

Detekce a analýza improvizovaných nástražných systémů v terahertzové oblasti spektra

The Detection and Analysis of IEDs
in the Terahertz Region of the Spectrum

Ondřej Sochor

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej Sochor**
Osobní číslo: **A11056**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Detekce a analýza improvizovaných nástražných systémů v terahertzové oblasti spektra**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na téma detekce a identifikace improvizovaných nástražných systémů.
2. Popište výrobu improvizovaného nástražného systému.
3. Vyberte nejčastěji používané chemické látky volně přístupné na trhu nutné k přípravě výbušnin.
4. Seznamte se s přístroji a technikou terahertzové spektroskopie a zobrazování.
5. Připravte vzorky k analýze pomocí terahertzových vln a proveďte příslušná měření, včetně diskuze výsledků.
6. Proveďte rozbor vámi studované metody pro oblast bezpečnostních aplikací.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. **CHENG ZHANG, Jingzhou Xu. Introduction to THz wave photonics. New York: Springer, 2009. ISBN 978-144-1909-787.**
2. **DEFOREST, M. Principles of improvised explosive devices. Boulder, Colo., USA: Paladin Press, c1984, iv, 69 p., 44 p. of plates. ISBN 08-736-4288-0.**
3. **KEMP, Michael C. a Joseph S. MELINGER. Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy? A Bridge Too Far?. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2011, vol. 1, issue 1, s. 282-292. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159647.**
4. **ETAYO, D., I. MAESTROJUAN, J. TENIENTE, I. EDERRA a R. GONZALO. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2013, vol. 34, 7-8. DOI: 10.1007/s10762-013-9988-0.**
5. **FEDERICI, John F, Brian SCHULKIN, Feng HUANG, Dale GARY, Robert BARAT, Filipe OLIVEIRA a David ZIMDARS. THz imaging and sensing for security applications? explosives, weapons and drugs. Semiconductor Science and Technology. 2005-07-01, vol. 20, issue 7, s. 282-292. DOI: 10.1088/0268-1242/20/7/018.**

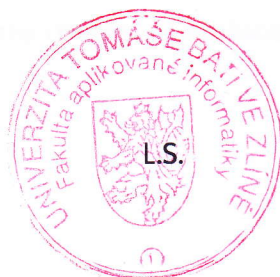
Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **7. března 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10. června 2014**

Ve Zlíně dne 7. března 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou improvizovaných výbušných systémů. Zkoumány jsou metody detekce a identifikace výbušnin, které lze snadno vyrobit v domácích podmínkách. Pozornost je věnována hlavně terahertzové spektroskopii a zobrazování. Jsou popsány výhody a nevýhody těchto technik. Praktická část je zaměřena na prekurzory výbušnin a jejich dostupnost. Je provedena spektroskopická analýza vybraných výbušnin v terahertzové oblasti spektra.

Klíčová slova: IED, NVS, výbušniny, detekce, THz, terahertz, spektroskopie, prekurzor, ANFO, DAP, nitrocelulóza

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of improvised explosive devices. It describes the methods of the detection and identification of explosives that are easy to make at home. Attention is paid mainly to terahertz spectroscopy and terahertz imaging. A reader is informed about advantages and disadvantages of these techniques. The practical part is focused on explosives precursors and their availability. The spectroscopic analysis of selected explosives is performed in the terahertz region of the spectrum.

Keywords: IED, explosives, detection, THz, terahertz, spectroscopy, precursor, ANFO, nitrocellulose

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za odborné vedení, věcné připomínky a užitečné rady během psaní bakalářské práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 IMPROVIZOVANÝ NÁSTRAŽNÝ SYSTÉM (IED)	11
1.1 STRUKTURA IED	11
1.1.1 Zdroj energie	11
1.1.2 Spínač	11
1.1.3 Detonátor.....	13
1.1.4 Hlavní nálož	13
1.1.5 Kontejner.....	14
1.2 ROZDĚLENÍ IED	15
1.2.1 Dle způsobu iniciace	15
1.2.2 Dle primárního cíle útoku	15
1.2.3 Z hlediska způsobu provedení útoku.....	15
1.2.4 Dle velikosti	15
1.3 ÚTOKY S VYUŽITÍM IED.....	16
1.3.1 Výbuch v Oslu 2011 (Norsko)	17
1.3.2 Útok na Bostonský maraton 2013 (USA)	17
1.3.3 Výbuchy ve Volgogradu 2013 (Rusko)	18
1.3.4 Výbuch poštovního balíku v obci Osov 2014 (ČR)	18
2 VÝBUŠNINY	19
2.1 TRHAVINY	19
2.2 TŘASKAVINY	20
2.3 STŘELIVINY	22
2.4 PYROTECHNICKÉ SLOŽE	23
3 TECHNIKY DETEKCE IED	24
3.1 DETEKCE PAR A STOPOVÝCH MNOŽSTVÍ VÝBUŠNIN.....	24
3.2 DETEKCE HLAVNÍ NÁLOŽE	25
3.3 DETEKCE KOVŮ	27
4 DETEKCE POMOCÍ TERAHERTZOVÝCH VLN	28
4.1 TERAHERTZOVÉ ZÁŘENÍ	28
4.2 ČASOVĚ ZÁVISLÁ SPEKTROSKOPIE	29
4.2.1 Transmittance	31
4.2.2 Absorbance.....	31
4.2.3 Transmisní spektroskopie.....	32
4.2.4 Reflexní spektroskopie.....	32
4.3 TERAHERTZOVÉ ZOBRAZOVÁNÍ.....	33
4.3.1 Pasivní zobrazování	33
4.3.2 Aktivní zobrazování	33
4.4 VÝHODY A NEVÝHODY	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	35
5 RECEPTURY PODOMÁCKU VYROBENÝCH VÝBUŠNIN	36

5.1	CHEMIKÁLIE POTŘEBNÉ PRO VÝROBU VÝBUŠNIN	36
5.2	DOSTUPNOST A CENA	37
6	SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA VÝBUŠNIN PRO VÝROBU IED	39
6.1	PŘÍSTROJ TERA VIEW TPS SPECTRA 3000.....	39
6.2	VÝBĚR VÝBUŠNIN	39
6.3	NÁKUP A PŘÍPRAVA VZORKŮ	40
6.4	MĚŘENÍ ABSORBANCE	42
6.4.1	ANFO	43
6.4.2	Střelná bavlna.....	48
6.5	MĚŘENÍ VLIVU OBALOVÝCH MATERIÁLŮ	49
6.5.1	Papír	49
6.5.2	Textil	50
6.6	MĚŘENÍ VLIVU ATMOSFÉRICKÉ VLHKOSTI.....	51
6.7	TERAHERTZOVÝ OBRAZ VÝBUŠNIN	52
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	59
	SEZNAM OBRÁZKŮ	61
	SEZNAM TABULEK.....	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	63

ÚVOD

Teroristické útoky s využitím improvizovaných výbušných systémů (IED) se stávají významnou bezpečnostní hrozbou současnosti. Za posledních 10 let byl zaznamenán enormní nárůst útoků tohoto typu. Je to dáno hlavně velmi snadnou a levnou výrobou improvizovaných výbušnin. Ve světě jsou proto vynakládány obrovské finanční prostředky na vývoj nových technik detekce výbušnin. Jednou z velmi perspektivních technik je detekce a analýza výbušnin pomocí terahertzových vln.

Bakalářská práce se podrobně zabývá improvizovaným nástražným systémem. Jeho konstrukcí, dostupností a výrobou improvizovaných výbušnin i detekcí takového zařízení.

Teoretická část je rozdělena do čtyř kapitol. V první kapitole je čtenář seznámen s improvizovaným nástražným systémem, jeho jednotlivými částmi a dělením dle různých kritérií. Zmíněno je i několik významných útoků, při kterých bylo využito improvizovaných výbušných zařízení. Druhá kapitola se věnuje výbušninám, které jsou při konstrukci takových zařízení nejčastěji používány. Třetí kapitola se zabývá současnými možnostmi detekce improvizovaných nástražných systémů. A konečně pátá kapitola se zaměřuje na využití terahertzových vln k detekci a analýze improvizovaných výbušných systémů. Zde je detailně popsána metoda časově závislé spektroskopie (TDS), která je později v praktické části použita k analyzování spektrálních vlastností vybraných výbušnin. V této kapitole je čtenář též seznámen se zobrazovacími systémy, které pracují v terahertzové oblasti spektra.

Praktická část bakalářské práce je rozdělena do dvou kapitol. První se zabývá výrobou výbušnin v domácích podmínkách a dostupností potřebných materiálů. V druhé kapitole jsou provedena spektroskopická měření vybraných výbušnin v terahertzové oblasti spektra, která mohou v budoucnu posloužit při návrhu detektoru IED.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 IMPROVIZOVANÝ NÁSTRAŽNÝ SYSTÉM (IED)

Improvizovaný nástražný systém je zařízení sestavené z běžně dostupných materiálů a domácích potřeb, za účelem zranit nebo zabít osoby, případně způsobit škodu na majetku.[1]

Existují nástražné systémy neexplozivní a explozivní. Neexplozivní fungují obvykle na principu mechanického vržení ostrého předmětu nebo potřísnění kyselinou.[2]

V této práci se budu zabývat pouze explozivními nástražnými systémy, které vždy obsahují výbušninu. V české literatuře se lze setkat s ekvivalentními termíny „improvizované výbušné zařízení“ nebo „nástražný výbušný systém“ (NVS). V anglické literatuře a ve světě se pak nejčastěji vyskytuje termín „Improvised explosive device“ (IED).

1.1 Struktura IED

Improvizovaný výbušný systém je obvykle složen z těchto pěti základních částí [3]:

- Zdroj energie.
- Spínač.
- Detonátor (primární nálož).
- Hlavní nálož (sekundární popř. terciární nálož).
- Kontejner.

1.1.1 Zdroj energie

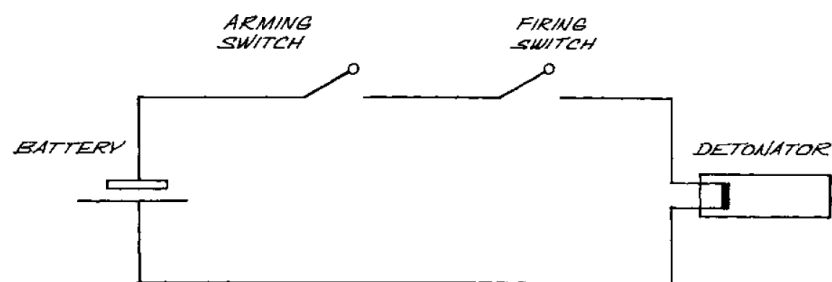
Zdroj energie je důležitá část IED, která slouží k iniciaci rozbušky. Obvykle se jedná o baterii, ale existují systémy, které k iniciaci nálože využívají chemické reakce.

1.1.2 Spínač

Spínač na základě určitého vnějšího podnětu sepne obvod mezi rozbuškou a baterií. K sepnutí může dojít lokálně nebo dálkově. V případě lokálního sepnutí se často jedná pouze o mechanické spojení dvou elektrických vodičů. Způsobů jak toho docílit existuje celá řada. Podrobně se této problematice věnuje publikace *Principles of improvised explosive devices* [2]. V případě dálkového sepnutí se používá již komplexnějších elektrických obvodů.

V IED jsou obvykle dva druhy spínačů v sériovém zapojení:

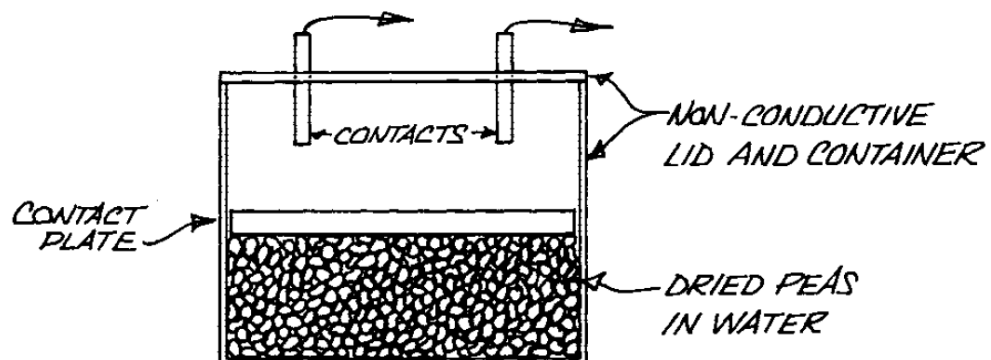
- **Ochranný spínač** zabraňuje nechtěné iniciaci při výrobě a přepravě IED.
- **Detonační spínač** v reakci na určitou událost iniciuje rozbušku. Pro spolehlivou iniciaci ve správný čas pak může být zapojeno několik detonačních spínačů sériově nebo paralelně.



Obr. 1 Základní schéma spínacího obvodu IED [2]

Události, které vedou k sepnutí detonačního spínače, můžeme obecně rozdělit do čtyř kategorií [2]:

- **Zpoždění** – různé mechanické a elektrické časovače, chemické reakce, ale i velmi netradiční způsoby jako je bobtnání hrachu ve vodě. Viz Obr. 2.
- **Okolní podmínky** – změna teploty, atmosférického tlaku, přítomnost určitého záření, přiblížení osoby, citlivost na akustické podněty.
- **Manipulace** – zvednutí, posunutí, tlak.
- **Příkazem** – rádiové vlny, mobil, kabel.



Obr. 2 Spínač na principu bobtnání luštěnin [2]

1.1.3 Detonátor

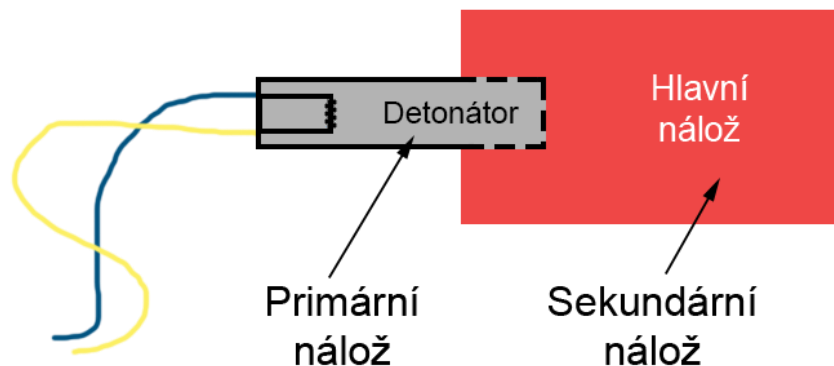
Detonátor nebo též primární nálož, je součástí IED, která je odpálena v první fázi výbuchu. Vytváří tak vhodné podmínky, při nichž jsou méně citlivé výbušiny v sekundární náloži schopné explodovat. Detonátor je obvykle vyroben z třaskaviny, kterou lze snadno iniciovat. Součástí primární nálože je i rozbuška. V případě IED se lze setkat i s improvizovanou rozbuškou vyrobenou např. z rozbité žárovky.

1.1.4 Hlavní nálož

Představuje hlavní složku IED, která určuje celkovou sílu detonace. Hlavní nálož obvykle není moc citlivá na vnější podněty. Pro její odpálení je tedy nutné použít rozbušku. Podle citlivost hlavní nálože se pak jedná o dvoufázové nebo třífázové sekvence výbuchů.

Sekundární nálož

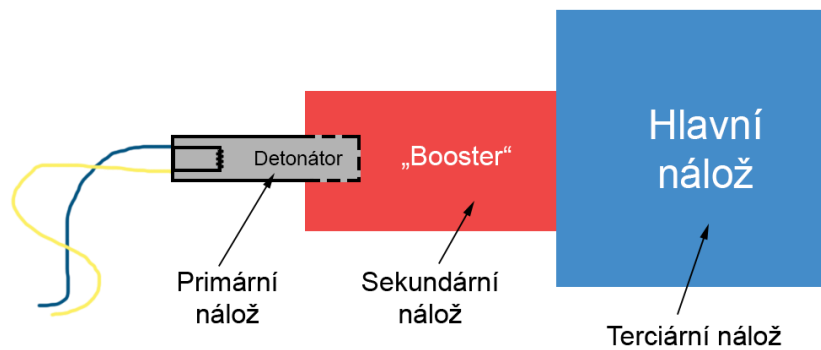
Většina výbušných systémů se skládá z primární a sekundární nálože. Tvoří tedy dvoufázový systém. Sekundární výbušiny jsou např. kyselina pikrová, TNT nebo RDX.



Obr. 3 Dvoufázová sekvence výbuchu [1]

Terciární nálož

Některé výbušiny jsou natolik necitlivé k vnějším podnětům, že je potřeba kromě detonátoru použít, ještě sekundární nálož jako tzv. „booster“, který vytvoří dostatečnou teplotu a tlak pro iniciaci terciární nálože. Jedná se už tedy o trojfázový systém. Terciární nálož se používá u IED rozsáhlých destruktivních účinků. Jako terciární nálož se nejčastěji používají výbušiny na bázi dusičnanu amonného (ANFO, ANNM), které jsou cenově dostupné a lze je tedy vyrobit ve velkém množství.



Obr. 4 Třífázová sekvence výbuchu [1]

1.1.5 Kontejner

Výbušniny bývají obvykle umístěny do obalu či kontejneru, který činí celý systém méně nápadný, případně zvyšuje jeho zraňující účinky. Tvar a materiál kontejneru je závislý na účelu použití IED. Může se jednat o dopis, balíček, zavazadlo nebo rovnou celý automobil. Materiály jsou různé. Kontejner může být ze dřeva, papíru, textilu, plastu, skla i kovu.

Společně s náloží mohou být do kontejneru umístěny různé šrapnely, hřebíky či jiné střepiny, které zvětší dosah zraňujícího účinku na stovky metrů. IED může být zkombinováno s radioaktivním materiálem nebo nebezpečnými chemikáliemi. Vzniká tak tzv. „špinavá bomba“. Existuje varianta IED, u které se nálož ukládá do kovové trubky. Jedná se o tzv. „trubkovou bombu“, která se při explozi roztrhne jako granát.



Obr. 5 „trubková bomba“ obalená hřebíky [1]

1.2 Rozdělení IED

IED může mít mnoho různých podob a tvarů. Stejně tak účinek výbuchu je ovlivněn mnoha faktory. Zde jsou uvedena základní rozdělení a možné účinky IED v závislosti na jeho velikosti. [4]

1.2.1 Dle způsobu iniciace

- řízené rádiem (dálkově),
- řízené kabelem,
- iniciované obětí.

1.2.2 Dle primárního cíle útoku

- člověk,
- budova,
- dopravní prostředek.

1.2.3 Z hlediska způsobu provedení útoku







- přepravované dopravním prostředkem,
- nesené osobou,
- stacionární.

1.2.4 Dle velikosti

Tab. 1 Destruktivní účinky IED dle velikosti [5]

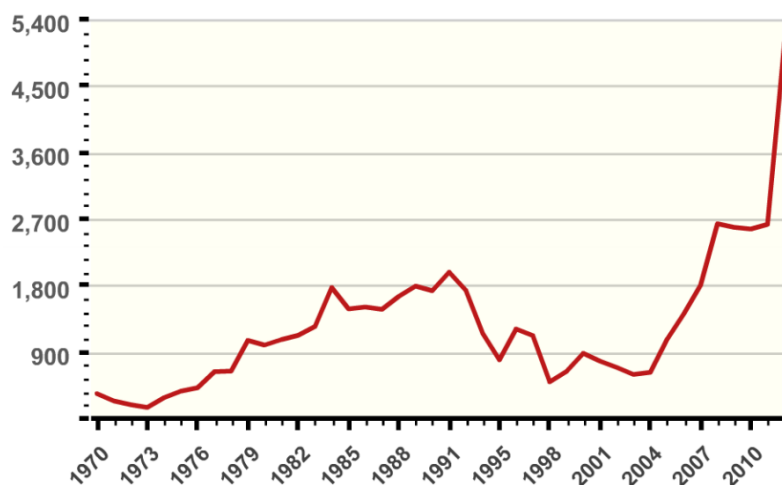
Forma IED	Hmotnost výbušniny	Okruh destrukce	Dosah střepin na volném prostranství
Malý balíček / dopis	0,5 kg	10 m	300 m
„Trubková bomba“	2,5 kg	20 m	400 m
Větší balíček	5 kg	30 m	320 m
Vesta	10 kg	40 m	500 m
Velký balík	25 kg	50 m	550 m
Malý osobní automobil	225 kg	100 m	600 m
Velký osobní automobil / SUV	450 kg	120 m	700 m
Dodávka	1800 kg	200 m	1100 m
Nákladní automobil	4500 kg	250 m	1500 m

Tab. 2 Objem exploziv a účinky dle typu vozidla [6]

ATF	Vehicle Description	Maximum Explosives Capacity	Lethal Air Blast Range	Minimum Evacuation Distance	Falling Glass Hazard
	Compact Sedan	500 pounds 227 Kilos (In Trunk)	100 Feet 30 Meters	1,500 Feet 457 Meters	1,250 Feet 381 Meters
	Full Size Sedan	1,000 Pounds 455 Kilos (In Trunk)	125 Feet 38 Meters	1,750 Feet 534 Meters	1,750 Feet 534 Meters
	Passenger Van or Cargo Van	4,000 Pounds 1,818 Kilos	200 Feet 61 Meters	2,750 Feet 838 Meters	2,750 Feet 838 Meters
	Small Box Van (14 Ft. box)	10,000 Pounds 4,545 Kilos	300 Feet 91 Meters	3,750 Feet 1,143 Meters	3,750 Feet 1,143 Meters
	Box Van or Water/Fuel Truck	30,000 Pounds 13,636 Kilos	450 Feet 137 Meters	6,500 Feet 1,982 Meters	6,500 Feet 1,982 Meters
	Semi-Trailer	60,000 Pounds 27,273 Kilos	600 Feet 183 Meters	7,000 Feet 2,134 Meters	7,000 Feet 2,134 Meters

1.3 Útoky s využitím IED

I přes zvyšující se bezpečností opatření, narůstá na celém světě počet útoků s využitím IED. Bohužel útoky jsou stále častější. Každý rok je odpáleno několik tisíc improvizovaných výbušných systémů. Jedná se hlavně o oblasti blízkého východu, kde působí povstalecké skupiny a teroristická hnutí. Nemusí se ale vždy jednat o teroristický útok a nejsou to jen útoky ve válečných oblastech. IED často figuruje i jako prostředek pro odstranění nepohodlných osob.



Obr. 6 Vývoj počtu útoků s využitím IED [7]

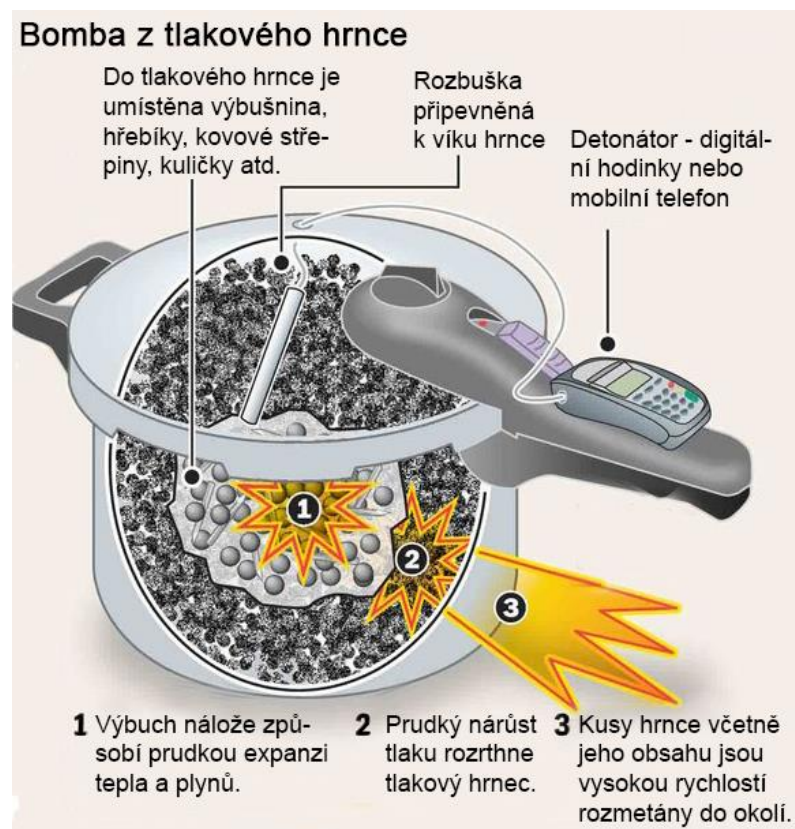
Nyní připomenu některé známé útoky a nedávno spáchané atentáty, při kterých bylo použito improvizovaných výbušných systémů.

1.3.1 Výbuch v Oslu 2011 (Norsko)

Dne 22. července 2011 vybuchla v centru Osla nálož o hmotnosti cca 950 kg, která zranila nejméně 209 lidí (z toho 9 vážně) a 8 lidí usmrtila.[8] Z útoku byl obviněn Anders Breivik, který tentýž den zastřelil dalších 69 lidí na ostrově Utøya . Těsně před útokem zveřejnil Breivik manifest [9], kde podrobně popsal své motivy, přípravy na útok a také přesný postup výroby bomby z hnojiva.

1.3.2 Útok na Bostonský maraton 2013 (USA)

Dne 15. dubna 2013 byly v cíli bostonského maratonu odpáleny dvě improvizované nálože. Bomby byly vyrobeny z tlakového hrnce. Útočník Dzhokhar Tsarnaev se inspiroval návodem, který na internetu zveřejnila islámská teroristická skupina Al-Káida. Při tomto atentátu bylo využito zábavné pyrotechniky. Útoky si vyžádaly 3 oběti a přes 170 lidí bylo zraněno.



Obr. 7. Bomba z tlakového hrnce. Převzato a upraveno z [10]

1.3.3 Výbuchy ve Volgogradu 2013 (Rusko)

Dne 29. prosince 2013 odpálil sebevražedný atentátník nálož na hlavním vlakovém nádraží ve Volgogradě, která usmrtila 18 lidí a dalších 10 těžce zranila. Den na to byla odpálena další nálož v trolejbusu městské hromadné dopravy, která usmrtila 15 lidí a dalších 28 zranila. Po tomto útoku vyhrožovala teroristická skupina útokem na olympijské hry v Soči. I přesto, že se tyto obavy nenaplnily, ovlivnila tato událost přípravu a dění olympijských her v Soči 2014, které tak doprovázela masivní bezpečnostní opatření.

1.3.4 Výbuch poštovního balíku v obci Osov 2014 (ČR)

Tento případ je ukázkovým příkladem toho, že problematika nástražných výbušných systémů se netýká jen světových velmocí a zemí dálného východu. Dne 15. ledna 2014 bylo použito IED ve formě poštovního balíčku, dopraveného Českou poštou. Exploze těžce zranila dvě osoby, z nichž jedna následně zraněním podlehla. Tento typ útoku ohrožuje kromě oběti ještě další osoby, které se účastní procesu přepravy a doručování. Tento případ nebyl dosud objasněn.[11]

Tab. 3 Další známé bombové útoky [5]

Výbušnina	Útoky
ANFO	Bombový útok v Oklahoma City 1995
TATP	Bombové útoky v Londýně 2005
Semtex, C4	Útoky IRA
EGDN	Plánovaný útok na letiště v Los Angeles 1999
Močovina	Bombový útok na světové obchodní centrum 1993
Bezdýmný střelný prach	Bombový útok na olympijský park v Atlantě 1996

2 VÝBUŠNINY

Hlavní částí improvizovaného výbušného zařízení je jednoznačně výbušnina. Samozřejmě existuje nepřeberné množství výbušnin, které lze použít. Od typu použité výbušniny se odvíjí škody, které IED může způsobit. Improvizované výbušniny mohou být:

- Směs paliva a oxidačního činidla (např. ANFO, Cheddit, střelný prach).
- Čisté chemické sloučeniny (např. TNT, RDX, Nitrocelulóza, PETN).
- Mix několika chemických sloučenin (např. Semtex).

Nemusí se vždy jednat o pevnou látku. Výbušniny mohou být v různých skupenstvích. Z improvizovaných výbušnin je známá např. kapalná výbušnina EGDN. Právě obava z možnosti smíchání výbušniny z tekutých chemikálií přímo v letadle je příčinou razantního omezení tekutin v letecké přepravě. [5]

Tato kapitola je zaměřena na výbušniny, které jsou využívány k výrobě IED. Tyto výbušniny jsou levné a lze je snadno připravit z dostupných materiálů. Výbušniny můžeme podle jejich účelu, citlivosti, rychlosti detonace a způsobu expanze plynů rozdělit do čtyř základních kategorií. Zde uvedu jen ty nejpoužívanější výbušniny z každé kategorie.

2.1 Trhaviny

Trhaviny jsou charakteristické svou nízkou citlivostí k vnějším podnětům a tedy i obtížnější iniciací. Vynikají ale svými silnými trhacími účinky.

Dusičnan amonný a palivo (ANFO, ANNM)

Jedná se o velmi oblíbenou trhavinu mezi teroristy. A to zejména díky její snadné dostupnosti, nízkým výrobním nákladům a bezproblémové výrobě. Tato výbušnina je velmi stabilní, takže její výroba je poměrně bezpečná. Používá se také na trhací práce v dolech. V improvizovaném výbušném zařízení tvoří tzv. terciární nálož. Tato výbušnina je obvykle balena do PE sáčků, aby se zamezilo navlhnutí, které by celou výbušninu ještě více znečitlivělo. Tato výbušnina je detailněji zkoumána v praktické části této práce.

Hexogen (RDX)

Hexogen, známý též jako Cyklonit, RDX nebo C4, je velmi stabilní trhavina. Díky svým dobrým vlastnostem se používá ve vojenství. Společně s Pentritem je součástí Semtexu H. Lze jej poměrně snadno připravit i v domácích podmínkách.

Pentrit (PETN)

Pentrit je bílá krystalická látka, nerozpustná ve vodě. Jedná se o silnou trhavinu, která se používá v detonátorech. I přesto, že výroba není úplně triviální, patří k nejčastěji vyráběným výbušninám mezi amatéry. Patrně za to může nespočet návodů k výrobě, které lze nalézt na internetu. Jsou známy případy, kdy se pentrit podařilo pronést přes bezpečnostní rentgen na palubu letadla. Pentrit je také hlavní složkou Semtexu 1A.

Trinitrotoluen (TNT)

TNT je jedna z nejrozšířenějších plastických trhavin. Vyrábí se nitrací toluenu. Má výborné pyrotechnické vlastnosti, proto se používá ve vojenství. Nicméně jedná se o toxickou látku. Ve směsi s dusičnanem amonným tvoří výbušninu „Amatol“.

Ethylenglykoldinitrát (EGDN)

EGDN je bezbarvá toxická kapalina podobná nitroglycerinu. Vyrábí se nitrací ethylenglykolu, který se vyskytuje jako součást nemrznoucích směsí. Oproti nitroglycerinu jsou trhací účinky silnější, a citlivost na mechanický náraz je nižší.

2.2 Třaskaviny

Tato skupina výbušnin se vyznačuje vysokou citlivostí k vnějším podnětům. Třaskaviny jsou používány jako primární nálož u IED.

Hexamethylentriperoxidiamin (HMTD)

HMTD je bílá krystalická látka, nerozpustná ve vodě. Příprava je snadná, proto je s oblibou vyráběna amatéry v domácích podmínkách. Patří do skupiny organických peroxidů. Používá se k výrobě rozbušek. Je to jedna z nejsilnějších třaskavin. Svými účinky předčí i fulminát rtuťnatý, ale průmyslově se nepoužívá, kvůli nízké chemické stabilitě.

Triaceton triperoxid (TATP)

Stejně jako HMTD patří do skupiny organických peroxidů. Jedná se o velmi populární třaskavinu mezi amatérskými pyrotechniky a teroristy. Výroba je velmi snadná. Zapotřebí jsou pouze látky volně dostupné na trhu. TATP je nejsilnější známá výbušnin, která neobsahuje molekuly dusíku. Nelze ji tedy odhalit detektory výbušnin, které fungují na bázi detekce nitrosloučenin. Průmyslově se nevyrábí kvůli nízké fyzikální stabilitě.

Tetrazen (GNGT)

Tetrazen je bezbarvá až slabě nažloutlá krystalická látka. Používá se v rozbuškách nebo ve směsi s jinými třaskavinami. Výroba není tak snadná jako u předchozích třaskavin, a ani potřebné materiály nepatří mezi běžné domácí potřeby. Nicméně nalézt ho lze v iniciačních složích do airbagu. Takže i u něj hrozí nebezpečí zneužití k výrobě IED.

Fulminát rtuťnatý

Fulminát rtuťnatý neboli třaskavá rtuť, je velmi citlivá třaskavina. Tvoří bílé až světle šedé krystaly. Jedná se o jednu z nejstarších známých třaskavin. Využívá se převážně k výrobě rozbušek. Lze ji snadno vyrobit ze rtuti a kyseliny dusičné. V průmyslu se příliš nepoužívá z důvodu vysoké ceny a toxicity. [1]

Azid olovnatý (AO)

Azid olovnatý je v současnosti jednou z nejpoužívanějších látek pro výrobu rozbušek. Jedná se o poměrně stabilní a silnou třaskavinu. Nesmí se ale dostat do kontaktu s kovovou mědí, protože by mohlo docházet ke vzniku velmi nestabilního a citlivého azidu měďnatého. Stejně jako tetrazen se používá i v airbagu, odkud jej lze snadno získat a použít k výrobě IED.

Diazodinitrofenol (DDNP)

DDNP je další třaskavinou, která se používá v iniciačních složích. Je méně citlivý než fulminát rtuťnatý nebo azid olovnatý. Není toxický. Jeho výroba je poměrně snadná a bezpečnější než u předchozích třaskavin. Tato třaskavina byla také použita v primární náloži při bombovém útoku v Oslu. [9]

2.3 Střeliviny

Střeliviny při výbuchu expandují velké množství plynů. Používají se jako raketová paliva nebo slože do nábojnic.

Černý střelný prach

Černý střelný prach je nestarší známou výbušninou na světě. Jedná se o směs dusičnanu draselného, síry a dřevěného uhlí. Různé poměry těchto základních složek pak určují konkrétní typ střelného prachu. Jeho výroba je velmi levná a snadná. Díky svým vlastnostem nachází uplatnění v zábavní pyrotechnice. Jeho využití u palných zbraní je v současné době minimální. Je nahrazen bezdýmným střelným prachem, který má lepší vlastnosti. [1]

Střelná bavlna

Po chemické stránce není střelná bavlna nic jiného než nitrocelulóza. Vyrábí se nitrací celulózy (bavlny). Podle stupně nitrace lze pak rozlišovat střelnou bavlnu, kolodiovou bavlnu a drobivou nitrocelulózu. Malé množství na volném prostoru rychle shoří. Ve větším množství a uzavřeném prostoru má silné trhací účinky. Střelnou bavlnu lze rovněž použít k výrobě improvizované rozbušky. Střelná bavlna je rovněž předmětem zkoumání v praktické části této práce.

Bezdýmný střelný prach

Bezdýmný střelný prach se používá jako prachová náplň u moderních nábojnic. Hlavní složku tvoří nitrocelulóza. Popřípadě směs nitrocelulózy a nitroglycerinu. Oproti černému prachu produkuje při hoření podstatně méně kouře. Proto název bezdýmný.

2.4 Pyrotechnické slože

Dalo by se polemizovat, zda pyrotechnické slože a zábavnou pyrotechniku řadit mezi výbušniny. V případě IED se však jedná o jednu z nejčastějších výrobních komponent, o čemž nás utvrzují nedávné útoky v Bostonu.

Pyrotechnika představuje závažné riziko především z důvodu snadné dostupnosti široké veřejnosti. I přesto, že v obyčejné petardě je jen několik gramů výbušné látky, není problém ji rozebrat a vytvořit z několika kusů novou a mnohem účinnější nálož. V kombinaci s různými ostrými předměty pak vzniká účinné IED.

Mezi pyrotechnické slože lze zařadit i kovové prášky hliníku, hořčíku nebo železa, které zvyšují teplotu chemické reakce.

Chlorečnan draselný

Chlorečnan draselný, KClO_3 , je bílá krystalická látka. Jedná se o velmi silné oxidační činidlo. V kombinaci s cukrem tvoří prudce hořlavou směs. Používá se mimo jiné pro výrobu zápalných lahví. Podle oficiálních zpráv Pentagonu z roku 2013 je chlorečnan draselný častěji používán pro výrobu IED než výbušniny na bázi hnojiv.[12] V zábavní pyrotechnice je v současné době nahrazován chloristanem draselným, který je stabilnější.

Manganistan draselný

Manganistan draselný (hypermangan), KMnO_4 , je tmavě fialový prášek. Stejně jako chlorečnan má silné oxidační účinky. Používá se v lékařství jako dezinfekce. Společně s glycerinem jej lze použít k výrobě samozápalné směsi, a iniciovat tak IED pomocí chemická reakce.

Dusičnan draselný

Dusičnan draselný, KNO_3 , známý též jako ledek draselný, je bílá krystalická látka. Jedná se rovněž o silné oxidační činidlo. Je jednou z hlavních složek střelného prachu. Mimo to se používá i v zemědělství jako hnojivo.

3 TECHNIKY DETEKCE IED

Bohužel zatím neexistuje metoda, která by dokázala spolehlivě identifikovat IED jako celek. Nedá se totiž dopředu určit, jak bude IED vypadat. Při detekci IED je třeba vycházet z jednotlivých částí zařízení. V dnešní době existuje celá škála různých technik a metod k detekci výbušnin. Ovšem žádná není dokonalá ani univerzální. Každá má své výhody i nevýhody. Některé metody umožňují vzdálenou detekci, jiné pouze detekci z bezprostřední blízkosti.

3.1 Detekce par a stopových množství výbušnin

Tyto metody spočívají v detekci velmi malého množství výbušniny, které se z nálože buď uvolňuje ve formě výparů, nebo ve formě mikroskopických částic, které ulpívají na povrchu předmětů při kontaktu s výbušninou. Některé systémy umožňují ohřev zkoumaného objektu (např. IR zářením), což zvyšuje schopnost detektoru zachytit molekuly výbušniny. [13]

Iontová mobilní spektrometrie (IMS)

Mezi komerčními detektory je IMS nejběžnější technikou. Vyniká relativně rychlou detekcí, nízkou cenou a vysokou spolehlivostí. Provedení může být v podobě ručního detektoru i průchozího portálu. Princip IMS spočívá v ionizaci částic nasátého vzduchu za atmosférického tlaku. Ionty jsou poté urychleny v elektrickém poli a separovány podle mobility. Z časové funkce dopadu iontů na detektor pak lze, při porovnání s referenčními daty, určit neznámou látku.

Tato metoda neodhalí všechny typy výbušnin. Kvůli omezenému časovému rozlišení může dojít ke splynutí charakteristických píků, což představuje problém obzvláště při detekci více výbušnin najednou. [13,14]

Hmotnostní spektroskopie (MS)

Hmotnostní spektroskopie rovněž využívá ionizace částic. Na rozdíl od IMS pracuje za velmi nízkého tlaku, blízkého vakuu. Při určení látky se vychází z charakteristického poměru hmotnosti/náboje daného iontu. Existují různé typy hmotnostní spektroskopie. Nevýhody jsou obdobné jako u IMS. [13]

Plynová chromatografie (GC)

Plynová chromatografie se často používá v kombinaci s výše zmiňovanými metodami, kde slouží k separaci různých látek ve směsi. To do jisté míry odstraňuje jejich problém při identifikaci směsí. Mimo to lze, z charakteristického času potřebného pro průchod vzorku přes chromatografickou kolonu, zvýšit spolehlivost identifikace vzorku. [13]

Elektrochemické senzory

Elektrochemické senzory fungují na principu změny napětí či proudu, v důsledku chemické reakce detekované látky s elektrodou na senzoru. Výhodou je rychlá detekce, vysoká citlivost, nízká cena a možnost miniaturizace. Elektrochemické senzory dobře detekují výbušniny na bázi peroxidů, s jejichž detekcí mají jiné metody problém. [14]

Detekce pomocí zvířat

Velmi často používanou metodou je detekce pomocí zvířat. Jedná se o detekci z bezprostřední blízkosti. Úskalím této metody je, že případná exploze zařízení může zvíře usmrtit nebo těžce zranit. Výcvik specializovaného psa je přitom velmi zdoluhavá a nákladná činnost. K detekci se kromě psů využívá i dalších zvířat, např. myši nebo hmyzu. [14]

3.2 Detekce hlavní nálože

Metody zaměřené na detekci hlavní nálože spoléhají na specifické projevy detekované látky, při působení určitého typu záření. Tyto metody jsou většinou schopny danou látku zobrazit a usnadnit tak rozpoznání předmětu podle tvaru.

Zobrazování pomocí elektromagnetických vln

Techniky využívající elektromagnetických vln lze rozdělit do dvou skupin. Na ionizující (rentgenové a gama zobrazování) a neionizující (infračervené, mikrovlnné, terahertzové zobrazování). U všech metod dochází k určité interakci s detekovanou látkou.

Nejstarší a nejpoužívanější technikou je rentgenové zobrazování. Běžně se používá jak při kontrole zavazadel, tak při osobních kontrolách. Rentgenové záření patří mezi ionizující záření a má tedy negativní vliv na zdraví člověka. I přesto, že je při kontrole člověk vystaven jen velmi nízké úrovni záření a zdravotní dopady jsou zanedbatelné, panuje mezi lidmi jistá obava o zdraví během kontrol těmito skenery. Na obdobném principu fungují i

skenery využívající gama záření, které je ještě pronikavější než rentgenové záření, ovšem ze zdravotních důvodů jsou také nevhodné pro osobní kontroly.

Proto se v této oblasti objevují i bezpečnostní skenery na bázi infračerveného (IR) záření, které také poskytuje spektrální informace a zkoumané látky. Nicméně penetrační schopnosti IR záření jsou značně omezené.

Jiné skenery využívají mikrovlny a milimetrové vlny (MMW). Ty sice pronikají skrz materiály lépe, ale charakteristické interakce, které by umožnily přesnou identifikaci, se objevují jen u několika málo látek. Navíc kvůli delší vlnové délce je obrazové rozlišení na nízké úrovni.

Výhody předešlých metod pak spojuje terahertzové zobrazování, které má v porovnání s MMW desetkrát větší prostorové rozlišení, v porovnání s IR zářením pronikne přes více materiálů, a na rozdíl od rentgenového záření je neionizující a umožňuje rozlišit popř. identifikovat více látek. [15,16]

Neutronové záření

Při neutronové analýze je látka ozářena proudem neutronů. Při následné interakci s látkou pak dojde k emisi gama záření. Ze spektra gama záření pak lze přesně identifikovat jednotlivé chemické prvky. Tato metoda je velmi přesná, s minimem falešných poplachů. Díky vysoké penetrační schopnosti, lze detekovat i výbušniny, které jsou ukryty v masivních kovových kontejnerech. Umožňuje prostorové zobrazování a tedy přesnou lokalizaci podezřelé látky. Tuto techniku bohužel nelze použít pro osobní bezpečnostní prohlídky z důvodu škodlivosti záření. Další nevýhodou je také velmi vysoká cena a velké rozměry skenovacího přístroje. [13]

Nukleární rezonance

Zde lze zařadit dvě používané techniky. Nukleární magnetickou rezonanci (NMR) a nukleární kvadrupólovou rezonanci (NQR). K detekci výbušnin se v praxi více používá NQR, která je založena na detekci kvadrupólového momentu jader dusíku ^{14}N . Tato technika je poměrně přesná, ale její využití je omezeno pouze na detekci výbušnin, které obsahují dusík. NMR je obdobná technika, která využívá externího magnetického pole, a jeho interakce s magnetickými dipóly jader. Obě techniky jsou neionizující, ale lze je použít jen na krátké vzdálenosti, nehodí se tedy na vzdálenou detekci. [13]

3.3 Detekce kovů

Detektory kovů nachází uplatnění především v případech, kdy je IED ukryto v kovovém kontejneru. Nicméně i plastový kontejner může skrývat kovové šrapnely, které mohou být odhaleny detektorem kovů.

Detektory kovů pracují na principu interakce elektromagnetického pole s kovy, které mají specifické fyzikální vlastnosti. Podle fyzikálního principu lze pak rozlišovat

- detektory na bázi indukce vířivých proudů (neferomagnetické kovy),
- detektory na bázi změn orientací magnetických domén (feromagnetických kovy),
- detektory na bázi relativního pohybu magnetu vůči cívice (permanentní magnety).

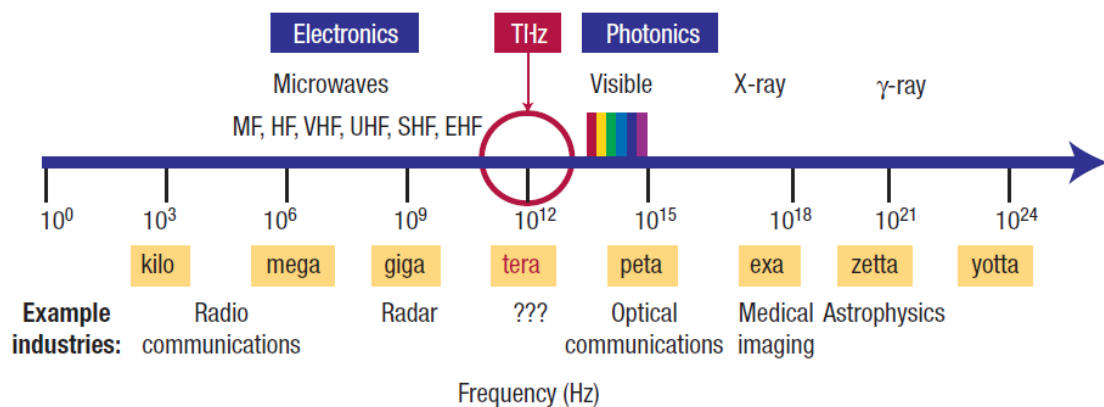
Detektory kovů mohou být konstruovány jako ruční přenosné přístroje nebo stacionární průchozí rámy. [17]

4 DETEKCE POMOCÍ TERAHERTZOVÝCH VLN

4.1 Terahertzové záření

Terahertzové záření je elektromagnetické záření, jehož frekvence je okolo 1 THz. Přesné rozmezí není oficiálně stanoveno. Nicméně většina publikací uvádí rozmezí 0,3 – 3 THz, což odpovídá vlnové délce 100 μm až 1 mm. [16]

Terahertzové záření leží ve spektrální oblasti mezi infračerveným a mikrovlnným zářením. Někdy se lze tedy setkat s pojmy jako submilimetrové vlny nebo vzdálené infračervené záření. Terahertzové záření je známé již desítky let. Nicméně kvůli technickým limitům bylo dlouho opomíjeno. Zlom nastal až na konci 20. století díky novým zdrojům a detektorům terahertzového záření. Od té doby je terahertzovému záření věnována zvýšená pozornost ze strany výzkumných pracovišť na celém světě. Objevují se stále nové metody a možnosti aplikace. V posledních letech bylo dosaženo mnohých pokroků a i nadále je věnováno značné úsilí dalšímu výzkumu. Vyvíjí se dokonalejší zdroje a detektory záření. Zkoumají se možnosti využití terahertzových vln v různých odvětvích. Velký potenciál je spatřován v oblasti bezpečnostních aplikací.



Obr. 8 Elektromagnetické spektrum [18]

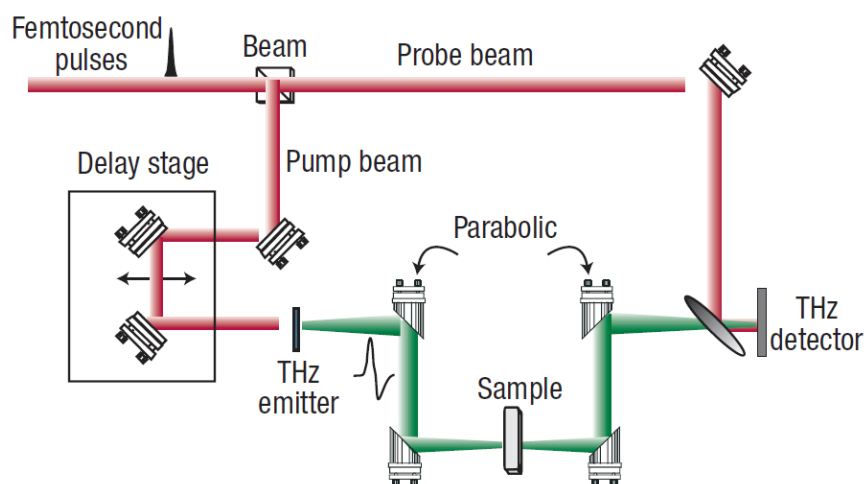
Aplikace terahertzových vln lze rozdělit do dvou základních kategorií.

- Terahertzová spektroskopie a
- terahertzové zobrazování.

4.2 Časově závislá spektroskopie

Existuje několik technik terahertzové spektroskopie, z nichž hlavní spektroskopickou technikou je časově závislá spektroskopie (TDS). [19]

Princip časově závislé spektroskopie spočívá v generování velmi krátkých laserových pulsů. Každý puls je po vygenerování rozdělen na dva paprsky. Ty jsou pak díky různé optické dráze navzájem časově posunuty. První paprsek je použit pro generování terahertzové vlny. Zatímco druhý je použit k časovému vzorkování této vlny.

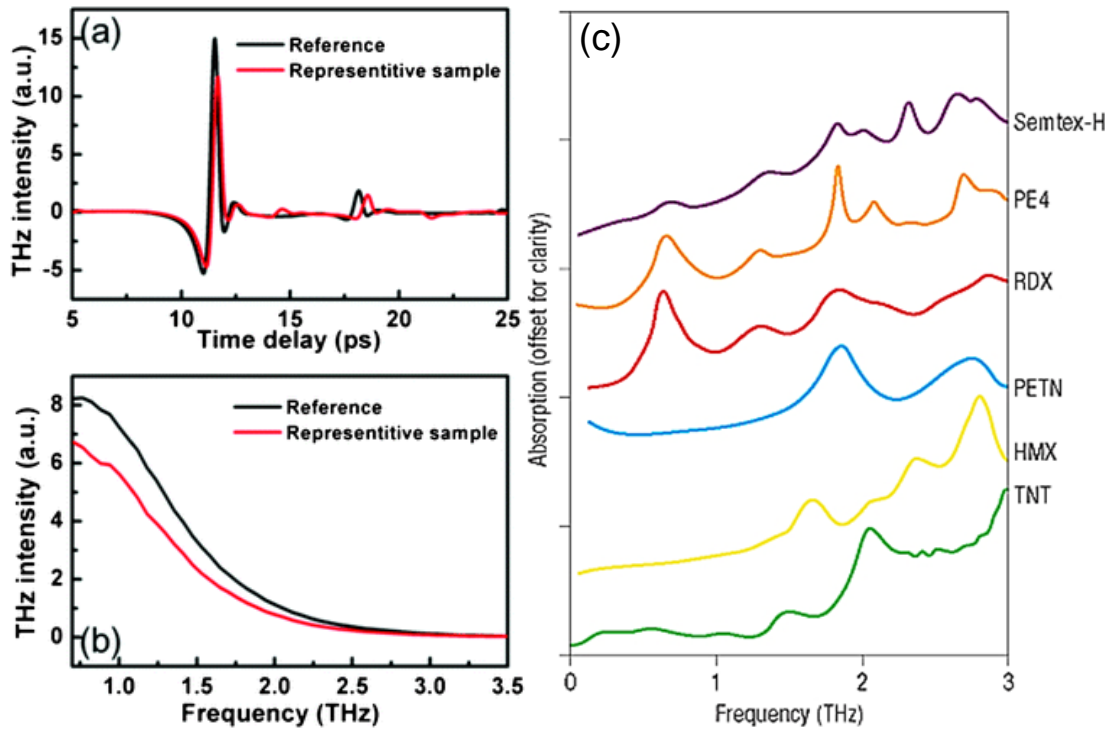


Obr. 9. Princip časově závislé spektroskopie [18]

Při průchodu terahertzového záření přes zkoumaný materiál dochází k vzájemné interakci, což se projeví změnou elektrického pole terahertzové vlny. Časovým posunem paprsků je pak zaznamenán celý průběh vlny. Pomocí Fourierovi transformace je pak časový průběh terahertzové vlny převeden na spektrální funkci.

$$\tilde{E}(\omega) = A(\omega)e^{-i\phi(\omega)} = \int dt E(t)e^{-i\omega t}. \quad (1)$$

Každý terahertzový puls má určitou šířku pásma. TDS typicky pracuje v rozmezí 0,1 až 3 THz. Lze ale dosáhnout i mnohem vyšších frekvencí. Různé terahertzové zdroje emitují různé spektrální šířky pásma. Z každého pulsu je získána spektrální informace přes celou šířku pásma. Protože je záznam průběhu vlny prováděn časovým posunem vzorkovacího paprsku, je celá metoda nazývána časově závislou spektroskopií. [19]



Obr. 10 (a) Záznam referenční a signálové vlny v čase. (b) Stejně vlny ve frekvenční oblasti. [20] (c) Absorpční spektra různých výbušnin. [21]

Před měřením vzorku je nejdříve zaznamenána referenční vlna. Tedy vlna, která prochází volným prostorem bez vzorku. Vlna, která prochází přes měřený vzorek, se nazývá signálová. Fourierovou transformací je pak získáno referenční spektrum $A_R(\omega)e^{-i\phi_R(\omega)}$ a signálové spektrum $A_S(\omega)e^{-i\phi_S(\omega)}$. Porovnáním těchto dvou spekter

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_R}{A_S} \quad (2)$$

$$n = 1 + \frac{[\phi_S(\omega) - \phi_R(\omega)]c}{d\omega} \quad (3)$$

lze pak při znalosti tloušťky vzorku d zjistit absorpční koeficient α . Z fázového posunu lze zjistit index lomu n . [19]

4.2.1 Transmittance

Transmittance je veličina, která vyjadřuje, jaké množství záření projde přes zkoumaný vzorek. Transmittanci lze definovat jako

$$T_{\lambda} = \frac{I_1}{I_0}, \quad (4)$$

kde T_{λ} je transmittance při vlnové délce λ , I_0 je intenzita záření při vlnové délce λ předtím než projde přes materiál, a I_1 je intenzita záření, které prošlo skrz materiál. [22]

4.2.2 Absorbance

Jelikož při průchodu terahertzového záření skrz vzorek může dojít kromě absorpce i k odrazu nebo rozptylu záření, je pro měření využívána spektrometrická veličina absorbance, která v logaritmickém měřítku vyjadřuje poměr vyzářeného a detekovaného záření při dané frekvenci. Absorbance je bezrozměrná veličina a lze ji definovat jako

$$A_{\lambda} = -\log_{10} \frac{I_1}{I_0}, \quad (5)$$

kde A_{λ} je absorbance při vlnové délce λ , I_0 je intenzita záření při vlnové délce λ předtím než projde přes materiál, a I_1 je intenzita záření, které prošlo skrz materiál. Absorbance také závisí na tloušťce vzorku a na koncentraci absorpční složky.

Mezi transmittancí a absorbancí tedy platí vztah

$$A_{\lambda} = -\log_{10} T_{\lambda}, \quad (6)$$

Různé materiály mají různou absorbanci. U některých materiálů dochází při určitých frekvencích k rezonanci molekul, které způsobí zvýšenou absorbanci. To se projevuje i u některých výbušnin. Vznikají tak typické „spektrální otisky“, které umožňují jejich identifikaci. [22]

Pro analýzu lze využít buď průchodu záření přes zkoumaný objekt – transmisní spektroskopie. Nebo odrazu záření od zkoumaného objektu – reflexní spektroskopie.

Terahertzovou spektroskopií lze rovněž aplikovat k zjištění stopových částic výbušnin v ovzduší. Nicméně provedená měření [23] ukazují, že tato detekční metoda není tak citlivá jako současně používané přístroje pro detekci par a stopových množství výbušnin.

4.2.3 Transmisní spektroskopie

Transmisní spektroskopie spočívá v průchodu záření přes zkoumaný vzorek. Při průchodu dochází k ovlivnění elektromagnetického pole vlny. V praxi se pak může jednat například o průchod záření přes zavazadlo nebo přes podezřelý balíček. U tohoto typu měření se pak používá veličin absorbance nebo transmitance.

4.2.4 Reflexní spektroskopie

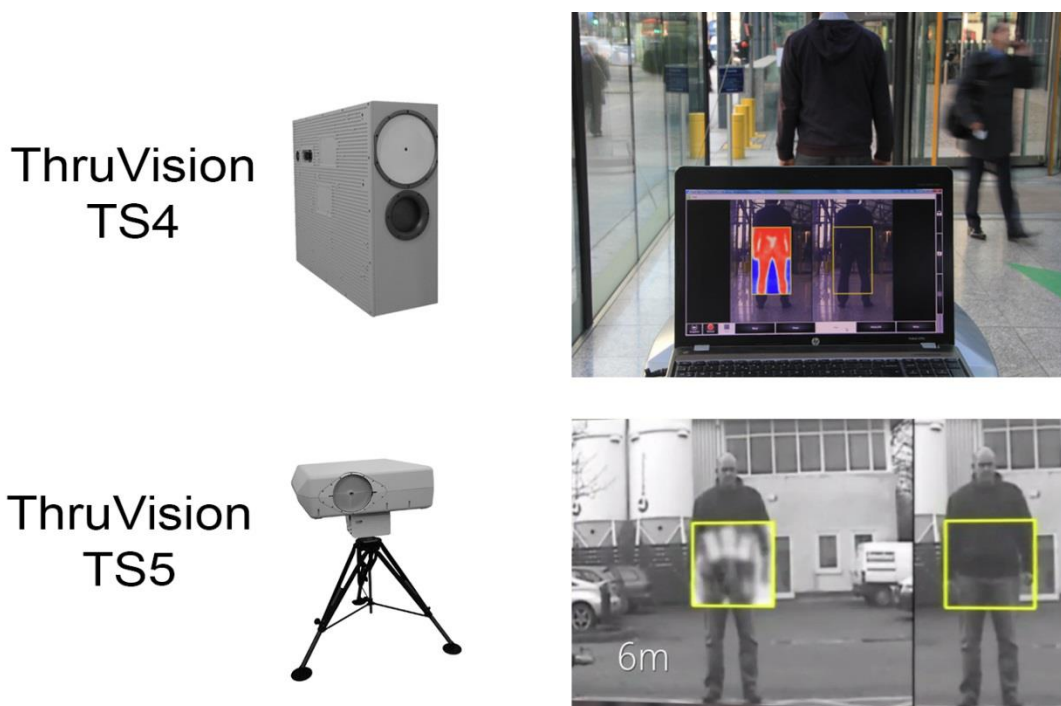
U některých vzorků, které vykazují vysokou absorpci terahertzového záření, může dojít při transmisní spektroskopii k takovému útlumu signálu, že se spektroskopická informace ztrácí. V těchto případech lze použít reflexní spektroskopie a veličiny reflektance, která znázorňuje množství odraženého záření při určité frekvenci.

4.3 Terahertzové zobrazování

V současné době se na trhu objevují první přístroje, které dokážou zobrazovat předměty v terahertzové oblasti spektra. Zobrazování může fungovat na principu různých metod včetně TDS. Zobrazování může probíhat i na principu vysílání a detekce vybraných frekvenčních pásem v terahertzové oblasti spektra.

4.3.1 Pasivní zobrazování

Princip pasivního zobrazování spočívá v detekci terahertzové části tepelného vyzařování. Na trhu již existují první terahertzové přístroje, které dokáží odhalovat skryté předměty pod oděvem. Například přístroj ThruVision TS5 od firmy Digital Barriers dokáže odhalit skryté výbušniny a zbraně na vzdálenost až 15 m. Firma nabízí několik pasivních terahertzových skenerů, které nachází uplatnění kromě komerční sféry i v armádě. [24]



Obr. 11 Přístroje ThruVision – pasivní zobrazování [24]

4.3.2 Aktivní zobrazování

Aktivní zobrazování spočívá v generování terahertzového záření, které pak prochází přes zkoumaný objekt nebo se od něj odráží. Na rozdíl od pasivního zobrazování, poskytuje kromě znatelně lepšího obrazového výstupu i informace v podobě „spektrálních otisků“ zkoumané látky. Tento přístup může být rovněž použit při osobních kontrolách na letištích

nebo také, jak prezentuje německá firma HÜBNER, v podobě terahertzových poštovních skenerů T-SENSE a T-COGNITION.

Přístroje dokážou analyzovat a zobrazit obsah poštovní zásilky a upozornit na nebezpečné látky. Využití není omezeno pouze na detekci výbušnin. Přístroje dokážou odhalovat i různé farmaceutika a drogy. [25]



Obr. 12 Poštovní skener T-SENSE – aktivní zobrazování [25]

4.4 Výhody a nevýhody

Terahertzové záření proniká stejně jako rentgenové záření skrz plasty, textil, papír, keramiku, dřevo, atd. Terahertzové záření je ale na rozdíl od rentgenových paprsků neionizující¹. Není tedy zdraví škodlivé. Navíc u mnohých výbušnin dochází ke specifické interakci se zářením, a lze tak kromě samotného zobrazování, aplikovat spektrální analýzu, a neznámou výbušninu přesně identifikovat. Samozřejmě lze i tuto metodu nasadit k detekci drog a zbraní.

Na druhou stranu terahertzové záření nepronikne skrz vodu ani kovy. To se negativně projevuje zkrácením signálu kvůli vzdušné vlhkosti. Možnou překážkou pro širší komerční využití může být i zatím vysoká cena technologie.

¹Ionizující záření – záření, které má potenciál změnit elektricky neutrální atom nebo molekulu na kladný nebo záporný ion.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 RECEPTURY PODOMÁCKU VYROBENÝCH VÝBUŠNIN

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, existuje mnoho různých výbušnin. Některé výbušniny lze vyrobit velmi snadno pouhým smícháním chemikálií ve správném poměru. Výroba jiných už vyžaduje určitou znalost chemie. V zásadě lze ale všechny uvedené výbušniny vyrobit v domácích podmínkách. Velice často se v recepturách objevuje kyselina dusičná a sírová, jejíž směs slouží k nitraci.

5.1 Chemikálie potřebné pro výrobu výbušnin

Cílem této práce rozhodně není někomu poskytnout přesný návod k výrobě výbušnin. Protože téměř u všech výbušnin je již samotná výroba v domácích podmínkách extrémně nebezpečná, jsou u každé výbušniny uvedeny pouze potřebné chemikálie, bez přesného postupu výroby. Nicméně přesné postupy se i tak dají poměrně snadno nalézt na internetu.

Tab. 4 Komponenty pro výrobu improvizovaných výbušnin

TRHAVINY	
ANFO	Dusičnan amonný + nafta nebo rostlinný olej
- NITREX	ANFO + Dichroman draselný
- ANLIT	ANFO + Hliníkový prach
- DYNAMON	ANFO + Dichroman draselný, Hliníkový prach
- AMONAL	ANFO + TNT
ANNM	Dusičnan amonný, nitromethan
EGDN	Kyselina dusičná, kyselina sírová, ethylenglykol
RDX	Pevný líh, kyselina dusičná, dusičnan amonný
TNT	Toluen, kyselina sírová, kyselina dusičná
PETN	Pentaerythritol (acetaldehyd, formaldehyd), kyselina dusičná, aceton, uhličitan sodný
Dusičnan močoviny	Močovina, kyselina dusičná
Nitromočovina	Dusičnan močoviny, kyselina sírová
Cheddit	Chlorečnan sodný, Chlorečnan draselný, petrolej, rostlinný olej, nafta, benzín
TŘASKAVINY	
HMTD	Peroxid vodíku, pevný líh, kyselina citronová.
Kyselina pikrová	Aspirin, kyselina sírová, dusičnan draselný, aceton
TATP	Peroxid vodíku, aceton, kyselina chlorovodíková
DDNP	Kyselina pikrová, hydroxid sodný, síra, kyselina sírová, dusitan sodný, Aceton
Fulminát rtuťnatý	Rtuť, kyselina dusičná
STŘELIVINY	
Černý střelný prach	Dusičnan draselný, síra, dřevěné uhlí
Střelná bavlna	Kyselina dusičná, kyselina sírová, bavlna

5.2 Dostupnost a cena

Téměř všechny látky lze objednat v chemicky čisté formě na internetu, ale vyskytují se také jako součást běžných domácích potřeb, které lze zakoupit v kamenném obchodě. Vzhledem k tomu, že tento rok bude po dlouhém schvalovacím procesu uvedeno v platnost NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 98/2013 o uvádění prekurzorů výbušnin na trh a o jejich používání [26], je velice pravděpodobné, že některé suroviny už nebude možné tak snadno získat jako je tomu nyní. Seznam látek, kterých se toto nařízení týká, je uveden v příloze této bakalářské práce.

Tab. 5 Látky používané pro výrobu IED

Název	Dostupnost	Cena
Aceton	snadná	60 Kč/l
Acetylen	omezená	546 Kč/kg
Amoniak	omezená	89 Kč/l
Aspirin	snadná	32 Kč/100 tablet
Benzín	snadná	35 Kč/l
Dřevěné uhlí	snadná	30 Kč/kg
Dusičnan amonný	snadná	68 Kč/kg
Dusičnan draselný	snadná	74 Kč/kg
Dusitan sodný	snadná	280 Kč/kg
Ethylenglykol 99%	omezená	106 Kč/kg
Formaldehyd	omezená	78 Kč/l
Hexamin	snadná	400 Kč/kg
Chlorečnan draselný	snadná	250 Kč/kg
Chlorečnan sodný	snadná	250 Kč/kg
Chloristan draselný	snadná	250 Kč/kg
Kyselina citronová	snadná	90 Kč/kg
Kyselina dusičná 65%	omezená	100 Kč/l
Kyselina chlorovodíková 30%	snadná	30Kč/l
Kyselina sírová 95%	omezená	100 Kč/l
Manganistan draselný (hypermangan)	snadná	230 Kč/kg
Močovina	snadná	20 Kč/kg
Nafta	snadná	36 Kč/l
Nitromethan 99,9%	omezená	750 Kč/l
Peroxid vodíku 30%	snadná	80 Kč/l
Petrolej	snadná	80 Kč/l
Rostlinný olej	snadná	40 Kč/l
Rtuť	omezená	500 Kč/kg
Síra	snadná	85 Kč/kg
Toluen	snadná	65 Kč/kg
Vata	snadná	200 Kč/kg
Železný prášek	snadná	70 Kč/kg

Ceny dle portálu heureka.cz

Uvedené ceny platí pro látky, které lze objednat na internetu. Nicméně osoba, která bude výbušninu vyrábět se zlými úmysly, se nejspíše bude pokoušet obstarat chemikálie pokud možno anonymně. V takovém případě se jistě pokusí sehnat některé produkty, které tyto chemikálie obsahují, přímo v kamenném obchodě:

Lékárna

- peroxid vodíku - dezinfekce
- manganistan draselný (hypermangan) - dezinfekce
- Aspirin
- bavlna

Drogerie

- chlorečnan draselný - bělidlo

Potraviny

- kuchyňská sůl
- kyselina citrónová
- draselná sůl

Hobby market

- aceton
- dřevěné uhlí
- hliníkový prášek
- tuhý líh
- pesticidy
- hnojiva (dusičnan amonný, močovina)
- palivo do RC modelů (nitromethan)

Autopotřeby

- autobaterie (kyselina sírová)
- Fridex (ethylenglykol)

Obr. 13 Dostupnost chemikálií v kamenných obchodech

6 SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA VÝBUŠNIN PRO VÝROBU IED

Na UTB jsou k dispozici dva přístroje pro terahertzovou analýzu. Jedná se o přístroje TeraView TPS Spectra 3000 a Menlo OSCAT. Všechna měření v této práci byla provedena na přístroji TeraView TPS Spectra 3000.

6.1 Přístroj TeraView TPS spectra 3000

Jedná se o spektrometr s femtosekundovým laserem, který pomocí polovodičového emitoru generuje terahertzové záření. Přístroj má v sobě integrovanou veškerou potřebnou elektroniku, chladičí zařízení, motorizovaný optický posuv a řídicí počítač. Přístroj generuje širokopásmé pulsy o frekvenci 0,05 až 3,3 THz. Při praktickém měření je ale často vlivem útlumu signálu relevantní jen úsek z tohoto intervalu. [27]



Obr. 14 Přístroj TPS spectra 3000 [27]

Jelikož intenzita generovaného signálu není příliš velká, je třeba pracovat s velmi tenkými vzorky. Pro reálné bezpečnostní skenování bude ale zcela jistě použit výkonnější zdroj, který poskytne řádově vyšší intenzitu signálu.

6.2 Výběr výbušnin

Pro spektroskopickou analýzu výbušnin byl vybrán jeden zástupce z kategorie trhavin a jeden z kategorie střelivin. Při výběru byla zohledněna snadná dostupnost a příprava výbušniny, a tedy velký potenciál ke zneužití. A především bezpečnost při manipulaci s výbušninou. Proto bylo upuštěno od třaskavin, které jsou velmi citlivé na vnější podněty. S ohledem na tyto skutečnosti byly vybrány improvizované výbušniny:

- Dusičnan amonný a palivo (ammonium nitrate + fuel oil - ANFO),
- střelná bavlna.

6.3 Nákup a příprava vzorků

Jak již bylo zmíněno, většina chemikálií pro výrobu výbušnin je volně dostupná v běžné obchodní síti, ale obvykle pod jinými názvy.

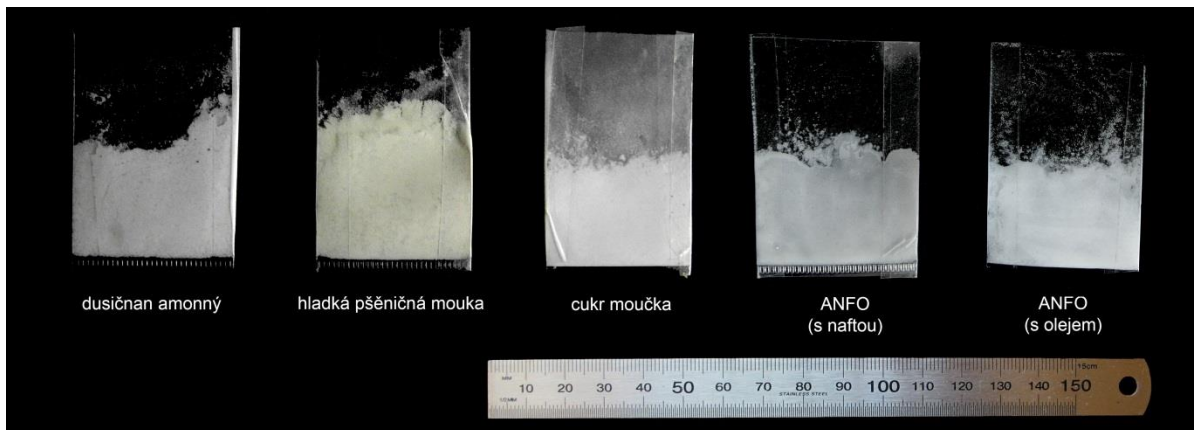
Dusičnan amonný (AN) je složkou dusíkatého hnojiva LAV – Ledek amonný + vápenec. V této formě bývá nejčastěji používán v IED [9]. Ovšem na internetu lze objednat i čistý dusičnan amonný. Za účelem získání co nejpřesnější spektroskopické informace byl jako vzorek použit právě čistý dusičnan amonný, který je vyráběn v podobě bílých granulí o velikosti 1 – 5 mm. V této podobě by bylo měření obtížné. Proto byl dusičnan rozdrcen na jemný prášek. Drcení a mletí dusičnanu amonného se běžně provádí i při výrobě skutečného IED [9], aby se docílilo co největší citlivosti výbušniny. Rozmělněný dusičnan amonný má podobu bílého prášku, snadno zaměnitelného za cukr nebo mouku. Proto byly pro porovnání změřeny i vzorky cukru a mouky.

Jako palivo (FO) lze použít naftu nebo rostlinný olej. Rozdrcený dusičnan amonný byl smíchán jak s naftou, tak s rostlinným olejem. Vznikly tak dvě různé směsi výbušniny ANFO.

Vzorky byly v rámci technických možností vyrobeny tak, aby měly přibližně stejnou tloušťku.

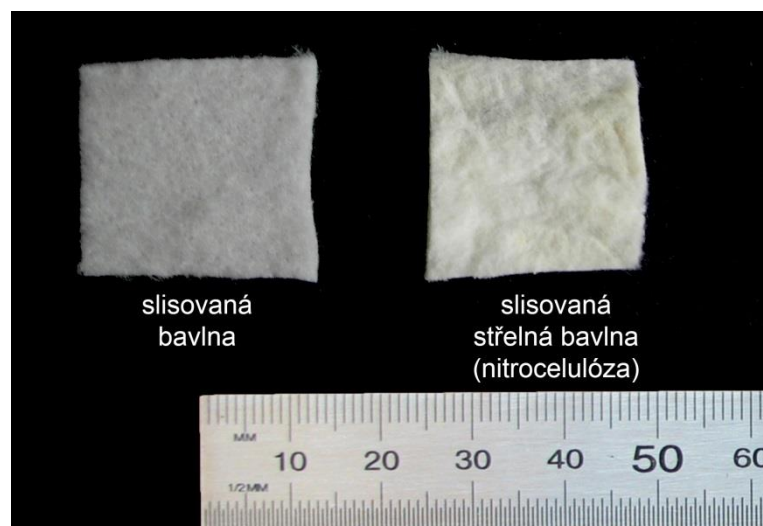
Tab. 6 Rozměry vzorků

Vzorek	Tloušťka
PVC fólie (1 vrstva)	$(0,131 \pm 0,002)$ mm
PE cela (1 vrstva)	$(1,879 \pm 0,006)$ mm
Dusičnan amonný (AN) + PVC fólie	$(0,779 \pm 0,029)$ mm
Hladká pšeničná mouka + PVC fólie	$(0,969 \pm 0,081)$ mm
Cukr moučka + PVC fólie	$(0,711 \pm 0,018)$ mm
AN s naftou (ANFO) + PVC fólie	$(0,716 \pm 0,073)$ mm
AN s olejem (ANFO) + PVC fólie	$(0,844 \pm 0,072)$ mm
Vrstva rostlinného oleje	$(1,969 \pm 0,012)$ mm
Vrstva nafty	$(1,969 \pm 0,012)$ mm
Obyčejná bavlna	$(0,617 \pm 0,030)$ mm
Střelná bavlna	$(0,764 \pm 0,067)$ mm

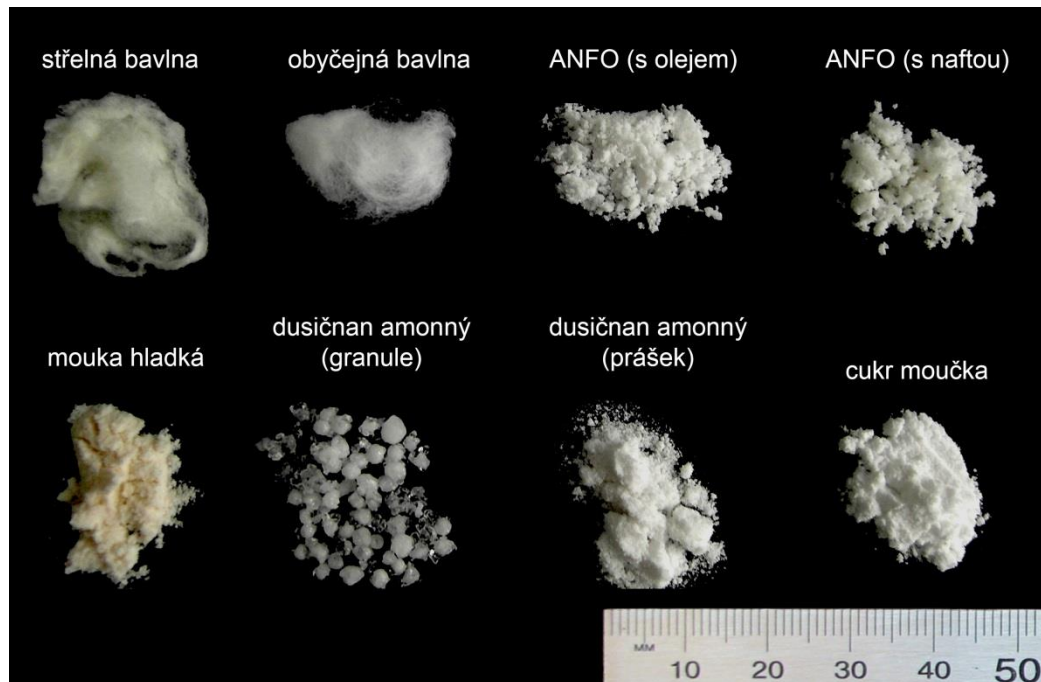


Obr. 15 Připravené vzorky pro analýzu výbušniny ANFO

Další zkoumanou látkou byla střelná bavlna. Střelnou bavlnu lze vyrobit z obyčejné vaty, která se na určitou dobu ponoří do nitrační směsi. Další možnost jak střelnou bavlnu získat, je nákup již hotového produktu v podobě „kouzelnické vaty“ v obchodě s kouzelnickými potřebami. Vzhledově je velmi podobná obyčejné vatě, je jen trochu drsnější a nažloutlá. Pro porovnání byly připraveny vzorky střelné i obyčejné vaty stejných rozměrů.



Obr. 16 Připravené vzorky pro analýzu střelné bavlny



Obr. 17 Běžný vzhled zkoumaných vzorků

6.4 Měření absorbance

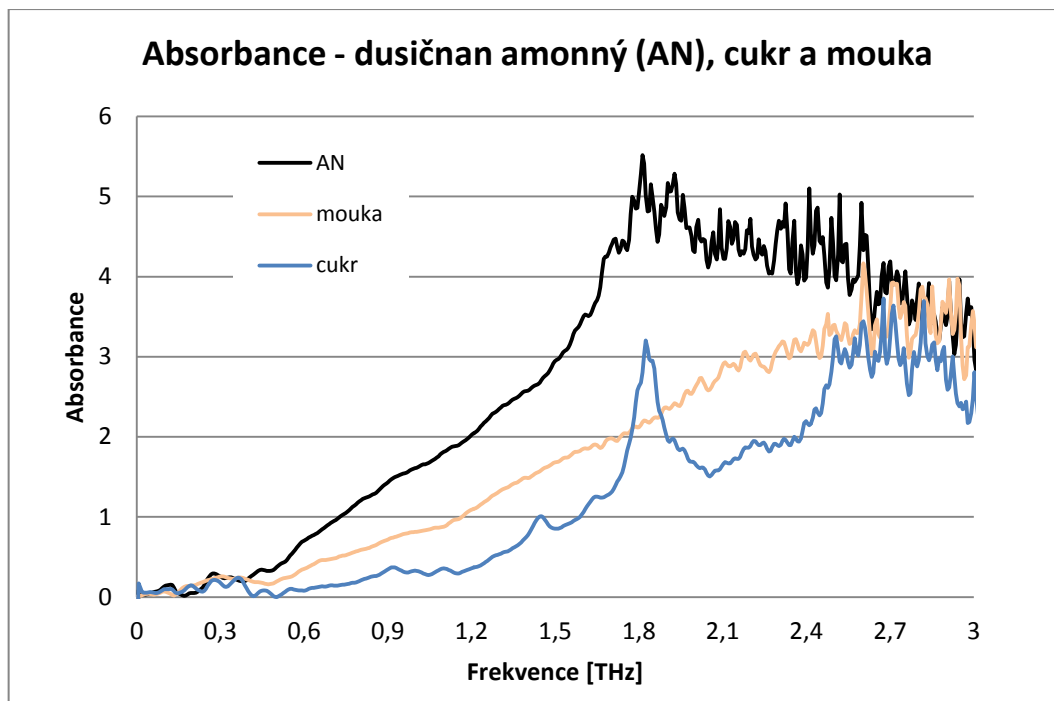
U každého vzorku byla provedena série 5 měření v různých bodech měřeného vzorku, z nichž bylo vypočteno průměrné spektrum. Na základě porovnání referenčního a signálového spektra byla vypočtena absorbance. Měřena byla frekvenční oblast do 3 THz. U některých látek jsou ovšem v důsledku velmi slabého signálu relevantní jen data při nižších frekvencích.

Měření probíhalo ve vakuu nebo dusíkové atmosféře, aby se zamezilo vlivu vzdušné vlhkosti. Konkrétní podmínky jsou vždy uvedeny u příslušného měření.

6.4.1 ANFO

Analýza dusičnanu amonného (AN)

Typ: Dusičnan amonný 99%; měřeno v dusíkové atmosféře



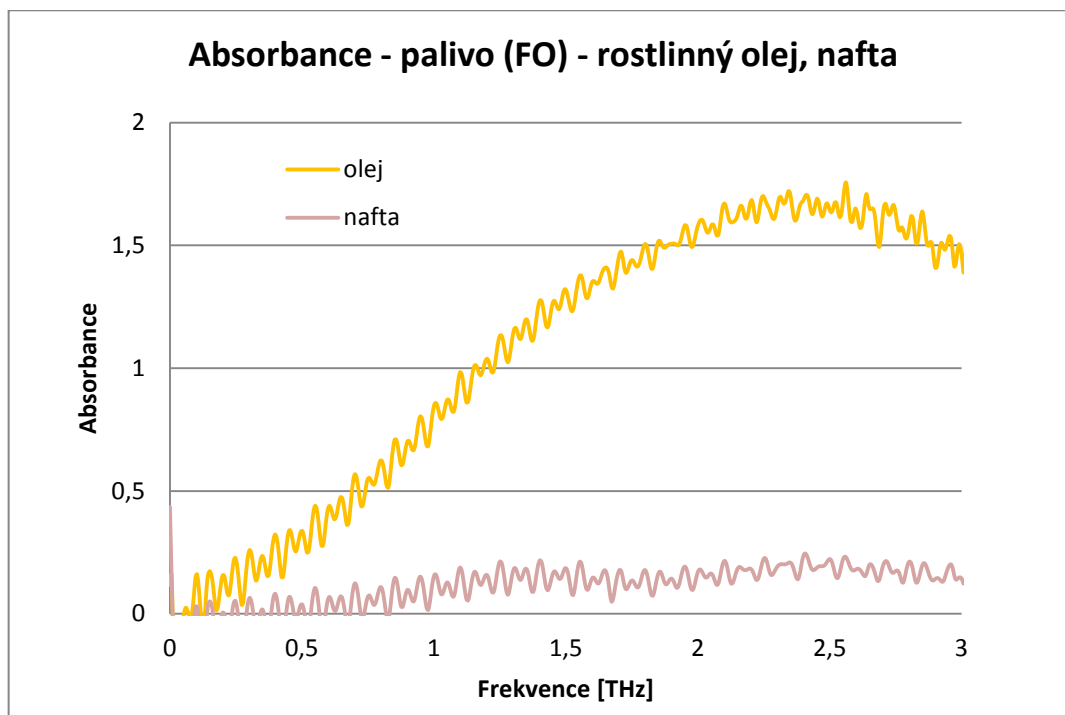
Obr. 18 Srovnání absorbance dusičnanu amonného, cukru a mouky

Z grafu Obr. 18 je patrné, že u všech látek se absorbance s rostoucí frekvencí zvyšuje. Ze zkoumaných látek absorbuje terahertzové záření nejvíce dusičnan amonný. Lze u něj pozorovat velmi strmý nárůst absorbance. Od frekvence 1,66 THz, respektive od absorbance 4, je u dusičnanu amonného signál již tak utlumen, že převažuje šum. Tyto data tedy nelze brát jako relevantní. Naproti tomu mouka ani cukr tak velkou absorbancí nemají, a lze tedy pracovat s daty z téměř celého frekvenčního rozsahu. Dusičnan stejně jako mouka nevykazuje žádné specifické rezonanční frekvence. U cukru si lze povšimnout nepatrného píku² při frekvenci 1,42 THz a velkého píku při frekvenci 1,82 THz.

² Pík - křivka zvonovitého tvaru, obvykle s ostrým vrcholem.

Analýza palivové složky (FO)

Typ: Nafta – Letní: třída B; Rostlinný olej – slunečnicový; měřeno v dusíkové atmosféře

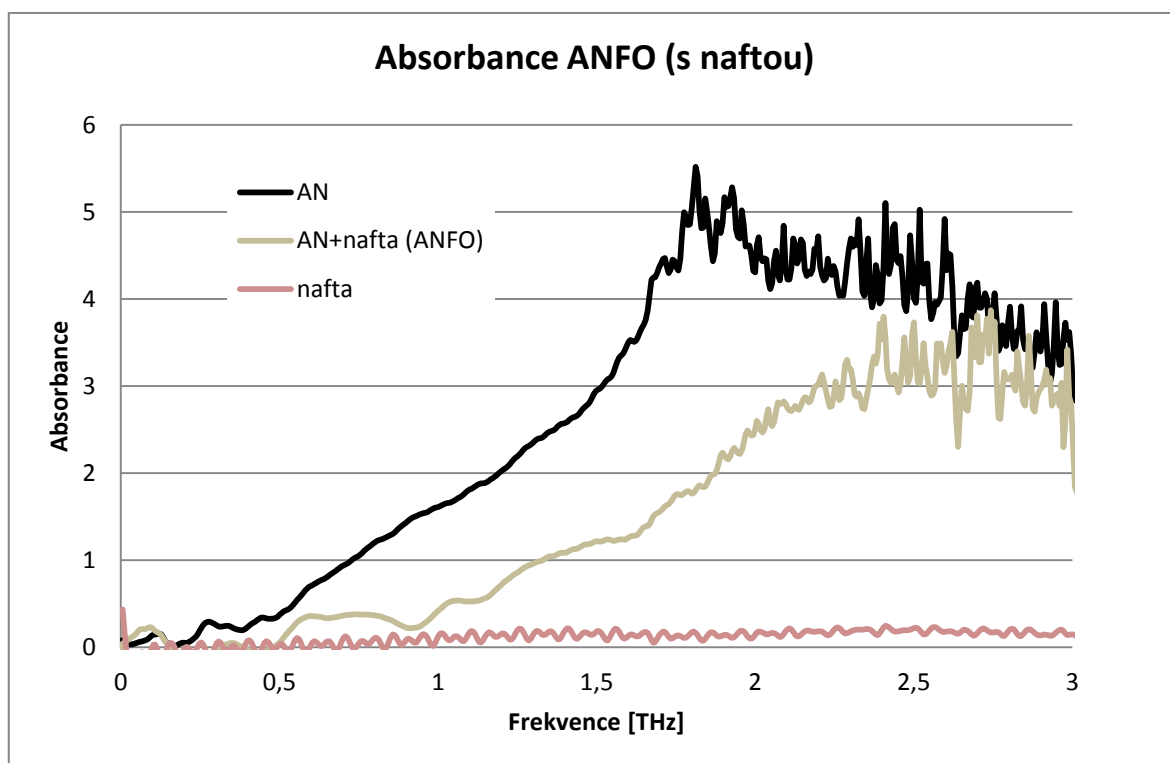
*Obr. 19 Srovnání absorbance nafty a oleje*

Před měřením samotné výbušniny ANFO (směs dusičnan amonný a palivo), byla změřena absorbance palivových složek. Nafta i rostlinný olej byly umístěny do PE cely, která je pro terahertzové záření téměř transparentní. Cella se skládá ze dvou vrstev PE (přední a zadní stěny), a z prostoru pro kapalinu. Přesné rozměry jsou uvedeny v tabulce *Tab. 6*.

Na obrázku *Obr. 19* je vidět, že olej má mnohem větší absorbanci než nafta. Vysoký výskyt nepatrných píků je způsoben charakterem PE cely, ve které byly kapaliny měřeny. Především mnohonásobnými odrazy na rozhraní měřené látky a cely. Jinak se ale neprojevují žádné výrazné rezonanční vlastnosti přes celé měřené spektrum. U oleje je opět patrný nárůst absorbance se zvyšující se frekvencí. U nafty je nárůst absorbance podstatně mírnější a od určité frekvence se dá hovořit spíše konstantním charakteru absorpční křivky.

Dusičnan amonný + nafta (ANFO vzorek č. 1)

Jako první byla měřena směs nafty a dusičnanu amonného. Podobná směs se používá v dolech k trhacím pracím. Připravená směs se dá charakterizovat jako nažloutlý prášek, s typickým zápachem nafty. Což usnadňuje její identifikaci pomocí detektorů par a stopových množství výbušnin. Měření probíhalo v dusíkové atmosféře.

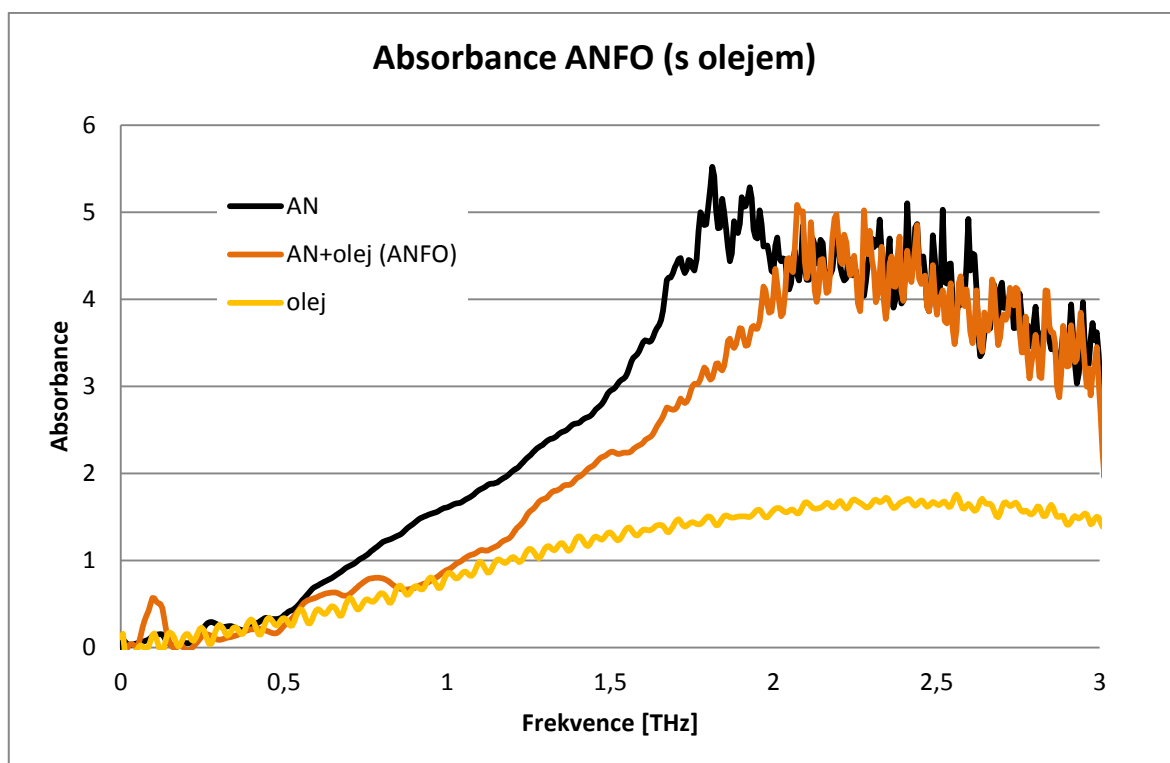


Obr. 20 Absorbance výbušniny ANFO na bázi nafty

Na grafu Obr. 20 je zřejmý vliv palivové složky. Směs je, vlivem velmi transparentní nafty, pro terahertzové záření více průchozí než samotný dusičnan amonný. Převážně lineární průběh spektrální křivky dusičnanu amonného se přidáním nepatrného množství nafty (5% hmotnosti směsi) změnil. Objevilo se určité zvlnění spektrální křivky v oblasti okolo 1 THz, které by mohlo být určující při identifikaci této směsi.

Dusičnan amonný + rostlinný olej (ANFO vzorek č. 2)

Tato varianta, kdy palivovou složku zastupuje rostlinný olej, nevyniká žádným výrazným zápachem, zjištění její přítomnosti tedy není tak snadné. Právě v této variantě se vyskytuje v mnoha návodech na internetových stránkách amatérských pyrotechniků. Vzhledově není příliš rozdílná od varianty s naftou. Měření probíhalo v dusíkové atmosféře.

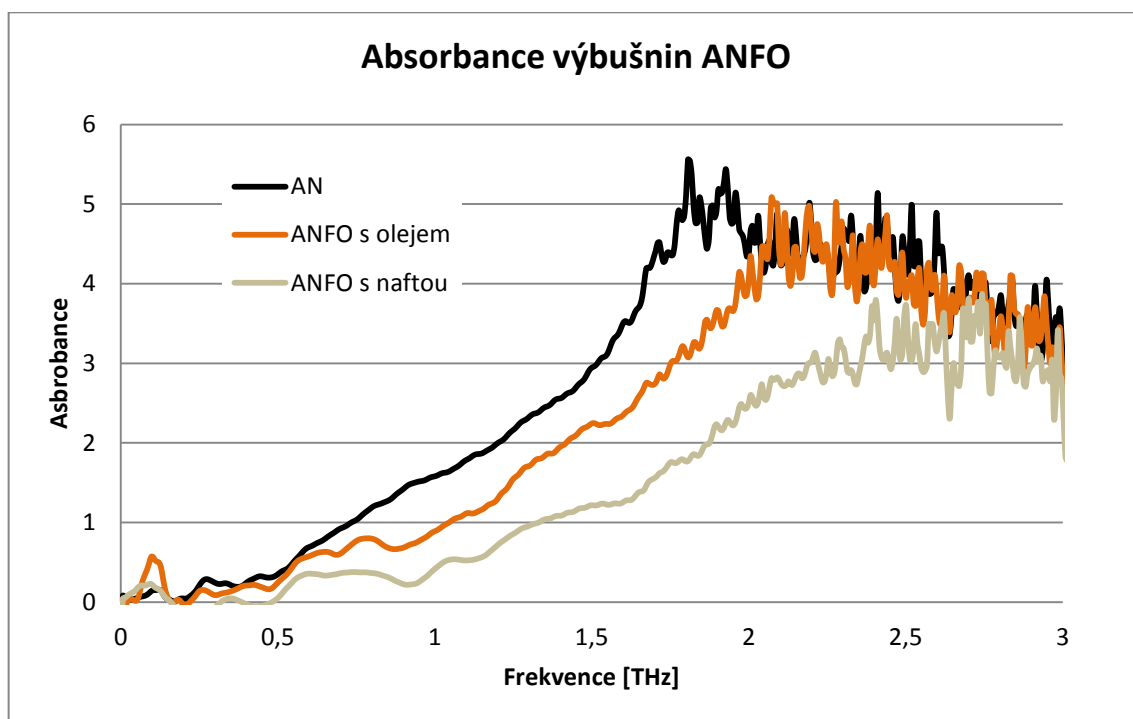


Obr. 21 Absorbance výbušniny ANFO na bázi rostlinného oleje

Na grafu *Obr. 21* lze pozorovat, že se vlivem rostlinného oleje, který má při vyšších frekvencích podstatně nižší absorbanci než dusičnan amonný, snížila i absorbance směsi těchto dvou látek. Rovněž lze, podobně jako v předchozím měření, pozorovat určité zvlnění absorpční křivky v oblasti 0,8 THz, které by mohlo umožnit identifikaci této směsi.

Srovnání obou výbušnin typu ANFO

Při porovnání obou směsí výbušnin a čistého dusičnanu amonného lze pozorovat, jak palivová složka ovlivňuje výslednou absorpční křivku. Neobjevily se sice výrazné rezonanční oblasti, které by se projevíly vznikem výrazných charakteristických píků. I tak lze ale pozorovat určité změny ve tvaru spektrální křivky, které by mohly být pro směsi charakteristické.

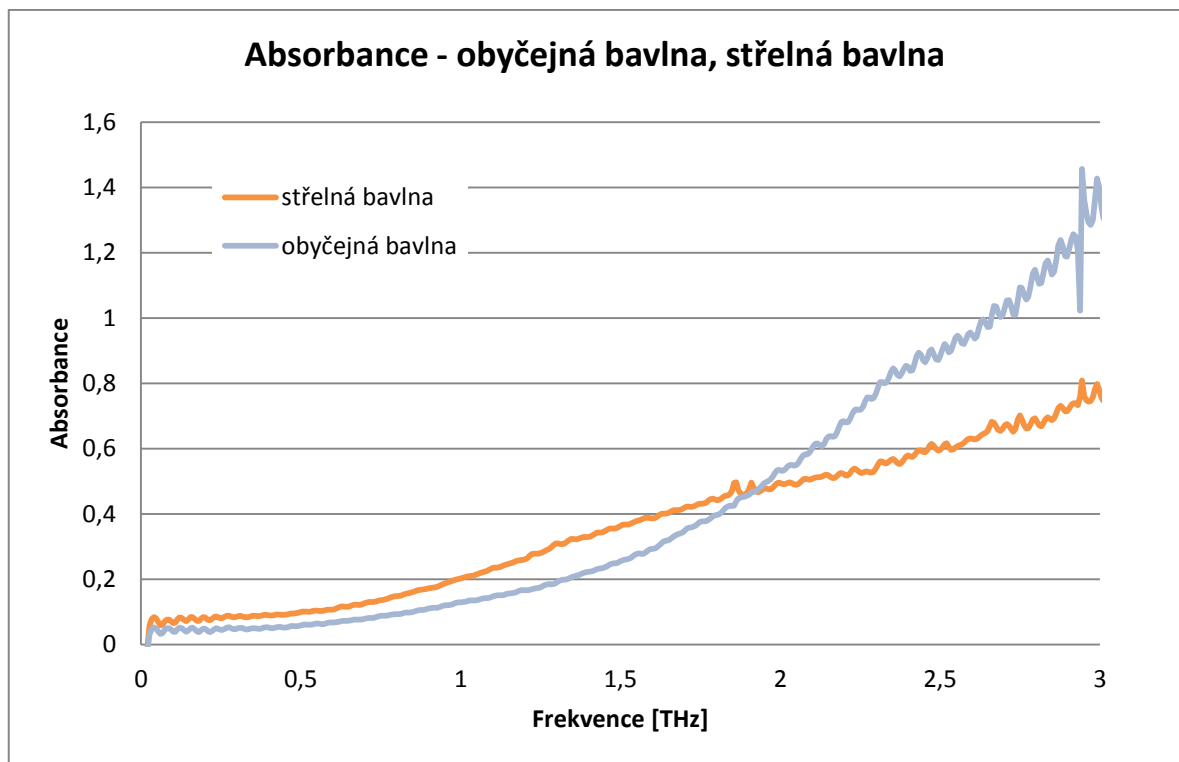


Obr. 22 Srovnání dusičnanu amonného s výbušninami typu ANFO na různé bázi

Uvážíme-li navíc, že ve výbušných směsích tvoří palivo pouze 5% hmotnosti, jsou změny poměrně výrazné. Tyto změny korespondují s absorpčními vlastnostmi palivových složek naměřených v předchozím měření. Je patrné, že směs s olejem, který měl v předchozím měření mnohem vyšší absorpční než nafta, má opět vyšší absorpční než směs s naftou.

6.4.2 Střelná bavlna

Měření probíhalo ve vakuu. Nicméně nejedná se o absolutní vakuum, takže lze pozorovat malé píky, které vznikly jako důsledek nepatrného zbytku vzdušné vlhkosti. Opět byla snaha vytvořit vzorky o stejné tloušťce. Vzorek obyčejné bavlny byl nakonec cca o 0,15 mm tenčí než vzorek střelné bavlny. Viz *Tab. 6*.



Obr. 23 Srovnání absorbance střelné bavlny a obyčejné bavlny

Na grafu *Obr. 23* lze pozorovat, že mají obě látky do frekvence 1 THz téměř totožný průběh absorbance. Od frekvence 1,5 THz je nárůst absorbance obyčejné bavlny strmější. Při frekvenci okolo 3 THz už je absorbance obyčejné bavlny mnohem větší než u střelné bavlny, přestože při nižších frekvencích tomu bylo naopak.

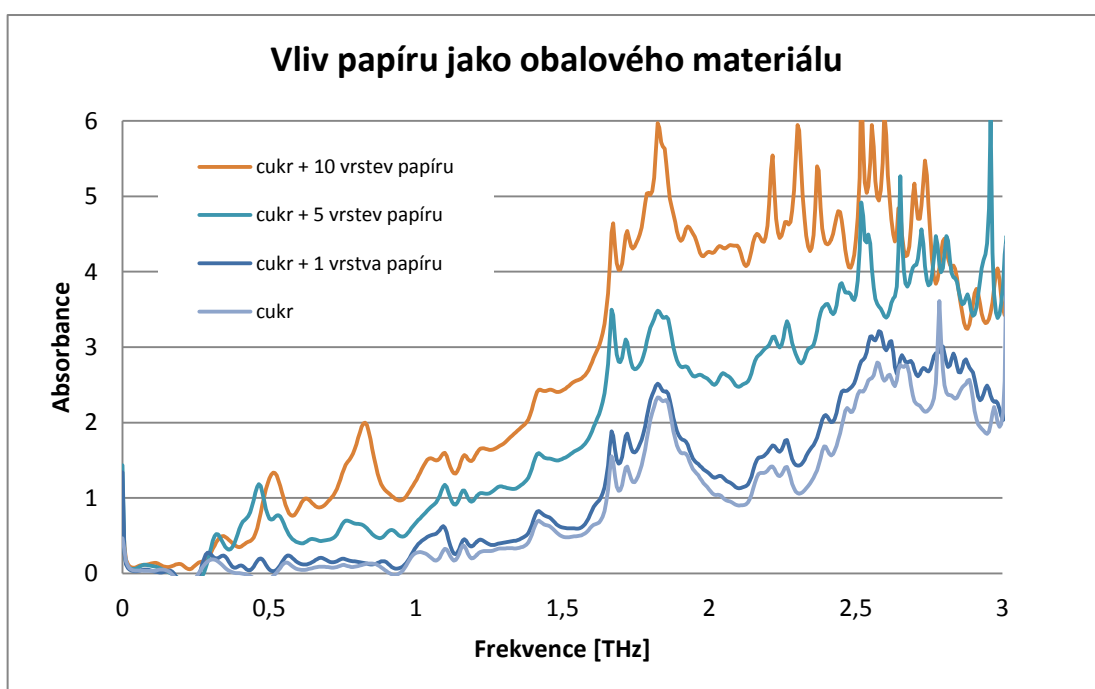
Velikost absorbance závisí i na tloušťce vzorku. Určující význam proto má hlavně tvar křivky. Obě látky sice nevykazují žádné výrazné rezonanční píky. Je ale patrné, že absorpční křivka obyčejné bavlny je mnohem strmější než u střelné bavlny, což by také šlo využít k identifikaci látky nebo alespoň odlišení obou látek.

6.5 Měření vlivu obalových materiálů

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, výbušniny bývají obvykle umístěny do obalu (kontejneru). Proto bylo provedeno měření vlivu obalových materiálů na absorpční spektrum látky. U spousty IED se vyskytuje kovový kontejner. Tím bohužel terahertzové záření nepronikne. Proto je toto měření zaměřeno na vliv papírového kontejneru, který se vyskytuje u balíkových a dopisních IED. A také na vliv textilu, který představuje oblečení útočníka.

6.5.1 Papír

Vzhledem k tomu, že u střelné bavlny ani u výbušniny ANFO se nevyskytují příliš výrazné rezonanční píky, byl vliv obalových materiálů demonstrován na vzorku cukru, u kterého se při frekvenci okolo 1,83 THz objevuje velký rezonanční pík. Toto měření bylo provedeno bez použití dusíkové atmosféry nebo vakua. Lze tedy pozorovat menší píky způsobené vzdušnou vlhkostí. Vzorek cukru byl postupně překrýván vrstvami kancelářského papíru o tloušťce 0,105 mm.

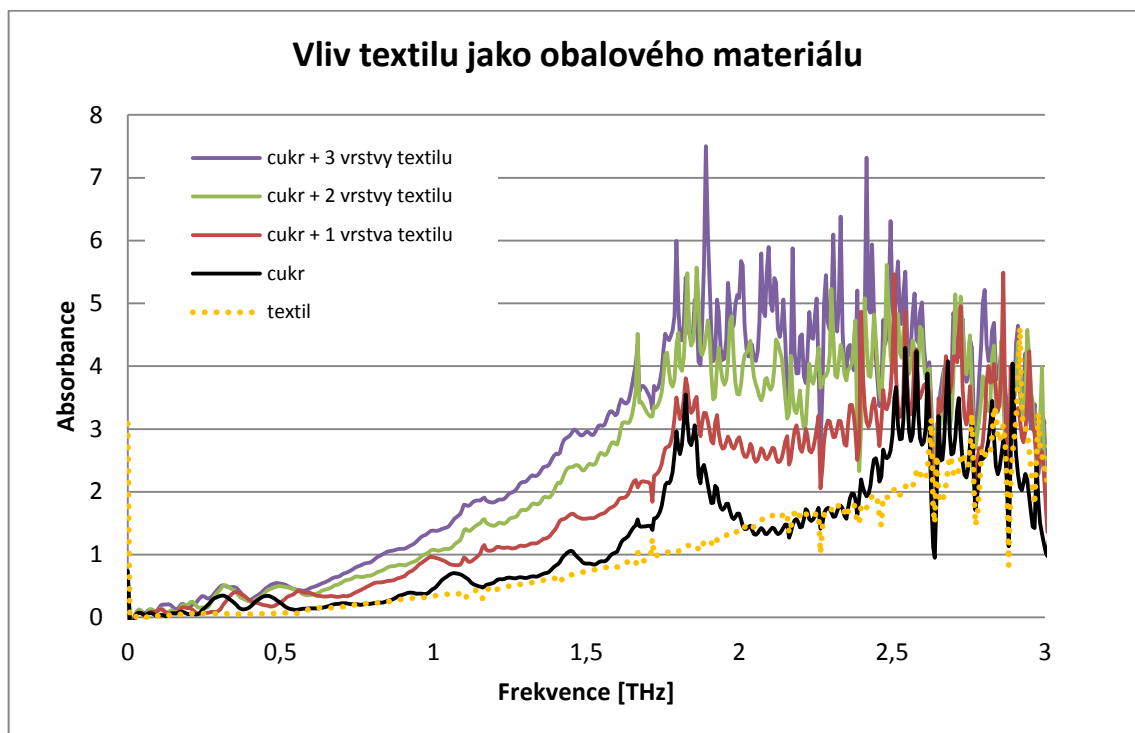


Obr. 24 Vliv papíru jako obalového materiálu

Je zjevné, že charakteristický pík se objevuje i při překrytí 10 vrstvami papíru. Objevují se i další výrazné píky např. v oblasti 1,41; 1,67; 1,72; 2,26 THz. Ty jsou ale způsobené vzdušnou vlhkostí. Papír tedy nepředstavuje pro detekci a identifikaci látky výrazný problém.

6.5.2 Textil

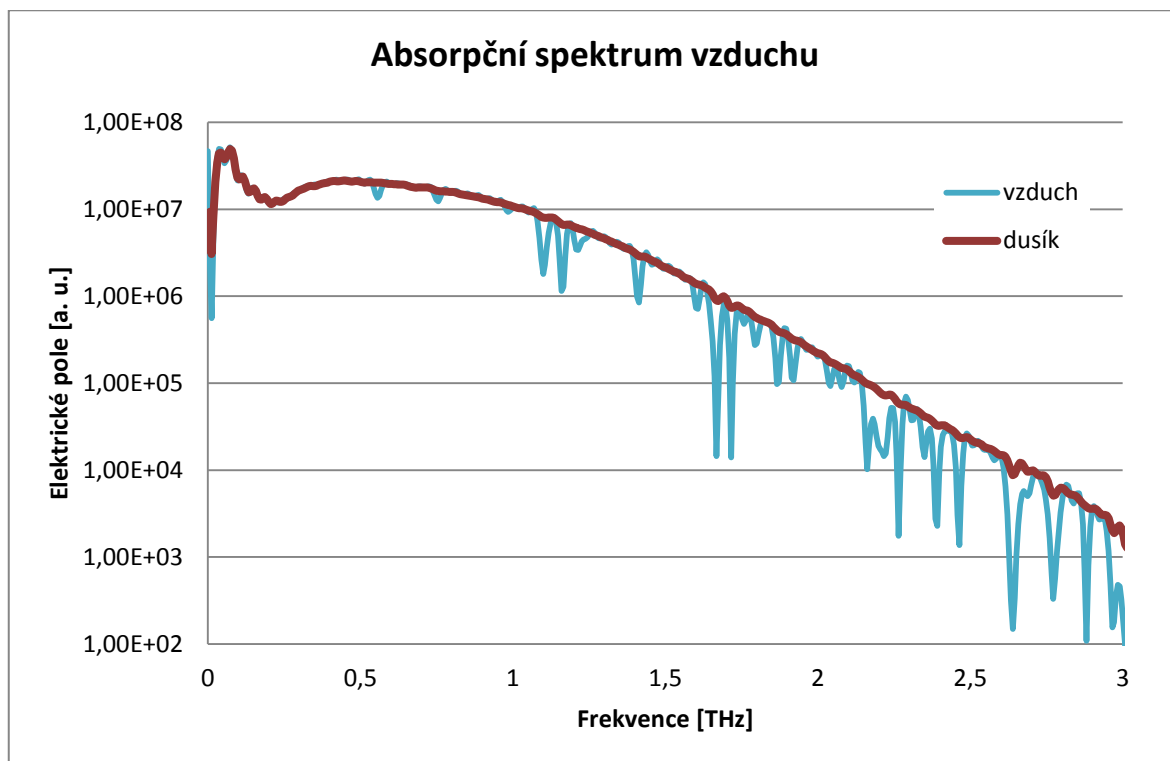
Pro otestování vlivu textilu na absorpční spektrum byl ze stejných důvodů jako v předchozím měření opět zvolen cukr, jako reprezentativní vzorek s výraznou absorbancí v oblasti 1,83 THz. Vrstvu textilu tvoří bavlněná tkanina o tloušťce 0,272 mm.



Obr. 25 Vliv textilu jako obalového materiálu

Výrazný pík v oblasti 1,83 THz lze pozorovat i po překrytí vzorku dvěma vrstvami textilu. Při překrytí třetí vrstvou už je absorbance příliš vysoká a pík už se začíná ztrácet v šumu, což by mohlo znesnadnit přesnou identifikaci skryté látky. Nicméně tento problém by v praxi nejspíš vyřešil silnější zdroj terahertzového záření.

6.6 Měření vlivu atmosférické vlhkosti



Obr. 26 Vliv atmosférické vlhkosti na terahertzové záření

Jak již bylo zmíněno, terahertzové záření je velmi silně pohlcováno vodou. Z grafu Obr. 26 lze vyčíst, že atmosférická vlhkost způsobuje zvýšenou absorpci terahertzového záření při frekvencích 0,556; 0,755; **1,100**; **1,160**; 1,214; 1,414; 1,607; **1,667**; **1,716**; 1,794; 1,867; 1,921; 2,042; 2,078; 2,163; **2,265**; 2,350; **2,392**; **2,465**; **2,640**; **2,773**; **2,882** a **2,996** THz.

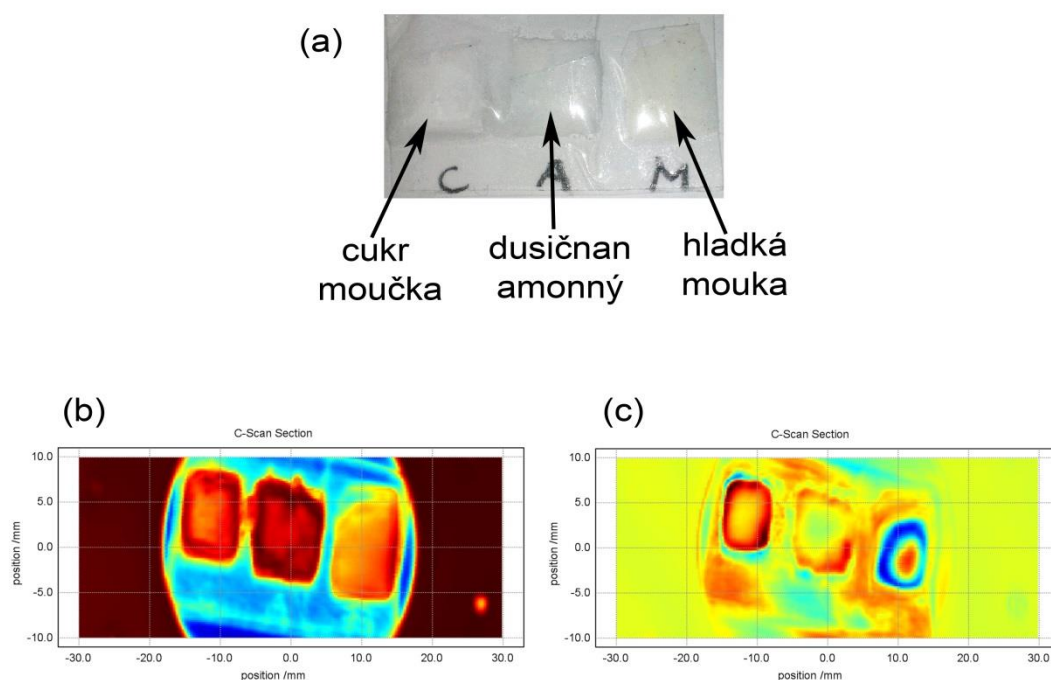
Měření odpovídá již dříve naměřeným hodnotám 0,557; 0,752; 1,097; 1,113; 1,163 a 1,207 THz [19] a doplňuje je o nová pásma ve vyšších frekvencích.

Při vývoji systému pro detekci výbušnin je nutno s těmito absorpčními pásy počítat a data v této oblasti buď vůbec neanalyzovat, nebo aplikovat patřičnou kompenzaci.

6.7 Terahertzový obraz výbušnin

Přístroj TPS spectra 3000 disponuje také modulem pro terahertzové zobrazování. Modul bohužel v nynějším stavu umožňuje pouze analýzu malých vzorků z bezprostřední blízkosti.

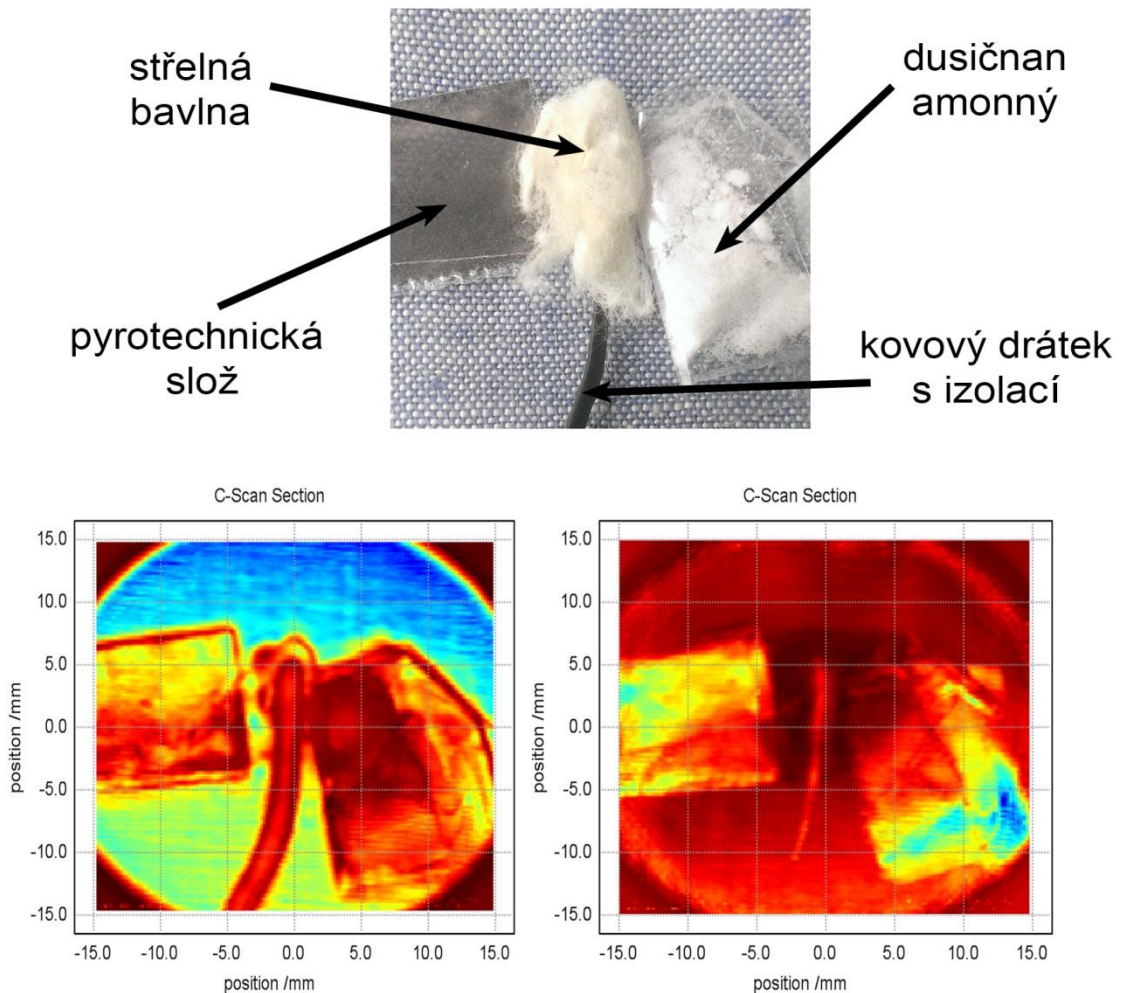
Vzorky nebyly připraveny příliš odborným způsobem. Proto je třeba brát výsledky s nadhledem. Pro přesnější výsledky by bylo třeba využít speciálních laboratorních přístrojů určených na přípravu vzorků.



Obr. 27 Terahertzové zobrazování cukru, dusičnanu amonného a mouky

Vzorky cukru, dusičnanu amonného a mouky byly skenovány přes vrstvu kancelářského papíru. *Obr. 27(a)* znázorňuje reálný vzhled vzorků. *Obr. 27(b)* vypovídá o rozdílné absorpci látek. Lze pozorovat, že dusičnan amonný má největší absorpci, což odpovídá i předchozím spektroskopickým měřením. *Obr. 27(c)* poukazuje na rozdílnou interakci s terahertzovým zářením u jednotlivých látek.

Spektrometr prozatím nedokáže zobrazit IED v reálných rozměrech. Proto bylo na ukázkou naskenováno rozložení několika komponent IED v miniaturním provedení. Skenování probíhalo přes textilní tkaninu.



Obr. 28 Terahertzové zobrazování modelu IED

Na obrázku lze velmi dobře pozorovat kovový drátek, přes který terahertzové záření nepronikne. Naproti tomu střelná bavlna, která je pro terahertzové záření velmi transparentní, splývá s tkaninou a na obrázku ji tedy nelze skoro vidět. Z obrázků je také patrné, v kterých místech je největší koncentrace pyrotechnické složky a dusičnanu amonného.

ZÁVĚR

Pomocí terahertzové spektroskopie lze dobře detekovat určité druhy výbušnin, které se používají k výrobě improvizovaných výbušných zařízení. Ovšem konstrukce takových zařízení je velmi rozmanitá, a výbušnin, které se dají v domácích podmínkách vyrobit, existuje celá škála. V této práci byla provedena analýza pouze dvou improvizovaných výbušnin. Pro skutečně spolehlivou detekci v pásmu terahertzových vln by bylo nutné vytvořit kompletní databázi všech výbušnin.

V pásmu do 3 THz, lze dobře detekovat např. TNT, PETN, RDX a jejich směsi. Nicméně existují výbušniny, které nemají v oblasti do 3 THz tak výrazné rezonanční vlastnosti, a jejich identifikace nebude tak snadná. Je ovšem možné, že se tyto vlastnosti projeví při vyšších frekvencích.

Výbušnina ANFO je jednou z těch hůře identifikovatelných výbušnin. Dusičnan amonný nevykazuje za pokojových teplot žádné rezonanční interakce s terahertzovým zářením. Některé studie [15] uvádí jako možný způsob detekce analýzu palivové složky (nafta, olej), která ovšem obvykle tvoří jen 5% hmotnosti výbušniny. Obě nejčastěji používaná paliva sice také nevykazují příliš výrazné rezonanční vlastnosti. Nicméně z provedených měření je vliv na absorpční křivku patrný. Další vědecké studie [29] uvádí, že dusičnan amonný vykazuje rezonanční interakce při vyšších frekvencích okolo 4 THz a 7 THz, což by mohlo identifikaci této výbušniny usnadnit. Tato fakta ale nebylo možné s dostupnou přístrojovou technikou ověřit.

Střelná bavlna rovněž nevykazuje ve zkoumané frekvenční oblasti žádné výrazné rezonanční chování. Nicméně průběh spektrální křivky střelné bavlny je mírně odlišný od průběhu spektrální křivky běžné bavlny. V laboratorních podmínkách tedy lze tyto látky odlišit. V reálných podmínkách je zde ale možné riziko splynutí střelné bavlny s obyčejným textilem.

Určitou komplikací může být při detekci IED kontejner, ve kterém je nástražné zařízení obvykle umístěno. Je zřejmé, že přes kovový kontejner, který je u IED poměrně běžný, nelze pomocí terahertzového záření výbušninu identifikovat. Při použití této metody pro tělesné prohlídky to ale nepředstavuje tak velký problém, protože zde se obvykle používá i detektor kovů. Avšak i v případě propustných materiálů jako je plast nebo textil dochází k mírné degradaci spektra, což by mohlo identifikaci znesnadnit.

Nabízí se také možnost bezpečnostního skenování poštovních balíků a dopisů, jejichž obal tvoří papír. Fakt, že kovy nepropouští terahertzové záření může být využit k detekci neobvyklých tvarů v IED jako jsou např. šrouby nebo hřeby.

Co se týká dostupnosti materiálů k výrobě improvizovaných výbušnin, objevují se v poslední době nová opatření [26], která podstatně komplikují nákup potřebných chemikálií. Stále je tady ale možnost vyrábět IED z pyrotechniky.

V optické laboratoři na VTP-ICT jsou momentálně dva spektrometry pro terahertzovou analýzu. Další poznatky v této oblasti by mohl přinést speciální přídavný modul [28] pro spektrometr TeraView TPS 3000, který je určen pro vzdálenou detekci výbušnin.

Detekce výbušnin pomocí terahertzových vln určitě nenahradí stávající systémy, ale může se stát významnou doplňkovou metodou, a zvýšit tak spolehlivost a přesnost kontrol. Tato metoda je vhodná hlavně tam, kde je třeba neinvazivního, nedestruktivního a zdravotně nezávadného zobrazování. Například jako první fáze při osobních prohlídkách na letišti.

Nicméně jedná se zatím o poměrně drahou technologii. Pro širší komerční využití bude navíc nutné vyřešit některé problémy, které prozatím znesnadňují přesnou identifikaci v reálném prostředí. Například absorpce záření ve vzduchu při vzdálené detekci nebo vliv obalových materiálů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] THURMAN, James T. *Practical bomb scene investigation*. Boca Raton: Taylor, 2006, 465 s. ISBN 08-493-4198-1.
- [2] DEFOREST, M. *Principles of improvised explosive devices*. Boulder, Colo., USA: Paladin Press, c1984, 465 s. ISBN 08-736-4288-0.
- [3] FREUDENRICH, Craig. How IEDs Work. *Howstuffworks* [online]. 2011 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/ied1.htm>
- [4] BUZA, Jozef a František JANEČKA. *Improvizovaná výbušná zařízení – stálá hrozba* [online]. 1. vyd. [Vyškov: Odbor doktrín VeV VA], 2011 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://doctrine.vavyskov.cz/_casopis/2011_1/2011_1_2a.html
- [5] NATIONAL ACADEMIES AND THE DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY. *IED Attack: improvised explosive devices*. Dostupné z: http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/prep_ied_fact_sheet.pdf
- [6] ATF: *Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives* [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.atf.gov/>
- [7] UNIVERSITY OF MARYLAND. *GTD Global Terrorism Database* [online]. 2013 [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.start.umd.edu/gtd/>
- [8] Anders Behring Breivik: the indictment. In: *Theguardian* [online]. 2012 [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: <http://www.theguardian.com/world/2012/apr/16/anders-behring-breivik-indictment>
- [9] BERWICK, Andrew. *2083 - A European Declaration of independence*. 2011. Dostupné z: <http://publicintelligence.net/anders-behring-breiviks-complete-manifesto-2083-a-european-declaration-of-independence/>
- [10] TREIBLE, Judy a Robert DORRELL. *MCT*. 2013. Dostupné z: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2310768/Boston-bombings-2013-photos-shrapnel-blasted-deadly-pressure-cooker-bomb.html>
- [11] Žádáme veřejnost o spolupráci v případě výbuchu v Osově. In: *Policie ČR* [online]. [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: <http://www.policie.cz/clanek/osov-vybuch.aspx>
- [12] BROOK, Tom. Afghan bomb makers shifting to new explosives for IEDs. *USA TODAY* [online]. 2013 [cit. 2014-04-30]. Dostupné

- z: <http://www.usatoday.com/story/news/world/2013/06/25/ammonium-nitrate-potassium-chlorate-ieds-afghanistan/2442191/>
- [13] DAVID, J. a A. M. LEWIS. Explosive Detection Equipment and Technology for Border Security [online]. 2008 [cit. 2014-05-21]. ISSN 1018-5593; EUR 23023 EN - 2008. Dostupné z: <http://bookshop.europa.eu/en/explosive-detection-equipment-and-technology-for-border-security-pbLBNA23023/>
- [14] CAYGILL, J. Sarah, Frank DAVIS a Seamus P.J. HIGSON. Current trends in explosive detection techniques [online]. [cit. 2014-05-21]. DOI: 10.1016/j.talanta.2011.11.043.
- [15] FEDERICI, John F, Brian SCHULKIN, Feng HUANG, Dale GARY, Robert BARAT, Filipe OLIVEIRA a ZIMDARS. *THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs*.
- [16] DOBROIU, Adrian, Chiko OTANI a Kodo KAWASE. *Terahertz-wave sources and imaging applications* [online]. 2006 [cit. 2014-05-03]. DOI: 10.1088/0957-0233/17/11/R01.
- [17] MATĚJKA, Radek. *Perspektivní metody bezpečnostních prohlídek osob a zavazadel*. Zlín: UTB, 2008. 77 s. Bakalářská práce. UTB .
- [18] FERGUSON, Bradley a Xi-Cheng ZHANG. *Materials for terahertz science and technology* [online]. [cit. 2014-02-04]. DOI: 10.1038/nmat708.
- [19] ZHANG, Cheng a XU. *Introduction to THz wave photonics*. New York: Springer, 2009. ISBN 978-144-1909-787.
- [20] HONGWEI, Liu, Sun CHENG, Lu JUNPENG, Zheng MINRUI, Lim Kim YONG, Nripan MATHEWS, Subodh G. MHAISALKAR, Tang Sing HAI, Zhang XINHAI a Sow Chorng HAUR. *Improved electrical property of Sb-doped SnO2 nanonets as measured by contact and non-contact approaches*[online]. [cit. 2014-04-22].
- [21] KEMP, Michael C. *Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy—A Bridge Too Far?* [online]. 2011 [cit. 2014-05-03]. DOI: 10.1109/TTHZ.2011.2159647.
- [22] Beer-Lambert Law. THE UNIVERSITY OF ADELAIDE. *Department of Chemistry* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z:<http://www.chemistry.adelaide.edu.au/external/soc-rel/content/beerslaw.htm>

- [23] KONG, Seong a Dong WU. TeraHertz Time-Domain Spectroscopy for Explosive Trace Detection [online]. 2006 [cit. 2014-05-21]. DOI: 10.1109/CIHSPS.2006.313311. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4106222>
- [24] ThruVision. *Digital Barriers* [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.digitalbarriers.com/products/thruvision/thruvision/>
- [25] Public Security. *HÜBNER* [online]. 2014 [cit. 2014-05-26]. Dostupné z: http://www.hubner-germany.com/public_security_de.html
- [26] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 98/2013: o uvádění prekurzorů výbušnin na trh a o jejich používání. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2013. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:039:0001:0011:CS:PDFQwOI08Eu>
- [27] TPS Spectra 3000 – THz Pulsed Imaging and Spectroscopy. *TeraView* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.teraview.com/products/terahertz-pulsed-spectra-3000/index.html>
- [28] Terahertz Stand-off Explosives Detection System. *TeraView* [online]. 2013 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.teraview.com/products/terahertz-pulsed-spectra-3000/terahertz-standoff-detection.html>
- [29] COOK, David J., Brian K. DECKER, Gami MAISLIN, Mark G. ALLEN a R. Jennifer HWU. *Through container THz sensing: applications for explosives screening* [online]. 2004-4-8 [cit. 2014-05-03]. DOI: 10.1117/12.525466.
- [30] ETAYO, D., I. MAESTROJUAN, J. TENIENTE, I. EDERRA a R. GONZALO. Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* [online]. 2013, vol. 34, 7-8, s. 468-479 [cit. 2014-05-30]. DOI: 10.1007/s10762-013-9988-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10762-013-9988-0>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

A	Amplituda
A_λ	Absorbance
c	Rychlost světla ve vakuu
d	Tloušťka vzorku
I	Intenzita záření
n	Index lomu
T_λ	Transmitance
α	Absorpční koeficient
ϕ	Fáze vlny
ω	Úhlová frekvence

Zkratky

AN	Ammonium nitrate (dusičnan amonný)
ANFO	Ammonium nitrate/fuel oil (dusičnan amonný/palivo)
ANNM	Ammonium nitrate/nitromethane (dusičnan amonný/nitromethan)
AO	Azid olovnatý
ATF (BATF)	Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives (Úřad pro alkohol, tabák, zbraně a výbušniny)
C4	Composition 4 (výbušnina na bázi RDX)
DDNP	Diazodinitrofenol
EGDN	Ethylenglykoldinitrát
FO	Fuel oil (palivo)
GC	Gas chromatography (Plynová chromatografie)

GNGT	1-guanyl-4-nitrosaminoguanilyltetrazen
HMTD	Hexamethyltriperoxidamin
IED	Improvised explosive device (improvizované výbušné zařízení)
IMS	Ion-mobility spectrometry (Iontová mobilní spektrometrie)
IR	Infrared (Infračervené (záření))
IRA	Irská republikánská armáda
LAV	Ledek amonný a vápenec
MMW	Millimetre wave (milimetrové vlny)
MS	Mass spectrometry (Hmotnostní spektrometrie)
NC	Nitrocelulóza
NMR	Nukleární magnetická rezonance
NQR	Nukleární kvadrupólová rezonance
NVS	Nástražný výbušný systém
PE	Polyethylen
PETN	Pentaerythrittetranitrát (Pentrit)
PVC	Polyvinylchlorid
RDX	Hexogen
TATP	Triaceton triperoxid
TDS	Time domain spectroscopy (časově závislá spektroskopie)
TNT	Trinitrotoluen
UTB	Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Základní schéma spínacího obvodu IED [2].....	12
<i>Obr. 2</i> Spínač na principu bobtnání luštěnin [2].....	12
<i>Obr. 3</i> Dvoufázová sekvence výbuchu [1]	13
<i>Obr. 4</i> Třífázová sekvence výbuchu [1]	14
<i>Obr. 5</i> „trubková bomba“ obalená hřebíky [1]	14
<i>Obr. 6</i> Vývoj počtu útoků s využitím IED [7]	16
<i>Obr. 7.</i> Bomba z tlakového hrnce. Převzato a upraveno z [10]	17
<i>Obr. 8</i> Elektromagnetické spektrum [18]	28
<i>Obr. 9.</i> Princip časově závislé spektroskopie [18]	29
<i>Obr. 10</i> (a) Záznam referenční a signálové vlny v čase. (b) Stejně vlny ve frekvenční oblasti. [20] (c) Absorpční spektra různých výbušnin. [21]	30
<i>Obr. 11</i> Přístroje ThruVision – pasivní zobrazování [24].....	33
<i>Obr. 12</i> Poštovní skener T-SENSE – aktivní zobrazování [25]	34
<i>Obr. 13</i> Dostupnost chemikálií v kamenných obchodech	38
<i>Obr. 14</i> Přístroj TPS spectra 3000 [27]	39
<i>Obr. 15</i> Připravené vzorky pro analýzu výbušniny ANFO	41
<i>Obr. 16</i> Připravené vzorky pro analýzu střelné bavlny	41
<i>Obr. 17</i> Běžný vzhled zkoumaných vzorků	42
<i>Obr. 18</i> Srovnání absorpance dusičnanu amonného, cukru a mouky	43
<i>Obr. 19</i> Srovnání absorpance nafty a oleje	44
<i>Obr. 20</i> Absorbance výbušniny ANFO na bázi nafty	45
<i>Obr. 21</i> Absorbance výbušniny ANFO na bázi rostlinného oleje.....	46
<i>Obr. 22</i> Srovnání dusičnanu amonného s výbušninami typu ANFO na různé bázi.....	47
<i>Obr. 23</i> Srovnání absorpance střelné bavlny a obyčejné bavlny	48
<i>Obr. 24</i> Vliv papíru jako obalového materiálu	49
<i>Obr. 25</i> Vliv textilu jako obalového materiálu	50
<i>Obr. 26</i> Vliv atmosférické vlhkosti na terahertzové záření.....	51
<i>Obr. 27</i> Terahertzové zobrazování cukru, dusičnanu amonného a mouky.....	52
<i>Obr. 28</i> Terahertzové zobrazování modelu IED	53

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Destruktivní účinky IED dle velikosti [5]</i>	15
<i>Tab. 2 Objem exploziv a účinky dle typu vozidla [6].....</i>	16
<i>Tab. 3 Další známé bombové útoky [5]</i>	18
<i>Tab. 4 Komponenty pro výrobu improvizovaných výbušnin.....</i>	36
<i>Tab. 5 Látky používané pro výrobu IED.....</i>	37
<i>Tab. 6 Rozměry vzorků.....</i>	40

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Seznam látek považovaných za prekurzory výbušnin

PŘÍLOHA P I: SEZNAM LÁTEK POVAŽOVANÝCH ZA PREKURZORY VÝBUŠNIN

Látky, které se nezpřístupňují osobám z řad široké veřejnosti samostatně ani ve směsích či látkách, které je obsahují, s výjimkou případů, kdy je koncentrace rovná nebo nižší než níže stanovené mezní hodnoty

Název látky	Mezní hodnota
Peroxid vodíku	12 % hmotnostních
Nitromethan	30 % hmotnostních
Kyselina dusičná	3 % hmotnostních
Chlorečnan draselný	40 % hmotnostních
Chloristan draselný	40 % hmotnostních
Chlorečnan sodný	40 % hmotnostních
Chloristan sodný	40 % hmotnostních

Látky samostatně nebo ve směsích či v látkách, u nichž se oznamují podezřelé transakce

Název látky
Hexamin
Kyselina sírová
Aceton
Dusičnan draselný
Dusičnan sodný
Dusičnan vápenatý
Dusičnan vápenatoamonný
Dusičnan amonný