepínačů odboček). [14]

Na vinutí transformátorů jsou kladeny požadavky, které musí splňovat:

- **Elektrická pevnost.** Izolace musí vydržet bez poškození dlouhodobé namáhání střídavým elektrickým polem v provozních podmínkách a krátkodobé impulsní namáhání při přepětích.
- **Mechanická pevnost.** Vinutí musí snést bez poškození mechanické namáhání při stahování během montáže a při zkratech během provozu kdy na závity a cívky působí velké elektromagnetické síly.
- **Odolnost vůči tepelnému namáhání.** Konstrukce vinutí musí zaručovat jejich dobré chlazení, teplota izolace nesmí překročit hodnotu stanovenou příslušnou tepelnou třídou. [1, 14]

Izolaci vinutí transformátoru dělíme na hlavní a vedlejší.

Hlavní izolace vinutí:

- izolace mezi jednotlivými vinutími
- izolace mezi vinutím a jádrem transformátoru
- izolace mezi vnějšími vinutími dvou sousedících fází
- izolace mezi vinutími a nádobou transformátoru

Vedlejší izolace vinutí:

- závitová izolace
- izolace mezi cívkami (část vinutí složená ze závitů zapojených v sérii a které tvoří jeden celek) nebo vrstvami (závity ve směru osy vinutí)

Na izolaci vinutí transformátoru se používá kombinovaná **olej-papírová izolace**. Vychází se z požadavků kladených na izolaci VN vinutí transformátoru, olej a papír mají dobré elektrické vlastnosti, papír má vyhovující mechanickou pevnost a olej zároveň plní roli

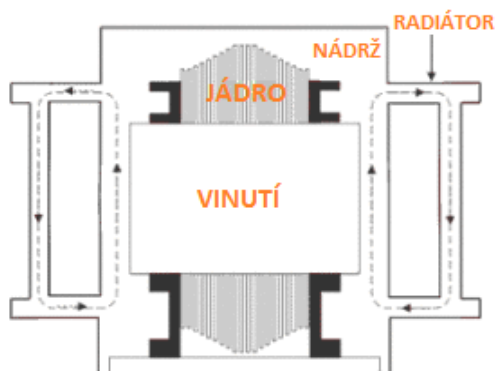
chladicího média. Každý z těchto izolantů má zvlášť své pozitivní a negativní vlastnosti. Využitím těchto izolantů v kombinaci se eliminují některé jejich negativní vlastnosti. [14]

2.5 Chladicí

Transformátory jsou běžně chlazený odnímatelnými chladicími radiátory, které zajišťují přirozený průtok oleje přes radiátory (ONAN chlazení). To je spolehlivé a nízko údržbové řešení chlazení. Pro zvýšení účinnosti chladičů se může využít umělého proudění vzduchu vytvořeného ventilátory (ONAF chlazení). Pokud je doporučeno nebo vyžadováno, aby byla větší účinnost chlazení, může se dále zvýšit umělým prouděním pomocí čerpání oleje přes vinutí (OFAF chlazení). [6, 7]

- **Chladicí systém ONAN**

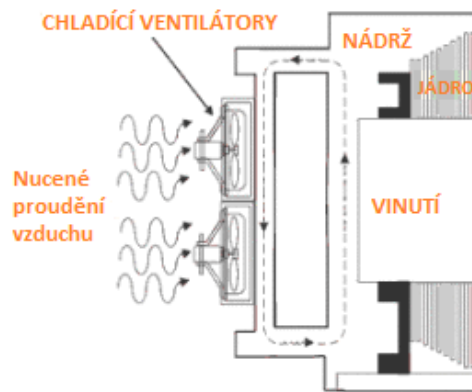
Jedná se o nejjednodušší systém chlazení transformátorů. Zkratka ONAN znamená „Oil Natural Air Natural“. Přirozený průtok horkého oleje se využívá k chlazení. Horký olej proudí do horní části nádrže transformátoru a uvolněné místo se zaplňuje studeným olejem. Tento horký olej, který je na horní straně, bude odvádět teplo v atmosféře přirozeným vedením, prouděním a zářením ve vzduchu a vystydne. Tímto způsobem olej v nádobě transformátoru cirkuluje, když je transformátor v zátěži. Pro zvýšení chladicího povrchu se opatřuje vlnitý povrch nádoby nebo řadou svislých trubek, které se spojují do skupin a tím tvoří zvláštní radiátor, který je upevněn k nádobě přes samostatné uzavírací ventily s ručně ovládaným uzavíráním. [1, 7, 15]



Obr. 2.5 Chladicí systém ONAN (upraveno z [15])

- **Chladicí systém ONAF**

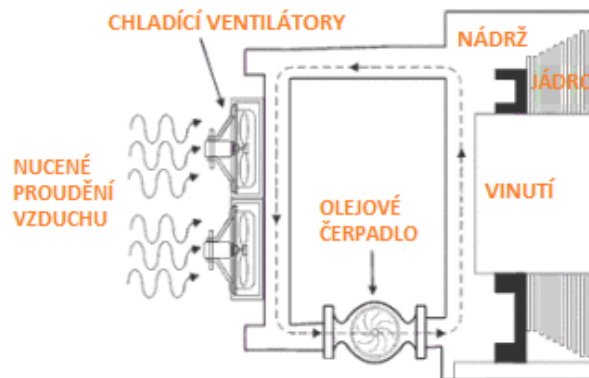
Odvod tepla může být samozřejmě zvýšen, jestliže se zvýší rozptýlující povrch, ale může být ještě zvýšen za použití nuceného proudění vzduchu. Využívají se ventilátory foukající vzduch pro ochlazení povrchu. Nucený vzduch odvádí teplo z povrchu chladiče a zajišťuje lepší chlazení než přírodní vzduch. Zkratka ONAF znamená „Oil Natural Air Forced“. Rychlost odvádění tepla je rychlejší chladicí metodou ONAF než chladicím systémem ONAN, proto transformátor může být více zatížen bez překročení povolených limitů teploty. [7, 15]



Obr. 2.6 Chladicí systém ONAF (upraveno z [15])

- **Chladicí systém OFAF**

Rychlost odvádění tepla může být ještě dále zvýšena, pokud tato cirkulace oleje se urychluje použitím určité síly. V chladicím systémem OFAF je olej nucen cirkulovat uvnitř uzavřené smyčky nádoby transformátoru pomocí olejových čerpadel. OFAF znamená „Oil Forced Air Forced“. Používají se olejově-vzduchové chladiče, které jsou připojeny k nádobě přes ventily. Každý chladič je vybaven ventilátory, čerpadlem a ukazatelem průtoku oleje. Chladiče se ovládají ručně nebo automaticky (pomocí ukazatelů oleje/vinutí). [7, 15]



Obr. 2.7 Chladicí systém OFAF (upraveno z [15])

- **Kontrola chlazení**

Kontrola chlazení je zcela závislá na návrhu transformátoru a chlazení. Všechny součásti pro kontrolu chlazení jsou voleny pro jejich vysokou kvalitu a dlouhotrvající vlastnosti. Pro přečerpávací jednotky, jsou použity snímače průtoku oleje signalizující poruchy chlazení, a pokud je to nutné, automaticky spínají záložní přečerpávací systém. Časová relé jsou použita pro postupné zapínání čerpadel a ventilátorů, a tak ke snížení rozběhového proudu. Všechny nezbytné signalizační kontakty jsou poskytovány standardně. Celé zařízení kontroly chlazení bývá přehledně umístěno v kontrolní skříni. [6]

3 Zkoušky transformátorů

Výrobní zkoušky se týkají fáze vzniku zařízení a konají se ve výrobním závodě. Můžeme do nich zahrnout vstupní kontrolu používaných materiálů, mezioperační zkoušky a ověřování funkčnosti celých transformátorů – zkoušky typové, kusové a zvláštní. [16]

Většina výkonových transformátorů je stále prakticky ručně vyrobená. Ve výrobě se nepoužívá žádná masová produkce a každý z nich je vyroben speciálně. To znamená, že se nemůžeme spoléhat na rozsáhlé typy testování předvýrobních prototypů, abychom došli k přesvědčení, že návrh a výroba činí transformátor vhodný pro provoz, ale musí se na jednotlivých transformátorech vykonávat zkoušky, jaké jsou považovány za nezbytné. Z řady testů, která mohou trvat nanejvýš několik dní, je třeba ověřit, že transformátor bude vyhovující v provozu po dobu 30 a více let [17]. Je proto logické, že toto testování by mělo být doplněno postupy QA systému, které působí na každé jednotlivé zařízení po celou dobu návrhového a výrobního procesu. [17]

Quality assurance (zkráceně QA) je systém zajištění kvality a týká se všech procesů počínaje návrhem, vývojem, nasazením, údržbou až po dokumentaci produktu. Cílem systému je dohlédnout, že produkt je vytvářen tak, že jeho jednotlivé části budou mít odpovídající kvalitu, která byla určena. [18]

Finální testy jsou kontroly všech QA postupů, které jsou prováděny po celou dobu výroby. Přísnost a důkladnost těchto testů jsou nezbytně důležité.

Podrobnosti o fungování QA systémů jsou mimo rozsah tohoto obsahu, ale je třeba poukázat na to, že testování samo o sobě neprokazuje, že transformátor je plně v souladu se všemi požadavky, které mohou být na něj kladeny. Mnoho faktorů, které mohou mít silný vliv na životnost provozu velkého vysokonapěťového transformátoru, jsou velmi závislé na důraz v detailu návrhu a výroby a je potřeba vysoký standard zajištění kvality. [17]

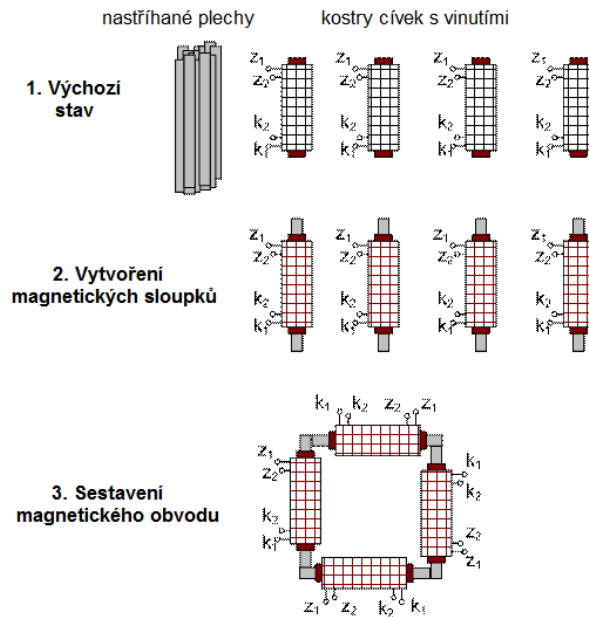
3.1 Zkoušky během výroby

Tovární zkoušky během výroby kontrolují správnost výroby. Jen tak se dosáhne záruky dobré jakosti, trvanlivosti a odolnosti, důležitých pro trvalý provoz.

3.1.1 Kontrola plechů magnetického obvodu

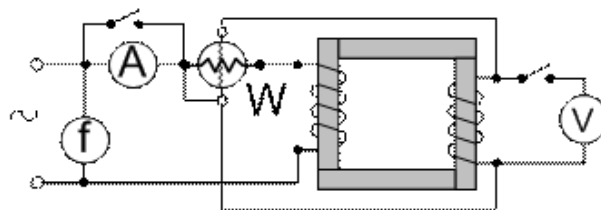
U příchozích plechů magnetického obvodu je kontrolována tloušťka a kvalita izolačního povlaku. Vzorek materiálu je oříznut a postaven do Epsteinova rámu, který se měří Epsteinovým přístrojem. Jedná se o mechanickou podporu a způsob sestavení magnetického

obvodu do čtvercového rámu. Rám se vytvoří ze čtyř stejných sloupků, které vzniknou navrstvením přesně nastříhaných pásků měřeného plechu. [17, 20]



Obr. 3.1 Epsteinův rám (upraveno z [20])

Po zapojení wattmetru, voltmetrů a ampérmetru vznikne pracoviště, na němž lze změřit magnetické ztráty. Izolační odpor plechu je kontrolován s cílem ověření výrobních jmenovitých hodnot. [17, 20]



Obr. 3.2 Schéma pracoviště (převzato z [20])

3.1.2 Magnetizace magnetického obvodu transformátoru

U transformátorů je zkoušen magnetický obvod po složení z transformátorových plechů před tím, než jsou namontována vinutí.

Na plně smontovaný magnetický obvod, včetně stahovací konstrukce, se navine pomocné magnetizační vinutí. Vinutí se provede tak, aby se dosáhlo krátkodobé indukce jádra odpovídající 110 % jmenovitého napětí po dobu 15 minut. [19]

Měřením naprázdno zkontrolujeme vypočítané ztráty a proud naprázdno. Dále se ověří, nejsou-li plechy spojené nakrátko, což se projevuje místním přehřátím. Kontrola se provádí vzájemným porovnáním teplot z různých míst v pětiminutových intervalech po dobu 60 minut až 90 minut, pokud se plechy neohřejí o více než 30 °C až 60 °C nad teplotu okolí při normální indukci. [19]

Volné plechy se projeví brucením a chvěním. Jakost stažení jádra se kontroluje zkusmo opatrným vrážením nože mezi jednotlivé plechy jádra; ani tenký nůž by neměl vniknout mezi plechy. Magnetické obvody transformátorů se suší před zkouškou magnetizace v peci 2 dny až 4 dny při 110 °C až 120 °C. [19]

3.1.3 Izolační odpor kostry transformátoru

Izolační odpor se kontroluje měřičem a aplikováním zkušebního efektivního napětí 2 kV nebo stejnosměrného napětí 3 kV na dokončenou instalaci jádra. [17]

Ve Velké Británii [17] se shodují, že test jádra a odporu izolace kostry je při těchto hodnotách nedostatečný. Moderní techniky zpracování umožňují pouze velmi malý rozměr izolační lepenky, který dosáhne zmíněných hodnot ve výrobním závodě. Takže i relativně malé otřesy utrpěné během transportu mohou snadno vést k poškození nebo narušení komponentů. Mají za následek, že výsledky z testování ve výrobě a výsledky z testování na místě jsou odlišné a mohou ukazovat nízký izolační odpor. Z toho důvodu několik výrobců, např. firma National Grid z Velké Británie, zvýšili požadavky na test izolace mezi jádrem, kostrou a nádobou transformátoru pracující při 275 kV a 400 kV [17]. V suchém stavu, před naplněním oleje, je zvýšeno zkušební efektivní napětí na 8 kV. Bezprostředně před expedicí, po naplnění olejem, je test zopakován při efektivním napětí 16 kV. [17]

3.1.4 Testy nádoby

Nádoba jakékoli nové konstrukce by měla být kontrolována pro pevnost a schopnost odolat vakuu. Ve Velké Británii se aplikuje pro 275 a 400 kV transformátory vakuum ekvivalentní 25 mbar absolutního tlaku [17]. To je potřeba udržet dostatečně dlouho k odečtení hodnot a k ověření, že nedochází k úniku. Celý proces může pro velkou nádrž trvat až 2 hodiny. Po vypuštění vakua musí být změřen trvalý průhyb po stranách nádrže, který by neměl překročit stanovené meze v závislosti na délce. Trvalý průhyb do 13 mm by měl být považován za přiměřený [17]. V návaznosti na tuto zkoušku je další zkouška provedena za účelem kontroly mechanické odolnosti. Běžný tlak ekvivalentní 3 mbar absolutního tlaku by měl být aplikován po dobu 8 hodin. [17]

Pro transformátory jmenovitých napětí do 132 kV by měl být aplikován méně náročný vakuový test ekvivalentní 330 mbar absolutního tlaku. Výsledné trvalé průhyby tohoto testu by měly být podobné těm, které jsou povoleny pro transformátorové nádrže napětí 275 kV a 400 kV, ale jsou sníženy poměrem jejich velikosti. [17]

V České republice je trvalý průhyb pro transformátory střední velikosti mezi 20 MVA a 100 MVA předpokládán 1 mm. Pro velké výkonové transformátory nad 100 MVA je očekávaná hodnota trvalého průhybu 5 mm. [21]

Jestliže se překročí očekávané hodnoty, musí být zkouška opakována pro důraz, že rozměry nádoby jsou stabilizovány. Pokud se to nepodaří, musí se uskutečnit akce, které budou vyžadovat dodatečné zpevnění nádoby. [21]

3.1.5 Zkoušení cívek před nasazením na jádro

- **Zkoušení měřením proudu**

Primární cívka transformátoru, jehož spojku lze sejmut, je připojena přes ampérmetr ke střídavému napětí. Nejdříve se změří proud primární cívky, přičemž není na spojce magnetického obvodu žádná zkoušená cívka. Pak zjistíme proud se zkoušenou cívkou nasunutou na spojce jako sekundární vinutí. Je-li v obou případech stejný proud, zkoušená cívka je bez chyby. Je-li proud na cívce nasunutě na spojce větší, má zkoušená cívka závitové spojení. [19]

- **Zkoušení měřením napětí**

Toto spojení se liší tím, že se ještě používá voltmetr, který se připojuje střídavě ke zkoušeným cívkám, které mají stejný počet závitů nebo je známý poměr počtu závitů. Je-li indukované napětí v obou cívkách stejné nebo ve správném poměru, cívka je bezvadná. Není-li tak, cívka má závitové spojení. [19]

- **Zkouška měřením střídavého odporu**

To se hodí k určování zkratu mezi polohami. Na rozdíl od předchozích zkoušek je tohle citlivější metoda. Závisí na tom, že cívku umístíme do magnetického pole a pozorujeme působení střídavého proudu na zařízení k měření odporu. Má-li zkoušená cívka závity ve zkratu, mění se velikost a fáze pozorovaného proudu. [19]

3.1.6 Zkoušky za sucha

Po sestavení cívek vinutí, příslušných izolačních výztuh, spojení odbočkového přepínače apod., ale před vložením transformátoru do nádoby s olejem, se měří a kontroluje v tomto pořadí:

- izolační odpor vinutí,
- spojení vinutí,
- odpory vinutí všech fází na všech odbočkách,
- převody na všech odbočkách
- měření nakrátko a kontrola spojů
- zkouška sníženým přiloženým napětím z cizího zdroje
- měření naprázdno při sníženém napětí nebo s rozpojeným vinutím. [19]

Současně se kontroluje mechanické provedení:

- jsou-li vývody z vinutí dostatečně vyztuženy;
- nejsou-li jednotlivé vývody cívek nebezpečně blízko sebe;
- zda je mezi fázemi a proti zemi dostatečná vzdálenost, zda nechybějí mezistěny apod.;
- zda jsou průchodky čisté;
- zda kontakty přepínačů mají dobrý dotyk a tlak;
- zda jsou všechny šrouby dotaženy a zajištěny proti uvolnění;
- zda je magnetický obvod včetně stahovací konstrukce uzemněn. [19]

3.1.7 Měření odporu izolace

Dobrá stav izolace vinutí je důležitý pro spolehlivý chod transformátoru. Proto měření odporu izolace patří mezi nejstarší diagnostické metody u výkonových transformátorů. Pokles odporu izolace je nejčastěji spojen s vlivem vlhkosti a nečistot, protože odpor citlivě reaguje na nejslabší místo izolačního systému. [16]

Testy izolačního odporu se provádí na každém jednotlivém vinutí, jádře a na stahovacích šroubech. Když se provádí zkouška na vinutí a pokud jsou fáze spojeny dohromady, tak je nutné, aby kterýkoli z neutrálních vodičů (v případě zapojení do hvězdy nebo mezifázového spojení v případě trojúhelníku) tvořilo jedno spojení mezi měřicím přístrojem a vinutím. VN a NN vinutí jsou zkoušena odděleně a v obou případech je postup stejný. V případě stahovacích šroubů je každý šroub testován samostatně. [17]

Měl by se stanovit přesný odpor izolace každého odděleného vinutí proti zemi nebo mezi každým vinutím a pak se může určit ochrana měřicího přístroje. Například pro měření odporu izolace VN vinutí k zemi je vývod měřicího přístroje připojen k jedné svorce vinutí vysokého napětí, zemnicí vodič k nádrži transformátoru a ochranný vodič k vinutí nízkého napětí. Propojením vinutí a přístroje není započítáván v přístroji jakýkoliv unikající proud z VN vinutí k NN vinutí a takto se získá přesné měření odporu izolace VN k zemi. [17]

Odpor izolace se odečítá v časech 15 sec – R_{iZ15} a 60 sec – R_{iZ60} od počátku měření při stejnosměrném napětí 2,5 kV (nemělo by překročit jmenovité napětí stroje). Měří se za normálních podmínek při okolní vzdušné vlhkosti menší než 90 % a při teplotě transformátoru větší než 10 °C. [16, 22]

Naměřené hodnoty izolace jsou výchozí pro určení minutového polarizačního indexu p_{i1} .

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} [-] \tag{3.1}$$

kde i_{15} je absorpční proud odečtený 15 s po přiložení napětí,
 i_{60} je absorpční proud odečtený 60 s po přiložení napětí. [16]

Časová konstanta τ je další veličinou, která charakterizuje stav izolačního systému. Absolutní velikost časové konstanty je nezávislá na geometrických vlastnostech vinutí, což v praxi umožňuje objektivně hodnotit izolační systémy bez ohledu na napětí, výkon a typ. Časová konstanta je stanovena z naměřených hodnot izolačního odporu a kapacity izolace. [16]

$$\tau = R_{iZ60} \cdot C_{50} [s] \tag{3.2}$$

kde R_{iZ60} je izolační odpor v čase 60 s po zapojení měřicího napětí [M Ω],
 C_{50} je kapacita izolace při 50 Hz [μ F]. [16]

Tab. 3.1 Zapojení vinutí transformátorů při měření izolačního odporu [16]

Transformátory s dvojitým vinutím		Transformátory s trojitým vinutím	
měřené vinutí	uzemněno	měřené vinutí	uzemněno
VN	NN, k	VN	SN, NN, k
NN	VN, k	SN	VN, NN, k
VN + NN	k	NN	VN, SN, k
		VN + SN	NN, k
		VN + SN + NN	k

3.1.8 Kontrola spojení vinutí

Jsou-li na některých vinutích paralelní větve, nebo vznikají-li při přepínání přepínatelných transformátorů, kontrolují se na konci nespojených větví rozdíly napětí mezi jednotlivými větvemi voltmetrem. I malé rozdíly mohou způsobit značné vyrovnávací proudy a tím vzrůst magnetizačního proudu a ztrát při chodu naprázdno. Příčinou vyrovnávacích proudů může být proražení nebo poškození izolace vodičů paralelních větví při stahování vinutí, proříznutí izolace závitů nebo rozdílný počet závitů v jednotlivých větvích. [17, 19]

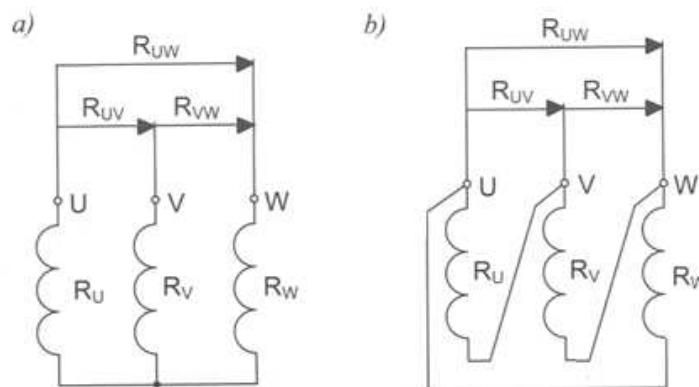
3.1.9 Měření odporů vinutí

Odpor se měří pro všechna vinutí transformátoru jak na straně nižšího napětí, tak i na straně vyššího napětí. Odpor se musí změřit na všech odbočkách a při všech polohách přepínače odboček vinutí. Odpory obou VN a NN vinutí mohou být měřeny jednoduše voltampérovou metodou. Voltampérová metoda není zcela uspokojivá, a proto se používá více přesná metoda, jako je měření Wheatstoneovým nebo Thomsonovým můstkem. [16, 17]

Při měření odporu jednoho vinutí se musí zajistit, aby ostatní vinutí byla rozpojena. Pokud jsou dostupné všechny vývody vinutí, měříme odpor na každé fázi zvlášť. Pokud jsou fáze zapojeny do hvězdy nebo do trojúhelníku, měříme odpor na začátku vinutí mezi dvojicemi svorek a z těchto hodnot můžeme dopočítat odpor jednotlivých fází. [16]

Činný odpor se určí změřením odporů mezi svorkami U, V, W, tedy R_{UV} , R_{UW} , R_{VW} . Za předpokladu, že se potřebuje jen střední hodnota odporu jedné fáze, nebo pokud se hodnoty odporů mezi svorkami téměř neliší, můžeme určit střední hodnotu odporu fáze R_f z naměřených hodnot podle vztahu [16]:

$$R_f = \frac{1}{6} (R_{UV} + R_{UW} + R_{VW}) [\Omega] \quad (3.3)$$



Obr. 3.3 Možnosti zapojení vinutí: a) vinutí spojené do hvězdy, b) vinutí spojené do trojúhelníku (překresleno z [16])

3.1.10 Měření převodu napětí a ověření fázového posunu

Převod napětí se musí měřit na každé odbočce. Musí se ověřovat polarita jednofázových transformátorů a značka spojení trojfázových transformátorů. Jestliže je použito měření napětí, napětí obou vinutí musí být měřeno současně. [21, 23]

Fázový posuv se udává hodinovým úhlem (1 hodina = 30°) a určuje se mezi stejně označenými svorkami výstupního a vstupního napětí. Shodný hodinový úhel je jedna z nezbytných podmínek pro správný paralelní chod transformátoru. [16]

Hodinový úhel můžeme určit využitím měření napětí transformátoru voltmetrem. Propojíme vodič dvě stejně označené svorky vyššího a nižšího napětí (např. U, u). Na stranu s vyšším napětím se přivede snížené souměrné trojfázové napětí a voltmetrem se změří jednotlivá napětí ($U_{uv}, U_{uw}, U_{ww}, U_{vv}, U_{vw}, U_{vw}, U_{uv}, U_{vw}, U_{uw}$). [16]

Pokud máme změřeny hodnoty napětí, tak je možné určit hodinový úhel jejich porovnáním pomocí *Tab. 3.2*.

Tab. 3.2 Určení hodinového úhlu ze srovnávacích hodnot napětí naměřených mezi svorkami [16]

1	2	3	4
$U_{Vv} = U_{Ww}$ $U_{Vw} = U_{Wv}$	$U_{Vv} < U_{Vw}$		0
	$U_{Vv} > U_{Vw}$		6
$U_{Vv} = U_{Wv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} < U_{Vw}$		1
	$U_{Vv} > U_{Vw}$		7
$U_{Vv} = U_{Vw} = U_{Ww}$	$U_{Vv} > U_{Wv}$		5
	$U_{Vv} < U_{Wv}$		11
$U_{Vv} = U_{Ww}$	$U_{Vv} < U_{UV}$ $U_{Vw} > U_{UV}$		2
	$U_{Vv} < U_{UV}$ $U_{Vw} < U_{UV}$		10
	$U_{Vv} > U_{UV}$ $U_{Vw} > U_{UV}$	$U_{Vw} < U_{UV} + U_{uv}$	3
		$U_{Vw} = U_{UV} + U_{uv}$	4
	$U_{Vv} > U_{UV}$ $U_{Vw} < U_{UV}$	$U_{Wv} = U_{UV} + U_{uv}$	8
		$U_{Wv} < U_{UV} + U_{uv}$	9

3.1.11 Zkouška sníženým přiloženým napětím z cizího zdroje

Tato zkouška je určena k ověření výdržné elektrické pevnosti izolace při střídavém napětí fázových a nulových svorek a k nim připojeným vinutím vůči ostatním vinutím a uzemněným částí. Izolační systém je tvořen izolací vodičů a válci z transformátorové lepenky. Napětí se přivádí na všechny svorky vinutí současně včetně svorky N, takže nevznikne žádné mezizávitové napětí. [16, 24]

Zkouška se provádí na kompletně sestavených transformátorech. Snížené zkušební napětí, nejvýše 20 kV proti zemi [19], se přivádí po dobu 60 sekund mezi všechny propojené svorky vinutí a uzemněné vývody zbývajících vinutí, jádro, konstrukci, kovový kryt nebo nádobu. Zkouška se provádí s jednofázovým sinusovým střídavým napětím s frekvencí vyšší než 80 % jmenovité frekvence. Zkušební napětí se měří na straně vyššího napětí. Jako hodnota zkušebního napětí se bere vrcholová hodnota napětí dělená $\sqrt{2}$. [16, 19, 24]

Zkouška začíná na napětím nižším než je jedna třetina stanovené zkušební hodnoty a napětí by se mělo zvyšovat rychlostí v souladu s měřením. Zkouška končí snížením napětí na hodnotu nižší než je jedna třetina zkušebního napětí a následným vypnutím napětí. Nedojde-li k žádnému náhlému poklesu zkušebního napětí, zkouška je úspěšná. [24]

3.1.12 Měření naprázdno při sníženém napětí

Zkouší se pro kontrolu, jestli nevznikla ve vinutí po dotažení stahovací konstrukce spojení nakrátko. Nové olejové transformátory se zkouší před ponořením do oleje na jmenovité napětí do 35 kV. Transformátory se jmenovitým napětím vyšším než 35 kV lze za sucha zkoušet buď s nepropojenými spojkami skupin cívek VN, anebo napětím sníženým tak, aby napětí na jedné fázi nepřekročilo 20 kV proti zemi. Např. vinutí 110 kV ve hvězdě, tj. 63,5 kV na fázi, se zkouší při 20 kV na fázi, tj. při 31,5 % jmenovitého napětí. [19]

3.1.13 Zkouška těsnosti

Výrobce transformátoru musí dokázat zkouškou těsnosti, že nádoba nebude v provozu prosakovat.

Tlak nejméně 30 kPa nad normálním tlakem kapaliny by měl být aplikován a udržován po dobu 24 hodin pro transformátory větší než 20 MVA nebo 72,5 kV. U transformátorů pro nižší jmenovité údaje se aplikuje tlak po dobu 8 hodin. Zkouška se provádí buď použitím nádoby s kapalinou nebo tlakem plynu přes konzervátor. [21]

Použije-li se ke zkoušce voda, musí být nádoba dobře vysušena, aby nerezavěla a aby vlhkost nekazila transformátorový olej. [19]

Všechny kovové části jsou očištěny pískováním tak, aby byly odstraněny okuje, oxidy a sváry po svařování, a byl tak vytvořen dokonalý povrch pro lepší přilnavost penetrace a barvy. Vnitřek nádrže je natřen bílým nátěrem odolným proti oleji, který zajistí dobrou viditelnost případných úniků v průběhu vnitřní kontroly. [7, 17]

3.1.14 Kontrola kompletnosti transformátoru

Je-li vše v pořádku, transformátor se před vložením do nádoby vysuší v peci nejlépe ve vakuu s teplotou 110 až 120 °C. Doba sušení závisí na velikosti transformátoru. Po sušení se dotáhnou stahovací konstrukce vinutí, zkontroluje se izolační stav vinutí proti sobě a proti zemi, překontroluje se vzájemná poloha, opětná kontrola zajištění všech šroubů a výztuh, zda se nedeformovaly izolační části apod. Opět se překontroluje přiloženým napětím izolace stahovacích svorníků a postranic. Pak lze přikročit k plnění transformátoru olejem a k montáži průchodek. [19]

3.2 Finální zkoušky

Finální testování transformátoru spadá do tří kategorií:

- *Testy, které mají prokázat, že transformátor byl správně postavený.* Ty zahrnují měření převodu, polarity, odporu a přepínání odboček.
- *Testy prokazující funkčnost.* Jsou to zkoušky ztrát, impedance, nárůstu teploty a hlučnosti.
- *Testy, které mají prokázat, že transformátor by mohl být uspokojivý v provozu po dobu nejméně 30 let.* Testy v této kategorii jsou nejdůležitější a nejlépe obtížné sestavit: obsahují všechny dielektrické a přepětové testy a zkratovou zkoušku. [17]

Finální zkoušky ověřují funkčnost celých transformátorů – tedy zkoušky typové, kusové a zvláštní.

- **Typové zkoušky** jsou zkoušky provedené při podstatné změně konstrukce nebo na každém novém typu transformátoru, který je reprezentativní pro ostatní transformátory a prokazuje, že je v souladu s uvedenými požadavky, které nejsou pokryty kusovými zkouškami.
- **Kusové zkoušky** se dělají na všech transformátorech.
- **Zvláštní zkoušky** jsou zkoušky, na rozdíl od typových či kusových, dohodnuté mezi výrobcem a zákazníkem. [16, 17]

Tab. 3.3 Zkoušky transformátorů a jejich rozdělení do jednotlivých skupin [16]

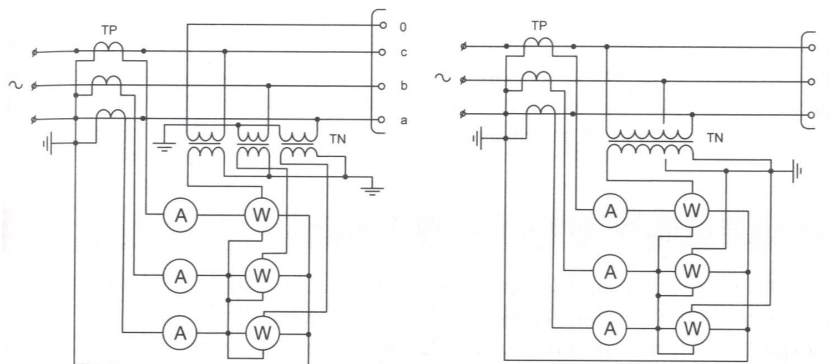
Název zkoušky nebo měření	zkouška		
	typová	kusová	zvláštní
Měření izolačního odporu	+	+	-
Měření odporu vinutí za studena stejnosměrným proudem	+	+	-
Měření převodu napětí naprázdno na všech odbočkách	+	+	-
Kontrola natočení fází	+	+	-
Zkouška přiloženým napětím z cizího zdroje	+	+	-
Zkouška indukovaným napětím	+	+	-
Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno	+	+	-
Měření charakteristiky naprázdno	+	+	-
Měření ztrát nakrátko a napětí nakrátko	+	+	-
Oteplovací zkouška	+	+	-
Zkouška elektrické pevnosti izolace atmosférickým impulzem:			
a) na vinutí se jmenovitým napětím do 132 kV	+	-	-
b) na vinutí se jmenovitým napětím nad 132 kV	+	+	-
Měření ztrátového činitele a kapacity vinutí na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
Zkratová zkouška			
Měření nulové složky reaktance na transformátoru			
a) se jmenovitým napětím menším než 110 kV	-	-	+
b) se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	-	-	+*)
Měření hluku na transformátorech			
a) s výkonem do 1600 kVA včetně	+	-	-
b) s výkonem nad 1600 kVA	-	-	+
Zkouška přepínače odboček	+	+	-
Zkouška el. pevnosti izolace spínacími impulzy	-	-	+
Měření částečných výbojů	-	-	+
Měření ochrany rádiového příjmu před rušením	-	-	+
Zkouška oleje pro transformátory s olejovou náplní			
a) zkouška průrazného napětí oleje	+	+	-
b) měření obsahu vody v oleji transformátorů se jmenovitým napětím 110 kV a vyšším	+	+	-
c) měření tgδ, R ₀ a ε _r oleje transformátorů se jmenovitým výkonem 110 kV a vyšším	+	+	-
+ vykonává se; - nevykonává se			
*) Pro transformátory určené pro energetiku – typová zkouška			

3.2.1 Měření impedance nakrátko a ztrát nakrátko

Impedance nakrátko a ztráty nakrátko se měří při jmenovité frekvenci po přiložení napětí na svorky jednoho vinutí a zároveň zkratováním sekundárních svorek. Na svorkách zkratovaného výstupního vinutí můžeme naměřit napájecí proud. Ten by měl být roven příslušnému jmenovitému proudu v napájecím nebo zkratovaném vinutí (rozhoduje menší hodnota). Z výstupního vinutí se neodebírá žádný výkon ani napětí. Výkon odebíraný z napájecího zdroje (ztráty nakrátko) je využíván na pokrytí ztrát Jouleova tepla ve vinutích. Měření by mělo být provedeno rychle, aby zvyšování teploty nezpůsobilo znatelné chyby. [16, 21]

Ztráty nakrátko jsou Jouleovými ztrátami v činných odporech obou vinutí, neboť ztráty v železe jsou při zapojení nakrátko zanedbatelné. Ztráty nakrátko se mění přímo úměrně s odporem vinutí a všechny ostatní ztráty pak nepřímo úměrně s odporem vinutí. Ztráty nakrátko také v sobě obsahují ztráty vířivými proudy ve vinutí a také tzv. přídavné ztráty. Hodnoty ztrát se přepočítávají na provozní teplotu vinutí transformátoru. Má-li vinutí izolaci třídy A, E nebo B, tak se obecně považuje teplota 75 °C. Má-li vinutí izolaci třídy F nebo H, tak se považuje teplota 115 °C. [16, 21, 23]

Impedance nakrátko se vyjadřuje reaktancí a střídavým odporem v sérii. Impedance je upravována na referenční hodnotu teploty za předpokladu, že reaktance je konstantní a že střídavý odpor odvozený ze ztrát nakrátko se mění, jak je uvedeno v předchozím odstavci. [21, 23]



Obr. 3.4 Zapojení pro měření ztrát nakrátko trojfázových transformátorů (převzato z [16])

Na transformátorech se třemi vinutími se měření provádějí na třech různých kombinacích vinutí. Výsledky se přepočítávají přiřazením impedancí a ztrát jednotlivým vinutím. [21]

3.2.2 Měření ztrát naprázdno a proudu naprázdno

Stav naprázdno je stavem, kdy je sekundární proud transformátoru $I_2 = 0$. Primárním vinutím teče magnetizační proud, který je potřebný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí. Tento proud se skládá ze dvou složek. První reprezentuje hlavní indukčnost a tedy i hlavní tok v magnetickém obvodu. Druhá složka reprezentuje hysterezní ztráty a ztráty vířivými proudy. [16, 23]

Ztráty naprázdno a proud naprázdno musí být měřeny na jednom z vinutí (zpravidla na vinutí nižšího napětí) při jmenovité frekvenci a při jmenovitém napětí. Zbývající vinutí se musí ponechat otevřená a vinutí, která by mohla být spojena do otevřeného trojúhelníku, musí mít trojúhelník uzavřen. Měření musí být provedeno při 90 % a 110 % stanoveného napětí. [16, 21]

Ztráty naprázdno ΔP_0 zahrnují ztráty v železe ΔP_{Fe} a výkon spotřebovaný měřicími přístroji P_w . [16]

$$\Delta P_0 = P - P_w \quad (3.4)$$

kde ΔP_0 jsou ztráty naprázdno [W]

P jsou ztráty z údajů wattmetru [W]

P_w je výkon spotřebovaný měřicím přístroji [W]

U trojfázového transformátoru je třeba volit vinutí a připojení ke zdroji výkonu tak, aby bylo zajištěno symetrické a sinusové napětí ve všech třech vinutí. Transformátor by měl mít přibližně teplotu okolí v továrně. Zkušební napětí se musí nastavit podle voltmetru měřícího střední hodnotu napětí se stupnicí efektivních hodnot sinusové vlny, která má stejnou střední hodnotu. Odečet tohoto voltmetru je U' . Zároveň se musí připojit paralelně k voltmetru na střední hodnotu voltmetr, který měří efektivní hodnotu napětí a zaznamenává se na něm odečtená hodnota napětí U . [21]

Jestliže se při zkoušce trojfázového transformátoru napájí vinutí zapojené do trojúhelníku, tak se musí měřit napětí mezi fázovými svorkami. Jsou-li napájena vinutí zapojená do YN nebo ZN, tak se musí měřit napětí mezi fázovými svorkami a svorkou N. Napětí mezi fázovými svorkami může být určeno z měření mezi fázovou svorkou a svorkou N, ale napětí mezi fázovou svorkou a svorkou N nesmí být odvozeno z měření mezi fázovými svorkami. [21]

Tvar vlny zkušebního napětí je vyhovující, jestliže rozdíl v odečtených hodnotách U' a U nepřesahuje 3 %. Jestliže je rozdíl větší než 3 %, tak platnost zkoušky závisí na dohodě. Větší rozdíl by mohl být akceptovatelný při vyšším napětí než je jmenovité. [21]

$$d = \frac{U' - U}{U'} \quad (3.5)$$

Efektivní hodnota proudu naprázdno je měřena současně se ztrátami. Pro trojfázový transformátor se bere střední hodnota odečtených hodnot ve všech třech fázích. Ztráty naprázdno nesmí být upravovány na jakýkoliv účinek teploty. [21]

3.2.3 Zkoušky přepínačů odboček

Na plně sestaveném transformátoru musí být na přepínači provedeny následující zkoušky:

- a) Na nenapájeném transformátoru musí být provedeno osm úplných cyklů funkce (jeden cyklus zahrnuje přepnutí z jedné krajní odbočky do opačné krajní odbočky a zase zpět);
- b) Na nenapájeném transformátoru a na transformátoru s pomocným napětím sníženým na 85 % jeho jmenovité hodnoty se provádí jeden úplný cyklus funkce;
- c) Na transformátoru napájeném jmenovitým napětím o jmenovité frekvenci se provádí jeden úplný cyklus funkce;
- d) S jedním vinutím zkratovaným a pokud možno se jmenovitým proudem v odbočkovém vinutí se provede 10 cyklů napříč rozsahem dvou stupňů na každé straně, odkud působí hrubý nebo reverzační radič odboček nebo jinak v okolí střední odbočky (přepínač proběhne 20krát přes přepínací pozice). [21]

3.2.4 Kontrola izolace jádra a kostry

Tato zkouška musí být vykonána na všech transformátorech ponořených do kapaliny obsahující izolaci, která odděluje jádro a kostru nebo kostru a nádobu.

U transformátorů, kde není přístupné spojení jádra a kostry se zemí, když je transformátor plněn kapalinou, se musí zkusit izolace stejnosměrným napětím 500 V po dobu 1 minuty bez průrazu před tím, než bude aktivní část instalována v nádobě.

U transformátorů, kde je přístupné spojení jádra a kostry se zemí, když je transformátor plněn kapalinou, se musí izolace zkusit stejnosměrným napětím 2 500 V po dobu 1 minuty bez průrazu po tom, kdy transformátor bude zaplněn kapalinou. [21]

3.2.5 Oteplovací zkouška

Princip zkušební metody se zakládá na oteplení transformátoru na ustálený teplotní stav jeho zatěžováním, kdy v aktivních částech konstrukce dochází ke ztrátám činné energie a oteplení částí nad teplotu okolí. Zkouška je prováděna při teplotě okolí od 10 °C do 35 °C a ověřuje, jestli oteplení jednotlivých částí vyhovují předpisům pro oteplení. [25]

Oteplovací zkoušky se provádějí na kompletně sestavených transformátorech. Není nutné montovat části, které nemají na tepelný chod vliv. Transformátory se zkouší s vlastním chladičím systémem. Účelem zkoušky je určit:

- Oteplení horní vrstvy oleje a střední oteplení oleje v ustáleném stavu s přihlédnutím k celkovým ztrátám;
- Střední oteplení vinutí při jmenovitém proudu pro střední oteplení kapaliny;
- Oteplení povrchu magnetického obvodu a konstrukčních prvků. [16, 25]

Toho lze dosáhnout:

- a) Metodou přímého zatížení, kdy se jedno vinutí napájí jmenovitým napětím a druhé vinutí se připojí na zatížení odpovídající jmenovitému proudu.
- b) Metodou vzájemného zatížení, kdy se zkoušený transformátor spojí paralelně s jiným transformátorem napájeným stejným jmenovitým napětím, který má stejnou skupinu zapojení jako zkoušený transformátor.
- c) Zkouškou nakrátko, kdy se jedno vinutí spojí nakrátko a druhé se napájí napětím. Kmitočet se nastaví tak, aby se ve vinutích ustálil proud, kde se ztráty rovnají celkovým jmenovitým ztrátám. Neměl by se lišit o více než 2 %. Během této zkoušky by neměl být transformátor vystaven jmenovitému napětí a jmenovitému proudu současně, nýbrž vypočteným celkovým ztrátám, získaných ze ztrát nakrátko při referenční teplotě a ze ztrát naprázdno. [16, 25]

Hodnoty se vypočítávají jako rozdíl teplot jednotlivých částí zjištěných při zkouškách a teploty chladičského prostředí.

- **Měření teploty chladiva**

Teplota chladičského vzduchu se měří teploměry ponořenými do nádoby o objemu nejméně 0,001 m³ naplněné olejem po dobu 2 hodin. Povrch nádoby by měl dostatečně odrážet tepelné záření (chránit např. hliníkovou fólií). Dále by měla být chráněna před vzdušnými proudy.

Při přirozeném nebo nuceném vzduchovém chlazení a též i při přirozeném olejovém chlazení se teploměry umisťují ve středu výšky nádoby na nejméně 3 stranách transformátoru a ve vzdálenosti 1 až 2 metry od povrchu nádoby.

Při nuceném vzduchovém chlazení se teploměry umisťují na vstup vzduchu do chladiče ve vzdálenosti nejméně 1 metru od povrchu transformátoru. Pokud nelze tuto podmínku splnit,

měříme výše popsaným postupem. Při chlazení olej-voda se měří teplota chladicí vody na místě, kde voda vstupuje do chladiče.

Teplota chladicího vzduchu a vody se získá aritmetickým průměrem nejméně 3 měření s intervalem mezi měřeními 1 hodina. Teplota chladicího vzduchu by se měla držet na konstantní hodnotě. [16]

- **Teplota v horní vrstvě kapaliny**

Teplota v horní vrstvě kapaliny se měří senzory (teploměrem nebo termočlánkem) ponořenými do izolační kapaliny v horní části nádoby nebo v jímkách na víku transformátorové nádoby.

Doporučený počet jímek:

- Jmenovitý výkon do 100 MVA 3 jímky;
- Jmenovitý výkon od 20 MVA do 100 MVA 2 jímky;
- Jmenovitý výkon do 20 MVA 1 jímka.

Umístění snímačů by se mělo volit tak, aby bylo možné měřit teplotu v horní vrstvě oleje nad odpovídajícími izolačními válci s vinutími. U chladičů mimo transformátor se teploměry umísťují do potrubí na výstupu transformátoru k chladiči. [16, 25]

- **Teploty dolní a střední vrstvy kapaliny**

Teplota dolní vrstvy kapaliny vyjadřuje teplotu kapaliny, která vstupuje do vinutí v její dolní části. Prakticky to označuje teplotu oleje, která se vrací z chladicího zařízení do nádoby. Teplota dolní vrstvy kapaliny se zjišťuje snímači, které jsou umístěny ve zpětném potrubí chladičů nebo radiátorů. Pokud je více chladicích zařízení, musí se použít více senzorů a bere se jejich průměrná hodnota. [16, 25]

Rozdíl střední teploty kapaliny, který se určuje např. jako rozdíl teplot horních vrstev kapaliny a polovičního rozdílu teplot na vstupu a výstupu z chladicí soustavy. Rozdíl teplot na vstupu a výstupu z chladicí soustavy se určuje:

1. *U transformátorů s nuceným oběhem oleje* – podle rozdílu teplot oleje na vstupu a výstupu z chladiče.
2. *U transformátorů s přirozeným a nuceným vzduchovým chlazením pomocí radiátorů* – podle rozdílu teplot vnějšího povrchu hrdla na vstupu do radiátoru a na výstupu z radiátoru.
3. *U transformátorů s hladkou, vlnovou a trubkovou nádobou* – podle rozdílu teplot vnějšího povrchu nádoby ve výšce odpovídající hornímu a spodnímu okraji vinutí. [16]

Pokud nejsou k dispozici údaje o rozdílu teplot u transformátorů do výkonu 2500 kVA s přirozeným olejovým chlazením a hladkou nebo vlnovou nádobou, pak můžeme brát střední oteplení oleje nad teplotu chladiva jako 0,8násobek oteplení horních vrstev oleje. [16]

- **Stanovení střední teploty vinutí**

Střední teplota vinutí se určí měřením odporu na konci zkoušek podle vztahu:

$$\vartheta_W = \frac{R_2}{R_1} \cdot (235 + \vartheta_{W1}) - 235 \quad \text{pro měď,} \quad (3.6)$$

$$\vartheta_W = \frac{R_2}{R_1} \cdot (225 + \vartheta_{W1}) - 225 \quad \text{pro hliník,} \quad (3.7)$$

kde ϑ_W je střední teplota vinutí (v okamžiku vypnutí) [°C],

R_1 je odpor vinutí při teplotě ϑ_{W1} [Ω],

R_2 je odpor vinutí při teplotě ϑ_W [Ω],

ϑ_{W1} je teplota při odečtu hodnoty odporu R_1 [°C]. [16, 25]

Odpor R_1 se měří za studena. Odpor R_2 se měří po odpojení od napájecího zdroje nebo metodou superpozice. Pokud je měření odporu vinutí nepřijatelné (např. vinutí s nízkým odporem, kde je přechodový odpor kontaktů srovnatelný s aktivním odporem), pak měříme střední teplotu vinutí několika termočlánky umístěných na vnější ploše. U trojfázových transformátorů se měření provádí přednostně na prostředním sloupku. [16, 25]

- **Teplota konstrukčních prvků, magnetického obvodu a oleje v jejich blízkosti**

Toto měření se provádí pro transformátory o výkonu větším než 100 MVA. Provádí se pomocí termočlánků sestavených z dvojice vodičů. Jeden konec termočlánku se vkládá do nádoby s kapalným dielektrikem s nulovou teplotou a druhý konec do kapalného dielektrika, kde se jeho teplota mění v rozsahu od 0 do 130 °C po 3 až 5 °C a poznamenávají se údaje z měřicího přístroje a teploměru. [16]

3.2.6 Stanovení hladiny zvuku

Základní jednotkou pro výpočet hluku z transformovny je hladina akustického tlaku. Závisí na typu transformátoru, jeho chlazení, na počtu a umístění, na rozměrech transformovny a na akustické pohltivosti vnitřních povrchů. [26]

V transformovně s jedním transformátorem umístěn uprostřed stěn a stropu, které nemají zvýšenou akustickou pohltivost a mají takový rozměr, který brání vzniku axiálních rezonancí,

je maximální hladina $L_{pA \max}$ dána vzorcem: [26]

$$L_{pA \max} = 26 + L_{PA} - 13 \cdot \log V$$

kde $L_{pA \max}$ je maximální hladina akustického tlaku A [dB(A)]
 L_{PA} je hladina akustického výkonu A transformátoru [dB(PA)]
 V je vnitřní objem transformovny [m³]

Pokud je v transformovně více transformátorů provozováno současně, je tam součtová maximální hladina akustického tlaku. Pokud je transformátor umístěn jinde než uprostřed transformovny, např. ve středu stěny, tak se L_{PA} zmenší o 2 dB(PA) nebo pokud je umístěn v rohu, tak se L_{PA} zvětší o 3 dB(PA). [26]

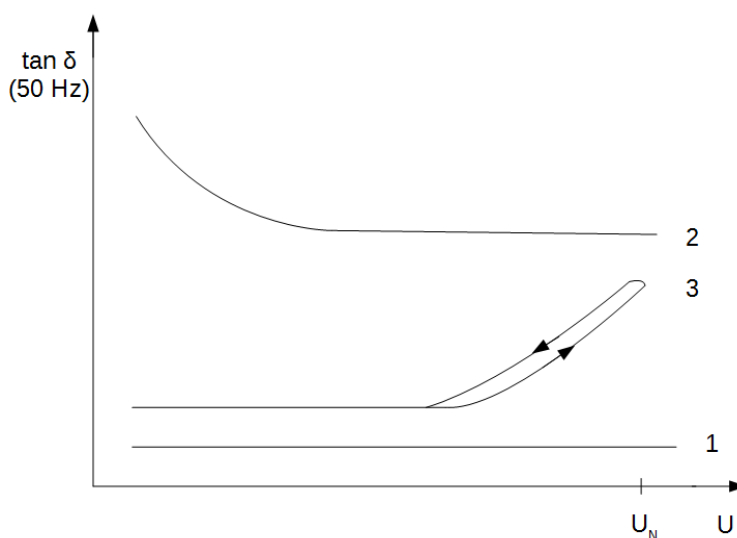
Z provozované transformovny se může hluk šířit:

- vzduchem větracími otvory;
- stavební konstrukcí transformovny (stěnami, stropem, dveřmi, podlahou). [26]

Zrušit přenos hluku přes vývody transformátoru a přes uzemnění se může zajistit tak, že vývody NN transformátoru nesmí být se stavební konstrukcí transformovny spojeny natvrdo (např. přes izolátor), ale řešit tyto přípoje kabelově. Nebo se může umístit do VN přívodů a do uzemnění transformátoru měkké spojky z plochého měděného vodiče. [26]

3.2.7 Měření ztrátového činitele ($\tan \delta$) a kapacit vinutí

Ztrátový činitel charakterizuje obraz celkového stavu izolace. Velikost ztrátového činitele (ovlivněna pevnou i kapalnou částí dielektrika) udává, jestli je izolační soustava navlhlá nebo



Obr. 3.5 Průběhy ztrátového činitele v závislosti na napětí (překresleno z [27])

zestárlá. Ztrátový činitel reaguje také omezenou měrou na vznik částečných výbojů. [16, 23]

Na *Obr. 3.5* se může ztrátový činitel v závislosti na napětí následujícím způsobem ohodnotit:

- nenavlhá, kvalitní izolace (1) – nízký ztrátový činitel, nezávislý na hodnotě přiloženého napětí,
- navlhá izolace (2) – vysoká hodnota ztrát. Obsah vlhkosti v izolaci směřuje při zvyšování napětí k poklesu ztrátového činitele,
- suchá, kvalitní izolace (3) – Při nízkých hodnotách napětí neukazuje na průběhu podstatné změny. Aktivací částečných výbojů se přispívá k nárůstu ztrátového činitele v tzv. „ionizačním koleně“. Působením změn výšky zapalovacího a zhasacího napětí při nasazení tzv. ionizace je na tomto místě sledovaná značná hystereze. [16, 27]

Kapacita vinutí se pro hodnocení obvykle nepoužívá, ale její změny mohou ukazovat poškození izolace a dokonce přispívat k jejich odhalení. Velikost kapacity vinutí je proto sledována jako znak kvality izolantu, který by se v průběhu provozu neměl příliš lišit. [16]

Kapacita vinutí a ztrátový činitel se měří můstkovou metodou a střídavým napětím 10 kV popř. nejbližší nižší zkušební napětí z řady 0,5-1-2-5 kV. Měření se provádí při teplotě kolem 20 °C. Měření je značně citlivé na okolní vliv parazitních vazeb. [16]

3.2.8 Měření nulové složky impedance

Impedance nulové složky se měří při stanovené frekvenci (dovolená odchylka je 1 %) na sestaveném transformátoru (pro olejové navíc s naplněnou nádobou olejem) mezi síťovými svorkami vinutí zapojeného do hvězdy nebo do lomené hvězdy navzájem propojenými a vyvedenou svorkou uzlu. V případě transformátoru s přídatným vinutím zapojeným do trojúhelníku by neměla být hodnota zkušebního proudu příliš velká kvůli velikosti proudu ve vinutí spojeného do hvězdy vzhledem k jeho trvání. Impedance nulové složky u vinutí s odbočkami se měří na stanovené odbočce. Výsledná hodnota nulové složky se určuje podle vztahu: [16, 21]

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I}, \quad (3.8)$$

kde Z_0 je impedance nulové složky [Ω],

U je zkušební napětí [V],

I je zkušební proud [A].

Velikost a trvání průchodu proudů se určují zkouškami, které předepisuje konstrukce transformátoru. Z důvodu možnosti vysokého ohřevu kovových částí transformátoru nesmí trvat průchod proudu při měření impedance nulové složky příliš dlouho. [16]

3.2.9 Zkratová zkouška

Transformátory musí vydržet bez poškození účinky zkratu trvajícím 2 sekundy, pokud není stanoveno jinak [28]. Zkouší se náhlým zkratem na výstupním vinutí, při němž vstupní vinutí se napájí z „pevné sítě“, jejíž napětí je konstantní po dobu zkratu. [19]

Zkratové proudy namáhají vinutí mechanickými silami, které musí konstrukce transformátoru bezpečně vydržet. Zkratové proudy zároveň oteplují vinutí, které již před zkratem mělo teplotu vyvolanou trvalým zatížením. Na začátku zkratových zkoušek musí být průměrná teplota vinutí mezi 10 °C a 40 °C. [19, 28]

Posoudit, zda transformátor obstál při zkratové zkoušce, lze teprve po jeho revizi, tj. po zevrubné prohlídce vinutí a stahovací konstrukce po vyjmutí z nádoby. Doporučuje se, aby zkušebna kontrolovala dílenské provedení vinutí před ponořením transformátoru do oleje (rovnoměrnost stažení vinutí, uchycení vývodů, správné podložení všech vinutí atd.). [19]

Aby transformátor byl považován za vyhovující při zkratové zkoušce, musí být splněno:

- 1) Výsledky zkratových zkoušek neodhalují žádnou chybnou vlastnost.
- 2) Výrobní zkoušky, které byly provedeny, byly úspěšně zopakovány a zkouška atmosférickým impulsem byla úspěšně vykonána.
- 3) Aktivní části vytažené z nádoby nevykazují žádné defekty jako posunutí, významné změny plechů, spojů, podpěrných konstrukcí, které by mohly ovlivnit bezpečný provoz.
- 4) Není objevena žádná stopa vnitřních elektrických výbojů
- 5) Hodnoty reaktance nakrátko se neliší od původních hodnot o více než 1 %. [28]

3.2.10 Dielektrické zkoušky

Tab. 3.4 Požadavky a zkoušky pro různé kategorie vinutí [24]

Izolace	Um < 72,5 kV	72,5 kV < Um < 170 kV		Um > 170 kV
	Plná	Plná	Redukovaná	Plná a redukovaná
Zkouška plnou vlnou atmosférického impulsu (LI) pro fázové svorky	Typová	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Nepoužívá se (zahrnuta v LIC)
Zkouška useknutým atmosférickým impulzem (LIC) pro fázové svorky	Zvláštní	Zvláštní	Zvláštní	Výrobní kusová
Zkouška atmosférickým impulzem (LIN) pro svorku N	Zvláštní	Zvláštní	Zvláštní	Zvláštní
Zkouška spínacím impulzem pro fázové svorky (SI)	Nepoužívá se	Zvláštní	Zvláštní	Výrobní kusová
Zkouška přiloženým napětím (AV)	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Výrobní kusová
Zkouška výdržným indukovaným napětím (IVW)	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Nepoužívá se
Zkouška indukovaným napětím s měřením částečných výbojů (IVPD)	Zvláštní ^a	Výrobní kusová ^a	Výrobní kusová ^a	Výrobní kusová
Zkouška fázové svorky výdržným střídavým napětím (LTAC)	Nepoužívá se	Zvláštní	Výrobní kusová	Zvláštní
Zkouška izolace pomocné elektrické kabeláže (AuxW)	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Výrobní kusová	Výrobní kusová

^a Požadavky na zkoušku IVW mohou být zahrnuty do zkoušky IVPD s tím, že pouze jedna zkouška bude považována.

- **Zkouška indukovaným napětím**

a) *Zkouška s plnou izolací nulového bodu vinutí VN*

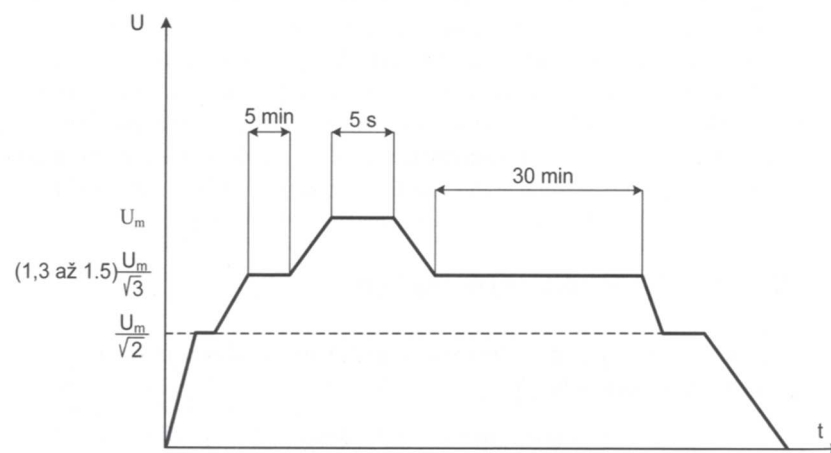
Tato zkouška se provádí kvůli kontrole elektrické pevnosti izolace podél zkoušeného vinutí, mezi fázemi vůči zemi a dalšími vinutími. Testuje se v provozním zapojení stroje dvojnásobným jmenovitým napětím. Napětí mezi vývody nesmí překročit normalizované zkušební napětí a vývod nulového bodu musí být uzemněn. [16]

b) *Zkouška s redukovanou izolací nulového bodu vinutí VN*

Tato zkouška se používá pro kontrolu elektrické pevnosti izolace vývodů na vedení proti zemi a dalším vinutím, mezi fázemi a podél zkoušeného vinutí. Normalizovaná zkušební napětí se přikládá současně mezi vinutí VN a SN a zemí u vývodu sousedních fází rozmístěných vně. Magnetický obvod a nádoba musí být uzemněna. [16]

c) Zkouška dlouhodobým indukovaným napětím

Zkouška je provedena, když je nulový bod zkoušeného vinutí uzemněn. V zapojení do trojúhelníka je uzemněn jeden z vývodů a v zapojení do hvězdy je uzemněn nulový bod. Průběh zkušebního napětí v čase mezi fázovými vývody a nulovým bodem musí odpovídat schématu jako na obr. [16]



Obr. 3.6 Časový průběh zkušebního napětí při zkoušce dlouhodobým indukovaným napětím (převzato z [16])

V průběhu celé té zkoušky se měří částečné výboje. Během zvyšování a snižování zkušebního napětí se zaznamenává hodnota zapalovacího a zhašecího napětí. Transformátor zkoušce vyhověl, jestliže nedošlo k poklesu zkušebního napětí (nebo jeho useknutí) nebo v případě, jestliže amplituda zdánlivého náboje částečných výbojů měřená ze všech měřících svorek nepřekročila mezní hodnoty:

- 300 pC při napětí od $1,3 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ do $1,4 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$, kde U_m je amplituda napětí
- 500 pC při napětí od $1,5 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ bez tendence růstu amplitud v blízkosti mezních hodnot

Jestliže změřené hodnoty překračují tyto hodnoty, ale nejsou vyšší jak 3000 pC, tak pak by se měla provést analýza výsledků a určit místo vzniku. Pokud jsou vyšší jak 3000 pC, pak zdroj výbojů musí být odstraněn. [16]

• Zkouška atmosférickým impulsem

Tato zkouška zjišťuje, jestli je dostatečná elektrická pevnost mezi:

- jednotlivými vinutími;
- vinutím a zemí (kostrou, nádobou apod.);
- závity, vrstvami a cívkami každého vinutí. [16]

a) *Zkouška plnou vlnou atmosférického impulzu pro fázové svorky*

Tato zkouška se používá k ověření schopnosti vydržet působení rychlých přepětí atmosférických výbojů a testuje výdržnou pevnost, když je impulz přiložen k jeho fázovým svorkám. Zkouška zahrnuje vysokofrekvenční napěťové složky a vytváří nehomogenní namáhání ve vinutí, které je odlišné na rozdíl od namáhání zkouškou střídavým napětím. [24]

b) *Zkouška useknutým atmosférickým impulzem pro fázové svorky*

Tato zkouška obsahuje jak impulzy plným atmosférickým impulzem, tak i impulzy useknuté v týlu pro vytvoření velmi vysoké rychlosti změny napětí. Rozdíl oproti impulzům plné vlny je v tom, že useknutá vlna impulzu má vyšší vrcholovou hodnotu a zahrnuje vyšší frekvenční složky. Tato zkouška se provádí pro každé vinutí samostatně. [24]

c) *Zkouška atmosférickým impulzem na svorce N*

Tato zkouška se používá k ověření výdržného impulzního napětí svorky N a k ní vinutí připojená vůči zemi a ostatním vinutím a podél zkoušeného vinutí. [24]

- ***Zkouška spínacím impulsem***

Tato zkouška se využívá ke kontrole kvality vnitřní izolace. Metoda se zakládá na indukování zkušebního napětí ve zkoušeném vinutí přiložením spínacího impulzu k vinutí vyššího nebo nižšího napětí. Trojfázový transformátor se zkouší po fázích. [16, 24]

U vinutích zapojených do hvězdy s vyvedenou nulou se svorka N uzemňuje přímo nebo přes malou impedanci. Na zbývajících svorkách, které bývají propojené navzájem, ale ne se zemí, se objeví napětí opačné polarity a přibližně poloviční amplitudy. K omezení napětí opačné polarity je možné připojit vysokoohmové tlumící rezistory (5 k Ω až 20 k Ω) mezi nezkoušené fázové svorky a zem. [24]

Vinutí zapojená do trojúhelníku musí mít fázovou svorku uzemněnou přímo nebo přes malou impedanci. Ostatní fázové svorky zůstávají otevřeny. Zkoušky bývají uspořádány tak, aby pro každou fázovou zkoušku byla uzemněna jiná svorka. [24]

Zkušební napětí bývá záporné kvůli zmenšení rizika náhodného vnějšího přeskočků v obvodu. Napěťový impulz musí mít dobu vrcholu alespoň 100 μ s. Doba, po kterou po kterou napěťový impulz převyšuje 90 % vrcholové hodnoty, je stanovená přinejmenším 200 μ s a doba k nule (do poklesu napětí na nulu) bývá alespoň 1000 μ s. [16, 24]

3.2.11 Měření částečných výbojů

Částečné výboje vznikají v transformátorech na defektních místech. Defekty vznikají důsledkem nedokonalé výroby a dlouhodobého provozu transformátoru. Tato výbojová činnost ovlivňuje v podstatné míře vlastnosti izolačního systému. Jejich měřením docílíme k odhalení a prevenci poruchy a předcházením haváriím. Částečné výboje se sledují v izolaci závitů cívek, v cívkách samotných a průchodkách transformátorů. Při měření musí být vnější povrch průchodek suchý a čistý a průchodky musí být obstarány stíněním k odstranění korony. [16, 29]

K měření částečných výbojů se využívá galvanická a akustická metoda nebo jejich kombinace pro přesnější výsledky. [29]

- **Galvanická metoda měření**

Metoda je založena na pozorování přímých impulzů částečných výbojů, které se oddělí od napájecího napětí, na jehož hodnotu se superponují měřicí impedancí. Měření je prováděno měřičem výbojové činnosti a měřicí impedancí, která bývá navržena tak, že musí být schopna propustit proud tekoucím nulovým bodem při plném zkušebním napětí. Měří se při odpojeném primárním vedení transformátoru. Připojení se provádí pomocí impedance připojené k měřicím vývodům průchodek. [16]

Ještě než začne samotné měření, musí se nejprve kalibrovat měřicí obvod zdrojem kalibračních impulzů, které se postupně přivedou na všechny vývody transformátoru a změří se velikost útlumu impulzu. Pomocí změřených hodnot se vytvoří kalibrační matice, která slouží k odhadu místa vzniku částečných výbojů. Kalibrací je získán převodní součinitel K_{qi} ze vztahu: [16]

$$K_{qi} = \frac{q_0}{A}, \quad (3.9)$$

kde q_0 je náboj při kalibraci [F],

A je údaj měřicího přístroje [F].

Výsledek z měření částečných výbojů je nejvyšší hodnota součinu údaje měřicího přístroje a převodního součinitele. Výsledky jsou často ovlivněny rušením, proto se musí posoudit jeho vliv. Za vyhovující je považováno rušení nepřesahující 50 % úrovně užitečného signálu. Pro potlačení rušení se může použít napájení měřicích přístrojů přes síťový filtr nebo použít úzkopásmový detektor. [16]

Samotné měření se provádí na minimálně třech hladinách. Jedna hladina je pod jmenovitým napětím, druhá při jmenovitém napětí a třetí při 110 % jmenovitého napětí.

Na každé hladině se napětí udržuje pod dobu 5 minut a pozoruje se výbojová činnost. Je-li výskyt částečných výbojů v jedné lokalitě, bývá vyhodnocení výsledků velmi přesné. Pokud je lokalit více, bývá vyhodnocení velmi obtížné až zcela nemožné. [16]

- **Akustická metoda měření**

Metoda využívá mikrofonů, případně akustických detektorů, které snímají tlakové vlny. Vlny vznikají transformací elektromagnetické energie částečného výboje v mechanickou energii v podobě tlakové vlny. Vlny jsou šířeny olejem transformátoru a odrážejí se od konstrukčních částí. Po nárazu vlny na stěnu nádoby se vlnění rozdělí na příčné a podélné s různými rychlostmi šíření. [16]

Tab. 3.5 Rychlosti šíření tlakových vln [16]

	Rychlost zvuku podélné vlny [m/s]	Rychlost zvuku příčné vlny [m/s]
Transformátorový olej	1400	-
Ocel	5900	3200

Závěr

Během výroby se musí věnovat pozornost všem částem transformátoru, zejména izolačnímu systému. Pro co možná nejdelší životnost a nízké provozní náklady se během výroby nových transformátorů sleduje jejich technický stav s ohledem na požadavky zákazníka, platné normy, ekonomičnost a bezpečnost.

Konstrukce a výroba transformátorů nejsou v dnešní době nejmodernější technologie. Ve srovnání s mnoha obory inženýrství je pokrok pomalý a změna je pozvolná. Koneckonců je u transformátorů očekáváno, že budou mít dlouhou životnost. Většina transformátorů, která je v současné době v provozu, byla navržena před 20 nebo 30 lety s použitím postupů, které už v té době nebyly považovány za moderní.

Ale průmysl se mění. Byl zaveden jednotný evropský trh a jeho následky byly dobře vidět. Nastalo mnoho fúzí v průmyslu, několik dobře známých a uznávaných výrobců v Evropě a USA zmizelo. Výsledkem je, že průmysl se stal mezinárodním. Národní normy se vytrácí a začínají převládat evropské a mezinárodní normy.

Zajímavostí je velmi nízká opakovatelnost výroby. Kombinací je tolik, že téměř každý transformátor je originál. Firma SGB uvádí, že vyrábí více než 300 ks transformátorů ročně. To znamená navrhnout, vykonstruovat, vyrobit, vyzkoušet a vyexportovat přibližně jeden výkonový transformátor denně.

Přínos této bakalářské práce má spočívat v ucelení základních informací o výkonových transformátorech a především v následném popsání jednotlivých diagnostických metod.

Na začátku práce byl popsán výkonový transformátor a charakterizován z hlediska jeho příslušenství. Bylo uvedeno sestavení druhů vinutí, jak je vyrobeno jádro či nádoba nebo k čemu slouží konzervátor. Podstatná část práce je věnována podsystémům transformátoru. Transformátory se skládají z několika podsystémů, které se rozdělují na konstrukční, magnetické, elektrické, izolační a chladicí. V této kapitole je popsáno jejich složení a funkce. Nejobsáhlejší kapitola popisuje jednotlivé zkoušky prováděné během výroby a finální zkoušky výkonových transformátorů. Všechny kapitoly jsou zpracovány s ohledem na celkový rozsah bakalářské práce a čtenáři je předložena práce, jejímž studiem získá základní přehled o výkonových transformátorech a základní informace o jednotlivých principech diagnostických zkoušek.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 1: úvod-transformátory*. 1. vyd. Praha: Academica, 1980.
- [2] KOBRLE, Pavel. *Konstrukce výkonového transformátoru* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/trafo.pdf>
- [3] HARLOW, James H. *Electric power transformer engineering*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2012. ISBN 9781439856291.
- [4] CSANYI, Edvard. *Power Transformer Construction - The Core / EEP* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-construction-core>
- [5] CSANYI, Edvard. *Power Transformer Construction – Windings / EEP* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/power-transformer-construction-windings>
- [6] *RIA Power - Výkonové transformátory* [online]. [vid. 23. březen 2016]. Dostupné z: <http://www.riapower.cz/assets/RIA-files/PT/CG-Brochure-PowerTransformers-CZECH.pdf>
- [7] *ABB - Návod pro výkonový transformátor* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: http://vfservis.cz/files/000279_Navod_pro_vykonovy_transformator.pdf
- [8] *Transformer Insulating Oil and Types of Transformer Oil / Electrical4u* [online]. [vid. 23. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>
- [9] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. *Tepelné stárnutí izolačního systému olej-papír* [online]. 2007 [vid. 23. duben 2016]. Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/389/r0c1c13.pdf?sequence=1>
- [10] *Technický předpis třífázových olejových transformátorů výkonu 2,5 MVA až 12,5 MVA, v radiátorové nádobě s dilatační nádobou* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: <http://transformatory.cz/files/file/novetransformatory/TPR-302-CZ-olejovy-s-konzervatorem-2,5-12,5-MVA-BEZ.pdf>
- [11] LIBRA, Jiří. *Elektrická zařízení 3 - Transformátory* [online]. [vid. 16. květen 2016]. Dostupné z: <http://web.sstzr.cz/download/cat1/elektrotechnika/ez3-transformatory.pdf>
- [12] KONÍČEK, Václav. *Elektrické stroje* [online]. [vid. 21. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.vosaspsekrizik.cz/cs/download/studium/vos/el-stroje-a-pristroje/transformatory.pdf>
- [13] MAJLING, Eduard. *Transformátor – základní vlastnosti a dělení* [online]. 2015 [vid. 15. květen 2016]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/transformator-zakladni-vlastnosti-a-deleni/>
- [14] *Diagnostika Transformatorov* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: <http://web.tuke.sk/fei-kee/predmety/DvEE/8.DiagnostikaTransformatorov.doc>
- [15] *Transformer Cooling System and Methods / Electrical4u* [online]. [vid. 23. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.electrical4u.com/transformer-cooling-system-and-methods/>
- [16] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 9788073002329.
- [17] HEATHCOTE, Martin J a D. FRANKLIN. *The J & P transformer book*. 13th ed. Burlington, MA: Newnes, 2007. ISBN 9780750681643.
- [18] *Quality assurance* [online]. [vid. 21. březen 2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Quality_assurance

- [19] BAŠTA, Jan. *Měření na elektrických strojích. 2, Měření na transformátorech*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1959.
- [20] KOBLIŽEK, Vilém. *E – learningová podpora výuky* [online]. [vid. 28. květen 2016]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV.htm>
- [21] *Výkonové transformátory. část 1, Všeobecně: ČSN EN 60076-1*. Praha: Český normalizační institut. 1999
- [22] NEUMANN, Jacek. *Izolační odpor a úseky izolačního systému* [online]. [vid. 28. březen 2016]. Dostupné z: <http://www.eldiag.cz/cz/texty/izolacni-odpor-a-useky-izolacniho-systemu>
- [23] *Elektromagnetické stroje netočivé. Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem: ČSN 35 1086*. Praha: Český normalizační institut. 1982
- [24] *Výkonové transformátory. část 3, Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti: ČSN EN 60076-3*. Praha: Český normalizační institut. 2001
- [25] *Výkonové transformátory. část 2, Oteplení transformátorů ponořených do kapaliny: ČSN EN 60076-2 ED.2*. Praha: Český normalizační institut. 2012
- [26] *Vnitřní stanoviště transformátorů. Opatření proti hluku: PNE 38 1753*. Praha: ÚJV Řež, a.s. divize Energoprojekt Praha, oddělení 08508 Oborové normalizace energetiky. 2005
- [27] PORZEL, Richard, Ernst NEUDERT a Matthias STURM. *Diagnostik der elektrischen Energietechnik: Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl, 1996. ISBN 3816913644.
- [28] *Výkonové transformátory. část 5, Zkratová odolnost: ČSN EN 60076-5 ED.2*. Praha: Český normalizační institut. 2006
- [29] *Monitorovacie a diagnostické systémy transformátorov: zborník medzinárodnej konferencie (odborného seminára) konaného v dňoch 9.-7.11.2007 v priestoroch penziónu Martinov dvor, Fatranská ulica v Tepličke nad Váhom, okres Žilina*. Žilina: Žilinská univerzita, 2007. ISBN 9788080707781.