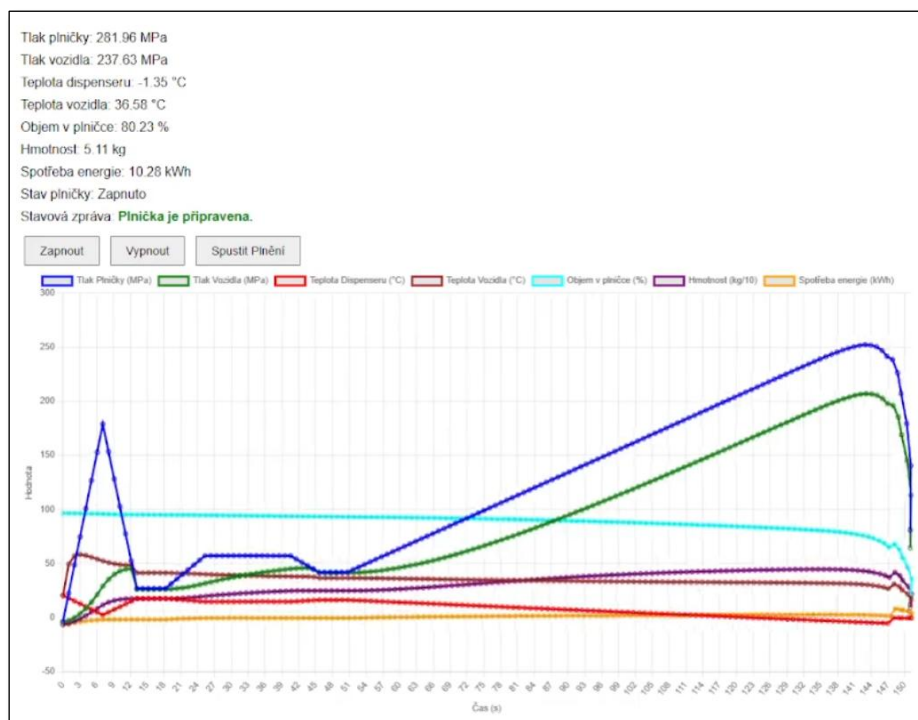


# Digitální model prvků plnicí infrastruktury

## R – Software





Tento výsledek je spolufinancován prostřednictvím Technologické agentury ČR v rámci  
Národního plánu obnovy z evropského Nástroje pro oživení a odolnost

## NÁZEV PUBLIKACE

Digitální model prvků plnicí infrastruktury

## PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

## NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Podpůrný SW pro akceleraci zavádění vodíkové mobility

## AUTOŘI

Stanislav Novotný, Petr Bouchner, Ondřej Smíšek (Fakulta dopravní, ČVUT v Praze)

## AUTORSKÝ TÝM KONCEPČNÍCH MATERIÁLŮ K SOFTWARE

Stanislav Novotný, Petr Bouchner, Ondřej Smíšek (Fakulta dopravní, ČVUT v Praze)

Jan Přikryl (Výzkumné centrum RICE, Fakulta elektrotechnická, ZČU)

Bronislav Vahalík (Centrum dopravního výzkumu)

## Obsah

|       |                                        |    |
|-------|----------------------------------------|----|
| 1     | Úvod .....                             | 4  |
| 2     | Dosavadní stav techniky.....           | 5  |
| 3     | Novost řešení .....                    | 6  |
| 4     | Popis SW.....                          | 7  |
| 4.1   | Koncepční materiály SW .....           | 7  |
| 4.1.1 | Použité principy .....                 | 7  |
| 4.1.2 | Návrh datových struktur.....           | 7  |
| 4.1.3 | Návrh architektury.....                | 8  |
| 4.1.4 | Návrh rozhraní .....                   | 10 |
| 4.2   | Analýza funkčních požadavků .....      | 12 |
| 4.2.1 | Hlavní funkce softwaru .....           | 12 |
| 4.2.2 | Podpora více provozních scénářů.....   | 12 |
| 4.2.3 | Vizualizace výsledků .....             | 12 |
| 4.2.4 | Flexibilita zadávání parametrů .....   | 13 |
| 4.3   | Programátorská dokumentace .....       | 13 |
| 4.3.1 | Vývojový diagram softwaru .....        | 13 |
| 4.3.2 | Struktura a klíčové části kódu.....    | 15 |
| 4.3.3 | Algoritmy a implementace .....         | 15 |
| 4.3.4 | Pseudokód simulace .....               | 16 |
| 5     | Popis ověření funkčnosti SW .....      | 17 |
| 5.1   | Technická validace .....               | 17 |
| 5.2   | Testování uživatelského rozhraní ..... | 17 |
| 5.3   | Integrace dat a export.....            | 18 |
| 6     | Umístění SW .....                      | 19 |
| 7     | Způsob využití .....                   | 20 |
| 7.1   | Samostatné využití softwaru.....       | 20 |
| 7.1.1 | Akademické využití .....               | 20 |
| 7.1.2 | Průmyslové využití.....                | 20 |
| 7.1.3 | Integrace do širších systémů .....     | 20 |
| 7.2   | Role v softwarovém ekosystému .....    | 21 |
| 8     | Seznam příloh.....                     | 22 |
| 9     | Seznam obrázků .....                   | 23 |

## 1 Úvod

Digitální model prvků plnicí infrastruktury je moderní softwarový nástroj navržený pro analýzu a optimalizaci procesů plnění vodíkových nádrží vozidel za různých provozních podmínek. Tento software využívá fyzikálních a termodynamických principů k modelování klíčových parametrů celého procesu – model sleduje například tlak, teplotu, spotřebu energie či množství přeneseného vodíku. Hlavní přínos modelu spočívá ve schopnosti simulovat chování plnicích stanic v reálném čase i za extrémních podmínek, čímž umožňuje uživatelům získat detailní pochopení procesů, aniž by museli riskovat selhání reálných zařízení.

Hlavním cílem softwaru je poskytnout prostředek pro pochopení komplexních fyzikálních a termodynamických jevů, ke kterým dochází při plnění vodíkových nádrží, a podpořit tak zohlednění procesů plnění vodíku do vozidel v obecném vodíkovém mikrogridu. Uživatelé tohoto modelu mají možnost analyzovat vliv různých provozních parametrů, jako jsou změny tlaku nebo teploty, na výkon a účinnost plnění. Díky tomu lze nejen optimalizovat provozní podmínky, ale také lépe navrhnout a dimenzovat zařízení tak, aby vyhovovala specifickým požadavkům různých aplikací. Software je navržen s důrazem na flexibilitu a modularitu a lze jej snadno přizpůsobit různým typům plnicích stanic, od menších zařízení až po velkokapacitní systémy. Navíc je možné jej rozšířit o nové funkce, například o integraci se senzory IoT nebo o napojení na cloudové platformy pro vzdálené monitorování a správu. Tato flexibilita umožňuje využití modelu v širokém spektru projektů, od akademického výzkumu přes průmyslové aplikace až po vývoj inovativních technologií pro vodíkovou infrastrukturu.

Jedním z klíčových přínosů simulátoru je zvýšení bezpečnosti: Simulací extrémních provozních podmínek, jako jsou tlakové rázy, přehřátí nebo kolísání energetických vstupů, lze identifikovat potenciální rizika a navrhnout preventivní opatření. Tento přístup minimalizuje nutnost experimentování na reálných zařízeních, čímž šetří náklady a eliminuje riziko poškození drahých komponent. Software zároveň slouží jako vzdělávací nástroj, který umožňuje studentům a odborníkům získat hlubší vhled do problematiky plnění vodíkových nádrží a interaktivně zkoumat různé scénáře a jejich dopady. To vede k lepšímu pochopení principů vodíkových technologií a přispívá k rozvoji této progresivní oblasti.

## 2 Dosavadní stav techniky

Proces plnění vodíkových nádrží představuje klíčovou součástí infrastruktury vodíkové ekonomiky. Technologie vodíkových plnicích stanic (VPS) prošly v posledních desetiletích výrazným vývojem, a to zejména díky potřebě zlepšit efektivitu, bezpečnost a spolehlivost při manipulaci s vodíkem. VPS musejí splňovat přísné normy a standardy, protože vodík jako plyn s vysokou energetickou hustotou a extrémně nízkou molekulární hmotností představuje značné technické výzvy.

Mezi nejčastěji používané technologie plnění vodíkových nádrží patří systémy založené na vysokotlakých kompresorech, chlazení během plnění a pokročilých bezpečnostních mechanismech. Moderní stanice jsou schopny plnit nádrže na tlak až 700 bar, což odpovídá požadavkům současných palivových článků používaných ve vozidlech na vodíkový pohon. Tyto vysokotlaké systémy využívají sofistikované algoritmy pro regulaci teploty a tlaku během plnění, aby nedocházelo k přehřívání nádrže ani k úniku plynu.

Modelování a simulace hrají v této oblasti klíčovou roli. Existující softwarové nástroje, jako MATLAB, ANSYS nebo COMSOL Multiphysics, umožňují detailní analýzu termodynamických procesů a navrhování komponent plnicích stanic. Tyto nástroje však často vyžadují pokročilé znalosti z oblasti programování a fyzikálního modelování, což může omezovat jejich použitelnost pro širší skupinu uživatelů. Navíc jejich implementace nebývá vždy uzpůsobena specifickým požadavkům plnicích stanic na vodík.

Stávající řešení se také zaměřují zejména na simulaci termodynamických a proudových procesů během plnění, avšak často postrádají možnost simulace extrémních provozních podmínek, například při kolísání objemu energie dodávané z obnovitelných energetických zdrojů nebo při výpadech systému. Další výzvou je integrace s novými technologiemi, jako jsou systémy IoT nebo digitální dvojčata, které umožňují sledovat a optimalizovat provoz stanic v reálném čase.

Navzdory těmto pokrokům stále existují oblasti, kde je prostor pro inovace. Patří sem například modelování a predikce degradačních procesů v nádržích, zlepšení energetické účinnosti nebo návrh adaptivních systémů, které se dokážou přizpůsobit různým požadavkům zákazníků a provozním podmínkám. Nové softwarové nástroje by měly být schopny nejen přesně simulovat stávající technologie, ale také podporovat vývoj inovativních řešení, která budou reflektovat potřeby moderní vodíkové infrastruktury.

Software popisovaný v tomto dokumentu se snaží překonat tyto nedostatky tím, že kombinuje přívětivé uživatelské rozhraní s výpočetními modely se stabilním aplikačním rozhraním. Umožňuje simulaci reálných i extrémních podmínek, podporuje integraci s moderními technologiemi a nabízí nástroje pro analýzu a optimalizaci. Software lze použít. Tím přispívá k dalšímu rozvoji plnicích stanic a zlepšení jejich provozních vlastností.

### 3 Novost řešení

Navrhovaný simulátor vodíkové plnicí stanice představuje inovativní přístup k modelování a optimalizaci procesů plnění vodíkových nádrží. Jeho hlavní novostí je kombinace pokročilých fyzikálních modelů, intuitivního uživatelského rozhraní a flexibilní architektury, která umožňuje snadné přizpůsobení různým aplikacím a provozním scénářům. Tento přístup zajišťuje přesnost, uživatelskou přívětivost a možnost rozšíření o nové funkce.

Mezi hlavní prvky novosti řešení patří:

- **Integrace dynamických simulací**  
Simulátor je schopen modelovat nejen statické provozní podmínky, ale také dynamické změny během plnění nádrží. Uživatelé mohou analyzovat vliv kolísání tlaku, teploty nebo průtoku na proces plnění a predikovat chování systému v reálném čase. Tato schopnost je zásadní při simulaci plnění nádrží za podmínek, které odpovídají reálným provozům, včetně kolísání napájecího zdroje nebo výpadků.
- **Podpora simulace extrémních podmínek**  
Software umožňuje testovat chování plnicích stanic při extrémních podmínkách, jako jsou tlakové rázy, přehřátí nebo nadměrné zatížení systémů. Tím poskytuje cenné informace pro návrh bezpečnostních mechanismů a pro prevenci poruch, což minimalizuje rizika spojená s provozem plnicích stanic.
- **Flexibilní návrh a modulární architektura**  
Simulátor byl navržen tak, aby podporoval různé typy plnicích stanic, od menších zařízení až po velkokapacitní systémy. Díky modulární architektuře lze přidávat nové funkce, například rozšíření pro predikci degradace nádrží, výpočty emisí nebo integraci s IoT zařízeními pro sběr dat.
- **Vizualizace výsledků**  
Výstupy simulací jsou prezentovány ve formě přehledných grafů, tabulek a reportů. Interaktivní vizualizace usnadňuje interpretaci dat a umožňuje uživatelům okamžitě identifikovat vliv provozních parametrů na výkon a účinnost systému.
- **Podpora rozhodování a optimalizace**  
Simulátor nabízí pokročilé nástroje pro optimalizaci provozních parametrů. Pomocí simulace lze testovat různé scénáře a identifikovat optimální podmínky, které zajišťují maximální účinnost a bezpečnost procesu plnění.
- **Snadné použití pro různé cílové skupiny**  
Software je navržen tak, aby jej mohli používat odborníci z různých oblastí, od inženýrů a výzkumníků po operátory plnicích stanic. Intuitivní uživatelské rozhraní umožňuje snadné zadávání vstupních parametrů a okamžité získání výsledků bez potřeby pokročilých znalostí programování nebo fyziky.

Navržený simulátor umožňuje nejen modelovat stávající provozní podmínky, ale lze jej použít jako podpůrný nástroj pro vývoj nových technologií plnění vodíkových nádrží. Tento přístup poskytuje uživatelům cenný nástroj pro zlepšení efektivity, bezpečnosti a udržitelnosti vodíkové infrastruktury.

## 4 Popis SW

### 4.1 Koncepční materiály SW

Simulátor vodíkové plnicí stanice byl navržen tak, aby přesně modeloval procesy spojené s plněním vodíkových nádrží a poskytoval uživatelům detailní náhled na klíčové fyzikální a termodynamické jevy. Architektura softwaru byla vytvořena s ohledem na modularitu, flexibilitu a uživatelskou přístupnost.

#### 4.1.1 Použité principy

- **Modularita a rozšiřitelnost**

Software je rozdělen do jednotlivých modulů reprezentujících klíčové fyzikální jevy (např. dynamika tlaku, teploty, Z-faktor). Tento přístup umožňuje snadné rozšíření funkcionality, například simulaci dalších plynů nebo přizpůsobení simulace specifickým provozním podmínkám.

- **Přesnost výpočtů**

Výpočty vycházejí z Bernoulliho rovnice, adiabatického ohřevu, Joule-Thomsonova efektu a dalších osvědčených fyzikálních modelů. Tyto metody byly implementovány tak, aby zajistily maximální přesnost simulace.

- **Vizualizace výsledků**

Interaktivní grafy a tabulky poskytují uživateli okamžitý přehled o vývoji tlaků, teplot, hmotnosti plynu a spotřebě energie během simulace.

#### 4.1.2 Návrh datových struktur

Aby simulátor vodíkové plnicí stanice efektivně spravoval vstupní parametry, výpočty a výstupní data, byly navrženy specifické datové struktury, které zajišťují organizaci a přenos informací mezi jednotlivými moduly. Tyto struktury podporují flexibilitu simulace, umožňují přesnou vizualizaci výsledků a zajišťují konektivitu s dalšími systémy.

### Vstupní data

Vstupní data slouží k definici počátečních a provozních podmínek simulace. Obsahují následující klíčové parametry:

- **Provozní parametry:**

- Počáteční tlak plničky a nádrže vozidla (v MPa).
- Počáteční teplota v dispenseru a nádrži vozidla (v °C).
- Maximální čas simulace (v sekundách).
- Geometrické parametry systému, například průměr potrubí plničky a vozidla (v metrech).

- **Fyzikální vlastnosti vodíku:**

- Hustota (v kg/m<sup>3</sup>).
- Viskozita (v Pa·s).
- Joule-Thomsonův koeficient (v K/MPa).
- Adiabatický koeficient (poměr  $c_p/c_v$ ).
- Koeficient přenosu tepla mezi plynem a okolím.

- **Konstrukční parametry:**

- Objem plničky (v procentech).
- Tvar a délka potrubí (pro výpočet tlakových ztrát).
- Koeficient přenosu tlaku mezi plničkou a nádrží.

Tyto parametry lze flexibilně nastavovat prostřednictvím uživatelského rozhraní, což umožňuje simulaci různých provozních scénářů.

### Výstupní data

Výstupní data poskytují informace o průběhu simulace a zahrnují:

- **Časové značky:** Záznam simulace v pravidelných intervalech (např. každá sekunda).
- **Tlakové parametry:**
  - Průběh tlaku v plničce a nádrži vozidla (v MPa).
  - Dynamický tlak (zohledňující rychlost proudění) a statický tlak v různých částech systému (v MPa).
- **Teplotní parametry:**
  - Vývoj teploty v dispenseru a nádrži vozidla (v °C).
  - Přenos tepla mezi systémem a okolím (v °C).
- **Energetické a hmotnostní parametry:**
  - Spotřeba energie během plnění (v kWh).
  - Přenesená hmotnost vodíku (v kg).
  - Energetická účinnost procesu.

Výstupní data jsou generována v reálném čase a zobrazována v interaktivních grafech a tabulkách. Lze je exportovat pro další analýzu.

### Konektivita

Konektivita systému zajišťuje kompatibilitu s externími aplikacemi a analytickými nástroji. Výstupy simulace lze exportovat ve standardních formátech:

- **CSV:** Strukturovaný tabulkový formát vhodný pro zpracování v dalších programech.
- **JSON:** Datový formát vhodný pro integraci s IoT platformami a analytickými nástroji.
- **Grafická data:** Hodnoty ve formátu připraveném pro vizualizaci.

#### 4.1.3 Návrh architektury

Architektura simulátoru vodíkové plnicí stanice byla navržena s cílem zajistit efektivní provádění simulací, přehlednou vizualizaci výsledků a snadnou rozšiřitelnost systému. Jedná se o vícevrstvou architekturu, která zahrnuje uživatelské rozhraní, výpočetní jádro a datovou vrstvu.

### Uživatelské rozhraní (UI)

Uživatelské rozhraní je vytvořeno v HTML a CSS, přičemž využívá knihovnu Chart.js pro vizualizaci výsledků. Je navrženo s důrazem na jednoduchost a intuitivní ovládání, aby bylo přístupné i uživatelům bez pokročilých znalostí. UI je připraveno pro integraci nejen v HTML prostředí, ale také v dalších platformách nebo aplikacích, které podporují webové technologie.

Hlavní prvky rozhraní zahrnují:

- **Panel pro zobrazení stavu**  
Zobrazuje klíčové informace o průběhu simulace, jako je tlak a teplota v plničce a nádrži vozidla, objem v plničce, spotřeba energie a aktuální stav zařízení.
- **Ovládací prvky**  
Umožňují uživatelům spouštět, zastavovat a resetovat simulaci. Tyto akce jsou propojeny s funkcemi výpočetního jádra a okamžitě ovlivňují simulaci.
- **Vizualizace dat**  
Interaktivní grafy zobrazují vývoj tlaků, teplot, spotřeby energie a dalších parametrů v reálném čase. Tyto grafy umožňují uživatelům snadno sledovat průběh simulace.

Díky této univerzální koncepci lze rozhraní simulátoru přizpůsobit různým softwarovým prostředím.

### Výpočetní jádro

Výpočetní jádro simulátoru je implementováno v několika jazycích, aby zajistilo maximální flexibilitu a výkonnost:

- **JavaScript**  
Slouží k okamžitému výpočtu simulací v prostředí webového prohlížeče. Zajišťuje interakci mezi uživatelským rozhraním a výpočetními algoritmy.
- **C++**  
Pro náročné a výpočetně intenzivní operace, jako jsou iterativní výpočty dynamiky tlaku, adiabatického ohřevu nebo přenosu tepla, je jádro optimalizováno v C++. Tento přístup umožňuje rychlé zpracování i při simulaci velkého množství dat.
- **Python**  
Python je využíván pro analýzu dat, generování pokročilých vizualizací a rozšiřující experimentální výpočty. Díky knihovnám jako NumPy, SciPy a Matplotlib může simulátor poskytovat detailní výstupy a umožňuje snadnou integraci s externími analytickými nástroji.

Hlavní funkce výpočetního jádra zahrnují:

- **Výpočet tlaků**  
Simulace probíhá na základě Bernoulliho rovnice, která zohledňuje statický a dynamický tlak, přičemž počítá s přenosovými ztrátami způsobenými třením a turbulencí.
- **Dynamika teplot**  
Teplotní změny jsou modelovány pomocí adiabatického ohřevu, Joule-Thomsonova efektu a přenosu tepla mezi plynem a okolím.
- **Energetická bilance:**  
Algoritmy sledují spotřebu energie během procesu plnění a umožňují uživatelům optimalizovat simulaci z hlediska energetické účinnosti.

- **Synchronizace a záznam dat:**

Jádro pravidelně aktualizuje hodnoty parametrů (tlak, teplota, spotřeba energie) a ukládá je pro vizualizaci a export.

### Datová vrstva

Datová vrstva je zodpovědná za správu vstupních a výstupních dat, jejich ukládání a zajištění konektivity s externími systémy. Obsahuje následující prvky:

- **Správa vstupních dat:**

Umožňuje načítání parametrů definovaných uživatelem, jako je počáteční tlak a teplota, maximální čas simulace nebo konstrukční parametry systému.

- **Ukládání výstupních dat:**

Generovaná data (např. průběh tlaků, teplot, spotřeby energie) jsou ukládána v interním formátu, který lze exportovat do CSV, JSON nebo jiných standardních formátů.

- **Podpora exportu:**

Výstupy simulace lze snadno exportovat pro další analýzu v externích nástrojích nebo integrovat s jinými systémy, například IoT platformami nebo analytickými aplikacemi.

### Modulární koncepce

Celý systém je navržen jako modulární, což umožňuje snadné rozšiřování funkcionalit. Nové fyzikální modely, jako simulace dalších plynů nebo pokročilé termodynamické modely, lze přidat bez zásadních úprav stávajícího systému. Tato modularita zajišťuje dlouhodobou udržitelnost a přizpůsobivost simulátoru vůči měnícím se potřebám uživatelů. Tento přístup k návrhu architektury zajišťuje, že simulátor je výkonný, flexibilní a snadno integrovatelný do širších softwarových ekosystémů.

#### 4.1.4 Návrh rozhraní

Rozhraní simulátoru vodíkové plíci stanice bylo navrženo s důrazem na jednoduchost, intuitivní ovládání a kompatibilitu s různými prostředími. Tato koncepce zajišťuje snadnou použitelnost aplikace nejen pro experty, ale i pro uživatele bez hlubších technických znalostí.

### Zadávání parametrů

Rozhraní umožňuje uživatelům snadno zadávat vstupní parametry simulace pomocí:

- **Textových polí**

Pro přesné zadávání hodnot, například počátečního tlaku, teploty nebo objemu nádrže.

- **Posuvníků**

Pro rychlou úpravu parametrů, jako jsou čas simulace, hustota vodíku nebo provozní teploty.

- **Přednastavených šablon**

Přednastavené scénáře umožňují rychlé spuštění simulace pro běžné provozní podmínky (například standardní plnění vozidla nebo test extrémních podmínek).

## Vizualizace výsledků

Výstupy simulace jsou prezentovány v přehledné a interaktivní podobě:

- **Grafy**  
Umožňují zobrazit dynamické změny tlaků, teplot, spotřeby energie a dalších parametrů během simulace.
- **Tabulky:**  
Data o průběhu simulace, jako jsou přenesená hmotnost vodíku nebo energetická bilance, jsou prezentována v tabulkové formě pro snadné porovnání a analýzu.
- **Reálná odezva:**  
Vizualizace je aktualizována v reálném čase, což uživateli umožňuje okamžitě vidět vliv změn vstupních parametrů na průběh simulace.

## Interakce s externími aplikacemi

Rozhraní je navrženo tak, aby bylo snadno integrovatelné do širších systémů nebo jiných softwarových aplikací. Podporuje:

- **Export dat**  
Výstupy simulace lze uložit do formátů CSV nebo JSON, což umožňuje jejich další zpracování v analytických nebo průmyslových nástrojích.
- **Integraci s IoT**  
Simulátor lze propojit s fyzickými zařízeními, jako jsou senzory nebo plnicí stanice, prostřednictvím IoT platformy.
- **Napojení na analytické systémy**  
Podpora analytických platform umožňuje uživatelům importovat data do specializovaných nástrojů pro pokročilou analýzu, jako jsou MATLAB, Python nebo cloudové služby.

## Rozšiřitelnost

Rozhraní je modulární a připravené pro rozšíření o další funkce:

- **Podpora nových plynů**  
Možnost přidat simulaci jiných plynů, například metanu nebo dusíku, úpravou zadávacích parametrů a výstupních grafů.
- **Podpora více jazyků**  
Rozhraní lze snadno lokalizovat, což umožňuje nasazení simulátoru v mezinárodním prostředí.

## Přístupnost

Rozhraní je optimalizováno pro různé platformy a zařízení:

- **Webová aplikace**  
Hlavní implementace v HTML je dostupná přes webový prohlížeč, což umožňuje snadný přístup bez nutnosti instalace.

- **Desktopová a mobilní aplikace**

Simulátor může být nasazen i jako samostatná desktopová nebo mobilní aplikace.

## 4.2 Analýza funkčních požadavků

Návrh simulátoru vodíkové plnicí stanice byl vytvořen tak, aby splňoval široké spektrum požadavků na přesnost, flexibilitu, uživatelskou přívětivost a rozšiřitelnost. Funkční požadavky byly definovány s ohledem na akademické i průmyslové využití, což umožňuje simulátoru adaptaci na různé scénáře.

### 4.2.1 Hlavní funkce softwaru

#### **Simulace fyzikálních procesů během plnění vodíkové nádrže**

Simulátor modeluje komplexní fyzikální a termodynamické procesy probíhající během přenosu vodíku z plničky do nádrže vozidla. Tyto procesy zahrnují:

- Výpočet dynamiky tlaku, využívající Bernoulliho rovnici pro analýzu přenosu energie mezi statickým a dynamickým tlakem.
- Modelování adiabatického ohřevu a Joule-Thomsonova efektu pro zohlednění změn teploty plynu během komprese a expanze.
- Výpočet tepelných ztrát způsobených přenosem tepla mezi plynem a okolím.

#### **Výpočet energetické bilance:**

Simulátor sleduje spotřebu energie během plnění a umožňuje analyzovat efektivitu procesu. Data o spotřebě energie jsou integrována do vizualizací a tabulek pro snadnou interpretaci.

#### **Vizualizace výsledků**

Výstupy simulace jsou prezentovány prostřednictvím grafů, které umožňují sledovat dynamické změny tlaků, teplot, spotřeby energie a dalších parametrů v reálném čase.

#### **Flexibilní nastavení vstupních parametrů**

Uživatelé mohou zadávat široké spektrum parametrů, například počáteční tlak a teplotu, vlastnosti vodíku nebo geometrické parametry systému. To umožňuje simulaci různých provozních scénářů a experimentování s extrémními podmínkami.

### 4.2.2 Podpora více provozních scénářů

Simulátor je navržen tak, aby podporoval různé typy provozních scénářů, například:

- **Standardní plnění:** Simulace běžného plnění vodíkové nádrže s optimalizací časového průběhu.
- **Nouzové podmínky:** Simulace provozu při selhání některých komponent nebo při extrémních změnách tlaku či teploty.
- **Testování různých plynů:** Možnost rozšíření na simulaci jiných plynů

### 4.2.3 Vizualizace výsledků

Vizualizace dat umožňuje názorně interpretovat výsledky simulace. Grafické zobrazení zahrnuje:

- **Tlak v plničce a nádrži vozidla:** Sleduje průběh tlaků v reálném čase.
- **Teplotní vývoj:** Zobrazuje teplotní změny v dispenseru a nádrži vozidla během plnění.
- **Energetická bilance:** Umožňuje sledovat spotřebu energie a identifikovat oblasti pro optimalizaci.

- **Přenesená hmotnost vodíku:** Ukazuje množství vodíku přeneseného během simulace.

Simulátor umožňuje rozšíření o další datové série např. průběh dynamického a statického tlaku odděleně, vizualizaci přenosu tepla mezi plynem a okolím nebo grafické zobrazení efektivity procesu (například poměr přenesené energie k celkové spotřebované energii).

#### 4.2.4 Flexibilita zadávání parametrů

Před spuštěním simulace plnění je možné nastavit všechny důležité parametry pro samotnou simulaci, a to:

- Upravit konstrukční parametry systému, jako je průměr potrubí, délka potrubí nebo tvar ventilů.
- Definovat počáteční podmínky simulace, například tlak v plničce a nádrži, teplotu plynu nebo maximální čas simulace.
- Použít přednastavené šablony pro rychlé nastavení běžných provozních scénářů.

V případě rozšíření funkcionalit je také možné přidat nové vstupní parametry, například specifické vlastnosti jiných plynů, parametry pokročilých termodynamických modelů nebo konstrukční detaily plnicích systémů. Nastavit fyzikální vlastnosti vodíku, například hustotu, viskozitu nebo Joule-Thomsonův koeficient.

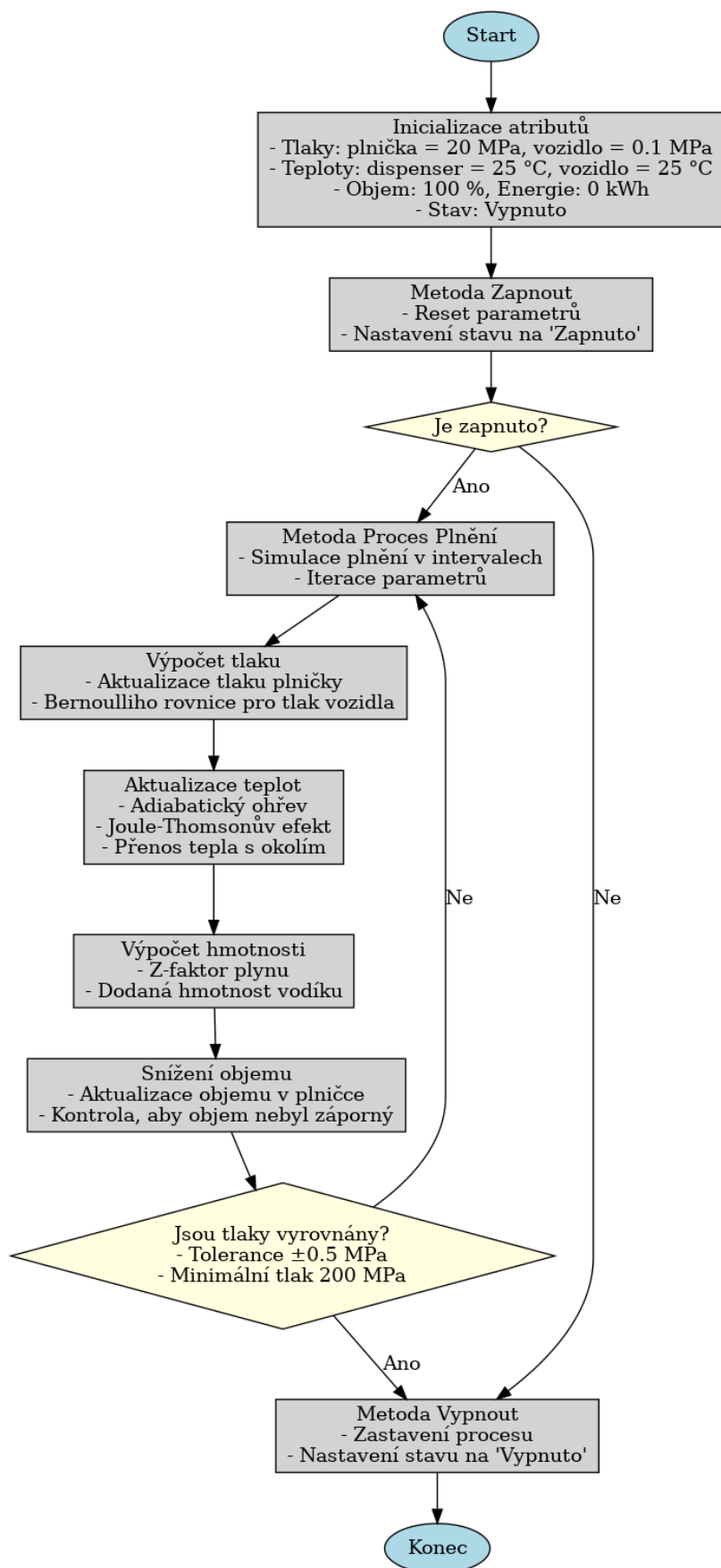
### 4.3 Programátorská dokumentace

Programátorská dokumentace poskytuje detailní přehled o architektuře a implementaci simulátoru vodíkové plnicí stanice, zahrnuje návrh klíčových algoritmů, strukturu kódu a postupy pro rozšiřování funkcionalit. Slouží jako praktický návod pro vývojáře, kteří chtějí simulátor přizpůsobit specifickým potřebám nebo jej dále rozvíjet.

#### 4.3.1 Vývojový diagram softwaru

Vývojový diagram znázorňuje logický tok simulace, který zahrnuje:

1. **Inicializaci parametrů:** Načtení vstupních dat zadaných uživatelem (např. počáteční tlak, teplota, vlastnosti plynu) a kontrola jejich validity.
2. **Simulační smyčku:** Iterativní výpočty klíčových parametrů (tlak, teplota, spotřeba energie) v pravidelných časových krocích až do dosažení maximálního času simulace nebo splnění podmínky ukončení.
3. **Vizualizaci výsledků:** Aktualizace grafů a tabulek v reálném čase během simulace.
4. **Ukončení simulace:** Uložení výsledků a jejich připravení pro export nebo další analýzu.



OBRÁZEK 1: VÝVOJOVÝ DIAGRAM SOFTWARE

#### 4.3.2 Struktura a klíčové části kódu

Simulátor je implementován s modulární architekturou, která odděluje jednotlivé funkce a umožňuje snadnou údržbu a rozšiřitelnost.

##### 1. Inicializační modul

- Odpovídá za načtení vstupních parametrů zadaných uživatelem.
- Obsahuje validační funkce, které ověřují správnost a konzistenci zadaných hodnot.
- Umožňuje nastavit výchozí hodnoty v případě, že uživatel některé parametry nezadá.

##### 2. Výpočetní modul

Hlavní část simulace obsahující algoritmy pro výpočet klíčových fyzikálních procesů:

- **Dynamika tlaku**  
Využívá Bernoulliho rovnici, Darcyho-Weisbachovu rovnici a další fyzikální modely pro simulaci přenosu tlaku mezi plničkou a nádrží vozidla.
- **Dynamika teplot**  
Obsahuje výpočty adiabatického ohřevu, Joule-Thomsonova efektu a přenosu tepla mezi plynem a okolím.
- **Energetická bilance**  
Algoritmy sledují celkovou spotřebu energie během plnění a vypočítávají efektivitu procesu.
- **Synchronizace dat**  
Průběžně ukládá výsledky simulace do strukturovaných datových polí, která jsou využívána pro vizualizaci a export.

##### 3. Modul vizualizace

- Generuje grafy a tabulky pro zobrazení výsledků simulace v reálném čase.
- Poskytuje funkce pro přidání nových průběhů, což umožňuje uživatelům rozšířit vizualizaci o další parametry.

##### 4. Modul exportu dat

- Ukládá výsledky simulace ve formátech CSV nebo JSON.
- Připravuje data pro integraci s analytickými nástroji nebo IoT platformami.
- Umožňuje snadný export dat pro další zpracování v externích aplikacích.

#### 4.3.3 Algoritmy a implementace

##### Dynamika tlaku

Použití Bernoulliho rovnice ve spojení s Darcyho-Weisbachovou rovnicí pro výpočet tlakových ztrát v potrubí. Výpočty zahrnují:

- Statický tlak (závisí na rozdílu tlaků mezi plničkou a nádrží).
- Dynamický tlak (zohledňuje rychlost proudění plynu a vlastnosti potrubí).
- Potenciální tlak (v případech, kdy jsou zahrnuty výškové rozdíly mezi plničkou a nádrží).

##### Dynamika teplot

Teplotní změny jsou modelovány pomocí:

- Adiabatického ohřevu, který simuluje nárůst teploty při stlačování plynu.
- Joule-Thomsonova efektu, který zahrnuje změny teploty při expanzi plynu.
- Přenosu tepla s okolím, což zahrnuje výpočty teplotních ztrát nebo zisků.

### Energetická bilance

- Algoritmus vypočítává celkovou spotřebu energie potřebnou pro provoz plničky, včetně zohlednění účinnosti a přenosových ztrát.

#### 4.3.4 Pseudokód simulace

- ❖ **START SIMULACE**
- ❖ **Inicializace systému:**
  - Nastavení počátečních parametrů:
    - tlakPlničky = 20 MPa
    - tlakVozidla = 0.1 MPa
    - teplotaDispenseru = 25 °C
    - teplotaVozidla = 25 °C
    - objemPlničky = 100 %
    - energie = 0 kWh
- ❖ **Čekání na akci uživatele:**
  - Pokud uživatel stiskne "Zapnout":
    - jeZapnuta = TRUE
    - Aktualizovat stav na "Zapnuto"
  - Pokud uživatel stiskne "Vypnout":
    - jeZapnuta = FALSE
    - Zastavit proces plnění
    - Aktualizovat stav na "Vypnuto"
  - Pokud uživatel stiskne "Spustit plnění":
    - Pokud je plnička zapnuta: - Spustit plnění
    - Jinak zobrazit chybu "Plnička není zapnuta"
- ❖ **Proces plnění:**
  - Opakovat, dokud plnění není dokončeno nebo uživatel neukončí simulaci:
    - Zvýšení času (čas += 1 sekunda)
    - Výpočet tlaku v plničce na základě časových fází
    - Výpočet tlaku ve vozidle:
      - Použít Bernoulliho rovnice pro výpočet tlakového rozdílu mezi plničkou a vozidlem
      - Přidání tlaku do vozidla s použitím přenosové konstanty
      - Zajistit, aby tlak ve vozidle nepřekročil tlak plničky
    - Výpočet teploty:
      - Adiabatický ohřev na základě změn tlaku
      - Přenos tepla s okolím
      - Směšování plynu vstupujícího a stávajícího ve vozidle
      - Zajistit, aby teplota zůstala v realistickém rozsahu
    - Výpočet spotřeby energie:
      - Na základě tlaku v plničce a energetické bilance
    - Výpočet změn v objemu plničky:
      - Snížení objemu na základě spotřeby vodíku
      - Zajistit, aby objem nepadl pod 0
    - Aktualizovat grafy a stavové hodnoty
    - Kontrola tlakového vyrovnání:
      - Pokud je tlak plničky blízko tlaku vozidla (tolerance < 0.5 MPa):
      - Ukončit plnění
      - Zobrazit zprávu "Plnění dokončeno: tlaky se vyrovnaly."
- ❖ **Ukončení simulace**

### OBRÁZEK 2: PSEUDOKÓD SIMULACE

## 5 Popis ověření funkčnosti SW

Proces ověření zahrnoval technickou validaci, testování uživatelského rozhraní a integraci dat. Níže je uveden podrobný popis těchto kroků.

### 5.1 Technická validace

Technická validace se zaměřila na přesnost implementovaných fyzikálních modelů a algoritmů. Byly provedeny následující kroky:

- **Porovnání s dostupnými modely**  
Výsledky simulace byly porovnány s hodnotami vypočítanými na základě standardních fyzikálních rovnic, jako jsou Bernoulliho rovnice, Joule-Thomsonův efekt nebo adiabatický ohřev. Validace zahrnovala výpočty pro různé počáteční podmínky (tlak, teplota, objem).
- **Srovnání s experimentálními daty**  
Simulátor byl testován na reálných datech z měření provozu vodíkových plnicích stanic. Tlak, teplota a spotřeba energie byly porovnávány s výstupy simulace, aby se ověřila přesnost a konzistence modelu.
- **Stress testy**  
Software byl testován na simulaci extrémních podmínek, například vysokých tlaků (až 700 MPa) nebo velmi nízkých teplot (-40 °C). Testování ukázalo, že software je stabilní a poskytuje věrohodné výsledky i při těchto hodnotách.
- **Výkonová validace**  
Byla zkoumána rychlost výpočtů a schopnost simulátoru pracovat s velkými objemy dat bez výrazného poklesu výkonu. Optimalizace algoritmů v C++ zajistila vysokou výpočetní efektivitu.

### 5.2 Testování uživatelského rozhraní

Testování uživatelského rozhraní bylo zaměřeno na intuitivnost, přístupnost a responzivitu simulátoru:

- **Uživatelské testy**  
Simulátor byl testován skupinou uživatelů s různými úrovněmi technických znalostí. Byly hodnoceny faktory, jako je přehlednost rozhraní, snadnost zadávání parametrů a pochopení výsledků.
- **Reálné scénáře**  
Byly simulovány běžné scénáře, jako je standardní plnění nádrže vodíkem, a ověřováno, zda uživatelé snadno zvládnou spustit simulaci a interpretovat výsledky.
- **Responzivita**  
Rozhraní bylo testováno na různých zařízeních, včetně desktopů, tabletů a mobilních telefonů. Byla ověřena správná funkčnost všech ovládacích prvků a grafů.

### 5.3 Integrace dat a export

Ověření integrace dat bylo zaměřeno na schopnost simulátoru efektivně pracovat s daty a podporovat jejich přenos do dalších systémů:

- **Export dat**

Výstupní data byla exportována ve formátech CSV a JSON. Testování ukázalo, že všechny klíčové informace (tlak, teplota, spotřeba energie) jsou správně strukturovány a kompatibilní s analytickými nástroji.

- **Import dat:**

Byla ověřena schopnost simulátoru načítat uložené konfigurace a výsledky simulací, což umožňuje uživatelům pokračovat v analýze nebo zopakovat simulace s upravenými parametry.

- **Integrace s externími aplikacemi:**

Exportovaná data byla úspěšně importována do analytických softwarů, jako je MATLAB a Python, kde byla dále zpracována. Byla ověřena kompatibilita formátů a přesnost přenesených hodnot.



## 6 Umístění SW

Software pro simulaci vodíkové plnící stanice je navržen jako flexibilní nástroj, který může být využit jak v akademických výzkumných a vzdělávacích projektech, tak v průmyslových aplikacích zaměřených na optimalizaci vodíkových technologií a infrastruktury. Jeho distribuce je záměrně koncipována tak, aby byl přístupný oprávněným uživatelům a zároveň zajišťoval ochranu duševního vlastnictví autorů.

Distribuce softwaru je koncipována tak, aby byla efektivní a zároveň chránila autorská práva:

### **Prostřednictvím interních datových úložišť:**

- Software je poskytován organizacím, které jej mohou interně šířit mezi své výzkumné nebo projektové týmy.
- Tento přístup zajišťuje kontrolu nad distribucí, verzováním a správou přístupů.

### **Na vyžádání u autorů:**

- Jednotliví uživatelé nebo organizace mohou o software požádat přímo autory projektu.
- Tento proces umožňuje autorům:
  - Ověřit účel a oprávněnost použití softwaru.
  - Poskytnout uživatelům technickou podporu a pomoc s implementací.
  - Uzavřít s uživateli dohodu o podmínkách použití, včetně pravidel pro ochranu duševního vlastnictví.

## 7 Způsob využití

Simulátor vodíkové plnicí stanice je univerzální nástroj navržený pro široké spektrum využití v akademických i průmyslových prostředích. Umožňuje detailní analýzu procesů plnění vodíkových nádrží, optimalizaci provozních podmínek a vývoj inovativních technologií.

### 7.1 Samostatné využití softwaru

Simulátor je navržen tak, aby byl plně funkční jako samostatná aplikace, bez potřeby připojení k dalším systémům. Nabízí širokou škálu funkcí pro různá odvětví:

#### 7.1.1 Akademické využití

V akademické sféře simulátor poskytuje cenný nástroj pro:

- **Výuku fyzikálních a chemických procesů**  
Učitelé a studenti mohou využít simulátor k pochopení klíčových principů, jako je Bernoulliho rovnice, Joule-Thomsonův efekt nebo adiabatický ohřev. Interaktivní vizualizace usnadňuje pochopení komplexních jevů.
- **Laboratorní simulace**  
Simulátor může nahradit drahé laboratorní vybavení a umožnit studentům provádět experimenty virtuálně.
- **Výzkum a publikace**  
Výsledky simulace mohou být použity jako podklady pro akademické studie a publikace zaměřené na vodíkové technologie a energetiku.

#### 7.1.2 Průmyslové využití

V průmyslu je simulátor cenným nástrojem pro:

- **Optimalizaci provozu plnicích stanic**  
Simulátor pomáhá provozovatelům plnicích stanic analyzovat a optimalizovat procesy plnění. Umožňuje testování různých scénářů, jako je plnění při extrémních teplotách nebo tlacích.
- **Vývoj nových technologií**  
Inženýři mohou simulátor využít při návrhu nových komponent, jako jsou ventily, potrubní systémy nebo izolační materiály, a testovat jejich vliv na procesy plnění.
- **Bezpečnostní analýzu**  
Simulátor umožňuje analyzovat bezpečnostní aspekty plnění vodíku, například simulací chybových stavů nebo extrémních podmínek.

#### 7.1.3 Integrace do širších systémů

Simulátor je navržen tak, aby byl snadno integrován do širších technologických ekosystémů:

- **Napojení na IoT systémy**  
Díky podpoře API lze simulátor propojit s monitorovacími a kontrolními systémy používanými v průmyslu. To umožňuje sběr reálných dat ze senzorů a jejich zpracování v simulaci.
- **Integrace do digitálních dvojčat**  
Simulátor může být použit jako součást digitálních dvojčat plnicích stanic, což umožňuje prediktivní analýzu a optimalizaci provozu.

## 7.2 Role v softwarovém ekosystému

Simulátor plní roli i jako podpůrný nástroj v oblasti vodíkových technologií. Jeho využití je pro optimalizaci procesů, ale také pro podporu výzkumu, vzdělávání a průmyslových aplikací. Zde jsou klíčové aspekty jeho role:

- **Poskytování klíčových dat**

Simulátor generuje přesná a detailní data, která jsou základem pro analýzu a optimalizaci:

- Výstupy zahrnují hodnoty tlaků, teplot, spotřeby energie a přenesené hmotnosti vodíku v reálném čase.
- Výsledky simulací lze exportovat do standardních formátů (CSV, JSON), což umožňuje jejich snadné zpracování v externích analytických nástrojích.
- Data mohou být využívána k porovnávání různých provozních scénářů a k validaci fyzikálních modelů.

- **Podpora analýzy a rozhodování**

Simulátor podporuje analytické a rozhodovací procesy v několika klíčových oblastech:

- Optimalizace provozu: Umožňuje simulaci a analýzu různých provozních scénářů, což pomáhá optimalizovat efektivitu plnicích stanic, snížit spotřebu energie a zvýšit bezpečnost.
- Bezpečnostní rozhodnutí: Simulátor poskytuje informace o možných kritických situacích, například při selhání systému nebo provozu za extrémních podmínek.
- Vývoj a návrh: Umožňuje inženýrům provádět simulace nových konstrukcí a technologií ještě před jejich fyzickým testováním.

- **Integrace s ostatními moduly**

V softwarovém ekosystému propojuje simulátor vodíkové plnicí stanice s dalšími moduly systému (např. elektrolyzéry, doprava, palivové články) a zajišťuje, že výstupy jsou kompatibilní s jejich vstupy. Díky tomu lze například kombinovat se simulací výroby vodíku s logistickými modely dopravy nebo potřebami palivových článků.

- **Výzkum a vývoj**

Slouží jako experimentální platforma pro vývoj nových materiálů, konstrukčních prvků a inovativních technologií pro plnění vodíku.

- **Vzdělávání a školení**

Poskytuje interaktivní prostředí pro výuku fyzikálních a termodynamických principů spojených s vodíkovými technologiemi. Je vhodný pro simulace v akademických kurzech i průmyslových školeních.

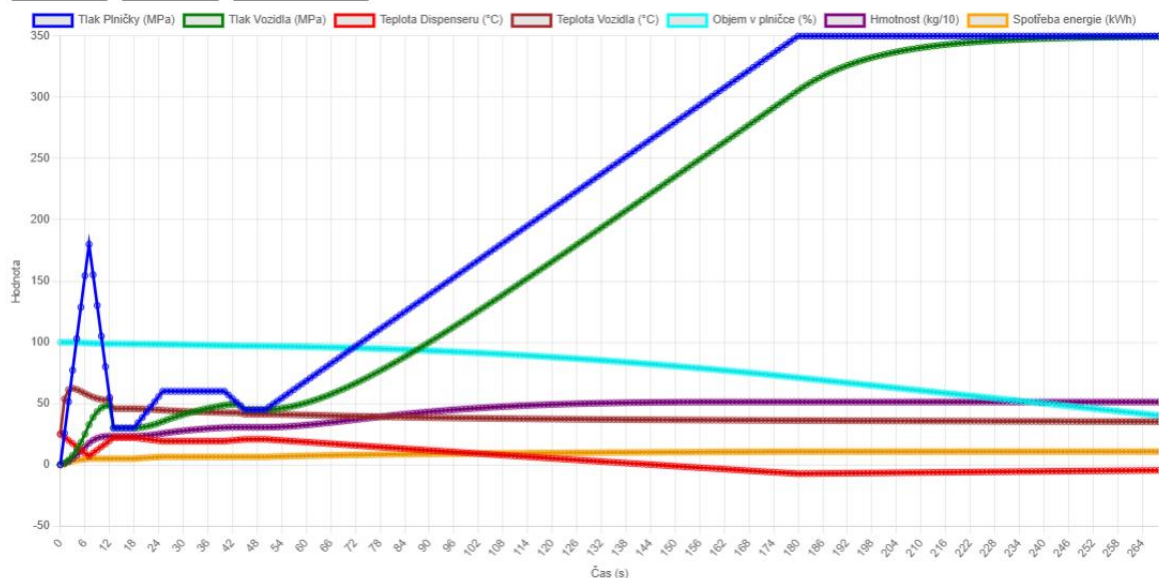
## 8 Seznam příloh

### Příloha 1: Videosoubor se záznamem funkčnosti

- [NAHYC\\_DP003N-V07-Plnici\\_stanice.mp4](#)

#### Vodíková plnicí stanice - simulace v3.0

Tlak plničky: 350.00 MPa  
Tlak vozidla: 349.51 MPa  
Teplota dispenseru: -4.58 °C  
Teplota vozidla: 35.12 °C  
Objem v plničce: 40.24 %  
Hmotnost: 5.12 kg  
Spotřeba energie: 10.73 kWh  
Stav plničky: Zapnuto  
Stavová zpráva: **Plnička je připravena.**



#### OBRÁZEK 3: UŽIVATELSKÉ ROZHRANÍ APLIKACE

### Příloha 2: Uživatelská příručka pro digitální model prvků plnicí infrastruktury

Viz níže



## **9 Seznam obrázků**

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1: Vývojový diagram softwaru .....     | 14 |
| Obrázek 2: Pseudokód simulace .....            | 16 |
| Obrázek 3: Uživatelské rozhraní aplikace ..... | 22 |

## Příloha 2

### Uživatelská příručka pro digitální model prvků plnicí infrastruktury

#### Úvod

Digitální model plnicí infrastruktury je software navržený pro simulaci a optimalizaci procesů plnění vodíkových nádrží vozidel. Využívá pokročilé fyzikální modely pro analýzu parametrů jako tlak, teplota, spotřeba energie a množství přeneseného vodíku, čímž umožňuje detailní pochopení plnicího procesu. Tento nástroj pomáhá optimalizovat návrh a provoz plnicích stanic za různých provozních podmínek, včetně extrémních scénářů jako změny tlaku nebo teploty.

Software je flexibilní a modulární, což umožňuje přizpůsobení různým typům plnicích stanic a integraci s moderními technologiemi, jako je IoT nebo cloudové platformy. Hlavní přínos spočívá v bezpečném testování provozních podmínek a optimalizaci energetické náročnosti, což vede k efektivnějšímu a bezpečnějšímu provozu plnicích stanic.

#### Popis softwaru plnicí stanice

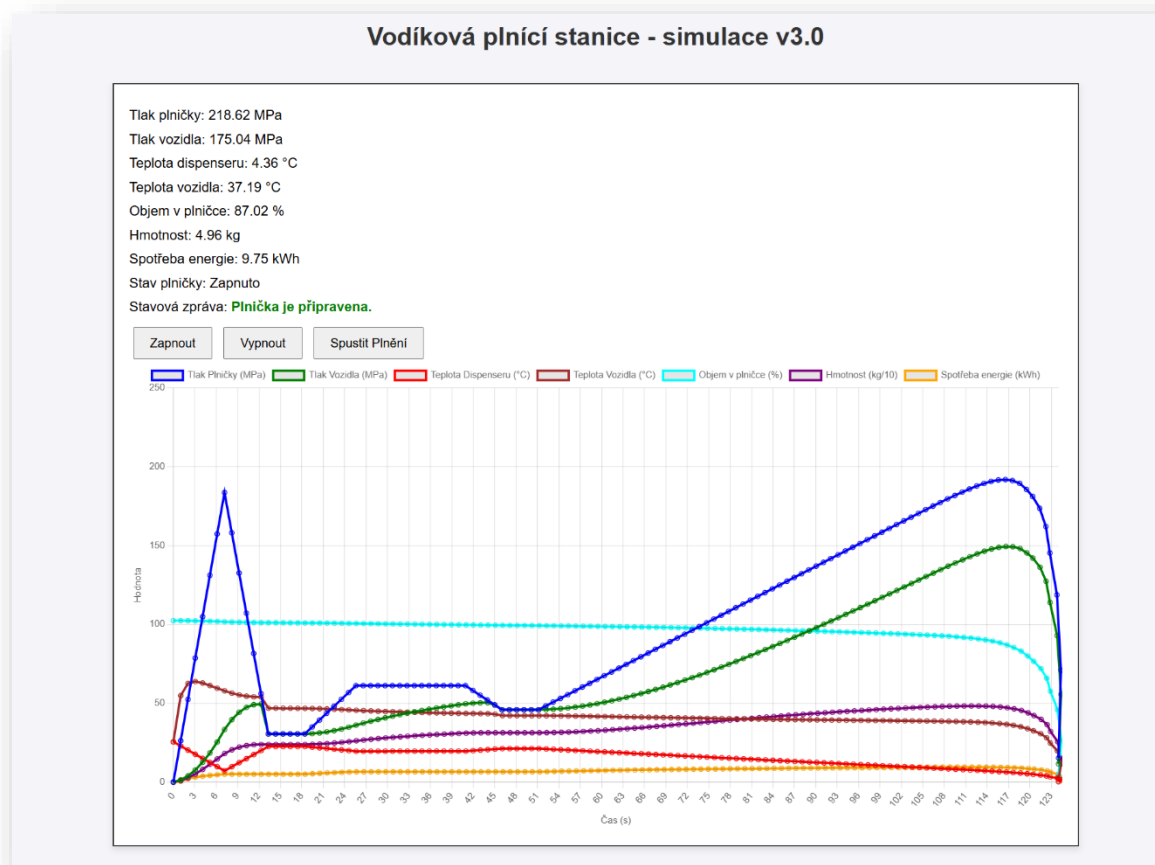
Software pro simulaci plnicí stanice na vodík je navržen tak, aby umožnil detailní analýzu a optimalizaci procesu plnění vodíkových nádrží ve vozidlech. Využívá pokročilé fyzikální a termodynamické modely pro simulaci chování systému plnění v reálném čase a při různých provozních podmínkách.

##### Hlavní funkce:

- ❖ **Simulace plnění vodíkových nádrží:** Software simuluje plnění nádrží vodíkem ve vozidlech s ohledem na změny tlaku, teploty a energetické spotřeby během procesu.
- ❖ **Výpočet dynamiky tlaku a teploty:** Program detailně modeluje tlakové a teplotní změny, které nastávají při plnění, což je klíčové pro zajištění bezpečnosti a efektivity plnicího procesu.
- ❖ **Energetická analýza:** Software umožňuje simulovat spotřebu energie během plnění, což je užitečné pro optimalizaci energetické náročnosti plnicích stanic a pro analýzu výkonnosti systému.
- ❖ **Vizualizace výsledků:** Výstupy simulací jsou zobrazeny ve formě grafů a tabulek, což umožňuje snadnou interpretaci dat o tlaku, teplotě, spotřebě energie a dalších důležitých parametrech.

## Použití softwaru a uživatelské rozhraní

Software pro simulaci plnicí stanice na vodík je navržen tak, aby byl uživatelsky přívětivý a umožnil intuitivní ovládání. Uživatelé mohou snadno zadávat provozní parametry, spouštět simulace a okamžitě zobrazovat výsledky v přehledné formě. Hlavní obrazovka obsahuje několik klíčových sekcí pro správu simulace a vizualizaci výsledků.



## Hlavní obrazovka

Po spuštění aplikace se zobrazí hlavní rozhraní, které obsahuje:

- ❖ **Panel pro zadání parametrů:** Umožňuje uživatelům nastavit provozní podmínky pro simulaci plnění. Parametry zahrnují teplotu okolí, výškový rozdíl, průměry plničky a vozidla, objemový tok, adiabatický koeficient, koeficient přenosu tepla a teploty vstupu.
- ❖ **Ovládací tlačítka:** Pro spuštění, zastavení nebo resetování simulace. Tato tlačítka umožňují uživateli snadno ovládat simulaci a získávat výsledky v reálném čase.

## Sekce pro zadání parametrů

Na této obrazovce uživatel zadává všechny důležité parametry, které ovlivní simulaci. Mezi klíčové parametry patří:

### ❖ Teplota okolí (°C):

- Počáteční teplota okolního prostředí, která ovlivňuje teplotu plnění.

### ❖ Výškový rozdíl (m):

- Ovlivňuje tlak a výkon plnicí stanice.

### ❖ Průměr plničky a vozidla (m):

- Rozměry zařízení, které mají vliv na rychlost plnění a spotřebu energie.

### ❖ Objemový tok (m<sup>3</sup>/s):

- Určuje rychlost, jakou je vodík plněn do nádrže vozidla.

### ❖ Adiabatický koeficient:

- Parametr, který ovlivňuje teplotní změny během komprese.

### ❖ Koeficient přenosu tepla:

- Určuje rychlost, s jakou se teplo přenáší mezi vodíkem a okolním prostředím.

### ❖ Počáteční teplota vstupu:

- Teplota vodíku při vstupu do systému.

### ❖ Minimální a maximální teplota dispenseru:

- Teplotní limity pro bezpečné plnění nádrže.

## Parametry

Teplota okolí (°C):

Výškový rozdíl (m):

Průměr plničky (m):

Průměr vozidla (m):

Objemový tok (m<sup>3</sup>/s):

Adiabatický koeficient:

Koeficient přenosu tepla:

Počáteční teplota vstupu (°C):

Minimální teplota dispenseru (°C):

Maximální teplota dispenseru (°C):

Objem nádrže vozidla (m<sup>3</sup>):

Účinnost kompresoru:

## Zobrazení aktuálních hodnot

Po spuštění simulace se na obrazovce objeví aktuální hodnoty parametrů plnění:

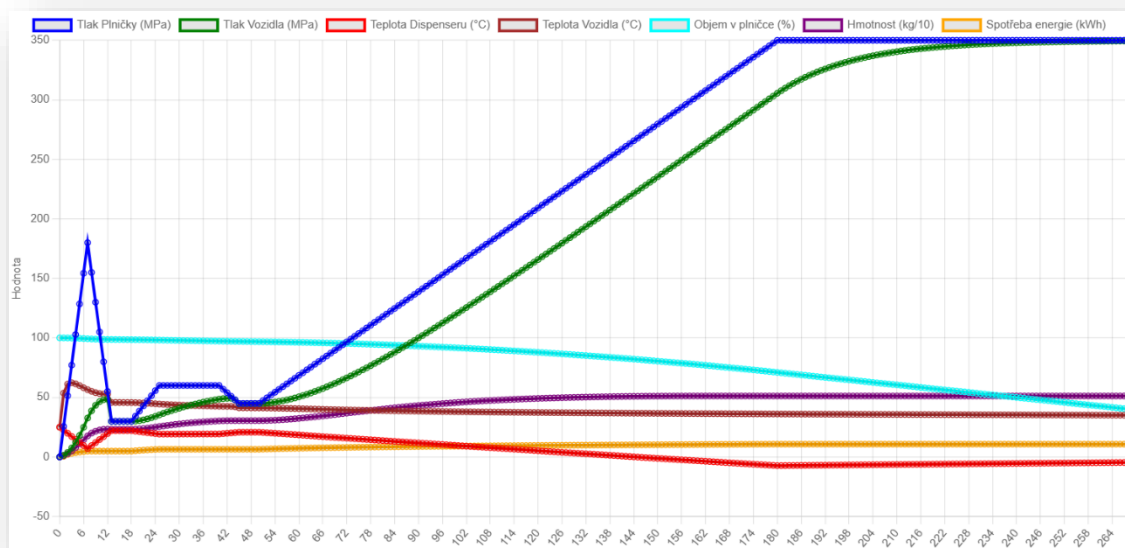
- ❖ **Tlak plničky a vozidla (MPa):** Zobrazení aktuálních tlaků v plničce a nádrži vozidla, které se mění během plnění.
- ❖ **Teplota dispenseru a vozidla (°C):** Dynamické zobrazení změn teploty během procesu.
- ❖ **Objem v plničce (%):** Zobrazuje, jaký objem byl naplněn v plničce v procentech.
- ❖ **Hmotnost vodíku (kg):** Zobrazuje množství přeneseného vodíku během plnění.
- ❖ **Spotřeba energie (kWh):** Ukazuje spotřebu energie během plnění, což je důležitý parametr pro optimalizaci procesu.

Tlak plničky: 286.65 MPa  
Tlak vozidla: 242.30 MPa  
Teplota dispenseru: -1.76 °C  
Teplota vozidla: 36.55 °C  
Objem v plničce: 79.66 %  
Hmotnost: 5.11 kg  
Spotřeba energie: 10.31 kWh  
Stav plničky: Zapnuto

## Vizualizace výsledků

Software poskytuje grafické výstupy, které umožňují sledovat vývoj všech parametrů v průběhu času. Mezi hlavní grafy patří:

- ❖ **Graf tlaků:** Ukazuje změny tlaku v plničce a vozidle.
- ❖ **Teplota:** Grafy, které zobrazují teplotní změny v dispenseru a vozidle během plnění.
- ❖ **Spotřeba energie:** Zobrazení energetické náročnosti plnění, což je klíčové pro optimalizaci nákladů.



Výsledky jsou zobrazeny v reálném čase a umožňují uživateli snadno sledovat efektivitu plicního procesu. Grafy jsou interaktivní a poskytují podrobné informace o průběhu simulace.

### Dostupné funkce ovládání

- ❖ **Spuštění simulace:** Po zadání parametrů kliknutím na tlačítko „Spustit plnění“ začíná simulace. Během simulace se dynamicky mění hodnoty parametrů a zobrazují se na grafu.
- ❖ **Resetování simulace:** Uživatel může kdykoliv resetovat simulaci na počáteční hodnoty pro nový výpočet.
- ❖ **Zastavení simulace:** Umožňuje zastavit simulaci a zobrazit aktuální výsledky.

### Export výsledků

Po dokončení simulace mohou uživatelé exportovat výsledky do formátů CSV nebo JSON pro další analýzu nebo uchování. Exportované soubory obsahují všechny relevantní údaje o tlacích, teplotách, spotřebě energie a dalších parametrech.

Software má přehledné uživatelské rozhraní (GUI), které je rozděleno do několika sekcí a umožňuje snadné zadání parametrů a okamžité zobrazení výsledků simulace.

### Instalace a nastavení

Pro instalaci a nastavení softwaru postupujte následovně:

#### Požadavky na systém

- ❖ **Operační systém:** Windows, Linux, macOS
- ❖ **Webový prohlížeč:** Pro spuštění aplikace stačí kompatibilní prohlížeč (např. Chrome, Firefox).
- ❖ **Požadavky na hardware:** Běžný desktopový počítač s připojením k internetu.

### Instalace

- ❖ Stáhněte zip soubor softwaru.
- ❖ Rozbalte soubor na požadované místo v počítači.
- ❖ Otevřete soubor index.html v kompatibilním webovém prohlížeči.
- ❖ Software se automaticky načte a je připraven k použití.

#### Verze v C++

Pokud chcete použít **C++ verzi** softwaru, stáhněte si soubory zdrojového kódu (např. plnici\_stanice.cpp, plnici\_stanice.h, main.cpp) a proveďte kompilaci pomocí příslušného kompilátoru.

## Nastavení

Software nevyžaduje složitou konfiguraci. Všechny parametry lze zadat přímo v uživatelském rozhraní.

## Příklady použití

Příklad použití softwaru pro simulaci elektrolyzérů:

- ❖ Otevřete software a vyberte typ plnicí stanice.
- ❖ Zadejte hodnoty pro tlak, teplotu, objem a rychlost plnění a další parametry.
- ❖ Spustíte simulaci a vyčkejte na výsledky.
- ❖ Výsledky vám ukáží efektivitu plnění, spotřebu energie a další parametry.

## Odstraňování problémů

Pokud narazíte na problémy při používání softwaru, zde jsou některé běžné problémy a jejich řešení:

- ❖ **Software se nenačítá**
  - Ujistěte se, že používáte kompatibilní webový prohlížeč. Zkuste použít aktuální verzi Google Chrome nebo Mozilla Firefox.
- ❖ **Problémy s výpočty**
  - Pokud výpočty neprobíhají správně, ujistěte se, že jste zadali všechny povinné parametry správně.
- ❖ **Nezobrazují se výsledky**
  - Pokud výsledky nejsou zobrazeny, zkuste resetovat všechny parametry a znovu spustit simulaci.

## API pro komunikaci s externími systémy

Software pro simulaci plnicí stanice na vodík poskytuje **RESTful API**, které umožňuje integraci s externími systémy a automatizované spuštění simulací. API komunikuje s externími aplikacemi prostřednictvím **HTTP požadavků** (GET, POST) a výstupy jsou vráceny ve formátu **JSON**. Tato komunikace umožňuje spuštění simulace, získání výsledků v reálném čase a export dat pro následnou analýzu.

### Popis API komunikace

API nabízí funkce pro zadání vstupních parametrů simulace, spuštění výpočtu, a získání výsledků. Parametry pro simulaci zahrnují teplotu, tlak, objem, a další klíčové hodnoty, které ovlivňují výsledek simulace. Po dokončení simulace jsou výsledky, včetně tlaků, teplot, objemů, spotřeby energie, hmotnosti a dalších metrik, k dispozici prostřednictvím API pro další analýzu.

## Konečné body API a příklad použití

### Spuštění simulace

**Požadavek (POST)** na `/startSimulation`: Tento konečný bod slouží k zadání vstupních parametrů simulace, které ovlivní celý proces plnění. Po odeslání těchto parametrů je simulace spuštěna.

#### Vstupní parametry:

- ❖ `temperature_ambient`: Teplota okolí (°C), například 25°C.
- ❖ `height_difference`: Výškový rozdíl (m), např. 0 m.
- ❖ `filling_station_diameter`: Průměr plničky (m), např. 0.05 m.
- ❖ `vehicle_diameter`: Průměr vozidla (m), např. 0.02 m.
- ❖ `flow_rate`: Objemový tok (m<sup>3</sup>/s), např. 0.01 m<sup>3</sup>/s.
- ❖ `adiabatic_coefficient`: Adiabatický koeficient, např. 1.41.
- ❖ `heat_transfer_coefficient`: Koeficient přenosu tepla (W/m·K), např. 0.001.
- ❖ `initial_inlet_temperature`: Počáteční teplota vstupu (°C), např. 25°C.
- ❖ `min_temperature_disp`: Minimální teplota dispenseru (°C), např. -30°C.
- ❖ `max_temperature_disp`: Maximální teplota dispenseru (°C), např. 25°C.
- ❖ `vehicle_tank_volume`: Objem nádrže vozidla (m<sup>3</sup>), např. 0.1 m<sup>3</sup>.
- ❖ `compressor_efficiency`: Účinnost kompresoru (%), např. 85%.

#### Příklad požadavku:

```
POST /startSimulation { "temperature_ambient": 25, "height_difference": 0, "filling_station_diameter": 0.05, "vehicle_diameter": 0.02, "flow_rate": 0.01, "adiabatic_coefficient": 1.41, "heat_transfer_coefficient": 0.001, "initial_inlet_temperature": 25, "min_temperature_disp": -30, "max_temperature_disp": 25, "vehicle_tank_volume": 0.1, "compressor_efficiency": 0.85 }
```

#### Odpověď:

Po spuštění simulace server vrátí status a unikátní ID simulace.

```
{ "status": "running", "simulation_id": "12345" }
```

### Získání výsledků simulace

**Požadavek (GET)** na `/getSimulationResults`: Tento konečný bod slouží pro získání výsledků simulace po jejím dokončení. Uživatel může na základě **simulation\_id** získat podrobnosti o plnění, včetně tlaků, teplot, objemů a spotřeby energie.

#### Parametry:

`simulation_id`: Unikátní ID simulace, které bylo vráceno při spuštění simulace.

#### Příklad požadavku:

```
GET /getSimulationResults?simulation_id=12345
```

**Odpověď:**

Po dokončení simulace server vrátí výsledky v JSON formátu, které zahrnují klíčové metriky, jako jsou tlak, teplota, objem v plničce, spotřeba energie a další.

- ❖ `filling_station_pressure`: Tlak v plničce (MPa).
- ❖ `vehicle_pressure`: Tlak ve vozidle (MPa).
- ❖ `dispenser_temperature`: Teplota dispenseru (°C).
- ❖ `vehicle_temperature`: Teplota vozidla (°C).
- ❖ `filling_volume_percentage`: Objem plnícího zařízení (v %).
- ❖ `hydrogen_weight`: Hmotnost přeneseného vodíku (kg).
- `energy_consumption`: Spotřeba energie během simulace (kWh).

```
{ "status": "completed", "filling_station_pressure": 286.65, "vehicle_pressure": 242.30, "dispenser_temperature": -1.76, "vehicle_temperature": 36.55, "filling_volume_percentage": 79.66, "hydrogen_weight": 5.11, "energy_consumption": 10.31, "status_message": "Filling station is active" }
```

**Možnosti rozšíření**

Software je modulární a lze jej snadno rozšířit o nové funkce:

- ❖ Podpora nových typů plnicích stanic.
- ❖ Pokročilé analytické nástroje pro analýzu výsledků.
- ❖ Integrace s IoT zařízeními pro monitorování reálných dat.