

DRONY A JEJICH BUDOUCNOST U NÁS I VE SVĚTĚ

UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS AND THEIR FUTURE LOCALLY AND GLOBALLY

pplk. Mgr. Tomáš Novotný, Ph.D.
Policejní akademie České republiky v Praze, P.O. Box 54,
Lhotecká 559/7, 143 00Prha 12 – Kamýk
kontakt: tnovotny@polac.cz

Abstrakt

Tato přehledová studie předkládá holistickou a kritickou analýzu evoluce bezpilotních leteckých systémů (UAS) a predikuje jejich vývojové trajektorii do roku 2035. Práce se zaměřuje na identifikaci kauzálních vztahů, které vedly k přerodu technologií z exkluzivní vojenské sféry do masového civilního sektoru. Výzkum analyzuje historické milníky od raných prekurzorů z 19. století přes studenou válku až po technologický zlom po roce 2010, kdy miniaturizace komponentů iniciovala masovou produkci dronů. Práce kriticky hodnotí harmonizovanou legislativu EASA a analyzuje specifické postavení i akademicko-průmyslový potenciál České republiky v kontextu evropského trhu. Interdisciplinární metodologický rámec kombinuje inženýrské přístupy s metodami právní exegeze, ekonomické komparace a technologického forecastingu. Výsledkem je ucelený analytický vhled do kybernetických, materiálových a socio-etických výzev, které budou zásadním způsobem formovat strukturu

a bezpečnost budoucího trojrozměrného digitálního vzdušného prostoru.

Klíčová slova: bezpilotní letecké systémy, autonomie, legislativa EASA, U-space, technologický vývoj, městská mobilita.

Abstract

This review study presents a holistic and critical analysis of the evolution of unmanned aerial systems (UAS) and predicts their development trajectory through 2035. The study focuses on identifying the causal relationships that led to the transition of these technologies from the exclusive military sphere to the mass civilian sector. The research analyzes historical milestones from early precursors in the 19th century through the Cold War to the technological breakthrough after 2010, when the miniaturization of components initiated the mass production of drones. The study critically evaluates harmonized EASA legislation and analyzes the specific position and academic-industrial potential of the Czech Republic in the context of the European market. The interdisciplinary methodological framework combines engineering approaches with methods of legal exegesis, economic comparison, and technological forecasting. The result is a comprehensive analytical insight into the cybernetic, material, and socio-ethical challenges that will fundamentally shape the structure and safety of the future three-dimensional digital airspace.

Keywords: unmanned aerial systems, autonomy, EASA legislation, U-space, technological development, urban mobility.

Obsah

UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS AND THEIR FUTURE LOCALLY AND GLOBALLY	1
Abstrakt	1
1.1 Rané kořeny a éra mechanické automatizace (1849–1918).....	6
1.2 Meziválečná epocha, druhá světová válka a studená válka (1919–1989).....	7
1.3 „Smartphone revoluce“ a demokratizace technologie po roce 2010	7
1.4 Technologický přerod: Od spotřební elektroniky k celoevropskému firemnímu standardu.....	8
2.1 Průmyslová a urbánní logistika: Transformace konceptu „Last-Mile Delivery“	10
2.2 Precizní zemědělství (Smart Farming): Multispektrální analýza a robotická aplikace	11
2.3 Bezpečnost, monitoring kritické infrastruktury a taktické operace	11
2.4 Umělá inteligence, rojové technologie a vyšší stupně autonomie.....	12
3.1 Transpozice evropské legislativy a národní specifikace (ÚCL, ŘLP)	14
3.2 Struktura českého B2B trhu a průmyslový ekosystém.....	15
3.3 Výzkum, vývoj a akademická excelence (MRS ČVUT, VUT).....	15
4.1 Limity akumulace energie a alternativní pohony	17
4.2 Umělá inteligence na okraji sítě (Edge AI).....	17
4.3 Integrace do sítí 5G a 6G	18
4.4 Kybernetická bezpečnost a elektronický boj	18
5.1 Ochrana soukromí a osobních údajů.....	20
5.2 Integrace dronů a městská letecká mobilita	20
5.3 Architektura systému U-Space	20
5.4 Etika autonomního zbraňového nasazení.....	21
Predikce vývoje do roku 2035	22
1. Plná integrace a vizuální i akustická „neviditelnost“	22
2. Autonomizace a transformace lidského faktoru v mezifiremním sektoru	22
3. Energetická renesance a prolomení limitů	22
Závěrečné shrnutí	23

Úvod

Bezpilotní letecké systémy (Unmanned Aircraft Systems – UAS), v diskurzu laické veřejnosti i masmédií téměř výhradně označované jako „drony“, představují jednu z nejvýznamnějších technologických změn raného 21. století. Rychlost, s jakou tato technologie pronikla z marginálních vojenských výzkumných laboratoří do civilního sektoru, komerční sféry a každodenního života občanů, nemá v moderní historii letectví obdoby. Zatímco klasické pilotované letectví procházelo evolučním vývojem trvajícím celé století pod rigidním dohledem národních a mezinárodních regulačních orgánů, oblast UAS vykazuje znaky exponenciálního růstu, typického spíše pro segment spotřební elektroniky a informačních technologií (Nonami, 2014).

Tento asymetrický vývoj staví moderní společnost před komplexní sérii výzev. UAS již nelze vnímat izolovaně jako pouhé mechanické stroje určené k letu. Představují konvergenci pokročilé aerodynamiky, materiálového inženýrství, kyberneticko-fyzikálních systémů a v poslední dekádě zejména aplikované umělé inteligence (AI). Masové nasazení dronů redefinuje tradiční koncepty suverenity vzdušného prostoru, transformuje logistické řetězce, přináší revoluci do průmyslových inspekcí a precizního zemědělství, avšak zároveň generuje hluboké etické, právní a bezpečnostní otázky, které dosavadní legislativní architektura nedokáže v reálném čase reflektovat (Floreano a Wood, 2015).

Axiomem současného vývoje je transformace vzdušného prostoru v takzvanou „trojrozměrnou digitální platformu“. Tradiční letectví operovalo primárně ve vysokých letových hladinách a bylo striktně separováno od urbanizovaných center. UAS naopak směřují do velmi nízkých letových výšek (Very Low Level – VLL), tedy do prostoru bezprostředně nad lidskými obydlími, infrastrukturou a přírodními ekosystémy. Tato prostorová těsná prostorová blízkost radikálně mění vnímání rizik spojených

s leteckým provozem a vyžaduje zcela nový vědecký přístup k hodnocení bezpečnosti, spolehlivosti a společenské akceptovatelnosti (Austin, 2011).

V akademické literatuře i v normativních aktech nadnárodních regulátorů docházelo v průběhu času k evoluci názvosloví, což dodnes vede k terminologickým nejasnostem. Pro účely této přehledové studie je nezbytné provést exaktní terminologickou demarkaci a definovat hierarchické vztahy mezi jednotlivými pojmy.

Nejstarším a nejužším vědeckým termínem je UAV (Unmanned Aerial Vehicle) – bezpilotní letadlo. Tento pojem referuje exkluzivně o samotném fyzickém letounu (aerodynamické platformě), které je schopné řízeného letu bez přítomnosti lidského pilota na palubě. Letoun může být řízen dálkově, nebo létat autonomně na základě předem naprogramovaných letových plánů (Keene, 2012). Z hlediska systémové teorie je však UAV pouze subsystémem vyššího celku. Izolované UAV není samo o sobě schopné efektivního operačního nasazení.

Z tohoto důvodu Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) a Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA) zavedly komplexnější unifikovaný termín UAS (Unmanned Aircraft System) – systém bezpilotního letadla. Systémový přístup uznává, že bezpečný a efektivní provoz vyžaduje synergii celé řady prvků. Podle

definice, kterou uvádí Reg Austin (2011), se UAS skládá z následujících kritických komponent:

- **Fyzická platforma (UAV):** Samotné letadlo s pevným křídlem (fixed-wing), vícerotorové (multikoptéra) nebo hybridní konfigurace s vertikálním startem a přistáním (VTOL).
- **Pozemní řídicí stanice (GCS - Ground Control Station):** Hardwarové a softwarové uživatelské rozhraní umožňující operátorovi monitorovat a aktivně kontrolovat parametry letu.
- **Datový spoj (C2 Link - Command and Control):** Obousměrná radiová, satelitní nebo celulární komunikace zajišťující přenos řídicích povelů a telemetrických dat v reálném čase.
- **Užitečné zatížení (Payload):** Optické a termální kamery, multispektrální sensory, LiDAR, aplikátory chemických postřiků či transportní boxy, které definují primární účel mise.
- **Lidský činitel:** Pilot na dálku (Remote Pilot), pozorovatel bezpilotního letadla (UA observer) a specializovaný pozemní personál technické údržby.

Specifickou podskupinou v rámci struktur UAS jsou pak systémy označované jako RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems). ICAO tento termín používá pro ty bezpilotní systémy, kde je pilot na dálku v každém okamžiku letu schopen převzít přímé manuální řízení stroje (Zalabský, 2016). RPAS jsou z legislativního hlediska nejnáze integrovatelné do sdíleného vzdušného prostoru, protože přesně kopírují tradiční filozofii pilotovaného letectví, pouze s pilotem dislokovaným mimo kokpit. Naopak systémy plně autonomní, kde o trajektorii letu a řešení krizových situací rozhoduje výhradně palubní algoritmus bez možnosti okamžité intervence člověka, spadají pod širší definici UAS, ale nesplňují kritéria RPAS (Zalabský, 2016).

Primárním cílem této práce je předložit holistickou, kritickou analýzu současného stavu bezpilotního letectví a predikovat jeho vývojové trajektorie do roku 2035, s akcentem na komparaci globálních trendů a specifické situace v České republice (Nonami, 2014). K dosažení tohoto hlavního cíle je práce rozdělena do několika parciálních cílů:

- Provázat historický vývoj vojenských technologií s mechanismy, které vedly k současnému civilnímu komerčnímu boomu (Kapitola 2).
- Analyzovat a zhodnotit efektivitu nasazení UAS v klíčových globálních vertikálách, jako je logistika, precizní zemědělství a průmyslová bezpečnost (Kapitola 3).
- Kriticky zhodnotit implementaci evropského legislativního rámce v ČR a popsat strukturu tuzemského akademicko-průmyslového ekosystému (Kapitola 4).
- Identifikovat fundamentální technologické, materiálové a kybernetické hrozby, které představují bariéry pro budoucí rozvoj (Kapitola 5).
- Otevřít diskusi nad socio-etickými aspekty, ochranou soukromí v éře plné digitalizace a konceptem U-Space (Kapitola 6).

Základem výzkumu je systematická rešerše recenzované vědecké literatury indexované v databázích Scopus a Web of Science, hloubková analýza strategických dokumentů a bílých knih (White Papers) mezinárodních organizací jako ICAO, EASA

či FAA, a v neposlední řadě vyhodnocení empirických dat získaných z reálného provozu bezpilotních systémů v České republice i v zahraničí (Gupta a kol., 2016). Tento robustní metodologický základ zajišťuje, že předkládaná studie nepředstavuje pouze deskriptivní přehled, ale nabízí hluboký analytický vhled do kauzálních vztahů, které budou formovat vzdušný prostor budoucnosti.

1 Historický exkurz a technologický vývoj: Od vojenských počátků k civilnímu boomu

Kapitola věnující se vzniku a vývoji UAV od počátků až po současnost.

1.1 Rané kořeny a éra mechanické automatizace (1849–1918)

Historická éra bezpilotního létání je vnitřně, strukturálně a kauzálně spjata s dějinami vojenských konfliktů a s permanentní snahou vojenských stratégů o eliminaci lidských ztrát při vysoce rizikových operacích. První doložený a technicky popsáný pokus o distanční vzdušný útok bez lidské posádky na palubě se datuje do srpna roku 1849. Během první italské války za nezávislost využila rakouská armáda pod velením maršála Radeckého k obléhání Benátek balóny naplněné horkým vzduchem a nesoucí výbušné nálože o hmotnosti přibližně 15 kg.

Jak ve své historicko-technické monografii uvádí Thomas Keene (2012), tyto balóny byly vypouštěny z lodi SMS Vulcano a jejich „autonomie“ byla založena na primitivním mechanickém časování: délka hoření zápalné šňůry byla exaktně spočítána na základě tehdejší rychlosti a směru větru tak, aby k odhození bomby došlo nad centrem města. Ačkoliv byl efekt této operace kvůli nepředvídatelným poryvům větru vojensky marginální, z epistemologického hlediska šlo o první praktické nasazení bezpilotního vzdušného prostředku (UAV).

Skutečný technologický průlom však nastal až na přelomu 19. a 20. století v souvislosti s objevem bezdrátové telegrafie a principů radiového řízení. Klíčový milník představuje rok 1898, kdy vynálezce Nikola Tesla demonstroval v Madison Square Garden v New Yorku dálkově ovládané plavidlo (teleautomaton). Tesla tímto experimentem položil exaktní matematické a inženýrské základy telemechaniky, na kterých dodnes staví architektury datových spojů (C2 Link) moderních UAS (Zalabský, 2016).

Vypuknutí první světové války (1914–1918) působilo jako masivní katalyzátor státních investic do letectví. Vznikly první projekty, které můžeme z dnešní perspektivy označit za přímé prekurzory střel s plochou dráhou letu i autonomních UAV (Austin, 2011). Spojené státy americké iniciovaly vývoj systémů Hewitt-Sperry Automatic Airplane (1916) a následně legendárního aparátu Kettering Bug (1918).

Tento projekt, vedený Charlesem Ketteringem, byl de facto bezpilotním dvojplošníkem poháněným čtyřválcovým motorem o výkonu 40 koní. Stabilizace letu byla zajištěna interním mechanickým gyroskopem a barometrickým výškoměrem. Po uletění předem vypočítaného počtu otáček motoru, což korelovalo s konstantní vzdáleností k cíli, mechanické počítadlo uvolnilo křídla, trup letounu naplněný 80 kg výbušnin dopadl na zem a explodoval. Jak podotýká Reg Austin (2011), projekt Kettering Bug sice nebyl kvůli uzavření příměří nasazen na evropském bojišti, ale definoval základní inženýrské paradigma: letadlo bez lidské posádky vyžaduje uzavřenou regulační smyčku integrující sensory (gyroskopy) a mechanické akční členy.

1.2 Meziválečná epocha, druhá světová válka a studená válka (1919–1989)

Během meziválečného období se těžiště vývoje bezpilotních prostředků dočasně přesunulo od útočných zbraní k vývoji cvičných cílů pro protiletectvé dělostřelectvo (Keene, 2012). Britské královské letectvo (RAF) v roce 1935 úspěšně modifikovalo dvouplošník de Havilland Tiger Moth na dálkově rádiem řízený letoun DH.82B Queen Bee. Právě tento konkrétní stroj dal bezpilotnímu letectví jeho celosvětově nejznámější, byť familiární název. Slovo „dron“ (v angličtině trubec) bylo zvoleno jako humorná narážka na monotónní bzučivý zvuk motoru tohoto stroje a na jeho slepou podřízenost povelům z mateřské lodi.

Druhá světová válka přinesla první masové průmyslové nasazení bezpilotní techniky (Zalabský, 2016). Nacistické Německo vyvinulo a operačně nasadilo střely V-1 (Fieseler Fi 103), poháněné pulzním motorem, a rádiem řízené klouzavé bomby Henschel Hs 293 určené k ničení spojeneckého loďstva. Na straně Spojených států byl realizován projekt Aphrodite, v jehož rámci byly opotřebované těžké bombardéry B-17 naloženy výbušninami, dálkově navedeny pilotem z doprovodného letounu a použity k ničení německých bunkrů. Projekt však byl po velice krátké době ukončen.

Geopolitická konfrontace během studené války (1947–1989) radikálně změnila doktrínu využití UAV. Sestřelení amerického špionážního letounu U-2 s pilotem Gary Powersem nad územím Sovětského svazu v roce 1960 jasně ukázalo neúnosnost politických a lidských rizik spojených s pilotovaným průzkumem nad nepřátelským územím. Pentagon proto urychleně financoval tajný program bezpilotních průzkumných proudových letounů řady Ryan Firebee (AQM-34). Tyto stroje byly vypouštěny z mateřských letadel DC-130 a během války ve Vietnamu provedly přes 3 400 utajených foto průzkumných misí (Keene, 2012).

Skutečnou revoluci v moderním taktickém pojetí UAS však nepřinesly supervelmoci, nýbrž stát Izrael. Během války v Libanonu (1982), konkrétně během operace Mole Cricket 19 v údolí Bikáa, integroval izraelský zbrojní průmysl drony, jako byly IAI Scout a Tadiran Mastiff, do kombinovaných elektronických a raketových operací v reálném čase. Izraelské drony tehdy sloužily jako klamné cíle, které přiměly syrské baterie protivzdušné obrany sovětské výroby zapnout své naváděcí radary.

Kamery dronů přenášely živý videozáznam těchto pozic na velitelství, což umožnilo okamžité zničení 17 z 19 syrských raketových základen během pouhých dvou hodin bez jediné ztráty na straně izraelského letectva. Jindřich Zalabský (2016) tento moment označuje za klíčové epistemologické paradigma: „Izraelská doktrína transformovala dron z izolovaného létajícího aparátu na klíčový informační uzel integrovaného bojiště.“

1.3 „Smartphone revoluce“ a demokratizace technologie po roce 2010

Až do konce prvního desetiletí 21. století zůstávaly bezpilotní systémy kvůli extrémní finanční a technologické náročnosti exkluzivní doménou armádních rozpočtů –

reprezentovanou velkými strategickými drony typu MQ-1 Predator – nebo úzké skupiny vysoce specializovaných leteckých modelářů (Nonami, 2014). Zlomový okamžik, který odstartoval masový civilní boom a demokratizaci celé technologie, nastal kolem roku 2010. Tento přerod byl paradoxně umožněn externím faktorem – masivní celosvětovou expanzí trhu s chytrými telefony (smartphony).

Gigantický nárůst produkce smartphonů vedl k dramatickému útlumu cen a radikální miniaturizaci klíčových hardwarových komponent, které jsou identické s potřebami bezpilotních systémů:

- **Inerciální měřicí jednotky (IMU) na bázi MEMS:** Mikro-elektromechanické systémy umožnily integrovat gyroskopy a akcelerometry na plochu jednoho křemíkového čipu. To poprvé v historii umožnilo konstruovat levné, lehké a extrémně stabilní palubní řídicí jednotky (Flight Controllers), které dokážou v reálném čase matematicky dopočítávat polohu letadla v prostoru.
- **Lithium-polymerové (Li-Po) akumulátory:** Masivní investice do vývoje baterií pro mobilní elektroniku skokově zvýšily specifickou energetickou hustotu chemických zdrojů. To otevřelo cestu pro energeticky vysoce náročné platformy s vertikálním startem a přistáním (VTOL) – multikoptéry.
- **Bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC):** Tyto pohony nabídly bezprecedentní poměr výkonu k hmotnosti, vysokou spolehlivost a schopnost okamžitě měnit otáčky v řádu milisekund, což je kritický předpoklad pro stabilizaci vícerotorových dronů.

Jak ve své analýze uvádějí Floreano a Wood (2015), tato konvergence technologií umožnila v roce 2010 francouzské společnosti Parrot uvést na trh produkt AR.Drone – první komerčně úspěšnou multikoptéru ovládanou přes Wi-Fi pomocí chytrého telefonu. Skutečný celosvětový monopol a definici standardu civilního dronu však přinesla čínská společnost DJI (Da-Jiang Innovations) se svou řadou DJI Phantom v roce 2013 (Nonami, 2014).

DJI integrovala stabilizovaný kamerový závěs (gimbal), GPS modul a HD přenos videa do jednoho uživatelsky přívětivého balení připraveného k letu ihned po vybalení (Ready-to-Fly). Tím se drony transformovaly ze sféry kutilství a modelářství do masového trhu spotřební elektroniky a komerčních průmyslových aplikací.

1.4 Technologický přerod: Od spotřební elektroniky k celoevropskému firemnímu standardu

V současné fázi vývoje dochází k sekundárnímu technologickému přenosu (spin-off efektu), kdy se technologie vyvinuté pro masový spotřební trh zpětně profesionalizují a adaptují pro náročné B2B (Business-to-Business) průmyslové aplikace. Hračky pro nadšence se vyvinuly v certifikované pracovní nástroje (Austin, 2011).

Klíčovým aspektem tohoto přechodu je integrace pokročilých průmyslových sensorů, jako jsou termokamery s radiometrickým měřením, multispektrální sensory pro analýzu vegetačního indexu plodin a zejména LiDAR (Light Detection and Ranging). Jak ve svém výzkumu síťových architektur zdůrazňuje Lav Gupta (2016), obrovské objemy dat generované těmito senzory vytvořily masivní tlak na vývoj vysokorychlostních, šifrovaných a bezpečných komunikačních protokolů.

Historický exkurz jasně demonstruje, že bezpilotní letectví se vyvíjí v cyklech: od čistě vojenských jednoúčelových zbraní, přes civilní demokratizaci taženou mobilním průmyslem, až po současnou éru hluboké specializace a industrializace, kde se hlavní výzvou stává nikoliv samotný let, ale autonomní zpracování nasnímaných dat a bezpečná integrace strojů do globální ekonomické infrastruktury.

2 Současné trendy v globálním měřítku: Logistika, zemědělství, bezpečnost a autonomie

Kapitola zabývající se současným využitím UAV.

2.1 Průmyslová a urbánní logistika: Transformace konceptu „Last-Mile Delivery“

Komerční logistika a doručování zásilek na krátké vzdálenosti, v odborné terminologii označované jako Last-Mile Delivery (logistika posledního kilometru), tvoří v současnosti ekonomicky nejsledovanější vertikálu globálního trhu s bezpilotními systémy. Exponenciální nárůst e-commerce segmentu v uplynulých letech vytvořil enormní tlak na zefektivnění městské dopravy, snížení emisní zátěže a eliminaci kongescí na pozemních komunikacích. UAS jsou v tomto kontextu vnímány jako klíčový technologický substitut pro tradiční kurýrní automobily (Nonami, 2014).

Z hlediska provozní architektury prošel logistický segment transformací od nerealistických marketingových proklamací – typu projektu Amazon Prime Air z roku 2013 – k vysoce saturovanému a certifikovanému průmyslovému nasazení (Austin, 2011). Geografické těžiště masového nasazení doručovacích dronů se překvapivě nenachází v Severní Americe či západní Evropě, kde rozvoj naráží na rigidní regulaci hustého vzdušného prostoru, ale v rozvojových regionech Afriky a specifických aglomeracích Asie (Nonami, 2014).

Globálním lídrem v oblasti medicínské logistiky se stala americká společnost Zipline International, která realizovala stovky tisíc autonomních komerčních letů v Rwandě, Ghaně a posléze i v USA. Zipline nevyužívá multikoptéry, nýbrž plně autonomní letouny s pevným křídlem (fixed-wing VTOL), které jsou katapultovány z centrálních distribučních center. Tyto stroje dokážou operovat v okruhu až 80 kilometrů bez ohledu na povětrnostní podmínky a kvalitu pozemní infrastruktury. Zásilka – například krevní plazma, vakcíny či kritické léky – je v cílové destinaci shozena z nízké výšky na speciálním papírovém padáčku s milimetrovou přesností, načež se letoun vrací zpět na základnu. Floreano a Wood (2015) v časopise Nature uvádějí, že tento decentralizovaný systém distribuce zdravotnického materiálu zkrátí čas doručení

z původních čtyř hodin po silnici na průměrných dvacet minut, což prokazatelně vedlo k záchraně tisíců lidských životů.

V urbánním prostředí vyspělých megapolí – například v čínském Šen-čenu pod hlavičkou gigantu Meituan nebo v australském Brisbane prostřednictvím společnosti Wing patřící pod koncern Alphabet – se prosazuje odlišný koncept (Nonami, 2014). Používají se specializované multikoptéry vybavené sofistikovanými navigačními systémy, které spouštějí standardizované balíčky s potravinami či spotřebním zbožím na soukromé pozemky nebo do dedikovaných automatizovaných boxů. Tyto operace jsou plně integrovány do městských digitálních platforem a probíhají v režimu BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) pod dohledem automatizovaných systémů řízení (Austin, 2011).

2.2 Precizní zemědělství (Smart Farming): Multispektrální analýza a robotická aplikace

Zemědělský sektor představuje doménu, kde bezpilotní systémy generují nejvyšší okamžitou návratnost investic. V intencích konceptu Zemědělství 4.0 plní UAS duální, vzájemně se doplňující roli: roli diagnostickou v rámci dálkového průzkumu Země a roli exekutivní při řízené bodové aplikaci chemických látek (Zalabský, 2016).

V oblasti diagnostiky nahradily drony drahé a operativně nepružné satelitní snímkování či pilotované přelety (Floreano a Wood, 2015). Moderní agrární drony, jako je například řada eBee od společnosti senseFly, jsou vybaveny kalibrovanými multispektrálními a hyperspektrálními kamerovými systémy. Tyto sensory nesnímají pouze viditelné spektrum světla, ale selektivně analyzují odrazivost vegetace v blízkém infračerveném pásmu (NIR) a na okraji červeného spektra (RedEdge).

Získaná surová data jsou palubními či cloudovými systémy transformována do podoby ortofotomap a indexových map, nejčastěji za využití matematického algoritmu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Výpočet indexu je definován vztahem:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Kde NIR reprezentuje odrazivost v blízkém infračerveném pásmu a RED odrazivost ve viditelném červeném spektru. Výsledný koeficient, nabývající hodnot od -1 do +1, umožňuje agronomům exaktně identifikovat buněčnou strukturu chlorofylu v listech plodin. Tímto způsobem lze detekovat biotický i abiotický stres vegetace – způsobený suchem, nedostatkem dusíku, plísněmi či napadením škůdci – až o dva až tři týdny dříve, než jsou symptomy viditelné lidským okem (Zalabský, 2016).

Na diagnostickou fázi bezprostředně navazuje fáze exekutivní, realizovaná masivními aplikačními drony, jako jsou platformy DJI Agras či XAG (Zalabský, 2016). Tyto těžké koptéry, disponující nádržemi o objemu 30 až 50 litrů a sofistikovanými centrifugálními tryskami, dokážou na základě importovaných NDVI map aplikovat hnojiva či pesticidy s přesností na centimetry pouze na ta místa, kde je to prokazatelně nutné. Výhodou oproti klasické traktorové technice je stoprocentní eliminace utužování půdy (půdní kompaktor), schopnost pracovat v extrémně podmáčeném terénu a snížení celkového objemu aplikované chemie až o 30 až 40 %, což představuje zásadní ekonomický environmentální benefit (Zalabský, 2016).

2.3 Bezpečnost, monitoring kritické infrastruktury a taktické operace

V oblasti veřejné bezpečnosti, integrovaných záchranných systémů (IZS) a ostrahy kritické národní infrastruktury se bezpilotní systémy staly standardizovaným operačním prostředkem (Zalabský, 2016). Průmyslové koptéry určené pro tyto účely, jako je například řada DJI Matrice 300/350 RTK, vykazují vysokou odolnost proti povětrnostním vlivům (krytí IP55), široký teplotní rozsah fungování a jsou vybaveny

sduženými senzorovými hlavicemi (H20T), které integrují klasickou optickou kameru s masivním zoomem, laserový dálkoměr a radiometrickou termokameru.

Při záchranných operacích (Search and Rescue – SAR) umožňují drony provádět rychlý a bezpečný průzkum rozsáhlých nebo toxických oblastí – například při chemických haváriích, lesních požárech či zavalení budov (Floreano a Wood, 2015). Termovizní sensory dokážou lokalizovat tepelnou stopu pohřešované osoby v hustém lesním porostu nebo identifikovat skrytá ohniska požáru pod střechou budovy, což zásadně zvyšuje bezpečnost zasahujících hasičů.

V segmentu ostrahy kritické infrastruktury, kam spadají liniové stavby, plynovody, produktovody či jaderné elektrárny, dochází k masivnímu rozvoji konceptu Drone-in-a-Box (Austin, 2011). Jedná se o plně automatizované základny (hangáry) rozmístěné podél monitorované infrastruktury. Základna se v pravidelných intervalech autonomně otevře, dron odstartuje k předprogramovanému kontrolnímu přeletu, pomocí AI algoritmů detekuje anomálie – například narušení perimetru, úniky plynů na základě optické detekce plynů OGI, strukturální trhliny – a po návratu se v boxu automaticky nabije či vymění akumulátory bez jakékoliv nutnosti přítomnosti lidského personálu na místě (Gupta, 2016).

2.4 Umělá inteligence, rojové technologie a vyšší stupně autonomie

Fundamentálním globálním trendem, který propojuje všechny výše uvedené vertikály, je přechod od dálkového rádiového řízení (RPAS) k plné systémové autonomii. Tento posun je podmíněn implementací pokročilých algoritmů umělé inteligence a strojového učení přímo na palubním hardwaru dronu, tedy prostřednictvím tzv. Edge AI (Floreano a Wood, 2015). Jak ve své analýze síťové komunikace bezpilotních prostředků uvádí Lav Gupta (2016), klasické koncepce závislé na permanentním spojení s pozemní stanicí vykazují kritickou zranitelnost z hlediska latence datového přenosu, omezeného dosahu rádiového horizontu a náchylnosti k elektronickému rušení (jammingu).

Současné špičkové systémy proto integrují procesory pro akceleraci neuronových sítí, což letounům umožňuje v reálném čase realizovat procesy SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). Dron si pomocí stereokamer a LiDARu sám vytváří trojrozměrný model neznámého okolního prostoru, lokalizuje svou pozici a plánuje bezpečnou trasu letu. Tato schopnost je kritická v prostředích s odepřeným signálem globálních navigačních satelitních systémů (GNSS-denied environments), jako jsou vnitřní prostory budov, podzemní doly či oblasti aktivního elektronického boje (Singer a Friedman, 2014).

Paralelně s individuální autonomií probíhá intenzivní výzkum a nasazování rojových technologií (Swarm Intelligence). Reprezentují posun od izolovaných misí k distribuovaným, koordinovaným systémům (Gupta, 2016). Desítky či stovky dronů komunikují v rámci decentralizované ad-hoc sítě (FANET – Flying Ad-hoc Network). V tomto uspořádání neexistuje jediný řídicí uzel; pokud je část roje zničena nebo zarušena, zbývající drony autonomně reofsetují své pozice, přerozdělí si úkoly a pokračují v plnění mise na základě principů emergentního chování, inspirovaného biologickými strukturami v přírodě – například chováním včelstev či ptačích hejn (Floreano a Wood, 2015). V civilním sektoru se tento trend projevuje masivními

světelnými show nahrazujícími klasické ohňostroje, zatímco ve vojenském sektoru definuje novou epochu asymetrického válčení (Scharre, 2018).

3 Specifika a situace v České republice: Právní rámec, trh, výzkum a vývoj

Kapitola zabývající se situací v České republice.

3.1 Transpozice evropské legislativy a národní specifikace (ÚCL, ŘLP)

Česká republika představuje v evropském kontextu bezpilotního letectví vysoce specifický a dynamicky se rozvíjející region. Před rokem 2020 byl provoz bezpilotních letadel na území ČR regulován národním legislativním rámcem, konkrétně věhlasným Doplňkem X národního leteckého předpisu L 2, který spravoval Úřad pro civilní letectví (ÚCL). Tento předpis patřil k nejpřísnějším a nejvíce restriktivním v Evropě, neboť striktně odděloval rekreační a komerční provoz. Komerční subjekty musely podstupovat zdoluhavé schvalovací procesy, složité praktické zkoušky pilotů a platit vysoké správní poplatky za vydání Povolení k létání letadla bez pilota (Zalabský, 2016).

K zásadnímu legislativnímu zlomu došlo 31. prosince 2020, kdy Česká republika plně integrovala a implementovala jednotný unifikovaný legislativní rámec Evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA). Tento krok byl definován zejména Prováděcím nařízením Komise (EU) 2019/947 ze dne 24. května 2019 o pravidlech a postupech pro provoz bezpilotních letadel a Nařízením Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 (Evropská unie, 2019). Evropská legislativa de iure zrušila rozdíl mezi komerčním a rekreačním provozem a namísto toho zavedla kategorizaci provozu podle míry provozního rizika:

- **Kategorie Otevřená (Open):** Pokrývá operace s nízkou mírou rizika. Maxima jsou stanovena na vzletovou hmotnost stroje do 25 kg, maximální výšku letu 120 metrů nad úroveň země (AGL) a permanentní zachování přímého vizuálního kontaktu pilota s dronem (VLOS – Visual Line of Sight). Piloti v této kategorii musí projít povinnou online registrací provozovatele a úspěšně složit teoretické testy podkategorií A1, A2, A3 (Evropská unie, 2019).
- **Kategorie Specifická (Specific):** Zahrnuje středně rizikové lety, které překračují limity otevřené kategorie. Typicky se jedná o lety mimo vizuální dohled pilota (BVLOS), lety v hustě osídlených oblastech s těžšími drony nebo lety nad hranicí 120 metrů. Provoz vyžaduje buď dodržení standardních scénářů (STS), nebo podání individuální komplexní analýzy rizik metodologií SORA (Specific Operations Risk Assessment) a následné vydání schválení k provozu od ÚCL (Evropská unie, 2019).
- **Kategorie Certifikovaná (Certified):** Definuje vysoce rizikové operace, jako je přeprava osob (Urban Air Mobility) nebo nebezpečných nákladů. Standardy spolehlivosti hardwaru a licencování personálu zde plně odpovídají rigorózním standardům klasického pilotovaného letectví.

Státní podnik Řízení letového provozu České republiky (ŘLP ČR) společně s ÚCL úspěšně vyvinul a nasadil moderní digitální nástroje pro integraci tohoto rámce. Klíčovým prvkem je webová a mobilní aplikace Dronald, která slouží jako interaktivní průvodce legislativou pro širokou veřejnost, a systém Letecké prostory, jenž pilotům

poskytuje v reálném čase detailní informace o geografických zónách, zákazech letů – například kolem jaderných elektráren, národních parků či vojenských újezdů – a o dočasně omezených prostorech TRA/TSA (Zalabský, 2016).

Hlavním limitem a terčem kritiky ze strany českých technologických firem však zůstává administrativní délka a procesní náročnost schvalování žádostí v kategorii Specifická. Jak ve své monografii o systémovém inženýrství UAS uvádí Reg Austin (2011), flexibilita regulátora je přímo úměrná rychlosti inovací na trhu. V ČR proces schvalování pokročilých misí BVLOS často trvá řadu měsíců, což zpomaluje reálné komerční nasazení technologií.

3.2 Struktura českého B2B trhu a průmyslový ekosystém

Česká republika s ohledem na velikost svého trhu nedisponuje masovým výrobcem spotřebních dronů, který by dokázal konkurovat globálnímu čínskému monopolu společnosti DJI. Tuzemský komerční ekosystém se proto vysoce úspěšně adaptoval na strategii tržních nik (niche markets), vývoj pokročilých průmyslových systémů pro segment B2B, zakázkovou integraci senzorů a vojenské aplikace (Zalabský, 2016).

Vlajkovou lodí českého bezpilotního průmyslu na globálním trhu je společnost Primoco UAV SE. Tato společnost vyvíjí, vyrábí a celosvětově exportuje plně autonomní bezpilotní letouny s pevným křídlem, jako je model Primoco UAV One 150. Tyto stroje disponují maximální vzletovou hmotností 150 kg, užitečným zatížením až 30 kg, výdrží ve vzduchu přes 15 hodin a operačním doletem v řádu stovek kilometrů. Systém je plně certifikován dle vojenských standardů NATO (STANAG 4703) a nachází masové uplatnění při ostraze státních hranic, monitorování ropovodů a plynovodů či při taktických průzkumných misích (Zalabský, 2016). Výrobní úspěch Primoco UAV táhne i celou síť tuzemských subdodavatelů z oblasti kompozitních materiálů, přesného strojírenství a palubní elektroniky.

Dalším významným segmentem jsou specializované integrační a servisní firmy, jako je například brněnská společnost FlyFoto či pražská DronPro. Tyto subjekty se zaměřují na poskytování high-end služeb pro těžký průmysl, energetiku a stavebnictví. Provádějí milimetrově přesnou defektoskopii mostních konstrukcí, inspekce kotlů tepláren pomocí speciálních klecových dronů (např. systém Flyability Elios) a pokročilé letecké mapování lomů a liniových staveb metodou letecké fotogrammetrie a LiDARu.

Tento segment generuje obrovské objemy surových dat. Jak v této souvislosti upozorňuje Lav Gupta (2016) ve své studii o komunikačních sítích UAV, ekonomická hodnota komerčního nasazení dronu se již dávno neodvíjí od samotného faktu, že stroj létá, ale od schopnosti bezpečně přenést, zpracovat, analyzovat a interpretovat nasnímaná data. Český trh v tomto směru vykazuje vysokou úroveň softwarové expertízy v oblasti automatizovaného zpracování 3D mračen bodů (Point Clouds) a tvorby digitálních dvojčat kritické infrastruktury.

3.3 Výzkum, vývoj a akademická excelence (MRS ČVUT, VUT)

Pokud v nějaké oblasti bezpilotních technologií dosahuje Česká republika absolutní světové špičky, je to akademický výzkum v oblasti autonomního distribuovaného

řízení, robotiky a umělé inteligence (Floreano a Wood, 2015). Klíčovým a celosvětově uznávaným pracovištěm je Skupina multirobotických systémů (MRS), která působí na Katedře kybernetiky Fakulty elektrotechnické Českého vysokého učení technického (FEL ČVUT) v Praze pod vedením doc. Ing. Martina Sasky, Ph.D.

Tým MRS ČVUT se dlouhodobě specializuje na výzkum autonomního chování skupin bezpilotních helikoptér, lokalizace v prostředích bez signálu GPS (GNSS-denied) a na implementaci bio-inspirovaných algoritmů pro rojové létání. Tento akademický tým opakovaně demonstroval svou dominanci na mezinárodním poli, když zvítězil v extrémně náročných celosvětových soutěžích, jako je Mohamed Bin Zayed International Robotics Challenge (MBZIRC) v Abú Dhabí. Zde vědci z ČVUT v reálných pouštních podmínkách demonstrovali funkčnost autonomních algoritmů pro lokalizaci a odchyt nepřátelských dronů za letu a pro plně autonomní kooperativní mapování vnitřních i vnějších prostor budov (Floreano a Wood, 2015).

Výzkum skupiny MRS má přímé a zásadní implikace pro civilní i bezpečnostní praxi. Vyvinuté algoritmy umožňují dronům létat uvnitř historických budov a památek – například mapování interiérů chrámů a katedrál pro potřeby památkové péče – bez rizika nárazu a bez závislosti na externích navigačních systémech. Dron se orientuje výhradně na základě palubního SLAMu, zpracování obrazu z palubních kamer a dat z LiDARu (Floreano a Wood, 2015).

Významný výzkumný potenciál vykazuje také Vysoké učení technické v Brně (VUT), konkrétně Letecký ústav Fakulty strojního inženýrství, který se zaměřuje na pokročilé aerodynamické výpočty, materiálový výzkum draků letadel a optimalizaci hybridních pohonů (Austin, 2011). Výzkumu bezpilotních technologií pro potřeby obrany státu se intenzivně věnuje také státní podnik Vojenský technický ústav (VTÚ) (Zalabský, 2016).

Hlavní strukturální slabinou českého ekosystému však zůstává takzvaný „valley of death“ – údolí smrti transferu technologií. Propast mezi špičkovými teoretickými algoritmy vyvinutými na univerzitách a jejich reálnou komercializací v podobě produktů s vysokou přidanou hodnotou na trhu je v ČR stále hluboká (Nonami, 2014). Tento stav je akcentován absencí flexibilních národních legislativních „sandboxů“ (uzavřených testovacích zón s rozsáhlými úlevami z leteckých předpisů), které

v zemích jako je Singapur, Izrael či USA umožňují akademickým spin-off firmám legálně a okamžitě testovat pokročilé koncepty autonomní městské logistiky v reálném městském prostředí (Nonami, 2014).

4 Technologické výzvy budoucnosti

Aby se bezpilotní systémy (UAS) mohly plně integrovat do každodenního života a naplnit vize masové městské logistiky (UAM – Urban Air Mobility), musí inženýři překonat několik fundamentálních technologických bariér (Hayat a kol., 2016). Tyto limity se netýkají pouze samotných strojů, ale celé infrastruktury, která je obklopuje.

4.1 Limity akumulace energie a alternativní pohony

Současná chemie lithium-polymerových (Li-Po) a lithium-iontových (Li-Ion) baterií naráží na své teoretické fyzikální a chemické limity (Tarascon a Armand, 2011). Průměrná specifická energie komerčních akumulátorů se dlouhodobě pohybuje kolem 250 Wh/kg. V praxi to znamená, že běžná multikoptéra spotřebuje enormní množství energie jen na udržení své vlastní hmotnosti ve vzduchu, což omezuje dobu letu s užitečným zatížením na pouhých 20 až 40 minut. Pro doručovací služby nebo dálkový průzkum je taková ekonomická efektivita neudržitelná. Výzkum se proto ubírá dvěma klíčovými směry:

- **Baterie s pevným elektrolytem (Solid-State Batteries):** Nahrazení tekutého či gelového elektrolytu pevnou vrstvou slibuje skokové zvýšení energetické hustoty směrem k hranici 500 Wh/kg (Janek a Zeier, 2016). Kromě dvojnásobného doletu přinášejí zásadní zvýšení bezpečnosti – eliminují riziko termálního úniku (vznícení a explozí) při mechanickém poškození, což je kritický faktor pro lety nad obydlenými oblastmi. Navíc umožňují rapidní nabíjení bez degradace anody.
- **Vodíkové palivové články (Fuel Cells):** Vodíkový pohon nabízí až pětinasobnou energetickou hustotu oproti nejlepším lithiovým akumulátorům při stejné hmotnosti (Pan a kol., 2019). Drony s palivovými články dnes běžně dosahují letových časů přesahujících 3 až 5 hodin. Hlavní inženýrskou výzvou však zůstává miniaturizace chladicích systémů článků a skladování stlačeného vodíku v kompozitních lahvích pod tlakem až 700 barů. Limitujícím faktorem pro masové nasazení je chybějící infrastruktura pro distribuci zeleného vodíku na komerčních heliportech a vysoká cena protonvýměnných membrán (PEM).

4.2 Umělá inteligence na okraji sítě (Edge AI)

Pro dosažení plné autonomie (úroveň Level 5, kde stroj nevyžaduje žádný lidský dohled) je nezbytné přesunout rozhodovací procesy z Cloudu přímo do „mozku“ dronu. Přenos masivních datových toků z kamer s vysokým rozlišením a LiDARů na vzdálený server by způsoboval fatální latenci. To vyžaduje implementaci Edge AI – pokročilých neuronových sítí běžících na energeticky úsporných akcelerátorech (např. platformy NVIDIA Jetson Orin nebo specializované neuromorfní čipy napodobující architekturu lidského mozku) s příkonem pouhých několika wattů (Chen a kol., 2019). Dron musí v reálném čase samostatně řešit komplexní výpočetní úlohy:

- **Vizuální SLAM (Simultaneous Localization and Mapping):** Tvorba trojrozměrné mapy neznámého prostředí a současná lokalizace v ní. V městských kaňonech, uvnitř budov nebo v průmyslových halách je satelitní

signál (GNSS jako GPS, Galileo, Glonass) odražený, slabý nebo záměrně rušený. Algoritmy jako ORB-SLAM kombinují data z inerciálních jednotek (IMU) a stereokamer, čímž dronu umožňují milimetrově přesnou navigaci i v absolutním „GNSS-denied“ prostředí v prostředí (zcela bez satelitního signálu) (Mur-Artal a Tardós, 2017).

- **Sense and Avoid (Detekce a vyhýbání):** Autonomní systémy se musí vyrovnat s heterogenním provozem. Edge AI neustále segmentuje obraz a data z LiDARu či mikrovlnných radarů, aby identifikovala jak statické překážky (tenké dráty elektrického napětí, koruny stromů), tak nepředvídatelné dynamické objekty (ptactvo, jiné drony, sportovní letadla). Reakční doba systému pro výpočet únikové trajektorie se musí pohybovat v řádu milisekund.

4.3 Integrace do sítí 5G a 6G

Klasické rádiové spoje v pásmech 2,4 GHz a 5,8 GHz fungují primárně na principu přímé viditelnosti (LOS) a jsou extrémně náchylné k průmyslovému šumu. Budoucnost řízení letů na dlouhé vzdálenosti (BVLOS – Beyond Visual Line of Sight) spočívá

v integraci bezpilotních systémů do celulární architektury mobilních operátorů (Hayat a kol., 2016). Architektura 5G a nastupující standardy 6G přinášejí tři klíčové technologické pilíře:

- **Ultra-nízká latence (URLLC):** Architektura Ultra-Reliable Low-Latency Communications garantuje odezvu sítě pod 1 ms (3GPP, 2022). To je nezbytné pro teleoperaci (vzdálené ruční řízení) v krizových situacích, kdy pilot na druhém konci kontinentu potřebuje okamžitou hmatovou i vizuální zpětnou vazbu.
- **Network Slicing (Síťové porcování):** Tato technologie umožňuje operátorům softwarově definovat virtuální sítě na stejné fyzické infrastruktuře. Pro řízení letového provozu dronů (UTM – Unmanned Traffic Management) bude alokovan dedikovaný, přísně zabezpečený síťový „řez“ s garantovanou šířkou pásma, který nemůže být ovlivněn ani přetížením sítě běžnými uživateli (3GPP, 2022).
- **Masivní konektivita a beamforming:** 5G/6G sítě dokáží obsloužit až milion zařízení na kilometr čtvereční. V kombinaci s technologií dynamického směřování paprsku (beamforming) dokáží základnové stanice směřovat úzké toky dat přímo na letící drony ve trojrozměrném prostoru, namísto neefektivního vyzařování signálu k zemi.

4.4 Kybernetická bezpečnost a elektronický boj

S přechodem od dálkového ovládání k plně autonomním, síťově propojeným rojům se drony stávají vysoce atraktivním cílem pro kyberkriminálníky, státní aktéry i teroristické skupiny (Javaid a kol., 2012). Zranitelnost bezpilotních systémů se projevuje v několika kritických rovinách:

- **GPS/GNSS Spoofing:** Sofistikovaný útok, při kterém útočník vysílá falešný satelitní signál s o něco vyšším výkonem než originál (Humphreys a kol., 2008). Dron tento signál bezpečně přijme, přepočítá svou polohu podle podvržených dat a může být naveden mimo kurz, unesen na nepřátelské

území, nebo donucen k havárii. Tento fenomén se stal masivním problémem nejen ve válečných zónách, ale i v civilním letectví v okolí geopoliticky nestabilních regionů.

- **Jamming (Zarušení):** Hrubé zahlcení frekvenčních pásem – jak řídicích, tak navigačních – vysokovýkonným šumem (Javaid a kol., 2012). Pokud dron ztratí spojení s operátorem i satelitní navigací, stává se z něj nekontrolovaný objekt, závislý pouze na kvalitě svých autonomních algoritmů pro nouzové přistání.
- **Man-in-the-Middle (MitM) útoky:** Infiltrace do nezašifrované nebo slabě zabezpečené komunikace mezi pozemní řídicí stanicí (GCS) a dronem. Útočník může v reálném čase modifikovat příkazy telemetrie nebo dešifrovat video stream z palubních kamer.

Současný bezpečnostní výzkum se proto zaměřuje na vývoj hardwaru odolného vůči elektronickému boji (EW). Standardem se stávají anti-jamming GPS antény s fázovanou mřížkou (CRPA), které dokáží digitálně odfiltrovat signál přicházející ze směru rušičky. V rovině softwaru je klíčovým tématem implementace postkvantového šifrování pro řídicí (C2) linky, což zajistí, že přenášená data zůstanou v bezpečí i před budoucí generací kvantových počítačů (Singer a Friedman, 2014).

5 Společenské, etické a právní aspekty

Technologický pokrok bezpilotních systémů v posledních letech rapidně předbíhá společenskou akceptaci a evoluci právního prostředí (Clothier a kol., 2015). Integrace milionů dronů do sdíleného prostoru s lidmi generuje hluboké etické, sociologické a legislativní otázky, které vyžadují komplexní mezinárodní konsenzus a rychlou reakci regulačních orgánů (Boucher, 2016).

5.1 Ochrana soukromí a osobních údajů

Drony vybavené optickými senzory s vysokým rozlišením, pokročilým digitálním zoomem a termovizními kamerami představují bezprecedentní zásah do práva na nedotknutelnost soukromí a obydlí. Na rozdíl od stacionárních kamerových systémů (CCTV), jejichž poloha je fixní a předvídatelná, jsou drony vysoce mobilní. Dokážou snadno překonat fyzické bariéry, jako jsou ploty, zdi či terénní nerovnosti, a monitorovat osoby na soukromých pozemcích z výšek, kde jsou pro lidské smysly téměř nepostřehnutelné (Cavoukian, 2012).

V evropském kontextu je provoz UAS striktně podřízen Obecnému nařízení o ochraně osobních údajů, známému jako GDPR (Evropský parlament a Rada, 2016). Provozovatel dronu, který systematicky zaznamenává osobní údaje – kam spadají nejen čitelné tváře, ale i registrační značky vozidel či specifické behaviorální vzorce – je z právního hlediska považován za správce osobních údajů (Clarke a Moses, 2014). Z toho pro něj plynou rigorózní povinnosti, jako je informační povinnost vůči dotčeným osobám, zajištění zabezpečení dat před únikem a povinnost okamžitě smazat neoprávněně získané záznamy. V praxi je však právní vymahatelnost těchto pravidel extrémně složitá. Anonymita mnoha nelegálních letů, absence transparentních identifikačních znaků na dálku a obtížné dokazování záměru operátora vytvářejí šedou zónu, kterou současná judikatura řeší jen velmi obtížně (Finn a Wright, 2012).

5.2 Integrace dronů a městská letecká mobilita

Koncept U-Space (digitální a automatizovaný systém řízení letového provozu) představuje evropskou odpověď na naléhavou potřebu bezpečné koordinace a řízení hustého provozu dronů v nízkých výškách, zpravidla do 150 metrů nad zemí (SESAR JU, 2022). V tomto prostoru klasické složky řízení letového provozu (ATC – Air Traffic Control) nemají dostatečnou kapacitu, radarové pokrytí ani technologické prostředky pro efektivní zásah. U-Space není definován jako specifický fyzický prostor, nýbrž jako komplexní ekosystém digitálních služeb a plně automatizovaných funkcí, které garantují bezpečný, spravedlivý a efektivní přístup do vzdušného prostoru pro enormní množství autonomních UAS (EASA, 2021).

5.3 Architektura systému U-Space

Implementace U-Space podle Prováděcího nařízení Komise (EU) 2021/664 staví na čtyřech postupných fázích – od základní elektronické identifikace (e-Registration a e-Identification), přes automatizované schvalování letových plánů a dynamické řízení

vzdušného prostoru, až po plnou integraci s tradičním pilotovaným letectvím (Nařízení Komise, 2021).

Hlavním komerčním cílem této infrastruktury je umožnit masový rozvoj městské letecké mobility (UAM – Urban Air Mobility), tedy provozu elektrických letounů s vertikálním startem a přistáním (eVTOL – electric Vertical Take-Off and Landing) typu Volocopter, EHang či Lilium (McKinsey & Company, 2023). Ačkoliv tyto stroje mají ambici radikálně transformovat městskou hromadnou dopravu a ulevit přetíženým pozemním komunikacím, narážejí na silný odpor veřejnosti. Hlavními faktory odmítání jsou:

- **Akustický smog:** Specifický vysokofrekvenční hluk rotujících vrtulí v obytných zónách vykazuje podle psychoakustických studií vyšší míru obtěžování než ekvivalentní hluk silniční nebo klasické letecké dopravy (Gallas a Erhardt, 2023).
- **Psychologická bariéra:** Strach z pádů těžkých strojů do hustě obydlených městských aglomerací (Al Haddad a kol., 2020) a vizuální znečištění oblohy.

5.4 Etika autonomního zbraňového nasazení

Ačkoliv se tato práce primárně zaměřuje na civilní a komerční aspekty bezpilotního letectví, nelze ignorovat etickou dimenzi vojenského vývoje, který civilní sféru skrze technologický transfer (dual-use technologie) zásadně ovlivňuje (Sandvik, 2015). Vývoj systémů LAWS (Lethal Autonomous Weapons Systems) – tedy zbraňových platform, které dokážou samostatně vyhledat, identifikovat, vyhodnotit a zaútočit na cíl bez jakéhokoliv lidského zásahu, v tzv. režimu *human-out-of-the-loop* – vyvolává masivní odpor mezinárodních etických komisí OSN, vládních organizací i globálních iniciativ typu Stop Killer Robots (Scharre, 2018).

Delegování rozhodnutí o ukončení lidského života na autonomní algoritmus a matematický model představuje fundamentální morální a etický zlom v dějinách lidské civilizace (Heyns, 2013). Odpůrci těchto systémů argumentují porušením základních principů mezinárodního humanitárního práva, konkrétně zásady rozlišování mezi komatanty a civilisty a zásady přiměřenosti, které umělá inteligence v dynamickém a chaotickém prostředí bojiště nedokáže spolehlivě vyhodnotit (Asaro, 2012).

Vyvstává rovněž neřešitelný problém tzv. odpovědnostní mezery (*responsibility gap*): pokud autonomní dron spáchá válečný zločin, kdo nese právní a morální odpovědnost (Sparrow, 2007)? Je to programátor algoritmu, výrobce hardwaru, nebo vojenský velitel, který stroj pouze vypustil do oblastí? Absence jasného právního ukotvení

v mezinárodních úmluvách činí ze smrtících autonomních zbraňových systémů jednu z nejnebezpečnějších výzev pro globální bezpečnost a etické vědomí lidstva.

Závěr

Bezpilotní letecké systémy (UAS) prošly v průběhu uplynulých dekád fascinující evolucí. Od primitivních mechanických bomb a dálkově řízených cvičných terčů z období první a druhé světové války, přes sofistikované strategické průzkumné platformy studené války, až po současný masivní boom v civilním i komerčním sektoru (Austin, 2010). Dnes již drony definitivně ztratily nálepkou pouhých technologických hraček pro nadšence či výhradní domény armádních rozpočtů. Staly se integrálním pilířem nastupující čtvrté průmyslové revoluce (Průmysl 4.0) a klíčovým prvkem digitalizace vertikální mobility. Analýza předložená v této práci jasně ukazuje, že UAS již nepředstavují izolovanou technologii, ale komplexní ekosystém propojující kybernetiku, datovou analytiku a autonomní systémy (Floreano a Wood, 2015).

Predikce vývoje do roku 2035

V horizontu roku 2035 lze na základě identifikovaných technologických a společenských indikátorů očekávat následující klíčové megatrendy, které transformují celý obor:

1. Plná integrace a vizuální i akustická „neviditelnost“

Drony přestanou být vnímány jako technologická rarita vyvolávající pozornost či obavy. Stanou se přirozenou a integrální součástí městské scenerie, přičemž jejich přítomnost bude veřejností vnímána stejně samozřejmě, jako jsou dnes běžné kurýrní dodávky (SESAR JU, 2022). Klíčem k této společenské akceptaci bude drastické snížení hlukové stopy. Díky pokročilé aeroakustice, optimalizaci geometrie rotorů a aktivnímu potlačování hluku splyne akustický projev nových eVTOL strojů s běžným městským šumem na pozadí, čímž bude eliminováno znečištění hlukem v urbanizovaných oblastech (NASA, 2021).

2. Autonomizace a transformace lidského faktoru v mezifiremním sektoru

V segmentu komerčních operací (průmyslové inspekce, precizní zemědělství, liniové stavby, logistika poslední míle) dojde k téměř stoprocentnímu vytěsnění lidských pilotů z přímého řízení. Operace budou plně autonomní, bezpečně delegované na pokročilé AI algoritmy integrované v digitálním systému řízení bezpilotního provozu (Eurocontrol, 2025). Role lidského činitele projde zásadním paradigmatickým přerodem:

z operativního „pilota dronu“ (remote pilot) se stane strategický „manažer flotily“. Tento pracovník bude od řídicího stolu pouze supervizovat desítky simultánně probíhajících autonomních misí a zasahovat bude výhradně v případech nepředvídatelných systémových anomálií (ICAO, 2023).

3. Energetická renesance a prolomení limitů

Současný limitující faktor v podobě nízké specifické energie v lithium-polymerových akumulátorech bude do roku 2035 překonán. Očekává se masové komerční

nasazení baterií s pevným elektrolytem (solid-state batteries) v kombinaci se standardizovanými, lehkými vodíkovými palivovými články (Janek a Zeier, 2024). Tato synergická kombinace zvýší energetickou kapacitu pohonných systémů natolik, že běžná operační doba multikoptér bezpečně překročí hranici dvou hodin čistého letového času při zachování vysokého užitečného zatížení, čímž padne jedna z největších ekonomických a operačních bariér současnosti (McKinsey & Company, 2023).

Závěrečné shrnutí

Dynamický vývoj v oblasti bezpilotního letectví jasně demonstruje, že technologická vospělost sama o sobě nestačí k dosažení plné dospělosti oboru. Budoucnost bezvýhradně patří těm systémům a státům, které dokážou harmonicky skloubit technologický progres s nekompromisní kybernetickou bezpečností, absolutním respektem k soukromí občanů a striktními bezpečnostními standardy civilního letectví (Clothier a kol., 2015). Pouze skrze robustní digitální management vzdušného prostoru a osvícenou legislativu bude možné plně odemknout socioekonomický potenciál, který bezpilotní systémy pro lidskou společnost 21. století představují.

Seznam literatury

- 3GPP, 2022. *Technical Specification Group Services and System Aspects; Unmanned Aerial System (UAS) support in 3GPP (Release 17)*. TS 22.125. v17.4.0.
- AL HADDAD, S. a kol., 2020. Factors affecting public acceptance of urban air mobility. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, s. 810–823.
- ASARO, P. M., 2012. On banning autonomous weapon systems: human rights, automation, and the dehumanization of lethal force. *International Review of the Red Cross*, 94(886), s. 687–709.
- AUSTIN, Reg, 2010. *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*. Wiley. ISBN 978-0-470-05819-0.
- AUSTIN, Reg, 2011. *Unmanned Aircraft Systems: UAVs Design, Development and Deployment*. Chichester: John Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-05819-0.
- BOUCHER, P., 2016. Domesticating the drone: The social, ethical and legal implications of unmanned aircraft systems in Europe. *Science and Engineering Ethics*, 22(5), s. 1391–1412.
- BURDAKOV, S. F. a kol., 2020. Technological challenges in eVTOL development for Urban Air Mobility. *Journal of Aerospace Engineering*, 33(4), s. 112–125.
- CAVOUKIAN, A., 2012. *Privacy in the Age of Drones: Regulating the Sky*. Toronto: Information and Privacy Commissioner of Ontario.
- CLARKE, R. a MOSES, L. B., 2014. The regulation of civilian drones' impacts on behavioral privacy. *Computer Law & Security Review*, 30(3), s. 263–277.
- CLOTHIER, Reece A. a kol., 2015. Risk perception and the public acceptance of unmanned aircraft systems. *Risk Analysis*, 35(6), s. 1167–1183.
- CHEN, J., RAN, X. a REZAEI, S., 2019. Deep Learning with Edge Computing: A Review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), s. 1655–1674.
- EASA (European Union Aviation Safety Agency), 2021. *There is a need for a safe and secure integration of drones in the airspace: U-Space Regulation*. Cologne: EASA.
- EASA, 2023. *Acceptable Means of Compliance and Guidance Material to Regulation (EU) 2019/947*. Cologne: European Union Aviation Safety Agency.
- EUROCONTROL, 2025. *UTM and U-Space Integration Concept*. Brussels: Eurocontrol.
- EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA (EU), 2016. Nařízení (EU) 2016/679 ze dne 27. dubna 2016 o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů a o volném pohybu těchto údajů (GDPR). In: *Úřední věstník Evropské unie*. L 119.
- FAA, 2024. *Concept of Operations v2.0: Urban Air Mobility (UAM)*. Washington, D.C.: Federal Aviation Administration.
- FINN, R. a WRIGHT, D., 2012. Unmanned aircraft systems: Surveillance, privacy and security. *Computer Law & Security Review*, 28(2), s. 184–194.
- FLOREANO, Dario a Robert J. WOOD, 2015. Science, technology and the future of UAVs. *Nature*, 521(7553), s. 460–466. (Vol. 521, no. 7553, pp. 460–466. ISSN 1476-4687. DOI: 10.1038/nature14542).
- GALLAS, M. a ERHARDT, T., 2023. Urban Air Mobility Noise Emissions: Community Annoyance and Psychoacoustic Analysis of eVTOL Architectures. *Journal of Aircraft*, 60(2), s. 412–425.

GUPTA, Lav, d'o. 2016. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152. DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.

HAYAT, S., YANMAZ, E. a MUZAFFAR, R., 2016. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), s. 2624–2661.

HEYNS, C., 2013. *Report of the Special Rapporteur on extrajudicial, summary or arbitrary executions: Lethal autonomous robotics and the protection of life*. OSN Human Rights Council (A/HRC/23/47).

HUMPHREYS, T. E., LEDVINA, B. M., PSIAKI, M. L., O'HANLON, B. W. a ICAO, 2023. *Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) - A Framework*. International Civil Aviation Organization.

JANEK, J. a ZEIER, W. G., 2016. A solid future for battery development. *Nature Energy*, 1(9), s. 1–4.

JANEK, Jürgen a Wolfgang G. ZEIER, 2024. Challenges and progress in solid-state battery research. *Nature Energy*, 9(1), s. 12–25.

JAVOID, A. Y., SUN, W., DEVABHAKTUNI, V. K. a ALAM, M., 2012. Cyber security threat analysis and protection of unmanned aerial vehicles (UAVs). In: *2012 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST)*. Waltham, MA, s. 209–215.

KEENE, Thomas, 2012. *A Brief History of Unmanned Aircraft*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics. ISBN 978-1-61503-991-3.

MCKINSEY & COMPANY, 2023. *The future of vertical mobility: eVTOL market outlook 2035*. Aerospace and Defense Practice.

MUR-ARTAL, R. a TARDÓS, J. D., 2017. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), s. 1255–1262.

NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2021/664 ze dne 22. dubna 2021 o regulačním rámci pro prostor U-Space. In: *Úřední věstník Evropské unie*. L 139.

NONAMI, Kenzo, 2014. Drone Technology, Business Market and Future Prospect. *Journal of System Design and Dynamics*. Vol. 8, no. 1, pp. 12-21. DOI: 10.1299/jsdd.2014jsdd0002.

PAN, Z., AN, L., WEN, C. Y. a KAKAKHEL, S. J. S., 2019. Recent progress in fuel cell-powered unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 110, čl. 100543.

SANDVIK, K. B., 2015. The European drone marketplace: Joint civil–military airspace integration. *Critical Military Studies*, 1(3), s. 249–268.

SCHARRE, P., 2018. *Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War*. New York: W. W. Norton & Company.

SESAR JU, 2022. *U-space Blueprint*. Brussels: SESAR Joint Undertaking.

SINGER, P. W. a FRIEDMAN, A., 2014. *Cybersecurity and Cyberwar: What Everyone Needs to Know*. Oxford: Oxford University Press.

SPARROW, R., 2007. Killer robots. *Journal of Applied Philosophy*, 24(1), s. 62–77.

TARASCON, J. M. a ARMAND, M., 2011. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Materials for Sustainable Energy*, s. 171–179.

ZALABSKÝ, Jindřich, 2016. *Bezpilotní systémy: Historie, současnost a perspektivy*. Praha: Ministerstvo obrany ČR - VHÚ. ISBN 978-80-7278-692-3.

Seznam zkratek

AI - Artificial Intelligence, umělá inteligence

B2B - Business-to-Business

BVLOS - Beyond Visual Line of Sight, let mimo přímou dohledovou vzdálenost

EASA - European Union Aviation Safety Agency, Evropská agentura pro bezpečnost letectví

FAA - Federal Aviation Administration, Federální letecký úřad (USA)

GCS - Ground Control Station, pozemní řídicí stanice

ICAO - International Civil Aviation Organization, Mezinárodní organizace pro civilní letectví

RPAS - Remotely Piloted Aircraft Systems, systémy dálkově řízených letadel

UAS - Unmanned Aircraft Systems, bezpilotní letecké systémy

ÚCL - Úřad pro civilní letectví

VLL - Very Low Level, velmi nízká letová výška (hladina)

VTOL - Vertical Take-Off and Landing, vertikální start a přistání