

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Diagnostika a monitoring průchodek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří SOUKUP  
Osobní číslo: E11B0465P  
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Komerční elektrotechnika  
Název tématu: Diagnostika a monitoring průchodek  
Zadávací 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. Uveďte základní typy průchodek.
2. Popište způsob výroby průchodek.
3. Popište off-line diagnostické metody a on-line monitoring průchodek.
4. Porovnejte a zhodnoťte off-line diagnostiku a on-line monitoring průchodek.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. V.Mentlík a kol. - Diagnostika elektrických zařízení, BEN 2008
2. Heathcote - J&P Transformer Book, 13th edition, Newnes 2007, ISBN 0750681640
3. Elektronické informační zdroje.
4. Internetové databáze (sciencedirect.com, IEEE, CIGRE)

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Jan Dončuk**


Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá průchodkami pro transformátory. Obsahuje stručnou historii, popis jednotlivých druhů průchodek a vysvětlení jejich konstrukce a výroby. Práce se také zabývá diagnostikou a monitoringem průchodek a to konkrétně popisem principů a porovnáním jednotlivých systémů.

## **Klíčová slova**

Průchodky, transformátor, diagnostika, monitoring, konstrukce.

## **Abstract**

The main subject of this bachelor work is transformer bushings. The work contains short history of bushings, description of their types and explanation of bushing construction and manufacture process. Off-line diagnostics and on-line monitoring systems and principles are also described and compared in this work.

## **Key words**

Bushings, transformer, diagnostics, monitoring, construction.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.6.2014

Jiří Soukup

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Dončukovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Mgr. Lucii Melenové za korektury textu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 HISTORIE PRŮCHODEK</b> .....	<b>12</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ TYPY PRŮCHODEK</b> .....	<b>15</b>
2.1 ROZDĚLENÍ PODLE IZOLAČNÍHO MÉDIA NA KONCÍCH .....	15
2.2 ROZDĚLENÍ PODLE KONSTRUKCE .....	15
2.3 ROZDĚLENÍ PODLE DRUHU IZOLACE .....	17
2.3.1 Vzduchem izolované průchodky .....	18
2.3.2 Olejem izolované průchodky .....	18
2.3.3 OIP – Oil impregnated paper .....	18
2.3.4 RBP – Resin bond paper .....	18
2.3.5 RIP – Resin impregnated paper .....	18
2.3.6 RIS – Resin impregnated synthetics .....	19
2.3.7 Plynem izolované průchodky .....	19
<b>3 KONSTRUKCE PRŮCHODEK</b> .....	<b>20</b>
3.1 ELEKTRICKÝ NÁVRH .....	20
3.2 MECHANICKÝ NÁVRH .....	21
3.3 TEPELNÝ NÁVRH.....	22
3.4 VODIČE.....	23
3.5 IZOLÁTORY .....	24
3.6 PŘÍRUBA .....	25
3.7 OLEJOVÁ NÁDRŽKA .....	25
3.8 SYSTÉM SVOREK .....	25
3.9 PŘIPOJOVACÍ TERMINÁLY .....	27
3.10 VÝROBA PRŮCHODKY .....	28
3.11 STANDARDY PRO PRŮCHODKY .....	28
<b>4 OFFLINE DIAGNOSTIKA</b> .....	<b>29</b>
4.1 ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \Delta$ .....	29
4.2 KAPACITA $C_1$ A $C_2$ .....	29
4.3 SVODOVÝ PROUD .....	30
4.4 TESTOVÁNÍ ZTRÁTOVÉHO ČINITELE A KAPACITY .....	30
4.4.1 GST (Grounded Specimen Test).....	32
4.4.2 Hot-guard test .....	32
4.4.3 UST (Ungrounded Specimen Test).....	33
4.4.4 Hot-collar test .....	33
4.4.5 Testování částečných výbojů .....	33
4.5 DGA (DISSOLVED GAS IN OIL ANALYSIS) .....	34
4.6 ANALÝZA VLHKOSTI.....	34
4.7 VIZUÁLNÍ PROHLÍDKA .....	34
4.8 ZKOUŠKY VÝROBNÍHO PROCESU .....	35
4.8.1 Typové zkoušky.....	35
4.8.2 Kusové zkoušky .....	37
4.8.3 Speciální zkoušky .....	37
<b>5 ONLINE MONITORING</b> .....	<b>38</b>
5.1 REFERENČNÍ SIGNÁL Z KAŽDÉ FÁZE.....	39



---

5.2	REFERENČNÍ SIGNÁL ZE DVOU STEJNÝCH PRŮCHODEK .....	39
5.3	REFERENČNÍ SIGNÁL Z ROZPTYLOVÉ KAPACITY .....	40
5.4	REFERENČNÍ SIGNÁL Z MĚŘÍČÍHO NAPĚŤOVÉHO TRANSFORMÁTORU .....	40
5.5	REFERENČNÍ SIGNÁL DOPOČÍTANÝ SYSTÉMEM .....	41
5.6	ABB TMU 100.....	41
5.7	MTE ZVCM-1001 .....	41
5.8	GE INTELLIX BMT 300 .....	42
5.9	WEIDMANN INSULOGICB.....	42
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>43</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>		<b>44</b>

## Seznam symbolů a zkratek

ASEA.....	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
RBP.....	Resin Bonded Paper
OIP.....	Oil Impregnated Paper
CIBA.....	Company for Chemical Industry Basel
RIP.....	Resin Impregnated Paper
ERIP.....	Epoxy Resin Impregnated Paper
GE.....	General Electric
ANSI.....	American National Standards Institute
IEEE.....	Institute of Electrical and Electronics Engineers
RIS.....	Resin Bonded Synthetics
SF <sub>6</sub> .....	Fluorid sírový
HVDC.....	High-voltage direct current
U.....	Elektrické napětí
U <sub>(d)</sub> .....	Elektrické napětí závislé na průměru
E <sub>(d)</sub> .....	Inzenzita elektrického pole závislá na průměru
D <sub>2</sub> .....	Průměr vnější vrstvy izolace
D <sub>1</sub> .....	Průměr vnitřní vrstvy izolace
ε <sub>0</sub> .....	permitivita vakua
ε <sub>r</sub> .....	permitivita dielektrika
P <sub>C</sub> .....	Celkové ztráty
P <sub>d</sub> .....	Ztráty v dielektriku
P <sub>o</sub> .....	Ohmické ztráty
C <sub>1</sub> .....	Hlavní kapacita průchodky
tan δ.....	Ztrátový činitel
ρ.....	Rezistivita
d <sub>cs</sub> .....	nominální hodnota povrchové dráhy podle normy
U <sub>m</sub> .....	maximální napětí
k <sub>d</sub> .....	korekční faktor podle normy
IEC.....	International Electrotechnical Commission
I <sub>C</sub> .....	Kapacitní proud
I <sub>R</sub> .....	Rezistivní proud
C <sub>2</sub> .....	Vedlejší kapacita průchodky
GST.....	Grounded Specimen Test
UST.....	Ungrounded Specimen Test
DGA.....	Dissolved Gas in oil Analysis
CO.....	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub> .....	Oxid uhličitý
A/D.....	Analogově Digitální
GPS.....	Global Positioning System
LAN.....	Local Area Network

## Úvod

Transformátory jsou dnes velmi často používaná elektrotechnická zařízení. Většina vysokonapěťových transformátorů používá izolační systém, který se skládá z oleje a papíru což znamená, že samotné zařízení musí být uzavřeno v nějaké nádobě. Touto koncepcí vzniká problém a to jak přenést elektrickou energii ven skrz uzemněnou skříň transformátoru. Jako efektivní a poměrně levné řešení se ukázalo použití průchodek. Průchodky jsou zařízení, která jsou instalována na nádoby transformátorů, kde díky své konstrukci zaručují přenos energie ven.

# 1 Historie průchodek

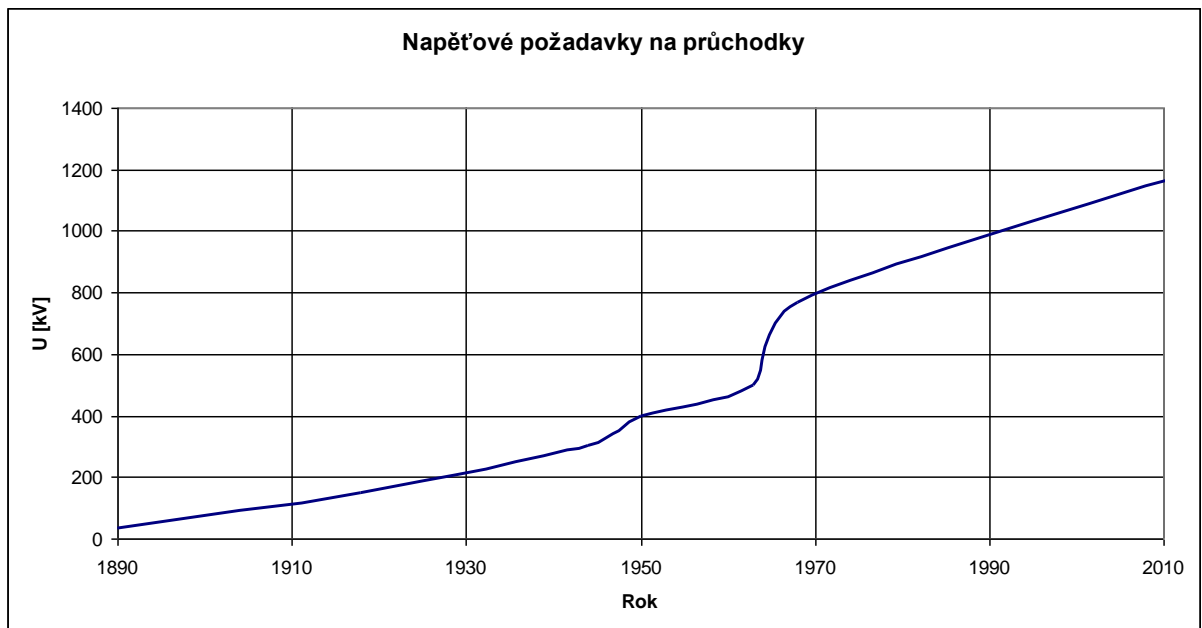
V roce 1890, při vzniku prvních střídavých transformátorů, bylo potřeba přenášet energii skrz stěny s potenciálem země. Z toho důvodu byly vynalezeny první transformátorové průchodky. Tyto průchodky byly jednoduché, pevného typu. Skládaly se z centrálního vodiče, který byl obklopen porcelánovou izolací. Tento model si získal velkou popularitu především díky své jednoduchosti. [1]

Postupem času vznikaly transformátory, které pracovaly s čím dál tím vyšším napětím. Ukázalo se, že průchodky pevného typu je možné používat do napětí okolo 35 kV. Aby se mohly použít tyto průchodky na vyšších napětích, bylo nutné zvětšit jejich průměr, což se kvůli nepraktičnosti neuskutečnilo. Další řešení spočívalo v použití několika vrstev porcelánu oddělených izolačním médiem. Toto řešení se opět neujalo kvůli nevhodným rozměrům průchodky. [1]

V roce 1908 začaly být dodávány první kapacitní průchodky americkou firmou Westinghouse. Tentýž rok byly kapacitní průchodky vyrobeny i švédskou firmou ASEA. Tyto první kapacitní průchodky používaly RBP technologii. V roce 1918 získal Emil Haefely evropský patent na první kapacitní průchodku třídy 150 kV. [1]

Po druhé světové válce se požadavky na vyšší napětí stále zvyšovaly (*Obr. 1.1*), to znamenalo použít adekvátní průchodky. Vzhledem k limitům RBP technologie, která nemohla být používána nad 230 kV, byla pro vyšší napětí zvolena technologie OIP. V roce 1944 byly firmou ASEA, ve spolupráci s Statens Vattenfallsverk, vyvinuty první 300 kV průchodky. [1]

Na počátku 50tých let byla švýcarskou firmou CIBA vytvořena první RIP průchodka pro napětí do 69 kV. Tato technologie se stala základem pro moderní technologii ERIP. Ve stejné době ASEA představila první průchodku, která mohla být použita do 400 kV. [1]



Obr 1.1 napěťové požadavky na průchodky [1],[2],[3]

V 50tých letech byla většina používaných průchodek kapacitního typu s papírovou, olejovou nebo pryskyřičnou izolací, mezi kterou byly umístěny hliníkové fólie. Tento typ byl oproti jiným konstrukcím velice spolehlivý a cenově výhodný. Jedinou nevýhodou byla dlouhá doba potřebná k impregnaci průchodky pryskyřicí nebo olejem. Jediná možnost impregnace byla spodem průchodky ve vakuu. Tento proces byl velmi pomalý a trval několik dnů, někdy dokonce i týdnů. Společnost GE se zaměřila právě na urychlení tohoto procesu, jehož výsledkem by bylo mimo jiné i snížení nákladů. Místo hliníkových fólií se začaly používat papíry s polovodivým inkoustem. Inkoust byl využíván jako vodivá vrstva, zatímco papír umožnil impregnaci i skrz vrstvy kondenzátorového jádra, čímž byl značně ušetřen čas potřebný k impregnaci průchodky. [1]

Použití této technologie se ukázalo jako velký problém z hlediska údržby. Inkoust by se v budoucnu mohl dostat do oleje, což by způsobilo zhoršení jeho vlastností. Pokud by tento jev nebyl detekován včas, vedlo by to ke zničení průchodky. [1]

V roce 1954 italská společnost Pasoni Villa začala produkovat OIP průchodky dle ANSI standardu [2]. Ke konci 60tých let byla firmou ASEA vyvinuta 765 kV průchodka, která byla použita v projektech po celé USA a Kanadě. V roce 1971 byl stejnou společností vytvořen autotransformátor 485 – 866 kV pro testování, který používal průchodky vlastní výroby. [1]

V roce 1985 byl společností Westinghouse zakoupen systém na tisk kapacitních vrstev švýcarské firmy Micafil [1]. Tento systém umožňoval podobné zkrácení času jako ten, který používala GE, avšak s otestovanou spolehlivostí, která systému od GE chyběla [1]. Švýcarská společnost Micafil začala produkovat na konci 80tých let první 420 kV RIP průchodky [3]. V roce 1991 společnost Haefely vytvořila první průchodku dle standardu IEEE a v roce 1994 doplnily řadu průchodky v rozsahu 500 kV až po 1800 kV. Pasoni Villa v roce 1993 začala produkovat průchodky s plynným dielektrikem [2]. V roce 1996 Micafil vyrobil první 500 kV RIP průchodku [3]. Společnost ABB, jejíž součástí je již i Micafil začala v roce 2004 vytvářet RIS technologii. V roce 2011 se tato technologie dostává do produkce. [3]

Dnes na trhu působí jen několik výrobců průchodek, mezi největší patří ABB (Micafil, Westinghouse), Trench (Haefely) a Alstom (Pasoni Villa). *Obr. 1.2* ukazuje transformátor s moderními průchodkami.



*Obr. 1.2 moderní transformátorové průchodky*

## 2 Základní typy průchodek

V současnosti existuje velké množství průchodek a každá se hodí pro jinou aplikaci. Taktéž vznikla celá řada společností, které se jejich výrobou zabývají. K rozdělení průchodek lze použít několik kritérií, například izolační médium na koncích průchodky, konstrukci průchodky nebo izolační médium v průchodce.

### 2.1 Rozdělení podle izolačního média na koncích

Vzhledem k tomu, že jsou průchodky používány k přenosu energie přes uzemněné překážky, jako jsou například stěny, ochranné pláště atd., lze je rozdělit podle prostředí, která jsou oddělená touto přepážkou.

Nejběžnější jsou průchodky olej - vzduch (např. transformátory s olejovým dielektrikem), kde je vodič veden z nádoby plněné olejem do prostředí se vzduchem. Konce průchodek, které jsou umístěny v nádobách s olejem, jsou přibližně dvakrát nebo i vícekrát kratší, jelikož olej má mnohem lepší izolační vlastnosti než vzduch. [4]

Další často používané průchodky jsou ty, které vedou vodič v různých prostředí vyplněným vzduchem. Používají se například pro vedení vodičů z budov. Jeden konec průchodky je umístěn venku a druhý uvnitř budovy. Venkovní konce by měly mít delší povrchovou cestu, aby byly schopny odolávat ve zhoršeném izolačním prostředí. [4]

Ostatní průchodky jsou pak používány pro dosti specifické situace, jako průchodky z plynného prostředí plynu SF<sub>6</sub> do oleje (např. vysokonapěťová vedení) a průchodky z oleje do oleje (taktéž vysokonapěťová vedení). [4]

### 2.2 Rozdělení podle konstrukce

Z hlediska konstrukce lze průchodky rozdělit na dva druhy, a to průchodky pevné a kondenzátorové (obsahují kondenzátorové jádro).

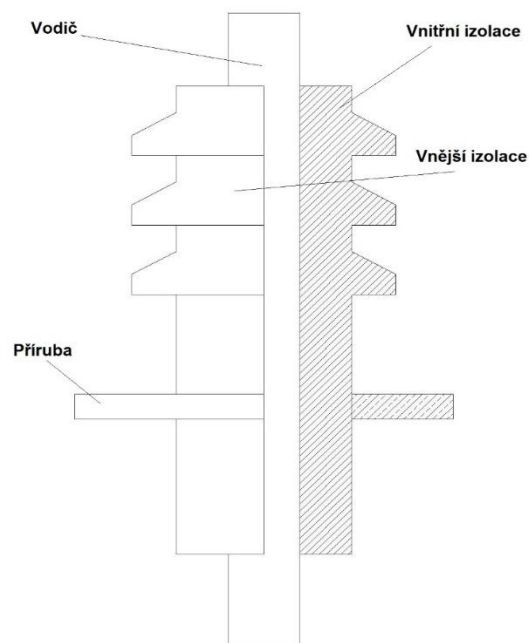
Pevné průchodky jsou určeny pro nízká napětí kolem 25 kV. Jejich konstrukce je poměrně jednoduchá. Skládají se z vodiče, který je izolován porcelánovou nebo epoxidovou izolací (*Obr. 2.1*). Tato konstrukce se používá již od doby prvních průchodek a má poměrně

univerzální použití, od malých rozvodných transformátorů, až po vodíkem chlazené hydrogenerátory. [4]

Použitý vodič může mít malý průměr (u průchodek, kde nejsou kladeny nároky na velikost protékaného proudu), u průchodek vyššího napětí (25 kV) je poté kladen vyšší nárok na tvar vodiče, díky tomu můžeme předvídat chování elektrických jevů mezi vodičem a izolací. U průchodek, kde je požadována vysoká proudová zátěž, se používají měděné vodiče velkého průměru nebo několik měděných tyčí spojených do tvaru kruhu. [4]

Mezera mezi vodičem a izolací bývá plněna buď vzduchem, nebo speciální směsí či olejem. Vzduch se používá pouze u průchodek, kde není požadováno příliš vysoké napětí. Použití oleje či speciální směsi přináší oproti vzduchu několik výhod: toto řešení má lepší chladicí vlastnosti než vzduch, jsou to lepší dielektrika a vydrží vyšší napěťovou zátěž. Olej můžeme použít buď z nádoby zařízení, nebo z vlastní nádoby průchodky. [4]

Použití těchto průchodek je vzhledem ke konstrukčním limitům jen do napětí 25 kV. Na vyšší napětí se používají průchodky kondenzátorové. [4]



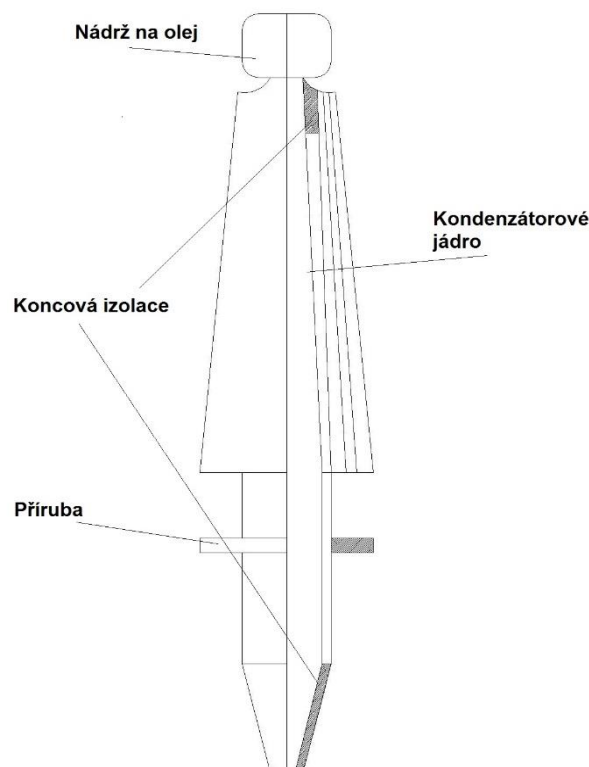
Obr. 2.1 průchodka pevného typu [4]

Kondenzátorové průchodky jsou používány na napětí, která přesahují 25 kV (byly použity až do 1500 kV). Hlavním důvodem jejich použití je optimální rozložení elektrického pole a snížení zatížení. [4]



Existuje nespočet materiálů a výrobních postupů, dříve byl používán porcelánový vodič s pokoveným povrchem. Dnešní technologie využívají vhodnější materiály, papír a různé vodivé fólie. Jako izolace je zde použit papír, který je navinut kolem vodiče. Během navíjení jsou mezi vrstvy papíru přidávány tenké plátky vodivého materiálu k vytvoření vrstev kondenzátoru, *Obr. 2.2*. Jako alternativní metoda je používán tisk vodivých vrstev na kraftový papír za pomoci polovodivého inkoustu. [4]

Kondenzátorové průchodky používají také přídatný izolační materiál na vyplnění mezer a impregnaci papíru. Axiální rozložení napětí je u kapacitního typu téměř lineární, izolátory proto mohou být kratší oproti průchodkám pevného typu. Průchodky kapacitního typu jsou na výrobu mnohem náročnější než průchodky pevné. To znamená, že jsou i dražší, jelikož je potřeba vlastnit zařízení na navíjení vrstev a na jejich výrobu. Na druhou stranu jsou tyto průchodky mnohem užší oproti pevným průchodkám, a tak lze ušetřit na materiálu. [4]



*Obr. 2.2 Kapacitní průchodka [4]*

### 2.3 Rozdělení podle druhu izolace

U transformátorových průchodek se používá několik druhů izolace. Každá má své výhody a nevýhody, proto se také liší použitím. Izolace se rozděluje na vnitřní a vnější. Kompletní přehled technologií lze najít v tabulce Tab. 2.1.

### 2.3.1 Vzduchem izolované průchodky

Tyto průchodky se používají výhradně s transformátory, které jsou taktéž izolovány vzduchem. Vzduchem izolované průchodky jsou vždy pevného typu. [4]

### 2.3.2 Olejem izolované průchodky

Jako hlavní izolační médium používají minerální olej, který je buď sdílený s transformátorem, nebo je umístěný ve vlastní nádrži pro průchodku. Tento typ průchodek se také používá v pevných průchodkách. [4]

### 2.3.3 OIP – Oil impregnated paper

Tento systém se používá u kapacitních průchodek. Vrstvy kondenzátoru jsou impregnovány minerálním olejem a uzavřeny v porcelánovém pouzdře. Díky pouzdru je zajištěno, že se olej z průchodky nebude míchat s olejem v transformátoru. OIP průchodky mají velmi dobré provozní vlastnosti. Avšak lze je instalovat jen pod určitými úhly a jejich teplotní použití bývá do 105°C. Tento systém patří na světě k nejrozšířenějším, používá ho skoro 80 % průchodek. [5]

### 2.3.4 RBP – Resin bond paper

Jádro průchodky je navinuto z papíru pokrytého pryskyřicí. Každá vrstva jádra je spojena s předchozí vrstvou díky spečení pryskyřice při vytvrzování. Během vytvrzování se v jádře nepodaří odstranit všechny vzduchové bubliny, a proto je tento typ izolace náchylný na částečné výboje. Čím je průchodka starší, tím víc se zvyšuje její ztrátový činitel. Průchodka je také náchylnější k navlhnutí. Velkou nevýhodou jsou velké ztráty v dielektriku  $P_D$  [5]. Výhodou RBP průchodek je jejich bezolejový provoz a teplotní třída 120°C [5]. Později se od výroby těchto průchodek odstoupilo. [6]

### 2.3.5 RIP – Resin impregnated paper

Tyto průchodky využívají papír napuštěný pryskyřicí. Nejprve je navinuto jádro, mezi jehož vrstvy je vložena hliníková fólie. Jádro je poté zahřáto a následně vysušeno. K vytvoření pevného jádra se poté impregnuje pryskyřicí ve vakuu. Výhodou těchto průchodek je bezolejový provoz, montáž pod jakýmkoliv úhlem, teplotní třída 120°C

a podobné nebo lepší vlastnosti jako OIP průchodky. Díky podobným vlastnostem jako mají OIP průchodky a bezolejovému provozu se začíná přecházet na tyto průchodky. [5]

### 2.3.6 RIS – Resin impregnated synthetics

Průchodky založené na této technologii používají místo papíru látku, která je vyrobená ze syntetických polymerových vláken. Oproti standardnímu papíru má látka výhodu v použití vysoce viskózních izolačních médií. Nejvíce se používají prověřené pryskyřice s přídavkem hliníku nebo křemíku, které dosahují velmi dobrých výsledků, jako je například lepší tepelná vlastnost. [5]

Kondenzátorová jádra průchodek, která využívají tuto technologii, mohou být vytvarována a vytvrzena ve velmi krátkém čase. Vzhledem k tomu, že technologie používá vlákna, která nepohlcují vlhkost, při výrobním procesu se může úplně vynechat vysoušení. RIS průchodky jsou nejmodernější a mají nejlepší provozní vlastnosti. Neobsahují papír ani olej, mohou být instalovány pod jakýmkoliv úhlem, používají se do 120°C a mají nejlepší provozní vlastnosti ze všech druhů. Jejich nevýhoda je maximální napětí při kterém mohou být použity což je 170 kV oproti např RIP průchodkám (550 kV) [3]. [5]

### 2.3.7 Plynem izolované průchodky

Používají se jen pro speciální aplikace, jako jsou například HVDC transformátory pro přeměnu střídavého proudu na stejnosměrný. Průchodky jsou plněny plynem, nejčastěji SF<sub>6</sub>. [5]

Technologie	OIP	RBP	RIP	RIS
<b>Vnitřní izolace</b>	Papír impregnovaný olejem	Papír s pryskyřičnou vrstvou	Papír impregnovaný pryskyřicí	Syntetická tkanina impregnovaná pryskyřicí
<b>Obsahuje olej</b>	ANO	NE	NE	NE
<b>Obsahuje papír</b>	ANO	ANO	ANO	NE
<b>Odolnost proti vlhkosti</b>	ANO	NE	NE	ANO
<b>Teplotní třída</b>	105°C	125°C	125°C	125°C
<b>Ztrátový činitel</b>	< 0.7	< 1.5	< 0.7	< 0.35

Tab. 2.1 přehled technologií [5]

### 3 Konstrukce průchodek

Jak bezpečně provést elektrickou energii skrz uzemněnou skříň zařízení, můžeme považovat za zásadní problém při konstrukci průchodek. Při návrhu konstrukce průchodky musí být kladen důraz na tři základní aspekty: elektrický, mechanický a tepelný [5]. Všechny součásti průchodky proto musí být zkonstruovány a navrženy s ohledem na tyto aspekty. Pro jednodušší orientaci jsou používány některé mezinárodní standardy pro konstrukci a testování.

#### 3.1 Elektrický návrh

Při elektrickém návrhu průchodky se klade důraz hlavně na správné rozmístění hliníkových fólií kolem kondenzátorového jádra. Napětí mezi určitým průměrem a vnější vodivou vrstvou je poté možné vypočítat rovnicí 3.1 [4],

$$U_{(d)} = U * \frac{\ln(D_2/d)}{\ln(D_2/D_1)}, \quad (3.1)$$

kde:

U – napětí mezi vnitřní a vnější vrstvou,

d – průměr, pro který se počítá hodnota napětí,

D<sub>2</sub>, D<sub>1</sub> – průměr vnitřní resp. vnější vrstvy.

Díky správnému rozmístění fólií a celkově dobrému návrhu jádra je zvýšena hladina odolnosti proti elektrickému namáhání, které průchodka vydrží [5]. Vzhledem k tomu, že je zde napětí logaritmickou funkcí, soustředí se kolem vodiče uprostřed a snižuje se směrem k vnější vrstvě izolace [4]. Podobně soustředěné bude i elektrické namáhání, které lze vypočítat rovnicí 3.2 [4],

$$E_{(d)} = \frac{2U}{d \ln(D_2/D_1)}. \quad (3.2)$$

Všechny procesy jsou během výroby pečlivě kontrolovány a monitorovány. Další součástí průchodky, na kterou je nutno se soustředit při elektrickém návrhu, je izolace. Důležité je zejména dobré sladění vnitřní a vnější izolace tak, aby v průchodce nevznikaly výboje, které jsou častým zdrojem požárů a selhání. [5]

Pokud by bylo potřeba vypočítat hodnotu kapacity průchodky lze použít vztah pro výpočet kapacity jedné vrstvy, který vychází ze zjednodušených Maxwellových rovnic (3.3),

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\frac{r_a}{r_b}} \cdot l, \quad (3.3)$$

kde:

$\varepsilon_0$  – permitivita vakua  
 $\varepsilon_r$  – permitivita dielektrika  
 $r_a$  – průměr vnější fólie,  
 $r_b$  – průměr vnitřní fólie,  
 $l$  – délka fólie.

A z této rovnice lze poté vypočítat celkovou kapacitu průchodky (3.4),

$$\frac{1}{C} = \sum_{n=1}^k \frac{\ln\frac{r_n}{r_{(n+1)}}}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l} \quad (3.4)$$

### 3.2 Mechanický návrh

Díky dobrému mechanickému návrhu je průchodce zajištěna ochrana proti různým mechanickým poškozením. Při mechanickém návrhu bývá zohledněno nejen prostředí, ve kterém bude průchodka používána, ale i další možné situace, jako je například zemětřesení, elektrická porucha v průchodce nebo případné požáry. [7]

Zároveň dobrým mechanickým návrhem je zajištěna celková těsnost průchodky, což znamená, že z průchodky se nedostává olej ven (u OIP průchodek) a vlhkost dovnitř. Mechanický design průchodky je navrhován pro určité spektrum teplot, ve kterých bude průchodka pracovat, aby nedocházelo k roztahování nebo naopak smršťování průchodky až do neúnosné meze. Všechny části průchodky musí být profesionálně navrženy tak, aby uvnitř vznikla potřebná komprese, která zajišťuje při běžných podmínkách správný tlak nutný k udržení těsnosti. [5]

Pro zvýšení spolehlivosti průchodky je mechanický návrh vypracován s minimálním množstvím součástí. Obecně platí, že čím méně součástí, tím větší je celková spolehlivost zařízení. [5]

### 3.3 Tepelný návrh

Dobrý tepelný návrh zajišťuje průchodkám dostatečné chlazení s ohledem na ztráty, které v průchodce vznikají. Ztráty (3.5) mohou být rozděleny na dvě části, a to ztráty v dielektriku (3.6) a ohmické ztráty (3.7),

$$P_C = P_d + P_o, \quad (3.5)$$

$$P_d = 2\pi f C_1 U^2 \tan \delta, \quad (3.6)$$

$$P_o = RI^2, \quad (3.7)$$

kde:

$P_C$  – celkové ztráty,

$P_d$  – ztráty v dielektriku,

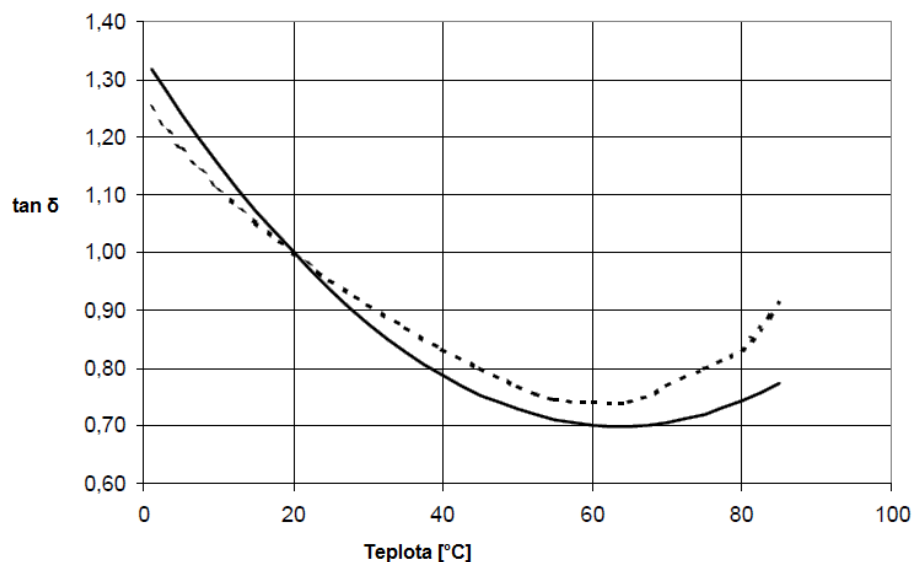
$P_o$  – ohmické ztráty,

$C_1$  – kapacita průchodky,

$\tan \delta$  – ztrátový činitel. [5]

K zajištění co nejmenších ohmických ztrát musí být velmi dobře navržen systém vedení elektrické energie uvnitř průchodky. Často je zde také použit systém na kompenzaci teploty pro zajištění stabilních ohmických ztrát při změně kompresní síly během průchodu proudu. [5]

Ztráty v dielektriku při nízkých napětích jsou v průchodkách zanedbatelné. Podstatnými se stávají až při extrémně vysokých napětích [5]. Nejnižší ztrátový činitel má izolace přibližně při 60°C (liši se podle výrobce), poté roste se zvyšující se teplotou (*Obr. 3.1*) [8].



Obr. 3.1 závislost  $\tan \delta$  na teplotě průchodek ABB [8]

Teplo musí být rozprostřeno skrz celou izolaci průchodky a přes povrch, kde poté dojde k tepelné výměně. Existuje ovšem limitní hodnota, která je nazývána tepelná stabilita. Při překročení této hodnoty dochází k nedostatečnému rozptylu tepla, který vede ke zvýšení teploty a následnému zničení izolace. Tepelná stabilita průchodky musí být největší při nejvyšších napětích, kterých průchodka může dosáhnout a musí do ní být započítány jak ztráty ohmické, tak ztráty v dielektriku. Během životního cyklu průchodky se tepelná stabilita stále snižuje vlivem stárnutí izolace a jejího namáhání. Proto musí být navržena tak, aby i po uplynutí určité doby byla dostatečně velká. [5]

Ztrátový činitel  $\tan \delta$  je měřen při výrobě při 20°C. Pro koncového uživatele je však důležitější hodnota ztrátového činitele při pracovních teplotách průchodky. Z praktických důvodů není možné tuto hodnotu naměřit při běžné produkci. Proto hodnota ztrátového činitele není pro průchodky důležitá tak jako jeho stálost. Pokud dochází k jeho zvýšení, může to signalizovat nedostatečný mechanický izolační systém, který umožňuje pronikání vlhkosti do průchodky. Kontrola stálosti  $\tan \delta$  je nejdůležitější u průchodek typu RIP a OIP, jelikož používají jako izolační médium papír. [5]

### 3.4 Vodiče

Průměr vodiče je primárně určen proudem, který přes něj bude protékat. Návrh vodiče proto ovlivňují dva faktory. Prvním faktorem je hloubka vniku materiálu  $\delta$  při frekvenci, na které bude průchodka používána. Proud v průchodce neprochází přes celý vodič, ale jen přes jeho část, od jeho okraje dovnitř až po hloubku vniku. Druhým faktorem jsou ohmické ztráty vznikající ve vodiči (rovnice 3.8),

$$P_0 = RI^2 = \frac{4I^2 \rho l}{\pi(D_1^2 - D_0^2)}, \quad (3.8)$$

kde:

$P_0$  – ohmické ztráty,  
 $\rho$  – rezistivita použitého materiálu,  
 $l$  – délka vodiče,  
 $D_1$  – vnější průměr vodiče,  
 $D_0$  –  $D_1 - \delta$ . [4]

Z rovnice ztrát je zřejmé, že se zvětšujícím se vnějším průměrem se ztráty snižují. V praxi to znamená, že vodiče jsou záměrně navrhovány s velkým průměrem pro průchod velkých proudů. S větším průměrem je také snižováno elektrické namáhání vodiče, což je

patrné z rovnice 3.2. Vodič s větším průměrem je také odolnější částečným výbojům a odolává vyšším napětím. [4]

### 3.5 Izolátory

Délka obou izolátorů závisí převážně na prostředí, kterému budou vystaveny [4]. Obecně platí, že musí mít dostatečnou délku, aby byly schopné odolávat ustálenému stavu průchodky a přeskokovým napětím, se kterým souvisí povrchová dráha izolátoru vůči zemi [4]. Norma IEC 60137 uvádí výpočet této dráhy podle vztahu 3.9 [9],

$$l = d_{CS} U_m k_d, \quad (3.9)$$

kde:

$d_{CS}$  – nominální hodnota povrchové dráhy podle normy,

$U_m$  – maximální napětí průchodky,

$k_d$  – korekční faktor podle normy.

Nominální hodnota je uváděna v mm/kV a rozlišuje se pro čtyři různá prostředí: lehce znečištěné (16 mm/kV), středně znečištěné (20 mm/kV), těžce znečištěné (25 mm/kV) a velmi těžce znečištěné (31 mm/kV). Pokud je průchodka používána ve dvou různých prostředích, délku izolátoru určuje prostředí s větším znečištěním. Korekční faktor závisí na průměru izolátoru, pokud je průměr menší než 300 mm, korekční faktor bude 1, při průměru od 300 do 500 mm, korekční faktor je 1,1 a nad 500 mm je korekční faktor 1,2. [9]

U izolátorů používaných ve vzduchu je jejich délka určena atmosférickým výbojem za suchých podmínek a impulzem napětí za mokra, lze použít normu IEC std. 62305 o ochraně před atmosférickými výboji [9]. Standardní průchodky jsou navrhovány pro použití do výšek 1000 metrů nad mořem. Pro větší výšku je nutno prodloužit izolátor, aby se vykompenzovala nižší hustota vzduchu. [4]

U průchodek používaných v prostředí s minerálním olejem může být délka izolátoru kratší díky lepším dielektrickým vlastnostem minerálních olejů. Izolátory mohou být kratší o 30-40 % délky izolátoru používaného v atmosférickém vzduchu. Podobně dlouhé jako olejové izolátory, bývají i izolátory používané prostředích s SF<sub>6</sub>. [4]

Nejčastěji používaným materiálem pro izolátory je buď porcelán, nebo silikonový kompozit. Porcelán se používá již od prvních průchodek, ale má řadu nevýhod, jako jsou neviditelné prasklinky, které mohou vznikat při mechanické zátěži, při poruše průchodky se



porcelán odlamuje a odlétává do velkých vzdáleností a také má špatné vlastnosti pro použití ve velmi znečištěných prostředích. Z těchto důvodů se začaly hledat alternativní materiály pro výrobu izolátoru. Jako vhodné se ukázalo použití silikonových kompozitů. Mezi jejich hlavní výhody patří především nízká hmotnost, větší odolnost proti mechanickému namáhání a hydrofobní povrch, který snižuje riziko různých přeskoků. Silikonové izolátory lze použít se všemi typy průchodek (ve velmi znečištěném prostředí je to téměř nutností). Oproti tomu porcelánové izolátory se používají pouze s typy OIP, RBP a RIP. Výběr materiálu izolátoru závisí především na prostředí, ve kterém bude průchodka používána. [10]

### 3.6 Příruba

Příruba je důležitá součást průchodky a slouží především k jejímu připevnění na skříň transformátoru. Příruba také odděluje oba izolátory a udržuje je přesně usazené na určených místech. Jako materiál se používají hliníkové odlitky, ocelové nebo hliníkové pláty a pro průchodky s velkou proudovou zátěží se používají různé nemagnetické materiály k zajištění co nejmenších ztrát. [4]

### 3.7 Olejová nádržka

U větších OIP průchodek je často vyžadována olejová nádržka. Ta je zde použita jako zásoba oleje pro kompresi a expanzi, k níž při změnách teplot dochází. Jelikož je olej nestlačitelná kapalina, musí být v nádržce umístěna ještě dostatečná zásoba plynu, jako je například dusík, aby nedocházelo k velkým tlakům uvnitř průchodky. Podle orientace průchodky může být nádržka umístěna na koncích izolátorů nebo na přírubě. Na nádržce bývá také ukazatel pro zjištění aktuální hladiny oleje. [4]

### 3.8 Systém svorek

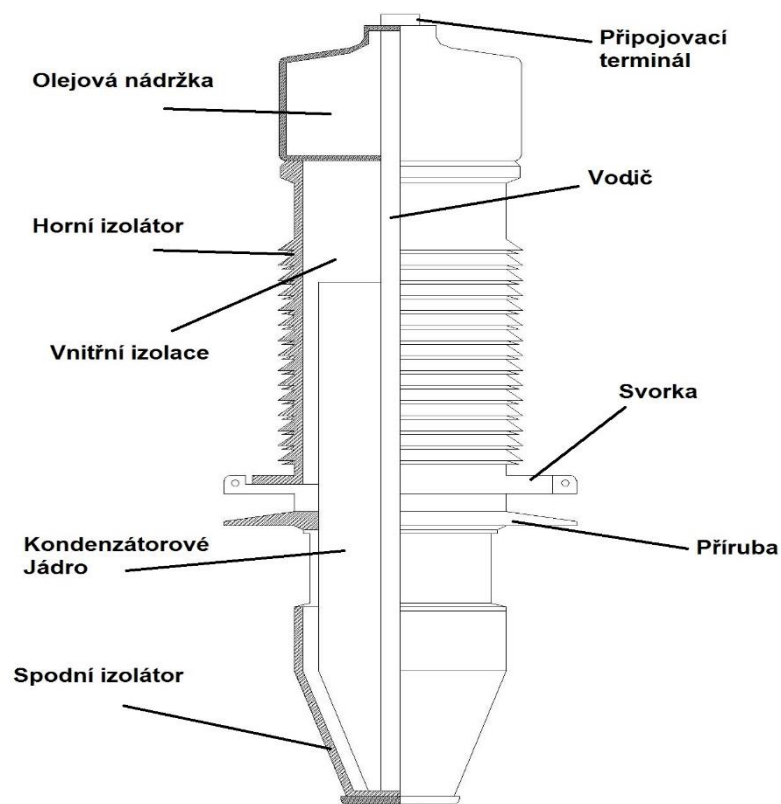
Systém svorek je velice důležitá část průchodky. Použitím dobrého systému je zajištěna celková soudržnost a mechanická stabilita průchodky. Existují celkem tři druhy těchto systémů. [4]

První systém (Mechanical clamped fittings) používá dvě příruby na koncích izolátorů a za pomoci šroubů jsou poté konce přišroubovány například k hlavní přírubě průchodky. Na průchodkách vysokého napětí je často použit stínící kroužek k ochraně před elektrickým

polem. Tento systém je ekonomicky nenáročný a kompaktní, je ovšem náchylný k praskání kvůli velkému mechanickému namáhání. [4]

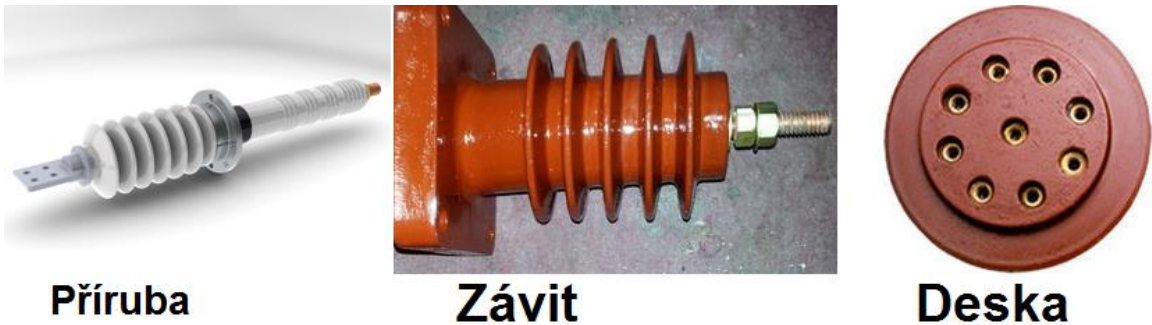
U druhého systému (Center clamped fittings) je na horním konci průchodky umístěna pružina. Průchodka je stlačována touto pružinou. Tento systém je také ekonomicky nenáročný a kompaktní, ale kvůli silám působícím na izolátory je náchylný k netěsnostem. [4]

Třetí systém (Cemented fittings) je podobný prvnímu (Obr. 3.2), jediný rozdíl je v mezeře mezi přírubami. Mezera je vyplněna řídkým materiálem natolik pevným, aby byl schopen přenést kompresní zátěž, ale zároveň pružným, aby nezatěžoval vnější izolaci. Tento systém omezuje úniky oleje i poškození materiálu, nicméně celková délka izolátoru musí být lehce prodloužena. [4]



Obr. 3.2 průchodka typu OIP [11]

### 3.9 Připojovací terminály



Obr. 3.3 druhy připojovacích terminálů

Existují tři běžně používané druhy připojovacích terminálů (Obr. 3.3): závit (threads), příruby (spades) a desky (plates). Všechny tyto používané druhy jsou v průběhu let ověřené a velmi spolehlivé. Nejčastěji používanými typy připojovacího terminálu jsou příruby (Obr. 3.4), a to až do 69 kV. Nad 69 kV se používají pouze v kombinaci s deskovým typem. [1]



Obr. 3.4 připojení kabelu k průchodce

### 3.10 Výroba průchodky

Samotný výrobní proces průchodky se skládá z několika částí. Nejprve je navinuto kondenzátorové jádro na navíjecích strojích. Podle typu průchodky se používá buď papír s hliníkovými, nebo jinými vodivými fóliemi. Alternativně se může použít tisk vodivých vrstev přímo na papír [4]. Při výrobě RIS průchodek je papír nahrazen syntetickou tkaninou. Další fáze výroby spočívá v impregnaci jádra, která se skládá ze zalévání a vysoušení. Jádro je nejprve zahřáto a vysušeno a poté je impregnováno za pomoci vakua pryskyřičnou směsí. Tato směs se skládá z pryskyřice, urychlovače a vytvrzovače. Podle druhu průchodky se volí různé kombinace těchto tří látek [4]. Po impregnaci se k jádru připevní ostatní části, jako jsou izolátory, připojovací terminály a systém svorek. Tímto vzniká samotná průchodka. Než je však možno ji odeslat do prodeje, musí se provést určité výstupní testy podle norem, při kterých se měří ztrátový činitel a kapacita při různých napětích. Pokud průchodka projde všemi testy je zabalena a odeslána k prodeji. [12]

### 3.11 Standardy pro průchodky

Existuje nespočet standardů používaných v různých zemích po celém světě. V Americe a Kanadě jsou používány standardy organizací ANSI a IEEE, ve zbytku světa potom standardy organizace IEC. Mezi nejdůležitější pro průchodky patří těchto hlavních pět:

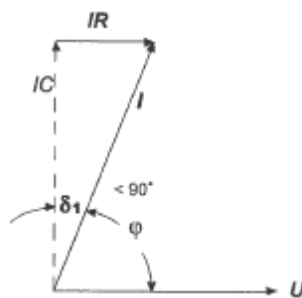
1. ANSI/IEEE Std. C57.19.00, Standard Performance Characteristics and Test Procedure for Outdoor Power Apparatus Bushings
2. IEEE Std. C57.19.01, Standard Performance Characteristics and Dimensions for Outdoor Power Apparatus Bushings
3. IEEE Std. C57.19.03, Standard Requirements, Terminology and Test Procedures for Bushings for DC Applications
4. IEEE Std. C57.19.100, Guide for Application of Power Apparatus Bushings
5. IEC Std. 60137, Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V

## 4 Offline diagnostika

Jelikož průchodky jsou jednou z nejporuchovějších součástí transformátorů [13], musí být udržovány v provozuschopném stavu a případně včas měněny. Interval servisních kontrol se liší podle typu průchodky a podle hodnoty transformátoru, na kterém je použita. Doba mezi kontrolami by se měla se stárnutím průchodek snižovat, aby se minimalizovala možnost selhání průchodky, které ve většině případů vede ke zničení celého transformátoru. Pro diagnostiku průchodek se používá několik testů, které zjišťují hodnoty různých parametrů průchodek. [4]

### 4.1 Ztrátový činitel $\tan \delta$

Tento parametr určuje ztráty v dielektriku. Čím menší je úhel  $\delta$  tím menší budou ztráty. Pro průchodky není tak důležitá průběžná hodnota tohoto parametru, jako jeho stálost, počáteční hodnota a teplotní nezávislost [5]. Jedná se o poměr proudu činného  $I_r$  (tepelné ztráty) k proudu kapacitnímu  $I_c$  ( $\tan \delta = \frac{I_r}{I_c}$ ), jak je vidět na *Obr. 4.1*. Ideální dielektrikum je látka, která nemá žádné volné nosiče náboje, tudíž její vodivost je nulová. Na ideálním kapacitoru, který se skládá z ideálního dielektrika, proud předbíhá napětí o  $90^\circ$ . V ideálním dielektriku jsou proto tepelné ztráty nulové, tudíž ztrátový činitel je roven 0.

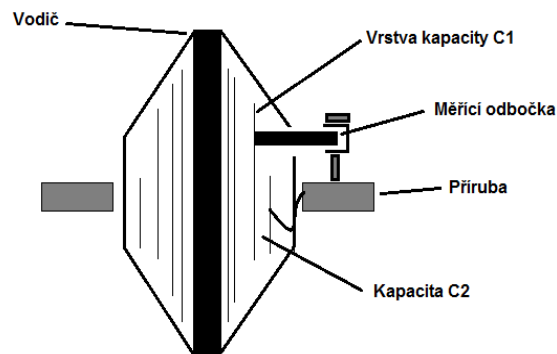


*Obr. 4.1* fázorový diagram izolace průchodky [14]

### 4.2 Kapacita $C_1$ a $C_2$

Kapacita  $C_1$  je hlavní kapacita průchodky. Je tvořena dielektrikem a vodivými fóliemi mezi vodičem průchodky a hraniční fólií kapacity  $C_1$ . Hraniční fólie kapacity  $C_1$  je připojena k měřicí odbočce nebo k napěťovému terminálu na průchodce. Kapacita  $C_2$  je tvořena dielektrikem mezi hraniční fólií kapacity  $C_1$  a přírubou (průchodky 69 kV a níž) nebo dielektrikem mezi hraničními fóliemi kapacity  $C_1$  a  $C_2$  (průchodky 115 kV a výše, *Obr. 4.2*). Za normálních provozních podmínek je fólie  $C_1$  uzemněna pomocí šroubku krytu odbočky

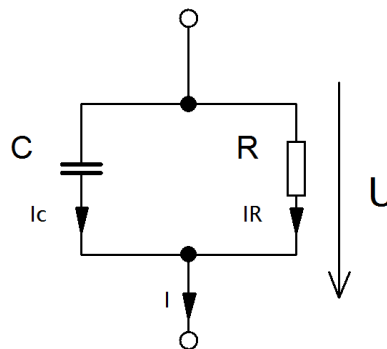
k montážní přírubě. To mimo jiné znamená, že je kapacita  $C_2$  vyzkratována a není namáhána elektrickým napětím. Pokud je využit napěťový terminál, kapacita  $C_1$  a  $C_2$  fungují jako napěťový dělič. [15]



Obr. 4.2 kapacita průchodky [15]

### 4.3 Svodový proud

Svodový proud sice není přímo veličinou, která nám určuje stav průchodky, ale je to velmi důležitý parametr pro výpočet kapacity a ztrátového činitele. Jedná se o proud, který při zatížení průchodky napětím protéká skrz izolaci do země ( $I$  na obrázku Obr. 4.3). Svodový proud se objevuje pouze u neideálního dielektrika.



Obr. 4.3 náhradní schéma izolace průchodky [14]

### 4.4 Testování ztrátového činitele a kapacity

Ztrátový činitel a kapacita průchodky jsou dnes nejčastěji měřené veličiny používané pro diagnostiku průchodek. Kapacita sice přímo neukazuje aktuální stav dielektrika, avšak může sloužit jako pohotovostní ukazatel stavu průchodky při jejím velkém poškození. Provozní teploty průchodek dosahují až  $50^{\circ}\text{C}$ . Diagnostika bohužel nemůže být provedena při těchto

teplotách, avšak je vhodné, aby byla prováděna při teplotách, které se té provozní alespoň přibližují (např. po vypnutí transformátoru). [13]

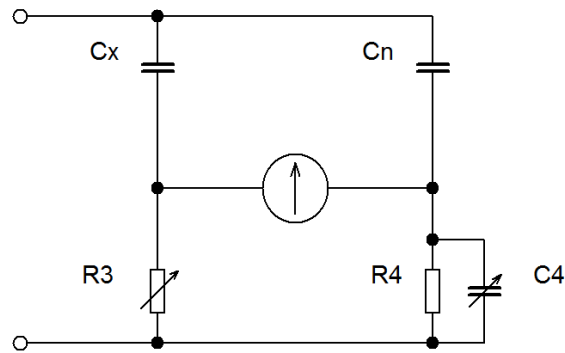
Ke zjištění hodnoty ztrátového činitele se provádí korekce podle tabulek, které udává výrobce průchodky. Naměřené hodnoty jsou poté porovnány s údaji na štítku průchodky (tyto údaje výrobce nejčastěji udává při pokojových teplotách, proto se provádí korekce). Tabulka tab. 4.1 poté uvádí limitní hodnoty ztrátového činitele pro odebrání průchodky mimo provoz. [8]

Typ průchodky	Maximální hodnota $\tan \delta$	
	Hodnota při $1,05 U_m / \sqrt{3}$	Nárůst mezi $1,05 U_m / \sqrt{3}$ a $U_m$
OIP	0,007	0,001
RIP	0,007	0,001
RBP	0,015	0,004
Kombinovaná	Určuje výrobce	Určuje výrobce
Ostatní	Určuje výrobce	Určuje výrobce

Tab. 4.1 limitní hodnoty ztrátového činitele [9]

Jestliže nastane nárůst v rozsahu 0-25 %, hodnota se zaznamená, avšak žádná další měření nejsou potřeba. Nárůst 25-40 % znamená, že se musí zkontrolovat měřicí okruh a vnější vlivy, pokud rozdíl přetrvává je potřeba vyměnit těsnění na průchodce. Při nárůstu v rozsahu 40-75% se provádí to, co je popsáno výše a navíc k tomu musí být měření do měsíce opakováno. Pokud je nárůst vyšší než 75 % průchodka by se již dál neměla používat. Když porovnáваме kapacitu, limitní hodnota je 3% nárůst, poté by se měla průchodka vyřadit z provozu. [8]

Při poškození fólie se kapacita zvyšuje, tím pádem je i vyšší napětí v okolí průchodky [16]. Pro měření ztrátového činitele a kapacity jsou používány speciální Scheringovy měřicí můstky (*Obr. 4.3*,  $C_X$  je kapacita průchodky,  $C_N$  je referenční kapacita), jako je například model M2H od Doble Engineering Company na obrázku *Obr. 4.4*.



Obr. 4.3 Scheringův můstek [17]



Obr. 4.4 měřicí můstek M2H [18]

#### 4.4.1 GST (Grounded Specimen Test)

Tento test měří kvalitu izolace mezi centrálním vodičem průchodky a její přírubou. Měřeny jsou následující parametry: svodový proud, výkon a kapacita všech cest. Do měření je započítána jak vnitřní izolace, tak všechny svodové cesty na povrchu průchodky. Při měření OIP průchodek je připočítán i svod v oleji. Tento test by měl být prováděn na průchodkách vyjmutých z transformátoru nebo alespoň izolovaných od jeho vedení. [4]

#### 4.4.2 Hot-guard test

Tímto testem je opět měřena kvalita izolace mezi centrálním vodičem a přírubou. Ačkoliv byl tento test vytvořen speciálně pro průvlečné průchodky lze jej použít na jakoukoliv průchodku, která může být izolována od transformátoru. Na rozdíl od GST, tímto testem lze měřit pouze svodový proud a ztráty průchodky. [19]



#### 4.4.3 UST (Ungrounded Specimen Test)

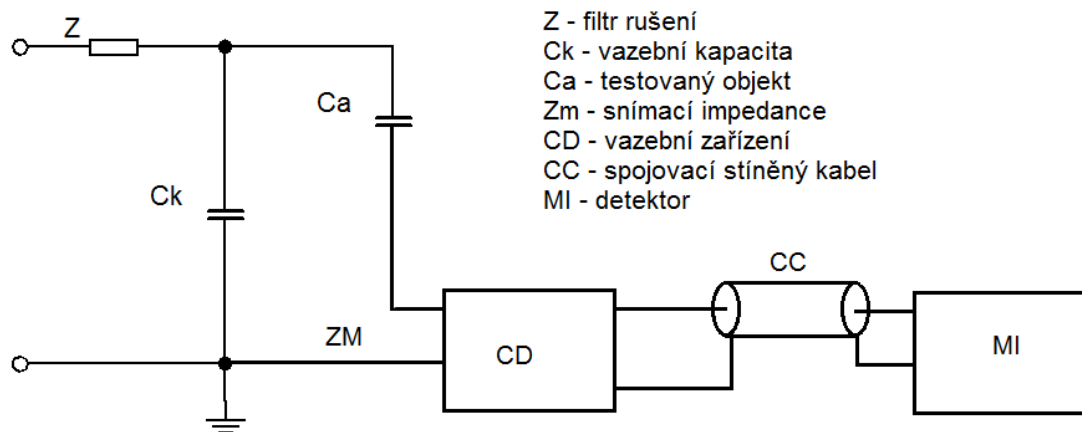
Metodou UST je měřena izolace mezi hlavním vodičem a měřicí odbočkou (napětovým terminálem) nebo neuzemněnou přírubou. Odpor mezi přírubou nebo odbočkou by měl být minimálně 0.5 M $\Omega$  nebo výše. Měřeny jsou stejné parametry jako u GST, avšak jsou zde zanedbatelné vlivy svodových cest, které nechceme měřit. Test lze provádět i na průchodkách umístěných na transformátoru. [4]

#### 4.4.4 Hot-collar test

Tento test zjišťuje stav malé části izolace mezi izolátorem a hlavním vodičem. Při tomto testu jsou kolem průchodky rozmístěny elektrody, do nichž je přivedeno napětí a hlavní vodič je uzemněn. Tento test je určen k použití místo GST, Hot-guard testu a UST tam, kde je tyto testy nemožné provést vzhledem k obtížné manipulaci nebo nepraktičnosti. Hot-collar je velmi efektivní při hledání prasklin v izolátorech nebo při zhoršení stavu izolace. [19]

#### 4.4.5 Testování částečných výbojů

Vzhledem k tomu že měřením ztrátového činitele a kapacity nemohou být odhalena selhání průchodky již v rané fázi, lze použít jako vhodnou metodu měření částečných výbojů (Obr. 4.5). Částečné výboje u nových průchodek jsou velice malé, je proto nutné provádět měření ve speciálních vysokonapětových laboratořích, které jsou vybaveny elektromagnetickým štítem a napětovým zdrojem s velmi nízkými částečnými výboji. Pokud je tato metoda používána na průchodkách již instalovaných v transformátoru, není příliš efektivní, jelikož ukazuje součet částečných výbojů jak v průchodce, tak v samotném transformátoru (částečné výboje v transformátoru převyšují ty v průchodce). Citlivost měření na transformátoru lze ovšem zlepšit použitím digitálních filtrů. Měřením částečných výbojů lze zjistit vznik korony nebo selhání izolace průchodky. [20]



Obr. 4.5 testování částečných výbojů se sériovou snímací impedancí [21]

## 4.5 DGA (Dissolved Gas in oil Analysis)

Průchodky typu OIP patří dnes stále k nejpoužívanějším průchodkám na světě, proto se lze u nich setkat s použitím metody DGA (analýza plynů rozpuštěných v oleji). Tato metoda je používána tam, kde testování ztrátového činitele a kapacity neukázalo uspokojivé výsledky. Při použití této metody je nutné odebrat z průchodky vzorek oleje, to nese jisté riziko v poškození izolace průchodky při opětovném uzavření. Po několika měřeních je nutné olej doplnit. Olej musí být vždy doplněn podle normy, která se na danou průchodku vztahuje. DGA dokáže zjištěním obsahu CO a CO<sub>2</sub> určit stáří papíru uvnitř průchodky. [4]

## 4.6 Analýza vlhkosti

Analýza vlhkosti je podobná metodě DGA, namísto obsahu plynů v oleji se zde určuje obsah vlhkosti. Množství papíru je v průchodkách převažující oproti množství oleje a proto je poměrně složité určit správnou hodnotu papíru. Při různých teplotách se vlhkost přesouvá z papíru do oleje a naopak. Vzorek oleje by proto měl být odebrán nejdříve 48 hodin poté, co průchodka dosáhla pokojové teploty. Hodnoty k porovnání jsou dodávány výrobcem průchodky. [8]

## 4.7 Vizuální prohlídka

Mnoho poruch průchodky lze odhalit také vizuální prohlídkou. Na průchodce existují specifická místa, na která je dobré se zaměřit: připojovací terminály (kontrola utáhnutí), měřicí odbočky a napěťové přípojky (kontrola uzemnění nebo kvality těsnění), těsnění

(kontrola těsnosti, stárí, úniky), kovové části (kontrola koroze a narušení), izolátory (kontrola mechanického poškození) a hladina oleje. [19]

## 4.8 Zkoušky výrobního procesu

Každá průchodka prochází po výrobním procesu určitou sérií zkoušek pro odhalení chyb. Zkoušky lze rozdělit na typové, kusové a speciální. Zkoušky jsou vykonávány podle normy IEC std. 60137 [9] na jejímž základě vznikla tato podkapitola. Výrobce musí vždy na požádání doložit certifikát o úspěšně provedených zkouškách. Většina zkoušek probíhá připojením určitého napětí na průchodku a poté měřením testovaných parametrů.

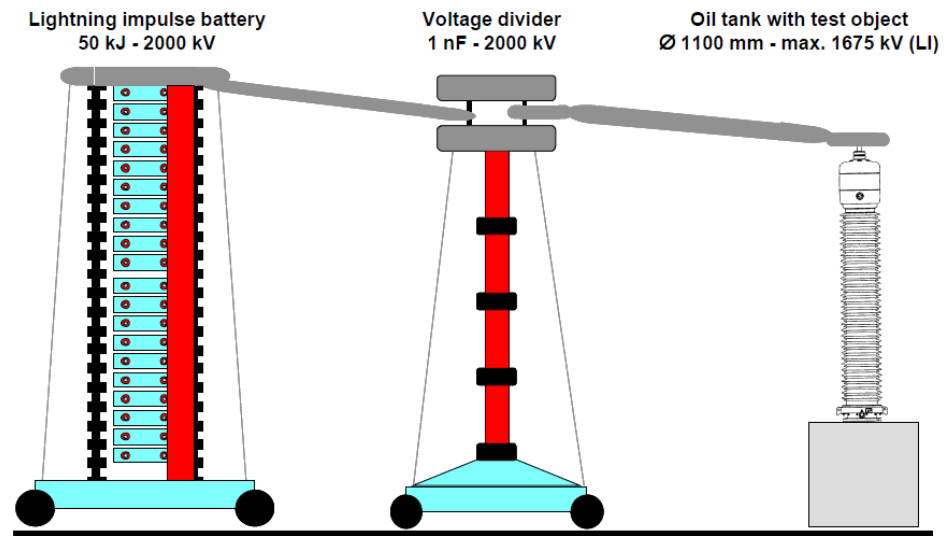
### 4.8.1 Typové zkoušky

#### Testování odolnosti napětím

Tento test se provádí buď za sucha pro průchodky používané uvnitř, a které nejsou podrobené kusovým zkouškám nebo za mokra pro venkovní průchodky, jejichž maximální napětí je menší než 300 kV. Na průchodku je připojeno napětí, které se postupně zvyšuje. Doba trvání zkoušky je 60 s. Průchodka splňuje zkoušku, pokud nenastane žádný přeskok nebo nedojde k průrazu. Zkouška také není splněna, jestliže dojde k poškození kapacitních vrstev a následnému nárůstu kapacity. Test lze opakovat maximálně jednou, pokud průchodka podruhé zkoušku splní, lze ji brát jako provozuschopnou.

#### Testování odolnosti atmosferickými výboji

Zkoušku (*Obr. 4.6*) lze provádět na všech průchodkách. Průchodka je podrobena 15 výboji s kladnou polaritou, které jsou následovány 15 výboji se zápornou polaritou. Délka výboje by měla být 1,2/50  $\mu$ s. Jestliže bude průchodka používána na transformátorech, jejichž napětí je větší nebo rovno 123 kV, test se skládá z 15 výbojů s kladnou polaritou následovaných jedním výbojem se zápornou polaritou, 5 zkrácenými výboji se zápornou polaritou a 14 výboji se zápornou polaritou. Průchodka splňuje zkoušku, pokud se neobjevily více než dva přeskoky během obou sérií testovacích impulzů a zároveň nedošlo k průrazu izolace.



Obr. 4.6 zařízení na zkoušky atmosférickými výboji [23]

### Testování pulsním napětím

Zkouška může být provedena na průchodkách, jejichž napětí je větší nebo rovno 300 kV. U vnitřních průchodek se tento test provádí za sucha, u vnějších za mokra. Průchodka je testována opět 15 kladnými impulsy a následně 15 zápornými impulsy. Délka impulsu je 250/2500  $\mu$ s. Průchodka splňuje zkoušku, pokud se neobjevily více než dva přeskoky během obou sérií testovacích impulzů a zároveň nedošlo k průrazu izolace.

### Zkouška tepelné stability

Test může být prováděn na průchodkách, které jsou kompletně nebo částečně ponořeny v izolačním médiu. Samotná izolace průchodky musí být organická a jejich pracovní teplota musí být 60°C nebo výše. Průchodka se testuje ponořená v oleji, který je zahřátý na provozní teplotu. Měření začíná, až když průchodka dosáhla stejné teploty jako olej. Při měření se zjišťuje hodnota ztrátového činitele při maximálním napětí průchodky ( $U_m$  je rovno nebo menší 170 kV) nebo při hodnotě 0,8  $U_m$  ( $U_m$  je větší než 170 kV). Průchodka dosáhla své tepelné stability, pokud se hodnota ztrátového činitele nezvětší po dobu pěti hodin. Zkouška je absolvovaná po tom co průchodka splní kusové zkoušky a tepelná stabilita zůstane beze změny.

### Zátěžová zkouška

Zkoušku lze aplikovat na konce průchodek používané ve vzduchu. Při zkoušce je aplikován tlak kolmo k ose průchodky na terminál průchodky. Aplikovaný tlak určuje výrobce. Doba aplikace tlaku by měla být 60 s a směr působení by měl být stejný jakým bude

průchodka zatěžována při provozu. Průchodka splní zkoušku, pokud nedojde k žádné poruše ani únikům.

#### 4.8.2 Kusové zkoušky

Měření ztrátového činitele a kapacity – tato zkouška může být provedena pouze na průchodkách kapacitního typu. Během tohoto testu by vodičem průchodky neměl procházet proud. Zkouška by měla být prováděna mezi 20°C a 40°C za pomoci Scheringova můstku při napětí  $1,05U_m/\sqrt{3}$  pro průchodky kde je  $U_m$  menší než 36 kV a  $1,05U_m/\sqrt{3}$  a  $U_m$  pro  $U_m$  větší než 52 kV. Průchodka splňuje zkoušku, pokud nepřekročí hodnoty ztrátového činitele a kapacity dané normou.

##### Testování odolnosti atmosferickými výboji

Provádí se stejně jako u typových zkoušek, ale pouze pro průchodky s hodnotou napětí impulsu 850 kVp nebo vyšší.

##### Měření četnosti částečných výbojů

Tato zkouška se provádí pro všechny průchodky kromě těch s plynným dielektrikem. Test také nemůže být prováděn na průchodkách, kde se většina izolace skládá z porcelánu, skla anebo jiného podobného materiálu. Test by měl být proveden podle normy IEC std. 60270 o měření částečných výbojů. Průchodka nesplňuje test, pokud jsou hodnoty četnosti vyšší než hodnoty udávané v normě.

##### Testování izolace odbočky

Izolace odbočky, ať už měřicí nebo napěťové, by měla být testována připojením napětí na 60 s. Toto napětí je minimálně 2 kV pro měřicí odbočku a 20 kV pro napěťovou odbočku. Po této zkoušce by měla být změřena kapacita a ztrátový činitel pro odhalení chyb. Průchodka splňuje test, jestliže ztrátový činitel a kapacita zůstanou beze změny.

#### 4.8.3 Speciální zkoušky

Tyto testy se provádějí pouze po dohodě s výrobcem průchodky, jedná se o seismickou zkoušku (IEC std. 61463) a test umělého znečištění (IEC std. 60507).

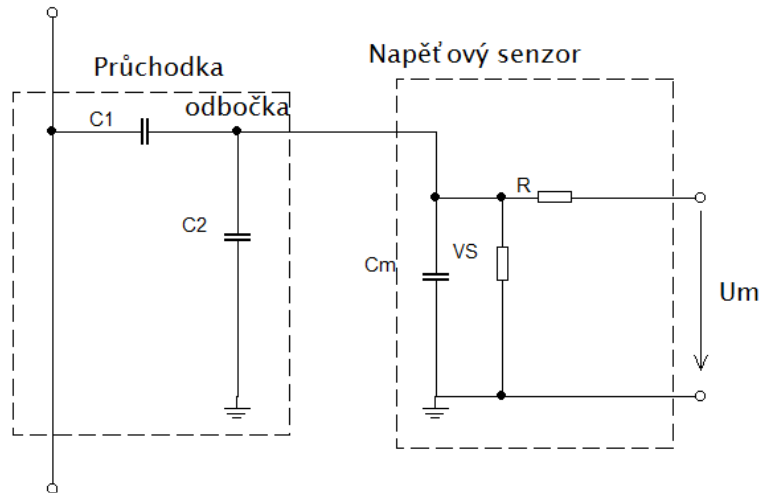
## 5 Online monitoring

Ačkoliv klasické diagnostické metody dokáží odhalit selhání průchodky dřív, než k němu dojde, většina poruch vzniká náhodně během provozu [13]. V posledních letech se proto u dražších zařízení začínají používat monitorovací systémy, které neustále hlídají důležité parametry průchodky. První systémy používaly k určení stavu průchodky základní veličiny, jako je teplota, tlak a hladina oleje [13]. Dnes se však měří stejné parametry jako při off-line diagnostice, a to ztrátový činitel a kapacita průchodky. Vzhledem k tomu, že je ztrátový činitel měřen při provozních teplotách, je toto měření velmi přesné a citlivé.



Obr. 5.1 senzor na průchodce

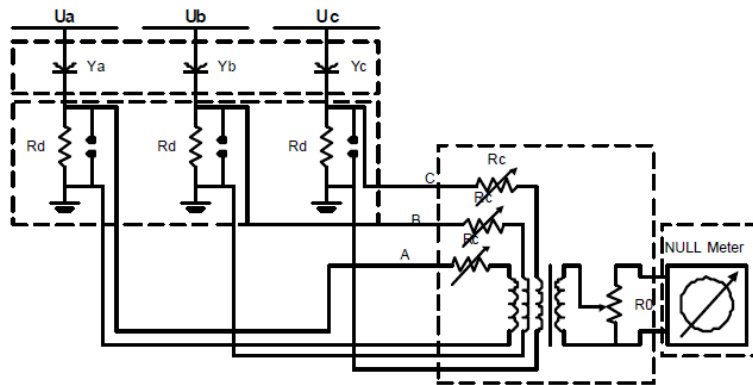
Dnešní systémy fungují převážně na jednom principu, a to je porovnávání signálu (Obr. 5.2 ukazuje získání napěťového signálu). Největším problémem je, jak získat referenční signál, jelikož proud a napětí nelze brát při provozu přímo z průchodky. Metoda získávání referenčního signálu se u různých monitorovacích systémů liší. Signály jsou přes senzory (Obr. 5.1) přivedeny přes A/D převodníky a filtry do mikropočítače a následně zpracovány. Výsledná data poté mohou být uložena až několik let. [23]



Obr. 5.1 připojení napěťového senzoru k průchodce [14]

### 5.1 Referenční signál z každé fáze

Nejjednodušší a také dnes nejčastěji používaný systém funguje tak, že jsou brány signály z měřících odboček všech průchodek na zařízení a následně sečteny (Obr. 5.3). Signály mohou být buď proudové, nebo napěťové, záleží na použitém senzoru. Pokud je výsledný součet nulový, jsou hodnoty ze všech průchodek stejné. Jestliže se ale ztrátový činitel jedné průchodky zvětší, součet proudů nebude nulový a bude nutné provést off-line testování. Tento systém lze použít pouze na vícefázových zařízeních a nebude fungovat, pokud izolace na všech průchodkách bude stárnout stejně. V praxi se také dost projevuje špatná symetrie sítě, to znamená, že součet proudů nikdy není nulový, tudíž toto měření není přesné. [23]



Obr. 5.3 porovnání napěťových signálů všech fází [24]

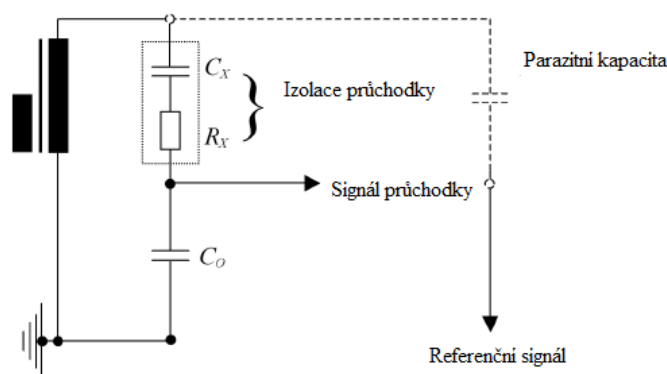
### 5.2 Referenční signál ze dvou stejných průchodek

Další systém podobný tomu prvnímu využívá dvě průchodky v totožné fázi na odlišných transformátorech stejného typu. Porovnávají jsou poté údaje z obou dvou průchodek. Tento

system eliminuje chyby vlivem nesymetrie sítě, avšak nevýhodou je, že stejné průchodky ve fázi nemusí být vždy dostupné a stejně jako u prvního případu se zde neodhalí chyba, pokud izolace průchodek budou degradovat stejně. [23]

### 5.3 Referenční signál z rozptylové kapacity

Další možností, jak získat referenční signál, je využití rozptylové kapacity průchodky (Obr. 5.4). Ta je v tomto případě tvořena elektrostatickým polem (které se mění stejně jako pole v průchodce) vně průchodky a elektrodou, ze které je následně odebírán referenční signál. Aby nedocházelo k přeskokům napětí mezi průchodkou a elektrodou, nesmí být narušena geometrie pole. Bohužel, pokud je tento systém použit v blízkosti dalších vysokonapěťových zařízení, je využívána parazitní kapacita ovlivňována cizími poli a výsledky jsou zkreslené [23]. Dalším faktorem, který ovlivňuje tento systém, jsou proudy na povrchu průchodky [23]. Tato metoda byla zatím zkoušena jen v laboratorních podmínkách. [13]

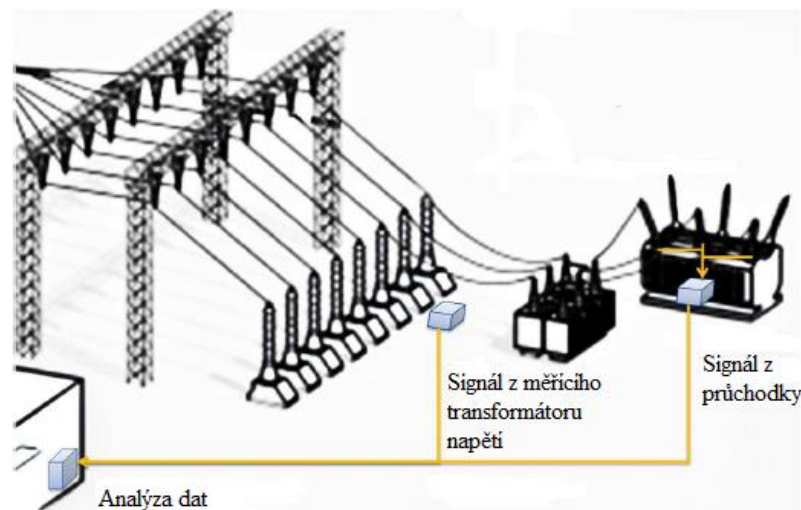


Obr. 5.4 referenční signál z rozptylové kapacity [13]

### 5.4 Referenční signál z měřicího napěťového transformátoru

Jako dosud nejlepší řešení se ukázalo použití referenčního signálu z měřicího transformátoru napětí (Obr. 5.5). Tyto transformátory jsou zařízení, která mají přesně daný transformační poměr a používají se pro měření na vysokých napětích. Měřicí transformátor je připojen na stejnou fázi jako průchodka, ze které získává referenční signál. Jak transformátor, tak průchodka jsou vybaveny vlastním zařízením na zpracování signálů, které jsou pak posílány přes optická vlákna (kvůli minimalizaci fázového zpoždění je potřeba vysoká přenosová rychlost) do vyhodnocovací jednotky. Jako nevýhodu u tohoto řešení lze brát nutnost připojit transformátor na stejné vedení, jako je připojena průchodka a nutnost zajistit dostatečně rychlé vedení signálů. [23]





Obr. 5.5 referenční signál z měřicího transformátoru napětí [23]

## 5.5 Referenční signál dopočítaný systémem

U některých monitorovacích systémů se lze setkat s referenčním signálem, který je dopočítáván z dat výrobce na štítku průchodky. S dnešní technologií je také možné poměrně kvalitně nasimulovat můstky používané pro off-line diagnostiku a ty pak dále využít k online monitoringu. [25]

## 5.6 ABB TMU 100

Systém společnosti ABB využívá jako signály svodové proudy z různých průchodek. Tyto signály jsou následně odeslány po síti na vyhodnocení a přeneseny do řídicího centra. Synchronizace měřených dat je zajištěna za pomoci systému GPS, tudíž jednotlivé jednotky nemusí být propojeny přímo mezi sebou. TMU 100 podporuje vyhodnocování až padesáti průchodek. Systém dokáže zpracovat 50 000 vzorků za sekundu a má rozlišení 18 bitů. Výrobce udává, že je systém schopen měřit fázový posun s přesností  $0,01^\circ$ , změnu amplitudy s přesností  $0,1\%$ , změnu ztrátového činitele s přesností  $0,035\%$  a změnu kapacity s přesností  $0,2\%$ . K přenosu dat TMU 100 využívá buď optické, nebo měděné kabely. [26]

## 5.7 MTE ZVCM-1001

ZVCM-1001 využívá k monitoringu součtovou metodu, kdy je sčítáno až šest svodových proudů. Systém umí také porovnávat fáze všech proudů a počítat ztrátový činitel. Dále je možno vypočítat kapacitu, jejíž navýšení je udáváno v procentech vzhledem k údaji, který

uvádí výrobce průchodky. ZVCM-1001 umí zpracovat 10000 vzorků za sekundu a A/D převodník má rozlišení 16 bitů. Výrobce udávané hodnoty přesnosti jsou následující: svodový proud s přesností 1,5 %, ztrátový činitel s přesností 0,045 %, kapacita s přesností 1 % a fázový posun s přesností 1 %. Komunikace může probíhat po síti LAN nebo za pomoci optických kabelů. [27]

## 5.8 GE Intellix BMT 300

Systém od společnosti GE funguje na lehce odlišném principu. Referenční signál nebere z jiných průchodek, ale sám ho vypočítává z údajů na štítku průchodky. Další odlišností je výpočet změny kapacity, kdy je stávající kapacita porovnána s hodnotou kapacity zaznamenanou při instalaci monitorovacího systému. Systém ale také dokáže porovnat průchodky mezi sebou, zapojeno může být až 6 kusů průchodek (tři na nízkém napětí a tři na vysokém napětí). BMT 300 umí zpracovat 100 000 vzorků za sekundu, rozlišení A/D převodníku bohužel výrobce neudává. Systém měří svodový proud s přesností 0,01 mA a fázový posun s přesností 0,01°. Komunikace probíhá pomocí optických vláken nebo klasické sítě LAN. [25]

## 5.9 WEIDMANN InsuLogicB

InsuLogicB pracuje na podobném principu jako BMT 300. Systém softwarově nasimuluje Scheringův můstek, který je používán při off-line diagnostice a změřením svodového proudu průchodky vypočítá ztrátový činitel a kapacitu. Tyto hodnoty jsou pak porovnány mezi ostatními průchodkami v systému. Systém dokáže zpracovávat data až z osmi průchodek. Systém využívá dva dvanáctibitové převodníky a je schopný přenášet data kabelem po síti LAN nebo bezdrátově za pomoci WIFI. Hodnoty o přesnosti měření bohužel výrobce neudává. [28]

Název systému	A/D převodník	vzorků za sekundu	Přesnost		
			$\Delta C$	$\Delta \tan \delta$	$\Delta \varphi$
TMU 100	18bit	50000	0,20%	0,035%	0,01°
ZVCM-1001	16bit	10000	1,00%	0,045%	1%
Intellix BMT 300	neudává se	100000	neudává se	neudává se	0,01°
InsuLogicB	2x12bit	neudává se	neudává se	neudává se	neudává se

Tab. 5.1 porovnání systémů jednotlivých výrobců [25], [26], [27], [28]

## Závěr

Průchodky prošly za minulá dvě století velkým vývojem. Objevilo se spoustu nových technologií a materiálů, avšak dnes stále nejrozšířenější jsou průchodky typu OIP. To je dáno nejspíše jejich výrobní cenou a také tím, že jsou již prověřené časem. Dnes se však začíná přecházet na modernější technologie, jako jsou RIP a RIS průchodky. RIP průchodky se vyznačují lepšími vlastnostmi než OIP a neobsahují olej. Oproti RIS technologii však RIP stále využívá papír, což znamená, že časem dochází k navlhání a zhoršování vlastností průchodky. Do budoucna se proto dle mého názoru budou stále častěji používat RIS průchodky, jejichž použití je momentálně limitováno maximálním napětím, do kterého mohou být použity.

Pokud se neobjeví nějaká převratná nová technologie, průchodky budou ještě dlouho nedílnou součástí všech transformátorů. S tím souvisí i potřeba včas odhalovat závady a poruchy, které by zapříčinily poškození nejen průchodky, ale i celého transformátoru. Off-line diagnostické metody jsou známy již velmi dlouho a jediná možná cesta, jak je dle mého názoru ještě zlepšit, je zvýšení přesnosti měřicího vybavení. Diagnostické metody jsou velmi přesné, ale na druhou stranu je vždy nutno demontovat průchodku z transformátoru nebo zařízení vypnout a izolovat. Oproti tomu on-line monitoring je u průchodek poměrně nová technologie, která umožňuje sledovat stav průchodky za provozu a neustále se vyvíjí. Většina dnes nabízených monitorovacích systémů funguje na podobném principu, a to porovnávání měřicích signálů z několika průchodek najednou. To s sebou nese několik nevýhod, jak je popsáno v kapitole 5. Do budoucna by proto mohly monitorovací systémy fungovat na různých principech, které jsou dnes zkoušeny pouze v laboratorních podmínkách.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ELLIS, Keith. *Bushings for power transformers: a handbook for power engineers*. Bloomington, IN: AuthorHouse, 2011, xiii, 100 p. ISBN 978-146-3442-767.
- [2] History. ALSTOM. *Alstom Grid* [online]. 2010 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.passoni-villa.com/history.php>
- [3] SCHNIDER, Bruno. ABB GROUP. *Todays technologies for tomorrow RIP & RIS: dry, oil free high voltage condenser bushings for transformers*. Istanbul, 2013.
- [4] HARLOW, James. *Electric power transformer engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2004, 1 v. (various pagings). ISBN 08-493-1704-5.
- [5] HARTINGS, Ralf. DOBLE ENGINEERING COMPANY. *Transformer components: Bushings*. 2013.
- [6] ABB COMPONENTS. *PRODUCT INFORMATION: DIFFERENT INSULATION SYSTEMS IN CONDENSER BUSHINGS*. 2000.
- [7] ALSTOM GRID RESEARCH & TECHNOLOGY. *CHALLENGING ASPECTS IN DESIGN AND TESTING OF UHV BUSHING*. Seoul, 2013.
- [8] ABB COMPONENTS. *Bushing diagnostics and conditioning: Product information*. 2000.
- [9] IEC 60137. *Insulated bushings for alternating voltages above 1 000 V*. 5. vyd. Geneva: IEC Central Office, 2003.
- [10] JONSSON, Lars. ABB COMPONENTS. *RELIABILITY, DESIGN AND SERVICE CHARACTERISTICS ON BUSHINGS*. Sydney, 2006.
- [11] ABB COMPONENTS. *Transformer bushings, type GOE and GOE(2): Technical guide*. 7. vyd. Ludvika, 2010.
- [12] ABB COMPONENTS. *PRODUCT INFORMATION: DIFFERENT INSULATION SYSTEMS IN CONDENSER BUSHINGS*. Ludvika, 2000.
- [13] LIEBSCHNER, M., K. BOEHM, A. REUMANN, A. KUECHLER, R. KRUMP a J. TITZE. *On-line Monitoring of Capacitance and Dissipation Factor of High Voltage Bushings at Service Temperature*. Ljubljana, 2007.
- [14] STIRL, Tobias, Raimund SKRZYPEK, Stefan TENBOHLEN a VILAITHONG. *On-line Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System*. Stuttgart, 2006.

- [15] SINGH, Pritpal. *ABB. C2 POWER FACTOR AND CAPACITANCE OF ABB TYPE O PLUS C, AB, AND TYPE T CONDENSER BUSHINGS*. 2003.
- [16] KANE, Claude. *DYNAMIC RATINGS. ON-LINE BUSHING MONITORING AND COMPARISON TO OFF-LINE TESTING*. [2011]. Dostupné z: <http://www.dynamicratings.com/US/Application/Transformers/Application%20Notes/AppNote8.pdf>
- [17] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [18] M2H. *Technical Diagnostic Services* [online]. 2013 [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.test-equipment-rental.com/doble-m2h.html>
- [19] FACILITIES ENGINEERING BRANCH DENVER OFFICE. *TESTING AND MAINTENANCE OF HIGH-VOLTAGE BUSHINGS*. Denver, 2000.
- [20] WAŃKOWICZ, J., J. BIELECKI, M. SZROT, J. SUBOCZ a R. MALEWSKI. *CIGRE. HV bushing failure in service, diagnostics and modeling of oil-type bushings*. 2010.
- [21] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [22] ABB COMPONENTS. *Electrical routine testing of high voltage bushings*. Ludvika, 2003.
- [23] KOCH, Maik a Michael KRÜGER. *A new method for on-line monitoring of bushings and partial discharges of power transformers*. Bali, 2012.
- [24] LAU, Mike, Tyler SCHWARTZ, Danny BATES, Claude KANE, Alexander GOLUBEV, Anatoliy SELIBER, Valeriy RUSOV a Sergey ZHIVODERNIKOV. *ON LINE MONITORING SYSTEMS FOR BUSHINGS*. 2014.
- [25] GE. *Intellix™ BMT 300: Bushing Monitoring and Partial Discharge Detection for Transformers*. 2013.
- [26] ABB AG TRANSFORMERS. *TMU 100: Monitoring system for high-voltage bushings and on-load tap changers*. Germany, 2013.
- [27] METER TEST EQUIPMENT. *Bushing Monitor ZVCM-1001: On-line Bushing Monitoring System*. Switzerland, 2013.
- [28] WEIDMANN DIAGNOSTIC SOLUTIONS INC. *INSULOGIX® B BUSHING MONITOR*. USA, 2013