NÁZOV PROJEKTU

**Výskum hybridných spektrometrických metód pre identifikáciu atómov a molekúl na úrovni ppb pomocou technológií sensor fusion a strojového učenia**

DELIVERABLE O1.2

**Summary report**

**Anotácia**

Tento sumarizačný report predstavuje syntézu poznatkov získaných zo štúdia vedeckej a technickej literatúry v rámci pracovného balíka KPB1 – Výskum analyzátora. Dokument nadväzuje na zoznam relevantných zdrojov (O1.1) a prináša ucelený prehľad súčasného stavu poznania v oblastiach optickej a hmotnostnej spektrometrie, ich integrácie, využitia studenej plazmy, MEMS plynových senzorov a fúzie dát. Na základe identifikovaných technologických medzier a trendov sú formulované odporúčania pre ďalší výskum, ktoré tvoria metodické východisko pre návrh experimentov a vývoj prototypu v nasledujúcej fáze projektu (KPB2). Súčasťou reportu je SWOT analýza, prehľad možných aplikačných oblastí zariadenia a zhodnotenie prínosu literárnej štúdie pre projekt aj výskumný tím. Dokument potvrdzuje, že štúdia literatúry zostáva otvoreným procesom a bude priebežne aktualizovaná až do konca decembra 2025 s cieľom zachytiť nové poznatky a technologické trendy.

**Kľúčové slová**

Hybridná spektroskopia, Optická spektroskopia, Hmotnostná spektrometria, Sensor fusion, Strojové učenie, Studená plazma, MEMS senzory, Detekcia ppb úrovne, Analytický systém, Miniaturizácia, Umelá inteligencia, Dátová fúzia, Biomedicínske aplikácie, Environmentálne monitorovanie, Priemyselná analýza

**Annotation**

This summary report presents a synthesis of knowledge obtained from the review of scientific and technical literature within Work Package KPB1 – Analyzer Research. Building on the list of relevant sources (O1.1), it provides a comprehensive overview of the current state of the art in optical and mass spectrometry, their integration, the use of cold plasma, MEMS gas sensors, and data fusion. Based on identified technological gaps and trends, targeted research recommendations are formulated, serving as a methodological basis for designing experiments and developing a prototype in the next phase of the project (KPB2). The report also includes a SWOT analysis, an overview of potential application areas for the device, and an assessment of the benefits of the literature study for both the project and the research team. It confirms that the literature review remains an open and ongoing process, to be continuously updated until the end of December 2025, ensuring that new findings and technological trends are captured and integrated into the project’s development.

**Keywords**

Hybrid spectroscopy, Optical spectroscopy, Mass spectrometry, Sensor fusion, Machine learning, Cold plasma, MEMS sensors, ppb-level detection, Analytical system, Miniaturization, Artificial intelligence, Data fusion, Biomedical applications, Environmental monitoring, Industrial analysis

**Identifikácia projektu**

|  |  |
| --- | --- |
| **Názov projektu** | Výskum hybridných spektrometrických metód pre identifikáciu atómov a molekúl na úrovni ppb pomocou technológií sensor fusion a strojového učenia |
| **Akronym projektu** | RespectATOM |
| **Kód projektu** | 09I05-03-V02-00028 |
| **Názov programu** | Plán obnovy a odolnosti SR |
| **Komponent** | 9. Efektívnejšie riadenie a posilnenie financovania výskumu, vývoja a inovácií Plánu obnovy a odolnosti Slovenskej republiky |
| **Investícia** | 5: Výskum a inovácie pre digitalizáciu ekonomiky |
| **Kód a názov výzvy** | 09I05-03-V02 – Výzva na podporu výskumných projektov zameraných na digitalizáciu ekonomiky v TRL úrovniach 1 - 3 |
| **Schéma pomoci** | Schéma štátnej pomoci na podporu výskumu, vývoja a inovácií v rámci komponentu 9 Plánu obnovy a odolnosti SR v znení dodatku č. 2 č. SA.117246 |
| **Cieľ projektu** | Náš projekt sa zameriava na výskum a optimalizáciu hybridných spektroskopických techník, ktoré kombinujú silné stránky optických a hmotnostných spektroskopických metód. Cieľom je vytvoriť vysoko citlivý, ekonomicky efektívny a spoľahlivý analytický nástroj schopný detegovať molekuly na úrovni 10 ppb. Takýto nástroj by umožnil rýchlu a presnú analýzu komplexných vzoriek v oblastiach, ako sú medicína, priemysel a monitorovanie životného prostredia.  Špecifické ciele:   1. Vytvorenie a optimalizácia hybridného analytického dátového modelu 2. Implementácia strojového učenia na analýzu údajov. 3. Kalibrácia a validácia zariadenia na hybridnú analýzu. 4. Spolupráca a synergia medzi partnermi konzorcia. |
| **Anotácia projektu** | Projekt je zameraný na využitie technológií strojového učenia pri hmotnostnej a optickej sprektroskópií. Získané údaje budú pomocou techník sensor fusion a techník strojového učenia vyhodnotené a bude stanovaná hodnota nameraných molekúl a atómov. Oproti súčasným samostatným použitiam GC-MS a GC-IMS predpokladáme, že náš skúmaný koncept bude ponúkať vyššie výkonnostné štandardy za podstatne nižšie náklady. To by mohlo viesť k širšej adaptácii technológie v priemyselných a výskumných laboratóriách po celom svete. V dnešnej dobe je výskum v oblasti umelej inteligencie a strojového učenia rýchly, avšak jeho integrácia s analytickými technológiami je ešte stále v začiatkoch. Naše zameranie na použitie týchto techník na vyhodnocovanie dát a kalibráciu je progresívne a predstavuje významný krok vpred v oblasti analytickej chémie a klinickej diagnostiky. |

Obsah

[Úvod 5](#_Toc206074222)

[1 Súčasný stav poznania podľa literatúry z O1.1 6](#_Toc206074223)

[1.1 Optická spektroskopia 6](#_Toc206074224)

[1.2 Hmotnostná spektrometria – prehľad a vývoj 6](#_Toc206074225)

[1.3 Integrácia optickej a hmotnostnej spektroskopie 6](#_Toc206074226)

[1.4 Využitie plazmy v spektroskopii 7](#_Toc206074227)

[1.5 Fúzia dát 8](#_Toc206074228)

[2 Odporúčania pre ďalší výskum 8](#_Toc206074229)

[3 SWOT analýza projektu na základe naštudovanej literatúry 9](#_Toc206074230)

[3.1 Silné stránky (Strengths) 9](#_Toc206074231)

[3.2 Slabé stránky (Weaknesses) 9](#_Toc206074232)

[3.3 Príležitosti (Opportunities) 9](#_Toc206074233)

[3.4 Hrozby (Threats) 10](#_Toc206074234)

[4 Možné oblasti využitia zariadenia 10](#_Toc206074235)

[5 Prínos štúdie literatúry pre projekt a výskumný tím 11](#_Toc206074236)

[Záver 11](#_Toc206074237)

# Úvod

Projekt „Výskum hybridných spektrometrických metód pre identifikáciu atómov a molekúl na úrovni ppb pomocou technológií sensor fusion a strojového učenia“ (kód projektu 09I05-03-V02-00028) je zameraný na vývoj a optimalizáciu analytických prístupov, ktoré spájajú prednosti optickej a hmotnostnej spektroskopie. Hlavným cieľom je vytvoriť vysoko citlivý, ekonomicky efektívny a spoľahlivý nástroj schopný detegovať molekuly už na úrovni desiatok častí na miliardu (ppb). Takéto riešenie má potenciál priniesť rýchlu a presnú analýzu zložitých vzoriek v medicíne, priemysle a environmentálnom monitorovaní.

Tento sumarizačný report je súčasťou pracovného balíka KPB1 – Analyzer Research, ktorý prebieha počas prvých dvanástich mesiacov riešenia projektu. KPB1 sa zameriava na hĺbkový prieskum súčasného stavu poznania, analýzu dostupných technológií, metodík a algoritmov, ako aj na návrh koncepčných prístupov pre následné experimentálne overenie. Úlohou tohto dokumentu je nadviazať na zoznam relevantných zdrojov (O1.1) a spracovať syntézu poznatkov získaných z vybraných vedeckých a technických publikácií. Takto pripravený prehľad poskytuje východiskový rámec pre návrh experimentov, vývoj prototypu meracej sústavy a testovanie metód v rámci pracovného balíka KPB2.

Na základe zoznamu relevantných zdrojov (O1.1) boli identifikované a spracované vedecké publikácie, patenty a technické dokumenty, ktoré sme tematicky zatriedili do piatich hlavných oblastí zodpovedajúcich zameraniu projektu:

1. **Optická spektroskopia** – techniky a aplikácie optickej emisnej a Ramanovej spektroskopie, vrátane pokročilých excitačných metód.
2. **Hmotnostná spektroskopia** – využitie GC–IMS, GC–MS a príbuzných techník na detekciu plynných a prchavých organických zlúčenín.
3. **Plazmová aktivácia** – metódy povrchovej a plynnej aktivácie vzoriek pomocou studenej plazmy s dôrazom na zvýšenie citlivosti detekcie.
4. **Sensor fusion a dátová integrácia** – postupy spájania výstupov z rôznych spektrometrických metód s cieľom zlepšiť presnosť a spoľahlivosť merania.
5. **Strojové učenie v spektrometrii** – algoritmy a modely pre spracovanie, klasifikáciu a interpretáciu spektrálnych dát.

Toto zatriedenie umožnilo systematickú analýzu stavu poznania v jednotlivých oblastiach a identifikáciu prienikov medzi nimi, ktoré sú relevantné pre koncept hybridnej spektroskopie riešenej v projekte.

# Súčasný stav poznania podľa literatúry z O1.1

## Optická spektroskopia

Zdroje uvedené v O1.1 ukazujú, že optická spektroskopia ostáva kľúčovým nástrojom pre rýchlu a bezkontaktnú analýzu zloženia vzoriek. Najväčší rozvoj je viditeľný v oblasti optickej emisnej spektroskopie (OES) a Ramanovej spektroskopie. Publikácie sa zameriavajú na zvýšenie citlivosti a selektivity, napríklad použitím vysokorozlišovacích spektrometrov, špeciálnych excitačných zdrojov alebo povrchovo zosilnenej Ramanovej spektroskopie (SERS). Trendom je miniaturizácia optických systémov a ich prenositeľnosť, čo otvára cestu k terénnym meraniam a rýchlej diagnostike.

**Medzery:**

* Nedostatok štúdií porovnávajúcich účinnosť rôznych optických techník pri extrémne nízkych koncentráciách analytov.
* Obmedzené informácie o dlhodobej stabilite a opakovateľnosti prenosných optických systémov v terénnych podmienkach.

**Príležitosti:**

* Vývoj kompaktného optického modulu optimalizovaného na špecifické cieľové látky.
* Integrácia pokročilých excitačných zdrojov (napr. laserov s nastaviteľnou vlnovou dĺžkou) na zvýšenie citlivosti.

## Hmotnostná spektrometria – prehľad a vývoj

Literatúra potvrdzuje, že hmotnostná spektrometria, vrátane plynových chromatografov s hmotnostnou detekciou (GC–MS) a ion-mobility spektrometrov (GC–IMS), patrí medzi najspoľahlivejšie metódy pre detekciu prchavých organických zlúčenín (VOC) a iných plynných analy­tov na úrovni ppb. Novšie štúdie sa sústreďujú na skrátenie času analýzy, zníženie energetickej náročnosti a zjednodušenie prípravy vzoriek. Rozvíjajú sa aj prístupy využívajúce nové ionizačné zdroje a kombináciu chromatografie s rýchlymi detekčnými technológiami, čo umožňuje presnejšie a rýchlejšie merania.

**Medzery:**

* Nedostatok optimalizovaných protokolov pre rýchlu analýzu bez náročnej predúpravy vzorky.
* Slabé prepojenie GC–IMS a GC–MS dát v reálnom čase.

**Príležitosti:**

* Testovanie nových ionizačných techník (napr. plazmových zdrojov) pre zníženie času analýzy.
* Implementácia automatizovaných postupov spracovania signálu s podporou ML pre zlepšenie identifikácie.

## Integrácia optickej a hmotnostnej spektroskopie

Zdroje ukazujú, že spojenie optickej a hmotnostnej spektroskopie prináša synergický efekt – optické metódy poskytujú rýchlu a nenáročnú predbežnú identifikáciu, zatiaľ čo hmotnostné metódy zabezpečujú vysokú presnosť a nízke limity detekcie. Publikované práce opisujú napríklad systémy, kde optická analýza určí pravdepodobný profil vzorky a následná hmotnostná analýza potvrdí alebo spresní výsledky. Integrácia týchto dvoch prístupov je čoraz častejšie realizovaná v reálnom čase, pričom sa kladie dôraz na kompatibilitu dátových výstupov.

**Medzery:**

* Chýbajú štandardizované protokoly pre synchrónne merania a zlúčenie výstupov z oboch metód.
* Obmedzené množstvo prípadových štúdií, kde sa integrácia realizovala v reálnom čase.

**Príležitosti:**

* Navrhnúť rozhranie umožňujúce simultánny zber dát z oboch spektrometrických kanálov.
* Vytvoriť dátovú štruktúru pripravenú na fúziu údajov a následnú analýzu ML modelmi.

## Využitie plazmy v spektroskopii

Podľa prehľadu literatúry z O1.1 je studená plazma perspektívnym nástrojom na aktiváciu povrchov a ionizáciu vzoriek pre spektrometrické merania. U pevných vzoriek umožňuje uvoľnenie adsorbovaných molekúl, čím zvyšuje intenzitu signálu v optických aj hmotnostných metódach. Pri plynných vzorkách môže plazma fungovať ako vysokoúčinný ionizačný zdroj, pričom zloženie pracovného plynu (napr. He, Ar, N₂) výrazne ovplyvňuje účinnosť ionizácie a spektrálny profil. Štúdie tiež uvádzajú možnosti využitia plazmy na dezinfekciu, povrchovú modifikáciu a chemickú transformáciu analytov pred detekciou.

**Medzery:**

* Nedostatok porovnávacích experimentov hodnotiacich účinnosť rôznych pracovných plynov a konfigurácií elektród pre konkrétne analytické úlohy.
* Málo dát o vplyve plazmovej aktivácie na kvantitatívnu presnosť výsledkov.

**Príležitosti:**

* Optimalizácia parametrov plazmového zdroja pre vybrané aplikácie (pevné vs. plynné vzorky).
* Prepojenie plazmovej aktivácie s oboma typmi spektroskopie (optickou aj hmotnostnou) v jednom meracom systéme.

**5. MEMS plynové senzory**

V zozname zdrojov sa nachádzajú práce dokumentujúce vývoj MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) plynových senzorov, ktoré sú schopné detegovať špecifické plyny alebo skupiny plynov s vysokou citlivosťou a nízkou spotrebou energie. Moderné MEMS senzory využívajú katalytické vrstvy, polovodičové materiály alebo rezonančné princípy. Ich výhodou je miniaturizácia a nízke výrobné náklady, čo umožňuje integráciu do prenosných analytických systémov. Nevýhodou môže byť obmedzená selektivita, ktorú možno zlepšiť kombináciou viacerých senzorov a spracovaním dát pomocou pokročilých algoritmov.

**Medzery:**

* Limitovaná selektivita pri meraní komplexných plynných zmesí.
* Nedostatok údajov o správaní senzorov pri veľmi nízkych koncentráciách a premenlivých podmienkach prostredia.

**Príležitosti:**

* Vytvorenie multisenzorového poľa s odlišnými citlivými vrstvami pre širší rozsah detekcie.
* Aplikácia algoritmov pre kompenzáciu vplyvu teploty, vlhkosti a rušivých plynov.

## Fúzia dát

V literatúre sa jednoznačne potvrdzuje, že fúzia dát z rôznych analytických zdrojov vedie k zlepšeniu spoľahlivosti a presnosti výsledkov. Zdroje z O1.1 opisujú metódy fúzie na rôznych úrovniach – od jednoduchého kombinovania signálov po pokročilé algoritmy strojového učenia, ktoré spájajú celé spektrálne dataset-y. Najväčšou výzvou zostáva zjednotenie dátových formátov, synchronizácia meraní a eliminácia šumu. Pri hybridnej spektroskopii môže fúzia dát zásadne prispieť k zníženiu limitu detekcie a zvýšeniu robustnosti celého systému.

**Medzery:**

* Chýba jednotný rámec pre integráciu dát zo spektrometrických a senzorových zdrojov.
* Nedostatočné využitie pokročilých ML metód (napr. hlbokých neurónových sietí) na multispektrálne dáta.

**Príležitosti:**

* Navrhnúť adaptívny algoritmus fúzie dát, ktorý bude pracovať s rôznymi typmi vstupov (optické spektrá, hmotnostné spektrá, senzorové výstupy).
* Overiť prínos fúzie na zníženie limitu detekcie a zvýšenie robustnosti identifikácie.

# ****Odporúčania pre ďalší výskum****

Na základe analýzy literatúry a identifikovaných technologických medzier boli formulované odporúčania pre ďalší výskum, ktoré budú tvoriť východisko pre nasledujúcu fázu projektu.

V oblasti **optickej spektroskopie** sa odporúča vybrať jednu perspektívnu techniku, napríklad vysokorozlišovaciu optickú emisnú spektroskopiu (OES), na testovanie v kombinácii s hmotnostnou spektrometriou. Dôležitým krokom bude overiť vlastnosti excitácie pomocou plazmy a jej vplyv na citlivosť detekcie pri veľmi nízkych koncentráciách. Zároveň je vhodné navrhnúť kompaktný optický modul optimalizovaný pre integráciu do budúceho komerčného riešenia.

V rámci **hmotnostnej spektrometrie** je prioritou implementovať ionizačný zdroj na báze studenej plazmy a porovnať jeho výkon s pasívnou desorbciou prchavých organických zlúčenín (VOC) z povrchov. Ďalším krokom je optimalizácia nastavení GC–IMS pre rýchlu analýzu VOC a vypracovanie metodiky spracovania dát v reálnom čase, čo umožní efektívnejšie vyhodnocovanie výsledkov.

Pri **integrácii optickej a hmotnostnej spektroskopie** sa odporúča navrhnúť jednotné dátové rozhranie pre súčasný zber a synchronizáciu meraní z oboch metód. Predbežná analýza optickými metódami môže slúžiť na určenie pravdepodobného zloženia vzorky, ktoré sa následne potvrdí hmotnostnou spektrometriou. Je potrebné overiť aj technické možnosti časovo zladeného spúšťania meracích sekvencií.

V oblasti **využitia plazmy v spektroskopii** je dôležité skúmať vplyv intenzity a trvania plazmovej expozície na kvalitu spektrálnych dát a preskúmať možnosti spoločného využitia plazmy na povrchovú aktiváciu aj ionizáciu v jednom procese.

Pokiaľ ide o **MEMS plynové senzory**, odporúča sa vytvoriť a otestovať multisenzorové pole s rôznymi citlivými vrstvami a integrovať tieto senzory ako doplnkový analytický kanál k optickej a hmotnostnej spektrometrii. Významným krokom bude aj vývoj algoritmov na kompenzáciu vplyvu prostredia, ako sú teplota, vlhkosť či prítomnosť rušivých plynov.

V oblasti **fúzie dát** je potrebné navrhnúť modul, ktorý dokáže spracovať spektrálne aj senzorové výstupy v jednotnom formáte, a otestovať rôzne algoritmy strojového učenia – od SVM cez random forest až po hlboké neurónové siete – na multispektrálnych datasetoch. Validácia prínosu fúzie by mala potvrdiť jej schopnosť znížiť limit detekcie a zlepšiť presnosť identifikácie analy­tov.

# SWOT analýza projektu na základe naštudovanej literatúry

## Silné stránky (Strengths)

* **Multimodálny prístup** – kombinácia optickej a hmotnostnej spektroskopie prináša synergický efekt vyššej citlivosti, rýchlosti a presnosti.
* **Flexibilita metodiky** – možnosť prispôsobiť konfiguráciu systému rôznym typom analy­tov a aplikačným oblastiam (medicína, priemysel, ekológia).
* **Integrácia pokročilých technológií** – využitie studenej plazmy, MEMS senzorov a algoritmov strojového učenia.
* **Potenciál miniaturizácie** – kompaktné optické a senzorové moduly umožňujú prenositeľné riešenia a terénne merania.

## Slabé stránky (Weaknesses)

* **Technická zložitosť** – integrácia viacerých analytických metód si vyžaduje precíznu synchronizáciu a kalibráciu.
* **Obmedzené štandardy** – chýbajú jednotné protokoly pre fúziu dát z optických, hmotnostných a senzorových zdrojov.
* **Citlivosť na environmentálne podmienky** – MEMS senzory a optické metódy môžu byť ovplyvnené teplotou, vlhkosťou a rušivými plynmi.
* **Nedostatok reálnych datasetov** – pre trénovanie ML modelov je potrebné rozsiahle zberné úsilie.

## Príležitosti (Opportunities)

* **Nové aplikačné oblasti** – rýchla diagnostika chorôb z VOC, kontrola kvality potravín a nápojov, monitorovanie životného prostredia.
* **Komerčný potenciál** – možnosť vývoja prenosných prístrojov pre priemysel, zdravotníctvo či bezpečnostné zložky.
* **Pokrok v technológiách** – rozvoj výkonnejších detektorov a MEMS senzorov.
* **Podpora AI a digitalizácie** – rastúci dopyt po systémoch s integrovanou automatickou analýzou dát.

## Hrozby (Threats)

* **Konkurenčné technológie** – rýchly vývoj v oblasti single-method prístrojov s vyššou špecializáciou.
* **Náročnosť validácie** – pre niektoré aplikácie bude potrebná klinická alebo priemyselná certifikácia, čo predlžuje uvedenie na trh.
* **Finančná náročnosť prototypovania** – vysoké náklady na špičkové komponenty a integráciu.
* **Riziko technickej nekompatibility** – problémy pri prepojení rozdielnych meracích systémov a dátových formátov.

# ****Možné oblasti využitia zariadenia****

Na základe prehľadu dostupnej literatúry a technologických trendov možno predpokladať široké uplatnenie vyvíjaného zariadenia v rôznych oblastiach. V zdravotníctve predstavuje významnú oblasť **dychová analýza**, ktorá sa využíva na skríning a diagnostiku závažných ochorení, ako je rakovina pľúc, metabolické poruchy či infekčné choroby. Pokročilé techniky, ako GC–IMS alebo GC–MS, v kombinácii s optickou spektroskopiou a fúziou dát, umožňujú získať spoľahlivé biomarkery z prchavých organických zlúčenín (VOC) prítomných vo vydychovanom vzduchu. Pri infekčných ochoreniach, ako je COVID-19, sa tieto metódy ukázali ako perspektívne nielen pre rýchlu diagnostiku, ale aj pre prognózu priebehu ochorenia.

Ďalšou významnou oblasťou je **monitorovanie životného prostredia a bezpečnosti práce**, kde zariadenie dokáže v reálnom čase detegovať stopové koncentrácie VOC a iných škodlivín v ovzduší. To umožňuje rýchlu identifikáciu potenciálne nebezpečných situácií a prijatie preventívnych opatrení.

V **polovodičovom priemysle** a pri plazmových procesoch môže zariadenie slúžiť na presné riadenie technologických postupov prostredníctvom optickej emisnej spektroskopie (OES) na detekciu koncového bodu procesov (endpoint detection). V kombinácii s hmotnostnou spektrometriou a algoritmami strojového učenia sa tým zvyšuje presnosť, spoľahlivosť a efektivita výrobných operácií.

Zariadenie má potenciál aj v **potravinárskom a nápojovom priemysle**, kde môže byť využité na overovanie autenticity výrobkov, odhaľovanie falšovania či kontrolu prítomnosti rezíduí chemických látok priamo v prevádzke.

Významné uplatnenie je aj vo **forenznej a bezpečnostnej oblasti**, kde prístroj dokáže identifikovať stopy výbušnín, omamných a psychotropných látok alebo iných toxických chemikálií v terénnych podmienkach.

Okrem toho, pokroky v oblasti prenosných spektrometrických systémov a ambientnej ionizácie umožňujú využiť zariadenie aj ako súčasť **mobilných laboratórií** pre rýchle analytické zásahy priamo na mieste udalosti – v priemyselných prevádzkach, na hraniciach alebo pri environmentálnych haváriách.

# Prínos štúdie literatúry pre projekt a výskumný tím

Realizovaná štúdia literatúry priniesla projektu a výskumnému tímu niekoľko zásadných prínosov. V prvom rade poskytla **komplexný prehľad aktuálneho stavu poznania** v kľúčových oblastiach – optická spektroskopia, hmotnostná spektrometria, integrácia analytických metód, využitie plazmy, MEMS senzory a fúzia dát. Tento prehľad umožnil identifikovať najrelevantnejšie technológie, metodické postupy a aplikačné prístupy, ktoré môžu byť implementované v ďalších fázach projektu.

Dôležitým výstupom bolo aj **identifikovanie technologických medzier**, ktoré predstavujú priestor pre inovatívny výskum a vývoj. Tím na základe týchto poznatkov formuloval cielené odporúčania pre ďalší výskum, čím sa vytvoril jasný rámec pre experimentálne aktivity v nasledujúcom pracovnom balíku KPB2.

Štúdia literatúry zároveň umožnila **porovnať prístup projektu s existujúcimi riešeniami na trhu a v akademickej sfére**, čo pomohlo lepšie zadefinovať konkurenčné výhody pripravovaného zariadenia. Tým sa posilnila strategická pozícia projektu v medzinárodnom kontexte.

Pre výskumný tím mala analýza význam aj v rovine interného rozvoja – pomohla zjednotiť terminológiu, nastaviť spoločné chápanie kľúčových pojmov a metodík a zlepšila schopnosť interdisciplinárnej komunikácie medzi odborníkmi z oblasti optiky, hmotnostnej spektrometrie, plazmových technológií a dátovej analytiky.

V neposlednom rade štúdia slúži ako **odborný referenčný rámec**, ku ktorému sa tím môže priebežne vracať počas realizácie projektu, a ktorý môže byť čiastočne využitý aj pri príprave vedeckých publikácií a prezentácií.

# Záver

Spracovaná štúdia literatúry v rámci tohto sumarizačného reportu predstavuje kľúčový výstup pracovného balíka KPB1, ktorý vytvoril pevný teoretický a metodologický základ pre ďalšie etapy projektu. Analýza relevantných vedeckých a technických zdrojov umožnila získať ucelený obraz o súčasnom stave poznania v oblastiach optickej a hmotnostnej spektrometrie, možnostiach ich integrácie, využití plazmových technológií, vývoji MEMS senzorov a prístupoch k fúzii dát.

Štúdia identifikovala nielen technologické riešenia, ktoré sú už etablované a overené, ale aj oblasti, kde existujú zjavné technologické medzery. Tieto medzery zároveň predstavujú priestor pre originálny výskum a inovačné prístupy, ktoré môžu projektu priniesť konkurenčnú výhodu a vyššiu pridanú hodnotu pre koncových používateľov. Vďaka tomu sa podarilo formulovať cielené odporúčania pre ďalší výskum, ktoré budú slúžiť ako praktický návod pre návrh experimentov, vývoj prototypov a testovanie technológií v nasledujúcom pracovnom balíku KPB2.

Významný prínos štúdie spočíva aj v tom, že poskytla výskumnému tímu jednotný referenčný rámec, ku ktorému sa môže opierať počas celého trvania projektu. Spoločná analýza zdrojov z rôznych disciplín napomohla zjednotiť terminológiu, zosúladiť metodologické prístupy a posilniť interdisciplinárnu spoluprácu medzi odborníkmi z oblasti spektroskopie, plazmových technológií, senzoriky a dátovej analytiky. Tým sa zvýšila efektivita komunikácie a vytvoril sa základ pre hladký priebeh experimentálnej fázy.

Je dôležité zdôrazniť, že štúdia literatúry je v tomto projekte chápaná ako **otvorený a dynamický proces**. Hoci tento report sumarizuje stav poznania k aktuálnemu dátumu, jej dopĺňanie a aktualizácia budú pokračovať až do konca decembra 2025 v rámci pracovného balíka KPB1. Tento kontinuálny prístup umožní včas zachytiť nové vedecké poznatky, technologické trendy a relevantné publikácie, ktoré môžu zásadným spôsobom ovplyvniť smerovanie vývoja. Takto zabezpečíme, že projekt bude reagovať na najnovší vývoj v oblasti a zachová si technologickú aj odbornú konkurencieschopnosť.

Výsledky a poznatky zo štúdie literatúry budú zároveň využité aj ako podklady pre prípravu vedeckých publikácií, konferenčných príspevkov a odborných prezentácií, čím projekt prispeje k medzinárodnému vedeckému diskurzu a zviditeľní prácu výskumného tímu.