

# Spotřeba bateriových elektrických vozidel

Software pro analýzu spotřeby energie bateriových elektrických vozidel (BEV).

SW verze 1.0

Popis ze dne 20.12.2013.



Technologická agentura  
České republiky



Centra  
kompetence

Centrum kompetence  
automobilového průmyslu  
Josefa Božka



## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Základní popis software.....	2
2.1 Spuštění programu.....	2
2.2 Grafické uživatelské rozhraní (GUI).....	2
2.3 Jazyk.....	3
2.4 Náповěda.....	3
2.5 Práce s programem.....	3
2.6 Licence.....	3
3 Podrobný popis modelu.....	3
3.1 Vstupy.....	3
3.2 Stavь.....	4
3.3 Parametry.....	4
3.3.1 Parametry kinematiky.....	4
3.3.2 Parametry dynamiky.....	4
3.3.3 Parametry pohonu vozidla.....	4
3.3.4 Parametry baterie (B) resp. Článku (A).....	5
3.3.5 Parametry cenové.....	5
3.4 Charakteristikь.....	5
3.5 Výsledky (výstupy).....	6
3.6 Výpočetní moduly.....	7
3.6.1 Vstupní podrobný kinematický modul.....	7
3.6.2 Výpočetní model pro jeden krok výpočtu.....	7
3.6.3 Modul základní kinematiky.....	7
3.6.4 Modul dynamiky.....	7
3.6.5 Modul pohonu.....	8
3.6.6 Modul trakční baterie.....	8
3.6.7 Modul trakčního akumulátoru.....	8
4 Experimentální ověření modelu.....	8

# 1 Úvod

V tomto dokumentu je popsán software pro analýzu spotřeby energie bateriových elektrických vozidel (BEV), který je výsledkem označeným jako TE01020020V017 WP19V001 v rámci projektu výzkumu a vývoje TE01020020 "Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka". Tento modulární simulační software na základě modelu vozidla a stavu okolí přiřadí danému provoznímu režimu vozidla v každém časovém kroku výkon potřebný k pohybu vozidla požadovanou rychlostí. Dalším výpočtem pak software určí také nároky na zásobník energie, zpravidla trakční baterii. Softwarový modul modelu baterie obsahuje podrobné výpočty stavových veličin jednotlivých trakčních akumulátorů (aktuální stav nabití, napětí, vnitřní odpor, teploty, aj.), přičemž se vychází z autorských měření provedených zejména na akumulátorech technologie LiFePO<sub>4</sub>. Při zadaných cenových parametrech propočítá model cenu následného dobíjení trakční baterie, jakož i cenu opotřebení trakční baterie.

## 2 Základní popis software

### 2.1 Spuštění programu

Software je vytvořen ve vývojovém prostředí LabVIEW 2011 SP1 americké společnosti National Instruments, Inc. Software je distribuován jako samostatně spustitelný (s příponou .exe). Pro jeho spuštění je buď nutné mít na počítači instalován SW LabVIEW, nebo postačí instalovat LabVIEW Run-Time Engine 2011 SP1, který je volně ke stažení na webových stránkách společnosti National Instruments. Např. pro Windows 32b je příslušný Run-Time Engine možné stáhnout na adrese <http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/2897/>.

Vlastní spuštění programu proběhne otevřením souboru SpotrebaBEV.exe.

### 2.2 Grafické uživatelské rozhraní (GUI)

Na následujících obrázcích je ukázána podoba grafického uživatelského rozhraní.

**Model of consumption of BEV - battery electric vehicles (model spotřeby BEV - bateriových elektrických vozidel)**

### Input values (vstupní hodnoty)

Text file delimiter, if used (oddělovač textového souboru, je-li použit)

**Travel definition (zadání trasy)**  
Distance depending on own defined travel (vlastní)

**Vehicle definition (zadání vozidla)**  
Citroen Saxo electric with 42x60 Ah LiFeVPO4 (s)

**Parameters of kinematics (parametry kinematiky)**  
am [m/s<sup>2</sup>]  
1.2

**Context Help**  
am [m/s<sup>2</sup>]  
Par\_V\_am [m/s<sup>2</sup>]  
Parameter\_Vehicle\_am  
maximum acceleration of the vehicle  
maximální zrychlení vozidla

**Initial conditions (počáteční podmínky)**

**Battery (baterie):**  
B\_SOC [%]  
90  
B\_SOH [%]  
100  
A\_thin [°C]  
23  
A\_thamb [°C]  
23

**Vehicle (vozidlo):**  
Alt\_0 [m.n.m.]  
200

**Parameters of dynamics (parametry dynamiky)**

**Vehicle (vozidlo):**  
mc [kg]  
1150  
mp [kg]  
80  
fr [-]  
0.01  
rm [-]  
1.05

**Environment (prostředí):**  
rA [kg/m<sup>3</sup>]  
1.25  
g [m/s<sup>2</sup>]  
9.81

**Prices (ceny):**  
C\_Cell [CZK]  
2500  
C\_Ene [CZK/kWh]  
4

**Parameters of powertrain (parametry pohonu vozidla)**

eC [-]  
0.88  
eT [-]  
0.98  
eB [-]  
0.95  
P0 [W]  
600

**Characteristics input (zadání charakteristik)**  
eM Default (výchozí)  
SV Default (výchozí)  
Rt Default (výchozí)  
RS Default (výchozí)

**Parameters of traction battery (parametry trakční baterie)**

A\_Cn [Ah]  
160  
A\_Umax [V]  
3.65  
A\_Umin [V]  
2.8  
A\_Idmax [x.C]  
1  
A\_Ichmax [x.C]  
1  
B\_NC [1]  
42  
B\_SOHnew [%]  
110  
B\_SOHhold [%]  
80

### Computation (výpočet)

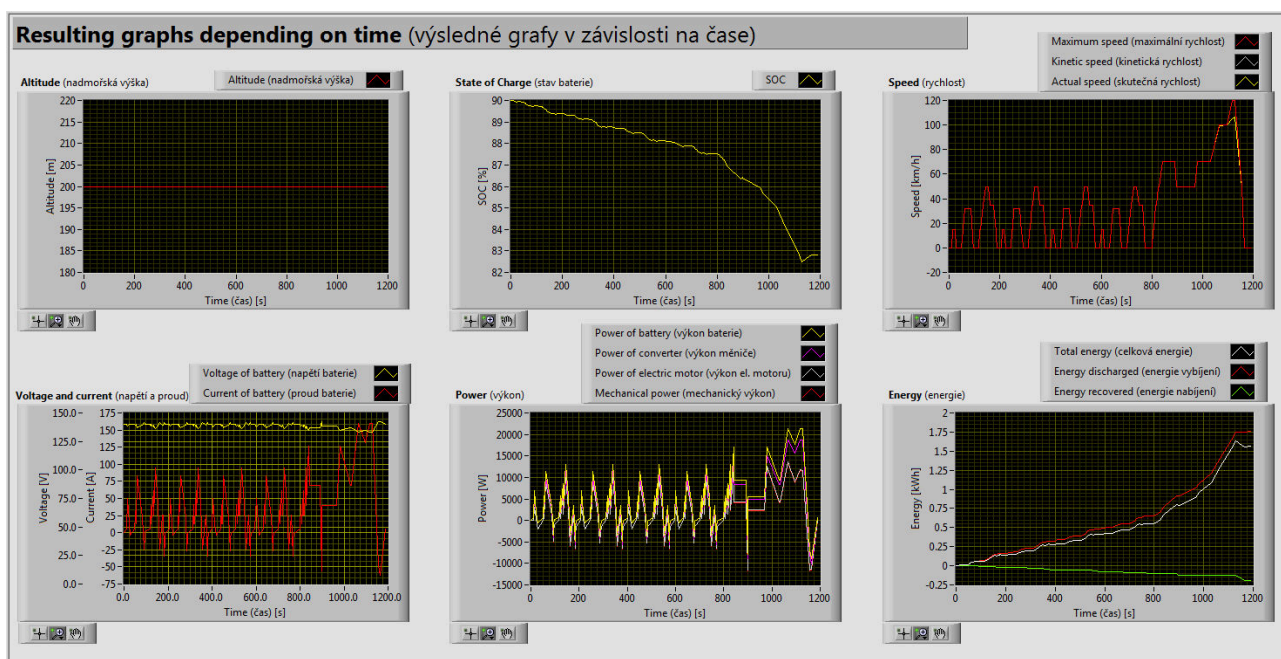
**Run (vypočítej)** **Progress (průběh výpočtu)** **Computation time [s] (čas výpočtu [s])**  
2.72656

**Main results (hlavní výsledky)**

Total route distance (celková vzdálenost trasy)	9.000 km
Total route ascent (celkové převýšení trasy nahoru)	2.000 m
Total route descent (celkové převýšení trasy dolů)	-103.000 m
Total travel time (celkový čas jízdy)	0 h 14 m 43.1 s
Energy discharged from battery (vybitá energie baterie)	0.862 kWh
Recovered energy to battery (rekuperovaná energie baterie)	0.213 kWh
Total energy of battery (celková energie baterie)	0.649 kWh
Price of charge + utilization of battery = total price (cena nabití + opotřebení baterie = celková cena)	2.73 + 0.81 = 3.54 CZK

**Travel feasible (jízda splnitelná)**

Obr. 1: Ukázka zadání vstupních parametrů.



Obr. 2: Ukázka výsledků při simulaci jízdy vozidla za podmínek cyklu NEDC.

## 2.3 Jazyk

Software je koncipován jako dvojjazyčný. Veškeré údaje jsou uvedeny nejprve anglicky a následně v závorce česky.

## 2.4 Nápopěda

Pro správnou práci s programem je vhodné prostudovat tento dokument. Při vlastní práci s programem se doporučuje mít otevřenou kontextovou nápovědu. Kontextová nápověda se otevře klávesovou zkratkou Ctrl+H nebo z lišty (Help-Show Context Help). Kontextová nápověda je ukázána také na obrázku 1.

## 2.5 Práce s programem

Nejprve je třeba v levé části zvolit zadání trasy a vozidla, kdy je možné vybrat přednastavené hodnoty nebo použít vlastní zadané údaje. Dále je třeba přezkontrolovat, případně upravit veškeré parametry, počáteční podmínky a ceny. Poté je možné spustit výpočet tlačítkem "vypočítej". Pokud výpočet trvá delší dobu, je průběh výpočtu znázorněn na ukazateli. Hlavní výsledky tvoří tabulka

v pravé části GUI a indikátor splnitelnosti zadané jízdy se zadaným vozidlem. Další část výsledků je uvedena níže v grafech v závislosti na čase a ještě níže v grafech v závislosti na vzdálenosti. Každý graf je možné přibližovat a oddalovat pomocí ikon pod příslušným grafem, jako výchozí je aktivní přibližování grafu ve výřezu definovaném myší. Další možností je grafy přibližovat pouze horizontálně, pouze vertikálně, nebo grafy oddalovat. Volba Edit-Reinitialize Values to Default vrací veškeré hodnoty k původně nastaveným hodnotám.

## 2.6 Licence

Pro použití programu není nutné nabytí licence. Program nelze upravovat. Pro další informace kontaktujte autora (sadir@fd.cvut.cz).

## 3 Podrobný popis modelu

V této kapitole jsou podrobně popsány vstupy, stavy, parametry, výstupy, charakteristiky a výpočetní moduly použité v softwarovém modelu spotřeby BEV.

### 3.1 Vstupy

Vstupem modelu mohou být přednastavené průběhy standardních jízdních cyklů (NEDC, FTP-75). Pro pokročilé uživatele může být vstupem modelu spotřeby BEV také vlastní textový soubor, který obsahuje desetinná čísla oddělená oddělovačem v níže definovaném významu. Jsou dvě možnosti podoby vstupního souboru:

- První možností vstupu je **předpokládaný profil jízdy** (nezávislou proměnnou je vzdálenost), což odpovídá jízdě z výchozího do cílového místa po určité trase s danými parametry jednotlivých úseků trasy. Úseky trasy nemusejí být stejně dlouhé. V případě zadání vstupního profilu jízdy mají sloupce textového souboru následující význam:
  - 1. sloupec: ujetá vzdálenost, kilometrů [m],
  - 2. sloupec: maximální rychlost v bodě [km/h],
  - 3. sloupec: doba zastávky v bodě [s],
  - 4. sloupec: sklon předcházejícího úseku [%].
- Druhou možností vstupu je **předpokládaný průběh jízdy** (nezávislou proměnnou je čas), což odpovídá např. zkušební jízdním cyklům nebo ověřování modelu měřením. V případě zadání vstupního průběhu jízdy mají sloupce textového souboru následující význam:
  - 1. sloupec: čas [s] (pozn.: doba zastávky je dána závislostí rychlosti na čase),
  - 2. sloupec: skutečná rychlost v bodě [km/h] (pozn.: tato skutečná rychlost může být dále omezena maximálním povoleným zrychlením resp. zpomalením),
  - 3. sloupec: sklon předcházejícího úseku [%].

### 3.2 Stav

U všech stavů je nutno zadat počáteční podmínky.

Označení	Jedn.	Název	Význam
B_SOC	%	Stav nabití baterie	Aktuální stav nabití baterie. Podíl kapacity baterie, kterou lze v aktuálním stavu během jednoho definovaného vybíjení ještě využít k zaručené kapacitě
B_SOH	%	Stav zdraví baterie	Aktuální stav zdraví baterie. Podíl kapacity baterie, kterou lze během jednoho definovaného vybíjení z plného nabití využít k zaručené kapacitě (původní neopotřeбенé baterie).

A_thin	°C	Teplota uvnitř akumulátoru (průměrná hodnota)	Průměrná hodnota teploty uvnitř akumulátoru
A_thamb	°C	Teplota okolí	Teplota okolního vzduchu (zůstává konstantní po celou dobu simulace)
Alt_0	m	Nadmořská výška	v metrech nad mořem

### 3.3 Parametry

#### 3.3.1 Parametry kinematiky

Označení	Jedn.	Název	Význam
am	m.s <sup>-2</sup>	Maximální zrychlení vozidla	respektuje pohodlí a styl jízdy
dm	m.s <sup>-2</sup>	Maximální zpomalení vozidla	respektuje pohodlí a styl jízdy

#### 3.3.2 Parametry dynamiky

Označení	Jedn.	Název	Význam
mc	kg	Pohotovostní hmotnost vozidla	Hmotnost vybaveného vozidla bez osob a nákladu
mp	kg	Hmotnost cestujících a nákladu	Hmotnost vezených osob a nákladu
fr	l	Koeficient odporu valení	Pozn.: záleží též na hrubosti povrchu komunikace)
Sc	m <sup>2</sup>	Čelní průřez vozidla	
cx	-	Součinitel odporu vzduchu	Součinitel aerodynamického odporu ve směru jízdy vozidla
rm	-	Koeficient setrvačnosti rotujících hmot	Zvýšení efektivní hmotnosti pro výpočet kinetické energie
rA	kg.m <sup>-3</sup>	Hustota okolního vzduchu	
g	m.s <sup>-2</sup>	Gravitační zrychlení	

#### 3.3.3 Parametry pohonu vozidla

Označení	Jedn.	Název	Význam
eT	-	Účinnost převodovky	
eC	-	Účinnost trakčního měniče	
eB	-	účinnost trakční baterie	Poměr elektrické energie odebrané z baterie při vybíjení k elektrické energii dodané do baterie při předchozím nabíjení
P0	W	Základní výkon vozidla	Základní výkon zapnutého vozidla bez uvažování trakce.

#### 3.3.4 Parametry baterie (B) resp. akumulátorů (A)

Označení	Jedn.	Název	Význam
A_Cn	Ah	Zaručená kapacita článku	(Jmenovitá) kapacita článku určená za stanovených podmínek a deklarovaná výrobcem
A_Umax	V	Konečné nabíjecí napětí	Napětí dosažené na konci nabíjecí fáze při stanoveném konstantním proudu (maximální napětí akumulátoru)

A_Umin	V	Konečné (vybíjecí) napětí	Stanovené napětí článku při kterém se ukončuje vybíjení (minimální napětí akumulátoru)
A_Idmax	xC	Maximální vybíjecí proud	akumulátoru (článku)
A_Ichmax	xC	Maximální nabíjecí proud	akumulátoru (článku)
B_NoC	1	Počet článků	Počet sériově řazených článků v baterii
B_SOHnew	%	SOH nové baterie	Stav zdraví (SOH) nejslabšího článku nové trakční baterie
B_SOHold	%	SOH staré baterie	Předpokládaný stav zdraví (SOH) nejslabšího článku vyměňované trakční baterie

### 3.3.5 Parametry cenové

Označení	Jedn.	Název	Význam
C_Cell	CZK	Cena jednoho akumulátoru	Cena jednoho článku trakční baterie
C_Ene	CZK/kWh	Cena elektrické energie	Cena 1 kWh elektrické energie ze sítě

Pozn.: po zadání cen v jiné měně je možné výsledek použít pro tuto jinou měnu.

## 3.4 Charakteristiky

Následující charakteristiky jsou v programu zadány pro stejnosměrný komutátorový motor v bateriovém elektrickém vozidle Saxo électrique a pro akumulátory LiFeYPO<sub>4</sub>.

Pokročilí uživatelé mohou tyto charakteristiky změnit zadáním pomocí vstupních souborů. Hodnoty zadané pomocí libovolného počtu bodů charakteristik jsou interpolovány.

Označení	Jedn.	Název	Význam	Specifikace formátu souboru pro pokročilé uživatele (s použitím zadaného oddělovače)
eM	1	Účinnost trakčního motoru	Účinnostní mapa (2d závislost účinnosti na napětí [V] a proudu [A] stejnosměrného trakčního motoru)	Soubor s napětím: v 1. řádku obsahuje hodnoty napětí (1. nezávislá proměnná). Řádek se opakuje tolikrát, kolik je hodnot proudu. Soubor s proudem: v 1. sloupci obsahuje hodnoty proudu (2. nezávislá proměnná). Sloupec se opakuje tolikrát, kolik je hodnot napětí. Soubor s účinností: obsahuje hodnoty účinnosti trakčního motoru (závislá proměnná). Sloupec definuje napětí motoru, řádek definuje proud motoru.
SV	V	Závislost OCV (SOC)	Závislost napětí naprázdno OCV [V] na stavu nabití SOC [%]	1. řádek: hodnoty SOC od 0 do 100 2. řádek: odpovídající hodnoty OCV (napětí naprázdno)
Rt	1	Korekce Ri na teplotu	Součinitel, kterým se koriguje hodnota vnitřního odporu akumulátoru na danou teplotu.	1. řádek: hodnoty teploty akumulátoru 2. řádek: odpovídající hodnoty součinitele zvýšení vnitřního odporu
RS	1	Korekce Ri na SOC	Součinitel, kterým se koriguje hodnota vnitřního odporu akumulátoru na daný stav nabití.	1. řádek: hodnoty SOC akumulátoru 2. řádek: odpovídající hodnoty součinitele zvýšení vnitřního odporu

## 3.5 Výsledky (výstupy)

Výsledkem modelu spotřeby BEV je souhrnná tabulka hlavních výsledků (údaje jsou patrné z GUI,

viz obr. 2). Dalším výsledkem jsou grafy závislostí vybraných výstupních veličin na čase a na vzdálenosti (nezávisle na tom, zda vstupem modelu byl profil nebo průběh jízdy). Výstupní hodnoty modelu ukazuje následující tabulka:

Označení	Jedn.	Název	Význam
B_SOC	%	Stav (viz výše)	
vk	km.h <sup>-1</sup>	Kinetická rychlost	Rychlost vozidla, která respektuje maximální dovolené zrychlení a zpomalení.
v1	km.h <sup>-1</sup>	Skutečná rychlost	Splnitelná (z hlediska pohonu) rychlost vozidla na konci úseku jízdy.
UBat	V	Napětí baterie	Napětí baterie
IBat	A	Proud baterie	Proud baterie
PTBat	W	Výkon baterie	Výkon trakční baterie
PPC	W	Výkon měniče	Výkon trakčního měniče
PTMot	W	Výkon motoru	Výkon trakčního motoru
Pmech	W	Mechanický výkon	Potřebný mechanický výkon
Wcelk	Ws	Celková energie	Celková energie baterie (odebraná z baterie...>0, dodaná do baterie...<0)
Wdis	Ws	Energie vybíjení	Energie odebraná během vybíjení z baterie
Wch	Ws	Energie nabíjení	Energie dodaná během rekuperace do baterie
feas	Ano /Ne	Jízda splnitelná?	Pokud baterie není schopna dodat výkon potřebný pro požadovanou konečnou rychlost úseku, snižuje se rychlost a tím se prodlužuje jízdní doba. Pokud jízdu nelze splnit ani za podmínky delší jízdní doby, je nutné jízdu ukončit (indikátor ukáže "jízda nesplnitelná").

### 3.6 Výpočetní moduly

V této kapitole jsou popsány výpočetní moduly modelu spotřeby BEV.

Software obsahuje následující softwarové moduly:

- Vstupní podrobný kinematický modul
- Výpočetní model pro jeden krok výpočtu, jenž obsahuje
  - modul základní kinematiky,
  - modul dynamiky,
  - modul pohonu,
  - modul trakční baterie a
  - modul trakčního akumulátoru.

#### 3.6.1 Vstupní podrobný kinematický modul

Vstupní podrobný kinematický modul na základě vstupních dat definujících jízdu (viz kapitola 3.1

) provede základní kinematické výpočty (klid, pohyb rovnoměrný, pohyb rovnoměrně zrychlený resp. zpomalený, včetně přechodů mezi těmito pohyby).

### **3.6.2 Výpočetní model pro jeden krok výpočtu**

Vstupem výpočetního modelu pro jeden krok výpočtu jsou výstupní hodnoty vstupního podrobného kinematického modulu. Výpočetní model pro jeden krok výpočtu si volá níže uvedené výpočetní moduly základní kinematiky, dynamiky, pohonu, trakční baterie a trakčního akumulátoru za účelem výpočtu příslušných veličin. V případě, že některá z komponent vozidla není schopna zajistit požadované vlastnosti jízdy (např. při daném stoupání vede požadavek zvýšení rychlosti na příliš velký proud trakční baterie), snižuje se požadavek na cílovou rychlost tak, aby veškeré komponenty byly provozovány v daných mezích.

### **3.6.3 Modul základní kinematiky**

Modul základní kinematiky pouze kontroluje, zda v daném kroku výpočtu nedochází k překročení dané maximální hodnoty zrychlení. To by mohlo nastat v případě, že by předcházející krok byl při původním zadání nesplnitelný a došlo by ke snížení skutečné rychlosti na konci předcházejícího kroku, tj. k počáteční rychlosti aktuálního kroku výpočtu. V aktuálním kroku se model snaží vrátit k původním hodnotám požadovaných rychlostí, nikdy ale nelze překročit maximální povolenou hodnotu zrychlení.

### **3.6.4 Modul dynamiky**

Vstupem modulu dynamiky jsou výstupy výše uvedených modulů. Modul dynamiky určuje na základě fyzikálních vztahů hodnoty jednotlivých sil působících na vozidlo, dále celkovou mechanickou energii a celkový potřebný mechanický výkon.

### **3.6.5 Modul pohonu**

Vstupem modulu pohonu jsou výstupy výše uvedených modulů. Modul pohonu uvažuje účinnost jednotlivých komponent pohonu. V případě jednodušších komponent, jako např. převodového ústrojí je účinnost uvažována konstantní, v případě složitějších komponent, např. trakčního elektrického motoru, je uvažována účinnostní mapa v závislosti na napětí a proudu trakčního motoru ve vybraných bodech, mezi nimiž se provádí 2d linearizace. Výstupem modulu pohonu je výkonový požadavek na trakční baterii v daném kroku výpočtu.

### **3.6.6 Modul trakční baterie**

Vstupem modulu trakční baterie jsou výstupy výše uvedených modulů. Modul baterie rozdělí požadovaný výkon mezi jednotlivé články (trakční akumulátory) trakční baterie.

### **3.6.7 Modul trakčního akumulátoru**

Vstupem modulu trakčního akumulátoru jsou výstupy výše uvedených modulů. Na základě výstupní hodnoty stavu nabití minulého kroku se určí napětí naprázdno na základě charakteristiky OCV (SOC) dané pro danou technologii akumulátoru. Podle aktuálních hodnot teplot a stavu nabití se dále určí vnitřní odpor akumulátoru na základě empirických vztahů zjištěných měření. Dále je na základě požadovaného výkonu, aktuálních hodnot napětí naprázdno a vnitřního odporu určen potřebný proud akumulátoru. Přitom se sleduje, zda nejsou překročeny napěťové meze dané technologií akumulátoru a zda proud akumulátoru není příliš velký s ohledem na životnost. V případě příliš velkého proudu se snižuje požadavek na cílovou rychlost a výpočet se provádí znovu od modulu základní kinematiky. Pro maximální možný dovolený proud se dále určí energie a náboj odebrané z akumulátoru resp. dodané do akumulátoru. Dále je modulem opotřeben



akumulátoru určen úbytek stavu zdraví (SOH) odpovídající jednomu kroku výpočtu. Úbytek SOH vychází z empirických vztahů na základě provedených měření. Dále se aktualizují hodnoty napětí naprázdno a vnitřního odporu na konci výpočetního kroku a nakonec se zavolá tepelný modul akumulátoru, který na základě protékajícího proudu, vnitřního odporu a okolní teploty určí tepelnou bilanci akumulátoru, vypočte generované teplo, teplo sdílené vedením a prouděním a konečné hodnoty teplot uvnitř a na pouzdře akumulátoru.

## 4 Experimentální ověření modelu

Řešitelský tým ČVUT FD má k dispozici bateriové elektrické vozidlo Citroën Saxo Electrique, které bylo rebaterizováno trakční baterií složenou ze 42 sériově zapojených článků 3,2 V, 160 Ah čínského výrobce Winston Battery, technologie LiFeYPO<sub>4</sub>. Na tomto vozidle byl instalován automatizovaný monitorovací systém pro záznam důležitých provozních veličin. Monitorovací systém využívá vestavěné jakož i dodatečně zabudované senzory a po předzpracování dat ukládá hodnoty každou vteřinu do datových textových souborů. Mezi zaznamenávanými veličinami jsou mimo jiné následující měřené hodnoty:

- datum, čas,
- meteorologické údaje (teplota, tlak, vlhkost),
- údaje z přijímače GPS (čas, poloha, nadmořská výška aj.),
- rychlost a vzdálenost odometru,
- napětí a proud trakční baterie a
- dopočtené hodnoty výkonu trakční baterie a energie (při vybíjení, rekuperaci a dobíjení).

Model byl kalibrován pomocí měření provedených na tomto vozidle a dosahuje přesnosti větší než 90 %.