

# Optický senzor

Šimon Prokop, Tomáš Knopf, Artsemi Matsevil, Yana Yakuba, Daniel Hranáč, Honza Šebele, Lukáš Kániský, Martin Bíba, Štěpán Roušal, Vojtěch Danda

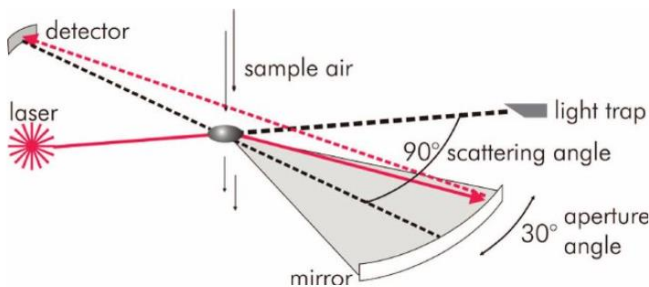
## I. ÚVOD

**N**aším cílem bylo vytvořit kompaktní zařízení založené na

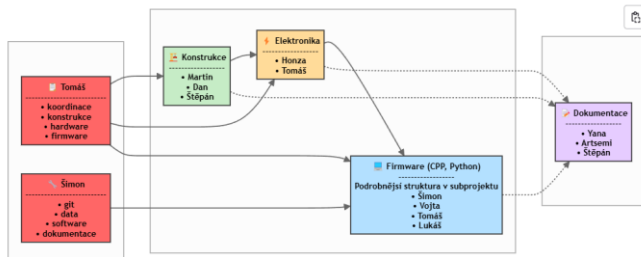
laserové technologii, které by dokázalo detekovat přítomnost částic v ovzduší a odhadnout jejich velikost na základě intenzity a charakteru rozptýleného světla. Chtěli jsme navrhnout řešení, které bude nejen technicky funkční, ale také malé, energeticky efektivní a cenově dostupné, vhodné například pro osobní použití, měření v interiérech nebo jako součást chytré domácnosti.

Využitím dvou laserových diod s odlišnou vlnovou délkou a dvojice citlivých optických senzorů usilujeme o zvýšení přesnosti měření a základní rozlišení velikostních kategorií částic.

## II. NÁVRH



Obrázek 1. Ukázka prvotního návrhu pro pochopení konceptu



Obrázek 2. Rozdělení prací

Jak je vidět na obrázku 1, naše konstrukce senzoru částic je založena na kompaktní optické komoře, ve které jsou umístěny

dva laserové zdroje – zelený (532 nm) a červený (635 nm). Tyto lasery jsou orientovány tak, aby jejich paprsky procházely přes střed komory, kde dochází k rozptylu paprsku na částicích ve vzduchu.

Částice jsou vytvářeny pomocí generátoru mlhy, který vytváří aerosol s definovanou velikostí částic. Tento aerosol vstupuje do komory skrze vstupní otvor, jehož tvar minimalizuje turbulence a umožňuje laminární tok vzduchu s částicemi. Kolem osy rozptylu jsou umístěny dva optické detektory OPT101, které zachycují rozptýlené světlo pod definovaným úhlem. Detekovaný signál je následně zesílen a digitalizován pomocí 16-bitového převodníku ADS1115. Tato data jsou dále zpracována mikrokontrolérem Arduino Nano.

## III. REALIZACE

### ■ Zapojení a technické řešení

Senzor částic využívá princip rozptylu světla při detekci prachových částic ve vzduchu. Zařízení je navrženo tak, aby dokázalo detekovat různé typy částic na základě odlišného rozptylu dvou různých vlnových délek.

- A. Laserové zdroje
- Zařízení využívá dvě laserové diody:
- Zelený laser o vlnové délce 532 nm,
- Červený laser o vlnové délce 635 nm.

Každý laser je napájen samostatně a řízen pomocí výkonových MOSFET tranzistorů IRF3205. Spínání probíhá na základě logických úrovní z výstupních pinů mikrokontroléru Arduino Nano (s čipem ATmega328P). Použití dvou různých vlnových délek umožňuje analyzovat chování částic různých velikostí a složení — některé částice rozptylují více červené světlo, jiné zelené, což zvyšuje schopnost senzoru rozlišit typy znečištění.

MOSFET tranzistory jsou zapojeny jako spínače v zapojení s otevřeným kolektorem, přičemž každý ovládá napájecí větev jednoho laseru. Pull-down rezistory zajišťují správný stav v klidovém režimu.

- B. Optické snímání

Pro detekci rozptýleného světla jsou použity dvě lineární fotodiody s integrovaným zesilovačem typu OPT101. Tyto senzory obsahují:

- fotodiodu (citlivou v rozsahu cca 400–1000 nm),
- transimpedanční zesilovač s pevně daným ziskem.

Umístění fotodiod je provedeno v úhlu  $90^\circ$  vůči ose laserového paprsku, což odpovídá klasické geometrii pro měření rozptylu dle Rayleighova a Mieova modelu. Každá fotodioda je zacloněna clonou pro eliminaci přímého světla a okolního rušení.

#### • C. Digitalizace signálu

Analogové výstupy fotodiod (napětí v rozsahu 0–5 V) jsou přiváděny na přesný 16bitový A/D převodník ADS1115, který umožňuje měřit až 4 analogové kanály s vysokou citlivostí (při nastavení zesílení až  $\pm 0.256$  V lze dosáhnout rozlišení v řádu mikrovoltů).

ADS1115 komunikuje s Arduino Nano prostřednictvím I2C sběrnice (typicky piny A4 - SDA a A5 - SCL). Měření jsou střídavě prováděna pro každý kanál, podle toho, který laser je aktivní. Pro minimalizaci šumu a zajištění přesnosti je měření několikrát časově průměrováno.

#### • D. Logika řízení a sekvence měření

Arduino Nano realizuje následující cyklus:

1. Aktivace červeného laseru (spuštění MOSFET 1),
2. Krátké čekání na ustálení (cca 10 ms),
3. Měření z obou fotodiod (záznam signálu rozptýleného světla),
4. Vypnutí červeného laseru, zapnutí zeleného (MOSFET 2),
5. Opakování měření,
6. Vypnutí všech laserů, zpracování dat,
7. Odeslání hodnot přes sériové rozhraní nebo I2C.

#### • E. Vývoj senzoru:

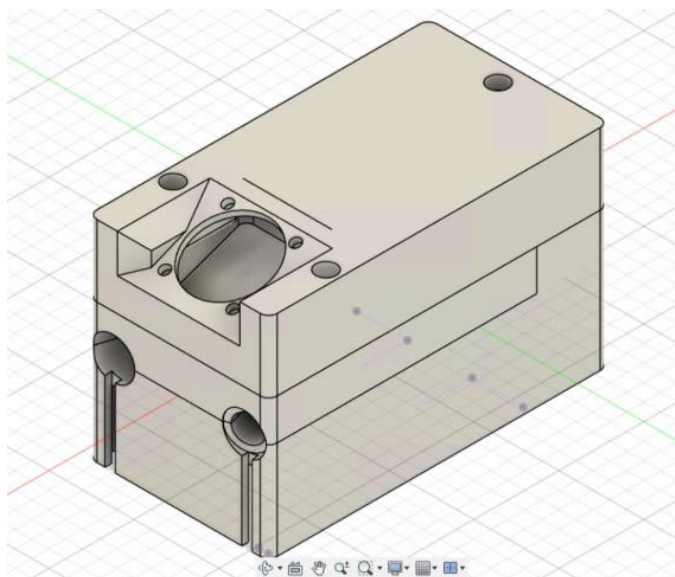
V první fázi vývoje jsme se zaměřili na experimentální ověření vlivu geometrického uspořádání jednotlivých

komponent senzoru – konkrétně pozice laserových diod a fotodiod – na citlivost a přesnost detekce prachových částic. Pomocí jednoduchých testovacích sestav jsme zkoumali, jak různé úhly, vzdálenosti a orientace ovlivňují míru detekovaného rozptýleného světla při různých koncentracích částic. Testy byly provedeny jak při standardním osvětlení, tak při omezení přístupu vnějšího světla.

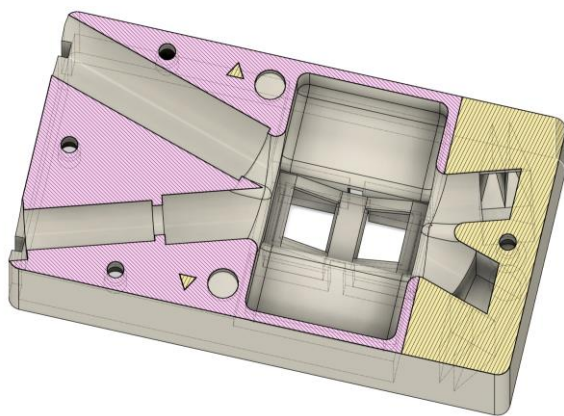
Na základě těchto měření byl pomocí 3D tisku vytvořen první funkční prototyp komory, který umožňoval flexibilně měnit umístění laserových modulů a snímacích fotodiod. Tento prototyp jsme dále využili k testování odezvy senzoru na různé typy částic a rychlosti proudění vzduchu v komoře. Významným faktorem bylo také vyhodnocení vlivu vnějšího osvětlení, které může zkreslovat výsledky měření – zejména při vyšších intenzitách okolního světla.

V další fázi jsme se zaměřili na zmenšení celkových rozměrů zařízení a integraci všech komponent do kompaktního, pevného pouzdra, které zároveň omezuje přístup vnějšího světla. Výsledkem tohoto vývojového cyklu je finální verze senzoru, který při malých rozměrech dosahuje vysoké přesnosti měření a stabilní funkce i při dlouhodobém provozu. Součástí návrhu bylo také optimalizované řízení laserových diod, vylepšené stínění detekčních obvodů a zpřesněné vyhodnocování dat pomocí vícebodového průměrování signálu.

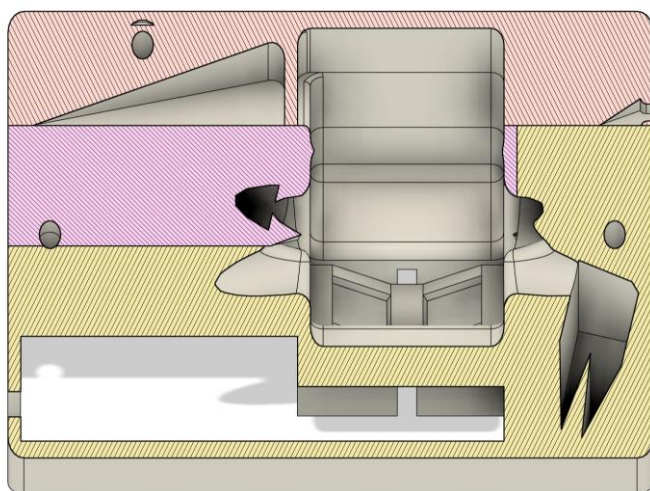
Celý vývoj senzoru tak probíhal v několika iteracích, při kterých jsme vždy na základě měření a analýzy dat upravovali konstrukci i elektroniku. Díky tomu se podařilo vytvořit funkční zařízení s dobrým poměrem mezi výkonem, velikostí a cenovou dostupností.



Obrázek 3. Celkový pohled na 3D model senzoru částic



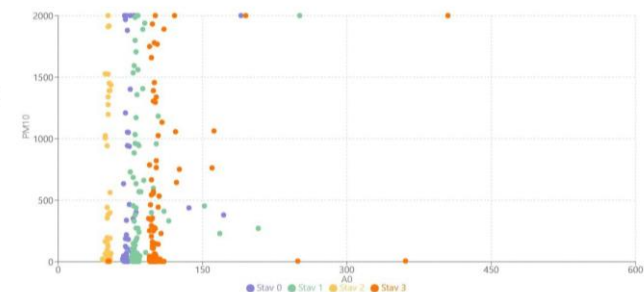
Obrázek 4. Řez 3D modelem se zobrazením vnitřního uspořádání senzorové komory.



Obrázek 5. Řez 3D modelem s boku se zobrazením vnitřního uspořádání senzorové komory.

#### IV. ZAVĚR

Závislost A0 na PM10 podle stavu laserů



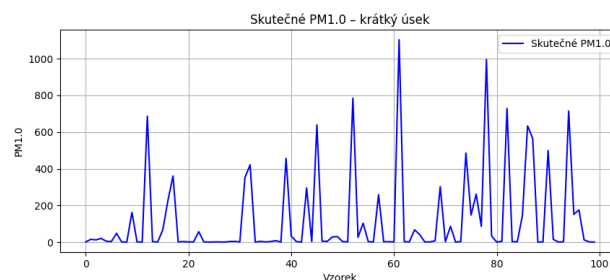
Obrázek 6. Vliv naměřené intenzity osvětlení senzoru A0 na stavu laserů pro různé koncentrace částic

Graf znázorňuje vztah mezi koncentrací PM10 (osa x) a hodnotou A0 (osa y) ve čtyřech stavech laseru. Při nízkých koncentracích PM10 (0–350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) je patrný velký rozptyl dat,

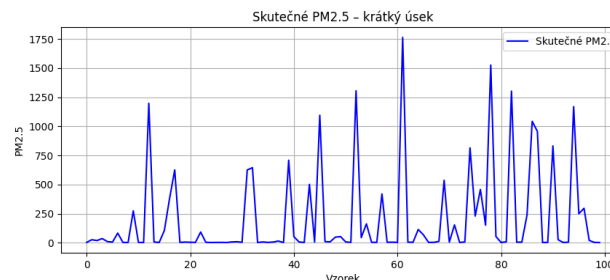
zejména ve stavech 0 a 2. Naopak při vyšších koncentracích (700–1400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) jsou data řidší, ale A0 je stabilnější, zvláště ve stavu 3. To může ukazovat na nasycení senzoru.

Pro porovnání výkonu modelu jsme zvolili krátký časový úsek (vzorky 200–300), kde vykresluje skutečné a predikované hodnoty PM1.0 a PM10 ve třech variantách:

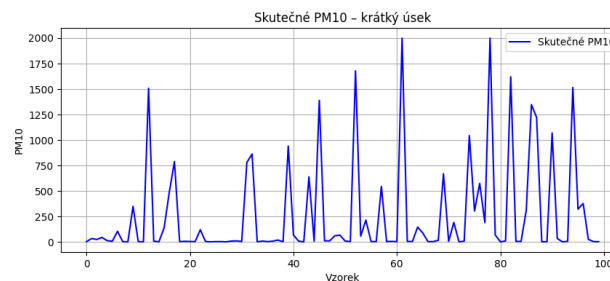
#### ● Skutečné hodnoty samostatně



Obrázek 7. Skutečné hodnoty pro PM1.0

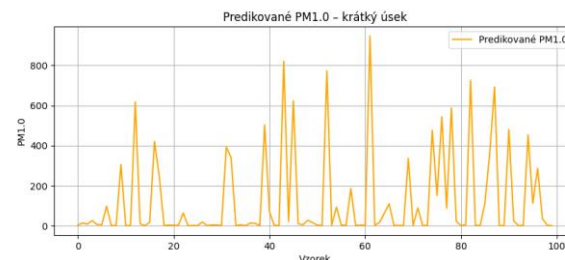


Obrázek 8. Skutečné hodnoty pro PM2.5

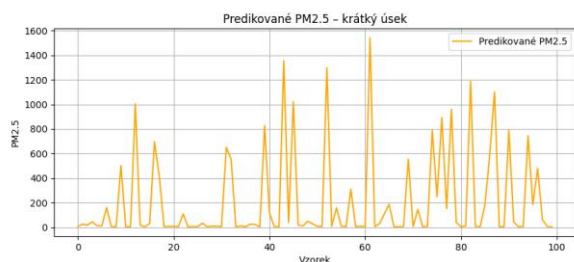


Obrázek 9. Skutečné hodnoty pro PM10

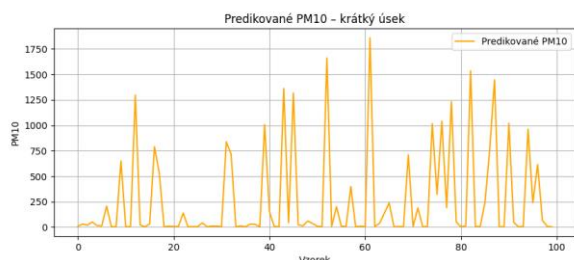
#### ● Predikované hodnoty samostatně



Obrázek 10. Predikované hodnoty pro PM1.0

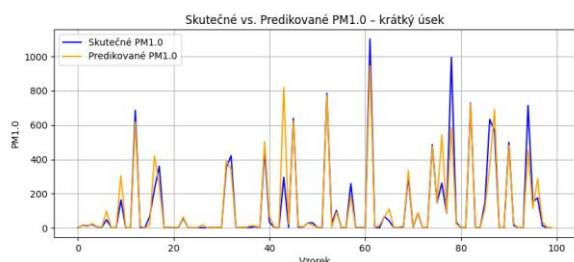


Obrázek 11. Predikované hodnoty pro PM2.5

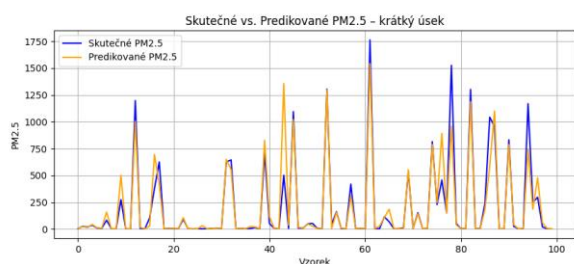


Obrázek 12. Predikované hodnoty pro PM10

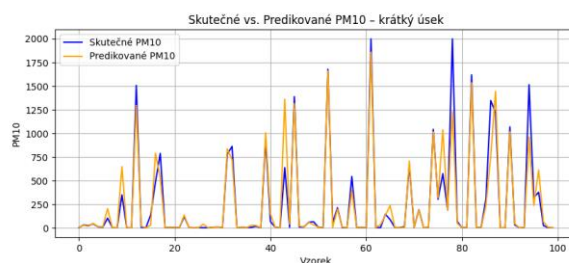
- Skutečné vs. Predikované v jednom grafu



Obrázek 13. Skutečné vs. Predikované hodnoty pro PM1.0



Obrázek 14. Skutečné vs. Predikované hodnoty pro PM2.5



Obrázek 15. Skutečné vs. Predikované hodnoty pro PM10

Model byl vytvořen pomocí Random Forestu, kde vstupními proměnnými jsou aktuální hodnoty fotosenzorů A0, A2, jejich zpoždění (lagy), stav laserových diod, které jsou použity jako kategorické proměnné (State) a rolling průměry se 7bodovým oknem.(odstranění šumu). Cílem bylo zlepšit predikci koncentrace prachových částic. Pomocí různých prediktorů.

### ■ Interpretace výsledků:

- Umístění senzorů a popis stavů laserů:

V měření byly použity dvě fotodiody. Senzor A0 je umístěn proti směru paprsku, a tedy snímá světlo odražené zpět ke zdroji. Naproti tomu senzor A2 je umístěn ve směru paprsku, kde zachycuje světlo, které prošlo vzorkem nebo bylo dále rozptýleno.

Během experimentu byly použity dva lasery – zelený a červený. Měření probíhala ve čtyřech režimech:

- Při vypnutých obou laserech, což sloužilo ke stanovení úrovně okolního osvětlení (pozadí),
- Při sepnutém pouze zeleném laseru,
- Při sepnutém pouze červeném laseru,
- Při sepnutých obou laserech zároveň.
- 
- 
- Vliv stavu laserů na senzory:

Stav zapnutí laserů měl zásadní vliv na intenzitu světla zaznamenanou oběma senzory. Největší rozdíl v naměřených hodnotách byl pozorován mezi režimem se zapnutým pouze červeným laserem a režimem se zapnutým pouze zeleným laserem, kde se výstupy senzorů lišily až 5–6násobně.

- Vztah mezi koncentrací prachových částic a senzory



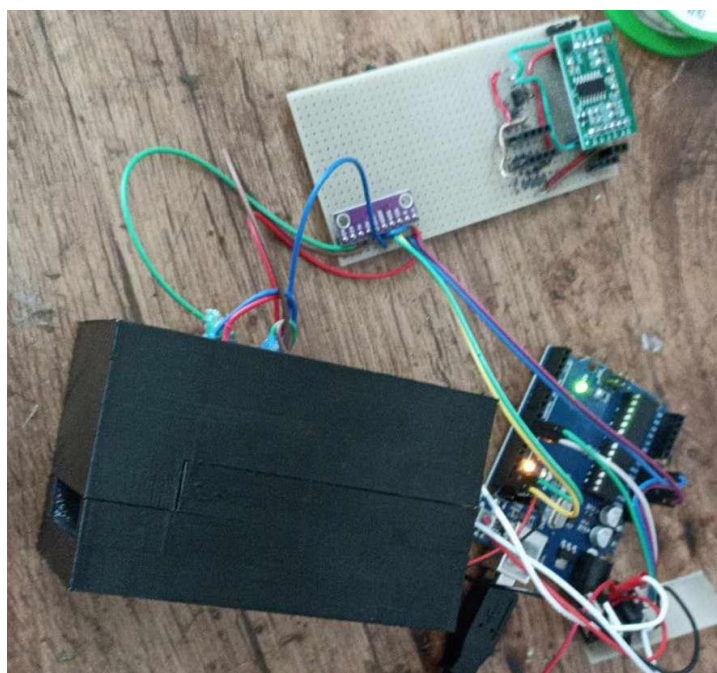
Při vypnutých laserech, sepnutém pouze zeleném laseru a při zapnutých obou laserech byla patrná mírná korelace mezi koncentrací prachových částic a hodnotami zaznamenanými oběma senzory. Naproti tomu při sepnutém pouze červeném laseru se hodnoty senzorů téměř neměnily v závislosti na množství prachu – chování fotodiod bylo prakticky konstantní bez ohledu na koncentraci částic.

- Zajímavá pozorování:
- Senzor A2, který měří světlo po směru paprsku, vykazoval výrazně větší rozptyl naměřených hodnot (v rozsahu přibližně 47 až 2293) než senzor A0 (v rozsahu 45 až 772).
- Z toho vyplývá, že A2 je citlivější na změny stavu laserů než A0, pravděpodobně díky svému umístění, které zachycuje světlo pronikající nebo rozptýlené skrz vzorek.
- Koncentrace prachových částic dosahovala vysokých maximálních hodnot (až kolem 2000), nicméně jejich rozložení pravděpodobně nebylo rovnoměrné, což může být způsobeno např. turbulentním prouděním nebo lokální akumulací částic během měření.

#### **Ve vytvořené interaktivní vizualizaci můžete prozkoumat:**

- Přehled průměrných hodnot podle stavu laserů
- Korelaci mezi hodnotami senzorů a prachovými částicemi s možností výběru veličin
- Statistiky senzorů včetně minimálních, průměrných a maximálních hodnot

Podařilo se nám vyvinout senzor, který dokáže spolehlivě měřit koncentraci prachových částic při různých nastaveních laseru. Pro zvýšení přesnosti a lepší rozlišení velikostí částic by bylo vhodné provést měření na větším množství vzorků. Výsledky potvrzují významný vliv stavu laseru na optické senzory, zatímco samotná koncentrace částic má na výstup senzorů spíše mírný vliv.



Obrázek 16. Experimentální setup pro měření koncentrací prachových částic