



Identifikační číslo projektu:	TK04020069
Název projektu:	Streamery a klouzavé výboje na površích izolantů v alternativních plynech k SF6
Název výstupu/výsledku:	Testovací výbojová komora
Druh výsledku:	Gfunk - Funkční vzorek
Vykazující subjekt:	Vysoké učení technické v Brně
Vlastnické podíly:	100 % Vysoké učení technické v Brně
Autoři výsledku:	Michal Krbal, Michal Ptáček
Termín dosažení:	31. 12. 2022
Interní registrační číslo výsledku:	183151 (IS Apollo)

Obsah

1	Technické řešení	2
1.1	Popis systému	2
1.2	Definice parametrů a vlastností komory pro testování plyných směsí	2
1.2.1	Zkušební napěťové hladiny	2
1.2.2	Změny polohy/rozměrů elektrodového systému a vložených vzorků pevných dielektrických materiálů	3
1.2.3	Použitelné materiály	3
1.2.4	Průzory	3
1.2.5	Měření proudu zemní elektrodou.....	4
1.2.6	Měření vnitřního tlaku	4
1.2.7	Elektrodové systémy.....	4
1.2.8	Interní tlak komory	4
1.3	Návrh jednotlivých funkčních částí komory a konkrétní řešení	5
1.3.1	Zkušební komora.....	5
1.3.2	Vstupní VN průchodka.....	5
1.3.3	Průzory	6
1.3.4	Vertikální pohyb spodní (zemní) elektrody a vyvedení jejího potenciálu	6
1.3.5	Horizontální pohyb vložené bariéry z pevného dielektrika	7
1.3.6	Návrh rozvodů plynů, plnění komory, napojení reclaimera a recyklace plyných produktů	7
1.3.7	Sestavení komory a zkouška hermetické těsnosti	8
1.3.8	Návrh zkušebního elektrodového systému a jeho realizace	8
1.3.9	Návrh a realizace připojení komory na zkušební zdroj.....	9

1 Technické řešení

Zkušební výbojová komora pro testování elektrických parametrů čistých plynů a plyných směsí.

1.1 Popis systému

Zkušební výbojová komora pro testování elektrických parametrů čistých plynů a plyných směsí. Komora je navržena pro plnohodnotné testování plyných izolací pro zařízení do jmenovité hladiny 35 kV, tj. BIL – LI do 170 kV a AC do 70 kV. Přičemž je snaha zachovat možnost testování vlastní výbojové činnosti do přiložených napěťových hodnot vyšších jak jmenovité napětí 35 kV. Hodnota zdánlivého náboje je menší jak 10 pC při 40 kV. Zkušební komora je vyrobena z materiálů odolných vůči plynům jako jsou kyslík, dusík, oxid uhličitý, SF₆ a fluorované uhlovodíky jako alternativy k SF₆ včetně produktů, které vznikají při výbojové činnosti. Zkušební komora je vybavena pohyblivou elektrodou pro změnu geometrie vnitřního jiskřiště a přeskokové vzdálenosti. Do komory je možné také vkládat vzorky pevných dielektrik pro testování výbojové činnosti na jejich rozhraní. S vloženými vzorky je možné manipulovat ve všech třech osách. Výbojovou činnost je možné analyzovat pomocí fotoaparátů, rychlokamer a spektrálních analyzátorů prostřednictvím dvou průzorů. Pracovním tlakem je vakuum až 0,3 MPa abs.

1.2 Definice parametrů a vlastností komory pro testování plyných směsí

Návrh zkušební komory na měření elektrických vlastností/parametrů vložených plyných dielektrik je možné rozdělit na několik oblastí, z nichž každá si žádá vlastní postup úvah k zajištění plnohodnotného naplnění předpokládaných cílů projektu při co nejvyšší míře variability/možných modifikací v budoucnu.

1.2.1 Zkušební napěťové hladiny

– jejich úroveň je základem návrhu celé komory a výchozím parametrem pro určení především rozměrových parametrů jednotlivých komponentů. Cílem navržené zkušební komory je možnost měřit elektrickou pevnost i provádět analýzu výbojové činnosti, trasovat výboje i aplikovat pokročilé diagnostické metody pro předem definované plyny a plyné směsi umístěné do vnitřních prostor zkušební komory. Navržená maximální napěťová hladina přiloženého napětí na vstupní elektrodu zkušební komory/jedné z elektrod vnitřního elektrodového systému odpovídá výdržným napěťovým úrovním pro zařízení s nejvyšším provozním napětím v distribučních sítích v ČR v oblasti MV (medium voltage), tedy 35 (38) kV. Hladina přiloženého střídavého napětí průmyslového kmitočtu pro výdržné zkoušky (AC) je pro tyto zařízení 70 kV a vrcholová hodnota přiloženého impulsního napětí (normalizovaný atmosférický impuls 1,2/50 μ s - LI) je 170/180 kV. Momentálně jsou dostupné znalosti o chování plyných směsí s NOVEC plyny pouze do nižších napěťových hladin. A data pro alternativy k SF₆ při vyšších napětích nejsou k dispozici. Jedním z cílů tohoto projektu je tedy jejich doplnění. Výchozím předpokladem pro návrh komory je také možnost aplikovat diagnostické nástroje – měření elektrických konstant pomocí elektronického můstku a měření výbojové činnosti pomocí měřiče částečných výbojů. Z pohledu elektrické pevnosti lze komoru s výskytem VN potenciálu rozdělit na tři oblasti. Prvním místem je vnější elektroda, ke které se připojuje výstupní potenciál ze zkušebních zdrojů. Zde je nutné zajistit bezvýbojové/bezkoronové připojení výstupního potenciálu především ze zkušebního střídavého zdroje (AC) pro možnosti aplikované diagnostiky do napěťových úrovní alespoň 42 kV (1,2násobek provozního napětí 35 kV zařízení). Druhou oblastí je místo přechodu mezi vnějším prostředím se vzduchovou izolací a vnitřním prostředím komory s izolací tvořenou zvoleným plynem/plynnou směsí. Vhodným uvažovaným elementem je elektrická vysokonapěťová průchodka pro zapouzdřená plynem izolovaná zařízení. Na vnější části této průchodky je nutné zajistit dostatečnou přeskokovou vzdálenost, a především zabránit možnému vzniku plazivých výbojů mezi vstupním VN potencionálem elektrody a zemním potenciálem příruby komory po nejkratší spojnici – vnějším kónickém povrchu průchodky. Třetí oblastí je zajištění dostatečné elektrické pevnosti vnitřní elektrody průchodky a samotného elektrodového systému. V tomto případě je potřebné uvažovat s vyšší elektrickou pevností testovaných plyných směsí oproti vzduchu (cca 3násobek a více – pro plyné směsi NOVEC C4, SF₆ a CO₂ za vyšších tlaků). Hrubým odhadem je při dostatečně homogenní distribuci elektrického pole možné uvažovat s izolační vzdáleností 50 mm. Maximální zkušební přeskoková vzdálenost v rámci elektrodového systému je stanovena na 50 mm (s určitou tolerancí se vychází z přeskokové vzdálenosti v SF₆ při maximálním přiloženém impulsním napětí a absolutním tlaku 3 bar s využitím kulových elektrod se vzdáleností 30-40 mm). Přičemž je nutné

do rozměrových požadavků zahrnout samotné rozměry případných deskových elektrod – průměr zpravidla 2násobek maximální zkušební elektrodové přeskokové vzdálenosti 50 mm tj. 100 mm. Celkově je tedy minimální navrhovaný vnitřní průměr zkušební komory v horizontální rovině (50+100+50 mm) 200 mm. K této hodnotě je vhodné uvažovat také určitou toleranci vzhledem k možným vnitřním svárům komory, nehomogenitám v distribuci elektrického pole a případně dalším prozatím neznámým komponentům vestavy komory.

1.2.2 Změny polohy/rozměrů elektrodového systému a vložených vzorků pevných dielektrických materiálů

– možnost z vnějšku manipulovat a provádět změny nastavení elektrodového systému případně i polohy vloženého vzorku pevného dielektrika bez nutnosti zásahu do vnitřního plynného prostředí vyplývá z předpokladu požadavku na vysokou četnost těchto zásahů a složitost, časovou náročnost případně i vysokou cenu plynné směsi v případě opakovatelného plnění komory. Důležitým aspektem je taktéž opakovatelnost měření a opakovatelné zajištění přesnosti směsného poměru uvažovaných plynných směsí. Při všech možných konfiguracích elektrodových systémů bude nutné měnit přeskokovou vzdálenost od desetin mm do maximální uvažované vzdálenosti elektrod 50 mm. V různých konfiguracích elektrodových systémů nedochází při změně přeskokové vzdálenosti pouze ke změně přeskokového napětí, ale do jisté míry se mění také podmínky pro vznik a formování výbojového strimeru, taktéž dochází k výrazné změně v distribuci elektrického pole. Závislost přeskokového napětí a přeskokové vzdálenosti nevykazuje linearitu. U plánované zkušební komory je uspořádání elektrodového systému v rámci návrhu uvažováno jako vertikální. V horizontální směru je možné umístit vzorky pevných dielektrických materiálů, především pro účely měření změny elektrické pevnosti plynného prostředí/složeného dielektrika v případě vložení pevné bariéry, analýza výbojové činnosti na složeném dielektriku, analýza vzniku a trasování plazivých výbojů na povrchu dielektrických vzorků atd. V rámci návrhu se uvažuje s pohybem vloženého vzorku pevného dielektrika v horizontálním směru pomocí lineárního posuvu. Taktéž je nutné uvažovat s vertikálním pohybem samotného elektrodového systému – spodní zemní elektrody, tudíž i vložený vzorek by měl mít možnost malého korekčního pohybu ve vertikálním směru.

1.2.3 Použitelné materiály

– požadavek na definování vhodných konstrukčních materiálů zkušební komory vyvstal kvůli zajištění chemické/mechanické/povrchové stálosti při různých variantách zvažovaných plynných směsí. Běžné plyny, směsi plynů a plynná izolační média – jako je vzduch, syntetický vzduch, oxid uhličitý, kyslík, dusík, argon případně fluorid sírový nevyžadují zvláštní materiály v přímém styku. Extrémem může být oxidace, případně jiné chemické změny aktivních částí elektrod kvůli vyšším teplotám při výbojové činnosti (týká se převážně aktivních ploch elektrod). Pozor se ale musí dávat na kyslík ve vyšších koncentracích v plynných směsích jak 20 %. Nicméně v rámci cílů projektu jsou uvažovanými plyny/plynnými směsmi také plyny ze skupiny NOVEC – C4 a C5. Ať už v čisté podobě, ale především po výbojové činnosti, kdy se část objemu těchto plynů přeměňuje na tzv. štěpné produkty. Především přítomnost sloučenin fluoru a flourovodíku neumožňuje použití hliníku a slitin s hliníkem. Taktéž lze předpokládat změny/chemické reakce na povrchu mědi/mosazi. Vhodným a doporučeným kovovým materiálem je pouze nerezavějící ocel a izolačním materiálem teflon/silon/keramika.

1.2.4 Průzory

– vizuální přehled o výbojové činnosti/stavu elektrodového systému/poloze elektrod/poloze vloženého vzorku dielektrika a případné trasování vzniklého výboje vyžaduje mít vyvíjenou komoru opatřenou průzory. Pro účely trasování a definování polohy vloženého vzorku materiálu je nutné komoru opatřit dvěma průzory posunutými o 90°. Uvažovaná diagnostika – fotoaparát, rychlokamera, spektrální měření v oblasti VIS a UV do 350 nm (koronová kamera) neklade zvláštní požadavky na materiál skel. Není nutné tedy použít křemenná skla pro propustnost do UVC, ale postačují běžná laboratorní borosilikátová skla. Otázkou na zvážení je případná odolnost na chemickou reakci s produkty štěpení plynů NOVEC s obsahem fluoru. Minimální průměr průzorů je dán jak velikostí objektivů diagnostických nástrojů, taktéž možným pohybem především spodní (zemní) elektrody (0 až 50 mm). Výbojová činnost musí být umístěna v kolmé průmětné ploše viditelné z průzorů. Takže doporučená minimální velikost průzorů (opticky průhledné části) je alespoň 60 mm.

1.2.5 Měření proudu zemní elektrodou

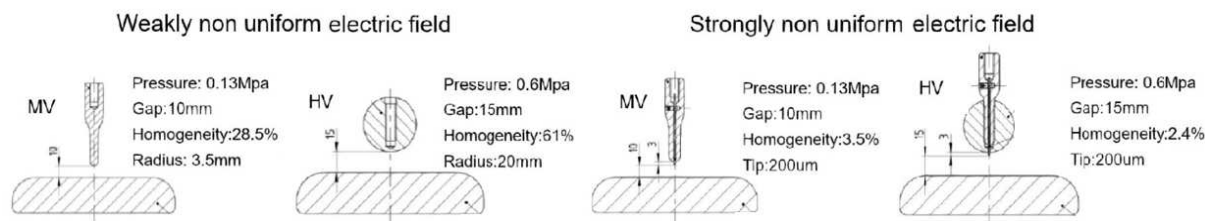
– měření výbojové činnosti ve VTPPL na VUT v Brně je plánováno provádět vazební galvanickou metodou s využitím Hipotronics DDX 7000/8003 s vazebním kondenzátorem 1 nF. Měření tedy probíhá pouze ze strany přiloženého vysokého napětí. V tomto případě se jak samotná komora i spodní (zemní) elektroda účinně uzemňují. Nicméně provedení spodní (zemní) elektrody jako elektricky izolované vzhledem k nádobě komory se jeví jako další vhodná varianta pro měření proudu procházejícího touto elektrodou/dielektrikem, včetně jeho analýzy a alternativně i pro účely měření výbojové činnosti. Uživatelsky by bylo vhodné volit, zda spodní elektroda zůstane galvanicky spojena s nádobou komory a účinně uzemněna nebo zda bude její potenciál možné přes koaxiální rozhraní vyvést pro účely další analýzy včetně impedančního přizpůsobení kabelem.

1.2.6 Měření vnitřního tlaku

– s přesným měřením tlaku plnicího plynu/plynné směsi se uvažuje především ve fázi plnění. Nicméně je vhodné komoru vybavit i měřičem tlaku pro kontinuální monitoring případných úniků/nasávání v případě dlouhodobých měření/aplikovaných diagnostických nástrojů. Ale také z pohledu sledování relativně malých změn vnitřního tlaku vlivem teploty, změny polohy polohovacích zařízení (mění se objem vlnovce), případně pro sledování změn tlaku způsobené chemickými změnami v plynných směsí nebo reakcemi s vloženým pevným dielektrickým materiálem či materiály vestavby komory.

1.2.7 Elektrodové systémy

-ve stádiu návrhu se uvažují všechny technicky dostupné konfigurace elektrodových systémů. V jednoduché konfiguraci hrot-hrot/hrot-deska pro účely počátečního měření elektrické pevnosti čistých plynů N_2 , CO_2 , vzduch, syntetický vzduch. A především pro účely verifikace hodnot elektrické pevnosti (AC i LI) pro čisté plyny/směsi/směsi s NOVEC. Druhou skupinou elektrodových systémů jsou doporučené tvary hrotových/jehlových elektrod od CIGRE viz Obrázek 1 s definovanou distribucí elektrického pole. A třetí skupinou budou elektrodové systémy čistě experimentálního charakteru, jež představují/simulují podmínky distribuce elektrického pole v energetických zařízeních, včetně vložených pevných dielektrických bariér. Pro účely návrhu, verifikační měření a jednoduchost výroby bude první sada elektrod vyrobená z mosazi. Při měřeních s NOVEC plynnými směsí již bude nutné použít materiál elektrod z nerezové oceli.



Obrázek 1 - Elektrodové systémy CIGRE

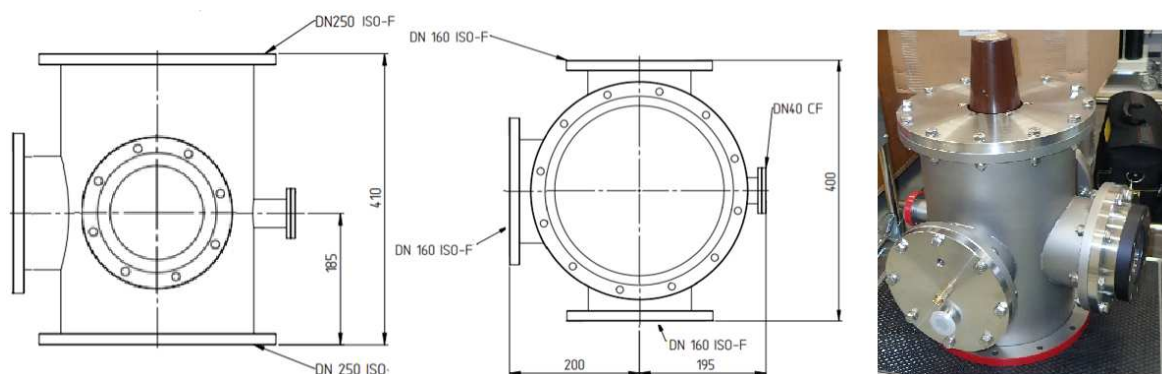
1.2.8 Interní tlak komory

– projekt je cílen na měření alternativních plynů/plynných směsí k SF_6 . Cílí na měření parametrů, analýzu vzniku výbojové činnosti a celkové chování těchto plynů za předpokladu jejich aplikace v energetických zařízeních. Z toho vyplývají i provozní tlaky izolačních plynných médií v těchto zařízeních, které jsou zpravidla od tlaku atmosférického, po zhruba 3 bar (cca 300 kPa abs). Tlaky vyšší (3-6 bar) jsou taktéž často prakticky použity, především ve výkonových vypínačích, zapouzdřených přípojnicích a kondenzátorech izolovaných SF_6 . Z pohledu řešení projektu není nutné provádět experimentální měření při tlaku vyšším jak 3 bar, jelikož chování plynů je dostatečně predikovatelné/aproximovatelné. Z tohoto důvodu, a především z pohledu bezpečnosti i možností realizace zkušební komory – mechanické posuvy, průzory s velkým průměrem atd. bylo rozhodnuto o maximálním vnitřním tlaku komory 3 bar (cca 300 kPa abs., cca 200 kPa přetlak). Zvláštní pozornost byla ale věnována také tlakům nižším než tlak atmosférický. Zvláště pak z pohledu nutnosti čerpání plynů/plynných směsí do prostředí bez zbytků plynů/produktů po předchozích experimentech je nutné zajistit jejich odčerpání vakuovou pumpou – vývěvou, teoreticky až na úroveň hlubokého vakua (z pohledu dodržení požadavků na čistotu plynů v řádech 0,1 % postačuje hrubé vakuum). Všechny komponenty komory musejí být tedy navrženy nejen na plánovaný přetlak, ale i podtlak

1.3 Návrh jednotlivých funkčních částí komory a konkrétní řešení

1.3.1 Zkušební komora

– Realizace komory ve tvaru válce ze skla/kovu byla hned zpočátku vedených úvah zavržena. Kromě jednodušší konstrukce nepřináší žádnou výhodu. Na první pohled vizuální dostupnost všech částí komory je přes optickou deformaci průchodu světla přes stěnu válce nepoužitelná pro účely diagnostiky. Na válcovou stěnu bez zpevnění je obtížné umístit posuvy, případně přívod plynu, měření atd. Navíc pokud by celá komora (stěny válce) byla ze skla, tak i obtížné by bylo provedení měření výbojové činnosti kvůli výraznému rušení bez efektivního stínění. Druhou a také nevhodnou variantou byla zvažovaná konstrukce buňky ve tvaru krychle nebo kvádrů o čtvercovém základu. Relativně jednoduchá konstrukce sebou nese nevýhody především v neefektivním využití plynné náplně, mechanicky malé pevnosti s uvažovanou deformací/pohybem systému nastavování polohy při různém vnitřním přetlaku/podtlaku. A z pohledu distribuce elektrického pole v okolí vnitřního elektrodového systému je toto řešení také nevhodné. Nakonec zelenou dostal návrh realizace zkušební komory ve tvaru tříosého kříže. Vnitřní nosný válec o průměru 250 mm (splněn požadavek minimálního horizontální rozměru/průměru komory vyplývající z požadavku umístění elektrodového systému a elektrické pevnosti zvažovaného plynného prostředí) ve vertikálním umístění je ve spodní i horní části vybaven přírubou DN 250 ISO-F. V horní části je uvažována vstupní vysokonapěťová průchodka. A na spodní straně je umístěna nízkonapěťová průchodka - vývod ze spodní (zemní) elektrody a je zde také realizován vertikální posuv této elektrody. Po bočních stranách válce jsou 4 příruby. 3 příruby jsou DN 160 ISO-F. První je určena pro přívodní ventil pro účely plnění komory, bezpečnostní přetlakový ventil a integrované kontinuální měření tlaku. A zbývající dvě příruby slouží pro umístění optických průzorů. Poslední čtvrtou přírubou je DN 40 ISO-F pro umístění horizontálního posuvu vloženého pevného dielektrika. Konstrukčním materiálem celé komory je nerezavějící ocel. Náčrt návrhu komory a výsledná realizace je na Obrázku 2.



Obrázek 2 – Zkušební komora

1.3.2 Vstupní VN průchodka

– slouží pro přivedení VN potenciálu na vnitřní elektrodový systém (horní pevnou elektrodu) komory, zajišťuje dostatečnou elektrickou pevnost prostředí na vnější i vnitřní straně komory a zároveň hermeticky odděluje vnitřní atmosféru komory od vnějšího prostředí. Nejprve byly uvažovány keramické průchodky distribučních transformátorů. Nicméně jejich laboratorní ověření nebylo úspěšné. Především kvůli vysoké úrovni vnitřní výbojové činnosti a nízké elektrické pevnosti vnitřní části. Nakonec bylo rozhodnuto o použití vysokonapěťové průchodky do plynem izolovaných rozvaděčů. Tato průchodka splňuje všechny potřebné parametry. Průchodka je dimenzovaná na napěťovou hladinu >40 kV, přičemž její vlastní výbojová činnost je <2 pC při 45 kV a je testována výdržným střídavým napětím 95 kV po dobu 5 minut a LI výdržná zkouška byla provedena s vrcholovou hodnotou 215 kV. Parametrově by měla vše potřebné splňovat včetně tolerancí. Nicméně je nutné podotknout, že tato průchodka je určena pro izolační médium SF₆ na vnitřní straně a na vnější straně musí být umístěn/nasazen kabelový konektor/adaptér s vlastním stíněním. Zvolená elektrická průchodka byla před instalací v komoře laboratorně ověřena. Vnější střídavá elektrická pevnost samotné průchodky proti přírubě je cca 50 kV. Přičemž zvýšením povrchové elektrické pevnosti na vnitřní i vnější části přidáním izolačních kruhů bylo možné střídavou elektrickou pevnost zvýšit až k cca 65 kV. Elektrická pevnost při impulsním namáhání LI dosáhla cca 150 kV. Vnitřní výbojová činnost byla měřitelná od cca 35 kV. Parametry průchodky jsou mírně pod potřebnými, nicméně je zde velký potenciál možných vylepšení – viz další kapitoly zprávy. Fotografie použité elektrické

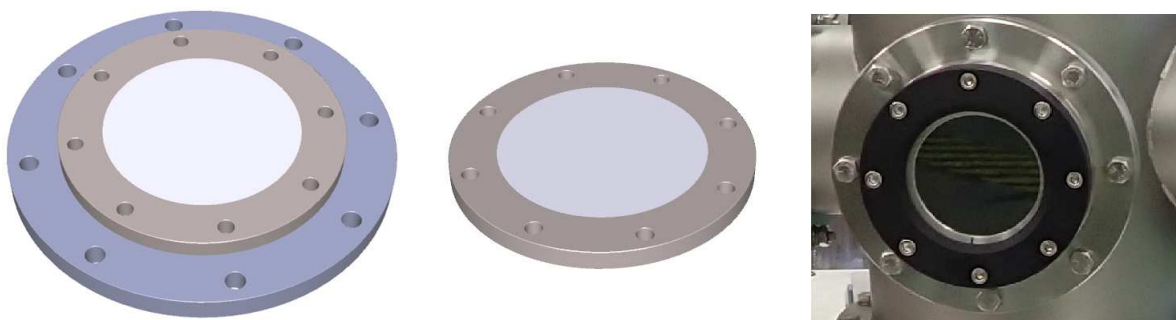
vysokonapěťové průchodky a laboratorní ověřování jejich elektrických parametrů jsou uvedeny na Obrázku 3.



Obrázek 3 - Vysokonapěťová průchodka a její laboratorní testování

1.3.3 Průzory

– dva optické průzory o průměru 100 mm (s označením Viewport Zero L Glass ISO-F 100) byly umístěny na přírubu DN 160 ISO-F pomocí redukce na DN 100. Průzory zvládají podtlak při čerpání plynu a také potřebný přetlak. Umístění průzorů může být kdekoliv na přírubu DN 160 ISO-F, tedy průhledově nebo kolmo. Prozatím je využito kolmé konfigurace. Demontáž jednoho z průzorů umožňuje mechanický zásah do vnitřního uspořádání komory – výměnu elektrod, montáž vzorku pevného dielektrika, čisticí procedury atd.



Obrázek 4 – Optické průzory

1.3.4 Vertikální pohyb spodní (zemní) elektrody a vyvedení jejího potenciálu

– podle návrhu je spodní (zemní) elektroda elektrodového systému vyvedena na potenciál oddělený od potenciálu komory. Výstupem je BNC konektor. Cílem je možnost měřit proud procházející elektrodovým systémem. Potenciál ze středního pinu BNC konektoru je vyveden přes „vlnovod“ s vlnovou impedancí přibližně 50 Ω na spodní elektrodu elektrodového systému. BNC průchodka (označením Feedthrough BNC 500 V DN 40 CF) je mechanicky připojena na spodní část příruby komory DN 250 ISO-F přes navařenou redukci a lineární vertikální posuv (s označením CLSM38 50-H od výrobce Lesker) s maximálním zdvihem 50 mm. Fotografie nízkonapěťové průchodky a lineárního vertikálního posuvu je na Obrázku 5.



Obrázek 5 – Nízkonapěťová průchodka a vertikální posuv spodní (zemní) elektrody

1.3.5 Horizontální pohyb vložené bariéry z pevného dielektrika

– horizontální posuv umístěného vzorku pevného dielektrika do vnitřního prostoru elektrodového systému umožňuje s vloženým vzorkem lineárně horizontálně manipulovat v rozsahu ± 25 mm (označení LBD-35-25-H od výrobce Lesker). Přičemž je uvažováno s korekcí tohoto pohybu jak v osách Y i Z (XY), tj. směrech kolmých na horizontální pohyb vloženého vzorku s rozsahem ± 10 mm. Korekce horizontálního posuvu vzorku (s označením XY Axis Manipulator 420MXY040-12 DN 40 od výrobce Pfeiffer) umožňuje docílit plnohodnotného tříosého posuvu a tím i částečně korigovat možnosti vertikálního pohybu spodní (zemní) elektrody elektrodového systému. Systémy vertikálního posuvu včetně XY manipulátoru jsou znázorněny na Obrázku 6.



Obrázek 6 – Vertikální posuv vloženého vzorku pevného dielektrika včetně manipulátoru XY pro plnohodnotný 3osý posuv

1.3.6 Návrh rozvodů plynů, plnění komory, napojení reclaimera a recyklace plynných produktů

Kromě samotné zkušební komory bylo zapotřebí provést návrh rozvodů plnicích plynů/plynných směsí, a především zajistit přesná plnění jedním i více plyny. Navíc jak z pohledu potencionální toxicity, tak i z pohledu ekologie a zákazu úniku technických plynů NOVEC i SF₆ do okolního prostředí bylo nutné zajistit jejich zachycení, uložení i následnou recyklaci.

Z pohledu testování/měření elektrických parametrů a výbojové činnosti v definovaném plynném prostředí jako alternativa k SF₆ bylo rozhodnuto o použití samostatného tlakového vzduchu, syntetického vzduchu (20 % O₂ a 80 % N₂), oxidu uhličitého CO₂, dusíku N₂, kyslíku O₂, čistého plynu NOVEC 4710 C4 C₄F₇N a připravené plynné směsi (20 % O₂, 15 % NOVEC 4710 C4 a 65 % CO₂). Uvedené technické plyny jsou umístěny v tlakových lahvích a rozvody plynů vzájemně propojeny tak, aby bylo možné dosáhnout libovolné jejich směsi. Na počátku experimentálního měření je uvažováno především s verifikačním měřením přeskokového napětí v jednoduchých/jednosložkových plynných atmosférách N₂, CO₂, syntetický vzduch. Následně budou probíhat verifikační měření s již připravenou plynnou směsí NOVEC C4 s CO₂ a O₂. A v dalším průběhu realizace projektu již bude prováděno měření/diagnostika v uživatelsky libovolné směsi daných plynů. Například zvažovanou variantou je C₄F₇N/CO₂/O₂ v poměrech 10 %/64 %/26 % nebo 10 %/45 %/45 % do maximálního absolutního tlaku 300 kPa. Problematické je především plnění zkušební komory více jak jedním plynem/připravenou plynnou směsí. Byl navržen detailní postup plnění komory s odčerpáváním zbytků plynů z rozvodů a jejich recyklace. Taktéž byl navržen způsob odčerpávání plynů/produktů ze zkušební buňky po provedeném experimentu za pomoci tzv. reclaimera.

Rozvody plynů se sestávají ze samostatných tlakových lahví technických plynů (200 bar) i připravených plynných směsí. Každá tlaková láhev je vybavena redukčním ventilem pro snížení a nastavení maximálního výstupního tlaku plnění do 10 bar. Dále je k rozvodu přes jehlový ventil připojena jednotka reclaimera. Reclaimer se skládá z vakuové pumpy umožňující vyčerpání plyn z testovací komory i rozvodů plynů do tlaku cca 10 mbar (1 kPa abs.). Pro vyčerpání na požadovanou úroveň (pro dosažení čistoty plynu pro plnění alespoň 1/1000 – 0,1 % tj. 100 Pa abs. a méně) je již použita externí rotační olejová dvoustupňová vývěva. Samotný reclaimer se kromě vakuové pumpy skládá z kompresoru, jež odsátý plyn z komory a rozvodů umožňuje natlačit do tlakové láhve s odpadním plynem s tlakem až 50 bar (cca 5 MPa). Tímto způsobem je zajištěno vyčerpání i potencionálně toxických a k životnímu prostředí škodlivých plynných směsí z komory a jejich uložení do tlakové láhve. Na konci projektu budou naplněné tlakové láhve odpadních plynů předány k recyklaci. Rozvody jsou kompletně provedeny ocelovou 6 mm trubičkou. Samotná komora se k rozvodu plynů připojuje ocelovou hadicí se zakončením DN25 ISO-KF. Principiální schéma rozvodu plynů s fotografií tlakových lahví, rozvodem plynů a reclaimer jednotkou je na Obrázku 7. Výše popsaný systém plnění je taktéž použit pro zkušební komoru MUNI, která se bude připojovat přes totožnou ocelovou hadicí se zakončením DN25 ISO-KF.



Obrázek 7 – Schéma rozvodů plynů, tlakové láhve, reclaimer jednotka a detail rozvodů s měřením

1.3.7 Sestavení komory a zkouška hermetické těsnosti

Zkušební komora je umístěna na konstrukci mobilního podstavce/rámu. Tím je zajištěna jak snadná transportabilitnost z místa plnění do zkušební komory s VN zdroji a dalšími diagnostickými nástroji. Ale i možnost umístění mechanického polohovacího zařízení pro nastavení spodní (zemní) elektrody vertikálního posuvu a možnost vyvedení potenciálu této elektrody, případně přivedení zemního potenciálu na samotnou komoru/rám.

U zkušební komory byl proveden test hermetičnosti i tlaková zkouška do přetlaku 4 bar. Tlaková zkouška byla provedena s průzory i VN průchodkou. Poté byla komora vybavena mechanickými posuvy, nízkonapěťovou průchodkou a přetlakovým bezpečnostním ventilem do 2 bar. Fotografie komory umístěné na podstavec je na Obrázku 8.



Obrázek 8 – Sestavení zkušební komory

Zkouška hermetičnosti zkušební komory byla provedena nejprve podtlakem s využitím vývěvy v jednotce Reclaimeru – dosaženo bylo tlaku cca 5 mbar (500 Pa), přičemž nebyly nalezeny úniky (nasávání) a tlak zůstal do dobu několika hodin konstantní. Následně byl proveden i test přetlakem do maximálního provozního tlaku pomocí N₂ a také CO₂. Taktéž nebyly nalezeny úniky a tlak zůstal po celou dobu sledování na konstantní úrovni. Všechny mechanicky pohyblivé části komory zůstávaly plně funkční a bez poškození.

1.3.8 Návrh zkušební elektrodového systému a jeho realizace

V průběhu řešení projektu v rámci experimentálních měření s využitím zkušební komory se uvažuje s několika sadami zkušebních elektrod i jejich modifikací. Pro verifikační měření jsou určeny základní uspořádání elektrodového systému v konfiguraci hrotová/jehlová elektroda – desková elektroda, hrotová/jehlová elektroda – hrotová/jehlová elektroda, kulová elektroda – desková elektroda, kulová elektroda – kulová elektroda, tj. základní konfigurace elektrod se známou a simulacemi ověřitelnou distribucí elektrického pole. Takže konfigurace těchto elektrod budou složité pro statistická ověřovací měření elektrické pevnosti plynem zaplněného izolačního prostoru elektrodového systému – zkoušky do přeskočení při přiloženém střídavém napětí průmyslového kmitočtu a při přiloženém impulsním

napětí. Pro další pokročilá experimentální měření budou vytvořeny elektrodové páry/kombinace vhodných elektrod/elektrod s nanesenou dielektrickou vrstvou pro účely jak aplikace diagnostických nástrojů – měření výbojové činnosti vizuálně (rychloměry, koronové kamery) a elektronicky pomocí měřičů částečných výbojů. Tak pro experimentální měření vzniku a charakteru šíření plazivých výbojů jak v axiálním tak i radiálním směru, taktéž bude studována tvorba výbojů na úzké štrbině a všeobecně bude prováděno studium bariérových/koplanárních výbojů v různé konfiguraci uspořádání elektrodového systému a vloženého pevného dielektrika.

Z výše uvedeného vyplývá potřeba snadno a rychle měnit obě elektrody, resp. jejich aktivní část ovlivňující distribuci elektrického pole. Z tohoto důvodu bylo navrženo použití prodlužovacích redukci/bajonetů jak od VN průchodky, tak od potenciálu země, až do prostor vizuálně dostupných přes průzory. VN potenciál je do vnitřních prostor zkušební komory přiveden elektrickou průchodkou, tedy je pevný bez možnosti změnit polohu. Cílem prodlužovacího bajonetu VN potenciálu je nepřispívat k výbojové činnosti. Potenciál spodní (zemní) elektrody je vyveden na NN průchodku s konektorem BNC. Za účelem experimentálního měření výbojové činnosti je potenciál spodní elektrody vyveden navrženým vlnovodem (masivní tyč potenciálu elektrody oproti konstrukci komory) s vlnovou impedancí přibližně 50Ω , tedy adaptaci na vlnovou impedanci BNC konektoru a následně i koaxiálního kabelu. Navržené impedanční přizpůsobení umožní měření proudových impulsů až do řádu desetin a jednotek ns. Systém spodní elektrody je ve vertikálním uspořádání z části realizován jako samonosný. Dielektrikum a zároveň nosný izolační materiál ve spodní části elektrody v místě napojení na konektor je vyroben z teflonu. Detail mechanického připevnění zemní elektrody na BNC konektor je na Obrázku 9. Prozatím je vyrobena desková rotační elektroda s průměrem 10 mm a sada hrotových elektrod s rádiusem ve vrcholové části cca $100 \mu\text{m}$. Jednotlivé elektrody se do prodlužovacích bajonetů připojují metrickým závitem. Prozatím jsou všechny kovové prvky elektrodového systému vyrobeny z mosazi, tudíž vhodným testovaným médiem jsou plyny a plynné směsi bez NOVEC 4710 C4. Jakmile budou odladěny všechny nedostatky stávajícího elektrodového systému, zváží se všechny varianty pro univerzální řešení a bude nutné pro testy používat NOVEC plyny, bude celý elektrodový systém vyroben z nerezavějící oceli. Ukázka současných mosazných prodlužovacích bajonetů, elektrod a jejich umístění do zkušební komory je uvedeno na Obrázku 10.



Obrázek 9 – Mechanické připevnění zemní elektrody na výstupní průchodku



Obrázek 10 - Ukázka prodlužovacích bajonetů, elektrod a jejich umístění do zkušební komory

1.3.9 Návrh a realizace připojení komory na zkušební zdroj

Zkušební komora bude v rámci experimentálních měření připojena na VN zdroje ve zkušebním prostoru. Plánovanými minimálními hodnotami přiložených zkušebních napětí je 170 kV vrcholové hodnoty impulsního napětí (LI) a 70 kV efektivní hodnoty střídavého napětí (AC), přičemž do cca 40 kV je požadavkem vlastní bezvýbojová činnost. Očekávaná vnitřní elektrická pevnost použité průchodky je dána limity výrobce, tedy 215 kV pro LI a 95 kV pro AC. Vnější elektrickou pevnost je možné rozdělit na část průchodky, která se nachází uvnitř zkušební komory – izolačním médiem bude testovaný plyn, a vnější části průchodky izolované okolním vzduchem. Před použitím samotné

průchodky byla experimentálně změřena její elektrická pevnost - maximálně 50 kV. Tato hodnota je nedostačující, takže byla provedena úvaha, jak ji zvýšit na potřebných alespoň 70 kV. Experimentálně se ještě otestovalo použití izolačních plastových kruhů, jež napomohly ke zvýšení elektrické pevnosti na cca 65 kV AC a 150 kV LI. V duchu podobné myšlenky byla vytvořena obálka z pevného dielektrika (materiál PP), která svým umístěním na kónickou část vnější části průchodky umožní prodloužit přímou přeskokovou vzdálenost mezi vstupním VN potenciálem a potenciál země na přírubě komory. A taktéž zabrání vzniku plazivých výbojů na povrchu průchodky podobně jako nasazený kabelový konektor/adaptér. Na Obrázku 11 je toto řešení znázorněno. Bohužel zatím není prakticky otestováno, jelikož prozatím testované plyny nedosáhly potřebné elektrické pevnosti pro možnosti zvýšení napětí na maximální velikost. Na místo přivedeného vysokonapětového potenciálu je umístěna vstupní polokulová rotační elektroda, která vytváří vhodnou distribuci elektrického pole v místě připojení – experimentálně ověřeno, že nepřispívá ke koruně až do hodnoty cca 55 kV přiloženého střídavého napětí. Zároveň tato elektroda kryje místo připojení zkušebního zdroje a svým hladkým tvarem (homogenizace a snižování intenzity el. pole) zabraňuje vzniku přeskoků a zvyšuje elektrickou pevnost mezi VN potenciálem a zemním potenciálem komory.



Obrázek 11 – Vstupní VN elektroda a zábrana vzniku plazivých výbojů po povrchu průchodky

V případě měření přiloženým střídavým napětím je možné výstupní potenciál zkušebního zdroje připojit přímo. Připojení se provádí VN připojovací hadicí (vodíčem velkého průměru), která zajišťuje bezvýbojovou činnost připojení až do napěťové úrovně cca 100 kV. Vstupní elektroda komory je pro účel přímého připojení hadicí vybavena masivním vstupním hliníkovým konektorem. V případě potřeby provádět experimentální měření s omezeným výkonem/proudem, resp. omezeným nábojem v případě impulsů, je možné použít proud omezující rezistor. Rezistor využívá vodu (destilovaná, voda s nižší vodivostí) jako odporového materiálu. Rezistor se mechanicky připojuje přímo na vstupní elektrodu komory přes konektor. Hodnota rezistivity se může nastavit od jednotek po stovky k Ω podle potřeby. Ukázka vstupního konektoru, přímé připojení komory na zkušební zdroj a připojení přes proudomezující rezistor je uvedena na Obrázku 12.



Obrázek 12 – Přímé připojení zkušební komory na výstupní potenciál VN AC zdroje, připojení přes proudomezující rezistor a detail vstupního konektoru komory