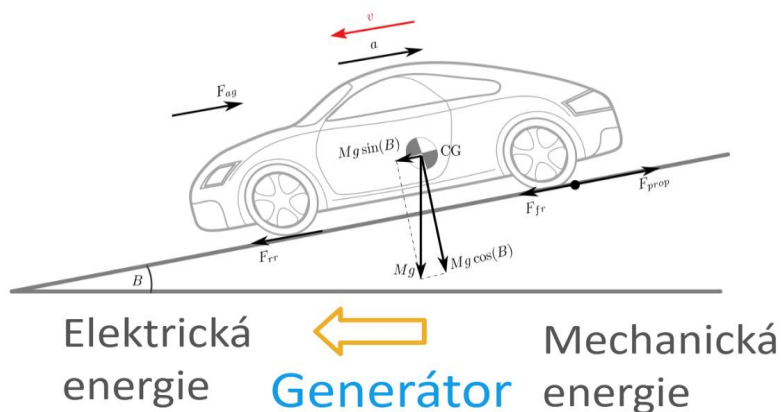


Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel

R – Software



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

NÁZEV VÝSLEDKU

Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Podpůrný SW pro akceleraci zavádění vodíkové mobility

AUTOŘI

Josef Štětina (Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně)

AUTORSKÝ TÝM KONCEPČNÍCH MATERIÁLŮ K SOFTWARE

Josef Štětina, Pavel Charvát, Martin Zálešák (Vysoké učení technické v Brně)

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

Bronislav Vahalík (Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.)



Obsah

1	Úvod.....	4
2	Dosavadní stav techniky	5
3	Novost řešení.....	6
4	Popis SW	7
4.1	Koncepční materiály SW.....	7
4.2	Modely vodíkových vozidel	8
4.3	Uvažované typy vozidel.....	8
4.4	Dynamický model vozidla.....	11
4.5	Analýza funkčních požadavků	13
4.6	Ukázka kódu	14
5	Popis ověření funkčnosti SW	17
6	Umístění SW	21
7	Způsob využití	21
8	Seznam příloh	22
9	Seznam obrázků.....	22
10	Seznam tabulek.....	22
11	Reference	22

1 Úvod

Přestože je vodík v současnosti vnímám jako slibné obnovitelné palivo pro oblast silniční dopravy, celkové počty silničních dopravních prostředků, využívajících vodík jako palivo, jsou stále velmi nízké. Tento stav má řadu příčin, od nedostatečné infrastruktury vodíkových plnicích stanic, přes vysoké pořizovací a provozní náklady vodíkových vozidel, až po nedůvěru potenciálních uživatelů k tomuto typu pohonu (1). Na rozdíl od bateriových elektrických vozidel (BEV), které mohou využít existující infrastrukturu pro distribuci elektrické energie, infrastrukturu pro vodíkovou dopravu je nutné teprve vybudovat. Legislativní předpisy Evropské unie do budoucna nepočítají s využitím vodíku vyrobeného z fosilních paliv, pouze vodíku vyrobeného pomocí obnovitelných zdrojů energie, a to zdrojů vybudovaných přímo za účelem výroby obnovitelného vodíku (2). Budování zařízení pro výrobu zeleného vodíku bude nákladné a časově náročné a cenu takto vyrobeného obnovitelného vodíku je v současnosti obtížné odhadnout.

Vodíková mobilita naráží na obecný problém přechodu na nové palivo. Nedostatečná infrastruktura pro zásobování palivem odráží potenciální uživatele od nákupu vozidel, které toto palivo využívají. Malý počet vozidel (omezený trh) současně odráží investory od budování infrastruktury pro nové palivo. Značnou část infrastruktury vodíkové dopravy dnes představují pilotní projekty, které často vznikly s výraznou podporou veřejných prostředků. Tato situace se v nejbližší budoucnosti nezmění a nové projekty vodíkové infrastruktury se neobejdou bez veřejné podpory. Další bariérou rozvoje vodíkové silniční dopravy je nedostatek zkušeností s provozem vodíkových vozidel. Přestože se první sériově vyráběná vodíková vozidla objevila před více než dvaceti lety, zkušenosti s jejich provozem nejsou příliš rozšířené. Navíc jde převážně o osobní vozidla, u kterých se ve střednědobé budoucnosti neočekává, že dosáhnou významného podílu na prodeji osobních vozidel. Ve střednědobé budoucnosti tak bude pozornost zaměřena hlavně na nákladní dopravu a hromadnou přepravu osob. Řada výrobců má dnes ve své nabídce nákladní vozidla a autobusy poháněné elektřinou získávanou z vodíkových palivových článků. Pro většinu těchto vozidel však nejsou běžně k dispozici data z jejich dlouhodobého reálného provozu.

Před získáním reálných provozních dat mohou být některé výše uvedené bariéry v rozvoji vodíkové silniční dopravy překonány pomocí vhodných počítačových simulačních nástrojů. Simulační nástroje pro tento účel musí poskytovat velkou flexibilitu, protože řada vstupních údajů je zatížena značnou nejistotou. Smysl tak dávají parametrické studie, které mohou prověřit různé scénáře provozu vodíkových vozidel, od velmi optimistických až po velmi pesimistické.

2 Dosavadní stav techniky

V současné době je na trhu velmi málo silničních vozidel využívajících vodík jako palivo. S ohledem na udržitelnost a snižování emisí se do budoucna předpokládá použití především vodíkových vozidel získávajících elektřinu z vodíku pomocí palivových článků (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle). Nejrozšířenějším komerčně dostupným vozidlem, využívajícím vodík cestou palivových článků, je v současnosti Hyundai Nexo, crossover SUV, které bylo uvedeno na trh v roce 2018 a doposud se celosvětově prodalo přibližně 40 000 těchto vozidel. Dalším komerčně dostupným osobním automobilem poháněným palivovými články je Toyota Mirai (sedan střední třídy), který je na trhu přibližně 10 let. Za tu dobu se celosvětově prodalo přes 30 000 těchto vozidel. Pro srovnání, nejprodávanějšího bateriového elektrického vozu, Tesla model Y, se jenom v roce 2023 celosvětově prodalo 1.2 milionu kusů. Z prodejů osobních vozidel je zřejmé, že se vodíková osobní vozidla ve střednědobé budoucnosti (cca 20 let) nestanou vážnou konkurencí bateriových elektrických vozidel, pro které je již dnes k dispozici rozsáhlá nabíjecí infrastruktura.

V oblasti vodíkové silniční dopravy lze očekávat, že ve střednědobé budoucnosti bude pozornost zaměřena především na nákladní vozidla a vozidla pro hromadnou přepravu osob. V těchto kategoriích vozidel zpravidla jeden provozovatel provozuje více vozidel (často několik desítek), což umožňuje vybudování vlastní plnicí stanice, případně další vodíkové infrastruktury. Vodíkové plnicí stanice vybudované pro potřeby místní hromadné dopravy osob mohou následně využít i provozovatelé jiných vozidel, včetně vozidel pro osobní přepravu.

Vytvořený model vodíkových vozidel je koncipován jako fyzikální popis dynamického chování vozidla při jízdě po zadané trase (např. získané z mapových podkladů). Základem modelu je výpočet sil působících na vozidlo během jízdy (např. aerodynamický odpor, setrvačné síly, odporové síly, gravitační síla). Tyto síly obecně nezávisí na typu pohonu, ale výrazně ovlivňují spotřebu energie. Další část modelu tvoří matematický popis pohonu vozidla. Základem pohonu elektrického vodíkového vozidla je elektromotor, který může pracovat jak v motorovém, tak generátorickém režimu. Jako zdroj energie jsou uvažovány vodíkové palivové články a pro vyrovnání rozdílů mezi produkcí elektrické energie palivovými články a spotřebou vozidla je uvažována baterie. Kromě elektrických vodíkových vozidel umožňuje vytvořený software modelovat také vozidla poháněná motory, které spalují vodík.

3 Novost řešení

Vytvořený simulační nástroj (software) pro modelování vodíkových vozidel přináší řadu nových a unikátních atributů a funkcí. Základní filozofie je založena na fyzikálním modelu dynamického chování vozidla, které zohledňuje charakteristiky vozidla (hmotnost, vlastnosti pohonu, aerodynamický odpor, pasivní odpory a další). Hlavním účelem vytvořeného nástroje je poskytnout uživatelům realistický model vodíkového vozidla bez vysokých požadavků na vstupní data ze strany uživatele. Základní rysy softwaru (simulačního nástroje) jsou uvedeny níže:

Realistická simulace dynamiky vozidla:

- **Adaptabilní modelování:** Umožňuje modelování různých typů vodíkových vozidel (osobní, nákladní, autobusy) s přihlédnutím k jejich specifickým charakteristikám.
- **Fyzikálně věrné simulace:** Detailní simulace aerodynamiky, valivého odporu, účinnosti elektropohonu a palivového článku. Unikátní je i zařazení modelů na spalování vodíku ve spalovacích motorech (s možností uvažování směsných paliv).
- **Ověřitelnost:** Vodíkových vozidel pro ověření přesnosti modelů je v současnosti málo. Pro základní ověření přesnosti modelů bylo využito dat z bateriových elektrovozidel a vozidel se spalovacími motory. Se zvyšující se dostupností dat bude možné modely dále zpřesňovat.
- **Variabilní podmínky:** Možnost simulovat provoz v různých geografických a klimatických podmínkách.
- **Variabilní chování řidiče:** je možné simulovat chování řidiče: úsporná jízda, normální jízda, agresivní jízda.

Eko-efektivní výpočty:

- Hodnocení uhlíkové stopy podle zdroje vodíku (výroba, přeprava).
- Srovnání s jinými typy pohonů (elektrické, spalovací) z hlediska spotřeby, emisí.

Pokročilá práce s daty:

- **Velká datová sada:** V budoucnu lze očekávat možnost využití velké sady dat od uživatelů a analyzovat historická data pro optimalizaci provozu a předpovědi spotřeby.
- **Simulace dopadu změn:** Možnost analyzovat, jak různé strategie (např. změna trasy, styl jízdy) ovlivní spotřebu a provozní náklady vozidla.

Možnost simulace různých technologií:

- **Palivové články vs. spalovací motory:** Simulace rozdílů v účinnosti, dynamice a spotřebě mezi těmito dvěma přístupy.
- **Budoucí technologie:** Testování hypotetických technologií (např. vysokoteplotní palivové články, nové způsoby skladování vodíku ve vozidle).

Podpora pro fleet management:

- **Optimalizace flotil:** Umožňuje správcům flotil plánovat trasy, hodnotit vozidla a simulovat jejich provozní náklady.
- **Prediktivní údržba:** Integrace diagnostiky vozidla pro odhad nutných oprav a optimalizaci provozuschopnosti.

Gamifikace a edukace:

- **Scénáře a simulace:** Uživatelé si mohou “hrát” s různými scénáři (např. porovnání efektivity různých stylů jízdy).
- **Vzdělávací rozhraní:** Nástroj pro výuku a popularizaci vodíkové mobility.

4 Popis SW

Použitý model je fyzikálním popisem pohybu vozidla po zadané trase. Jako vstupní údaje modelu je třeba zadat popis trasy a popis vozidla včetně charakteristik pohonu.

4.1 Koncepční materiály SW

Software se skládá z následujících částí:

- Grafické rozhraní vytvořené v MATLAB App Designer (3)
- Výpočtový model vozidla pro přepravu vodíku
- Rozhraní webové aplikace přístupné přes MATLAB WebApp Server

Software je strukturován tak, aby umožnil efektivní výpočty a vizualizaci při simulaci provozu vodíkových vozidel v rámci dané trasy. Jeho architektura a design vycházejí z několika klíčových principů zaměřených na modularitu, flexibilitu a uživatelskou přívětivost.

Výpočtový model vodíkových vozidel je implementován ve formě MATLAB skriptu, který zahrnuje komplexní algoritmy pro výpočet spotřeby vodíku na základě vstupních parametrů, jako jsou hmotnost vozidla, maximální povolená rychlost, topografie trasy a další faktory ovlivňující spotřebu. Vstupním parametrem do modelu vozidla je struktura „Vehicle,“ která v sobě zahrnuje parametry vozidla. Tyto parametry lze členit do následujících kategorií.

Aerodynamika

Vehicle.Aero.Cx = .29; % [-] Koeficient aerodynamického odporu

Vehicle.Aero.S = 1.815*(1.535-0.13); % [m²] Čelní plocha vozidla

Vehicle.Aero.T = 20; % [°] Teplota

Vehicle.Aero.p = 980; % [hPa] Tlak

Vehicle.Aero.phi = 45; % [%] Vlhkost

Vehicle.Aero.ro = 1.3; % [kg/m³] Hustota vzduch

Konfigurace

Vehicle.Config.Vehicle = 0; % 0 samo, 1 s vlekem 2 s navesem 3 s navesem i vlekem

Vehicle.Config.NuAxle = 2; % front wheel drive?

Vehicle.Config.NuDriveAxle = 1;

Hmotnosti

Vehicle.Weight.m_whole = 1945; % [kg] Celková hmotnost vozidla

Vehicle.Weight.m_empty = 1850; % [kg] Hmotnost prázdného vozidla

Vehicle.Weight.m_load = 0; % [kg] Náklad

Vehicle.Weight.m_fuel = 5 + 90; % [kg] Palivo + řidič

Vehicle.Weight.g = 9.81; % [m/s^2] Gravitational Constant

Rozměry vozidla

Vehicle.Dimension.l = 2.92; % [m] Rozvor tažného vozidla

Vehicle.Dimension.a = 1.15; % [m] Horizontal Distance From Center of Gravity -> Front Wheel

Vehicle.Dimension.b=Vehicle.Dimension.l-Vehicle.Dimension.a; % [m] Horizontal Distance From Center of Gravity -> Rear Wheel

Vehicle.Dimension.hG = .5; % [m] Height of Center of Gravity

Pneumatiky

Vehicle.Tire.wheel_indication = '155/65R13'; % Wheel Indication (235/55R19 245/45R20)

Vehicle.Tire.R0 = 13*25.4/2 + .65*155; %[mm] % Wheel Radius

Vehicle.Tire.Re = .98*R0*10^-3; % [m] % Wheel Effective Radius

Vehicle.Tire.Jw = 1.6; % [kg.m^2] Wheels' Moment of Inertia

Odpory

alpha = atan(0:0.1:0.4); %[-] Angle of Inclination

Vehicle.Resistance.f0 = .013; %[-] Rolling Resistance Coefficient 1

Vehicle.Resistance.K = 6.51*10^-6; %[s^2/m^2] Rolling Resistance Coefficient 2

4.2 Modely vodíkových vozidel

Hlavní část softwaru je věnována vozidlům s palivovými články. Technické parametry vozidel byly získány z materiálů výrobců vozidel. Model pohonu vychází jak z materiálů výrobců, tak z jiných literárních zdrojů (např. charakteristiky elektromotorů a palivových článků).

Vozidla s palivovými články (FCEV)

Model je rozdělen do dvou bloků. První je blok elektrického pohonu, který zahrnuje jednostupňovou převodovku, elektromotor, regulační měnič a baterii (vše řízeno BMS systémem). Druhým blokem je model palivového článku.

Vozidla s motory spalujícími vodík

Jako doplňkový je uvažován model vozidla se zážehovým spalovacím motorem upraveným pro spalování vodíku. Pro tento model jsou použity pouze informace z výzkumných vozidel a publikovaných odborných článků. V modelu je použit přístup pro modelování vozidla přes úplnou charakteristiku motoru.

4.3 Uvažované typy vozidel

Osobní automobil

Osobní automobily představují v současnosti nejrozšířenější typ vodíkových vozidel s palivovými články. Z toho důvodu je pro tento typ vozidel k dispozici nejvíce vstupních údajů a do budoucna lze očekávat i dostupnost provozních dat pro validaci modelů. Data z provozu osobních vodíkových automobilů lze do jisté míry použít pro validaci malých nákladních vodíkových vozidel (dodávkových

automobilů). V Tabulka 1 jsou uvedeny základní parametry sedanu Toyota Mirai, poháněného vodíkovými palivovými články. Toto vozidlo je na trhu 10 let a je pro ně nejvíce dostupných vstupních údajů.

Tabulka 1: Základní technické údaje osobního vozu Toyota Mirai (4)

Délka	4975 mm
Šířka	1885 mm
Výška	1470 mm
Pohotovostní hmotnost	1950 kg
Typ palivových článků	S polymerní membránou (PEM)
Max. výkon palivových článků	128 kW
Typ elektromotoru	Synchronní s permanentními magnety
Výkon elektromotoru	136 kW
Kroutící moment elektromotoru	300 Nm
Kapacita baterie	1.24 kWh
Počet vodíkových nádrží	3
Max. plnicí tlak	87.5 MPa
Standardní provozní tlak	70 MPa
Kapacita vodíkových nádrží	5.6 kg

Autobus

Silniční vozidla pro lokální hromadnou přepravu osob představují ideální typ vodíkového vozidla pro provoz v rámci vodíkového ostrova. Organizace provozující lokální hromadnou přepravu osob provozují zpravidla větší počet silničních vozidel, pro které má smysl vybudovat lokální vodíkovou infrastrukturu. Podle počtu vozidel buď výdejní nebo plnicí stanici, případně lokální výrobu zeleného vodíku. Řada výrobců v současnosti připravuje nebo již nabízí autobusy poháněné vodíkovými palivovými články, pro které je z dokumentace možné získat údaje pro model vozidla. V Tabulka 2 jsou uvedeny základní parametry městského vodíkového autobusu ELEC CITY výrobce Hyundai.

Tabulka 2: Základní technické údaje autobusu ELEC CITY (5)

Seat Capacity		48 (22+1+25) Seater
Overall Length		10,995 mm
Overall Width		2,490 mm
Overall Height		3,400 mm
Fuel Cell System		180 kW (2 x 90 kW each)
Hydrogen tank	Capacity	875 L (5 x 175 L each)
	Hydrogen	33.99 kg
	Charging Pressure	700 bar
Motor	Type	Central Motor
	Power	180 kW
Battery	Type	Lithium-ion
	Energy Capacity	78.4 kWh (2 x 39.2 kWh each)

※ Seat Capacity = Passenger seats + Driver seat + Standing passengers

Těžká nákladní vozidla

V oblasti těžkých nákladních vozidel (především tahačů pro dálkovou dopravu) je situace podobná jako u autobusů. Řada výrobců připravuje nebo již nabízí vozidla s pohonem pomocí palivových článků. Podobně jako u autobusů, také u těžkých nákladních vozidel, tvoří obsluhu profesionální řidiči, které je možné v rámci zaměstnání prostřednictvím odborných školení seznámit se specifiky provozu vodíkových vozidel, včetně doplňování paliva a bezpečnosti. V Tabulka 3 jsou specifikace pohonu tahače firmy Nikola.

Tabulka 3: Základní technické údaje tahače Nikola (6)

POWERTRAIN	
FUEL CELL POWER MODULE	200 kW
TOTAL BATTERY CAPACITY (2 PACK)	164 kWh
CONTINUOUS POWER	536 HP / 400 kW
INSTANTANEOUS POWER	773 HP / 575 kW
CONTINUOUS WHEEL TORQUE	12,500 FT-LB
E-AXLE GEAR RATIO	21.6

HYDROGEN SYSTEM	
HYDROGEN STORAGE CAPACITY	70 kg
REFUELING TIME	Less than 20 minutes**
STORAGE PRESSURE	10.000 PSI / 700 bar

Vozidlo pro lokální nákladní přepravu

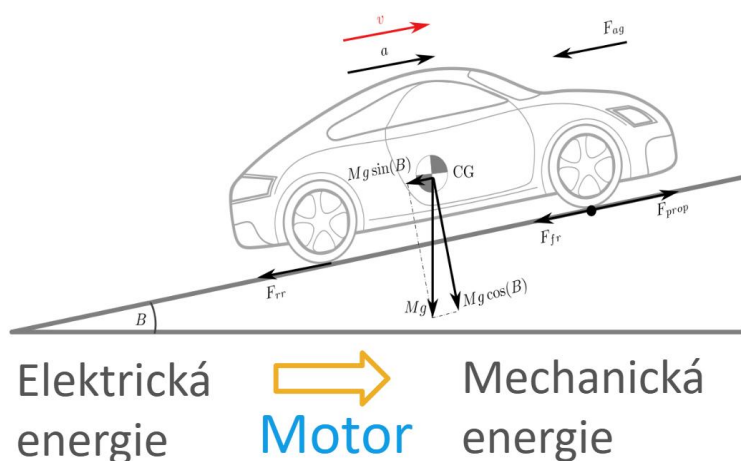
Vozidla pro lokální nákladní přepravu (lokální zásobování) mohou využívat infrastrukturu vodíkového ostrova. Řada výrobců v současnosti pracuje na přestavbě nebo návrzích lehkých nákladních vozidel na vodíkový pohon. Na Obrázek 1 je vodíková platforma pro Peugeot e-EXPERT Hydrogen.



Obrázek 1: Peugeot e-EXPERT Hydrogen (7)

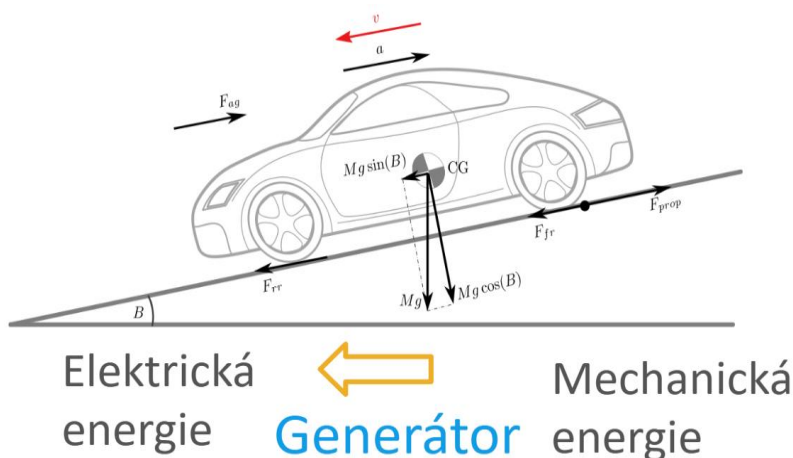
4.4 Dynamický model vozidla

Základním uvažovaným typem vodíkových vozidel je vodíkové elektrické vozidlo poháněné palivovými články. Alternativně je uvažováno vozidlo se zážehovým motorem spalující vodík nebo směs paliv. Model vozidla je založen na výpočtu energie potřebné pro překonání odporových sil při pohybu vozidla po zadané trase. Ukázka sil působících na vozidlo v případě, že elektrický pohon pracuje v motorovém režimu je na Obrázek 2.



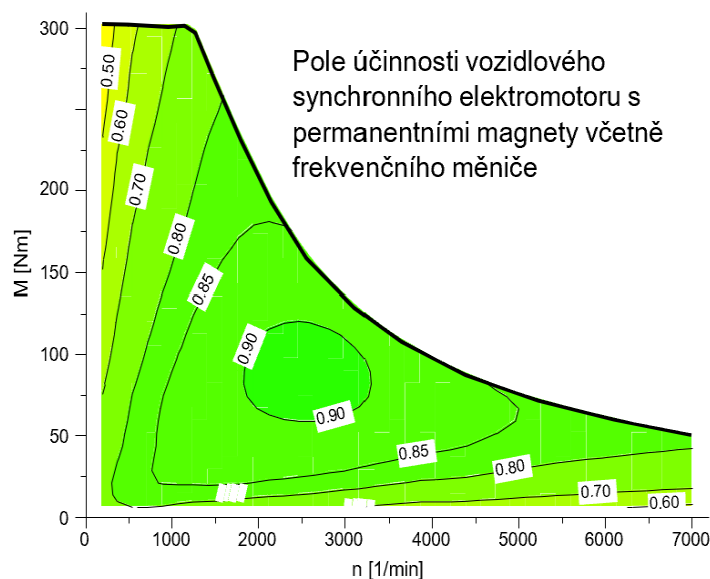
Obrázek 2: Jízdní odpory vozidla

V případě vodíkového elektrického vozidla software umožňuje modelovat generátorický chod (rekuperaci energie). Ukázka sil působících na vozidlo v případě, že elektrický pohon pracuje v generátorovém režimu je na Obrázek 3. Vodíková elektrická vozidla mají menší kapacitu baterie než elektrická bateriová vozidla, a to ovlivňuje možnosti rekuperace.



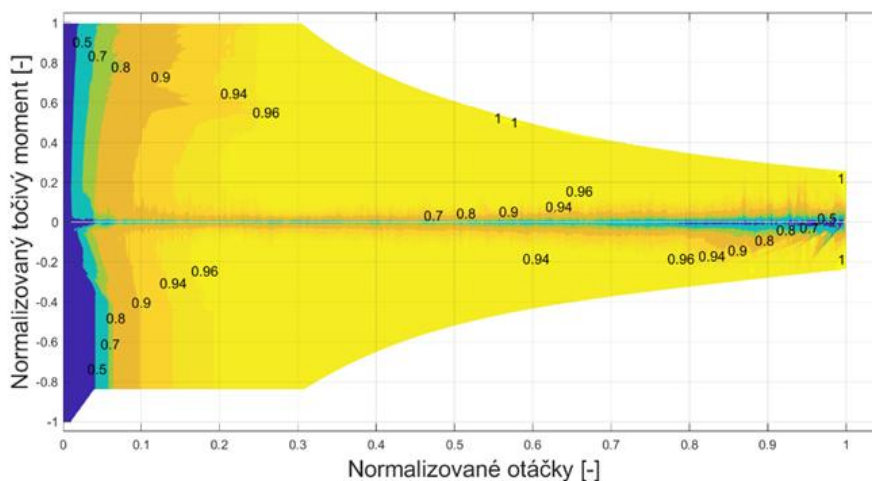
Obrázek 3: Jízdní odpory v generátorickém chodu

Pro modelování spotřeby energie na pohon vozidla je nutné mít k dispozici účinností mapu elektromotoru (příklad takové mapy je na Obrázek 4).



Obrázek 4: Příklad mapy elektrického pohonu

Elektropohony mají možnost pracovat v generátorovém režimu (rekuperace), a proto je nutné mít k dispozici také mapu pohonu pro záporné momenty. V případě elektrických pohonů navíc software řeší přepínání mezi brzděním elektromotorem a hydraulickými brzdami. To je vidět na přiložené mapě (Obrázek 5), kde záporné tzv. brzdné momenty jsou omezeny čarou zásahu brzd vozidla.



Obrázek 5: Mapa elektrického pohonu v motorovém a generátorickém režimu

4.5 Analýza funkčních požadavků

Software umožňuje uživatelům, bez detailních znalostí nebo přístupu k podrobným informacím, modelovat provoz různých typů vodíkových vozidel. Modely vozidel obsahují parametry konkrétních vozidel dostupných na trhu nebo vozidel připravovaných výrobcí. Základní myšlenkou je nabídnout

uživatelům výběr z databáze vozidel (kterou je možné rozšiřovat), bez toho, aby museli uživatelé zadávat detailní charakteristiky každého vozidla. Hlavní požadavky na software jsou uvedeny níže.

Interaktivní a uživatelsky přívětivé prostředí

- **Webová dostupnost:** Uživatelé mohou přistupovat k simulaci odkudkoliv bez nutnosti instalace softwaru.
- **Modularita:** Možnost přizpůsobit nástroje a zobrazení podle potřeb konkrétních uživatelů (výrobci vozidel, fleet manažeři, akademická sféra).
- **Vizualizace výsledků:** Pokročilé grafy a mapy, které umožňují analyzovat data v reálném čase.

4.6 Ukázka kódu

Níže je uvedena ukázka kódu pro zadávání základních charakteristik vozidla. Na základě těchto charakteristik je proveden výpočet jízdních odporů a následně stanoven potřebný výkon pohonu vozidla a příslušná spotřeba energie/paliva.

```
%% Podélná dynamika vozidel
% Základní výpočty
clear all
clc
%PraceScharakteristikou00;
%% Konstanty
% Aerodynamika
Cx = .35; % [-] Koeficient aerodynamického odporu
S = 8.82; % [m^2] Čelní plocha vozidla Typická výška: 3,5-4,0 m Typická šířka: 2,5 m
%%
% Hmotnosti
MassTotal = 21000; % [kg] Celková hmotnost vozidla 10 tahac+8návis+5 vodík=23tun
VolumeEngine = 12998; % [cm^3] Objem motoru
PermanentGear = 2.5;
Tf = 1/PermanentGear; % [-] Stálý převod
OtackyMin = 6000; % [1/min] Minimální otáčky motoru
efficiencyt = .85; % [-] Účinnost pohonu
%%
%
LengthTotal = 18.0; % [m] Rozvor tažného vozidla
a = 6.0; % [m] Vodorovná vzdálenost od těžišti -> přední kolo
b=LengthTotal-a; % [m] Vodorovná vzdálenost od těžišti -> zadní kolo
hG = 1.2; % [m] Výška těžišti
%%
%
```

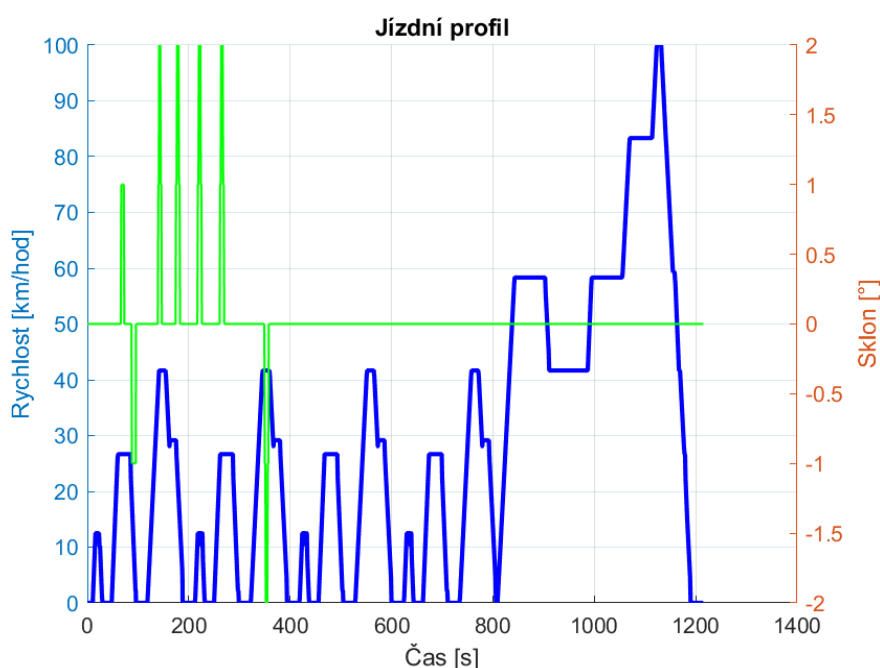
```
wheel_indication = '155/65R13'; % Rozměry pneumatik
R0 = 22.5*25.4/2 + .70*315;      % [mm] % [mm] Poloměr kola
Re = .98*R0*10^-3;              % [m] Efektivní poloměr kola
Ngears = 10;                    % [-] Number of Gears
ts = 1;                         % [s] Time of Shifting Between Gears
Je = .32;                       % [kg.m^2] Engine's Moment of Inertia
Jw = 3.6;                       % [kg.m^2] Wheels' Moment of Inertia
Jt = Jw;                        % [kg.m^2] Transmission's Moment of Inertia
g = 9.81;                       % [m/s^2] Gravitational Constant
ro = 1.212;                     % [kg/m^2] Air Density
f0 = .013;                      % [-] Rolling Resistance Coefficient 1
K = 6.51*10^-6;                 % [s^2/m^2] Rolling Resistance Coefficient 2
%% VÝKON POTŘEBNÝ PRO POHYB
% Pokrytí libovolný interval rychlosti
vKm = 0:10:300;                 % [km/h]
vm = (vKm./3.6);                % [m/s]
alpha = atan(0:0.1:0.4);        % [-] Angle of Inclination
% Deklarovat všechny vektory/matrice jako nuly
A = zeros(6, 1);
B = zeros(6, 1);
R = zeros(6, 31);
Pn = zeros(6, 31);
Pnorm = zeros(5, 31);
Pcar = zeros(5, 1);
Vcar = zeros(5, 1);
Av = zeros(5, 31);
Bv3 = zeros(5, 31);
% Vypočítejte A, B, Vcar, Pcar, R, Av, Bv^3, Pn, Pnorm a Vnorm při 5
% různých sklonů vozovky
for i = 1:5
    A(i) = MassTotal*g*(f0*cos(alpha(i)) + sin(alpha(i))); % [N]
    B(i) = MassTotal*g*K*cos(alpha(i)) + 0.5*ro*S*Cx; % [kg/m]
    Vcar(i) = sqrt(A(1)/B(1)); % [m/s]
    Pcar(i) = 2*A(i)*sqrt(A(i)/B(i)); % [W]

    for j = 1:31
        R(i, j) = A(i) + B(i)*(vm(j)^2); % [N]
        Av(i, j) = A(i)*vm(j); % [W]
        Bv3(i, j) = B(i)*vm(j)^3; % [W]
        Pn(i, j) = Av(i, j) + Bv3(i, j); % [W]
        Pnorm(i, j) = Pn(i, j)/Pcar(i); % [-]
    end
end
```

```
Vnorm = vm/Vcar(i); %[-]
end
% Vykreslete požadované grafy v části I.
figure;
hold on;
for i = 1:2
    % subplot(3, 3, i);
    plot(vKm(1:16), R(i, 1:16)/1000);
end
xlabel('Rychlost [km/h]');
ylabel('Odpor [kN]');
title(['Odpor vs Rychlost @ tan(alpha) = ', num2str(tan(alpha(2)))]);
grid on;
saveas(gcf, 'odpor.png');
for i = 1:2
    figure;
    % subplot(3, 3, i+2);
    loglog(vKm(1:16), Pn(i, 1:16));
    hold on;
    loglog(vKm(1:16), Av(i, 1:16));
    loglog(vKm(1:16), Bv3(i, 1:16));
    xlabel('log(V)');
    ylabel('log(Pn)');
    title(['Výkon vs Rychlost @ tan(alpha) = ', num2str(tan(alpha(i)))]);
    grid on;
    X = sprintf('odpor%d.png', i);
    saveas(gcf, X);
end
for i = 1:5
    figure;
    % subplot(3, 3, i+4);
    loglog(Vnorm, Pnorm(i, 1:31));
    xlabel('log(Vnorm)');
    ylabel('log(Pnorm)');
    title(['P_n vs v_n @ tan(alpha) = ', num2str(tan(alpha(i)))]);
    grid on;
    X = sprintf('odporytan%d.png', i);
    saveas(gcf, X);
end
```

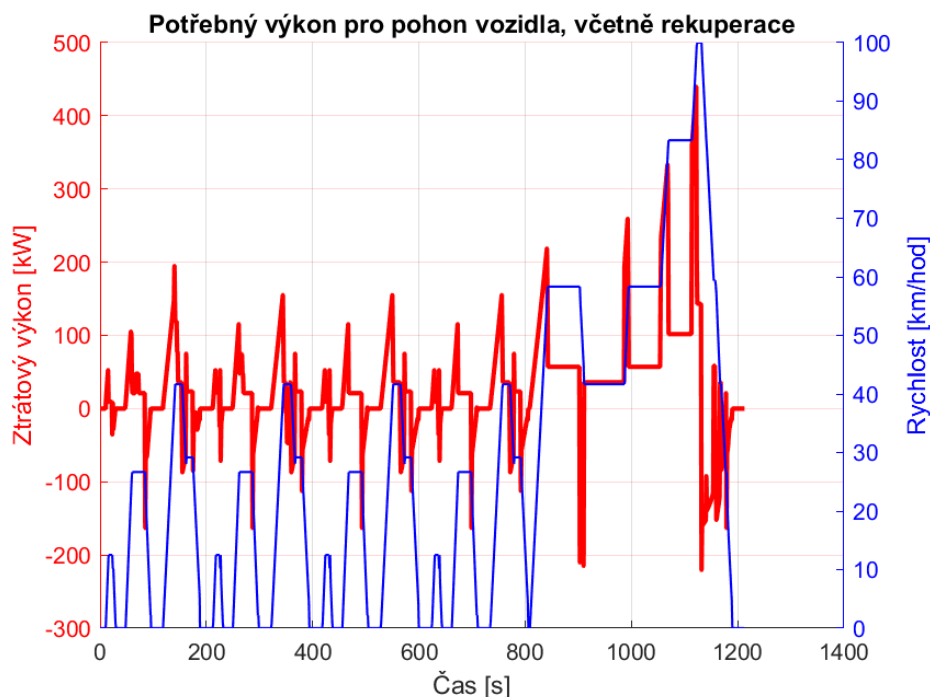

5 Popis ověření funkčnosti SW

Funkčnost softwaru byla ověřena na NEDC (New European Driving Cycle) cyklu. Tento cyklus se skládá se ze dvou fází: městské (UDC) s častými zastávkami a rozjezdy a mimoměstské (EUDC) s vyššími rychlostmi. Celkově trvá 20 minut, pokrývá 10 km a má průměrnou rychlost 33 km/h. Standardní testovací cykly NEDC a WLTP jsou určeny pro osobní a lehká užitková vozidla. V případě vodíkové mobility se předpokládá, že vodík jako palivo budou využívat především větší vozidla (nákladní automobily, autobusy apod.). NEDC cyklus se už pro testování osobních a lehkých užitkových vozidel nepoužívá, ale v současnosti používaný WLTP (8) cyklus uvažuje vyšší hodnoty zrychlení a vyšší rychlosti (130 km/hod), které jsou méně realistické v případě nákladních vozidel nebo autobusů pro lokální dopravu. WLTP navíc zohledňuje spotřebu palubních systémů vozidel (např. klimatizace), které software v současné verzi neřeší. Průběh rychlosti a sklonu trasy pro použitý testovací cyklus je na Obrázek 6.



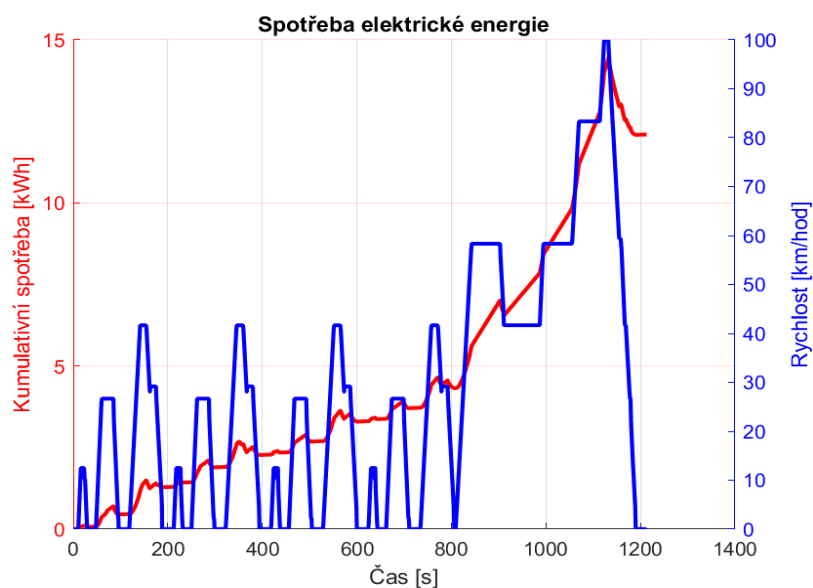
Obrázek 6: Průběh rychlosti a sklonu trasy v závislosti na čase

Průběh potřebného výkonu pohonu nákladního vozidla s vodíkovými palivovými články je na Obrázek 7. Ze závislosti je vidět, že při zpomalování pomocí elektromotoru (generátorický chod) dochází k rekuperaci energie. Pokud to stav nabití baterie umožňuje, je tuto energii možné ukládat baterie.

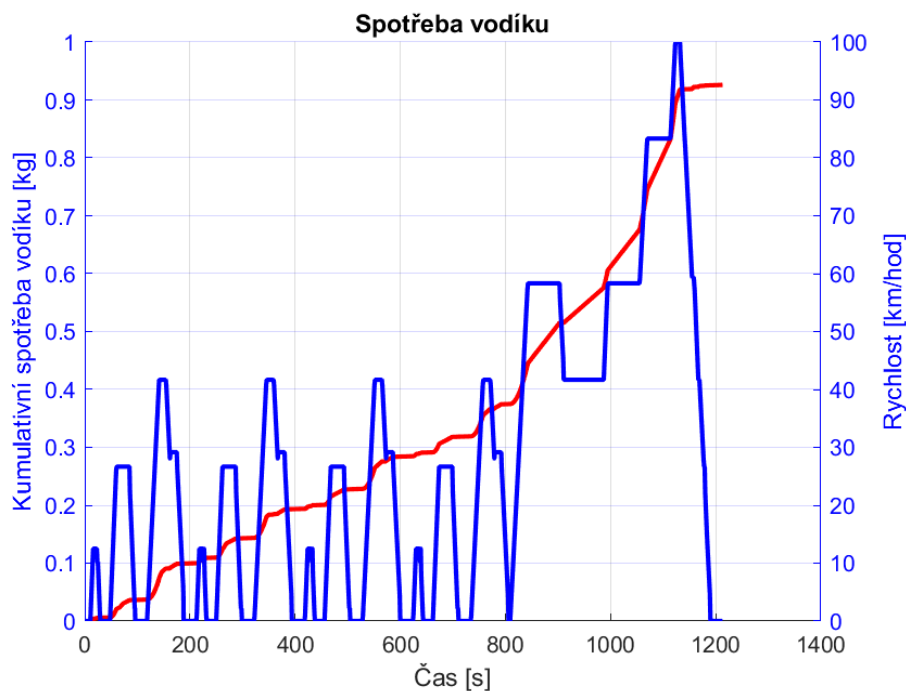


Obrázek 7: Okamžitý potřebný výkon pohonu nákladního automobilu s palivovými články

Jak je vidět na Obrázek 8, generátorický chod elektrického pohonu se projevuje na spotřebě elektrické energie. Na konci cyklu bylo při zastavení (zpomalení z rychlosti 100 km/h na 0 km/h) získáno značné množství elektrické energie. Na okamžité spotřebě vodíku se tato skutečnost neprojevívá, jak je vidět z průběhu kumulativní spotřeby vodíku (Obrázek 9).

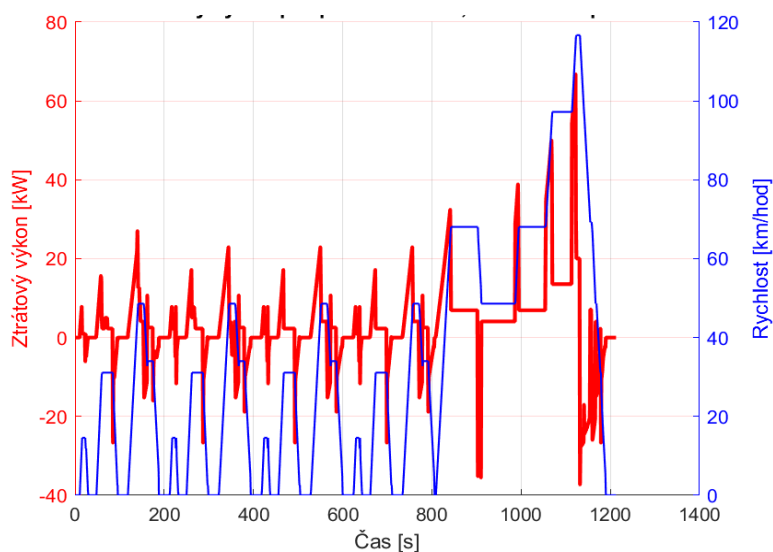


Obrázek 8: Kumulativní spotřeby elektrické energie (nákladní automobil)

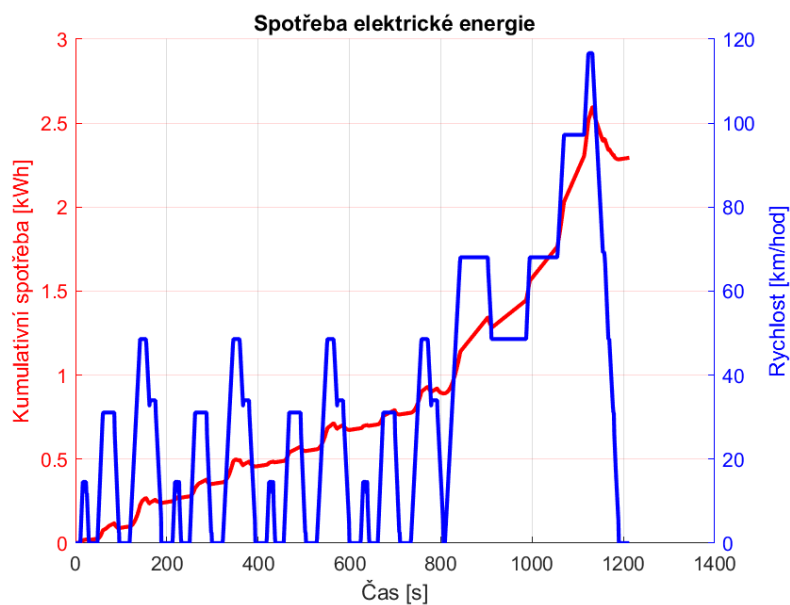


Obrázek 9: Průběh kumulativní spotřeby vodíku (nákladní automobil)

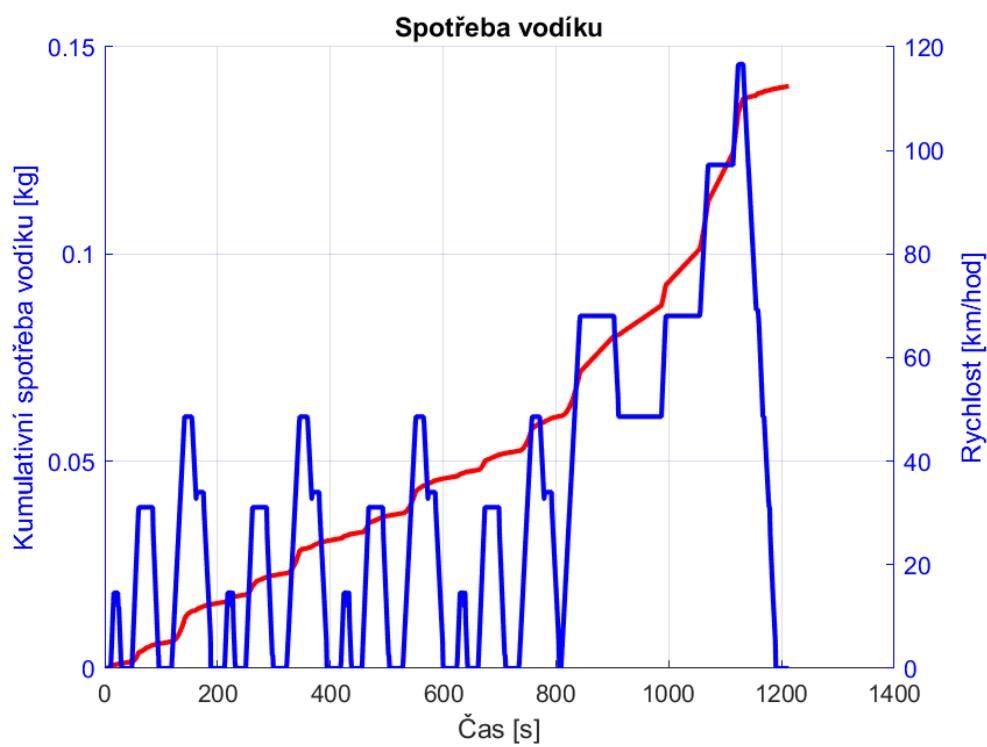
Kromě nákladního automobilu byl model vodíkového vozidla testován také pro osobní automobil (Toyota Mirai). Ve střednědobé budoucnosti se neočekává, že by vodíková osobní vozidla získala podstatný podíl na trhu osobních vozidel. Nicméně se v současnosti jedná o nejrozšířenější kategorii vodíkových vozidel a z tohoto důvodu je pro tato vozidla k dispozici nejvíce dat. Graf na Obrázek 10 zobrazuje okamžitou spotřebu elektrické energie osobního vodíkového vozidla pro testovací cyklus. Kumulativní spotřeby elektrické energie a vodíku jsou uvedeny na Obrázek 11 a Obrázek 12.



Obrázek 10: Okamžitý potřebný výkon pohonu osobního vozidla



Obrázek 11: Kumulativní spotřeba elektrické energie (osobní automobil)



Obrázek 12: Kumulativní spotřeba vodíku (osobní automobil)

6 Umístění SW

Software je dostupný přes webovou stránku <https://mws.fme.vutbr.cz/> pro použití softwaru je nutný přístupový kód. Počet přístupových kódů je limitován z důvodu výpočetní náročnosti modelu se snahou eliminovat útoky DDoS, ke kterým docházelo při zkušebním provozu software.

7 Způsob využití

Modely vodíkových vozidel slouží primárně v rámci simulace provozu různých typů vodíkových vozidel. Simulace vyžadují informace o projížděných trasách. Model využívá parametry trasy načtené ze souboru. Model projíždí trasu a na základě specifikací vozidla poskytuje informace o spotřebě energie a nákladech. Tyto výstupní údaje mohou být dále zahrnuty v analýzách ostrovního provozu vodíkové infrastruktury.

Další využití softwaru se očekává v oblasti výuky, kde lze poměrně názorným způsobem demonstrovat provozní charakteristiky vodíkových vozidel. Výpočtové modely, které jsou součástí softwaru, mohou být dále rozvíjeny a zdokonalovány v rámci diplomových nebo disertačních prací. Současná verze softwaru přímo nezohledňuje spotřebu energie palubních systémů, jako je např. klimatizace. U těžkých nákladních vozidel je energie potřebná na klimatizaci kabiny relativně malá v porovnání s energií potřebnou na pohon vozidla, ale u autobusů a menších vozidel může hrát spotřeba energie palubními systémy nezanedbatelnou roli.

8 Seznam příloh

Příloha 1: Videosoubor se záznamem funkčnosti

- [Model nákladního vozidla s vodíkovými palivovými články](#)
- [Model osobního vozidla s vodíkovými palivovými články](#)

Příloha 2: Uživatelská příručka pro matematicko-digitální modely vodíkových vozidel

Viz níže.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Peugeot e-EXPERT Hydrogen (7)	11
Obrázek 2: Jízdní odpory vozidla.....	12
Obrázek 3: Jízdní odpory v generátorickém chodu.....	12
Obrázek 4: Příklad mapy elektrického pohonu.....	13
Obrázek 5: Mapa elektrického pohonu v motorovém a generátorickém režimu	13
Obrázek 6: Průběh rychlosti a sklonu trasy v závislosti na čase	17
Obrázek 7: Okamžitý potřebný výkon pohonu nákladního automobilu s palivovými články	18
Obrázek 8: Kumulativní spotřeby elektrické energie (nákladní automobil)	18
Obrázek 9: Průběh kumulativní spotřeby vodíku (nákladní automobil).....	19
Obrázek 10: Okamžitý potřebný výkon pohonu osobního vozidla	19
Obrázek 11: Kumulativní spotřeba elektrické energie (osobní automobil).....	20
Obrázek 12: Kumulativní spotřeba vodíku (osobní automobil).....	20

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní technické údaje osobního vozu Toyota Mirai (4)	9
Tabulka 2: Základní technické údaje autobusu ELEC CITY (5).....	10
Tabulka 3: Základní technické údaje tahače Nikola (6).....	10

11 Reference

1. Rawat A., Garg C.P., Sinha P. Analysis of the key hydrogen fuel vehicles adoption barriers to reduce carbon emissions under net zero target in emerging market. *Energy Policy*. 2024.
2. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1184 of 10 February 2023. *EUR-Lex*. [Online] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1184>.
3. The MathWorks, Inc. MATLAB® App Building. [Online] 2024. https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/creating_guis.pdf.
4. Mirai full release. *Toyota UK*. [Online] prosinec 2024. <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/220203M-Mirai-Tech-Spec.pdf>.



5. ELEC CITY Fuel Cell. *Electrified Commercial Vehicles*. [Online]
<https://ecv.hyundai.com/global/en/products/elec-city-fuel-cell-fcev>.
6. Hydrogen Fuel Cell EV. *Nikola*. [Online] https://www.nikolamotor.com/wp-content/uploads/2023/04/FCE009_FCEV-US-Spec-Sheet-03.06.23.pdf.
7. Hydrogen by Peugeot. *Peugeot.com*. [Online]
<https://www.peugeot.com.mt/brand/hydrogen.html>.
8. Sileghem I., Bosteels D., May J., Favre C., Verhelst S. Analysis of vehicle emission measurements on the new WLTC, the NEDC and the CADC. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2014, Sv. 32, pp. 70-85.

Příloha 2 – Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel (manuál)

Představení software

Software “Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel” je koncipován jako fyzikální popis dynamického chování vodíkového vozidla při jízdě po zadané trase. Základem modelu je výpočet sil působících na vozidlo během jízdy (např. aerodynamický odpor, setrvačné síly, odporové síly, gravitační síla). Tyto síly obecně nezávisí na typu pohonu, ale výrazně ovlivňují spotřebu energie. Další část modelu tvoří matematický popis pohonu vozidla. Základem pohonu elektrického vodíkového vozidla je elektromotor, který může pracovat jak v motorovém, tak generátorovém režimu. Jako zdroj energie jsou uvažovány vodíkové palivové články a pro vyrovnání rozdílů mezi produkcí elektrické energie palivovými články a spotřebou vozidla je uvažována baterie. Kromě elektrických vodíkových vozidel umožňuje vytvořený software modelovat také vozidla poháněna motory spalujícími vodík nebo směsná paliva.

Software je koncipován jako součást většího logického celku, kterým je podpůrný software pro akceleraci zavádění vodíkové mobility. Celek bude umožňovat modelování provozu vodíkových vozidel v rámci ostrovního řešení a zásobování vodíkového ostrova vozidly pro přepravu vodíku. V současné verzi je software použitelný bez možnosti generování tras z mapových podkladů. Trasy je možné načítat pouze ze souborů. Propojení s mapovými podklady a návaznost na provoz vodíkového ostrova bude, podle plánu řešení, dopracováno v průběhu roku 2025.

Software přináší řadu nových a unikátních atributů a funkcí, které mohou být dále rozvíjeny. Základní filozofie je založena na fyzikálním modelu dynamického chování vozidla, které zohledňuje charakteristiky vozidla (hmotnost, vlastnosti pohonu, aerodynamický odpor, pasivní odpory a další). Hlavním účelem vytvořeného nástroje je poskytnout uživatelům realistický model vodíkového vozidla bez vysokých požadavků na vstupní data ze strany uživatele. Software je primárně určen pro simulaci provozu existujících vodíkových vozidel (pro která je k dispozici dostatek vstupních dat). Software je možné použít také pro testování vlivu různých parametrů (účinnosti palivového článku, velikost trakční baterie, aerodynamické charakteristiky vozidla) na energetickou náročnost provozu vodíkového vozidla.

Modelový přístup

Vytvořený model je fyzikálním popisem pohybu vozidla po zadané trase. Jako vstupní údaje modelu je třeba zadat popis trasy a popis vozidla.

Software se skládá ze částí:

- Grafické rozhraní vytvořené v MATLAB App Designer
- Výpočtový model vozidla pro přepravu vodíku
- Rozhraní webové aplikace přístupné přes MATLAB WebApp Server

Software je strukturován tak, aby umožnil efektivní výpočty a vizualizaci při simulaci provozu vodíkových vozidel v rámci dané trasy. Architektura a design softwaru vycházejí z několika klíčových principů zaměřených na modularitu, flexibilitu a uživatelskou přívětivost.

Model vozidla

Výpočtový model vodíkového vozidla je implementován ve formě MATLAB skriptu, který zahrnuje komplexní algoritmy pro výpočet spotřeby vodíku na základě vstupních parametrů, jako jsou hmotnost vozidla, maximální povolená rychlost, topografie trasy a další faktory ovlivňující spotřebu. Vstupním parametrem do modelu vozidla je struktura „Vehicle,“ která v sobě zahrnuje parametry vodíkového vozidla. Tyto parametry jsou rozčleněny do následujících kategorií.

Aerodynamika

Vehicle.Aero.Cx = .29; % [-] Koeficient aerodynamického odporu

Vehicle.Aero.S = 1.815*(1.535-0.13); % [m^2] Čelní plocha vozidla

Vehicle.Aero.T = 20; % [°] Teplota

Vehicle.Aero.p = 980; % [hPa] Tlak

Vehicle.Aero.phi = 45; % [%] Vlhkost

Vehicle.Aero.ro = 1.3; % [kg/m^2] Hustota vzduch

Konfigurace

Vehicle.Config.Vehicle = 0; % 0 samo, 1 s vlekem 2 s navesem 3 s navesem i vlekem

Vehicle.Config.NuAxle = 2; % front wheel drive?

Vehicle.Config.NuDriveAxle = 1;

Hmotnosti

Vehicle.Weight.m_whole = 1945; % [kg] Celková hmotnost vozidla

Vehicle.Weight.m_empty = 1850; % [kg] Hmotnost prázdného vozidla

Vehicle.Weight.m_load = 0; % [kg] Náklad

Vehicle.Weight.m_fuel = 5 + 90; % [kg] Palivo + řidič

Vehicle.Weight.g = 9.81; % [m/s^2] Gravitational Constant

Rozměry vozidla

Vehicle.Dimension.l = 2.92; % [m] Rozvor tažného vozidla

Vehicle.Dimension.a = 1.15; % [m] Horizontal Distance From Center of Gravity -> Front Wheel

Vehicle.Dimension.b=Vehicle.Dimension.l-Vehicle.Dimension.a; % [m] Horizontal Distance From Center of Gravity -> Rear Wheel

Vehicle.Dimension.hG = .5; % [m] Height of Center of Gravity

Pneumatiky

Vehicle.Tire.wheel_indication = '155/65R13'; % Wheel Indication (235/55R19 245/45R20)

Vehicle.Tire.R0 = 13*25.4/2 + .65*155; %[mm] % Wheel Radius

Vehicle.Tire.Re = .98*R0*10^-3; % [m] % Wheel Effective Radius

Vehicle.Tire.Jw = 1.6; % [kg.m^2] Wheels' Moment of Inertia

Odpory

alpha = atan(0:0.1:0.4); %[-] Angle of Inclination

Vehicle.Resistance.f0 = .013; %[-] Rolling Resistance Coefficient 1

Vehicle.Resistance.K = 6.51*10^-6; %[s^2/m^2] Rolling Resistance Coefficient 2

Model trasy

Trasa je získána z mapových podkladů a převedena na vstupní soubor pro výpočtový řešič. Model automobilu provádí výpočet po úsecích. Standardní úsek získaný z mapových podkladů tvoří trasa mezi křižovatkami. Model si úseky z mapy interně dělí na kratší úseky, aby bylo možné lépe postihnout dynamické chování vozidla. Z mapových podkladů jsou v současné verzi nástroje získávána následující data:

- Délka úseku [m]
- Maximální povolená rychlost na úseku [km/h]
- Kumulativní stoupání na úseku [m]
- Typ vozovky (kategorie)
 - ▪ 1 - dálnice I. třídy
 - ▪ 2 - silnice I. třídy
 - ▪ 3 - silnice II. třídy
 - ▪ 4 - silnice III. třídy
 - ▪ 5 - dálnice II. třídy
 - ▪ 6 - silnice pro motorová vozidla
 - ▪ 7 - ostatní komunikace
- Typ křižovatky na konci úseku
 - 1 = na úsek již nenavazuje další
 - 2 = nejedná se o křižovatku – pouze navazující úseky
 - 3 = křižovatka tří úseků

Na světelných křižovatkách, při odbočování doleva, při vjezdu na hlavní silnici apod., nejsou z mapy k dispozici údaje o aktuálním provozu. V důsledku dopravního značení, dopravní signalizace a dopravní situace může v takových případech dojít k zastavení vozidla a jeho následnému rozjezdu. To má vliv na spotřebu paliva a tím i provozních nákladů. Mezi jednotlivými úseky jsou proto v závislosti na typu křižovatky vygenerovány časové prodlevy (zastavení vozidla) založené statisticky na normálním rozdělení.

Implementace na MATLAB WebApp Serveru

Rozhraní webové aplikace bylo realizováno prostřednictvím MATLAB WebApp Serveru, což umožňuje snadnou distribuci a přístup k aplikaci přes běžný webový prohlížeč bez nutnosti instalace specializovaného softwaru na straně uživatele. Tento přístup výrazně usnadňuje správu aplikace, protože aktualizace a údržba jsou centralizovány a není nutný žádný zásah uživatele.

MATLAB WebApp Server je navržen tak, aby zajistil kompatibilitu aplikace s různými operačními systémy, platformami a zařízeními, což přináší uživatelům maximální flexibilitu. Bez ohledu na to, zda uživatel přistupuje k aplikaci z počítače, tabletu nebo telefonu, je zajištěna konzistentní uživatelská zkušenost. Kromě toho WebApp Server podporuje bezpečnostní protokoly, které chrání data a integritu aplikací při přenosu i během jejich provozu.

Grafické uživatelské rozhraní (GUI)

Grafické uživatelské rozhraní (GUI) je vytvořeno v prostředí MATLAB App Designer. Toto rozhraní poskytuje intuitivní a interaktivní platformu pro uživatele, kde mohou snadno zadávat potřebné

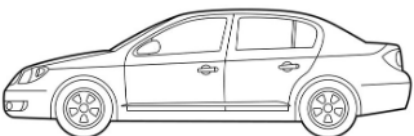
parametry, vybrat požadované vozidlo, vybrat trasu a vizualizovat výsledky. Při přepnutí typu vozidla dojde k výměně parametrů uvnitř struktury „Vehicle“ tak, aby odpovídaly zvolenému vozidlu. Výběrem vozidla v uživatelském rozhraní dochází k předání parametrů daného vozidla do výpočetního modelu. Analogicky při přepnutí trasy dojde k načtení příslušných parametrů tras.

Matematicko-digitální modely vodíkových vozidel

Vozidlo

Výběr vozidla

Osobní automobil
Autobus
Dodávka
Nákladní automobil



Mapa

Výběr trasy

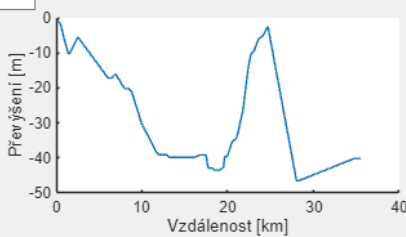
Šternberk - Prostějov
Rýmařov - Jeseník
Františkovy Lázně - Jablůnkov
WLTP cyklus
NEDC cyklus

Celková délka trasy [km] 35.54

Převýšení na trase -40.12

Kumulativní převýšení 238.8

Profil trasy Rychlostní limity



Výpočet simulace a výsledky

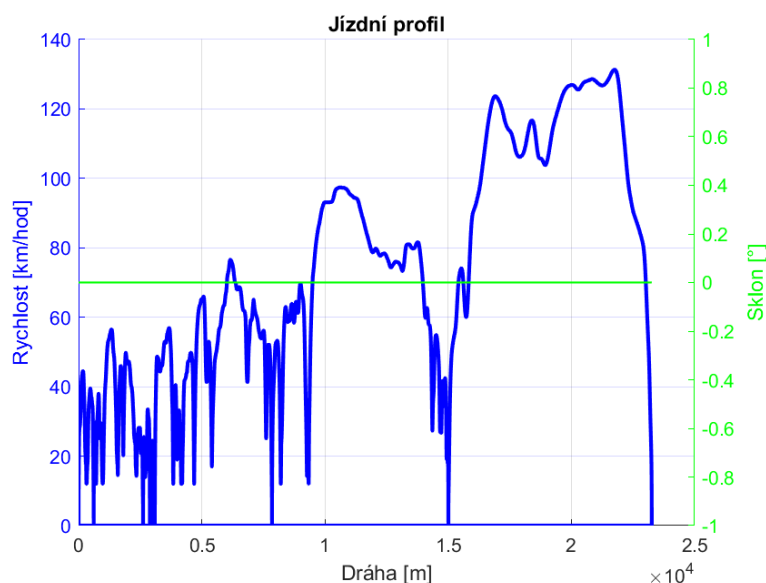
Proveď výpočet

Obrázek 13: Grafické uživatelské rozhraní

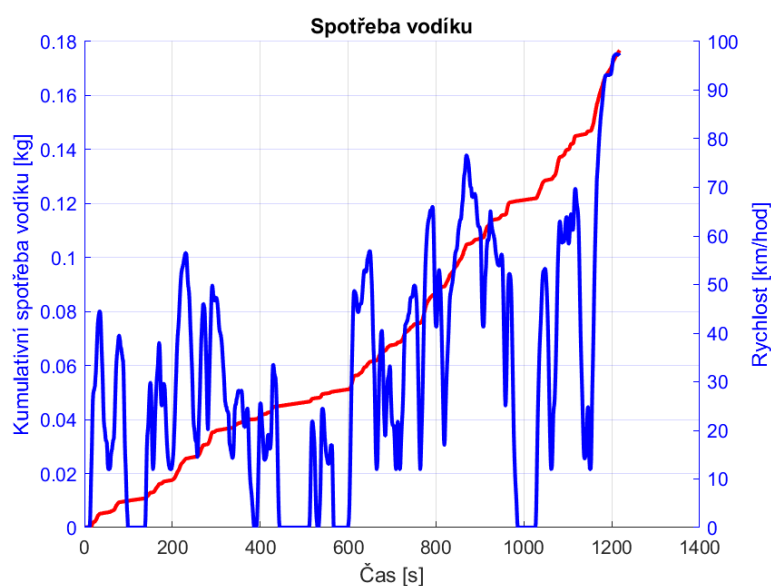
Obrázek 13 zobrazuje grafické uživatelské rozhraní výpočetního modelu pro matematicko-digitální modely vodíkových vozidel. V současné verzi softwaru má uživatel možnost vybírat z přednastavených vozidel a přednastavených tras (včetně standardních testovacích cyklů NEDC a WLTP). Grafické uživatelské rozhraní je rozděleno na tři části.

- **Vozidlo:** Slouží k výběru vodíkového vozidla. Volba je mezi osobním vozidlem, autobusem, lehkým nákladním vozidlem (dodávkou) a těžkým nákladním vozidlem. V zobrazeném případě (Obrázek 13) se jedná o osobní vodíkový automobil.
- **Mapa:** V oblasti „Výběr trasy“ uživatel vybírá jednu z dostupných tras. Po volbě trasy dochází k vytvoření vstupních parametrů trasy jako vstupu pro výpočetní model. Vstupní parametry byly vytvořeny s využitím mapy.
 - Celková délka trasy [km]: Zobrazená hodnota vzdálenosti pro danou trasu.
 - Převýšení na trase [m]: Hodnota celkového převýšení mezi startovním a koncovým bodem trasy.
 - Kumulativní převýšení [m]: Součet převýšení dosaženého během cesty ztráty nadmořské výšky nejsou v tomto parametru uvažovány.

- Profil trasy: Tlačítko pro zobrazení detailního výškového profilu v průběhu cesty na dané trase.
- Rychlostní limity: Tlačítko pro zobrazení profilu rychlostního limitu v průběhu cesty na dané trase.
- **Výpočet simulace a výsledky** Po kliknutí na „Proveď výpočet“ dojde k zobrazení některých vstupních dat ve formě grafů. Jedním z generovaných grafů vstupních parametrů je rychlostní profil trasy (Obrázek 14). Následně dojde k provedení simulace (výpočtu) pro zvolené vozidlo a vybranou trasu a jsou zobrazeny výsledkové grafy. Výsledky zahrnují jak průběh okamžitých spotřeb energie, tak kumulativní spotřebu vodíku na trase (Obrázek 15).



Obrázek 14: Profil trasy (WLTP cyklus)



Obrázek 15: Kumulativní spotřeba vodíku (osobní vozidlo)