

Masové používanie dronov na civilne účely. (**MDCU**)^{*}

Tomáš Mariňák, Dmytro Seredenko, Dominik Luksaj

Slovenská technická univerzita v Bratislave

Fakulta informatiky a informačných technológií

xseredenkod@stuba.sk xmarinak@stuba.sk xluksaj@stuba.sk

9. novembra 2025

Abstrakt

Tento projekt sa zameriava na komplexnú analýzu, návrh a overenie rozsiahleho nasadenia bezpilotných vzdušných prostriedkov (ďalej len UAV) v moderných smart mestách a prímestských oblastiach. Cieľom je preskúmať všetky významné aspekty prevádzky dronov, vrátane technických riešení, legislatívnych rámsov, spoločenských dopadov a ekonomických efektov. Projekt sa sústredí uje na identifikáciu možností, ako rozsiahla flotila UAV môže prispieť k zefektívneniu mestských procesov, zlepšeniu bezpečnosti, optimalizácii logistiky a podpore zdravotnej starostlivosti, pričom zohľadňuje aj environmentálne a energetické aspekty prevádzky dronov.

V technickej rovine projekt navrhuje decentralizovanú architektúru riadenia dronov, ktorá využíva pokročilé algoritmy koordinácie a plánovania letov, moderné senzorické moduly a robustné komunikačné infraštruktúry, vrátane 5G a mesh sietí. Tento systém umožňuje dynamickú správu letového priestoru, flexibilnú distribúciu UAV a integráciu konceptu U-space podľa európskych štandardov, čím sa zabezpečuje bezpečný, efektívny a škálovateľný prevádzkový rámec pre mestskú vzdušnú mobilitu. Projekt sa zároveň zaobera otázkou interoperability s existujúcimi dopravnými a logistickými systémami, čím podporuje hladkú integráciu dronov do každodennej prevádzky miest a regiónov.

Sociálne a ekonomické dopady sú kľúčovou súčasťou projektu. Analýza zahŕňa možnosti zníženia nákladov na dopravu a logistiky, automatizáciu manuálnych procesov, optimalizáciu prepravných tokov a efektívne využitie zdrojov. Zároveň projekt identifikuje vznik nových pracovných príležitostí v oblasti autonómnych letov, analýzy letových dát, technickej údržby dronov a správy systému U-space, čím prispieva k modernizácii pracovného trhu a vzniku nových špecializácií. Environmentálne aspekty sú zastúpené znížením uhlíkovej stopy dopravy vďaka elektrickému pohonu UAV a podporou udržateľnej mobility v súlade s európskymi klimatickými politikami a stratégiami smart city.

Projekt má interdisciplinárny charakter a spája poznatky z urbanizmu, informatiky, automatizácie, telekomunikácií a legislatívy. Tento holistický prístup umožňuje komplexnú analýzu problémov súvisiacich s nasadením UAV, vrátane riadenia vzdušného priestoru, bezpečnosti prevádzky, ochrany osobných údajov a sociálnej akceptácie technológie. Zároveň poskytuje návrhy na optimalizáciu systémov pre mestskú správu, logistiku, zdravotnú starostlivosť a monitorovanie infraštruktúry.

Výstupy projektu majú potenciál slúžiť ako základ pre budúci rozvoj urbánnej vzdušnej mobility, podporovať inovačný potenciál regiónov a prispieť k rozvoju moderných technologických oblastí. Projekt poskytuje praktické riešenia, overené koncepty a odporúčania pre implementáciu dronových systémov, čím podporuje konkurencieschopnosť miest a regiónov, efektívnosť prevádzky a trvalo udržateľný rozvoj. Celkovo projekt predstavuje významný krok k integrácii dronov do smart cities a tvorbe komplexnej infraštruktúry pre bezpečnú a efektívnu prevádzku bezpilotných lietadiel.

*Semestrálny projekt v predmete Metódy inžinierskej práce, ak. rok 2024/25, vedenie: Vladimír Mlynarovič

1 Dopad projektu na spoločnosť a technologický ekosystém

1.1 Prínos pre výskum, aplikovaný vývoj a inovácie

Projekt MDCU predstavuje komplexný a výrazne nadstandardný prístup k využívaniu dronov v mestskom prostredí, pretože oproti individuálnemu nasadeniu UAV prináša nové metodiky pre koordináciu veľkých flotíl, riadenie autonómnych letov a organizáciu nízkoletového vzdušného priestoru. Medzi jeho najvýznamnejšie vedecké prínosy patrí predovšetkým vývoj algoritmov na optimalizáciu letových trás, prevenciu kolízií, predikciu rizikových situácií a adaptívne rozhodovanie v dynamickom mestskom prostredí, pričom využíva širokú škálu prístupov od heuristických metód po multi-agentné systémy a distribuovanú umelú inteligenciu. Ďalším dôležitým prvkom je inovatívna senzorika, keďže rozvoj optických, termálnych a LIDAR technológií zvyšuje bezpečnosť autonómnych letov v hustej zástavbe, pri nepriaznivom počasí alebo v oblastiach s obmedzenou viditeľnosťou. Projekt zároveň významne podporuje rozvoj európskeho konceptu U-space, posilňuje akademický aj praktický základ pre budovanie jednotného systému riadenia nízkeho vzdušného priestoru podľa odporúčaní EASA a vytvára predpoklady pre interoperabilitu slovenských riešení v rámci európskej leteckej infraštruktúry. Celkovo tak prispieva k interdisciplinárному výskumu prepojujúcemu informatiku, automatizáciu, letectvo, telekomunikáciu, urbanizmus aj legislatívnu.

1.2 Využiteľnosť výsledkov pre SR aj zahraničie

V rámci Slovenskej republiky aj v zahraničí je nasadenie dronov do logistiky a kuriérskych služieb perspektívne riešenie, ktoré by mohlo výrazne zefektívniť prepravu tovaru. Drony sú prevažne poháňané elektrinou, čo by zároveň znížilo ekologický dopad na životné prostredie v porovnaní s tradičnými dopravnými prostriedkami. Využitie dronov by mohlo prispieť k rýchlejšej a flexibilnejšej doprave menších zásielok, najmä v oblastiach so sťaženou dostupnosťou alebo pri urgentných dodávkach.

V zdravotníctve by drony mohli zohrávať kľúčovú úlohu pri transportovaní urgentných zásielok, ako sú defibrilátory, lieky alebo iné život zachraňujúce pomôcky. Takéto riešenie by umožnilo výrazne skrátiť čas dodania kriticky dôležitých prostriedkov a prispelo by k zvýšeniu efektivity zdravotnej starostlivosti, najmä v núdzových situáciách alebo na ťažko dostupných miestach.

V oblasti civilnej bezpečnosti by drony mohli pomáhať pri monitorovaní verejných priestorov, prevenčii trestnej činnosti a rýchlej reakcii pri mimoriadnych udalostach. Ich nasadenie by umožnilo zlepšiť bezpečnostný dohľad a zefektívniť zásahy zložiek bezpečnostných zložiek.

Medzinárodne je možné drony integrovať do európskeho systému U-Space, ktorý je zameraný na efektívne vytváranie, koordináciu a manažovanie infraštruktúry pre drony. Tento systém umožňuje bezpečný a organizovaný letový priestor pre bezpilotné lietadlá a poskytuje podmienky pre masovejšie nasadenie dronov v mestskom i regionálnom prostredí.

1.3 Ekonomický dopad a tvorba hodnoty

Ekonomický prínos projektu je viacvrstvový a zahŕňa environmentálne efekty, podporu nových profesí aj priame finančné úspory. Z finančného hľadiska môže rozsiahle nasadenie dronov znížiť spotrebu paliva pri bežnej cestnej logistike, nahradíť mnohé manuálne postupy automatizovaným dohľadom, podstatne minimalizovať náklady na prepravu menších balíkov a prispieť k účinnejšiemu využívaniu zdrojov.

Projekt zároveň formuje pracovný trh, pretože vytvára dopyt po nových špecializovaných pozících. Medzi takéto profesie patria operátori autonómnych letov, analytici letových dát, technici senzorických modulov alebo špecialisti na prevádzku systému U-Space. Týmto spôsobom projekt podporuje rozvoj nových kompetencií a zvyšuje kvalitu pracovnej sily v technologických oblastiach.

Okrem ekonomických a pracovných benefitov je dôležitý aj ekologický a energetický aspekt. Elektrický pohon dronov znižuje uhlíkovú stopu dopravy a prispieva k udržateľnej mobilite v súlade s európskymi

klimatickými politikami.

Celkový ekonomický dopad projektu spočíva nielen v úsporách a zvýšenej efektivite, ale aj v posilnení inovačnej kapacity regiónu a rozvoji moderných technologických oblastí. Projekt tým podporuje dlhodobú konkurencieschopnosť a technologický pokrok, čím prispieva k trvalo udržateľnému rozvoju.

1.4 Technologie a limity súčasného stavu

Napriek neustálemu pokroku v oblasti dronov a UAV zostávajú tieto technológie stále technologicky a fyzicky limitované. Jedným z najväčších problémov je neefektívnosť batérií – súčasné drony majú maximálnu výdrž približne 20 až 30 minút, čo je pri nasadení do logistiky výrazne nedostatočné. Takáto obmedzená doba letu výrazne limituje vzdialenosť a kapacitu, ktorú drony môžu pokryť pri doručovaní zásielok, najmä vo väčších mestských a prímestských oblastiach.

Ďalším významným obmedzením je nosnosť dronov, ktorá sa väčšinou pohybuje medzi 2 a 5 kilogramami. To znamená, že kuriérske spoločnosti nemôžu prevážať ľahšie zásielky, čo značne znižuje praktickú použiteľnosť UAV v bežnej logistike. Tieto limity sú jedným z dôvodov, prečo väčšina spoločností zatiaľ do tejto oblasti intenzívne neinvestuje.

Problémom je aj nedostatok štandardizovanej infraštruktúry U-space, ktorá by umožnila bezpečný a koordinovaný pohyb dronov vo vzdušnom priestore. Bez takého systému je prevádzka dronov riziková a zložitejšia, najmä pri väčšom počte zariadení lietajúcich súčasne.

Okrem technických a infraštrukturálnych obmedzení predstavuje veľkú výzvu aj počasie. Prudké búrky, silný vietor alebo intenzívne zrážky môžu poškodiť telo dronu, narušiť jeho stabilitu alebo dokonca spôsobiť poruchu navigačných a komunikačných systémov. Takéto podmienky môžu viesť k odklonu dronu zo zamýšľanej trasy a ohrozit bezpečnosť prepravy.

Napriek týmto obmedzeniam je však viditeľný potenciál dronov, a preto sú súčasné výskumy a projekty zamerané na predĺžovanie výdrže batérií, zvýšenie nosnosti, vývoj robustnejších komunikačných a navigačných systémov a postupnú implementáciu štandardizovanej infraštruktúry U-space. Cieľom je umožniť praktické a bezpečné nasadenie dronov v logistike a iných oblastiach, kde môžu priniesť významné ekonomicke a spoločenské prínosy..

1.5 Legislatívne prekážky a regulačné požiadavky

Nasledujú problémy s legislatívou, ktoré významne ovplyvňujú masové nasadenie dronov v mestskom prostredí. Najväčšou prekážkou sú náročné povolenia na BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) prevádzku, teda na lety mimo vizuálneho dohľadu operátora. Keďže ide o rizikovú formu letu, EÚ vyžaduje rozsiahlu dokumentáciu, bezpečnostné postupy, komunikáciu so správcom vzdušného priestoru a preukázanie technickej spoľahlivosti dronu. Tento proces je časovo aj administratívne náročný, čo komplikuje škálovanie flotíl UAV.

Ďalším problémom je riziková kategorizácia letov podľa metodiky SORA (Specific Operations Risk Assessment). Prevádzkovateľ musí pre každý let posúdiť riziká, definovať mitigácie, určiť minimálne technické požiadavky a pripraviť scenáre reakcií na mimoriadne situácie. Pri veľkom počte dronov ide o náročný a opakovany proces, ktorý znižuje flexibilitu prevádzky.

Zásadné sú aj požiadavky GDPR v súvislosti s používaním kamier a senzorov. Ak dron sníma osoby alebo objekty, ktoré umožňujú identifikáciu, prevádzkovateľ musí zabezpečiť ochranu údajov, minimalizáciu zberu dát a jasné informovanie verejnosti. To je náročné najmä pri lietaní v obývaných zónach, kde dochádza k nechcenému záznamu ľudí. Okrem toho sa prevádzkovatelia stretávajú s ďalšími prekážkami, ako sú limity pre hluk, obmedzenia rádiového spektra, otázky zodpovednosti za škody a nejednotná implementácia európskych pravidiel.

2 Implementačný rámec projektu

2.1 Analýza požiadaviek a definícia systému

Úvodná fáza projektu sa zameriava na dôkladnú analýzu potrieb používateľov a definovanie základnej štruktúry systému. V prvej etape sa identifikujú konkrétnie požiadavky rôznych sektorov, ako sú logistika, zdravotníctvo či mestské služby, pričom sa berie do úvahy efektívnosť, bezpečnosť a špecifické potreby každého segmentu.



Obr. 1: Diagram implementačného rámca projektu

Na základe týchto požiadaviek sú definované klíčové funkcie systému, medzi ktoré patrí registrácia dronov, priradovanie úloh jednotlivým jednotkám a sledovanie ich polohy v reálnom čase. Súčasne sa stanovujú technické požiadavky na senzory, batérie a komunikačné prostriedky, ktoré zabezpečia spoľahlivú a efektívnu prevádzku UAV.

Projekt zároveň zahrňuje analýzu legislatívnych obmedzení, ktoré ovplyvňujú prevádzku dronov, vrátane pravidiel týkajúcich sa ochrany osobných údajov, leteckej bezpečnosti a prevádzky mimo vizuálnu líniu (BVLOS).

Dôležitou súčasťou fázy je štúdium existujúcich technologických riešení a zahraničných výskumov. Projekt vychádza zo skúseností z UAV prieskumov civilných aplikácií, pričom kladie dôraz na výzvy a možnosti komunikácie v prostredí 5G a B5G. Tieto poznatky umožňujú navrhnúť systém, ktorý spája moderné technologické trendy s praktickými požiadavkami používateľov a súčasne rešpektuje legislatívne rámce.

2.2 Návrh architektúry systému

Navrhovaná architektúra systému je založená na decentralizovanom modeli, ktorý zabezpečuje flexibilitu, škálovateľnosť a odolnosť celej siete dronov. Mestské stanice, fungujúce ako uzly, slúžia na nabíjanie dronov, preskladnenie zásielok a lokalizáciu jednotlivých jednotiek, čím poskytujú základnú infraštruktúru pre efektívnu prevádzku.

Horizontálna komunikácia medzi dronmi je realizovaná prostredníctvom mesh siete, čo umožňuje rýchlu a spoľahlivú výmenu informácií bez závislosti od centrálneho bodu. Mobilné siete, najmä 5G, slúžia ako záložný komunikačný kanál, čím sa zabezpečuje kontinuita operácií aj pri výpadku primárnej siete - čo korešponduje s prácou „A Survey on Cellular-connected UAVs: Design Challenges, Enabling 5G/B5G Innovations, and Experimental Advancements“ [1].

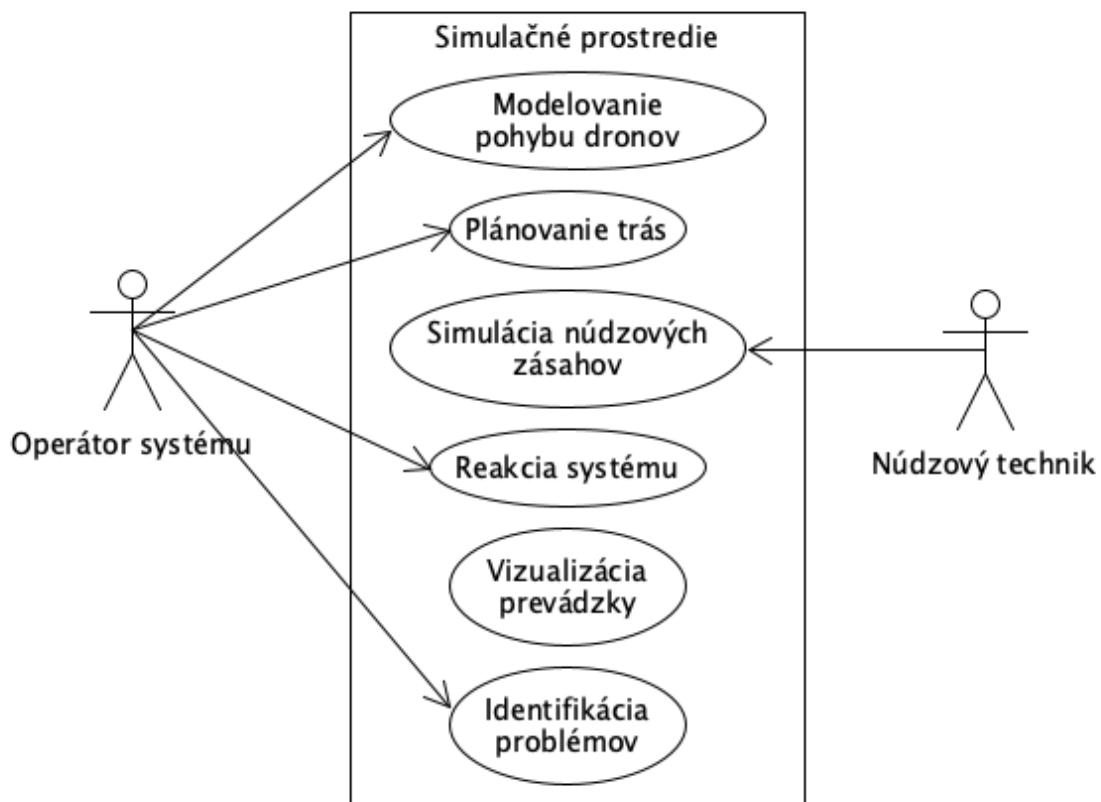
Pre lepšiu organizáciu a riadenie prevádzky sú mestské oblasti rozdelené do autonómnych zón, ktoré umožňujú efektívnejšiu koordináciu dronov a minimalizujú riziko kolizií. Riadiace protokoly systému určujú priradovanie úloh jednotlivým dronom, optimalizujú trasovanie a koordináciu flotily, pričom berú do úvahy aktuálne prevádzkové podmienky.

Návrh architektúry zahŕňa aj definovanie bezpečnostných scenárov, mechanizmov redundancie a postupov pre reakciu na nádzové situácie, čím sa zabezpečuje vysoká úroveň spoľahlivosti a bezpečnosti celého systému.

2.3 Prototyp a simulačné overenie systému

Pre overenie navrhnutého systému sa vytvorí simulačné prostredie, ktoré umožní testovanie jeho funkcií bez rizika reálnej prevádzky. Simulácie budú zahŕňať modelovanie pohybu dronov v mestskej mape, plánovanie trás pri zvýšenej doprave a reakcie systému na výpadok stanice.

Okrem toho sa budú simulovať núdzové zásahy a vizualizovať letová prevádzka, čím sa identifikujú potenciálne problémy a úzke miesta v koordinácii flotily. Pri tvorbe prototypu sa využijú nástroje na modelovanie udalostí, napríklad SimPy, UML diagramy pre návrh procesov a špecializované vizualizačné nástroje, ktoré poskytujú prehľad o dynamike systému a umožňujú optimalizáciu jeho fungovania ešte pred nasadením do reálneho prostredia.



Obr. 2: Príklad diagramu simulacie

2.4 Pilotné nasadenie a testovanie v praxi

Po úspešnom overení systému v simulačnom prostredí nasleduje jeho testovanie v reálnych podmienkach na obmedzenej oblasti mesta. Cieľom pilotnej fázy je overiť praktickú funkčnosť navrhnutého systému a identifikovať možné nedostatky pred jeho širším nasadením.

V rámci testovania sa hodnotí spoľahlivosť komunikácie medzi dronmi a centrálnymi uzlami, presnosť senzorov, reakčný čas dronov na priradené úlohy a bezpečné správanie v neštandardných situáciách. Zároveň sa posudzuje právna kompatibilita prevádzky, aby systém splňal všetky legislatívne požiadavky.

Pilotná fáza predstavuje kľúčový krok smerom k reálnemu zavedeniu technológie, poskytuje cenné dátá pre optimalizáciu a zvyšuje dôveru používateľov aj regulačných orgánov v bezpečnosť a efektívnosť UAV systému.

3 Excelentnosť projektu z vecného a odborného hľadiska

3.1 Interdisciplinárne a systémové

Projekt spája viaceré oblasti, čím zabezpečuje komplexný prístup k návrhu a implementácii UAV systému. Medzi kľúčové oblasti patria AI technológie a robotika, senzorika, telekomunikácie vrátane 5G a mesh sietí, urbanizmus a konceptie smart cities, ako aj legislatíva a bezpečnostné štandardy.

Takéto prepojenie umožňuje riešiť problémy z rôznych uhlov pohľadu a vytvára systém, ktorý je technologicky robustný, legislatívne kompatibilný a prakticky využiteľný v mestskom prostredí. Integrácia týchto oblastí je charakteristická pre špičkové výskumné iniciatívy a zabezpečuje, že výsledný systém splňa nároky moderných smart city aplikácií.

3.2 Technologicky inovatívne

Kľúčovou inováciou projektu je decentralizovaná architektúra systému, ktorá prináša výrazné výhody oproti tradičným centralizovaným riadiacim modelom. Tento prístup umožňuje škálovanie flotily na stovky dronov, podporuje lokálne autonómne rozhodovanie a zvyšuje odolnosť systému voči výpadkom jednotlivých uzlov.

Decentralizovaná architektúra zároveň umožňuje adaptívne správanie systému pri zmene prostredia alebo prevádzkových podmienok, čo zvyšuje flexibilitu a spoľahlivosť celého UAV riešenia. Tento model predstavuje nový prístup k riadeniu dronovej flotily a reflekтуje moderné trendy vo vývoji inteligentných a autonómnych systémov.

3.3 Vysoko spoločensky prínosné

Projekt prináša významné spoločenské prínosy tým, že podporuje rýchlejšiu záchranu životov v zdravotníckych a núdzových situáciach, umožňuje efektívnejšiu správu mestských služieb a prispieva k ekologickejšej logistike.

Okrem toho zvyšuje bezpečnosť a efektivitu monitoringu infraštruktúry, čím poskytuje mestám nástroje na prevenciu rizík a rýchlejšiu reakciu na neštandardné udalosti. Výsledný systém tak spája technologickú inováciu s konkrétnym spoločenským prínosom, čím podporuje udržateľný a inteligentný rozvoj mestského prostredia.

4 Očakávané výsledky

Projekt očakáva dosiahnutie viacerých konkrétnych a merateľných výsledkov, ktoré prispejú k rozvoju UAV technológií a ich integrácii do mestského prostredia. Jedným z hlavných výstupov bude funkčný prototyp systému, ktorý umožní praktické testovanie navrhnutých funkcií, od registrácie a sledovania dronov až po koordináciu úloh a autonómne rozhodovanie v decentralizovanom prostredí. Tento prototyp poslúži ako základ pre simulácie, pilotné testy a ďalší výskum v oblasti mestských UAV operácií.

Projekt tiež poskytne detailnú analýzu dopadu dronov na rôzne sektory, vrátane logistiky, združenictva a správy miest. Analýza sa zameria nielen na technologické aspekty, ako sú spoľahlivosť komunikácie, presnosť senzorov a efektívnosť riadiacich protokolov, ale aj na spoločenské a legislatívne dôsledky, čím sa zabezpečí komplexný pohľad na prínos systému.

Ďalším očakávaným výstupom je návrh architektúry systému, ktorý bude zahŕňať mestské stanice, komunikačné protokoly, autonómne zóny a mechanizmy bezpečnostnej redundancie. Tento návrh poskytne jasné štruktúry pre pilotnú implementáciu a umožní optimalizáciu prevádzky flotily dronov v mestskom prostredí.

Nakoniec projekt prinesie odporúčania pre integráciu UAV technológií do konceptu smart city, vrátane návrhov pre efektívnu správu mestských služieb, ekologickejšiu logistiku, bezpečný monitoring infraštruktúry a adaptívne riadenie dopravy. Tieto odporúčania budú vychádzať z výsledkov simulácií, pilotného testovania a interdisciplinárnej analýzy, čím podporia udržateľný a bezpečný rozvoj inteligentných miest a zvýšia ich technologickú a spoločenskú hodnotu [2].

Literatúra

- [1] Debashisha Mishra and Enrico Natalizio. A survey on cellular-connected uavs: Design challenges, enabling 5g/b5g innovations, and experimental advancements. <https://arxiv.org/abs/2005.00781>, 2020.
- [2] Vittorio Di Vito; Bartosz Dziugiel; Sandra Melo; Jens T. Ten Thije; Gabriella Duca; Adam Liberacki; Henk Hesselink; Michele Giannuzzi; Aniello Menichino; Roberto Valentino Montaquila; Giovanni Cerasuolo; Adriana Witkowska-Konieczny. Integrating urban air mobility into smart cities: a proposal for relevant use cases in the next decades. <https://www.emerald.com/aeat/article-abstract/97/1/2/1245339/Integrating-urban-air-mobility-into-smart-cities-a?redirectedFrom=fulltext>, 2025.