

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND COMMUNICATION**

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

DEPARMENT OF RADIO ELECTRONICS

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE LIGHTNING
ON SMALL AIRCRAFT**

NUMERICKÁ ANALÝZA ÚČINKU BLESKU
NA MALÉ LETADLO

SHORTED VERSION OF DOCTORAL THESIS

Author (Autor práce)

Ing. David Krutílek

Supervisor (Školitel)

Prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

KEYWORDS

Numerical analysis, electromagnetic compatibility, direct effects of the lightning, indirect effects of the lightning, lightning, aircraft.

KLÍČOVÁ SLOVA

Numerická analýza, elektromagnetická kompatibilita, přímé účinky blesku, nepřímé účinky blesku, blesk, letadlo.

STORAGE PLACE

Research department, FEEC BUT, Technická 3058/10, 602 00 Brno

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vědecké oddělení, FEKT VUT v Brně, Technická 3058/10, 602 00 Brno

OBSAH

Úvod	5
1 Současný stav	7
1.1 Úder blesku do letounu z pohledu leteckých norem.....	7
2 Cíle Disertační práce	9
3 Experimentální charakterizace elektromagnetické ochrany letadel	10
3.1 Měření stínící účinnosti kompozitních materiálů	10
3.1.1 Koaxiální měřicí přípravek	11
3.1.2 Požadavky na měřené vzorky	13
3.1.3 Vzorky pro určení optimální skladby kompozitu	13
3.2 Mechanická ochrana a odolnost proti úderu blesku	17
3.2.1 Testovací zařízení a vzorky.....	18
3.2.2 Testovací průběhy.....	19
3.2.3 Výsledky testování úderu blesku v zóně 2A.....	20
3.2.4 Výsledky testování úderu blesku v zóně 1A.....	20
3.3 Shrnutí.....	22
4 Účinky bleskového výboje: Numerická Analýza kompozitní nosové části EV-55	23
4.1 Analýza výsledků simulace úderu blesku.....	24
4.1.1 Zkoumání vlivu potahu na rozložení proudu	24
4.1.2 Rozložení bleskového proudu na zjednodušeném modelu.....	24
4.1.3 Výpočet magnetických sil působících na hydraulické potrubí.....	26
4.1.4 Určení ohřátí měděného divotoru průchodem bleskového proudu ..	27
4.1.5 Určení možnosti přeskočení bleskového proudu na vnitřní instalaci ...	27
4.2 Shrnutí.....	28
5 Závěr	29
Reference	30
Curriculum vitae	32
Abstrakt	33

ÚVOD

Tato teze disertační práce se zabývá jednou z možností, jak lze analyzovat účinky způsobené úderem bleskového výboje do malého letounu. Cílem analýzy je přispět k co nejlepší ochraně proti negativním vlivům účinků blesku.

Odhaduje se, že na běžně provozovaném dopravním letadle dochází k zásahu blesku průměrně jednou až dvakrát do roka. Letoun většinou vyvolá blesk průletem přes silně nabitou oblast mraku, kdy se sám stane spouštěčem blesku. U menších civilních a soukromých letounů tak často k zásahům bleskem nedochází. Je to dáno jejich velikostí a tím, že se snaží většinou bouřce vyhnout. Nicméně bylo zaznamenáno mnoho případů, kdy došlo k poškození křídel, vrtulí a pozičních světel i na menších strojích.

V roce 1967 byl zaznamenán nejhorší pád velkého komerčního letadla způsobený bleskem, kdy v důsledku zásahu nad Marylandem explodovaly palivové nádrže. Všech 81 lidí na palubě letounu Boeing 707 zahynulo [1]. K další větší letecké nehodě došlo o třináct let později, když se iránský Boeing 747 přibližoval k Madridskému letišti. Zemřelo tehdy 17 lidí a na vině byl opět výbuch palivové nádrže [2].

Od té doby se výrazně zlepšily možnosti ochrany letounů proti úderu blesku. Tato ochrana se navíc s příchodem nových materiálů používaných v letectví neustále zdokonaluje. V současné době mají výrobci letadel povinnost prokazovat odolnost proti přímým účinkům blesku. Způsob prokazování je dán certifikačními předpisy a prostředky jejich prokazování [3], [4], [5], [6], [7] [8]. Dále jsou vydávány návodné materiály k ověření bezpečnosti konstrukce letadla [9], [10], [11].

Většina provozovaných letadel má stále potah z leteckého duralu, který je poměrně dobře vodivý a funguje jako Faradayova klec. Tím se zajistí, že většina bleskového proudu zůstane na povrchu letadla. Některá moderní letadla jsou ale zcela vyrobena z pokročilých kompozitních materiálů nebo jsou tyto kompozitní materiály použity na vybrané části letadla.

Používané kompozitní materiály jsou výrazně méně vodivé než dříve používané speciální kovové slitiny. Proto se jako jedna z vrstev potahu používá speciální měděná kovová mřížka. Navíc jsou a do kompozitu vlamínovány měděné pásy, které vytvoří vodivou cestu pro bleskový proud.

Účinky, které zásah blesku vyvolá, dělíme na přímé a nepřímé [12].

- Přímé účinky bleskového výboje

Přímý účinek blesku nastává, pokud se letoun stane součástí vodivého kanálu blesku. Při zásahu blesku může dojít k mechanickému poškození, neboť plasma, kterou je tvořen vodivý kanál, dosahuje teploty až 20 000 °C a bleskový proud může dosahovat kolem 200 kA. Průchodem takto vysokého proudu může ve spojích vzniknout jiskření.

Jiskření je obzvláště nebezpečné uvnitř palivových nádrží, kde může dojít k zapálení třaskavé směsi výparů paliva se vzduchem. Nebezpečný může být i průchod části bleskového proudu kloubovými spoji táhel řízení nebo zámky dveří. Může totiž dojít k jejich svaření, a posádka tak ztratí vládu nad strojem nebo nemůže opustit letoun v případě nouzového přistání.

Analýzami můžeme zjistit, kudy bleskový proud protéká, a můžeme tak navrhnout dostatečnou ochranu. Ta spočívá v přemostění kritických míst a vytvoření vodivější cesty pro bleskový proud, která odkloní proud z jeho trasy.

Numerickými výpočty můžeme také analyzovat další jevy, jako jsou například magnetické síly působící na palivové nebo hydraulické potrubí, či oteplení způsobené protékajícími proudy. Dále můžeme vytipovat místa, kde by mohlo dojít k přeskoku blesku na chráněné vnitřní instalace, které jsou kritické z hlediska bezpečnosti letu a přistání.

- **Nepřímé účinky bleskového výboje**

Průchod blesku po kovovém potahu letounu vyvolává na kabeláži přechodové jevy, které mohou ovlivnit činnost zařízení umístěného v blízkosti pod potahem. Přechodové děje vyvolané v kabelových svazcích průchodem bleskového proudu potahem letadla jsou nazývány nepřímými účinky blesku. V případě potřeby můžeme nepřímé účinky zmírnit pečlivým stíněním kabeláže a jeho ukostřením k vodivým částem konstrukce draku. Přípustná velikost rušivého napětí, které se může naindukovat, je určena evropskými normami nebo je předepsána výrobcí zařízení.

Tato práce se zaměřuje na numerickou experimentální charakteristiku vlastností kompozitních materiálů. Důraz je přitom kladen na ochranu proti úderu bleskového výboje. Práce se dá rozdělit do tří základních částí.

V první části se poměrně detailně věnuji problematice ochrany proti účinkům blesku z pohledu norem a z pohledu měřících a numerických metod, používaných k popisu elektromagnetických vlastností kompozitních materiálů. Dále zde diskutuji problematiku ochrany kompozitních materiálů před nežádoucími jevy.

V druhé části se zabývám experimentální charakteristikou kompozitních materiálů z pohledu přímých a nepřímých účinků bleskového výboje. Na základě výsledků experimentů diskutuji návrh optimální struktury kompozitních materiálů a rozebírám vhodnou volbu ochrany kompozitů umístěných v různých bleskových zónách.

V třetí části se věnuji numerickým analýzám a vyhodnocuji jevy, které mohou nastat při úderu blesku. Na základě výsledků těchto analýz lze efektivně navrhnout ochranu a odhadnout, kudy se bude bleskový proud pravděpodobně šířit.

1 SOUČASNÝ STAV

V této kapitole jsou velmi stručně shrnuty metody a způsoby testování úderu blesku do letounu. Tento souhrn nám pomůže pochopit metodiku prokazování odolnosti letounu proti účinkům blesku. Dále jsou zde prezentovány vybrané poznatky o využití metod výpočetního elektromagnetismu (*computational electromagnetics*, CEM) v oblasti leteckého průmyslu.

Dosavadní publikace můžeme podle vnějších vlivů, které působí na letoun během běžného provozu, rozdělit do dvou skupin:

- Vlivy polí s vysokou intenzitou (*high intensity radiated fields*, HIRF)

Zdrojem HIRF mohou být například rozhlasové a televizní vysílače, radiotechnické prostředky používané na letištích, radary apod. V oblasti leteckého průmyslu se řešením problematiky HIRF blíže zabývaly výzkumné a vývojové projekty ARTEMIS [13] (*Analytical Research of Threats in Electro-Magnetically Integrated Systems*; 2007–2010) a HIRF-SE [14] (*High Intensity Radiated Field – Synthetic Environment*; 2008–2013). Uvedené projekty si kladly za cíl nahradit některé finančně náročné testy numerickými výpočty, a díky tomu snížit cenu procesu certifikace na EMC.

- Vlivy efektů způsobených bleskovým výbojem

Se zásahem bleskového výboje se letoun neseťkává tak často jako s průletem HIRF. Žádný výzkumný a vývojový projekt se tudíž působením účinků bleskového výboje na dopravní prostředky či na stavby doposud nezabýval. Tématu se však věnují konference SIPDA [15] (*International Symposium on Lightning Protection*), a ICLP [16] (*International Conference on Lightning Protection*).

1.1 Úder blesku do letounu z pohledu leteckých norem

Kromě klasických mechanických testů, které jsou součástí vývoje a certifikace nového letadla, musí být ve specifikacích certifikace letadel zahrnuty i účinky silného elektromagnetického prostředí, a musí být definována opatření na ochranu proti nim [17]. Nejvýznamnějšími hrozbami elektromagnetického prostředí jsou blesky a vyzařovaná pole o vysoké intenzitě (HIRF). Zatímco statistická pravděpodobnost úderu blesku u pravidelně provozovaného letadla je přibližně jednou až dvakrát za rok, prostředím HIRF je letoun vystaven během každého letu. Je to důsledek neustálého zvyšování počtu rádiových, televizních, mobilních vysílačů a radarů a jejich neustále se zvyšujících výkonů.

Specifikace certifikace EASA [17] obsahuje dva důležité odstavce – CS 23.1306 pro nepřímé účinky blesku a CS 23.1308 pro HIRF. Odstavce specifikují požadovanou odolnost palubního zařízení proti elektromagnetickému prostředí podle jeho kritičnosti pro bezpečný let a přistání. Musí být tedy prokázána dostatečná ochrana všech

kritických zařízení v místě jejich instalace konstrukcí draku letounu. Vnitřní elektromagnetické prostředí je dáno povrchovými proudy na potahu letadla, indukovanými jak úderem blesku, tak ozářením elektromagnetickým polem s vysokou intenzitou, a dále účinností stínění potahem draku letounu.

Protože většina vnějších vlivů působících na letadla je stochastická, bylo vytvořeno standardizované bleskové prostředí [18] a standardizované prostředí HIRF [19]. Pro Evropu (podle EUROCAE) a pro USA (podle SAE ARP) existují pro každé prostředí dva definiční standardy se stejným názvem a stejnou formulací, ale s různými parametry. Na tyto standardy se pak vztahují certifikace EASA a FAA.

Certifikační specifikace [17] odkazuje na výše uvedené dokumenty pomocí vhodných *Acceptable Means of Compliance* AMC 20-136 [20] a AMC 20-158 [21]. Pro certifikaci se používají podobně číslované *Advisory Circulars* AC 20-136B a AC 20-158A podle předpisů FAA (FAR) s odkazem na dokumenty [18] a [19].

Při zkoumání vlivu blesku na kompozitní nosovou část (CNP - *Composite nose part*) jako demonstrátoru z pohledu vlivu na vnitřní kabelové svazky i jakéhokoli jiného kovového vedení (např. rozvod hydrauliky) můžeme pozorovat nebezpečné jevy - napětí a proudy, které jsou buzeny změnami okolních elektromagnetických vln pole uvnitř CNP. Toto proměnné vnitřní pole je buzeno povrchovými proudy na CNP, které způsobí průchod proudu po struktuře CNP.

Kromě vnitřních elektromagnetických polí buzených uvnitř struktury CNP bleskem (nepřímý účinek blesku) musíme brát v úvahu i hrozby způsobené nadměrnými bleskovými proudy, které jsou vedeny na povrchu nebo uvnitř struktury CNP. Tyto rázové proudy interagují přímo s konstrukcí letounu. V kombinaci s tepelnou, chemickou a mechanickou erozí a při potenciálním elektrickém oblouku uvnitř konstrukce může dojít ke vznícení hořlavé hydraulické kapaliny. Vysoká hustota proudu na spojích různých materiálů může způsobit nejen zapálení materiálu, ale také nežádoucí svary v zámcích dveří a krytech servisních otvorů, pokud si bleskový proud najde nejnížší odporovou cestu skrz ně.

Všechny mechanické jevy způsobené bleskovými proudy označujeme jako přímé účinky úderu blesku (*Direct Effects of Lightning Strikes*, DEOLS). Jevy, které indukují nežádoucí proudy a napětí na rozvodech kabeláže a na jiných kovových strukturách, nazýváme nepřímými účinky úderu blesku (*Indirect Effects of Lightning Strikes*, IEOLS).

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V předchozí části práce jsem popsal stávající přístupy k testování účinků blesku na letadla. Dále jsem se zabýval využitím výpočetního elektromagnetismu (CEM) v letectví. Z rozboru současného stavu řešení problematiky je zřejmá snaha integrovat CEM do certifikačního a vývojového procesu s cílem získat průkaz odolnosti proti vnějším elektromagnetickým vlivům při nižších nákladech.

Kromě obecně platných zákonitostí, které jsou svázány s používanými numerickými metodami, nejsou k dispozici konkrétní poznatky o chování elementárních částí při průchodu bleskového proudu a nejsou optimálně definovány materiálové modely pro konkrétní typy počítaných úloh.

Začlenění efektivně a správně nastavených numerických analýz účinků bleskového výboje do vývoje konstrukce letadel a do návrhu ochrany před úderem blesku může výrazně přispět ke zvýšení efektivity a spolehlivosti prokazování odolnosti letounu proti vnějším elektromagnetickým vlivům.

Na základě výše uvedených závěrů jsem si vytyčil dva cíle disertační práce:

- Vypracování metodiky numerické a experimentální charakterizace kompozitního materiálu

V této části se zabírám vlastnostmi kompozitních materiálů a měřením jejich elektrických parametrů. Popisuji vytvoření numerického modelu struktury kompozitu v závislosti na bleskové zóně, v níž se kompozit vyskytuje. Správnost numerického modelu je ověřena experimentálním měření elektrických vlastností kompozitní struktury.

- Vypracování metodiky numerické a experimentální analýzy úderu blesku

Výsledky optimalizace kompozitního materiálu jsou implementovány do komplexního modelu kompozitní části malého letounu. V tomto modelu pak ověřuji funkčnost ochrany navržené proti pronikání elektromagnetických polí dovnitř struktury letounu a proti ohrožení kabelových svazků. Odhaduji zde také některé nepřímé účinky blesku.

3 EXPERIMENTÁLNÍ CHARAKTERIZACE ELEKTROMAGNETICKÉ OCHRANY LETADEL

V minulosti se při stavbě letadel využívaly slitiny na bázi hořčíku, materiály z plastů, tkaniny a dřevo. Od poloviny 50. let byly konvenční materiály nahrazeny nekonvenčními, jako jsou vyztužené plasty a pokročilé kompozity. Dokonce i používání hliníku a hliníkových slitin se výrazně snížilo z 80 % na přibližně 15 %.

S cílem zlepšit mechanické vlastnosti konstrukce letadel (zejména zvýšit pevnost a snížit hmotnost) se začaly v leteckém průmyslu používat syntetická vlákna a kompozitní materiály. Když už mluvíme o kompozitech, obvykle uvažujeme laminát, grafit nebo aramidy (kevlar). Kromě leteckého průmyslu a letectví jsou i jiná průmyslová odvětví, která do své výroby zahrnují kompozity. Automobilový průmysl, sportovní vybavení, lodně a obranný průmysl patří k typickým příkladům.

Kompozit lze definovat jako konstrukci složenou z různých materiálů. Taková obecná definice se může vztahovat na kovové slitiny, které jsou vyrobeny z různých kovů za účelem zlepšení vlastností, jako jsou pevnost, tvárnost či vodivost.

Na složení kompozitních materiálů lze pohlížet i jako na kombinaci zpevňovacích prvků, jakými jsou např. vlákna, tkaniny nebo částice. Tyto prvky tvoří strukturu, která je obklopena a fixována pryskyřicí. Samostatně mají výztuž a pryskyřice zcela jiné vlastnosti než při jejich kombinaci. Jako příklad lze uvést beton. Beton je kompozitní hmota složená z cementu (pryskyřice) a šterku; k dalšímu vyztužení materiálu lze pak použít kovových sítí a tyčí.

Z pohledu elektrických vlastností jsou elektrická vodivost a účinnost stínění kompozitních materiálů nižší v porovnání s kovy. Proto je nutno zjišťovat účinnost stínění použitých materiálů, aby byly zajištěny požadované elektromagnetické vlastnosti kompozitní struktury.

V [22] byly diskutovány teoretické a praktické aspekty koaxiálního měření účinnosti stínění. Měřeným kompozitním materiálem beton s uhlíkovými vlákny. Vektorovým analyzátozem byla zaznamenána frekvenční odezva S-parametrů v rozsahu od 9 kHz do 1 GHz, a následně byla vyhodnocena účinnost stínění. Výstupy koaxiálního měření byly ověřeny anténním měřením.

V této kapitole se věnuji měření účinnosti stínění a měření odolnosti kompozitních materiálů vůči bleskovému výboji. Uhlíkové vícevrstvé kompozity jsou při stavbě letadel používány jako potah draku letadel (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

3.1 Měření stínicí účinnosti kompozitních materiálů

V této kapitole rozeberu postup měření materiálových vlastností kompozitních a dielektrických struktur používaných v leteckém průmyslu. Konkrétní vzorky odpovídají

materiálovým složením materiálů, použitým na stavbu letounu EV-55- Outback. Vzhledem k tomu, že je tato práce zaměřena na přímé a nepřímé účinky úderu blesku, měření byla koncipována tak, aby frekvenční rozsah vyhovoval numerickým simulacím.

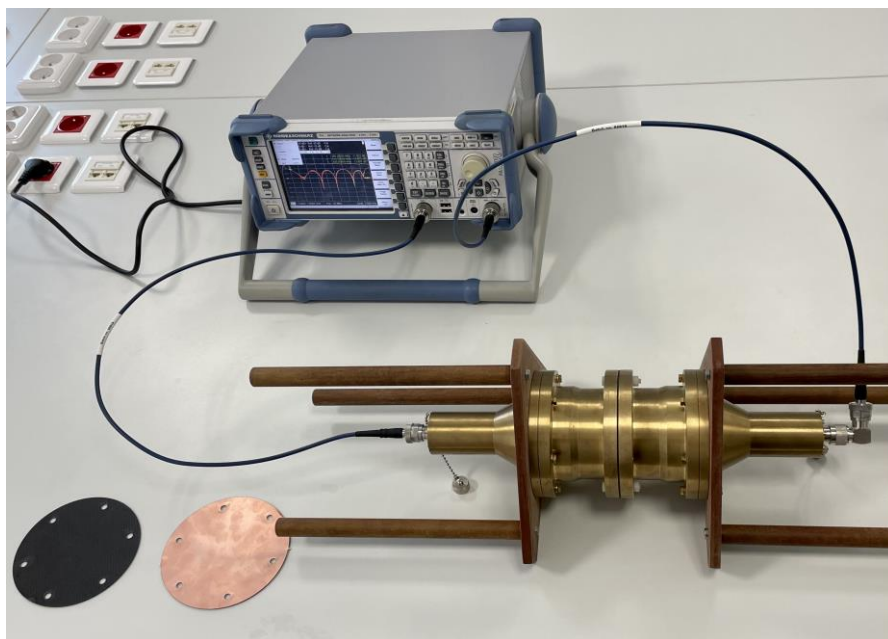
Pro měření stínicí účinnosti (SE) planárního materiálu byl navržen vlastní koaxiální měřicí přípravek. Z údajů naměřených tímto přípravkem lze hodnoty SE v blízkém poli vypočítat pro magnetické (H) zdroje a elektricky tenké vzorky [23] [24] [25].

Metoda měření je použitelná pro kmitočtový rozsah od 30 MHz do 1,5 GHz. Frekvenční limity jsou dány velikostí posuvných proudů kapacitní vazbou na nižších kmitočtech a přechodem [26] na vyšších kmitočtech.

V rozsahu měření by měl být zvolen určitý počet diskrétních kmitočtů. U elektricky tenkých izotropních materiálů s frekvenčně nezávislými elektrickými vlastnostmi je měření při nízkých frekvencích dostatečné, protože hodnoty SE ve vzdáleném poli jsou frekvenčně neměnné. Pokud materiál není elektricky tenký nebo se parametry mění s frekvencí, měla by se měření provádět na více frekvencích v rámci sledovaného pásma.

3.1.1 Koaxiální měřicí přípravek

Základní nastavení měřicího experimentu je znázorněno na Obr. 3.1. Koaxiální přípravek je připojen k analyzátoru ZLV. Fyzické rozměry přípravku vychází z normy D4935-10 [27], výrobní dokumentace je součástí příloh této práce.

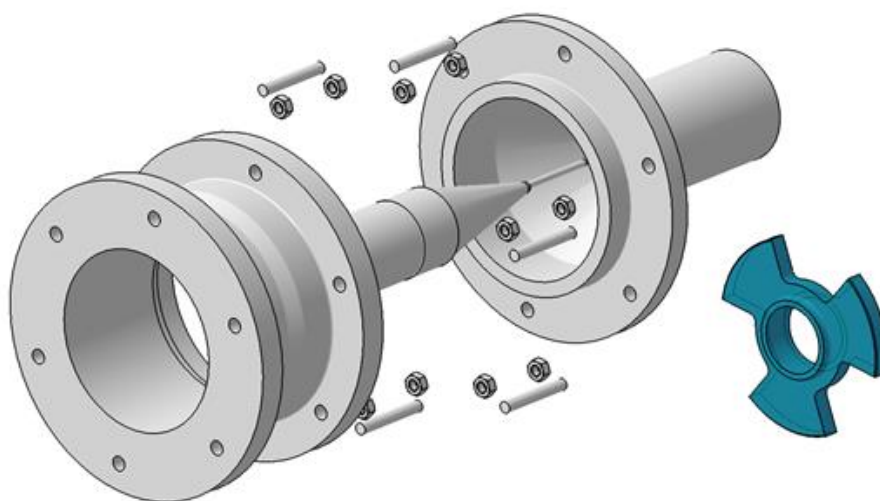


Obr. 3.1: Měření stínicí účinnosti: základní konfigurace experimentu.

Obr. 3.2 ukazuje polovinu přípravku rozloženou do konstrukčních prvků. Aby byla zachována charakteristická impedance $50\ \Omega$ po celé délce vedení, je koaxiální přechodové vedení se speciálními zúženými částmi doplněno vroubkovanými drážkami [28]. Velikost charakteristické impedance je třeba kontrolovat a je třeba korigovat odchylky vyšší než $60,5\ \Omega$.

Při návrhu koaxiálního měřicího přípravku jsou důležité tři aspekty:

- Dvě poloviny přípravku drží vzorek. To umožňuje kapacitní vazbu energie do izolačních materiálů prostřednictvím posuvných proudů.
- Referenční vzorek (REF) o stejné tloušťce a elektrických vlastnostech jako zatěžovací vzorek (LOAD) způsobuje stejnou diskontinuitu v přenosovém kanále, jakou způsobuje zatěžovací vzorek.
- Nevodivé (nylonové) šrouby se používají ke spojení dvou částí přípravku. To způsobuje vedení elektromagnetické energie tak, aby primárně protékala přes měřenou sadu vzorků. Nevodivé spojení obou částí přípravku je nezbytné pro správnou činnost držáku vzorku.



Obr. 3.2: Polovina měřicího přípravku. Šedá: mosaz, modrá: plexisklo.

Porovnáním metody použité v této práci s metodou popsanou v článku [22] lze nalézt následující rozdíly:

- Protože se měří sada dvou vzorků (referenční a zatěžovací), je vliv měřicího přípravku na výsledky měření kompenzován.
- Díky konstrukci přípravku je velikost měřeného vzorku prakticky neomezena.
- Je dosaženo širšího frekvenčního rozsahu měření (1,5 GHz oproti 1,0 GHz v [22]).

Měření popsanou metodou [27] již organizace ASTM nepodporuje. Přesto se tato metoda stále používá díky své jednoduchosti a snadnému použití. Měření nevyžaduje velké vysílací a přijímací antény, stíněné či bezodrazové komory. Ke stanovení účinnosti stínění stačí pouze relativně malý vzorek zkoumaného materiálu. Proto jsou měření touto metodou vhodná zejména pro výzkumné laboratoře a vývojová pracoviště, která vyvíjí a testují nové stínicí materiály (tenké vodivé vrstvy, stínicí tkaniny atd.).

3.1.2 Požadavky na měřené vzorky

Pro měření se používá sada dvou vzorků – referenční vzorek REF, a vzorek zátěže LOAD. Oba vzorky by měly mít stejnou tloušťku. Uložení vzorků v koaxiálním měřicím přípravku ukazují. Vzorek zátěže může přesahovat vnější průměr, nicméně dodržení rozměrů urychlí a usnadní manipulaci. Kritickým rozměrem je tloušťka vzorků; tloušťka t referenčního vzorku a vzorku zátěže by měla splňovat podmínku [27]:

$$t \leq \frac{\lambda}{100} \quad (3.1)$$

kde λ je délka vlny procházející vzorkem.

Tloušťka t vzorků se považuje za identickou, pokud $\Delta t_a < 25 \mu\text{m}$ a $\Delta t_a / t_a < 5\%$, kde a označuje průměrnou hodnotu. Materiály vzorků mohou být homogenní i nehomogenní, jednovrstvé i vícevrstvé, vodivé i nevodivé. Naměřená účinnost stínění nehomogenních materiálů závisí na geometrii a orientaci vzorku a opakovatelnost měření je horší než v případě homogenních materiálů.

3.1.3 Vzorky pro určení optimální skladby kompozitu

V této části specifikujeme vzorky změřené výše popsanou metodou. Vzorky patří mezi uhlíkové kompozity, které jsou v leteckém průmyslu používány jako opláštění letadel. Některé vzorky jsou doplněny ochrannou vrstvou.

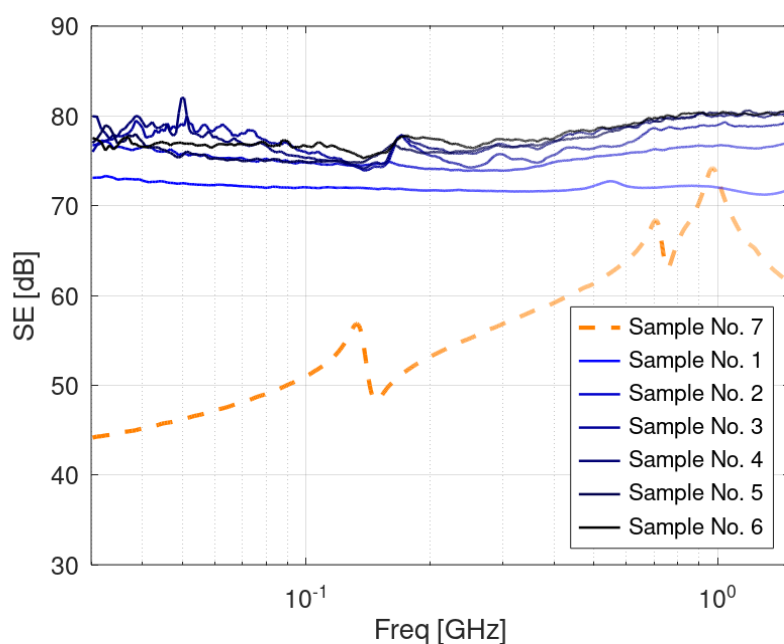
Měřené vzorky můžeme rozdělit do tří skupin:

- Vzorky 1 až 6 jsou vyrobeny z polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFRP). U vícevrstevných vzorků jsou vrstvy položeny tak, aby se vlákna kompozitu v každé vrstvě prolínala pod úhlem 45° .
- Vzorky 8 až 13 se skládají opět z kompozitu CFRP, v tomto případě doplněného měděnou ochrannou mřížkou (Cu). Vrstva sklem vyztuženého plastu (GRP) pokrývá přední stranu, aby chránila Cu mřížku před mechanickým poškozením a vyhladila povrch.
- U vzorků 14 až 24 je nosným materiálem opět CFRP. Místo ochranné měděné mřížky je však použit speciální hliníkový nástřik. V jednom případě je nástřik tvořen čtyřmi vrstvami, ve druhém vrstvami sedmi.

Vzorek 7 navíc obsahuje měděnou mřížku, která je z obou stran chráněna kompozitem GRP. Měděná mřížka je vyrobena jako expandovaná měděná folie; výrobcem je společnost DEXMET [29]. Struktura mřížky a základní rozměry jsou znázorněny na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Mřížka DEXMET se používá jako doplňková ochrana proti úderům blesku.

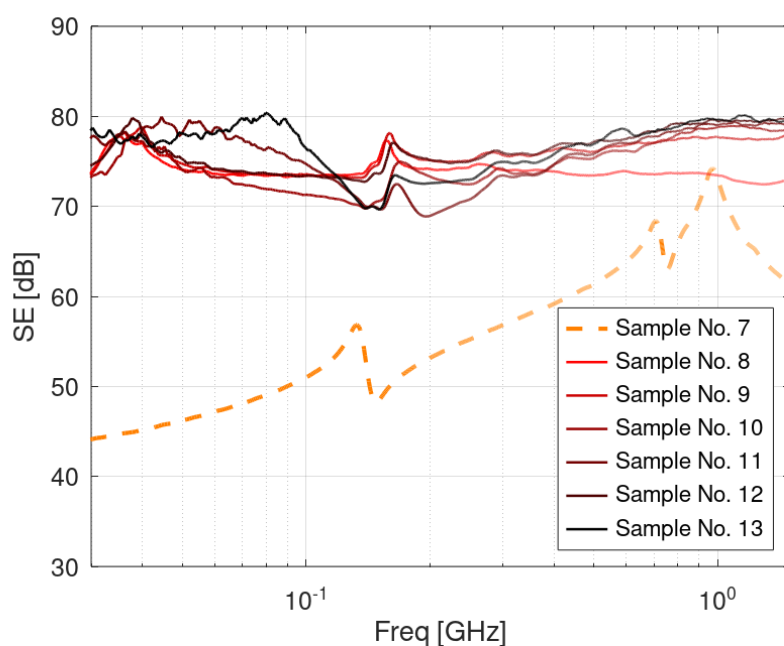
Ve všech grafech je jako reference uvedena frekvenční charakteristika stínicí účinnosti měděné mřížky (vzorek č. 7).

Z frekvenčních odezev stínicí účinnosti CFRP kompozitů bez ochranné mřížky (Obr. 3.3) pro různý počet vrstev (vzorky 1 až 6) je zřejmé, že účinnost stínění roste s rostoucím počtem vrstev. Mezi 4 a 8 vrstvami CFRP (vzorky 4, 5 a 6) není prakticky žádný rozdíl.



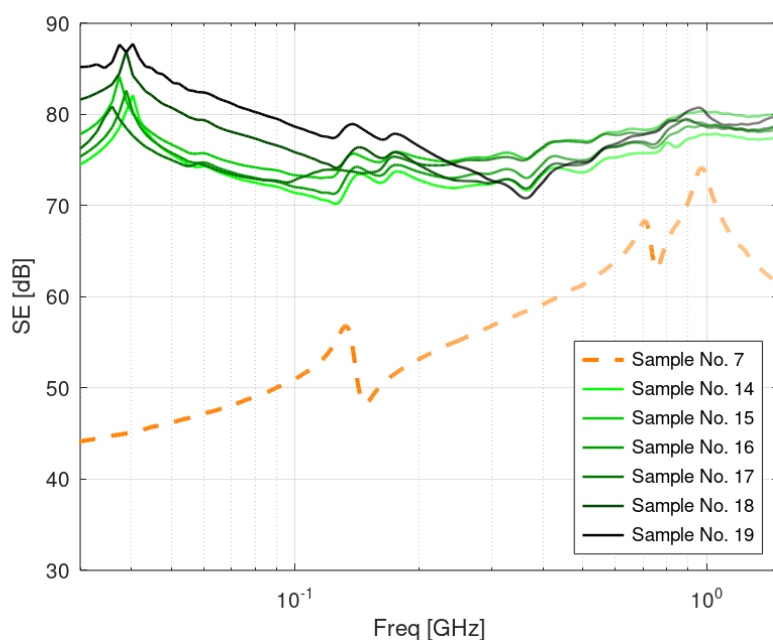
Obr. 3.3 Frekvenční charakteristika změřené stínicí účinnosti CFRP kompozitů (vzorky 1-6) a měděná mřížka + GRP (vzorek č. 7). Vliv různého počtu vrstev.

Srovnání CFRP kompozitů s ochrannou mřížkou (vzorky č. 8 až 13) a bez ní (Obr. 3.4) ukazuje na mírné zlepšení účinnosti stínění. Na nižších frekvencích lze však pozorovat silnější rezonance. Toto chování je pravděpodobně způsobeno kombinací uhlíkového kompozitu a tvaru mřížky. Mezi vzorky se 4, 6 nebo 8 vrstvami (vzorky č. 11, 12 a 13) opět není výrazný rozdíl v účinnosti stínění.

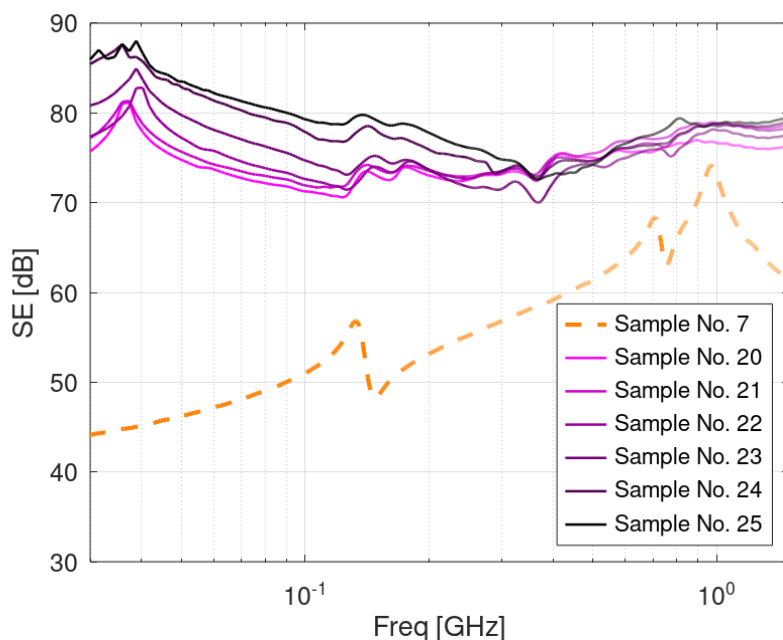


Obr. 3.4 Frekvenční charakteristika změřené stínicí účinnosti chráněných CFRP kompozitů (vzorky 8-13) a měděná mřížka + GRP (vzorek č. 7). Vliv různého počtu vrstev.

Obr. 3.5 a Obr. 3.6 srovnávají stínící účinnost CFRP kompozitů s experimentálním hliníkovým nástřikem. V porovnání s předchozími materiály jsou hodnoty stínící účinnosti o něco lepší, protože nástřik vytváří homogenní vodivou vrstvu.



Obr. 3.5 Frekvenční charakteristika změřené stínící účinnosti CFRP kompozitů s hliníkovým nástřikem (4 vrstvy hliníku, vzorky 14-19) a měděná mřížka + GRP (vzorek č. 7). Vliv různého počtu vrstev CFRP.



Obr. 3.6 Frekvenční charakteristika změřené stínící účinnosti CFRP kompozitů s hliníkovým nástřikem (7 vrstev hliníku, vzorky 20-25) a měděná mřížka + GRP (vzorek č. 7). Vliv různého počtu vrstev CFRP.

Provedená měření ukazují, že stínicí účinnost uhlíkových kompozitů je lepší ve srovnání s kompozity ze skleněného vlákna, jež jsou chráněny měděnou mřížkou (vyšší počet vrstev skleněného vlákna nemá na účinnost stínění významný vliv). Tento závěr platí i pro ochranu proti polím s vysokou intenzitou (HIRF). Při ochraně proti blesku je nezbytné použít měděnou mřížku nebo speciální nástřik, které dokáží přenášet velké bleskové proudy.

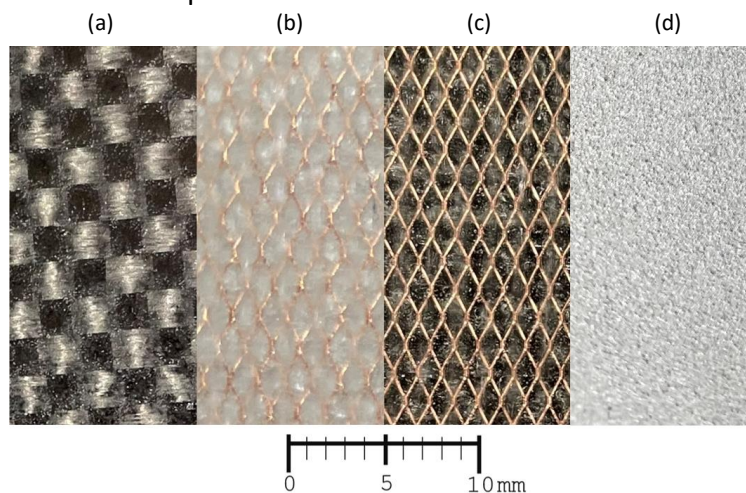
Popsaným postupem byla změřena stínicí účinnost kompozitů z uhlíkových vláken. Měřené materiály vykazují významnou schopnost stínit elektromagnetické záření. Například struktura z uhlíkových vláken se čtyřmi vrstvami a tloušťkou 0,9 mm dosahuje úrovně stínění mezi 74,2 dB a 80,1 dB. Ještě lepší výsledky stínění jsou dosaženy při použití speciálního hliníkového nástřiku (stínicí účinnost mezi 75,1 dB a 98,4 dB). Hliníkový nástřik je zatím pouze experimentální a velmi nákladný.

Stínicí účinnost kompozitů roste s tloušťkou materiálu a s počtem kontaktů mezi vlákny. Stínicí účinnost je tedy pozitivně ovlivněna nejen vyšším objemovým podílem vláken, ale také spojitostí vodivých vláken v příčném a rovnoběžném směru vůči dopadající vlně. Stínicí účinnost uhlíkových vláken se zvyšuje s frekvencí.

Pro optimalizaci kompozitní struktury z hlediska hmotnosti a stínicí účinnosti se doporučuje použít pouze 4 vrstvy uhlíkového kompozitu. Více vrstev nemá na stínicí účinnost významný vliv. Výsledky dále ukazují finanční a hmotnostní úspory, kterých dosáhneme díky nahrazení některých vrstev kompozitem ze skleněných vláken.

Při porovnání stínicí účinnosti uhlíkových kompozitů chráněných měděnou mřížkou nelze zjistit žádný významný rozdíl vůči kompozitům nechráněným. Měděná mřížka zvyšuje stínicí účinnost pouze u kompozitů se skleněnými vlákny. Měděná mřížka se používá v kombinaci s uhlíkovým kompozitem na povrchu letadel jako ochrana před bleskem; je schopna svádět proudy až 200 kA.

Prezentovaná naměřená data budou použita pro kalibraci ekvivalentních homogenních numerických modelů kompozitů. Tyto modely budou použity k simulaci účinků blesku a HIRF na kompozitní letadla.



Obr. 3.7 Detailní fotografie povrchů vzorků a) 1-6, b) 7, c) 8-13, d) 14-25.

Tab. 3.1: Parametry měřených vzorků

#	Složení	Počet vrstev	Hmotnost ¹ [g]	Tloušťka [mm]
1	1× CFRP	1	4,9	0,38
2	2× CFRP	2	8,8	0,51
3	3× CFRP	3	12,6	0,72
4	4× CFRP	4	16,0	0,89
5	6× CFRP	6	23,6	1,28
6	8× CFRP	8	30,9	1,63
7	2× GRP + 1× Cu	3	14,1	0,65
8	1× GRP + 1×Cu + 1× CFRP	3	12,5	0,64
9	1× GRP + 1×Cu + 2× CFRP	4	17,0	0,83
10	1× GRP + 1×Cu + 3× CFRP	5	20,2	1,02
11	1× GRP + 1×Cu + 4× CFRP	6	36,1	1,35
12	1× GRP + 1×Cu + 6× CFRP	8	33,6	1,73
13	1× GRP + 1×Cu + 8× CFRP	10	41,4	2,14
14	4x Al + 1× CFRP	5	7,3	0,43
15	4x Al + 2× CFRP	6	10,8	0,62
16	4x Al + 3× CFRP	7	14,7	0,82
17	4x Al + 4× CFRP	8	17,8	1,00
18	4x Al + 6× CFRP	10	25,2	1,38
19	4x Al + 8× CFRP	12	33,0	1,80
20	7x Al + 1× CFRP	8	8,6	0,49
21	7x Al + 2× CFRP	9	12,5	0,71
22	7x Al + 3× CFRP	10	16,2	0,86
23	7x Al + 4× CFRP	11	19,7	1,06
24	7x Al + 6× CFRP	13	27,3	1,46
25	7x Al + 8× CFRP	15	34,5	1,84

3.2 Mechanická ochrana a odolnost proti úderu blesku

Věnujme se zkušební metodě, která je použitelná pro konstrukce nacházející se v zónách letadel 1A, 1B, 1C, 2A a 2B. Zkouška se používá k určení přímých účinků bleskového úderu, které mohou vzniknout v místech možného připojení bleskového kanálu k letadlu nebo v místech, kde může při úderu blesku odtékat od vstupního bodu vysoký proud. Příkladem jsou plochy nebo části letadla, které jsou vystaveny účinkům přímého nebo *zameteného* úderu blesku, vnitřní konstrukční prvky, které mohou vést bleskové proudy, a externě namontované součásti, které mohou být zasaženy přímým úderem nebo mohou být ovlivněny účinky elektrického proudu. Test lze tedy použít k posouzení:

- mechanického poškození materiálu,
- vzniku vypálených oblastí,

¹ Byl vážen pouze vzorek s označení LOAD

- tepelné odolnosti struktury,
- optimální skladby struktury a její dostatečné ochrany
- chování spojů a hardwarových úchytů,
- napětí a proudů v bodech zájmu.

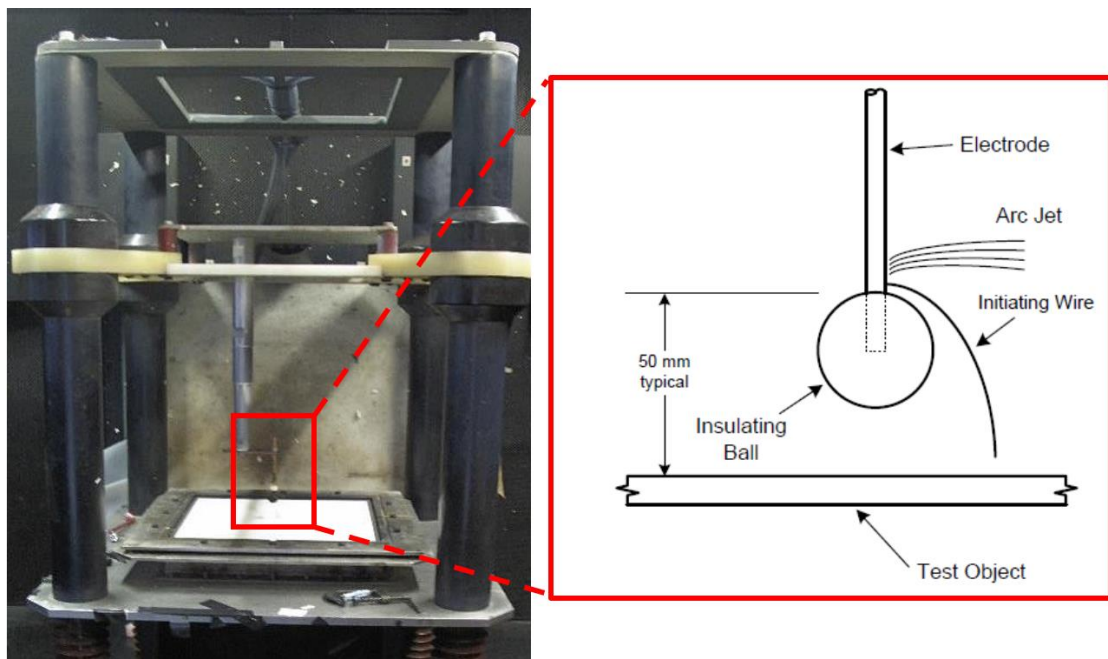
Vzorky by měly být vyrobeny vhodnými výrobními postupy, nátěry a jinými povrchovými úpravami, spoji a materiály, které se běžně používají při výrobě letounu.

Následující text dokumentuje zkoušky provedené na kompozitních vzorcích z různých částí letounu EV-55. Cílem je posoudit přiměřenost potenciální ochrany před bleskem pro příslušnou zónu blesku.

Měřené vzorky byly vybrány s ohledem na zónování letounu. Byly vybrány zóny, které jsou nejvíce namáhány při připojení bleskového oblouku (jedná se o zóny 2A a 1A).

3.2.1 Testovací zařízení a vzorky

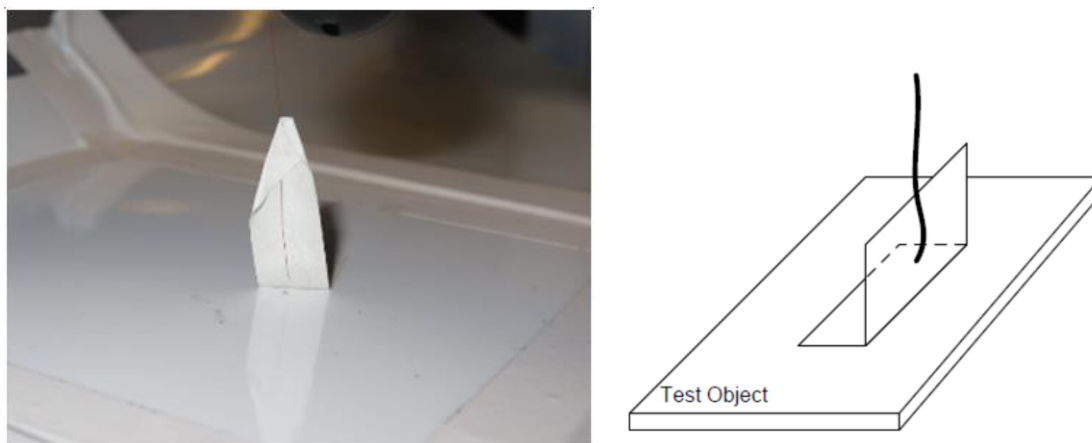
Měřený vzorek se upevní do upínacího přípravku na testovací stoličce. Generátor se k sestavě připojí tak, aby vedení bleskových proudů směrem k měřenému vzorku simulovalo zásah letadla bleskem. Musí se zajistit, aby magnetické síly a další související interakce simulovaly přirozenou situaci. Zkušební elektroda by měla být ve výšce 50 mm nebo více nad plochu měřeného vzorku. Pro účely našeho experimentu je použita elektroda typu *jet diverting* (viz Obr. 3.8).



Obr. 3.8 Zkušební zařízení pro testování úderu blesku: základní nastavení experimentu

Je-li třeba zavést bleskový proud na určité místo, lze použít tenký kovový drátek, jehož průměr nepřesahuje 0,1 mm. Tímto drátkem pak směřujeme oblouk do určitého bodu měřeného vzorku. Drát by měl končit několik milimetrů od vzorku. K tomu lze použít papírovou pásku (viz Obr. 3.9). Drát by neměl být ke vzorku přilepen přímo.

Měřené vzorky jsou specifikovány v Tab. 3.2. Jelikož se počítalo s destruktivním výsledkem testu, byl každý vzorek vyroben dvakrát. Měřené vzorky byly čtverce o rozměrech 400 x 400 mm. Měření bylo realizováno v Element, oxfordském bleskovém testovacím zařízení v Abingdonu ve Spojeném království [30].



Obr. 3.9 Umístění pomocného zaváděcího drátu.

Tab. 3.2: Složení vzorků pro určování přímého účinku blesku

#	Složení	Počet vrstev	Tloušťka [mm]
1	1x Cu + 8x CFRP	9	2,14
2	4x Al + 8x CFRP	12	1,80
3	7x Al + 8x CFRP	15	1,84

3.2.2 Testovací průběhy

Vzorky se nacházejí na letounu v zónách 2A a 1A. Testovací průběhy úderu blesku byly zvoleny dle normy ED-84 [18] a v navrhovaných zónách mají následující komponenty:

- Zóna 2A: D + B + C*
- Zóna 1A: A + B + C*

Tab. 3.3: Informace o průběhu bleskového proudu v zónách 2A a 1A [18]

Component A	Peak current Action Integral	200kA ± 10% 2.0 MJ/Ω ± 20%
Component D	Peak current Action Integral	100kA ± 10% 0.25 MJ/Ω ± 20%
Component B	Average current Charge transfer Duration	2kA ± 10% 5C 10ms
Component C*	Charge transfer Duration	18C ± 20% 45ms

3.2.3 Výsledky testování úderu blesku v zóně 2A

První kolo bleskových zkoušek polymeru vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFRP) je znázorněno na Obr. 3.10 a Obr. 3.11 spolu s rozsahem poškození každého panelu po vystavení zásahu bleskem zóny 2A. Tato zóna se vyznačuje velmi vysokým proudem (až 200 kA) a relativně krátkou dobou trvání.

Ve všech případech se ochranná vrstva odpařila z povrchu panelů v místě počátečního obloukového uchycení. Byly zaznamenány sekundární zachytné body bleskového výboje a širší oblast tepelného poškození. U vzorku chráněného měděnou mřížkou došlo k delaminaci vrstev a proražení vzorku bleskem (viz Obr. 3.10). U hliníkových povlaků vznikly spáleniny (hliník roztavený počátečním úderem dopadl na povrch panelu).

U nástřiku hliníku na CFRP bylo poškození o něco větší v případě čtyřech hliníkových vrstev (Obr. 3.11a) než v případě vrstev sedmi (Obr. 3.11b). Na panelu se čtyřmi vrstvami hliníku byly sekundární připojovací body zřejmější. I když existovaly indikace poškození podkladového kompozitu, nejednalo se o poškození významné (nebyla dotčena integrita a struktura kompozitu). Pro srovnání, panel se sedmi hliníkovými vrstvami vykazoval minimální strukturální poškození, přičemž hliník byl odpařen pouze z místa počátečního uchycení bleskového výboje. Byly zaznamenána přibližně tři sekundární místa připojení blesku; některá místa byla spálena roztaveným hliníkem vymrštěným z místa počátečního připojení blesku.

3.2.4 Výsledky testování úderu blesku v zóně 1A

Do testu byly opět zahrnuty vzorky 1, 2 a 3. Hliníkové nástřiky byly stejně jako u předchozího testování na povrchu panelu homogenní.

Při zásahu bleskem v zóně 1A si panel s hliníkovým nástřikem vedl dobře. V případě 4 vrstev nástřiku se odpařila malá plocha povlaku se v místě prvního zásahu (~60 mm Ø); viz Obr. 3.12b. Dále je vidět několik sekundárních zachytných bodů spolu s malými popáleninami od horkých hliníkových kapek dopadajících na povrch panelu na ploše ~100 mm Ø.

V případě 7 vrstev ochranného nástřiku nedošlo k výraznějšímu odpaření ochrany v místě připojení bleskového úderu (Obr. 3.12c). U této varianty také nebyly zjištěny žádné výrazné známky poškození vláken v oblasti uchycení blesku, i když pryskyřice byla na několika místech na povrchu odpařena.

Pro srovnání, panel s měděnou mřížkou utrpěl rozsáhlá poškození s delaminací a odpaření části mřížky z oblasti ~140mm Ø. Tepelné poškození dosáhlo ~300mm Ø; viz Obr. 3.12a. Podkladový kompozit rovněž utrpěl značné poškození a panel vykazoval proražení.



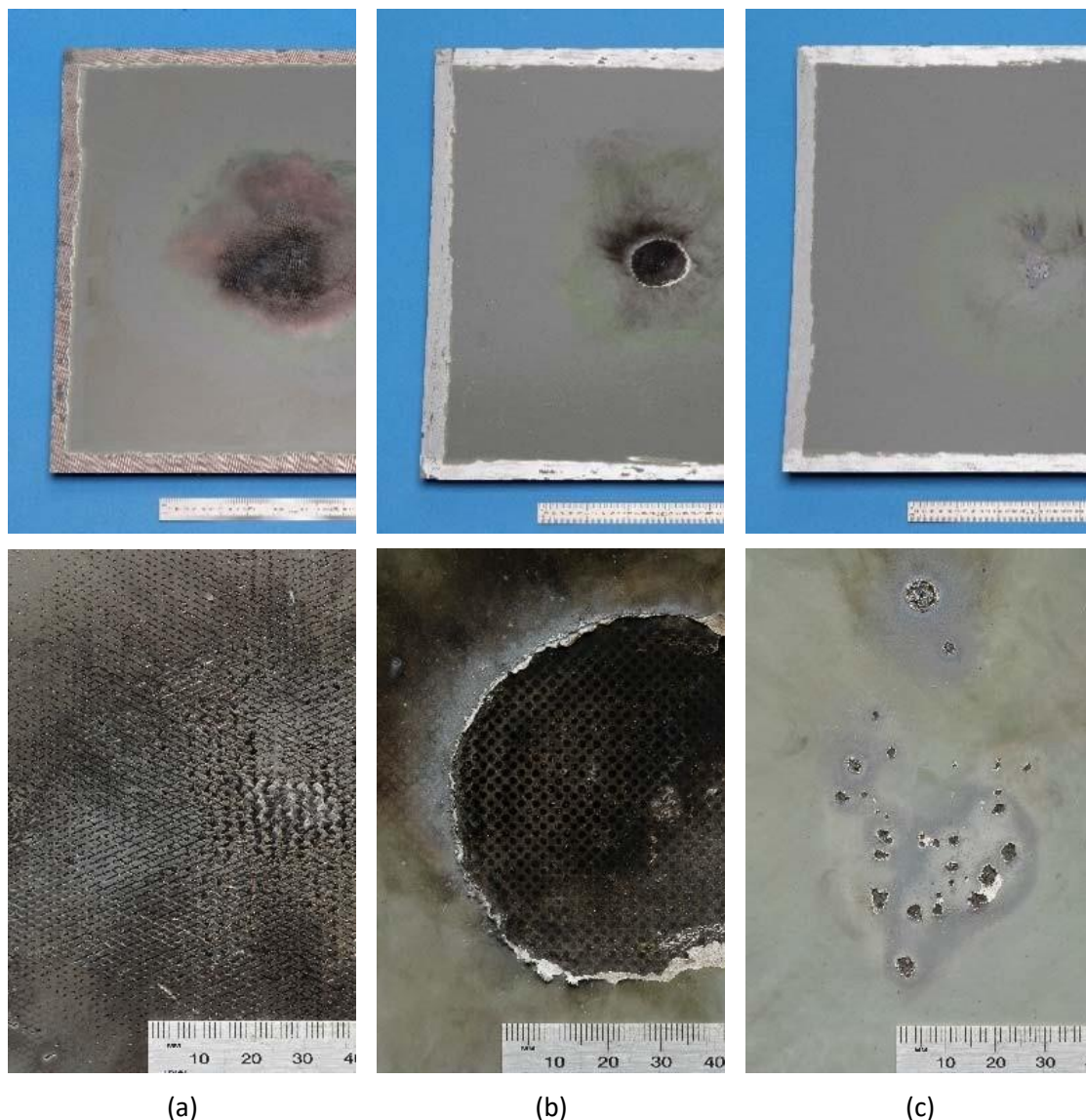
Obr. 3.10: Zkušební panel s ochrannou měděnou mřížkou po zásahu bleskem: rozsáhlé poškození v místě připojení úderu blesku v zóně 2A.



(a)

(b)

Obr. 3.11 Výsledky testu úderu bleskového výboje do kompozitních panelů: (a) 4 vrstvy hliníkového nástříku, (b) 7 vrstev hliníkového nástříku. Zóna 2A.



Obr. 3.12 Výsledky testu úderu bleskového výboje do kompozitních panelů:
 (a) ochrana měděnou mřížkou, (b) 4 vrstvy nástřiku, (c) 7 vrstev nástřiku. Zóna 1A.

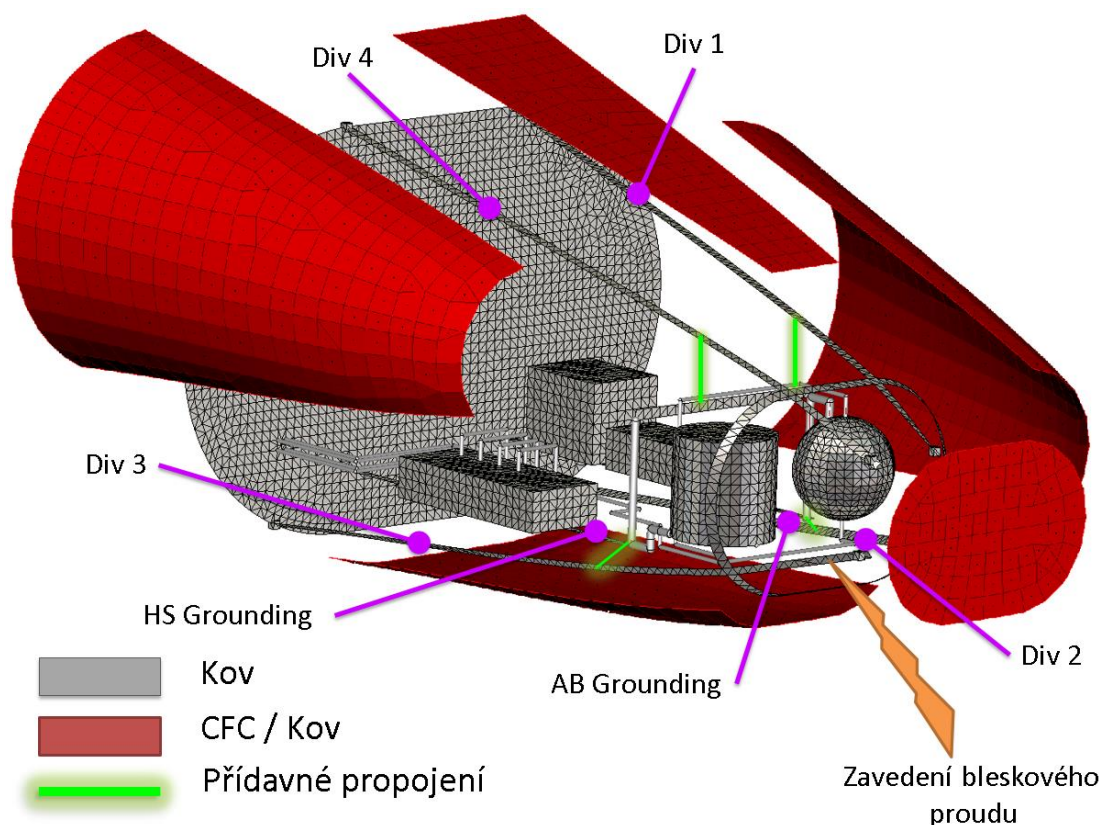
3.3 Shrnutí

Tato kapitola pojednává o experimentální charakterizaci kompozitních materiálů používaných zejména na potahy letadla. Zaměřili jsme se na eliminaci přímých a nepřímých účinků pomocí různých ochran, ať už dodnes komerčně používaných (měděná mřížka) nebo experimentálních (hliníkový nástřik). Z výsledků měření a experimentů je vidět, že používaná ochrana kompozitních materiálů pomocí měděné mřížky je dnes již překonaná jak z pohledu stínící účinnosti, tak i z pohledu odolnosti proti úderu blesku. Další velkou výhodou hliníkového nástřiku je prakticky minimální navýšení hmotnosti ve srovnání s běžně používanou měděnou mřížkou a nepatrné navýšení tloušťky. Výsledky z analýz se mohou využít k tvorbě elektromagnetických modelů.

4 ÚČINKY BLESKOVÉHO VÝBOJE: NUMERICKÁ ANALÝZA KOMPOZITNÍ NOSOVÉ ČÁSTI EV-55

Cílem této kapitoly je seznámit se se simulací účinků bleskového výboje a popsat jevy, které nastávají průchodem přes zkoumanou strukturu. Na zjednodušeném modelu nosové části trupu (CNP - *Composite nose part*) byla ověřena správnost nastavení simulace výpočtem ve dvou principiálně odlišných řešičích. Zkoumán byl také vliv různého nastavení materiálu potahu na rozložení proudů.

Na obr. 4.1 jsou vyznačena místa, v nichž je analyzován bleskový proud. CNP je na levé straně doplněna zjednodušeným avionickým vybavením. Na straně pravé vede zjednodušená hydraulická zástavba tvořená rozdělovačem tlaku a trubicemi hydrauliky. V přední části trupu je umístěn zjednodušený pohon hydrauliky (čerpadlo a akumulátor).



Obr. 4.1: Zjednodušený model nosové části: zkoumaná místa a definice materiálů.

Pro zvýšení ochrany před účinky blesku byla analyzována varianta modelu s přídavným propojením (zelená barva na obr. 4.1). Pokud je v modelu propojení uvažováno, hovoříme o *variantě A*. Pokud s propojením není počítáno, hovoříme o *variantě B*. Vliv a funkce přídavného propojení jsou diskutovány dále.

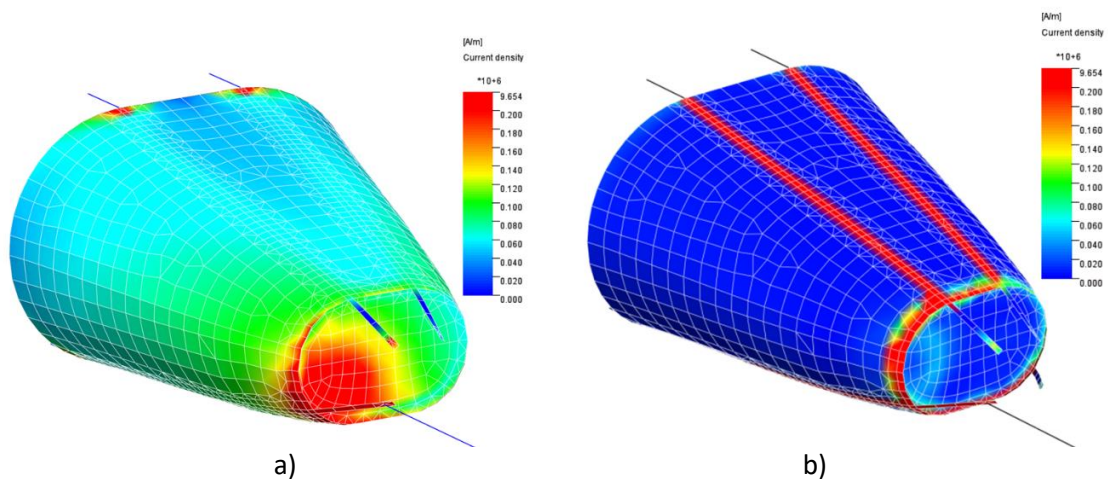
4.1 Analýza výsledků simulace úderu blesku

4.1.1 Zkoumání vlivu potahu na rozložení proudu

Model s kovovým potahem představuje klasickou konstrukci nosové části používanou u celokovových letadel. Obr. 4.2a ukazuje rozložení proudu na této variantě nosu. Proud se rovnoměrně rozloží na kovovém potahu a znovu se koncentruje na svodech, které odvádějí bleskový proud dále do kovové konstrukce trupu letounu. Další varianta je uvažována jako případ, kdy je opláštění definováno na modelu CNP jako CFC.

Materiálový popis kompozitu byl převzat ze [31], kde byla naměřena hodnota povrchového odporu $161 \text{ M}\Omega$. Změřená hodnota je použita pro stanovení vodivosti:

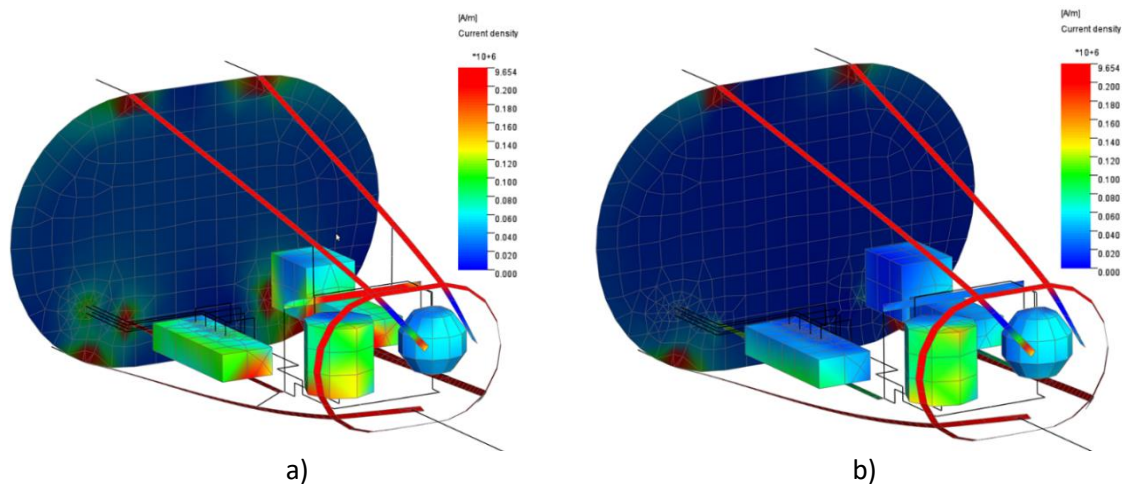
Z rozložení proudu (obr. 4.2b) bylo zjištěno, že CFC díky své malé vodivosti nemá zásadní vliv. Na reálném modelu je horní vrstva doplněna o měděnou mřížku, která zvyšuje vodivost povrchu. Níže zobrazené obrázky znázorňují rozložení proudů na různých variantách zjednodušeného nosu po zásahu bleskem v čase $6.4 \text{ }\mu\text{s}$, tedy v maximu bleskového pulsu, kde má bleskový proud velikost $I = 200 \text{ kA}$.



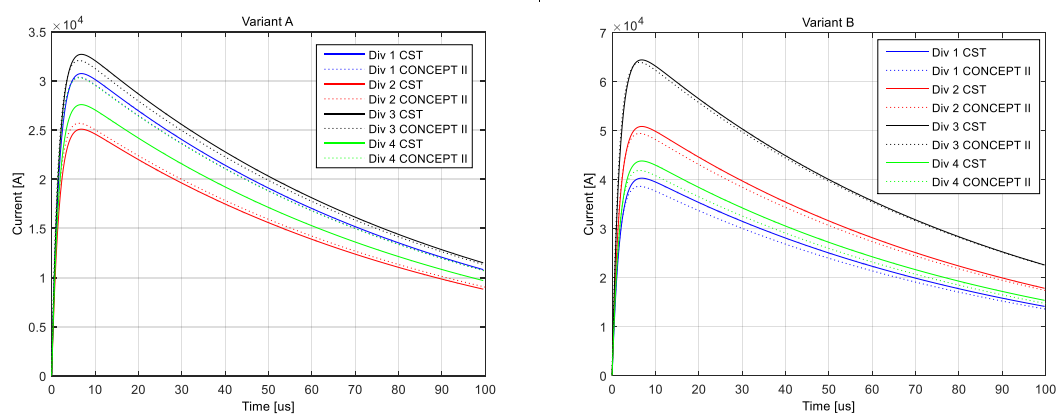
Obr. 4.2: Rozložení proudu na zjednodušeném modelu nosové části:
a) kovový plášť, b) CFC potah.

4.1.2 Rozložení bleskového proudu na zjednodušeném modelu

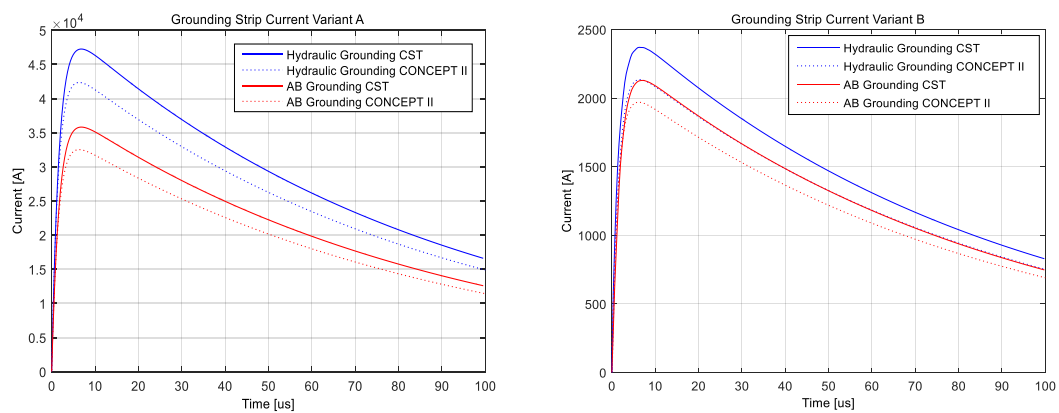
Z důvodů zanedbatelného uplatnění ploch s CFC byl dále analyzován model bez jakéhokoliv opláštění. Jedná se vlastně o nejhorší případ, který by mohl nastat při úderu bleskem. Nejhorší případ prověří správné dimenzování ochranné struktury. Na Obr. 4.3 je znázorněno rozložení proudů, na nichž je analyzován vliv přídavného propojení. Přídavné propojení má zásadní vliv nejen na rozložení proudu na divertorech, ale také na velikost proudů tekoucích po hydraulickém systému a instalaci avionického vybavení.



Obr. 4.3: Rozložení proudu na zjednodušeném modelu nosové části bez opláštění:
a) varianta A, b) varianta B.



Obr. 4.4: Rozložení proudů na divertorech zjednodušeného modelu
nosové části. Simulace.

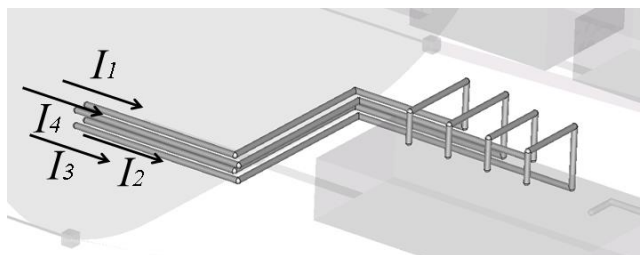


Obr. 4.5: Rozložení proudů na uzemnění zjednodušeného modelu
nosové části. Simulace.

Na Obr. 4.4 je znázorněno rozložení proudů na divertorech zjednodušeného modelu nosové části. Je vidět, že propojením divertorů s kostřením (varianta A) se zajistí rovnoměrnější rozložení bleskového proudu na jednotlivých páscích. Pokud se ovšem podíváme na proudy procházející po zemních páscích (Obr. 4.5), ve variantě A tečou proudy téměř 20x vyšší, nežli ve variantě B. Propojení mělo za důsledek zmenšením potenciálů mezi avionickým vybavením a divertory. Tím se také minimalizovalo přeskočením blesku na citlivou avioniku.

4.1.3 Výpočet magnetických sil působících na hydraulické potrubí

Ztráta funkce hydrauliky během letu je ve většině případů kritická. Letoun EV-55 má hydraulikou ovládané vztahové klapky, vysunování a zasunování podvozku a brzdy. Pokud by se dostal bleskový proud na hydraulické potrubí, silové účinky vyvolané protékajícím vysokým proudem by mohly potrubí poškodit. V případě zjednodušeného modelu byla vytvořena situace, která popisuje trasu 4 rovnoběžných trubek o délce cca 770 mm (obr. 4.10).



Obr. 4.6: Znázornění proudů na trubkách hydrauliky

Pro odhad magnetických sil působících na jednu trubku jsme nebrali v potaz tvar trasy, ale pouze její délku. Výpočtem v CST MWS jsme zjistili velikost proudu procházejícího tímto svazkem. V programovém balíku CONCEPT II můžeme jednoduše zjistit proudy po jednotlivých trubkách, jež jsou modelovány jako dráty s definovaným průměrem. Výsledky jsou uvedeny v tab. 4.1 i s výslednou silou, která působí na jednu trubku. Výpočet sil působících na trubku vycházel z Ampérova zákona, kterým byly spočteny všechny příspěvky sil od ostatních trubek; tyto síly se pak vhodně posčítaly. Proudů mají stejný směr a podle Ampérova zákona se budou tedy přitahovat.

Tab. 4.1: Magnetické síly působící na jednu trubku hydrauliky

	I_{total} [A]	I_1 [A]	F [N]
Varianta A	20k	5k	327
Varianta B	600	150	0,3

Podle předpokladů byly proudy (a tím i celková síla) několikrát vyšší u varianty A než u varianty B. Pokud by došlo k opakovaným úderům (pokud by letoun prolétával bouřkou) a trubky by nebyly vhodně zajištěny, hrozilo by uvolnění či poškození trubek. To by mohlo vyústit v možnou ztrátu funkce hydrauliky.

4.1.4 Určení ohřátí měděného divertoru průchodem bleskového proudu

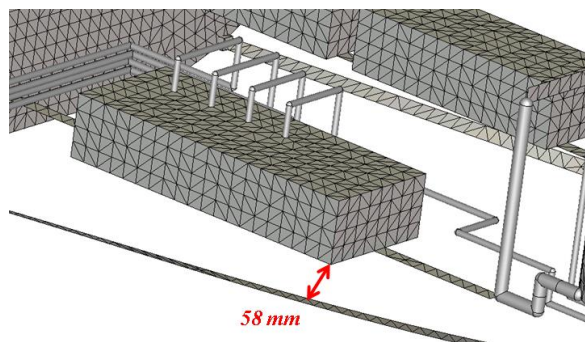
Průchod elektrického proudu přes vodič uvolní teplo. Množství uvolněného tepla Q můžeme spočítat dle Jouleho zákona [32]. Integrací průběhu proudu protékajícího divortory jsme získali střední absolutní hodnotu, se kterou budeme počítat. Výpočty jsme zjistili, že samotný divertor se procházejícím proudem ohřeje zanedbatelně asi o 4°C.

Zásadnější vliv na ohřev vlivem protékajícího bleskového proudu mají přechodové odpory ve spojích. Dle experimentálního měření na reálném letounu mohou tyto hodnoty dosahovat až 500 Ω , což by mohlo znamenat i zničení spoje tepelným působením. Díky numerickým analýzám zjistíme nejvíce proudově namáhaná místa. Spoje v těchto místech se musí provést co nejprecizněji, aby se při případném zásahu bleskem neporušila struktura a celistvost trupu. Mechanické poškození a opálení v místě zásahu bleskem způsobuje velmi horká plasma tvořící vodivý kanál blesku.

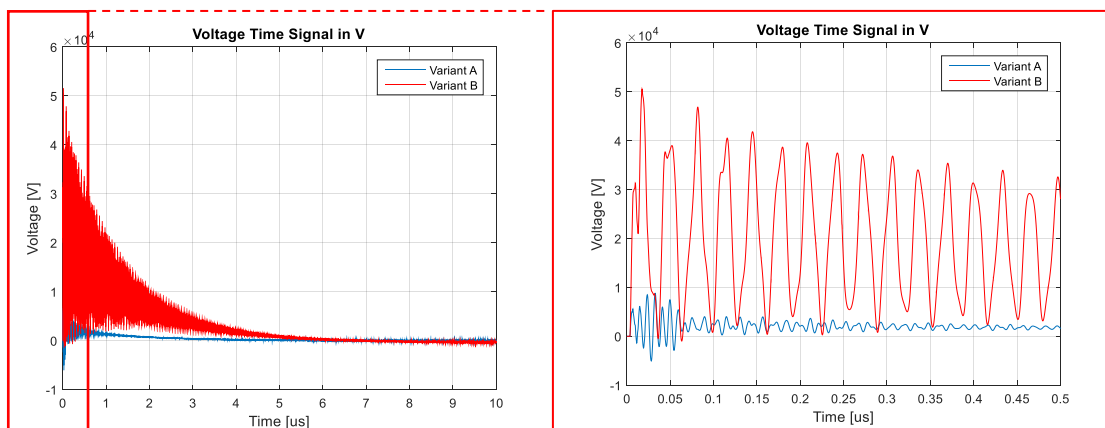
4.1.5 Určení možnosti přeskoku bleskového proudu na vnitřní instalaci

Jiskření je jev, který nelze metodami použitými v této práci simulovat. Jiskření má tendenci vznikat na ostrých hranách konstrukčních prvků, případně na špatně ošetřených rozích kovových pásků. Takové případy zjednodušený model nerespektuje. Můžeme však spočítat napětí v místech mezi dvěma povrchy, kde očekáváme vznik elektrického oblouku. Obvykle jsou to objekty s velkým rozdílem potenciálů (povrchové proudy na jedné ploše tečou opačným směrem než na druhé ploše).

V CST MWS můžeme toto napětí zjistit jednoduše použitím monitoru napětí. Ten integruje tečné složky elektrického pole po zvolené křivce. V případě programu CONCEPT II musíme vypočítat tečnou složku elektrického pole z předem definovaných bodů, které tvoří pomyslnou křivku, a hodnoty složek integrovat. Zkoumaným místem je mezera mezi divertorem a hydraulickým rozdělovačem (obr. Obr. 4.7). Velikost mezery je 58 mm.



Obr. 4.7: Sledování velikosti intenzity pole v mezeře mezi divertorem a hydraulickým rozdělovačem.



Obr. 4.8: Porovnání velikostí napětí. Simulace.

Výsledky varianty A a B můžeme vidět na obr. 4.12. Přídavným propojením byl snížen rozdíl potenciálů, čímž bylo sníženo riziko porušení elektrické pevnosti vzduchu (přeskoku proudu na avionické zařízení).

Počítaná struktura má spíše induktivní charakter. Periodicita zámkitů, které můžeme pozorovat, je daná rezonancí struktury. Analýzy jsou provedeny pouze do 10 mikrosekund, jelikož dochází k postupnému vyrovnávání potenciálů mezi zkoumanými povrchy.

Z výsledků analýz můžeme konstatovat, že k přeskoku bleskového proudu na hydraulický rozdělovač nedojde. Maximální hodnota napětí je u varianty B přibližně 50 kV na vzdálenost 58 mm, což je asi 0.86 kV/mm. Elektrická pevnost vzduchu je přibližně 3 kV/mm. Aby došlo k přeskoku, muselo by napětí v této mezeře vzrůst minimálně na 174 kV.

4.2 Shrnutí

V této kapitole byly provedeny numerické simulace úderu blesku do nosové části semikompozitního letounu EV-55 Outback. Nosová část byla vybrána z důvodu umístění v nejkritičtější bleskové zóně 1A, kde dochází k prvotnímu zavěšení bleskového oblouku. Tato nosová část je kompletně vyrobena z kompozitních materiálů různého složení, a obsahuje také kritické systémy a avioniku.

Pomocí numerických analýz jsme získali představu o šíření bleskového proudu po povrchu a uvnitř struktury. Také jsme obdrželi informaci o chování elektromagnetického pole. Díky numerickým analýzám dokážeme optimalizovat ochranu a prozkoumat různé varianty ukostření ještě na virtuálním prototypu. Tím lze ušetřit nemalé finanční náklady na výrobu a testování.

5 ZÁVĚR

Na základě úvodní diskuze o vývoji dosavadních přístupů k návrhu a hodnocení ochrany letadel před účinky úderu blesku a na základě rozboru aktuálních problémů spojených s využitím simulací při analýzách letadel byly stanoveny dva základní cíle disertační práce. Jejich vlastní řešení je popsáno ve dvou samostatných kapitolách.

První cíl a kapitola 3 disertace – Experimentální charakterizace elektromagnetické ochrany letadel, se zaměřují na metody charakterizace ochrany před přímými a nepřímými účinky blesku. Byla měřena stínící účinnost 25 kompozitních vzorků s různým složením a s různou přídatnou ochranou před účinky HIRF nebo úderem blesku. Dále se tato ochrana zkoumala přímo na úder blesku. Z výsledků experimentů vyplývají doporučení, jak je třeba optimalizovat ochranu letounu v různých zónách úderu blesku.

Tyto poznatky pak byly využity při naplňování druhého cíle ve 4. části disertace – Účinky bleskového výboje: Numerická Analýza kompozitní nosové části EV-55. Byl vytvořen zjednodušený model nosové části kompozitního letounu, na kterém byla provedena analýza ochrany před účinky bleskového výboje. Bylo zkoumáno rozložení proudu na divertorech, a byly analyzovány různé možnosti, jak zvýšit ochranu před účinky bleskového výboje. Jedná se o propojení bleskosvodného systému s uzemněním uvnitř kompozitní nosové části.

Ze získaných výsledků analýz byly formulovány výhody a nevýhody řešení. Zjištěním velikosti proudů na jednotlivých částech modelu jsme také mohli dopočítat a analyzovat jevy, které mohou při úderu blesku do takto vybavené nosové části letounu nastat. Jedná se o působení magnetických sil na trubky hydrauliky, ohřátí materiálu průchodem bleskového proudu a případný přeskok bleskového proudu na instalovanou avioniku.

Vzhledem k tomu, že se k analýzám těchto jevů používalo virtuální prostředí a virtuální modely, bylo dosaženo nemalé finanční úspory při optimalizování ochrany nosové části.

Praktické zkušenosti z naplňování obou cílů byly využity v průběhu finálních simulačních analýz prototypových verzí letounů EV-55 Outback. Výsledky této práce pak jasně dokazují jak výhodnost začlenění numerických analýz elektromagnetického pole do zavedeného procesu vývoje elektronických systémů letadel a jejich ochrany.

REFERENCE

- [11] Aircraft Accident Report, Boeing 707-12, N709PA Pan American World Airways, Inc, Near Elkton, Maryland, Dec. 8, 1963. Civil Aeronautic Board File n° 1-0015, http://en.wikipedia.org/wiki/Pan_Am_Flight_214, 1965.
- [2] Wing Failure of Boeing 747-131 Near Madrid Spain May 9, 1976. Report n° NTSB-AAR-78-12.
- [3] EUROCAE ED-14D/RTCA DO-160G (2010) – Section 22.
- [4] ED-84. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. The European Organisation for Civil Aviation Equipment, 1997. Including Amendment N. 1 - October 1999, Amendment N. 2 – May 2001 & Amendment N. 3 - June 2006.
- [5] 'Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning', ref. EUROCAE ED-81 & A1, August 1999.
- [6] 'Aircraft Lightning Zoning', refs. EUROCAE ED-91 & A1 & A2, June 2006 / SAE ARP 5414, rev A, February 2005.
- [7] 'User's Manual for Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning', ref. SAE ARP 5415, rev A, February 2008.
- [8] 'Protection of Aircraft Electrical/Electronic Systems Against the Indirect Effects of Lightning', ref. AC 20-136A, December 2006..
- [9] F. A. FISHER, A. PLUMER and R. PERALA – Lightning Protection of Aircraft. Lightning Technologies Inc. Second Printing, 1999.
- [10] C. C. Goodloe, 'Lightning Protection Guidelines for Aerospace Vehicle', NASA, May 1999.
- [11] G. A. M. Odam, A. W. Hanson, R. H. Evans, 'Lightning Protection Requirements for Aircraft - A Proposed Specification', Defence Research Agency, Controller HMSO London, revised issue 1, May 1991.
- [12] Vladimir A. Rakov and Martin A. Uman, 'Lightning: Physics and Effects', Cambridge University Press, 2003.
- [13] ARTEMIS – Analytical Research of Risks in Electromagnetically Integrated Systems [online]. 2007 [cit. 2015-4-22]. Description — International projects. Available at WWW: <<http://www.evektor.cz/en/international-projects.aspx>>.
- [14] HIRF SE High Intensity Radiated Field Synthetic Environment [online]. 2008 [cit.2013-8-15]. Description — HIRF SE. Available at WWW: <<http://www.hirf-se.eu>> or <http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/hirf_se_en.htm>.
- [15] SIPDA [online]. 2015 [cit.2015-4-22]. Description — The International Symposium on Lightning Protection. Available at WWW: <<http://www.usp.br/sipda/?q=en/home>>.
- [16] ICLP [online]. 2015 [cit.2015-4-22]. Description — The International Conference on Lightning Protection. Available at WWW: <<http://www.iclp-centre.org>>.

- [17] CS-23 Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Normal, Utility, Aerobatic, and Commuter Category Aeroplanes, Amendment 4, EASA, July 2015..
- [18] EUROCAE ED-84B / SAE ARP5412B, Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms..
- [19] EUROCAE ED-107A / SAE ARP 5583A, Guide to Certification of Aircraft Electrical and Electronic Systems for Operation in the High Intensity Radiated Fields (HIRF) Environment..
- [20] AMC 20-136, Aircraft Electrical and Electronic System Lightning Protection.
- [21] AMC 20-158 Aircraft Electrical and Electronic Systems High Intensity Radiated Fields (HIRF) Protection..
- [22] STEFFAN, P., VRBA, R., DRINOVSKY, J. A new measuring method suitable for measuring shielding efficiency of composite materials with carbon fibers. In International Conference on Systems. Menuires (France): IEEE, 2010. DOI: 10.1109/ICONS.2010.39.
- [23] -, ASTM F3114-15, Standard Specification for Structures. [Online] Cited 2021-08-10. Available at www.astm.org.
- [24] DANIEL, I. M., ISHAI, O. Engineering Mechanics of Composite Materials. 2nd ed. New York (USA): Oxford University Press, 2006. ISBN 9780195150971.
- [25] WILSON, P.F., MA, M.T. A Study of Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials. NBS Technical Note 1095. [Online] Cited 2021-08-10. Available at www.govinfo.gov/content/pkg.
- [26] Černohosky, D., Novaček, Z., Raida, Z., Electromagnetic waves and lines.. Brno: Vutium 1999. 136 p. ISBN 80-214-1261-5..
- [27] -, ASTM D4935-10, Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. [Online] Cited 2021-08-10. Available at www.astm.org.
- [28] ADAMS, J.W., VANZURA, E.J., Shielding Effectiveness Measurements of Plastics. NBS Publications. [Online] Cited 2021-08-10. Available at nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR.
- [29] Dexmet Corporation, manufacture precision expanded metal foils and polymers. [Online] Cited 2021-08-10. Available at www.dexmet.com.
- [30] Element Materials Technology [Online]. 2021[cit. 2021-8-15] Available on WWW: <<https://www.element.com/product-qualification-testing-services/aircraft-lightning-strike-testing>>.
- [31] D. H. Trout, J. E. Stanley, and P. F. Wahid, "Evaluation of Lightning Induced Effects in a Graphite Composite Fairing Structure," 27th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Williamsburg, Virginia, USA, march 2011.
- [32] Joule heating, Wikipedia, Online on WWW: https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_heating..
- [33] Airplane EV-55 [Online]. 2015[cit. 2015-4-22] Available on WWW: <<http://www.evektor.cz/en/ev-55-outback>>.
- [34] EUROCAE ED-91B / SAE ARP 5414A Aircraft Lightning Zoning Standard.

CURRICULUM VITAE

Personal Details

Name: Krutílek David, Ing.
Date of Birth: 28 September 1987
Contact: David.Krutilek@email.cz
Nationality: Czech

Education

2007 – 2013 Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radioelectronics
Study programme: Electrical Engineering and Computer Science
Thesis theme: Numerická analýza účinků elektromagnetického pole na semikompozitní letoun EV55 / Numerical em analysis of semi-composite model of EV55 aircraft

Since 2013 Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radioelectronics
(from 2013 to 2017 present study, since 2017 combined study)
Study programme: Electrical Engineering and Communication
Dissertation theme: Numerická analýza účinku blesku na malé letadlo / Numerical analysis of the lightning on small aircraft

Working experience

Since 3/ 2011: **Evektor, spol. s r.o., EMC/CEM department**
R&D Engineer

Job description: EMC/CEM analysis and design
Analysis of complex electromagnetic systems on EMC (aircraft, cars, cable harnesses) with focus on high-powered electromagnetic events (HIRF, lightning effects, etc)

Languages: Czech, English, German

Research interests: Numerical analysis of electromagnetic phenomena with focus on EMC.

ABSTRAKT

Tato disertační práce se zabývá numerickou analýzou účinků úderu bleskového výboje do letadla a návrhem optimálního složení kompozitní struktury ve smyslu ochrany před bleskovým úderem. K návrhu složení je využit zjednodušený model kompozitní nosové části letounu EV-55. Optimalizace kompozitní struktury vychází z výsledků experimentálního měření a testování. Na zjednodušeném modelu nosové části je pak ověřena materiálová skladba kompozitu a jsou numericky odhadnuty přímé a nepřímé účinky bleskového výboje.

ABSTRACT

This dissertation deals with the numerical analysis of effects of a lightning strike on an aircraft and with the design of the optimal composition of the composite structure in terms of lightning strike protection. When optimizing the composition, a simplified model of the composite nose section of an EV-55 aircraft is used. The optimization of the composite structure is based on results of experimental measurements and testing. On the simplified model of the nose part, the material composition of the composite is verified and the direct and indirect effects of the lightning discharge are numerically estimated