

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Textilní RFID tagy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr BOROVSANĚKÝ**
Osobní číslo: **E15B0279P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Textilní RFID tagy**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. provedte rešerši RFID tagů
2. provedte rešerši textilních RFID tagů
3. navrhnete a realizujete RFID tag

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

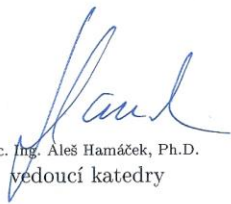
1. E. Moradi, T. Björninen, L. Ukkonen and Y. Rahmat-Samii, "Characterization of embroidered dipole-type RFID tag antennas," 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), Nice, 2012
2. Moradi et al., Characterization of Embroidered Dipole-type RFID Tag Antennas.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Pavec
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017
Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší konvenčních a nekonvenčních RFID tagů, kde u nekonvenčních je kladen důraz na textilní RFID tagy. V rámci práce je navržen a realizován textilní RFID tag.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části. První část rozebírá technologii RFID tagů jako celku a její postupný vývoj od historie až po současnost. Druhá část se zabývá rešerší konvenčně vyrobených RFID tagů, za kterou následuje krátké shrnutí této technologie. Třetí část je soustředěna na rešerší nekonvenčních RFID tagů, se zaměřením na textilní RFID a následné shrnutí. Ve čtvrté části je představen návrh textilního RFID tagu.

Klíčová slova

Radiofrekvenční identifikace, textilní, vyšívané, tag, identifikace, anténa

Abstract

This bachelor thesis consists of research of conventional and unconventional RFID tags, focusing on textile RFID in the unconventional part. The thesis contains the design and realization of textile RFID tag.

This paper is divided into four main parts. First one describes the technology of RFID tags in general, it's development through history till present. The second part is dealing with research of conventional RFID tags, followed by their evaluation. The third part focuses on the research of unconventional RFID tags, aiming at textile RFID, and it's evaluation. In part four is then proposed the design of RFID tag.

Key words

Radiofrequency identification, textile, woven, tag, identification, antenna

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni, dne 7.6.2018

Petr Borovanský

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Pavcovi za hodnotné připomínky, ochotu a trpělivost projevené při mém zpracovávání této bakalářské práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TECHNOLOGIE RADIOFREKVENČNÍ IDENTIFIKACE	11
1.1 VÝVOJ RFID.....	12
1.1.1 Čtyřicátá léta dvacátého století.....	12
1.1.2 Padesátá léta dvacátého století.....	12
1.1.3 Šedesátá léta dvacátého století.....	14
1.1.4 Sedmdesátá léta dvacátého století.....	15
1.1.5 Osmdesátá léta dvacátého století.....	16
1.1.6 Devadesátá léta dvacátého století.....	17
1.2 RFID V SOUČASNOSTI.....	17
2 KONVENČNĚ VYROBENÉ RFID TAGY	22
2.1 REŠERŠE KONVENČNÍCH RFID TAGŮ.....	22
2.2 SHRUTÍ KONVENČNÍCH RFID TAGŮ.....	30
3 NEKONVENČNĚ VYROBENÉ RFID TAGY	31
3.1 ZPŮSOBY VÝROBY.....	31
3.2 REŠERŠE TEXTILNÍCH RFID TAGŮ.....	33
3.3 SHRUTÍ TEXTILNÍCH RFID TAGŮ.....	43
4 NÁVRH TEXTILNÍHO RFID TAGU	48
ZÁVĚR	50
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	51

Úvod

Technologie Radiofrekvenční Identifikace (RFID) je bezdrátová komunikace využívající rádiové vlny k přenosu dat a energie mezi čtecím zařízením a tagem. RFID pomalu nalézá svou cestu k širokému uplatnění v různých aplikacích. Je mnoho kritérií, podle kterých se dá technologie RFID tagů dělit, například podle způsobu jejich napájení, způsobu výroby, frekvenčním pásmu na kterém pracují, atp.

Textilní RFID tagy jsou pro svou ohebnost a lehkost velmi často aplikovány do použití například ve zdravotnictví, nositelné elektroniky nebo smart textilií. A to i přes limitace pramenící z mechanického namáhání z důvodu neustálého natahování a ohýbání v důsledku pohybu lidského těla, nebo praní v pračce v případě použití ve smart textiliích.

Co ovšem drží masové používání této technologie zpátky je její cena. Ať už se jedná o pasivní, aktivní, konvenční nebo nekonvenční tagy, zpravidla jsou minimálně několikanásobně dražší, než jejich předchůdce, čárový kód.

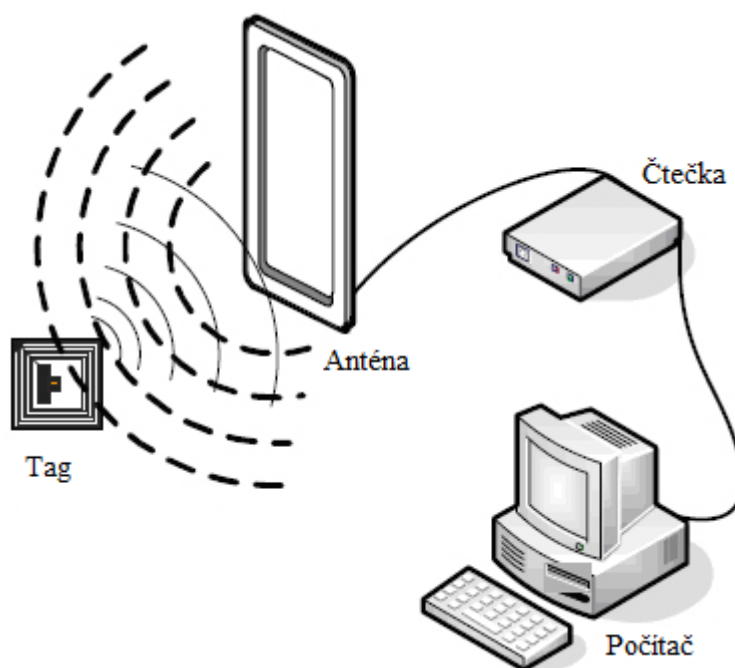
Seznam symbolů a zkratek

RFID	radiofrekvenční identifikace
AM.....	amplitudová modulace
FM	frekvenční modulace
např.	například
atp.	a tak podobně
č.	číslo
LF	low frequency
HF.....	high frequency
UHF	ultra high frequency
JIS	jednotný identifikační systém
WDT	watchdog tag
ID	identifikátor
SPZ	státní poznávací značka
RF	radiofrekvenční
IC	integrated circuit/integrovaný obvod

1 Technologie Radiofrekvenční Identifikace

Radiofrekvenční identifikace (RFID) je bezdrátová technologie využívající rádiové vlny ke čtení, zápisu a přenosu informací uložených v tagu. Ten je možné číst ze vzdálenosti až několika desítek metrů bez nutnosti jeho přímé viditelnosti. Tato technologie slouží stejně jako čárové kódy k jednoznačné identifikaci daného objektu a pro bezkontaktní a několikanásobnou interakci s ním. [1][2]

RFID systém je znázorněn na obrázku č. 1. Zpravidla je tvořen dvěma hlavními částmi - tagem a čtečkou. Čtečka je obvykle propojena s počítačem k umožnění přístupu do dané konkrétní databáze. Další možností přístupu k databázi je čtečka s přímým přístupem k síti, příkladem mohou být třeba ruční skenery. Samotné tagy v sobě kombinují mikročip, ve kterém se informace ukládají a zpracovávají, a anténu, sloužící k příjmu a vysílání signálu. Informace se z tagu získává signálem vyslaným anténou čtečky, na který tag konkrétním způsobem odpoví informací uloženou ve své paměti. Signál se poté vrací k anténě čtečky, která data poskytne počítači, popřípadě je vyhodnotí a zpracuje sama. [1][2]



Obr. č. 1 Schéma RFID systému [1].

1.1 Vývoj RFID

Vývoj vedoucí k samotnému RFID nepřímo začal už více než před sto lety. Prvotním pomyslným milníkem bylo první souvislé vysílání rádiových signálů dosažené roku 1906 Ernstem F. W. Alexandersonem. Tento úspěch značil začátek moderní rádiové komunikace, kde jsou řízeny všechny aspekty rádiových vln. V první polovině dvacátého století následoval zrod radaru, jehož vývoj značně urychlila především druhá světová válka. Radar vysílal rádiové vlny k detekování a lokaci vzdáleného objektu pomocí odrazu rádiových vln. Takto odražené vlny umožňovaly zjistit pozici a rychlost daného objektu. Jelikož jednou z částí radiofrekvenční komunikace je kombinace technologie rádiového přenosu a radaru, je zřejmé, že prvotní nepřímý vývoj RFID stavěl na poznatcích z radaru. [3]

1.1.1 Čtyřicátá léta dvacátého století

Pravděpodobně vůbec první výzkum související s RFID pochází z roku 1948 a je uveden v publikaci *Communication by Means of Reflected Power* od Harryho Stockmana, která pojednává o komunikaci prostřednictvím odražené energie.

V této publikaci Stockman mimo jiné popisuje reálné využití takovéto komunikace, například telemetrie a sledování meteorologických balónů. To bylo tehdejšími konvenčními způsoby prováděno tak, že balón obsahoval vysílač, který posílal meteodata a data o své poloze statickému směrovému přijímači na zemi. Pomocí tzv. odražené energie je popsáno zjednodušení této komunikace tak, že balón by obsahoval speciálně modulovaný reflektor k odražení signálu z radaru na zemi, tudíž by balón signál přijímal a modulovaně odrážel. Došlo by tak ke zjednodušení a zlevnění celé operace. Stockman nicméně uvádí, že je stále potřeba značného výzkumu a vývoje k odstranění zbývajících problémů před tím, než bude možné tyto technologie reálně využívat. Protože před realizací komunikace pomocí RFID bylo potřeba například tranzistorů, integrovaných obvodů, mikroprocesorů a také rozvoje komunikačních sítí, byla Stockmanova úvaha správná. K dosažení tohoto cíle chybělo téměř třicet let vývoje. [3][4]

1.1.2 Padesátá léta dvacátého století

Že byla cesta k dosažení systému RFID dlouhá a kontinuální, dokazuje také patent z roku 1960 od Donalda B. Harrise, *Radio Transmission Systems With Modulatable Passive Responder*. Řešení popsané v tomto patentu vylučovalo nevýhody spojené s používáním

baterií u bezdrátových systémů a uvádělo pět metod použití pasivního respondéru, který namísto baterie využíval k napájení obvodu a vysílání odpovědi příchozí signál. [5]

Baterie byly v době vydání patentu jedinou možností jak používat nestatická zařízení určená k přijímání a vysílání signálu bez napájení ze sítě, například vysílačka, popřípadě již uvedené meteorologické balóny. Nevýhoda baterií spočívá v jejich velikosti a omezené kapacitě, tudíž cesta za jiným, ekonomičtějším řešením než jsou baterie, byla nasnadě.

V případě první metody vzdálené zařízení sestávalo z dipólové antény, ladicích obvodů, usměrňovače a detektoru, konvenčního telefonního přijímače a vysílače adaptovaného ke generování vlastního výkonu bez externího zdroje. Signály vyslané ze statické stanice systému se pomocí parabolické nebo čočkové antény dostávaly ke vzdálenému zařízení, kde byly přijímány dipólovou anténou. Poté, co amplitudově modulovaný signál skládající se z nosné a dvou postranních pásem prošel ladicím obvodem, byl zaznamenán na detektoru, usměrněn a přenesen do telefonního přijímače. Přenos zpět na stanici byl dosažen amplitudovou modulací nosné z původního signálu ze stanice, a jejího zpětného vysílání na stanici, kde byl přijímán směrovou anténou spojenou s konvenčním AM přijímačem. Na straně stanice bylo navázáno spojení s telefonní linkou přes hybridní cívku, popřípadě, pokud bylo možné signifikantně redukovat feedback z vysílače do přijímače, pak přes přemost'ovač. [5]

Druhá metoda byla velmi podobná první, lišily se od sebe pouze tím, že ze stanice se signál přenášel frekvenčně modulovaný, nikoliv amplitudově. Při přenosu zpět na stanici byla opět použita amplitudová modulace. Třetí metoda opět variovala tu první, nicméně používala pro přenos ze stanice signál modulovaný amplitudově, a zpět na stanici frekvenčně. [5]

Význam druhé a třetí metody se objevoval v případě, kdy od sebe byly stanice a vzdálené zařízení vzdáleny na obecně delší vzdálenost. V případě, kdy by byla na větší vzdálenost použita první metoda, byly by zisky mezi vysílačem a přijímačem stanice (tzv. feedback) vyšší, než mezi vysílačem ze vzdáleného zařízení a přijímačem ze stanice. Jinými slovy by byl na přijímači stanice „hlasitější“ vysílač stanice, než vysílač vzdáleného zařízení. K zabránění tomuto jevu by se používaly právě druhá a třetí metoda. K dalšímu zvětšení možné vzdálenosti se navíc mohly používat směrové antény, aby se zabránilo zpětnému

odrážení signálu odjinud, než z vysílače vzdálené stanice, tudíž signálu stejného, jako byl vyslán. [5]

Čtvrtá metoda využívala pulzních technologií. Stanice byla navržena k uzpůsobení podobnému jako radar, spolu s vysílačem adaptovaným k emitování modulovaných pulzů radiofrekvenčních vln ve vhodných supersonicky frekventovaných opakováních. Dále byla stanice vybavena citlivým přijímačem, který byl po dobu vysílání pulzu deaktivován, a na konci každého pulzu se přijímač zapnul, aby stanice poslouchala echa vracející se ze vzdáleného zařízení. Vzdálené zařízení bylo uspořádané podobně, jako tomu bylo v první metodě – dipólová anténa, ladicí obvody, usměrňovač, detektor a konvenční telefonní přijímač a vysílač. V momentu vysílání ze stanice ke vzdálenému zařízení přijímalo zařízení modulované pulzy emitované stanicí, usměrnilo je a reprodukovalo výslednou zvukovou frekvenci na telefonní přijímač. Přenos zpět na stanici se realizoval modulací nosné ze signálu příchozího ze stanice, který se následně přenesl zpět. [5]

Tato čtvrtá metoda třímala tu výhodu, že stanice a vzdálené zařízení nikdy nevysílaly ve stejný čas, tím pádem se velmi omezoval feedback. Ovšem v případě malé vzdálenosti mezi stanicí a vzdáleným zařízením byla tato metoda nepoužitelná, protože kvůli velmi vysoké rychlosti přenosu rádiových vln by se signál jednoho pulzu vracel ze vzdáleného zařízení dříve, než by bylo jeho vysílání zcela dokončeno na stanici, tudíž by v tu chvíli stanice „neposlouchala“. [5]

Poslední, pátá metoda, používala opět amplitudovou modulaci v obou směrech jako v první metodě, ale ztráty feedbacku zvyšovala využitím harmonické signálu emitovaného stanicí při odesílání ze vzdáleného zařízení zpět na stanici. [5]

1.1.3 Šedesátá léta dvacátého století

Výzkum a vývoj se v šedesátých letech minulého století nezastavil, ba naopak. Za zmínku stojí R. F. Harringtonova studie Theory of Loaded Scatters z roku 1964 zaměřující se na elektromagnetickou teorii spojenou s RFID, především elektromagnetického rozptylu. [6]

Další významnou prací byl patent z roku 1968, *Passive data transmission techniques utilizing radar echoes* od J. H. Vogelmana. Tento patent popisuje systém pro přenos informace k radaru ze zařízení, která udržují rádiové ticho. [7]

Komerční využití na sebe nenechalo dlouho čekat. Ve druhé polovině šedesátých let byly založeny společnosti Sensormatic, Checkpoint, Knogo, a další, které přišly s tzv. *Electronic article surveillance (EAS)*, což byla zařízení sloužící k zamezení krádeží zboží v obchodech – byly to první komerční široce využívané jednobitové RFID tagy. I přes to, že systémy s těmito zařízeními v použití dokázaly pouze určit, zda je tag přítomen či nikoliv, byly efektivní jak z hlediska prevence krádeží, tak i ekonomičnosti – tagy byly velmi levné. Tento typ systémů používal buď mikrovlnnou, nebo induktivní technologii, v prvním případě generací harmonické polovodičem, v druhém rezonančními obvody. [3]

Tagy s více než jedním bitem byly prakticky pouze experimentální a byly složeny z oddělených komponent. Zatímco jednobitové EAS tagy byly malé, vícebitové měly velikost krajíce chleba. [3]

1.1.4 Sedmdesátá léta dvacátého století

Sedmdesátá léta byla pro RFID velmi důležitá, výsledek se zrodil z práce mnoha univerzit, společností a výzkumných center, a vzešla myšlenka prvního kompletně pasivního tagu s operativní vzdáleností až několik desítek metrů. Příkladem může jít práce výzkumníků z Los Alamos Scientific Laboratory, A. R. Koelle, S. W. Depp a R. W. Freymana, *Short-Range Radio-Telemetry for Electronic Identification Using Modulated Backscatter* z roku 1975. Tato práce uvádí elektronický identifikační systém s užitím zpětného odrazu radiofrekvenčního pulzu tagem o 12 bitech a na frekvenci 915MHz. [8]

V této době bylo jasné, že RFID systémy budou mít ohromné využití také v elektronickém výběru mýtného nebo identifikaci zvířete, na vývoj takovýchto systémů se mimo jiné zaměřily velké firmy typu General Electric nebo Philips. [3]

Jako další důležitá událost se ve Washingtonu, USA, roku 1973 odehrála konference, ve které se zúčastněné strany, mimo jiné například International Bridge Turnpike and Tunnel Association (Mezinárodní turniketová a tunelová asociace) a US Federal Highway Administration (Federální správa silnic USA) dohodly, že není v jejich zájmu zavádění

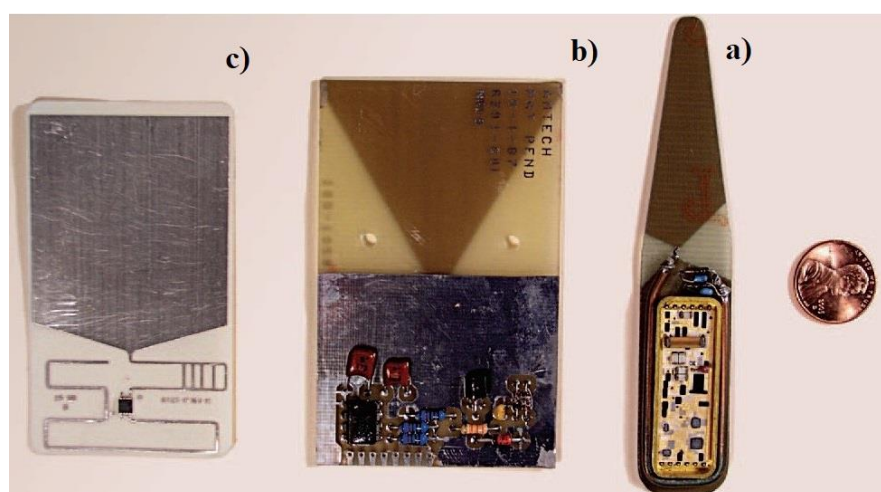
standardu pro elektronickou identifikaci vozidel. To bylo velmi důležité rozhodnutí, protože umožnilo vývoj širokého spektra systémů elektronické identifikace. [9][10]

1.1.5 Osmdesátá léta dvacátého století

Toto období bylo pro technologii RFID významné zejména z hlediska její rozsáhlé implementace. Klíčem k této rapidní expanzi byl rozvoj osobních počítačů, který umožňoval pohodlný a ekonomický sběr a správu dat z RFID systémů. [9]

V severní Americe bylo RFID využíváno hlavně k transportu zboží, jako přístupové karty a počínaje rokem 1989 i k výběru mýtného. Menší mírou se využívalo také k identifikaci zvířete. V Evropě našlo RFID významné zastoupení rovněž v identifikaci zvířete, dále také v průmyslovém odvětví. Jako nástroj k výběru mýtného RFID sloužilo v Itálii, Francii, Španělsku, Portugalsku a Norsku. Norsko, byť poslední zmíněné, bylo v Evropě a rovněž ve světě prvním státem, který výběr mýtného pomocí RFID zavedl, bylo to roku 1987. [9]

V této době se RFID technologie dostala do bodu, kdy byly tagy běžně vyráběny s integrovanými obvody CMOS spolu se samostatnými komponenty pro mikrovlnné tagy. Použití EEPROM pamětí umožnilo velkovýrobu identických tagů, které bylo možné naprogramovat až podle požadovaného využití. Tyto vylepšení vedly ke zmenšení tagu a ke zlepšení funkcionality. [9]



Obr. č. 2 Vývoj RFID tagů ve velikostním porovnání s centem.
Převzato z [9].

Na obrázku č. 2 je znázorněn vývoj zmenšování obvodů RFID tagů v porovnání s centem. Tag a) je dvanáctibitový read-only tag vyrobený přibližně roku 1976 s logikou CMOS, obvody v tomto případě zabírají prakticky polovinu tagu. Tag b), vyrobený cirká 1987, je 128 bitový read-only tag, a používá integrovaný obvod CMOS s komponenty mimo čip. Obvody zabírají přibližně čtvrtinu tagu. Poslední zobrazený tag c) je 1024 bitový read-write tag z druhé poloviny devadesátých let dvacátého století. Tag c) používá jediný CMOS čip, a zabírá zanedbatelnou část tagu. Je zřejmé, že kvůli postupujícímu vývoji ve velikosti obvodů, popřípadě čipů, určuje velikost celého tagu převážně anténa. [9]

1.1.6 Devadesátá léta dvacátého století

Pravděpodobně největší pokrok v devadesátých letech bylo patentování UHF (Ultra-high frequency) RFID systému společnosti IBM. Ve spolupráci s řetězcem Wal-Mart společnost IBM testovala UHF tagy v praxi, nicméně kvůli finančním potížím IBM v polovině devadesátých let prodala patent firmě Intermec. Firma Intermec v té době poskytovala systémy čárových kódů, a její RFID systémy byly instalovány v mnoha odvětvích. Nicméně UHF tagy byly v té době velmi nákladné kvůli malému počtu odběratelů a nedostatku mezinárodních standardů k rozšíření technologie. [11]

1.2 RFID v současnosti

V dnešní době je technologie RFID rozvětvena na množství typů ať už podle způsobu jakým jsou napájeny jejich čipy, na jaké frekvenci pracují, jestli vůbec čip mají či jsou bezčipové, nebo jestli jsou vyrobeny podle konvenčních způsobů, nebo nekonvenčních (tištěné, textilní).

Prvním možným dělením RFID tagů je na aktivní, pasivní a semi-pasivní. Čipy aktivních tagů jsou napájeny baterií, která je pro tag výhodou i nevýhodou. Výhodou je, že tag k vyslání informace nepotřebuje „probudit“ od čtecího zařízení, a může tedy vysílat jako první, pokud je to v aktuálním použití potřeba. Na straně nevýhod je zvýšená náchylnost k teplotě, vibracím a vlhkosti, které mohou baterii vyřadit z provozu, a tím i celý tag. Životnost baterie aktivního tagu závisí na její velikosti a také na tom, jak často je od tagu požadováno vysílání, obecně se uvádí 2 až 10 let [12][13]. Pasivní tagy, jak už jejich název napovídá, vlastní napájení nemají a dostat energii k čipu je potřeba jinak, existují dva způsoby. Prvním způsobem je odrazení energie ze čtecího zařízení zpět k němu, druhý je

absorbování energie a její dočasné uskladnění pomocí kondenzátoru ke generování odpovědi [14]. Semi-pasivní tagy nemají vlastní napájení čipu stejně jako tagy pasivní, ale zpravidla obsahují vedlejší čidla nebo senzory, které vlastní napájení mají. K vyslání informace tedy semi-pasivní tagy také potřebují přichozí energii ze čtecího zařízení.

Dalším rozdělením RFID tagů je podle frekvence, na které pracují. Pracovní frekvence určuje mnoho důležitých vlastností tagu, například pohlcování signálu vodou nebo kovovými předměty. V tabulce č. 1 jsou uvedeny frekvenční pásma RFID systémů, spolu s jejich označením, typickým dosahem a příkladem obvyklé oblasti použití. Důležité je podotknout, že uvedený typický dosah se týká pasivních a semi-pasivních tagů, u některých frekvenčních pásem je možné použití aktivních tagů, a tím zvýšit dosah na různé vzdálenosti, podle aktuálních podmínek a požadavků.

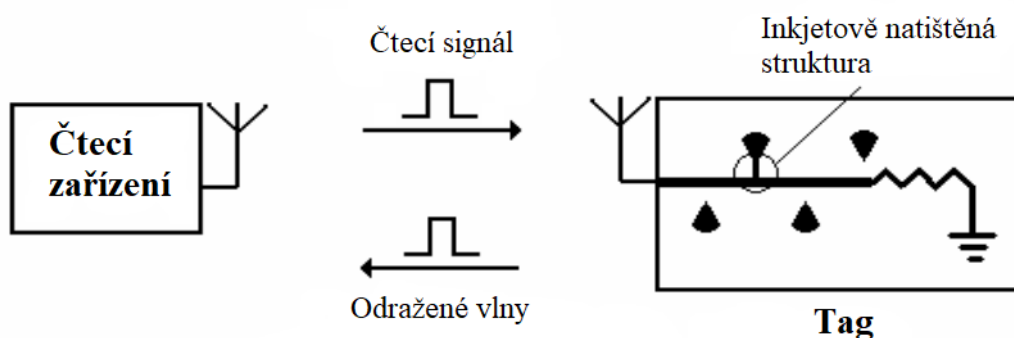
Tagy pracující na Low frequency (dále jen LF), užívány jako tagy pasivní, jsou jedny z nejstarších a zároveň nejvíce rozšířených vůbec. Velkou výhodou těchto systémů je jejich dlouhá vlnová délka, díky které dokáží penetrovat tenké kovové materiály a tekutiny, dále také relativně nízká cena. Antény LF systémů mohou mít různé tvary a velikosti a jsou obvykle složeny z cívky měděného drátu a železného jádra. Na rozdíl od LF tagů, High frequency (dále jen HF) systémy mohou být implementovány jako anti-kolizní, tzn., je možné číst více HF tagů najednou, nicméně kvůli jejich krátké čtecí vzdálenosti se tato možnost u HF tagů používá velmi zřídka. Antény HF tagů se obvykle dělají z méně než 10 vinutí měděné, hliníkové nebo stříbrné cívky, což z nich dělá jednoduché a levné řešení. U Ultra high frequency (dále jen UHF) tagů se frekvence 433 MHz používá pro aktivní tagy, zatímco 860-960 MHz jsou užívány jak pro pasivní, tak pro aktivní tagy. UHF, stejně jako HF, poskytuje anti-kolizní provoz, ale s jejich vyšší přenosovou rychlostí se UHF systémy hodí více pro čtení mnoha tagů najednou. Anténa UHF tagů se vyrábí ze stejných materiálů jako anténa HF, tedy měď, hliník nebo stříbro. Velkou nevýhodou ovšem je, že kvůli krátké vlnové délce těchto tagů je signál pohlcován vodou a kovovými materiály. Microwave RFID tagy lze použít jako pasivní i aktivní, kde u aktivních tagů je možné dosáhnout čtecí vzdálenosti až 100 m. Svoje výhody a nevýhody sdílí s UHF tagy, rozdíl je nicméně mimo jiné v anténě, která se v tomto případě používá směrová, což z Microwave tagů dělá lepší variantu při použití v blízkosti vody nebo kovu. [15][16]

Označení	Frekvenční pásmo	Typický dosah	Obvyklé oblasti použití
Low frequency	125 kHz; 134,2 kHz	méně než ½ m	montážní linky
High frequency	13,56 MHz	méně než 1 m	přístupové karty, logistika
Ultra high frequency	433 MHz; 860-960 MHz	až 10 m	výběr mýtného
Microwave	2,45 GHz; 5,8 GHz	až 30 m	identifikace vozového parku, real-time lokační systémy

Tab. č. 1: Frekvenční pásma RFID systémů [15].

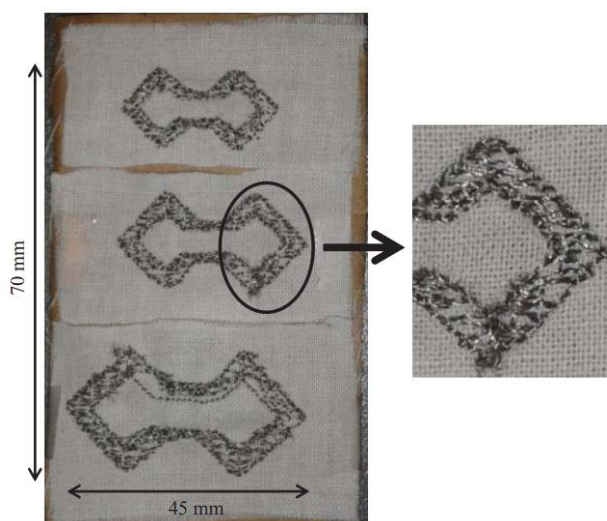
Zajímavou větví RFID technologie jsou tagy bezčipové, které mají místo čipu rezonanční strukturu, která přichodzí signál moduluje podle svojí struktury a poté odráží zpět ke čtecímu zařízení.

Vědci Národního institutu Technologie ve Stockholmu, Švédsko, publikovali práci [17], ve které představili 8 bitový, plně rekonfigurovatelný tištěný tag. Zajímavé na něm je, že základní struktura je vyráběna sériově, a obsahuje offsetově natištěné pasivní komponenty, které jsou ovšem odpojeny tzv. přenosovou linií, aby se mohly zapojit při druhém, inkjetovém tisku podle požadovaných vlastností a komponent. Tímto způsobem lze levně a rychle masově vyrábět tištěné bezčipové tagy, které se doladují podle konkrétních požadavků až v předposlední řadě, kde poslední je jejich implementace. Na obrázku č. 3 je znázorněn návrh tohoto RFID systému.



Obr. č. 3: Návrh bezčipového tištěného RFID systému [17].

Bezčipové tagy ovšem mohou být i textilní, na Technické univerzitě v Tampere, Finsko, byl navržen roztahovatelný bezčipový textilní tag. Publikovaná práce [18] se zaměřuje na dvě tkaniny, bavlnu a syntetický polyester. Použité vodivé vlákno je Shieldex 110f34 dtex 2-ply HC, které je založeno na 34 vláknech pokovených stříbrem. Jedno vlákno má 160 μm v průměru, a k realizaci vyšitého vodivého pásu (antény) jsou zapotřebí desítky takovýchto vláken. Navržený tag na obrázku č. 4 má dvojitý rombický tvar, a je uzavřený do smyčky. Jak je uvedeno v článku [19], pro cílové vlastnosti tagu je důležitá hustota šití, délka vláken a také směr šití. Jak lze očekávat, čím hustší vyšívání obrazec, tím lepší vodivosti lze dosáhnout, nicméně nikoliv do nekonečna, v článku se uvádí jako konečná stabilní hustota 10 svazků vláken. Jak lze vidět v tabulce č. 2, při vertikálním šití se dosahuje mnohem větší rezistivity, než při horizontálním. Pro vyšívání textilní tagy je tedy mnohem vhodnější vyšívat horizontálně.



Obr. č. 4: Bezčipové RFID dvojitého rombického tvaru [18].

Čtecí vzdálenost	Horizontální šití	Vertikální šití
1 cm	0,6 Ω	15,7 Ω
2 cm	0,8 Ω	31,7 Ω
3 cm	0,9 Ω	45,8 Ω
4 cm	1 Ω	59,5 Ω
5 cm	1,2 Ω	74,9 Ω

Tab. č. 2: Rozdíl v rezistivitě mezi horizontálním a vertikálním šitím [19].

Způsob výroby je posledním v této práci uvedeným rozdělením, jestli je tag vyroben podle konvenčních či nekonvenčních způsobů mu udává důležité vlastnosti, a také podle těchto vlastností poté dané tagy nacházejí své uplatnění. Konvenčně vyrobené tagy nacházejí uplatnění v méně náročných aplikacích, jelikož jsou obecně více náchylné na vnější vlivy jako třeba teplota nebo ohyb. Na druhou stranu tagy nekonvenčně vyrobené jsou vhodnější pro speciální použití, jako je například nositelná elektronika.

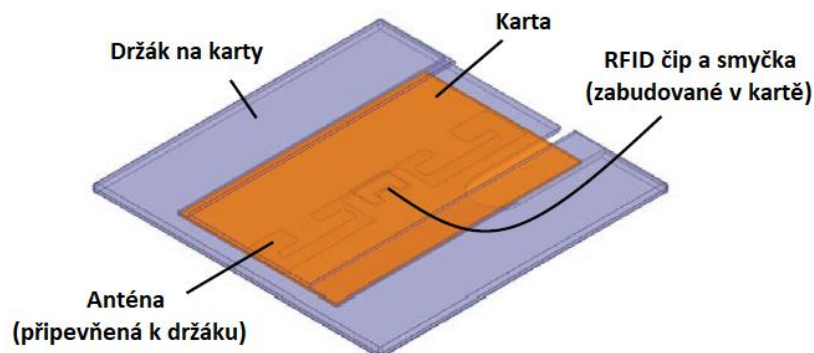
2 Konvenčně vyrobené RFID tagy

Pojem konvenční lze synonymizovat jako standardní, tudíž můžeme konvenční způsoby výroby chápat jako výrobu takovou, která splňuje obecná očekávání od elektroniky – výrobek minimálně s kovovými vnitřnostmi.

2.1 Rešerše konvenčních RFID tagů

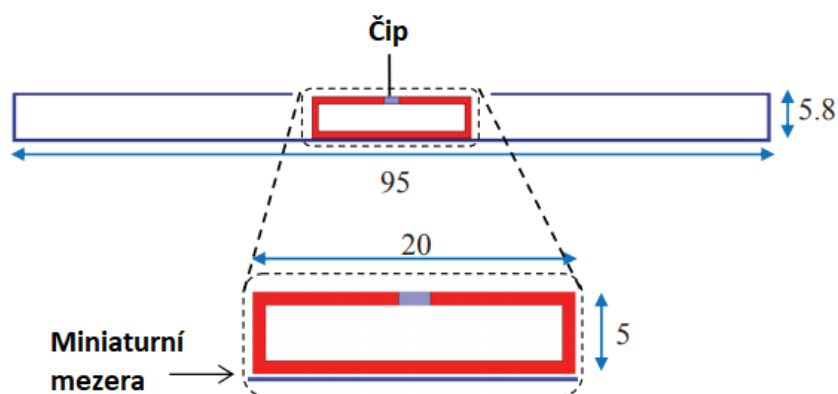
Nejsilnější zastoupení mají pasivní RFID tagy v oblasti bezkontaktních přístupových karet, kde se prakticky nepoužívá jiného řešení. Používají se zde HF tagy, které pracují na 13,56 MHz. Stejně označení nicméně nesou i jejich předchůdci, karty pracující na frekvenci 125 kHz. Tento starší systém nesl jednu hlavní nevýhodu, kvůli které byly nahrazeny. Problém spočívá v tom, že v okamžik, kdy se 125 kHz karta dostane ke čtecímu zařízení, tedy ke zdroji energie, začne bez jakéhokoli ověření vysílat informace v sobě uložené. Tím pádem bylo za použití jiného čtecího zařízení možné na dálku kartu „probudit“, ta svá data odeslala, a ty se jednoduše přečetly. S takto získanými daty pak nebylo těžké kartu v libovolném množství reprodukovat. Naproti tomu 13,56 MHz karty používají pro komunikaci se čtecím zařízením sdílené šifrovací klíče, které si stanoví na začátku komunikace. Data z karty se tedy přenesou až po stanovení tohoto klíče. Jedinou výhodou starších 125 kHz karet byla jejich větší čtecí rychlost, která plyne z menšího objemu přenesených dat. Další výhodou novějších 13,56 MHz bezkontaktních přístupových karet je jejich větší úložiště (až 64 MB), díky čemuž je možné je použít k různým přístupům. Příkladem můžou být JIS karty Západočeské univerzity v Plzni, které mohou vedle přístupů do učeben sloužit i jako Plzeňská karta, která slouží k předplácení městské hromadné dopravy v Plzni [20]. [21][22]

V oblasti automatické identifikace vozidel se v posledních letech zvyšuje zájem o pasivní UHF RFID technologie, v práci [23] byly navrženy a následně patentovány dva nové designy pasivních UHF tagů. První z nich, pojmenovaný Detachable Windshield Tag, vyniká možností výměny ID tagu pomocí odnímatelných karet, které se zasouvají do speciálního držáku připevněného na předním skle auta, viz obrázek č. 5. Tyto karty obsahují spojovací smyčku a čip, držák má v sobě zabudovanou zesilovací anténu pro větší dosah tagu.

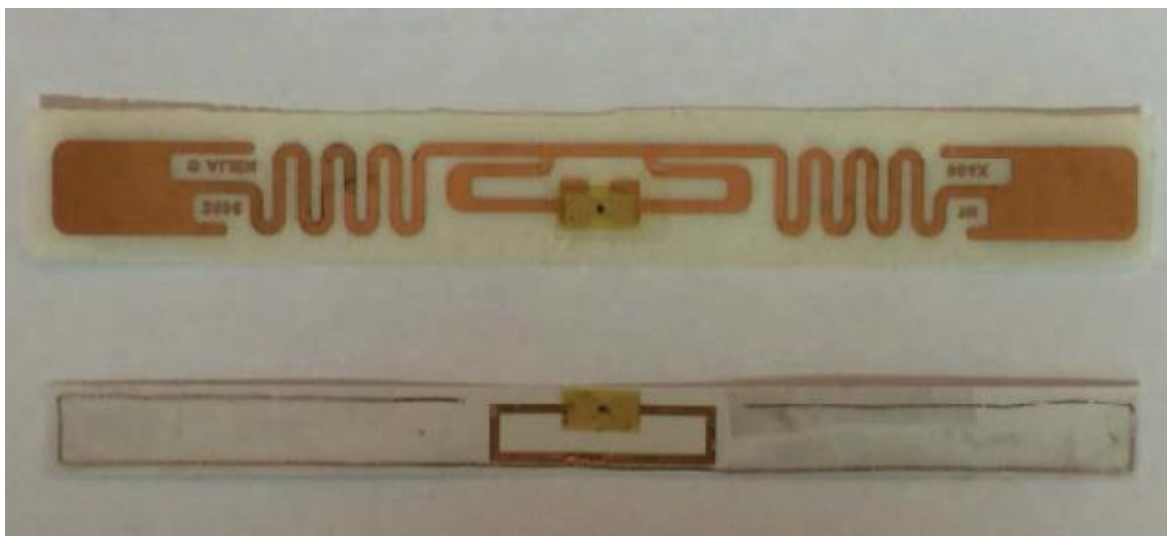


Obr. č. 5: Detachable Windshield Tag [23].

Druhý navržený tag, pojmenovaný Thin-wire Vehicle Headlamp Tag, je určený pro připevnění na přední světla auta, a nachází své uplatnění v případech použití speciálních předních oken u aut, tyto okna mají metalické příměsi, tudíž významně snižují účinnost RFID tagů na nich připevněných. Typický problém tagů určených pro přední světla je jejich velikost, protože nesmějí světlometům zaclánět. Jak napovídá název tagu, je navržen tak, aby právě tento problém minimalizoval. Skládá se z čipu připojeného ke smyčce o šířce 0,8 mm, a tenkovrstvé antény široké 0,2 mm. I když jsou smyčka a anténa velmi blízko, nejsou fyzicky spojeny. Jejich vzájemné propojení je prostředkováno miniaturní mezerou o velikosti 0,2 mm, jak je znázorněno na obrázku č. 6. Porovnání klasického tagu pro světlometry (zde Alien Squiggle Tag) a navrženého je na obrázku č. 7, rozdíl v zabraném prostoru je na první pohled zřejmý.

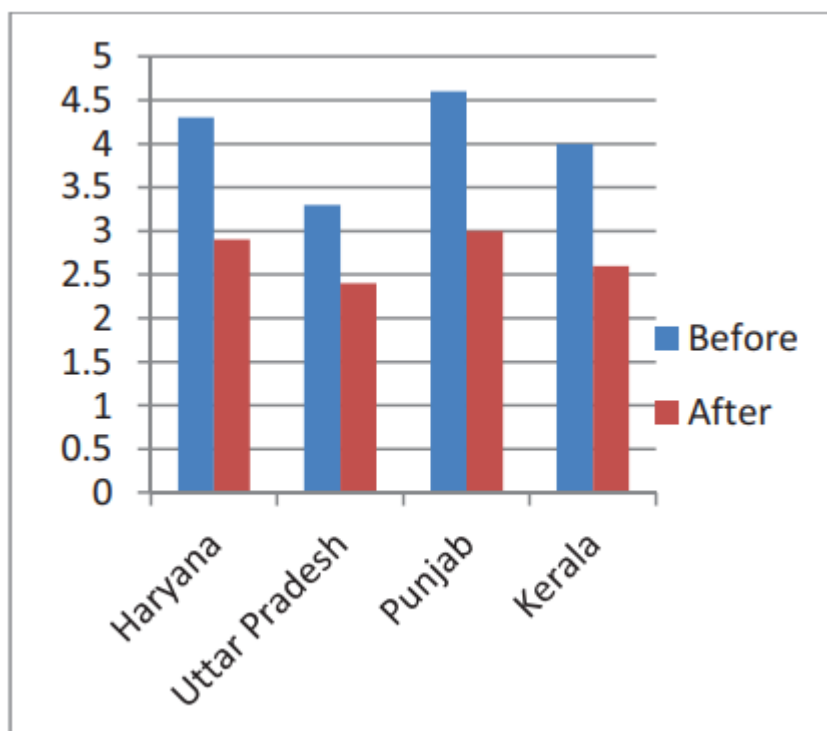


Obr. č. 6: Miniaturní mezera mezi smyčkou a tenkovrstvou anténou [23].



Obr. č. 7: Porovnání klasického (nahore) a navrhovaného tagu (dole) [23].

V oblasti zemědělství přináší aktivní RFID nové možnosti jejich využití. Takovýto systém byl navržen v [24], a obsahuje RFID tag, senzor teploty a senzor vlhkosti. Jako senzor teploty je v publikaci použita sonda THERM200. Senzor teplotu měří z hlíny okolo sebe, dokáže rozpoznat teploty od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, a teplotu indikuje změnou napětí, které se pohybuje od 0 V do 3 V, kde 0 V značí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 3 V znamená $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako senzor vlhkosti je použita sonda VH400 pracující na principu přenosové linky, díky němuž na rozdíl od sond založených na vodivosti nekorodují. Stav teploty a vlhkosti poté putuje do RFID tagu, který data následně posílá na čtecí zařízení, kde jsou dále zpracovávány. Tyto data slouží k jednoduchému a rychlému udržování přehledu o teplotě a vlhkosti na poli rostlin, který poté umožňuje rychlý zásah, pokud nejsou hodnoty v pořádku. Systém ale slouží i jako indikátor požáru, a to právě díky senzoru teploty. Na obrázku č. 8 je graficky znázorněna spotřeba vody v různých státech Indie před a po testovacím použití představovaného systému.



Obr. č. 8: Spotřeba vody před (Before) a po (After) instalaci představeného systému. Převzato z [24].

Co se týče použití technologie RFID v obchodním odvětví, práce [25] představuje návrh implementace a kód aplikace pro správu futuristického maloobchodu založeného na technologii RFID. Představovaný systém může být reprezentován tříúrovňovou architekturou sestávající z RFID Hardwaru, Middlewaru a Aplikační vrstvy.

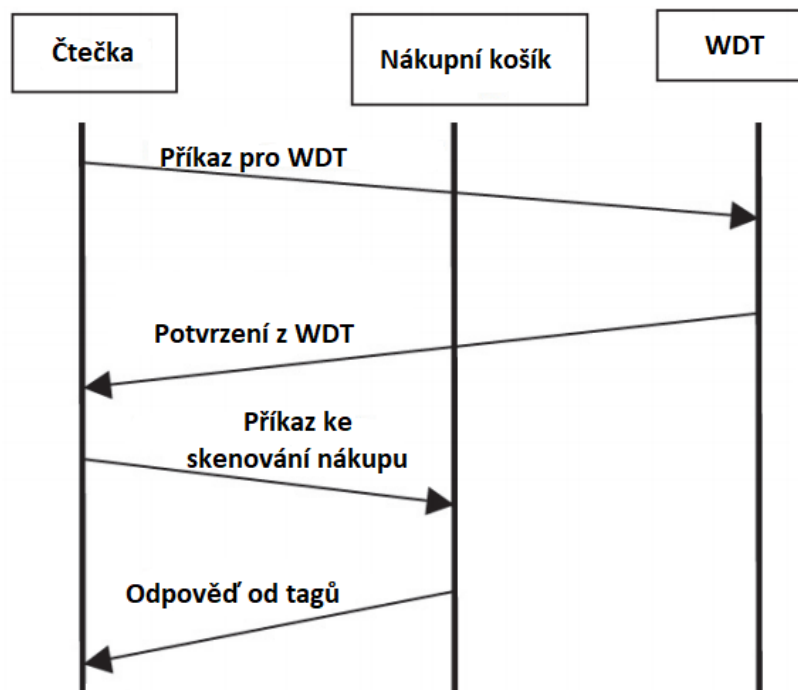
RFID Hardware obsahuje čtečky a tagy, kde čtečky zastupují první kontakt s tagem. Middleware poskytuje prostředí pro aplikace k přístupu k Hardwaru, a Aplikační vrstva zprostředkovává služby poskytované middleware pro aplikační developery pro vývoj RFID aplikací. Tento systém by obecně zlepšoval viditelnost produktů v dodavatelském řetězci, přesněji sledoval skladové zásoby a redukoval manuální operace se zásobami. Monitorování v reálném čase by navíc zamezovalo administrativním chybám, zlepšovalo spokojenost zákazníků a zabezpečení zboží.

Ovšem na fakt, že RFID není dokonalý spasitel maloobchodu, upozorňuje práce [26], která vyzdvihuje nespolehlivost čtení tagů a navrhuje jejich řešení. Může se stát, že některé tagy připevněné na zboží nebudou při placení (hromadném skenování u pokladny)

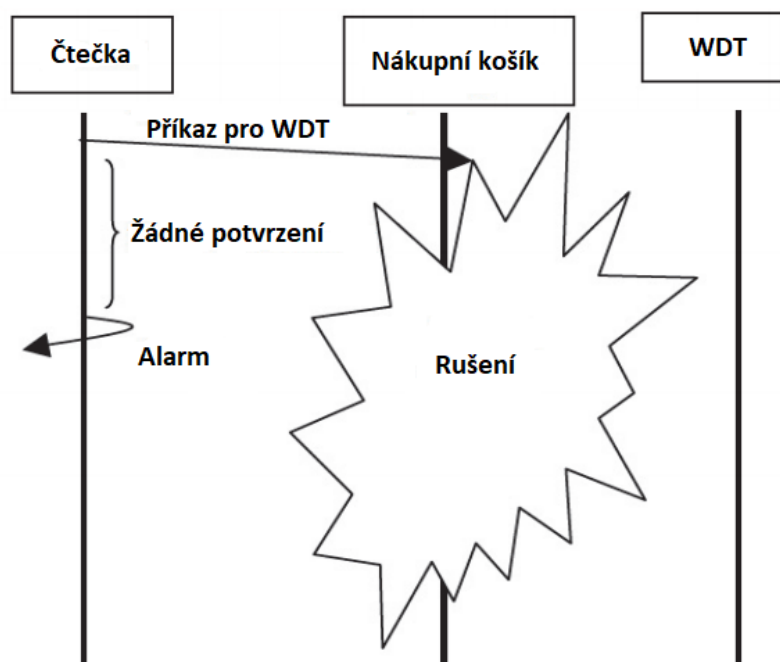
zaznamenány čtecím zařízením, z čehož pramení neetické obohacení zákazníka, a ztrátu pro řetězec. Práce kategorizuje tyto problémy do dvou skupin, úmyslné a neúmyslné.

Jako úmyslné jsou považovány ty problémy, kde zákazník naruší standardní fungování RFID systému k získání neetické výhody, například získat zboží zadarmo (krádež), nebo ho získat za levnější cenu než je oceněné (podvod).

Jako příklad úmyslného problému jsou rušičky signálu. Zákazník může mezi zboží schovat malé elektronické zařízení generující elektromagnetické rušivé signály. Signály generované těmito zařízeními by rušily komunikaci mezi čtecím zařízením RFID a tagy připevněnými ke zboží. Tím by čtecí zařízení nemohlo správně přečíst všechny tagy, a naskenovalo by jich méně. Práce jako možné řešení představuje koncept tzv. Watchdog Tagu (WDT). Jak je ukázáno na obrázku č. 9, WDT je umístěno na protilehlé straně od čtecího zařízení, nákupní košík by měl být umístěn mezi ně. Pokaždé, než by začalo samotné hromadné skenování tagů, poslal by se specifický příkaz na WDT, který, pokud by se vrátil v pořádku zpět ke čtecímu zařízení, by povolil následné skenování nákupu. V opačném případě by příkaz vyvolal odpovídající alarmový systém. Na obrázku č. 10 je znázorněn opačný příklad, kdy by byl příkaz pro WDT narušen.



Obr. č. 9: Aplikace WDT při odbavování nákupu [26].



Obr. č. 10: Reakce systému na cizí rušení při použití WDT [26].

Druhá skupina, a sice neúmyslné problémy, zastává především problémy technického rázu. Jako jeden z neúmyslných problémů v práci uvedených je kolize odpovědí více tagů. Kolize v důsledku více tagů odpovídajících ve stejný okamžik je jeden z klíčových problémů RFID systémů. V okamžiku, kdy je započato skenování několika RFID tagů, získají tagy energii a posílají odpovědné signály. Tyto signály mohou kolidovat ve vzduchu mezi tagy a čtecím zařízením, a stávat se tak neidentifikovatelnými, proto je k minimalizaci kolizí potřeba používat anti-kolizní protokoly na straně čtecího zařízení.

Jako řešení tohoto neúmyslného problému je představeno řešení na principu kategorizace zboží. Každá kategorie zboží by měla implicitně nastavenou jinou časovou prodlevu mezi příjmem signálu a zpětnou odpovědí, tím se dosáhne cíleného účinku, že všechny tagy neodešlou svou odpověď ve stejný čas, ale každá kategorie zboží v jiný čas. Toto řešení by ovšem mělo být navrženo na základě pravidelnosti nákupů, jinými slovy, množina často kupovaného zboží by měla obsahovat co nejvíce kategorií k docílení žádaného účinku kategorizace zboží.

Vedle bezpečnosti zboží v maloobchodech je, mimo jiné, důležitá i jeho bezpečnost, přehlednost a přesnost v dalších prvcích dodavatelského řetězce, zejména pak v případě jeho skladování. Práce z Technické univerzity v Ostravě [27] se zaměřuje právě na tuto

problematiku, s cílem modernizovat metody automatického managementu zásob za použití technologie RFID. Jako jedním z prvků modernizace jsou v práci uvedeny tzv. čtecí brány, které, integrované do dveří popř. průchodů, mají za úkol identifikovat veškeré průchozí otagované objekty. V rámci publikované práce je také zahrnuta modifikace takovéto čtecí brány, která má sloužit proti odcizení nebo neautorizovanému odnesení materiálu a vybavení z daných prostor. V těchto případech poté modifikovaná brána jednoduše učiní předem dané procedury, které by jinak bylo nutné provádět ručně.

K daným požadavkům této aplikace (větší vzdálenost čtení, čtení více tagů najednou) jsou nejvhodnější UHF tagy, a to i přes fakt, že UHF tagy mají obecně problém s operativností v blízkosti kovových předmětů a tekutin. Tento problém je v uvedené práci vyřešen výběrem UHF tagů specializovaných právě pro tyto podmínky. Nicméně ani toto řešení není univerzální, protože i jiné materiály mají omezení pro RFID tagy operující v jejich blízkosti, toto je vyřešeno použitím různě specializovaných typů UHF tagů. Selektce různých typů tagů je dalším přínosem uvedené práce, protože firmy poskytující řešení RFID systémů obecně poskytují systémy s jedním typem tagů.

Jak lze očekávat, při automatické identifikaci použitím uvedených čtecích bran je důležité umístění tagů, resp. jejich antén, na otagovaném předmětu. Z tohoto důvodu byly v rámci uvedené práce uskutečněny testy k zjištění nejlepšího možného umístění antény.

Obdobně složený tým z Technické univerzity v Ostravě také představil návrh automatizace parkovacích systémů pomocí technologie RFID [28]. Tento návrh by automatickou identifikací nahradil běžně používané parkovací lístky na parkovištích obvykle obsluhovaných buďto automaty, nebo obsluhou parkoviště. Návrh je použitelný např. pro parkoviště, přístupové brány do pracovišť atp.

Princip tohoto řešení spočívá v označení často navštěvujících vozidel (zaměstnanci, dodavatelé, zákazníci) RFID tagy, které by zajistily jejich jednoznačnou identifikaci. Když se vozidlo přiblíží k přístupové bráně, identifikátor (dále jen ID) je bránou načten, a pokud je vozidlo, resp. tag na něm umístěný, v databázi, brána se otevře. V tu chvíli se také zaznamená čas, a přiřadí k danému ID tagu v databázi. Při odjezdu z parkoviště se stejným způsobem zaznamená čas odjezdu, a podle toho se případně vypočítá cena za parkování.

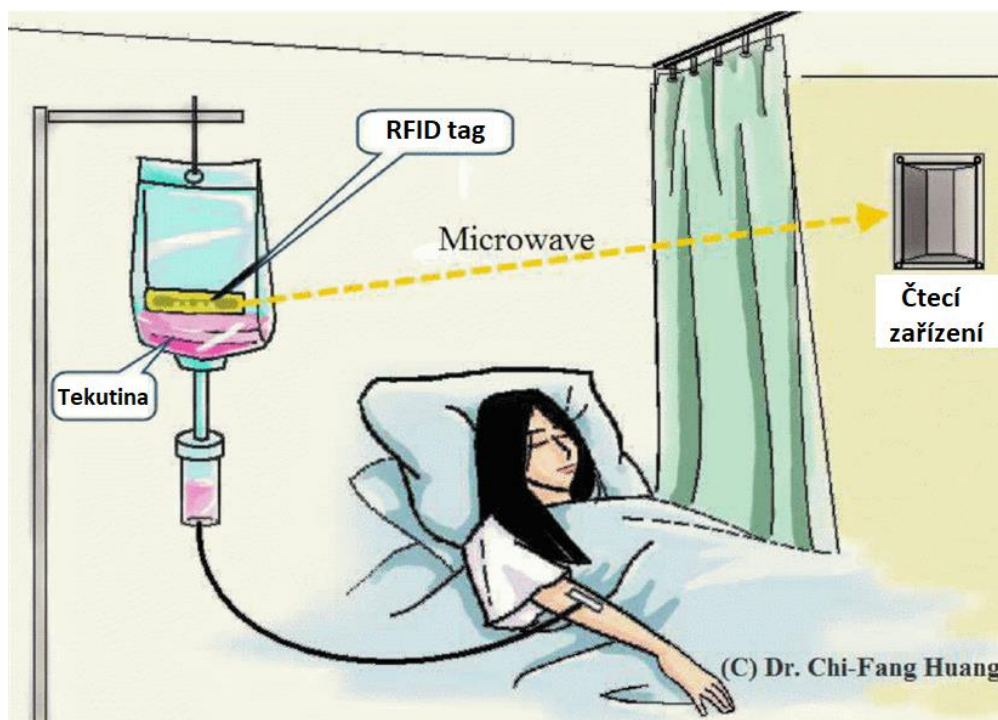
Tento systém se dá také zkombinovat s kamerovým systémem, může to být k zaznamenání SPZ vozidla a následné přiřazení nebo kontrola už přiřazené SPZ k ID tagu v databázi. Dalším využitím kamer může být pouze k zaznamenání vjezdu a odjezdu vozidla z a do objektu/parkoviště.

Oblastí, kde je technologie RFID rovněž významně zastoupena je identifikace zvířete, která je regulována normami ISO-11784 a ISO-11785 [29]. Obzvláště pro hospodářskou zvířet se mohou používat buďto miniaturní tagy injektované pod kůži zvířete, popřípadě visačky na uši, které mohou obsahovat jak standardní identifikační číslo, tak právě RFID čip pro identifikaci ze vzdálenosti [29]. Sledování a identifikace menší zvířete je představena v [30]. Hodí se především pro laboratorní zvířet, a konkrétní návrh zmíněné práce spočívá v otagování každého zvířete, a vytvoření sektorů adekvátně velkých k velikosti prostoru, na kterém se zvířet pohybuje. V každém tomto sektoru by byl určitý počet čtecích zařízení k zaznamenávání pohybu zvířete.

Sledování nicméně není jedinou aplikací, ve které může být RFID v oblasti správy zvířete nápomocno. V [31] je mimo jiné publikována i aplikace pro zaznamenávání tělesné teploty a lokace v reálném čase. Každé zvířet by mělo, například v obojku, RFID tag, a ve výběžích a areálu zoologické zahrady by byly kontrolní body ve formě RF čteček. Pomocí těchto kontrolních bodů by poté tato data byla snímána, a poté ukládána do databáze. V rámci zmíněné práce je uvedena i webová aplikace správy zoologické zahrady. Pomocí tohoto systému by byl poté monitorován pohyb zvířat v ohradách, a návštěvníci by díky němu mohli v reálném čase sledovat, kolik a která zvířata v jednotlivých výběžích jsou. Třešnička na dortu je možnost sledování pohybu zvířat v případě jejich útěku, kdy by bylo možné pomocí kontrolních bodů zjistit, jak se pohybovala v areálu zoologické zahrady, případně kudy areál opustila podle posledního zaznamenaného kontrolního bodu.

Rovněž v oblasti zdravotnictví nacházejí konvenční RFID tagy uplatnění. Pro zefektivnění a lehké zjednodušení práce zdravotních sester byl v práci [32] navržen indikátor plnosti, resp. prázdnoty intravenózních odkapávacích sáčků (kapačky). Princip je znázorněn na obrázku č. 11, a spočívá v připevnění UHF nebo Microwave RFID tagu na odkapávací sáček – když je plný, není tag schopen reflektovat signály ze čtecího zařízení, jelikož jsou UHF a Microwave vlny tekutinami pohlcovány. Ovšem jak se sáček vyprazdňuje, zmenšuje

se objem tekutiny v sáčku, a tím pádem i postupně mizí rušení, takže se ke čtecímu zařízení vrátí signál.



Obr. č. 11: Prezentovaný návrh UHF/Microwave tagu umístěného na intravenózním odkapávacím sáčku [32].

2.2 Shrnutí konvenčních RFID tagů

RFID tagy obecně nacházejí v dnešní době uplatnění v širokém spektru aplikací, i přesto ale stále převládají čárové kódy. Co široké použití technologie RFID brzdí, je především vyšší cena oproti čárovým kódům. Zatímco cena jednoho čárového kódu je obvykle menší než 1 US cent (méně než 20 haléřů), cena jednoho pasivního tagu se pohybuje od 0,1 do 1 US dolaru (přibližně 2,2 až 22 korun) a jednoho aktivního dokonce 15 až 20 US dolarů (cca 330 až 440 korun), u speciálních ovšem i mnohem více [33][34][35]. U obou technologií cena závisí na vyrobených kusech – s více vyrobenými kusy se cena snižuje.

3 Nekonvenčně vyrobené RFID tagy

Vedle konvenčních způsobů se v dnešní době vyrábějí RFID tagy také způsoby nekonvenčními, jsou to zejména tagy tištěné nebo textilní. Tyto tagy nacházejí díky svým specifickým vlastnostem (např. ohebnost, transparentnost, integrovatelnost do oblečení) uplatnění v mnoha různých aplikacích.

3.1 Způsoby výroby

Je k dispozici několik způsobů, jak vyrobit nekonvenční RFID tag, a ve svých aplikacích se často kombinují.

Tištěné tagy jsou vyráběné především pomocí inkjetu, ten spočívá ve vysokorychlostním vystřelování miniaturních kapiček inkoustu na substrát. Většina publikovaných prací používá při tisku vysoce specializované a drahé tiskové vybavení za použití finančně nákladných technologií, které k dosažení optimální vodivosti natisknutého vzoru vyžadují tepelné nebo laserové spékání za vysokých teplot (135°C a více než 300°C) [36]. Možnost pro levnější a dostupnější vodivý tisk nabízí vodivé inkousty, které namísto energeticky a časově náročného spékání schnou za pokojové teploty [36].

Antény textilních RFID tagů se dají vyrobit několika způsoby, v [37] se uvádějí textilní tagy z elektrotextilie, dále pak vyšívané, a natřené vodivou barvou. Další možností pro výrobu textilních RFID je pletení. Všechny jsou zobrazeny na obrázku č. 12.

Elektrotextilní antény se mohou přímo nůžkami vystříhnout z vodivého plátna, jelikož jsou velmi tenká a lehká. Antény natřených tagů, jak název napovídá, sestávají z nevodivého plátna (například bavlna), které je po vystřížení do požadovaného tvaru natřeno vodivou barvou, která se na plátně zpravidla nechává za určité teploty a po určitý čas vytvrdit k získání maximální vodivosti. Antény vyšíváných tagů se vodivou nití vyšívají opět na nevodivý substrát (například bavlněné plátno). Všechny způsoby výroby se v posledním kroku mohou ošetřit ochrannou vrstvou, která tagu pomáhá snášet externí vlivy a mechanická namáhání, například praní.



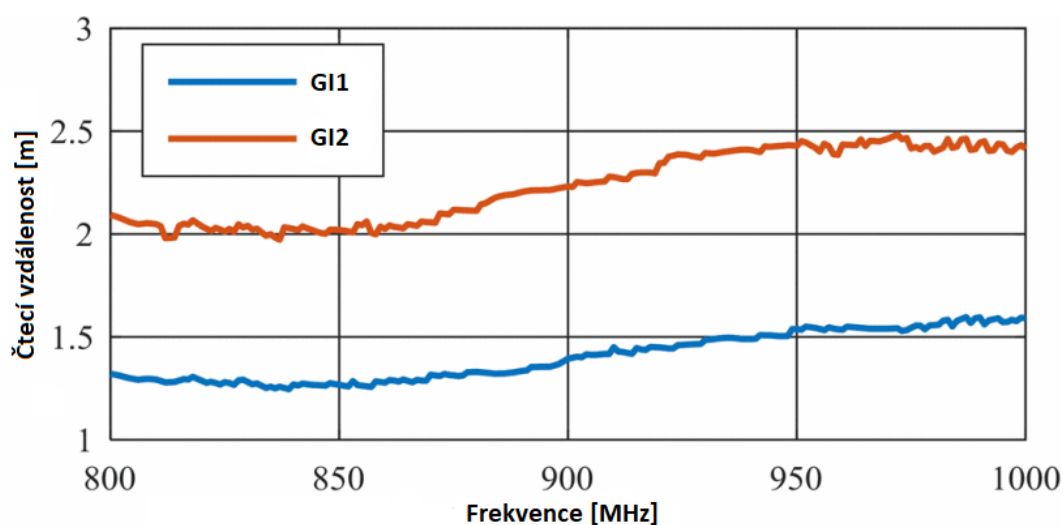
Obr. č. 12: Shora tag natřený vodivou barvou, pod ním tag z elektrotextilie, třetí vyšíváný, dole pletený [37][38].

Textilní RFID tagy s anténami vyrobenými pomocí grafenu jsou další možností, jak textilní tagy realizovat. Antény následně uvedených tagů byly realizovány technikou Doctor-Blade, která spočívá v odstraňování přebytečného inkoustu ze substrátu pomocí posuvné těrky [39]. Tloušťka inkoustu na substrátu je dána především šířkou mezery mezi těrkou a substrátem [39]. Na porovnání dvou různých typů grafenového inkoustu se zaměřuje práce [40], jsou jimi HDPlas IGSC02002 a Vor-ink™ X103, a dále se na ně bude odkazováno jako na GI₁ a GI₂ (Grafen Ink). Jak vypadají po vyrobení je zobrazeno na obrázku č. 13.



Obr. č. 13: Textilní RFID tagy s grafenovou anténou, GI₁ nahoře, GI₂ dole. Převzato z [40].

Tagy byly testovány ve frekvenčním pásmu UHF mezi 800 a 1000 MHz. Na obrázku č. 14 jsou výsledky měření těchto dvou tagů, a jak lze vidět, GI₂ má vyšší čtecí vzdálenost, přibližně 2,4 metru, přičemž v evropském frekvenčním pásmu UHF (866,6 MHz) lehce přes 2 metry. GI₁ dosahuje nejvyšší čtecí vzdálenosti přibližně 1,6 metru, a v evropském pásmu přibližně 1,25 metru. Důvod rozdílností v čtecích vzdálenostech pramení velmi pravděpodobně z odlišných pojiv a komponent použitých v těchto grafenových inkoustech, z čehož vychází i odlišné referenční hodnoty inkoustů. Odpověď na otázku, proč se zabývat grafenovými textilními tagy je poměrně jednoduchá – grafenový inkoust je levný, a zároveň není ekologickou zátěží [41].



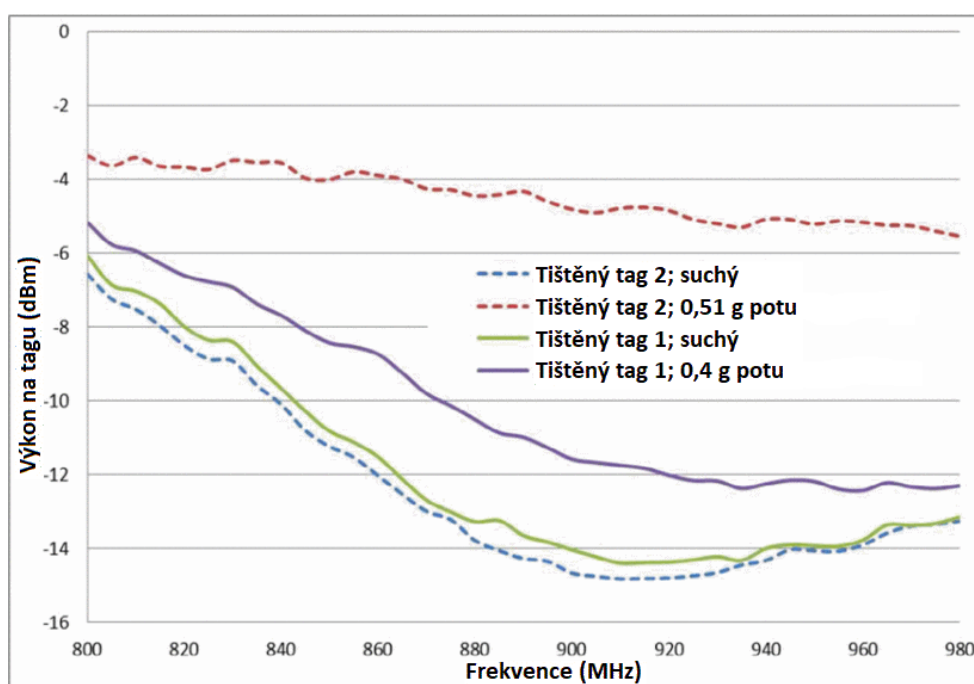
Obr. č. 14: Výsledky měření čtecí vzdálenosti dvou různých RFID tagů s grafenovými anténami [40].

3.2 Rešerše textilních RFID tagů

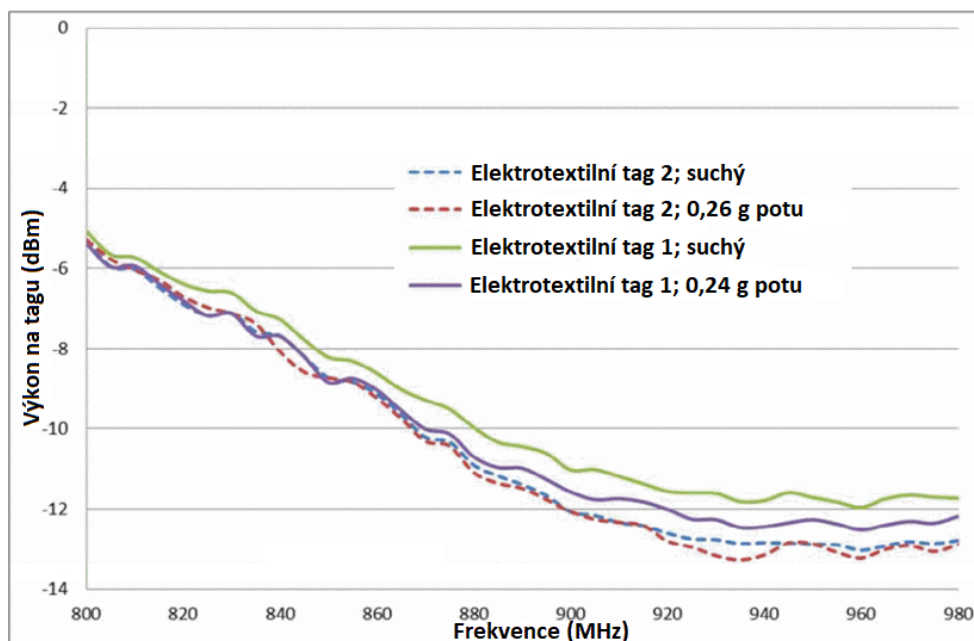
Textilní RFID tagy nalézají své nejvýznamnější využití ve smart textiliích, které mohou sloužit sportovcům nebo ke zdravotnickým účelům, např. sledování zdravotního stavu nemocných, těhotných atp. Tyto aplikace, a sice aplikace na lidském těle, nicméně vyžadují jistou míru elasticity, jelikož jak se lidské tělo hýbe, tagy na něm umístěné se při pohybu stahují a roztahují.

Senzor míry pocení uvedený v [42] nachází uplatnění jak pro sledování pacientů ve zdravotnictví, tak pro sportovce. Senzor byl testován za použití čtyř pasivních UHF RFID tagů vyrobených ze dvou materiálů, dvou textilních a dvou tištěných. První typ tagu je vyroben z elektrotextilie, konkrétněji stříbrem potaženou pružnou tkaninou z nylonu (76 %) a elastických vláken (24 %). Druhý je natištěný stříbrným inkoustem složeným ze stříbra

(65-65 % hmotnosti) a polyesterové pryskyřice (11-14 % hmotnosti) na nevodivé, roztažné tkanině. Po natištění je tento tag potřeba ošetřit za teploty 120 °C po dobu patnácti minut. U obou typů se IC připojuje vodivým epoxidem. Všechny čtyři tagy byly poté testovány nejdříve suché, a poté s přítomností lidského potu v množství 0,4 g a 0,51 g pro tištěné, a 0,26 g a 0,24 g pro tagy z elektrotextilie. Z výsledků prezentovaných na obrázcích č. 15 a 16 je viditelné, že tištěné tagy jsou na lidský pot mnohem více náchylné, než ty z elektrotextilie, to lze přisuzovat impedančnímu přizpůsobení, které je u obou materiálů ovlivňováno jiným způsobem [42].

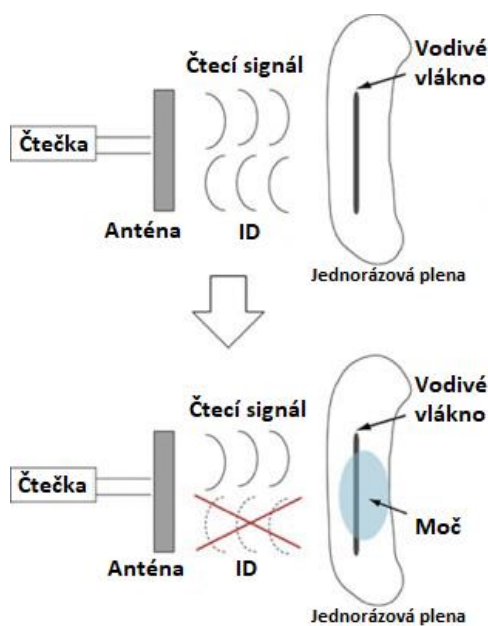


Obr. č. 15: Výkon na tagu v závislosti na frekvenci; tištěné tagy [42].



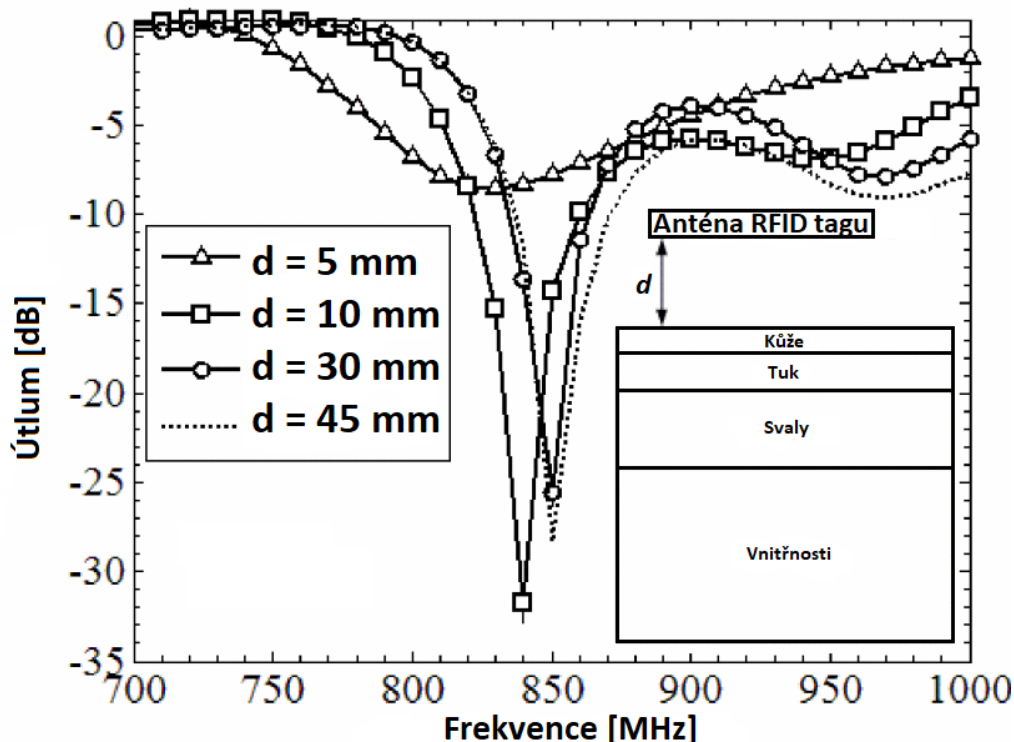
Obr. č. 16: Výkon na tagu v závislosti na frekvenci; elektrotextilní tagy [42].

Zajímavým použitím textilních RFID tagů ve zdravotnictví je systém detekce moči v plenách prezentovaný v [43]. V jednorázové pleni je zašité vodivé vlákno obsahující pasivní tag, které kdykoli je aktivováno čtečkou, vyšle zpět svoje ID. Když je ale plena mokrá, změní se kvůli vodivosti moči vlastnosti antény tagu, a tím pádem není schopen odpovědět. Čtečka může být umístěna pod postýlkou, nebo pod sedadlem kolečkového křesla, a když se k ní signál nevrátí zpět, je to indikace, že je plena pomočená. Princip je znázorněn na obrázku č. 17.



Obr. č. 17: Princip detekce moči pomocí textilního RFID [43].

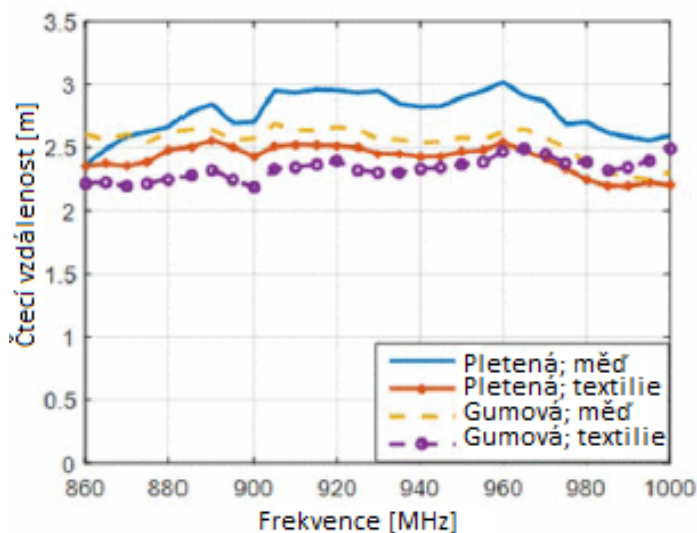
Největší problém pro antény RFID používaných na lidském těle je blízkost lidského těla, která způsobuje degradaci efektivity antény kvůli vodivosti lidského těla. Tímto problémem se zabývá práce [44]. K zjištění vlivu těla na útlum antény byl použit model lidského těla znázorněný v pravé dolní části obrázku č. 18. Simulace na základě tohoto modelu poté sledovala útlum v závislosti na frekvenci, a to při různých vzdálenostech od povrchu lidského těla (5, 10, 30 a 45 mm), a její výsledky jsou rovněž na obrázku č. 18. Za předpokladu operací při pracovní frekvenci 870 MHz (Evropský frekvenční standard UHF), je optimálního útlumu pod -10 dB dosaženo při 45 a více mm od lidského těla. Nicméně útlumu alespoň pod -6 dB bylo dosaženo i ve vzdálenostech mezi 5 a 10 mm. Jako výsledek této simulace lze uvést, že dosáhnout optimálních výsledků lze při nastavení antény na příjem o 30 až 40 MHz výše, než je požadovaná frekvence.



Obr. č. 18: Simulace vlivu lidského těla na útlum antény v závislosti na frekvenci, v pravém dolním rohu je znázorněn použitý model lidského těla [44].

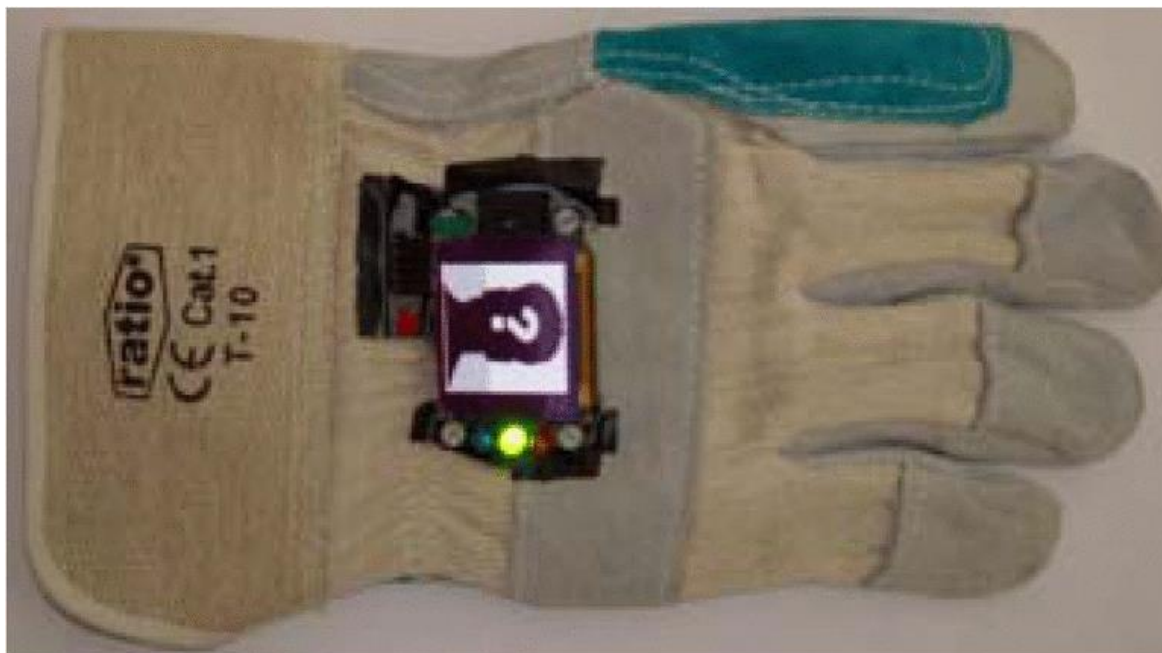
Ve [45] je testován rozdíl elektrotextilních a měděných tagů na dvou typech rukavic (pletená a pogumovaná), tudíž také v blízkosti lidského těla. Testování probíhalo v anechoické komoře ze vzdálenosti jednoho metru a postupného zvyšování. Jako referenční hodnota pro testování sloužil nejmenší výstupní výkon, při kterém bylo jako odpověď tagu na dotaz čtečky v komunikačním standardu ISO 18000-6C přijato 16 bitové náhodné číslo.

Výsledky měření jsou k nahlédnutí na obrázku č. 19 a ukazují, že vzdálenosti, na které lze přečíst elektrotextilní tag, jsou pouze o něco málo menší, než čtecí vzdálenosti měděného tagu, a sice 2,5 – 3 metry. Toto zjištění dává dobrý podklad pro reálné aplikace nahrazující měděné tagy elektrotextilními, jelikož mají srovnatelné výsledky měření.



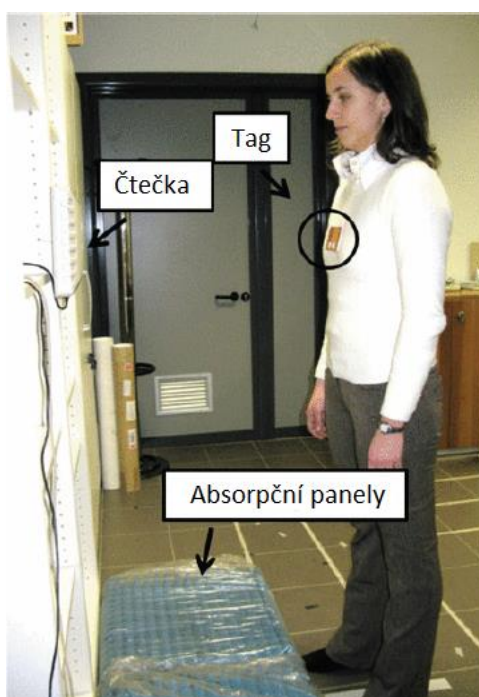
Obr. č. 19: Čtecí vzdálenosti v závislosti na frekvenci. Porovnání pletených a pogumovaných rukavic s měděným a elektrotextilním tagem [45].

Z opačného hlediska, a sice čtení tagů pomocí rukavice určené pro manipulaci zboží ve skladech, na věc pohlíží práce [46]. Na horní straně rukavice je připevněno čtecí zařízení, a k němu je připojen malý display pro interakci s uživatelem, viz obrázek č. 20. Takto navržený systém dosahuje relativně malých čtecích vzdáleností, od 0,8 cm do 11,8 cm, to nicméně pro předkládanou aplikaci stačí, jelikož se předpokládá manipulace se zbožím. Takto nízká čtecí vzdálenost je způsobena několika faktory, cíleným faktorem je snaha o dosažení co nejmenších energetických nároků k prodloužení životnosti baterie. Vedlejším pak, že čtečka tagy načítá skrz rukavici a ruku, to se dosahuje čtecí vzdálenosti 0,8 až 3,5 cm. V případě načítání tagů horní stranou musí čtečka prostoupit pouze display, tudíž se dosah zvyšuje na 3 až 11,8 cm.

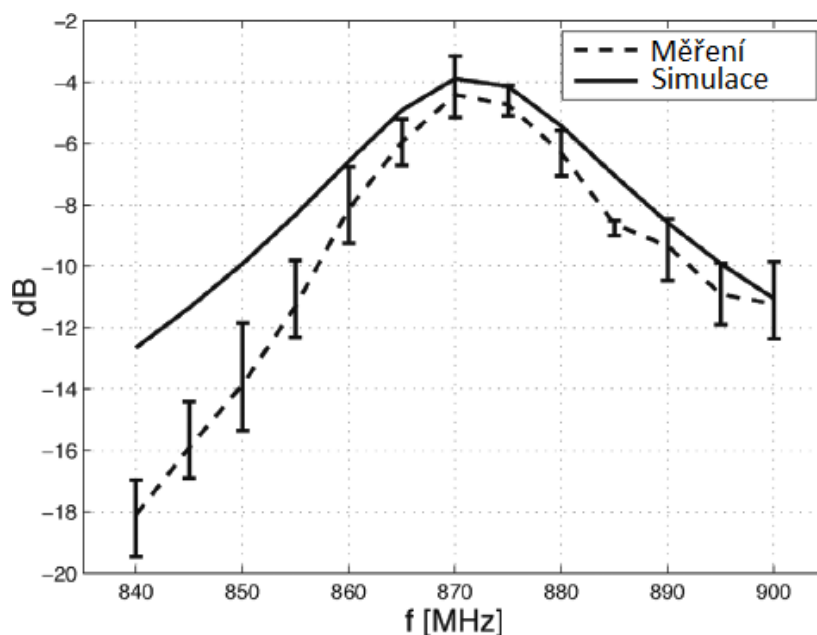


Obr. č. 20: Čtecí zařízení s malým displayem na rukavici. Převzato z [46].

Práce [47] nabízí kromě měření vzdálenosti i úhel, pod kterým je tag čten. Testování spočívalo v měření zisku odraženého signálu z tagu. Testovaný tag byl nejdříve umístěn na hrudi dobrovolníka, naproti antény čtečky a ve výšce 1,3 m. Odrazy ze země byly minimalizovány použitím absorpčních panelů, znázorněno na obrázku č. 21. Graf závislosti maximálního zisku ke frekvenci je na obrázku č. 22.



Obr. č. 21: Testování textilního tagu na lidském těle, zde konkrétně na hrudi dobrovolníka [47].



Obr. č. 22: Zisk v dB v závislosti na frekvenci při testování textilního tagu umístěného na hrudi dobrovolníka; vertikální čáry určují odchylku v jednotlivých měřeních [47].

Nicméně měření za takto idealizovaných podmínek (tag přímo před čtecím zařízením, natočený směrem nahoru) není prokazatelné pro reálné aplikace. Z toho důvodu se zmíněná práce zabývá i měřením v méně ideálních podmínkách. Těmi je různé horizontální natočení tagu vůči čtecímu zařízení (0° , 90° , 180° a 270°), v různých vertikálních natočeních (nahoru, doleva a doprava) a různé umístění tagu na těle dobrovolníka (na hrudi, zádech a paži). Výsledky tohoto měření jsou k nahlédnutí na obrázku č. 23, zapsána je hodnota největší vzdálenosti, ze které byl tag přečten v metrech.

Z výsledků prvního měření na obrázku č. 22 lze usuzovat, že nejlepší frekvence, kterou používat v pásmu UHF je kolem 870 MHz. To potvrzují i výsledky práce [48], ve které byly testovány čtecí vzdálenosti textilního tagu umístěného na paži dobrovolníka z hlediska různých frekvenčních standardů UHF (pro EU 866,6MHz, USA 915 MHz a Japonsko 954,2MHz). Uvedené výsledky v tabulce č. 3 prokazují evropskou frekvenci, která je prakticky totožná s nejlépe vycházející frekvencí v prvním měření v [47], jako nejefektivnější. Výsledky druhého měření na obrázku č. 23 jsou komplexnější, mimo jiné je dobře vidět, že když je přímo mezi čtecím zařízením a tagem lidské tělo, nelze tag buďto přečíst vůbec, nebo pouze z malé vzdálenosti 0,6 m. Výjimkou je vzdálenost 2,1 m při natočení 180° horizontálně a vertikálním natočením C. Z výsledků druhého měření lze nicméně usuzovat, že použití pouze jednoho tagu není konzistentní (nedosahuje se stejných čtecích vzdáleností) při různém horizontálním natočení. Zmíněná práce navrhuje jako řešení

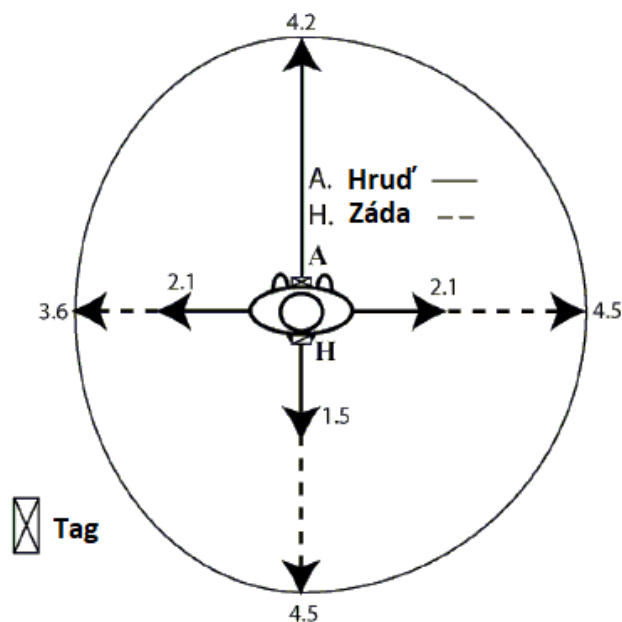
tohoto problému použití více tagů namísto jednoho, jako příklad je znázorněna kombinace umístění A spolu s H, čímž lze možnou čtecí vzdálenost učinit více konzistentní, viz obrázek č. 24.

Úhel [°]	Maximální čtecí vzdálenost [cm]		
	EU	USA	Japonsko
0	105	73	51
45	76	65	38
90	50	48	40
135	-	-	-
180	-	-	-
225	39	47	34
270	134	99	71
315	132	120	79

Tab. č. 3: Maximální čtecí vzdálenosti v cm k úhlu natočení vůči čtecímu zařízení pro EU, USA a Japonské frekvenční pásma UHF [48].

Vertikální natočení tagu				
	$\phi=0^\circ$	$\phi=90^\circ$	$\phi=180^\circ$	$\phi=270^\circ$
A	4.2	2.1	1.5	2.1
B	1.8	3.3	0.6	1.5
C	2.1	2.1	2.1	1.5
D	4.2	3.6	1.2	0.6
E	5.1	2.7	2.4	0.6
F	4.5	4.5	3.3	-
G	-	4.5	4.8	2.1
H	-	4.5	4.5	3.6

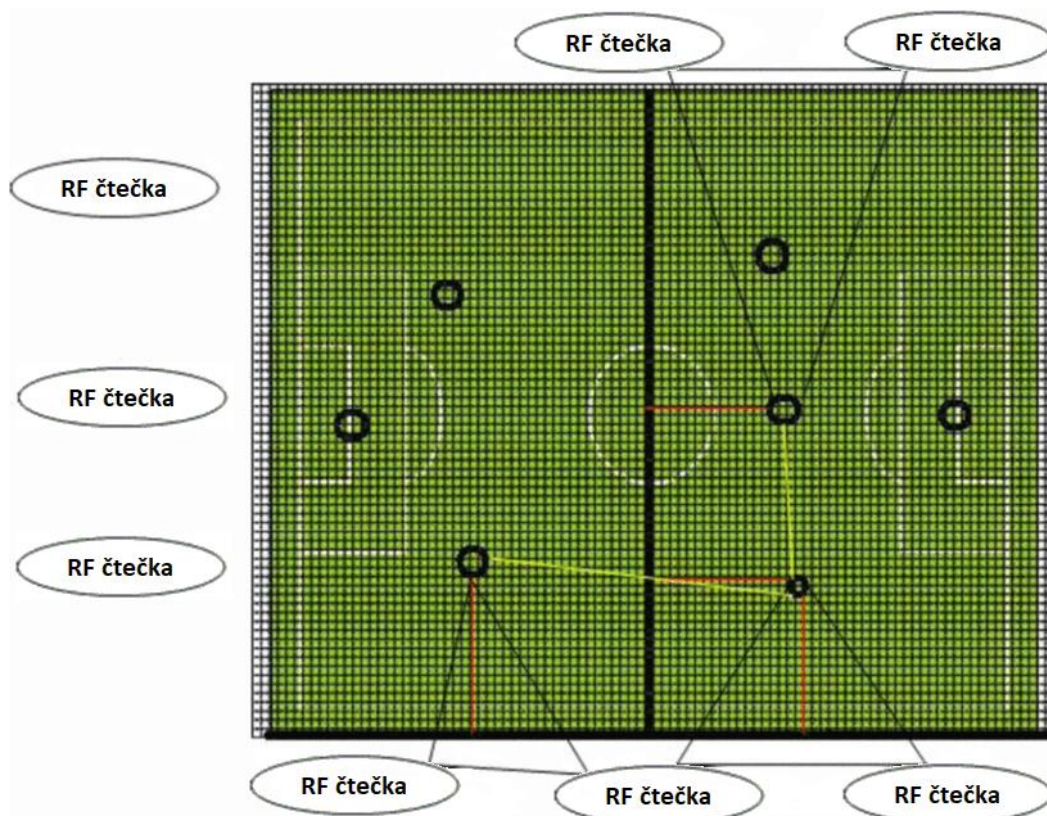
Obr. č. 23: Měření tagu na těle v různých vertikálních a horizontálních (0° , 90° , 180° , 270°) pozicích, spolu s různým umístěním na těle dobrovolníka; R znázorňuje čtecí zařízení [47].



Obr. č. 24: Kombinace vertikálních umístění A a H k dosažení konzistentnější čtecí vzdálenosti [47].

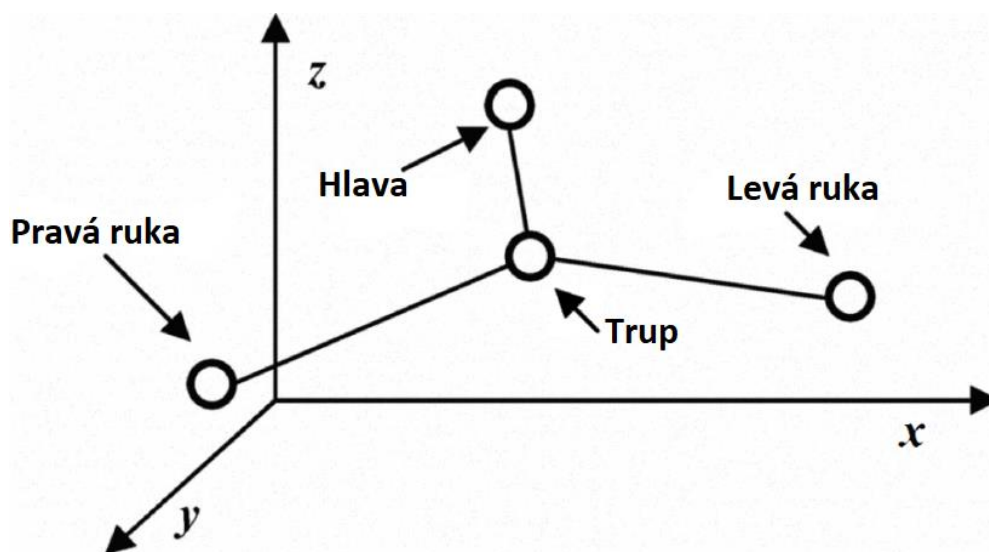
Textilní RFID má ve sledování a potenciálním zlepšování sportovních výkonů velký potenciál. Publikace [49] navrhuje řešení pro sportovce, respektive spíše pro jejich trenéry, kteří díky němu mohou sledovat stav a umístění hráče. Navržená systémová architektura pro toto řešení se jmenuje Player Tracker. Struktura se dělí do tří vrstev, nejnižší vrstvou je Vrstva RFID sledování, která řídí hardwarovou komunikaci, jako střední Software pro zpracování dat, a nejvyšší je Prezentační a hlásící vrstva, zajišťující komunikaci s uživatelem. Tento systém dokáže jako výstup vykreslovat model pohybu hráče ve 3D, nebo ve 2D model hřiště.

Dvourozměrné vykreslování zobrazuje relativní polohy hráčů na mřížce hřiště vytažením délky přímky pomocí dvoubodového průsečíku na ose x a dvoubodového průsečíku na ose y. Pro klarifikaci – relativní poloha hráčů je ve smyslu vzdálenosti jednotlivých hráčů od sebe. Na obrázku č. 25 je tento princip znázorněn.



Obr. č. 25: Prezentace relativních pozic ve 2D; uzly reprezentující pozici každého hráče za použití triangulačních výpočtů jsou znázorněny černými kruhy; dvoubodové průsečíky na x a y osách jsou reprezentovány červenými čarami, relativní pozice jsou reprezentovány žlutými čarami [49].

Ve trojrozměrném vykreslování jsou pozice částí těla reflektovány na kartézskou soustavu. Každý bod zobrazený v soustavě reprezentuje specifickou část těla na které je umístěn tag, tělo se poté pomocí bodů vizualizuje wireframe diagramem, viz obrázek č. 26.

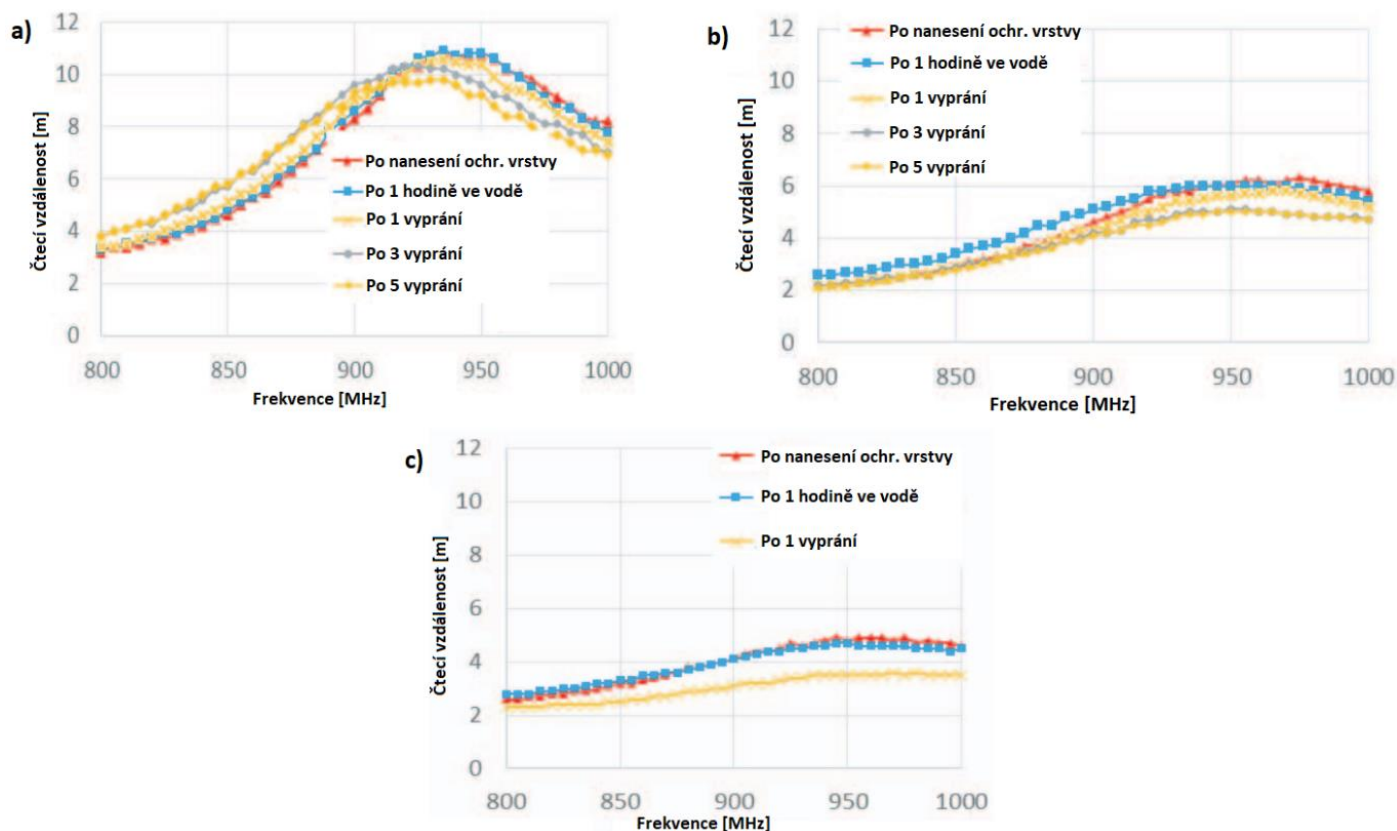


Obr. č. 26: 3D wireframe diagram v kartézské soustavě se čtyřmi RFID tagy na obou rukou, hlavě a trupu [49].

V oblasti automotive je možným využitím textilních tagů například sledování stavu pneumatik nákladních automobilů, to přijde vhod z důvodu jejich vysoké ceny a neustálého a opakovaného užívání. V publikaci [50] je předložen návrh širokopásmové flexibilní pasivní UHF antény pro aplikace jako sledování tlaku a teploty v pneumatikách. Tato anténa je pro použití v pneumatikách vhodná zejména díky široké impedanční šířce pásma, která poskytuje konstantní výkon pro různé dielektrické materiály a jejich různé tloušťky. Další výhodou v této aplikaci má oproti konvenčním anténám z hlediska mechanické flexibility a nízkého dopadu na mechanické vlastnosti pneumatiky, jelikož je vyrobena z vodivých textilií, a čip má zabudovaný do polymeru.

3.3 Shrnutí textilních RFID tagů

Velký problém textilních RFID tagů v nositelné elektronice je jejich degradace v důsledku praní. Při testování spolehlivosti elektrotextilních, natřených a vyšívaných tagů se jako velice efektivní ochrana proti vlhkosti prokazuje ochranné natírání, jelikož, jak je vidět na obrázku č. 27, čtecí vzdálenost zůstává prakticky beze změny (přibližně 10 m pro elektrotextilní, 6 m pro vyšívaný a 4 m pro natřený) při měření po nanesení ochranné vrstvy, a poté po ponoření tagu na jednu hodinu pod kohoutkovou vodu [37]. Ochranná vrstva použitá při tomto testování je DuPont PE772.

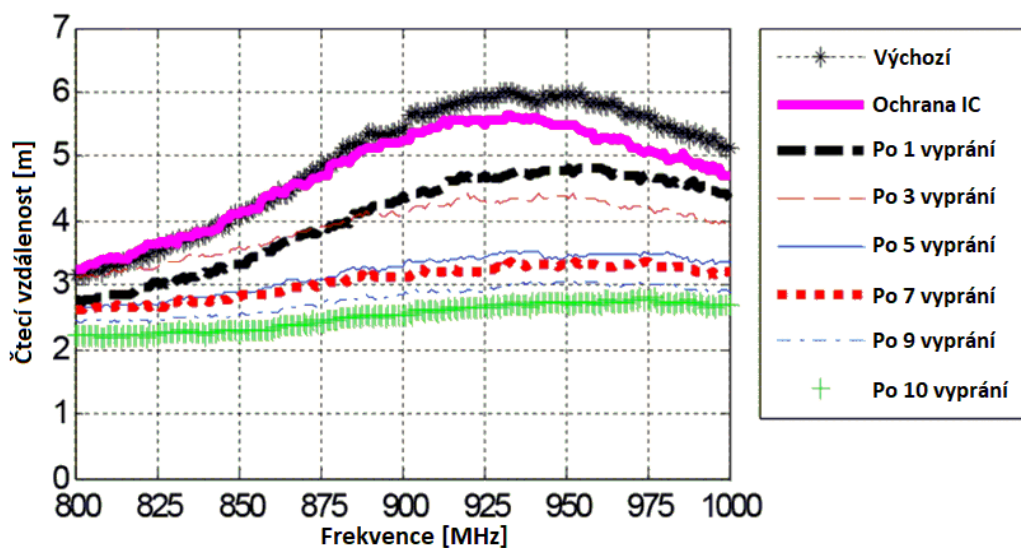


Obr. č. 27: Čtecí vzdálenosti a) elektrotextilního, b) vyšívaného a c) natíraného tagu po nanesení ochranné vrstvy, po jedné hodině ve vodě, a po jednotlivých pracích cyklech [37].

Testování tagů při praní v pračce prokazuje natíraný tag jako naprosto nevhodný pro nositelnou elektroniku, protože již po prvním vyprání vykazuje sníženou čtecí vzdálenost a viditelné mechanické poškození. Druhé praní zajišťuje destrukci tagu, jelikož po něm už není možné tag přečíst, a mechanické poškození dokazují markantní praskliny. Vyšívané a elektrotextilní tagy se dle výsledků jeví jako nejvhodnější, jelikož i přes postupné snižování čtecí vzdálenosti přežily všech pět pracích cyklů. Nejslabším místem vyšívaných a elektrotextilních RFID tagů je podle testování spoj IC a antény. Problémem pro tento spoj je zjevně mechanické namáhání tagu v pračce. Výsledky měření po jednotlivých pracích cyklech jsou rovněž na obrázku č. 27. [37]

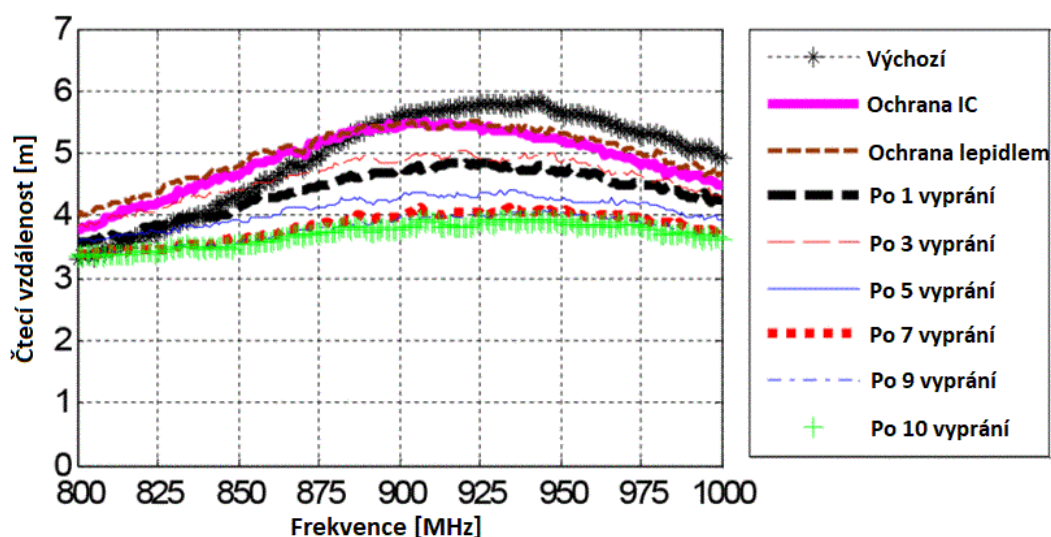
Výsledky testování v [37] podtrhává [51], kde je elektrotextilní tag podobnou metodikou testován nejdříve bez ochranného nátěru (zde lepidlo), a poté s ním. Výsledky prezentované na obrázku č. 28 ukazují, že neošetřený elektrotextilní tag dosahuje čtecí vzdálenosti 6 metrů při cílené frekvenci 940 MHz. Ochrana IC lepidlem snižuje čtecí vzdálenost přibližně o 30 cm, což značí malý dopad ochrany IC lepidlem na impedanci

antény tagu. Každý prací cyklus snižuje čtecí vzdálenost, kdy při desátém cyklu dosahuje čtecí vzdálenosti přibližně 2,7 metru při 940 MHz.



Obr. č. 28: Výsledky testování ochrannou vrstvou neošetřeného elektrotextilního tagu [51].

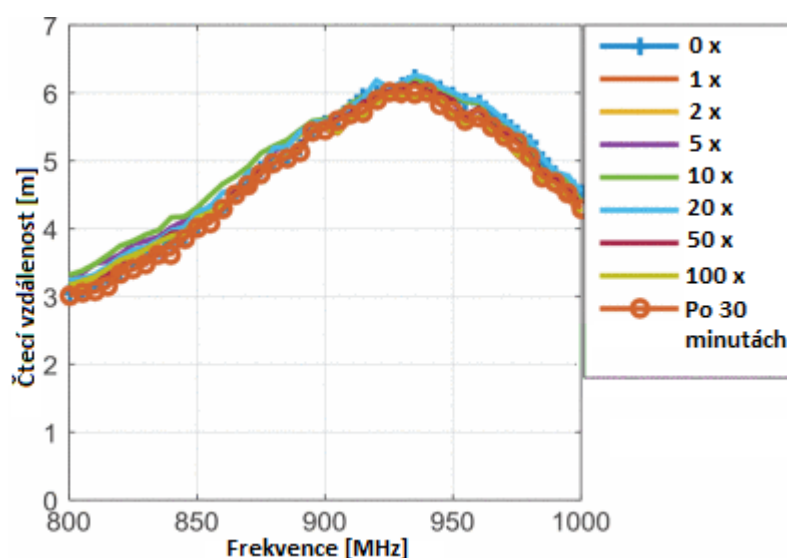
Na obrázku č. 29 jsou výsledky měření stejnou metodikou, ale po ošetření IC se lepidlem ošetří i celý tag. Po deseti pracích cyklech dosahuje tag čtecí vzdálenosti přibližně 4 metry, což je o 1,3 metru větší dosažená čtecí vzdálenost, než když tag není ošetřen ochrannou vrstvou.



Obr. č. 29: Výsledky testování ošetřeného elektrotextilního tagu [51].

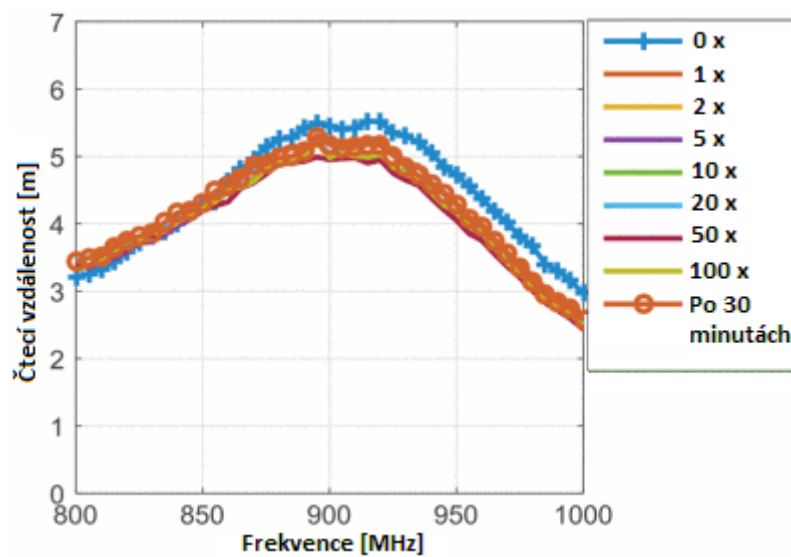
Na základě výzkumu v těchto ([37][51]) publikacích lze tedy ochranné ošetření pro použití textilních RFID tagů jakožto nositelné elektroniky označit za klíčové při údržbě (praní) tohoto typu oblečení.

Dalším problémem při aplikaci textilních RFID tagů do nositelné elektroniky je neustálé natahování a ohýbání v důsledku pohybu lidského těla. Testování v [52] spočívá v roztahování elektrotextilního a vyšíváného tagu v cyklech z délky 165,71 cm na 167,71 po dobu dvou sekund, a poté zpět. Dosažená čtecí vzdálenost je měřena po určitém množství těchto cyklů, a poté znovu po třiceti minutách od posledního cyklu. Výsledek testování vyšíváného tagu je na obrázku č. 30, ve kterém je vidět, že čtecí vzdálenosti 6,3 m dosahuje tag jak před testem, tak i po sto cyklech roztahování. Na vyšívávaný tag tedy nemá roztahování v tomto měřítku (o 2 cm) citelný vliv.



Obr. č. 30: Testování roztahování vyšíváného tagu v cyklech a po třiceti minutách od posledního cyklu [52].

Elektrotextilní tag má před prvním cyklem čtecí vzdálenost přibližně 5,5 metru, hned po prvním cyklu už dosahuje o 50 cm menší čtecí vzdálenosti, tedy 5 metrů. Při dalších cyklech už se ale nesnižuje, a ani třicetiminutový odpočinek nevrátil tagu původní čtecí vzdálenost, stále dosahuje 5 metrů. To je velmi pravděpodobně dáno strukturou materiálu, který jemně změní tvar při natažení, a do původního stavu se nevrátí okamžitě. Viz obrázek č. 31.

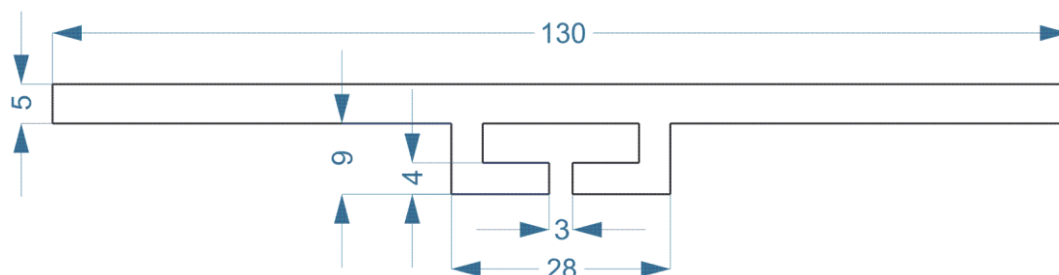


Obr. č. 31: Testování roztahování elektrotextilního tagu v cyklech a po třiceti minutách od posledního cyklu [52].

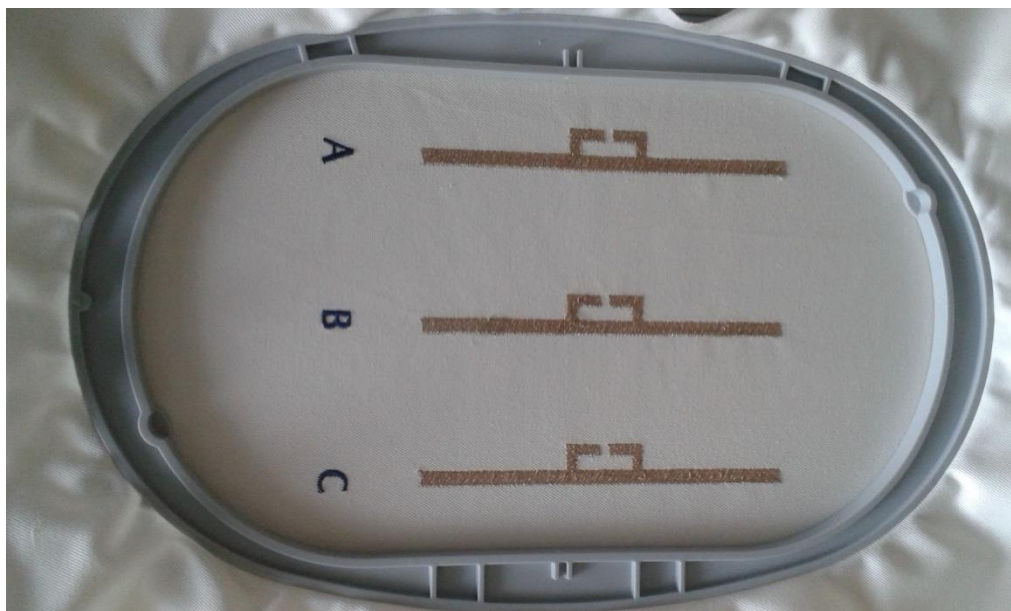
4 Návrh textilního RFID tagu

Návrh textilního RFID tagu je založen na poznacích z literatury doporučené k vypracování této bakalářské práce, konkrétně [53]. Anténa tagu je navržena a vyšívána jako dipólová UHF pro aplikace typu nositelné elektroniky.

Anténa byla vyšita pomocí šicího stroje Bernina QE750, její návrh byl vytvořen v programu CorelDRAW x6. Nicméně jelikož tento šicí stroj neumí pracovat se surovými daty z programu CorelDRAW, bylo potřeba ho převést v programu Bernina Designer Plus, který návrh automaticky přetransformuje na výšivku [54][55]. Návrh je zobrazen v obrázku č. 32. Vyšitá anténa je na obrázcích č. 33 a 34.



Obr. č. 32: Okótovaný návrh antény textilního tagu v programu CorelDRAW x6.



Obr. č. 33: Realizovaný návrh antény textilního RFID tagu pomocí šicího stroje Bernina QE750.



Obr. č. 34: Detail realizované antény textilního RFID tagu vyšitého pomocí šicího stroje Bernina QE750.

Takto vyrobená anténa je připravena pro osazení a nakontaktování IC, který bude v tomto případě pasivní UHF čip. Možný čip pro osazení je například Alien Higgs-3, který disponuje 800 bity paměti, z toho 512 bitů uživatelské paměti, která je programovatelná [56]. Výrobce daná čtecí vzdálenost je až 10 metrů, ale reálně se dá předpokládat čtecí vzdálenost znatelně menší.

Závěr

Cesta k vyvinutí technologie Radiofrekvenční Identifikace započala už ve čtyřicátých letech minulého století, a urazila dlouhou cestu před tím, než uzrála do stavu, ve kterém ji známe dnes. Technologie RFID je velmi obsáhlé téma, které má mnoho větví, dělní a aplikací.

Konvenční RFID tagy nacházejí své uplatnění především v aplikacích denního užití, jako jsou například přístupové karty s různým, a mnohdy několikanásobným využitím, správa a značení zboží v dodavatelském řetězci, automotive aplikace, nebo zemědělství. I když se může zdát, že jsou pouze můstkem k zajímavějším a složitějším nekonvenčním tagům, není tomu tak, a v budoucnu budou jistě jak konvenční, tak nekonvenční RFID tagy společně dominovat identifikaci, ale především automatické identifikaci, zboží, zvířat a identity lidí.

Nekonvenční RFID tagy jsou ve své podstatě složitější, a v dnešní době ne dokonale zvládnutou technologií, která má stále spoustu zádrhelů a limitů ve svém používání. Světlá stránka je, že je pouze otázkou času, než se veškeré, nebo alespoň naprostá většina, zádrhelů vyřeší, a budou levnou a široce aplikovatelnou technologií.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] “What is RFID? - EPC-RFID/EPC-RFID.” [Online]. Available: <https://www.epc-rfid.info/rfid>. [Accessed: 17-Feb-2018].
- [2] “What is RFID?” [Online]. Available: <http://www.technovelgy.com/ct/technology-article.asp>. [Accessed: 18-Feb-2018].
- [3] J. Landt, “The history of RFID,” *IEEE Potentials*, vol. 24, no. 4, pp. 8–11, 2005.
- [4] H. Stockman, “Communication by Means of Reflected Power,” *Proc. IRE*, vol. 36, no. 10, pp. 1196–1204, 1948.
- [5] D. B. Harris, “Radio transmission systems with modulatable passive responder.” 01-Mar-1960.
- [6] R. F. Harrington, “Theory of loaded scatterers,” *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 111, no. 4, p. 617, 1964.
- [7] J. H. Vogelmann, “Passive data transmission techniques using radar echoes,” 18-May-1968.
- [8] A. R. Koelle, S. W. Depp, and R. W. Freyman, “Short-range radio-telemetry for electronic identification, using modulated RF backscatter,” *Proc. IEEE*, vol. 63, no. 8, pp. 1260–1261, 1975.
- [9] J. Landt, “The history of RFID,” *IEEE Potentials*, vol. 24, no. 4, pp. 8–11, Oct. 2005.
- [10] “Tollways_1973_7,” *Tollways*, 1973. [Online]. Available: https://www.ibtta.org/sites/default/files/documents/Archive/1970%27s/1973_7.pdf.
- [11] M. Roberti and B. Violino, “The History of RFID Technology,” *Energy*, pp. 1–3, 2007.
- [12] RFID4u, “Active RFID versus passive RFID | RFID4U.” [Online]. Available: <https://rfid4u.com/rfid-basics-resources/how-to-select-a-correct-rfid-tag-passive-vs-active/>. [Accessed: 08-May-2018].
- [13] “The Complete Active RFID Overview.” [Online]. Available: <https://www.airfinder.com/blog/active-rfid>. [Accessed: 08-May-2018].
- [14] S. Mason, J. Chimka, T. Yeung, and M. Greiner, *Commercial Practices as Applied to Total Asset Visibility*. 2003.
- [15] “Frequency ranges for RFID – IdentSystem AB.” [Online]. Available: <https://www.identsystem.com/2018/02/27/frequency-ranges-rfid/>. [Accessed: 16-May-2018].
- [16] S. Armstrong, “Which RFID Frequency is Right for Your Application?,” 2012. [Online]. Available: <https://blog.atlasrfidstore.com/which-rfid-frequency-is-right-for-your-application>. [Accessed: 16-May-2018].
- [17] Linlin Zheng, S. Rodriguez, Lu Zhang, Botao Shao, and Li-Rong Zheng, “Design and implementation of a fully reconfigurable chipless RFID tag using Inkjet printing technology,” in *2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2008, pp. 1524–1527.

- [18] A. Vena *et al.*, “Design and realization of stretchable sewn chipless RFID tags and sensors for wearable applications,” in *2013 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, 2013, pp. 176–183.
- [19] Jae Han Choi, Yeonho Kim, Kyoungwan Lee, and You Chung Chung, “Various wearable embroidery RFID tag antenna using electro-thread,” in *2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008, pp. 1–4.
- [20] “PK-JIS - Plzeňská karta.” [Online]. Available: <http://www.plzenskakarta.cz/pk-jis/prokoho-je-urcena/>. [Accessed: 27-May-2018].
- [21] “ICT | Choosing Card Technology.” [Online]. Available: <https://www.ict.co/Choosing-Card-Technology>. [Accessed: 27-May-2018].
- [22] T. Norman, “How Electronic Access Control Systems Work,” in *Electronic Access Control*, Elsevier, 2012, pp. 35–48.
- [23] C.-L. Mak, “Passive UHF RFID tag designs for automatic vehicle identification,” in *2017 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM)*, 2017, pp. 61–63.
- [24] P. K. Tarushi Wasson, Tanupriya Choudhury, Shilpi Sharma, “Integration of RFID and sensor in agriculture using IOT - IEEE Conference Publication,” *Smart Technol. Smart Nation (SmartTechCon), Int. Conf.*, pp. 217–222, 2017.
- [25] M. S. Umar, J. A. Ansari, and M. Q. Rafiq, “Automated Retail Store Based on RFID,” in *2013 International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 2013, pp. 17–21.
- [26] K. T. Patil, V. Bansal, V. Dhateria, and S. K. Narayankhedkar, “Probable causes of RFID tag read unreliability in supermarkets and proposed solutions,” in *2015 International Conference on Information Processing (ICIP)*, 2015, pp. 392–397.
- [27] Z. Neustupa, R. Danel, P. Stasa, F. Benes, and J. Svub, “Ensuring the security of warehouse using automatic identification by RFID,” in *Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2015, pp. 338–342.
- [28] P. Stasa, F. Benes, J. Svub, and Z. Neustupa, “Monitoring and evidence of cars in private objects,” in *Proceedings of the 2014 15th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 2014, pp. 545–550.
- [29] R. E. Floyd, “RFID in Animal-Tracking Applications,” *IEEE Potentials*, vol. 34, no. 5, pp. 32–33, Sep. 2015.
- [30] L. Catarinucci *et al.*, “An innovative animals tracking system based on passive UHF RFID technology,” in *2012 20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2012*, 2012.
- [31] S.-H. Kim, D.-H. Kim, and H.-D. Park, “Animal Situation Tracking Service Using RFID, GPS, and Sensors,” in *2010 Second International Conference on Computer and Network Technology*, 2010, pp. 153–156.
- [32] C.-F. Huang and J.-H. Lin, “A warning system based on the RFID technology for running-out of injection fluid,” *Conf. Proc. ... Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf.*, vol. 2011, pp. 2212–5, Aug. 2011.

- [33] E. Zeisel, “Comparison of NFC, Barcode to RFID Inventory Tracking,” 2017. [Online]. Available: <https://rfid4u.com/comparison-of-rfid-nfc-and-barcode-for-inventory-tracking-part-2-nfc-barcode/>. [Accessed: 27-May-2018].
- [34] E. Zeisel, “Comparison of RFID, NFC and Barcode for Inventory Tracking | RFID4U,” 2017. [Online]. Available: <https://rfid4u.com/comparison-of-rfid-nfc-and-barcode-for-inventory-tracking-part-1-rfid/>. [Accessed: 27-May-2018].
- [35] Advanced Mobile Group, “The Shocking Price of RFID Tags,” 2016. [Online]. Available: <http://www.advancedmobilegroup.com/blog/the-true-price-of-rfid-tags>. [Accessed: 05-Jun-2018].
- [36] S. Amendola, A. Palombi, and G. Marrocco, “Inkjet Printing of Epidermal RFID Antennas by Self-Sintering Conductive Ink,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 3, pp. 1561–1569, Mar. 2018.
- [37] M. Guibert *et al.*, “Washing reliability of painted, embroidered, and electro-textile wearable RFID tags,” in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, 2017, pp. 828–831.
- [38] Y. Liu, A. Levitt, C. Kara, C. Sahin, G. Dion, and K. R. Dandekar, “An improved design of wearable strain sensor based on knitted RFID technology,” in *2016 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, 2016, pp. 1–4.
- [39] M. Akbari, M. W. A. Khan, M. Hasani, T. Bjorninen, L. Sydanheimo, and L. Ukkonen, “Fabrication and Characterization of Graphene Antenna for Low-Cost and Environmentally Friendly RFID Tags,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 15, pp. 1569–1572, 2016.
- [40] M. Akbari, L. Sydanheimo, Y. Rahmat-Sami, J. Virkki, and L. Ukkonen, “Implementation and performance evaluation of graphene-based passive UHF RFID textile tags,” in *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, 2016, pp. 447–449.
- [41] J. Ren *et al.*, “Environmentally-friendly conductive cotton fabric as flexible strain sensor based on hot press reduced graphene oxide,” *Carbon N. Y.*, vol. 111, pp. 622–630, Jan. 2017.
- [42] S. Merilampi, Han He, L. Sydanheimo, L. Ukkonen, and J. Virkki, “The possibilities of passive UHF RFID textile tags as comfortable wearable sweat rate sensors,” in *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, 2016, pp. 3984–3987.
- [43] T. Kuroda, H. Takahashi, and A. Masuda, “Woven Electronic Textiles,” in *Wearable Sensors*, Elsevier, 2014, pp. 175–198.
- [44] D. Patron, K. Gedin, T. Kurzweg, A. Fontecchio, G. Dion, and K. R. Dandekar, “A wearable RFID sensor and effects of human body proximity,” in *2014 IEEE Benjamin Franklin Symposium on Microwave and Antenna Sub-systems for Radar, Telecommunications, and Biomedical Applications (BenMAS)*, 2014, pp. 1–3.
- [45] X. Chen *et al.*, “Electro-textile glove-tags for wearable RFID applications,” in *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2017, pp. 1–2.
- [46] L. Muguira, J. I. Vazquez, A. Arruti, J. R. de Garibay, I. Mendia, and S. Renteria, “RFIDGlove: A Wearable RFID Reader,” in *2009 IEEE International Conference on e-Business Engineering*, 2009, pp. 475–480.
- [47] S. Manzari, C. Occhiuzzi, and G. Marrocco, “Feasibility of Body-Centric Systems Using

- Passive Textile RFID Tags,” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 54, no. 4, pp. 49–62, Aug. 2012.
- [48] L. Ukkonen, L. Sydanheimo, and Y. Rahmat-Samii, “Sewed textile RFID tag and sensor antennas for on-body use,” in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2012, pp. 3450–3454.
- [49] A. Gomide Foina, R. M. Badia, A. El-Deeb, and F. J. Ramirez-Fernandez, “Player Tracker - a tool to analyze sport players using RFID,” in *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, 2010, pp. 772–775.
- [50] S. Shao, A. Kiourti, R. Burkholder, and J. Volakis, “Broadband and flexible textile RFID tags for tires,” in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, pp. 1507–1507.
- [51] Y. Y. Fu *et al.*, “Experimental Study on the Washing Durability of Electro-Textile UHF RFID Tags,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 14, pp. 466–469, 2015.
- [52] X. Chen, H. He, L. Chen, P. Raunonen, L. Ukkonen, and J. Virkki, “Two-part stretchable passive UHF RFID textile tags,” in *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*, 2017, no. Type 1, pp. 3318–3321.
- [53] E. Moradi, T. Bjorninen, L. Ukkonen, and Y. Rahmat-Samii, “Characterization of embroidered dipole-type RFID tag antennas,” in *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, 2012, pp. 248–253.
- [54] M. Pavec *et al.*, “A comparison of embroidered and screen-printed Ultra-Wideband antennas,” in *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2017.
- [55] “vyšívací software Bernina Designer Plus 8 | Šicí-Centrum.cz.” [Online]. Available: <https://www.sici-centrum.cz/vysivaci-software-bernina-designer-plus-8>. [Accessed: 06-Jun-2018].
- [56] “Higgs® 3 | Alien Technology.” [Online]. Available: <https://www.alientechnology.com/products/ic/higgs-3/>. [Accessed: 06-Jun-2018].