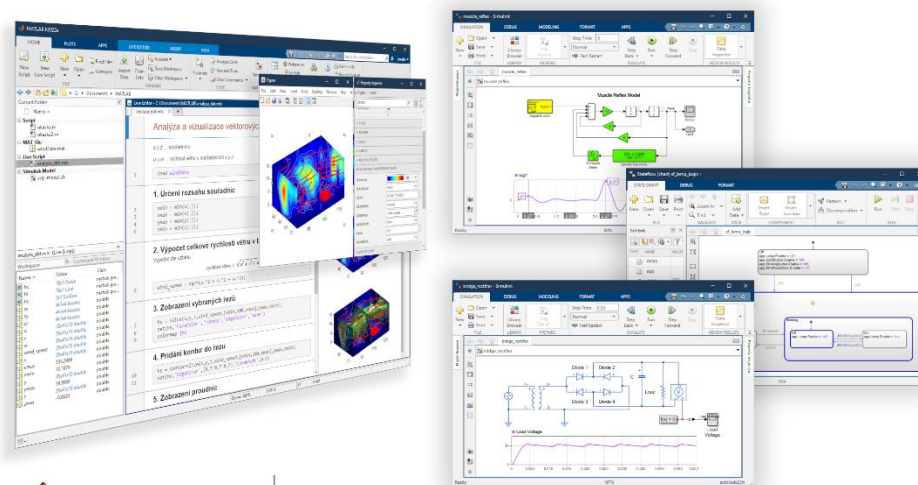


Modelování a simulace bateriových systémů a vývoj BMS



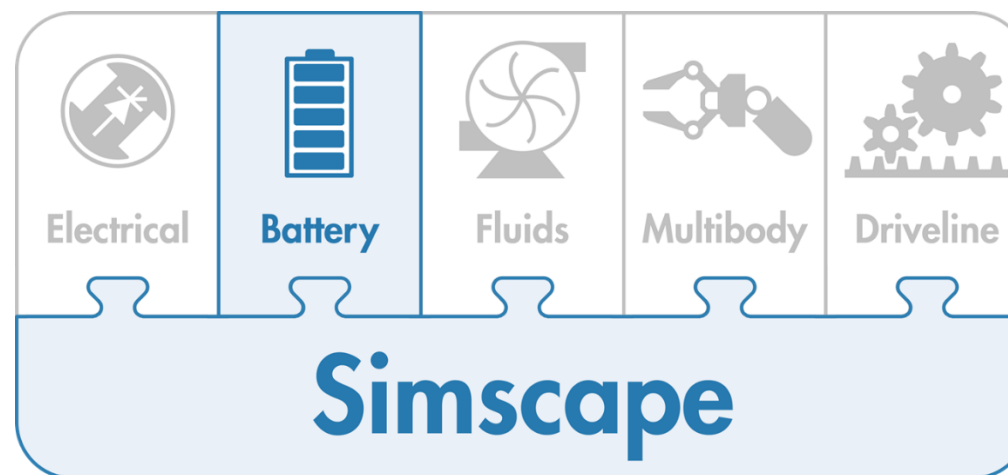
Anna Tocháčková
annat@humusoft.cz

www.humusoft.cz

info@humusoft.cz

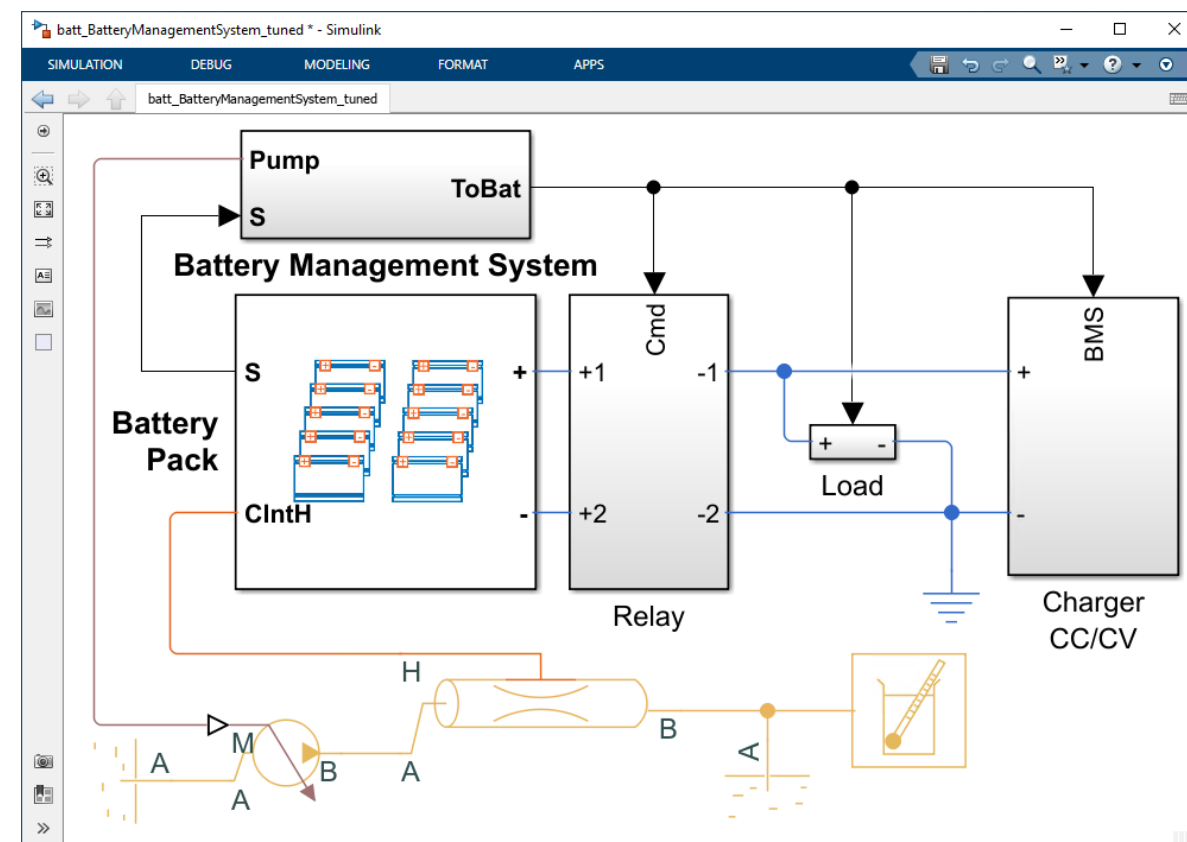
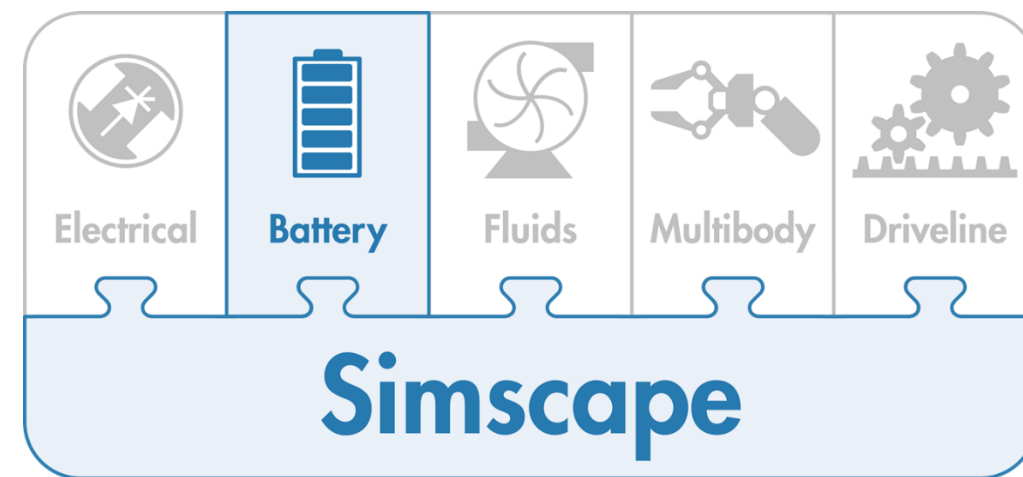
www.mathworks.com

Simscape Battery



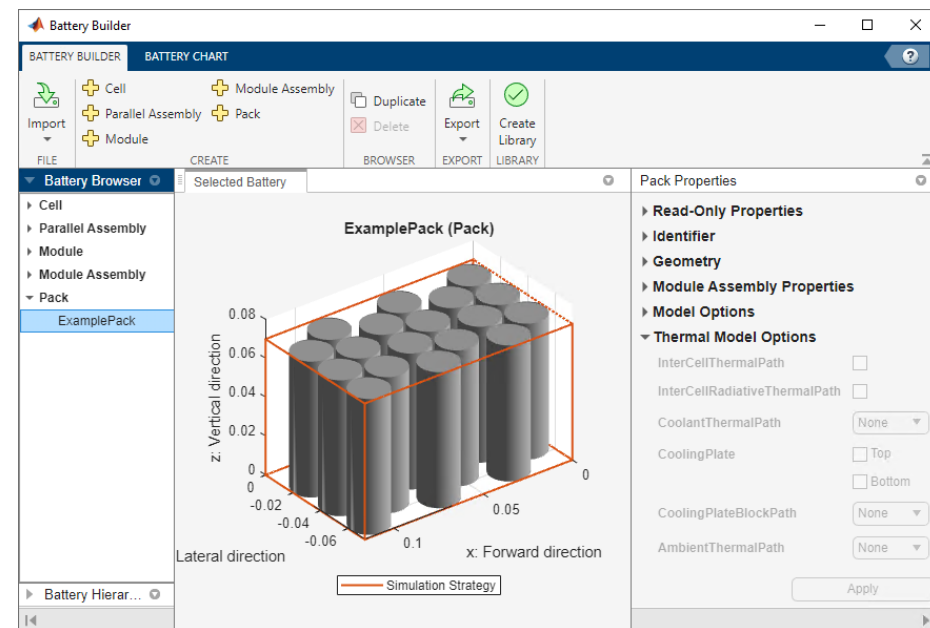
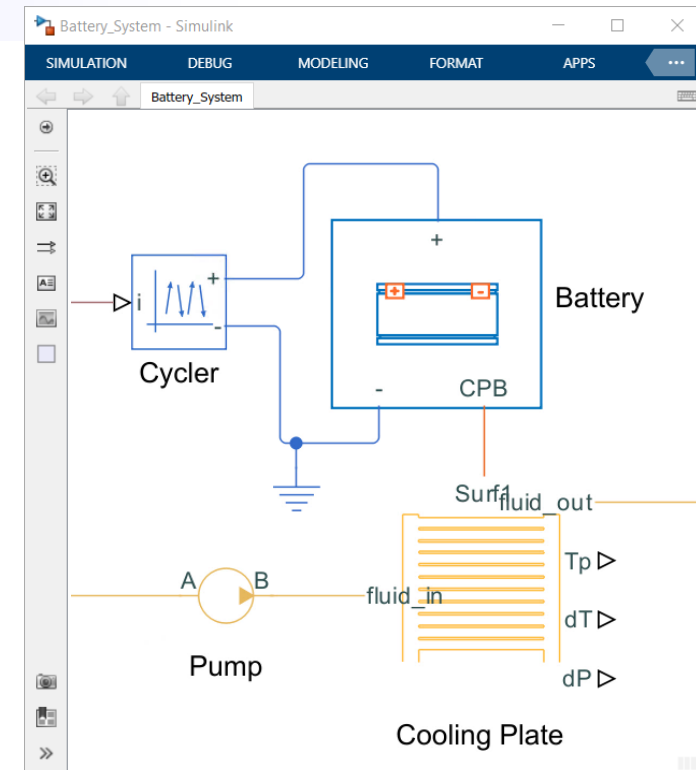
Simscape Battery

- Návrh a simulace systémů baterií a skladování energie
 - Elektrotermické chování bateriových článků
 - Battery pack design
 - Systémy pro správu baterií (BMS)
- Simscape Battery umožňuje
 - Vyhodnocovat architekturu bateriových sad z hlediska elektrických a tepelných požadavků
 - Ověřovat robustnost algoritmů vybíjení, nabíjení a tepelného managementu
 - Ověřovat algoritmy pomocí HIL testování



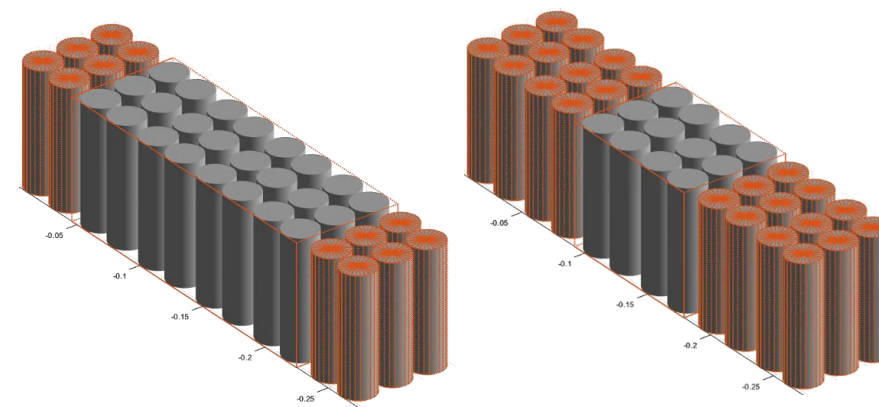
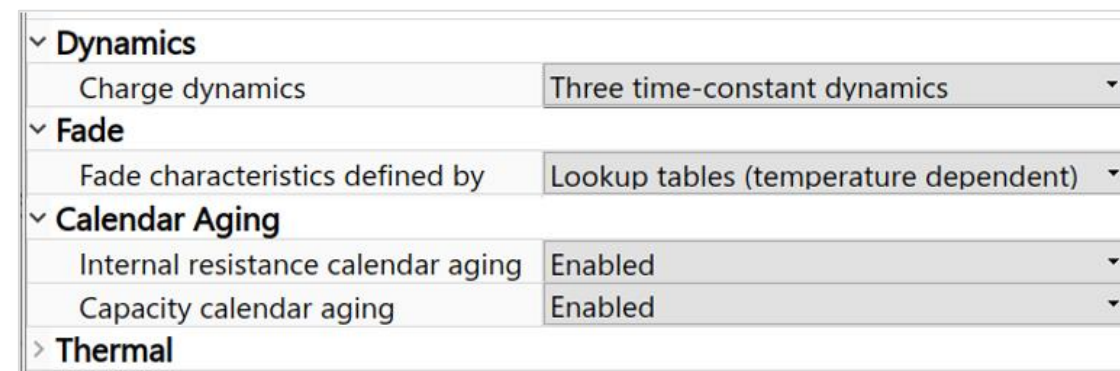
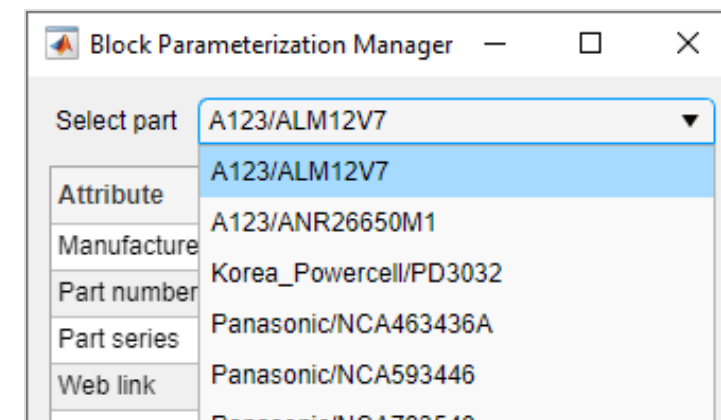
Simscape Battery

- Battery Pack Builder (MATLAB API, App)
 - Automatické poskládání modelů článků do bateriové sestavy
 - Definice elektrických a tepelných propojení (sériové, paralelní)
 - Nastavení kompromisu mezi rychlostí simulace a úrovní detailu
- Modelování chlazení
 - boční chlazení, paralelní vedení, vedení do U
- Algoritmy pro Battery Management
 - nabíjení/vybíjení, SOC, SOH, vyvážení článků, tepelný management, ochrana
- Umožňuje generovat kód v jazyce C

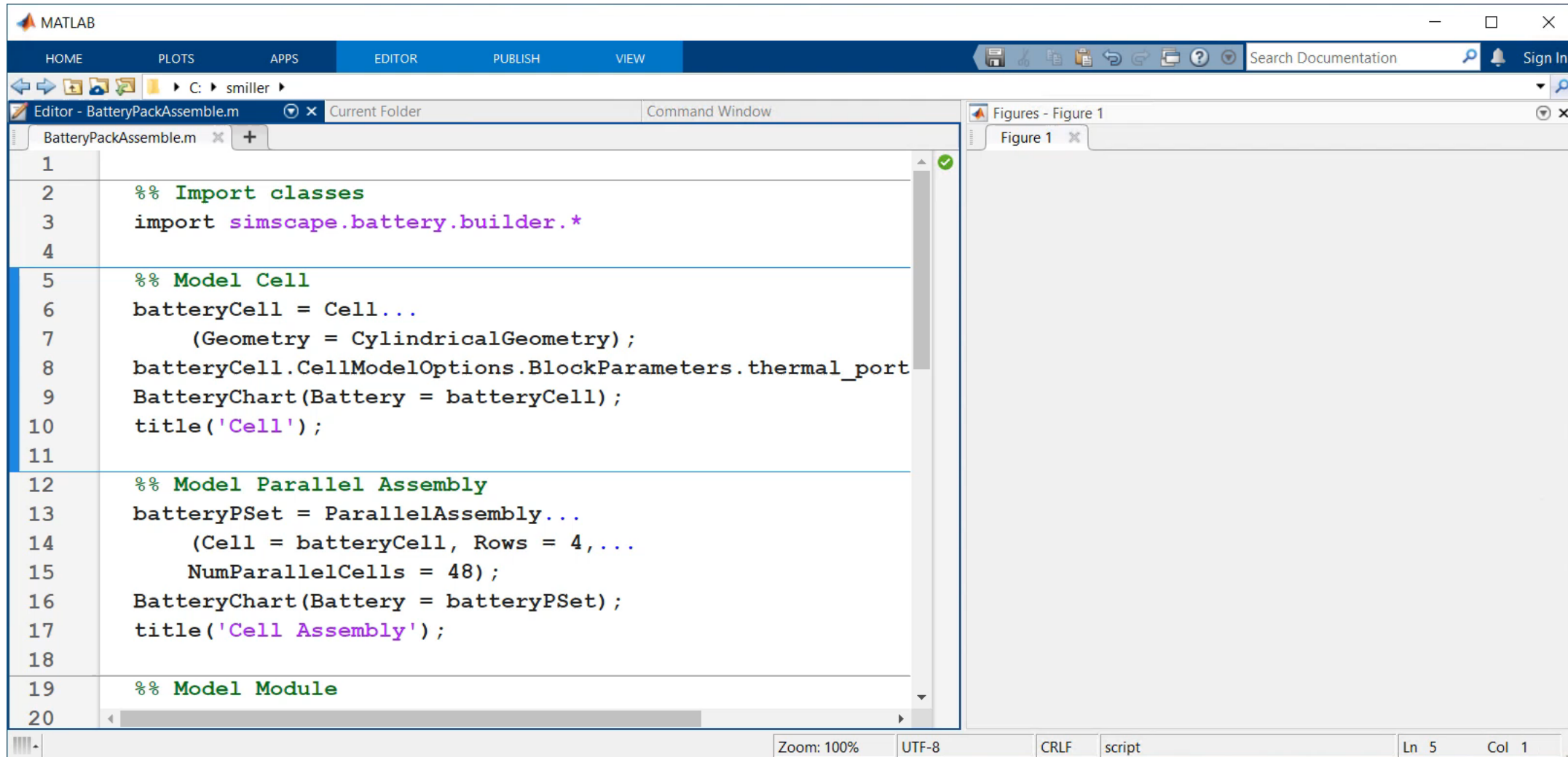


Simscape Battery – Modeling API

- Automatické sestavení bateriových sad (pack)
 - Volba elektrotermických vlastností článku z databáze
 - Geometrie článků (cylindrical, pouch...) a jejich spojování
- Efekty, které upravují chování článku
 - Samovybíjení, dynamika nabíjení
 - Pokles kapacity, stárnutí
- Nastavení kompromisu mezi rychlostí simulace a úrovní detailu
 - Snížení výpočetní náročnosti výběrem skupin článků tak, aby měly stejné tepelné a elektrické vlastnosti



Simscape Battery – Pack Builder API



The image shows the MATLAB Editor interface. The main window displays the script `BatteryPackAssemble.m` with the following code:

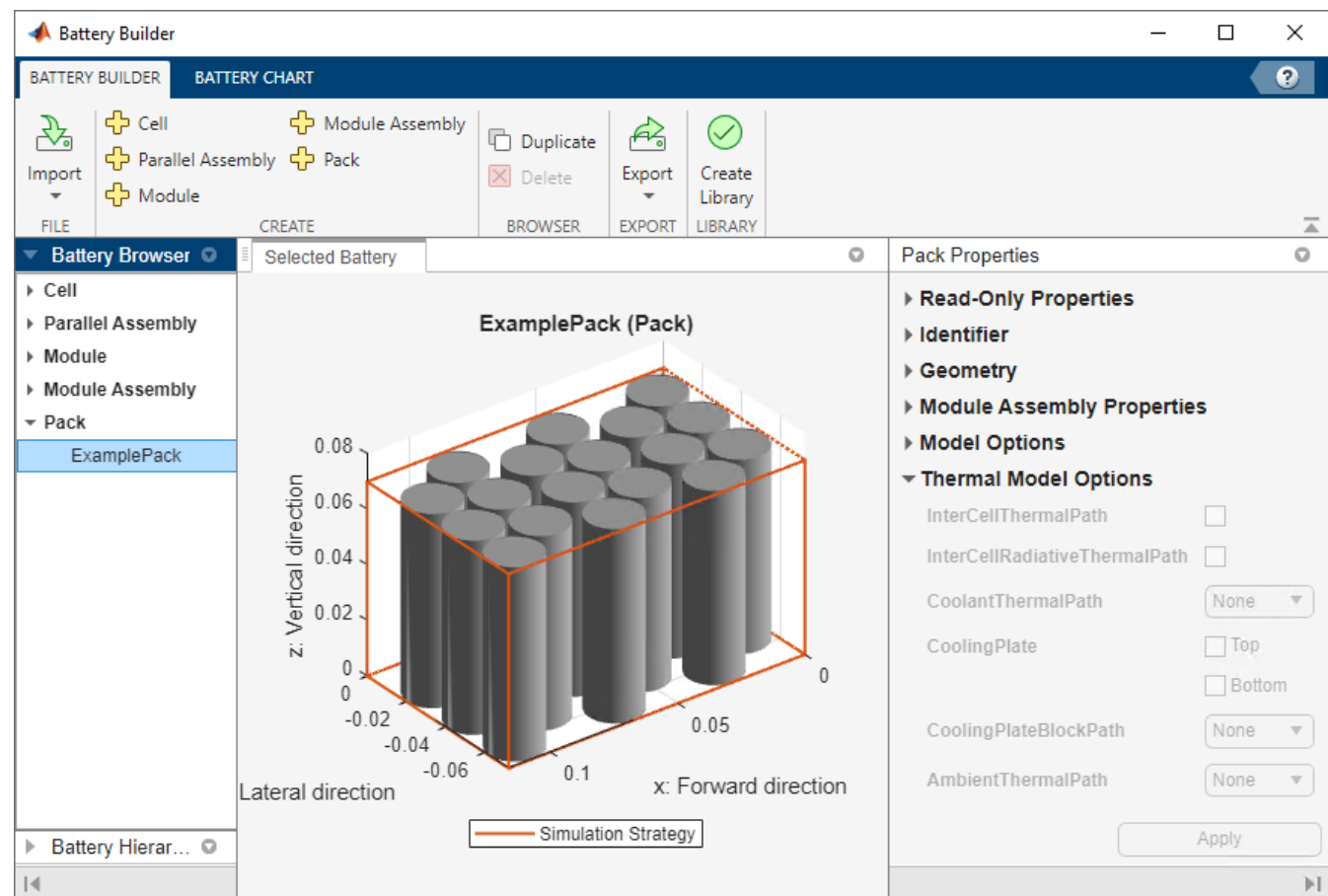
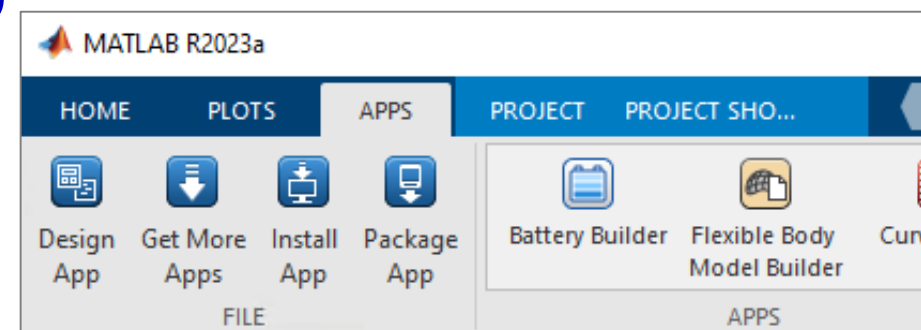
```
1  
2 %% Import classes  
3 import simscape.battery.builder.*  
4  
5 %% Model Cell  
6 batteryCell = Cell...  
7     (Geometry = CylindricalGeometry);  
8 batteryCell.CellModelOptions.BlockParameters.thermal_port  
9 BatteryChart(Battery = batteryCell);  
10 title('Cell');  
11  
12 %% Model Parallel Assembly  
13 batteryPSet = ParallelAssembly...  
14     (Cell = batteryCell, Rows = 4,...  
15     NumParallelCells = 48);  
16 BatteryChart(Battery = batteryPSet);  
17 title('Cell Assembly');  
18  
19 %% Model Module  
20
```

The script is divided into three sections: `%% Import classes`, `%% Model Cell`, and `%% Model Parallel Assembly`. The `%% Model Cell` section creates a `Cell` model and displays it in a `BatteryChart`. The `%% Model Parallel Assembly` section creates a `ParallelAssembly` model and displays it in a `BatteryChart`. The `%% Model Module` section is currently empty.

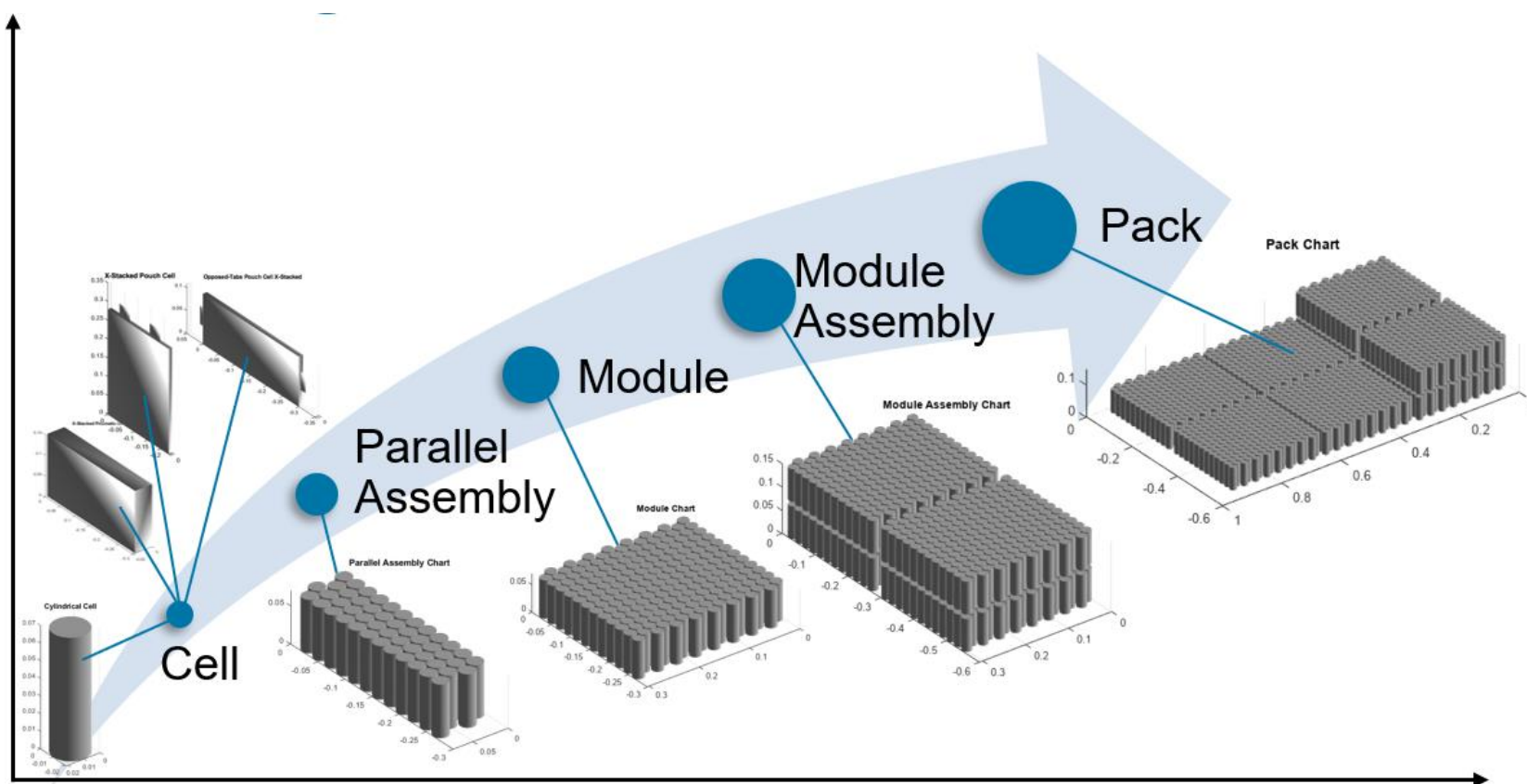
The right side of the interface shows a `Figures - Figure 1` window with a blank plot area. The status bar at the bottom indicates the zoom level is 100%, the encoding is UTF-8, the line ending is CRLF, the file type is script, and the cursor is at line 5, column 1.

Simscape Battery – Battery Builder App

- Sestavte modely baterií pomocí interaktivní aplikace
 - Vytvářejte nové objekty baterií pro modelování článků, modulů a sad
 - Importujte stávající objekty baterie z workspace nebo souboru .mat
 - Vytvořte 3D graf objektu baterie a exportujte jej do MATLAB figure
 - Upravte vlastnosti objektu baterie – geometrická data a teplotní okrajové podmínky
 - Vytvořte z objektu knihovnu pro Simscape

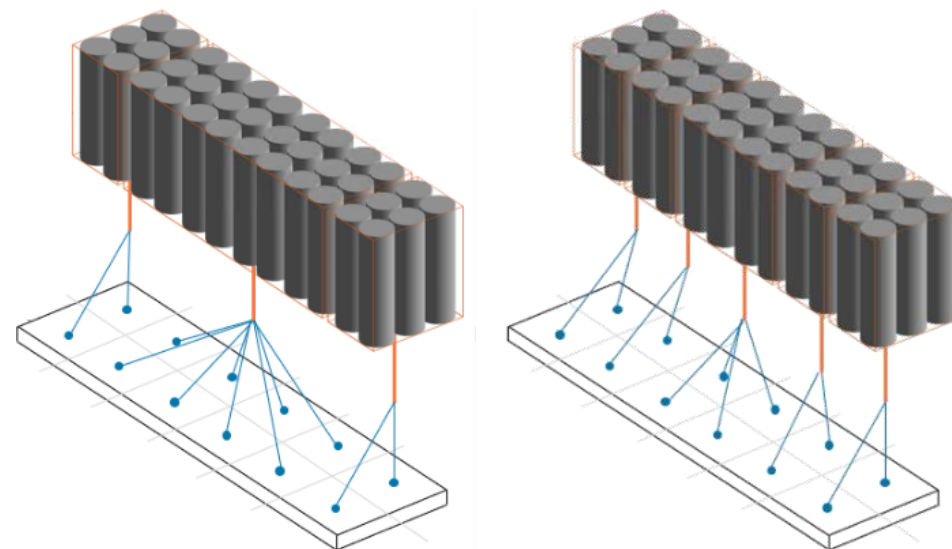
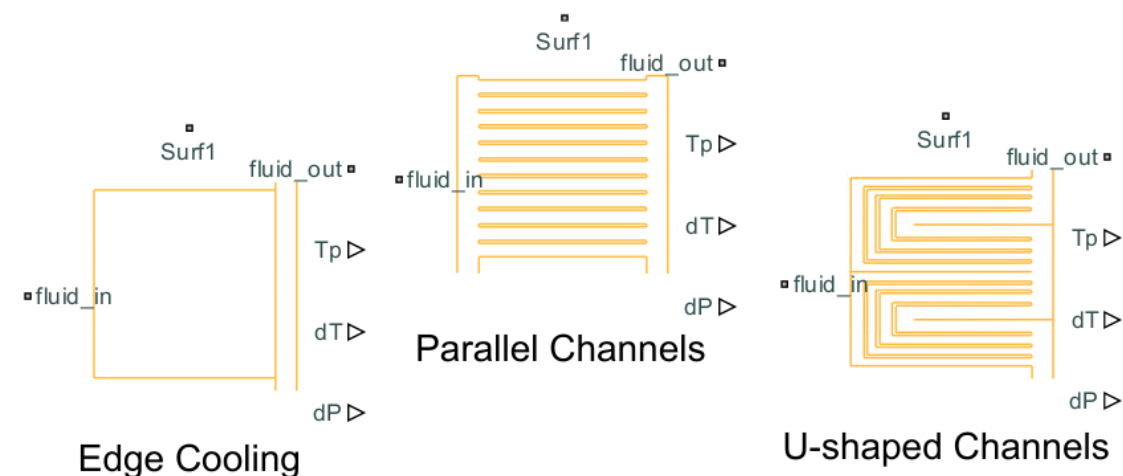


Battery Builder App – hierarchie objektů



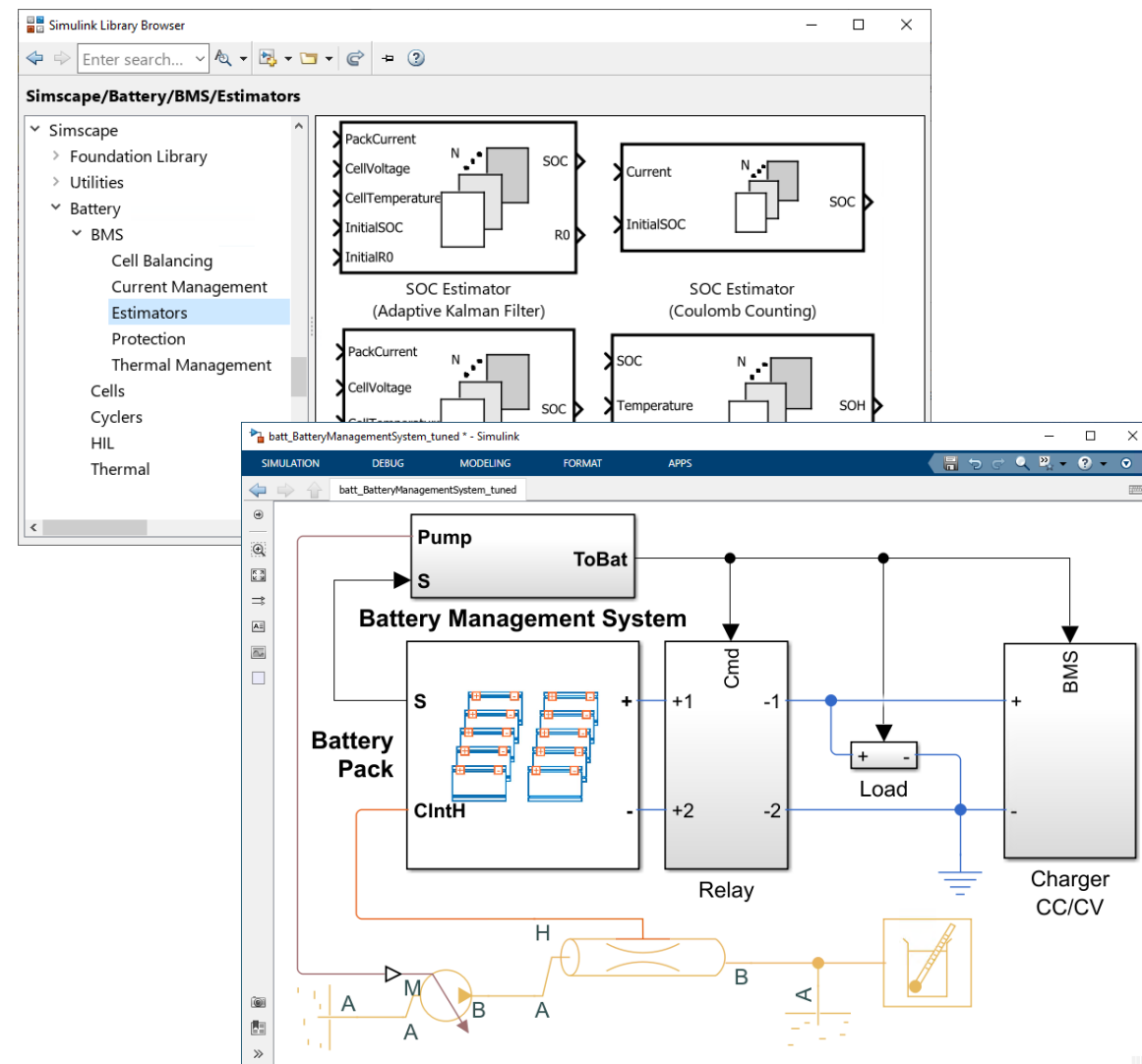
Simscape Battery – Chlazení

- Model přenosu tepla mezi baterií, kapalinovým chlazením a prostředím
 - Ovládejte kolísání teploty mezi buňkami
 - Kompromis nákladů na čerpání a účinnosti chlazení
- Různé topologie chladicích desek
 - Hrana, paralelní kanál, kanál ve tvaru U
- Úprava rozlišení tepelného modelu
 - Definujte množství a umístění uzlů



Simscape Battery - Battery Management Algoritmy

- Nabíjení a vybíjení
 - CC-CV, maximální nabíjecí proud
 - Algoritmy pro odhad SOC, SOH, SOE
- Ochrana
 - Sledování proudu, napětí a teploty
 - Fault qualification
- Tepelný management
- Umožňuje generovat kód v jazyce C



Simscape Battery Modely článků

Modely bateriových článků v Simscape Battery



R2022b



R2023b



R2024a



R2024b

	Battery (Table-Based)	Battery Eq. Circuit	Battery Single Particle	Fuel Cell Eq. Circuit
RC parametry	Závislost SOC/T	Závislost SOC/T	Ne	Pouze odpor
Počet RC bloků	5	3	Ne	1
Elektrochemický model	Ne	Ne	Ano	Ne
Hysterezní Model	Ne	Ano	Ne	Ne
Injekce chyb	Ne	Ano	Ne	Ne
Zdrojový kód přístupný?	Ne	Ano	Ano	Ano

Modely bateriových článků

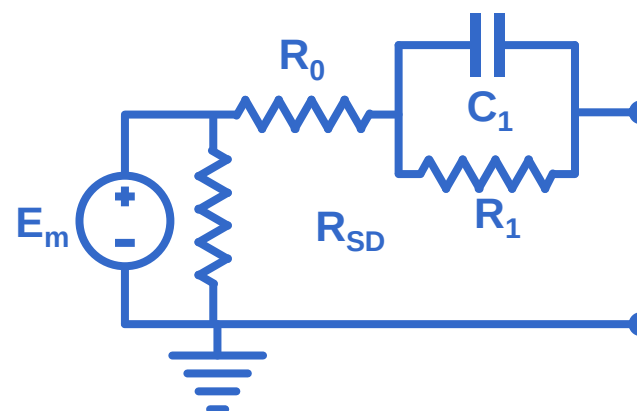
- Ekvivalentní obvod
- Tabulkový model
 - OCV počítáno z tabulky (stav nabití a teplota)
- Databáze parametrů od výrobců
- Další děje
 - Dynamika nabíjení/vybíjení, samovybíjení, ztráta kapacity (fade), stárnutí
 - Tepelné závislosti
 - Teplota baterie je počítána z ohmických ztrát



Battery



Battery
(Table-
Based)

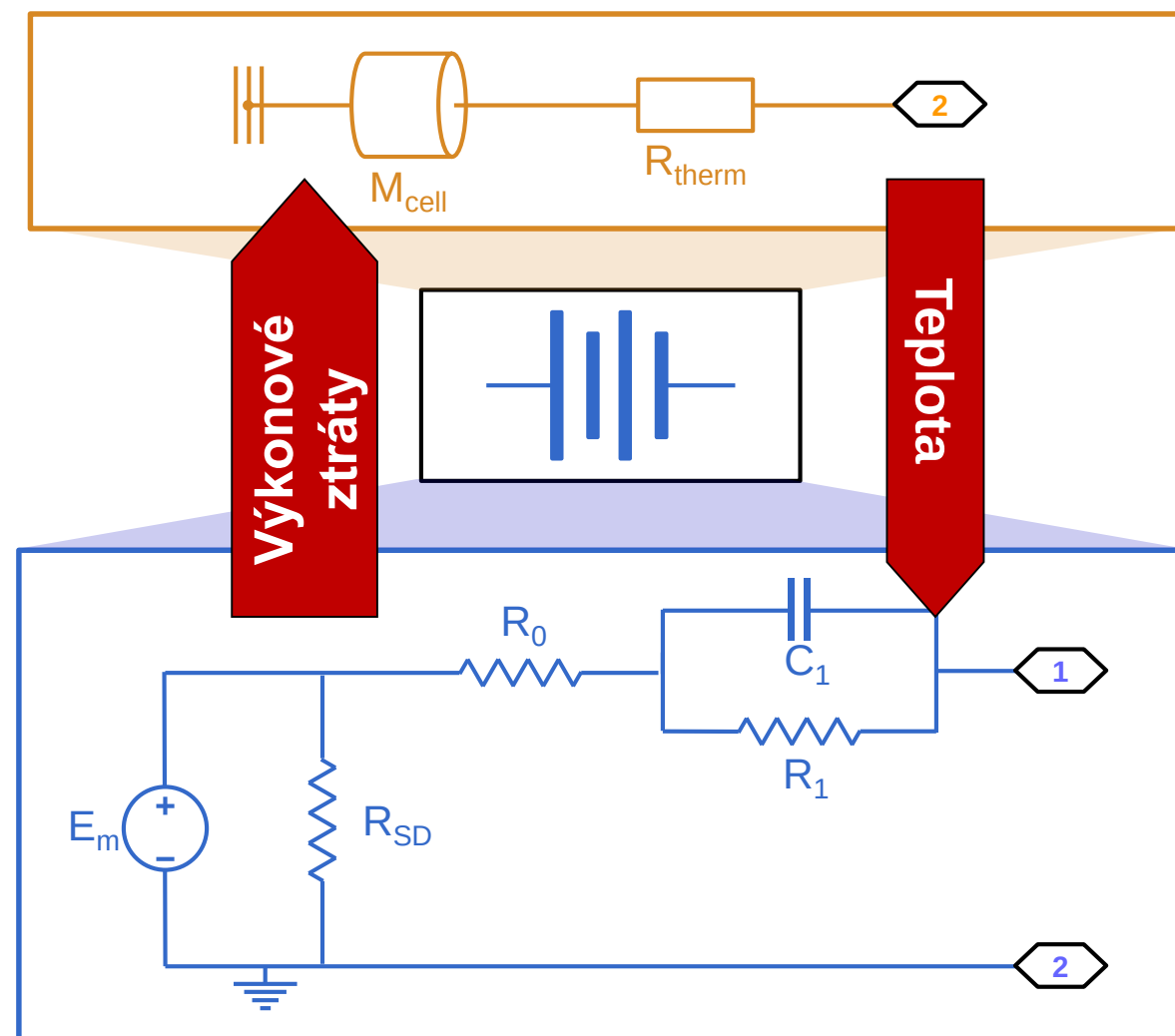


Block Parameterization Manager	
Select part	A123/ALM12V7
Attribute	A123/ALM12V7
Manufacture	A123/ANR26650M1
Part number	Korea_Powercell/PD3032
Part series	Panasonic/NCA463436A
Web link	Panasonic/NCA593446

▼ Dynamics	
Charge dynamics	Three time-constant dynamics
▼ Fade	
Fade characteristics defined by	Lookup tables (temperature dependent)
▼ Calendar Aging	
Internal resistance calendar aging	Enabled
Capacity calendar aging	Enabled
> Thermal	

Blok Battery Equivalent Circuit block

- Vícedoménový fyzikální model
- Elektrický model článku
 - Článek popsáný RC obvodem
 - Různé úrovně podrobnosti
 - Hysterezní model
- Tepelný model
 - Článek jako jeden elektrotepelný prvek
 - Teplo z výkonových ztrát
 - Vratné generování tepla
- Simulace poruch



Parametrizace bloku Battery Equivalent Circuit

Block Parametrization Manager

Block Parameterization Manager: Battery Equivalent Circuit

SELECT FORMAT

Apply all Reset all

3

PARAMETERIZE FILTER

Select part Part specification Compare selected part with block

Part number	Manufacturer	BatteryType	Geometry	Capacity,mA*hr	Vnominal,V	Weight,g	Diam
ALM12V7	A123	Lithium-ion	Prismatic	4600	13.2000	840.0000	
AMP20M1HD	A123	Lithium-ion	Pouch	19600	3.3000	496.0000	
ANR26650M1	A123	Lithium-ion	Cylindrical	2300	3.3000	72.0000	
PD3032	Korea Powercell	Lithium-ion	Cylindrical	180	3.7000	7.2000	
INR_21700_P45B	Molicel	Lithium-ion	Cylindrical	4500	3.6000	70.0000	
NCA103450	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	2200	3.6000	38.3000	
NCA463436A	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6800	3.6000	12.4000	
NCA593446	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	20.6000	
NCA623535	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	17.6000	
NCA673440	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	20.3000	
NCA793540	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	24.7000	
NCA843436	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	23.0000	
NCR18500A	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	33.5000	
NCR18650BD	Panasonic	Lithium-ion	Prismatic	6000	3.6000	49.5000	
NCR18650BF	Panasonic	Lithium-ion	Cylindrical	2835	3.6000	46.5000	
NCR18650DF	Panasonic	Lithium-ion	Cylindrical	2700	3.6000	48.0000	

2

K dispozici je více než 65 různých parametrizací pro baterie

Block Parameters: Battery Equivalent Circuit

Battery Equivalent Circuit ☒ Auto Apply

Settings Description

NAME	VALUE
Selected part	<click to select>
Main	
Battery capacity	27 A*hr
Thermal model	Constant temperature
Extrapolation method f...	Nearest
Open Circuit Voltage	

1

Block Parameters: Battery Equivalent Circuit

Battery Equivalent Circuit ☒ Auto Apply

Settings Description

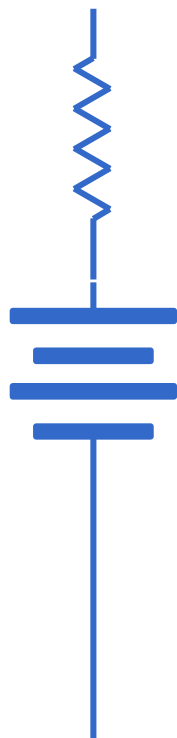
NAME	VALUE
Selected part	A123:ALM12V7
Main	
Battery capacity	4.911 hr*A
Thermal model	Lumped thermal mass
Extrapolation method f...	Linear
Open Circuit Voltage	

4

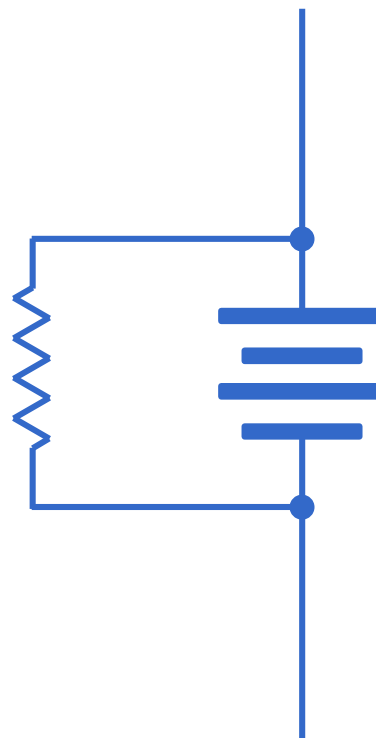
» [List of Pre-Parametrized Components](#)

Blok Battery Equivalent Circuit - poruchy

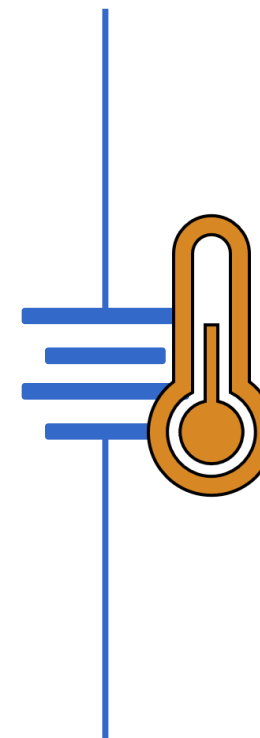
Add. Resistance Fault



Internal Short Fault



Exothermic Reaction



Blok Battery Single Particle (od R2024a)

- Modeluje baterii elektrochemickým modelem
 - Zachycuje dynamické chování článků, difúzi lithia a reakce na rozhraní elektroda/elektrolyt
 - Zachycuje degradační mechanismy, jako je depozice lithia a praskání elektrod



Zdrojový kód

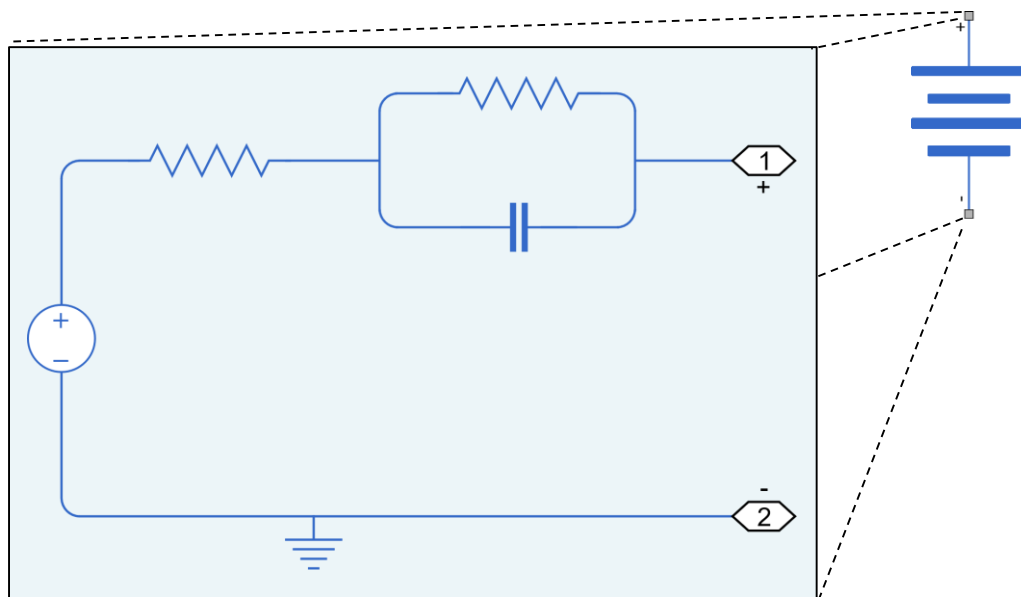
```
components(ExternalAccess=observe)
    anodeModel = batt.cells.electrochemical.electrode(
    cathodeModel = batt.cells.electrochemical.electrode(
    electrolyteModel = batt.cells.electrochemical.electrolyte(
    thermalModel = batt.cells.thermalLumpedMass(thermalMass)
    reactionKineticsModel = batt.cells.electrochemical.reactionKinetics(
end
```

NAME	VALUE
> Main	
> Geometry	
> Electrodes Properties	
> Electrolyte Properties	
> Reaction Kinetics	
> Thermal	
> Battery thermal mass	77 J/K
> Arrhenius reference temp...	298.15 K
> Activation energy for diffu...	39000 J/mol

Battery Single Particle vs. Battery Equivalent Circuit

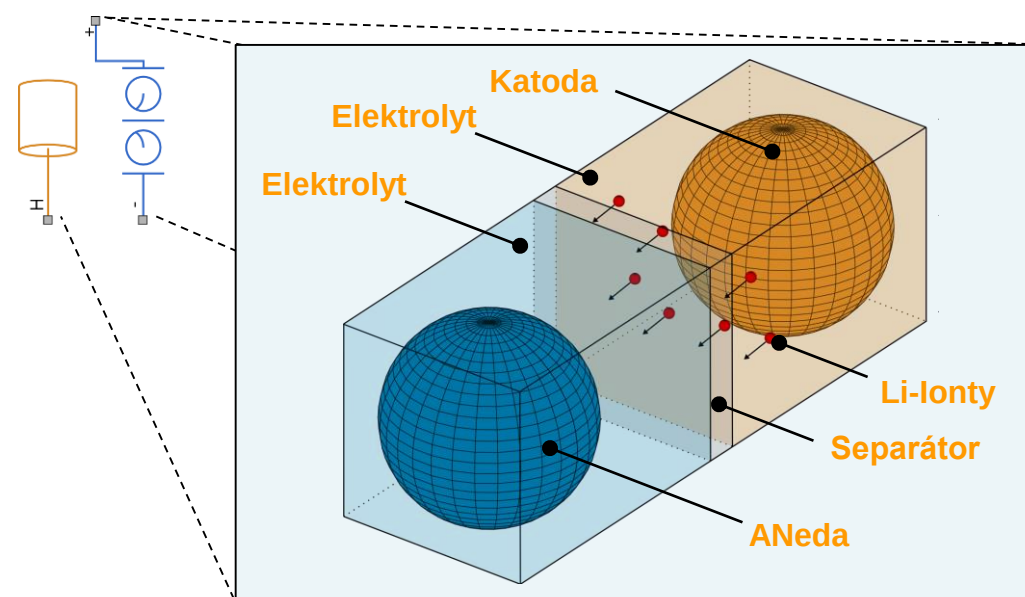
Empirický model

- Model ekvivalentního obvodu
- Jednoduchá implementace a pochopení
- Omezená přesnost



Elektrochemický model

- Single Particle Model
- Vyšší přesnost a složitost
- Vyžaduje podrobné parametry



Blok Single Particle Model

Parametry a nastavení

Geometrie elektrody, separátoru, elektrolytu

Difuzivita elektrody, stechiometrie, objemový zlomek

Objemový zlomek elektrolytu, převodové číslo, vodivost, difuzivita

Konstanty rychlosti přenosu náboje na anodě a katodě

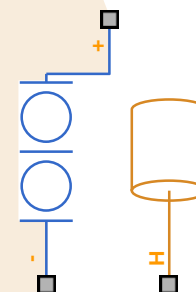
Tepelná kapacita a aktivační energie

Block Parameters: Battery Single Particle

Battery Single Particle ☒ Auto Apply ?

Settings Description

NAME	VALUE
> Main	
> Geometry	
> Electrodes properties	
> Electrolyte properties	
> Reaction kinetics	
> Thermal	
> Initial Targets	
> Nominal Values	

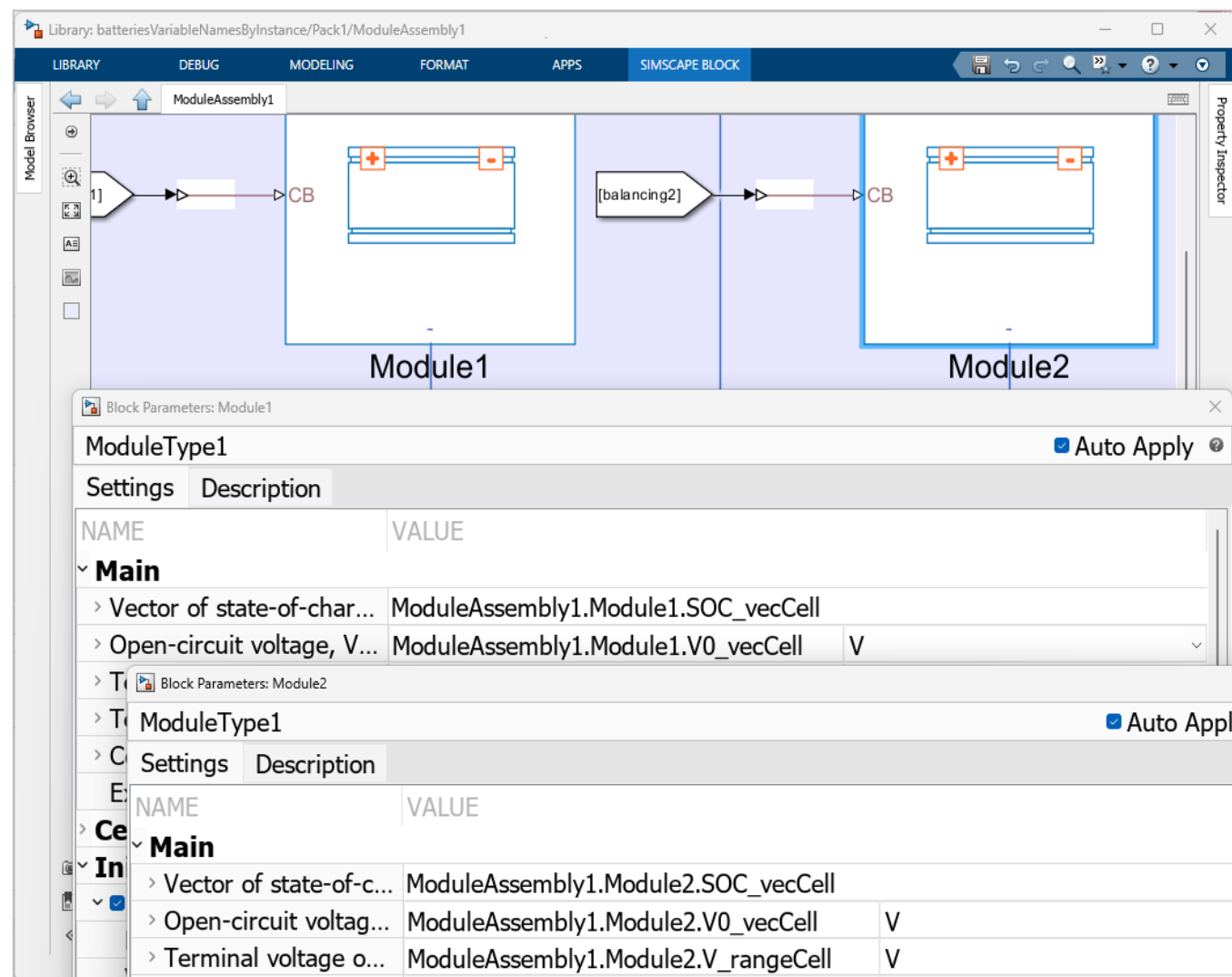


Simscape Battery

Modelování sad baterií (battery pack)

Jedinečné parametry pro každý modul nebo paralelní sestavu

- Uvnitř generované knihovny
- Modelování sad (pack) s různým chováním jednotlivých článků
 - Různé typy buněk
 - Nové a degradované buňky



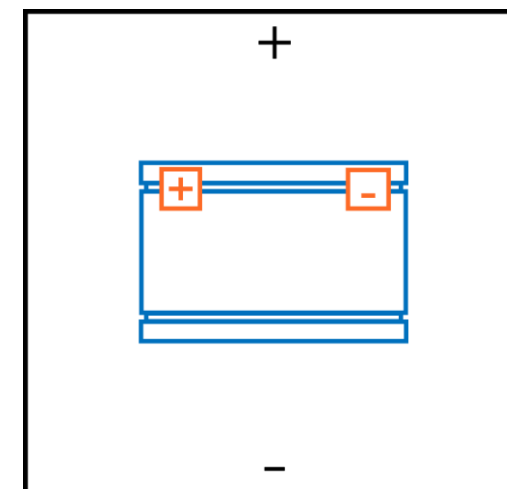
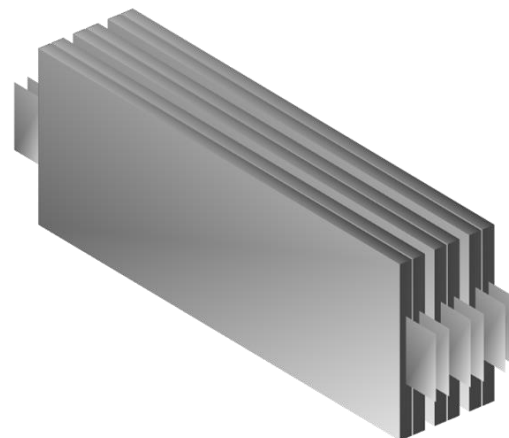
Odchyly parametru v rámci Module/Pack

- Přiřazení odchylek tepelných a elektrických parametrů článků
- Odchyly jsou definovány jako procentuální odchylka od referenční hodnoty

$$\text{cellParameter} = 1 + \left(\frac{\text{cellParameterDeviation}}{100} \right) \text{referenceValue}$$

- Odchyly můžete přiřadit různým parametrům článku:

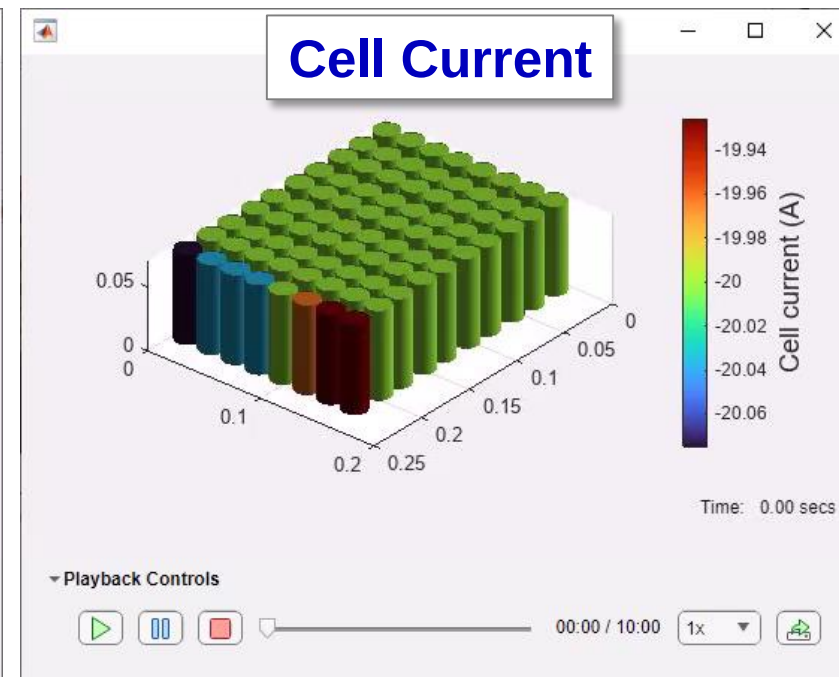
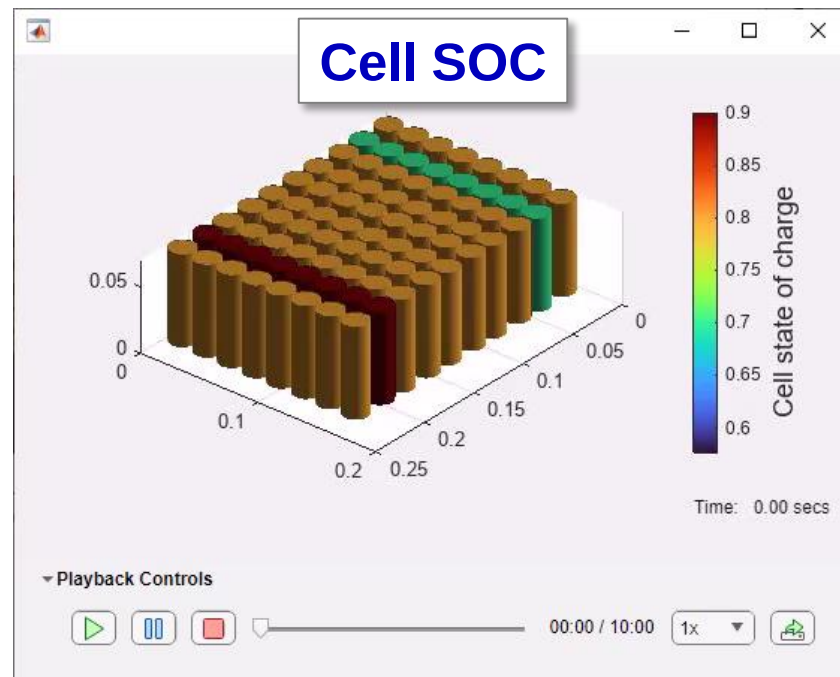
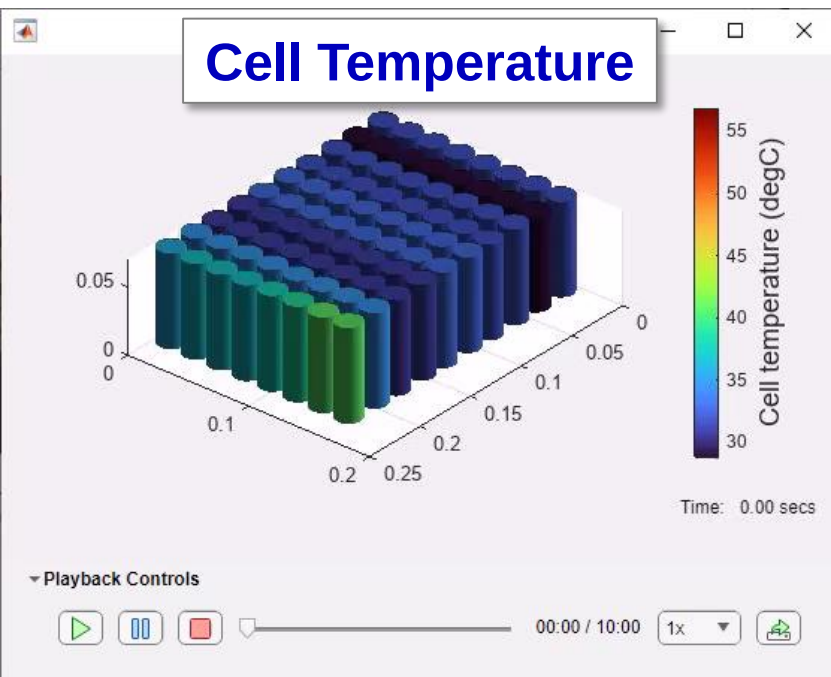
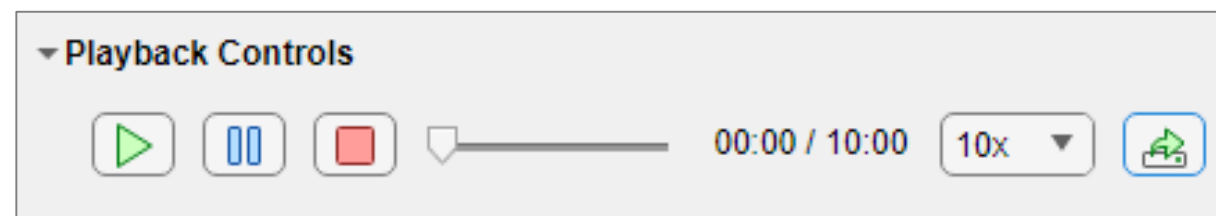
- Tepelná kapacita
- Kapacita
- Napětí naprázdno (Open Circuit Voltage)
- Okamžitý odpor R_0



Vizualizace výsledků

- Animace výsledků simulace
 - Zobrazení veličin, jako je proud, teplota a SOC, pro každý článek
 - Lze exportovat ve formě videa

[objekt batterySimulationChart](#)

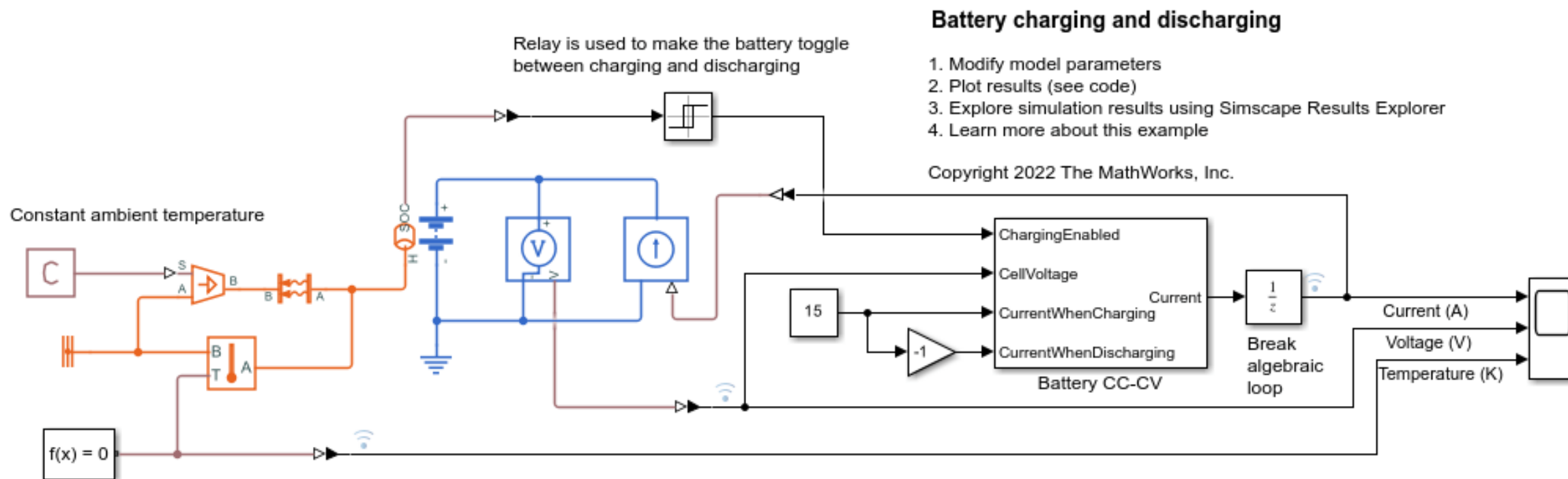


Simscape Battery

Systemy pro správu baterií (BMS)

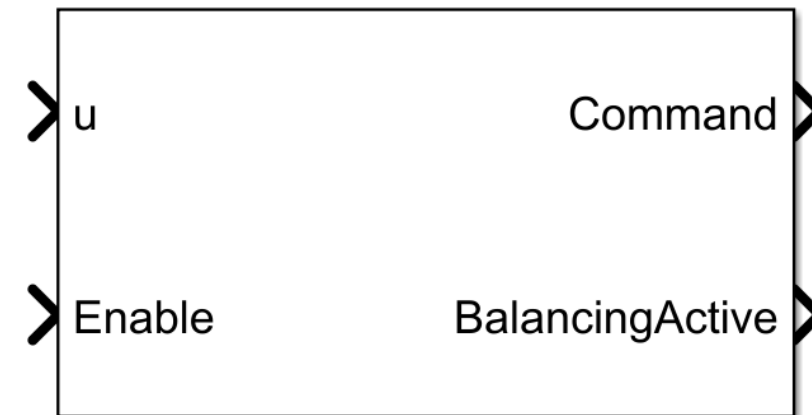
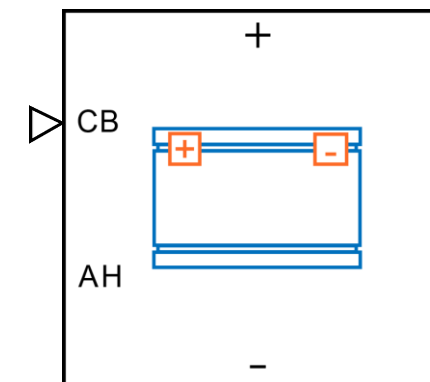
Nabíjení a vybíjení baterií

- Bloky [Charger](#) / [Discharger](#) / [Cycler](#) – ideální chování
- Blok [Battery CC-CV](#) – nabíjení pomocí algoritmu „constant-current (CC), constant-voltage (CV)“



Vyrovnávač napětí

- Vyrovnávání článků lze aktivovat pomocí volitelného vstupu při vytváření packu
- Blok Passive Cell Balancing lze použít na module, module assembly nebo pack
- Vyrovnávání napětí lze ovládat pomocí:
 - vektoru hodnot SOC
 - vektoru hodnot napětí

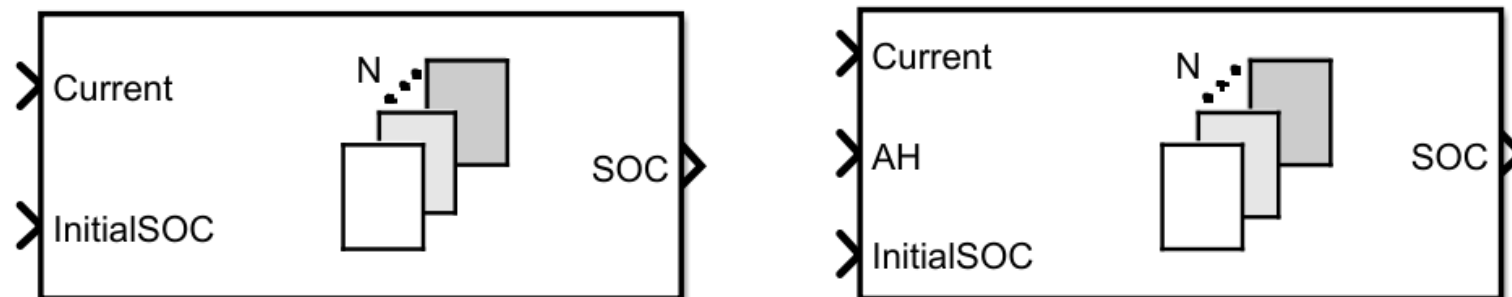


Odhad stavu nabití – State of Charge (SOC)

- Metoda „Coulomb Counting“
- Odhaduje SOC na základě proudu a kapacity článku

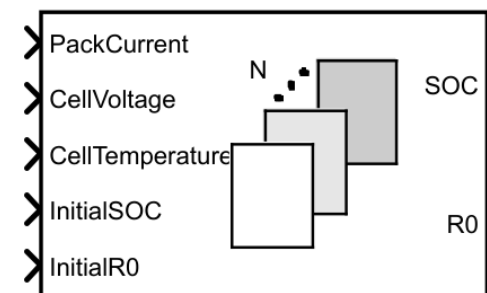
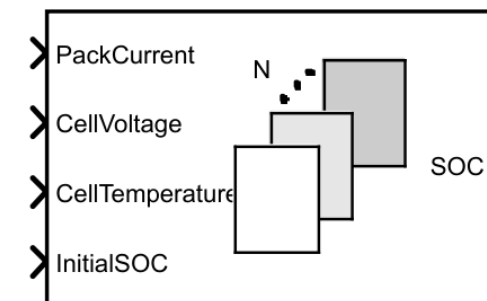
$$SOC = SOC(t_0) + \frac{1}{C_{rated}} \int I_{batt}$$

- Blok [SOC Estimator \(Coulomb Counting\)](#)



State of Charge (SOC) Estimator

- Pomocí Kalmanových filtrů
 - Extended Kalman filter (discrete-time simulation)
 - Extended Kalman-Bucy filter (continuous time simulation)
 - Unscented Kalman filter (discrete-time simulation)
 - Unscented Kalman-Bucy filter (continuous time simulation)
 - Adaptive Kalman Filter (cell resistance R0 included as an additional state). Can be coupled with SOH estimator
- Blok SOC Estimator (Kalman Filter)

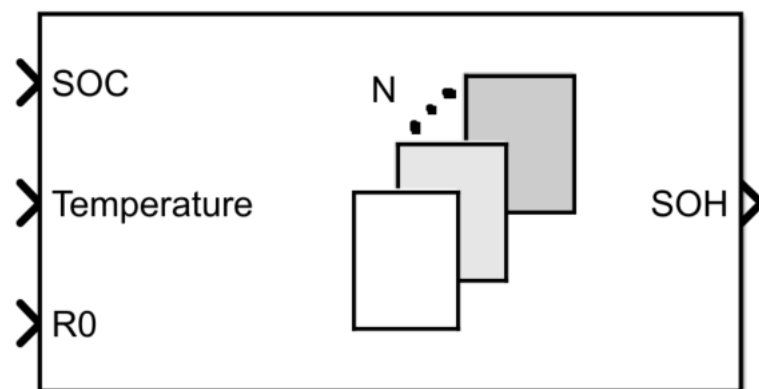


State of Health (SOH)

- Odhaduje SOH na základě rychlosti změny vnitřního odporu baterie.

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R_0}{R_{EOL} - R_{0,new}}$$

- Adaptivní Kalmanovy filtry lze použít k odhadu stavu nabití (SOC) a vnitřního odporu R_0 , které slouží k výpočtu SOH



State of Energy (SOE) Estimator

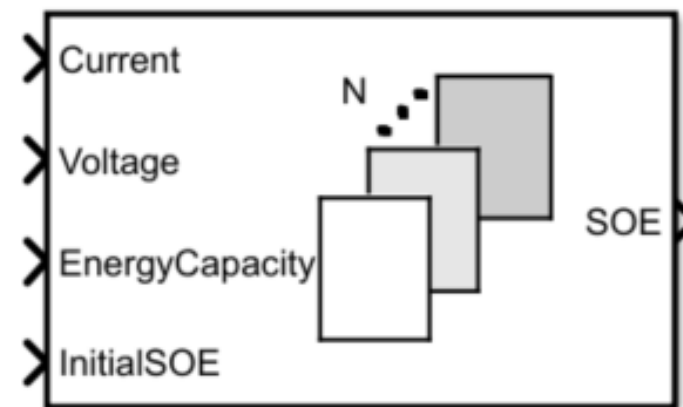
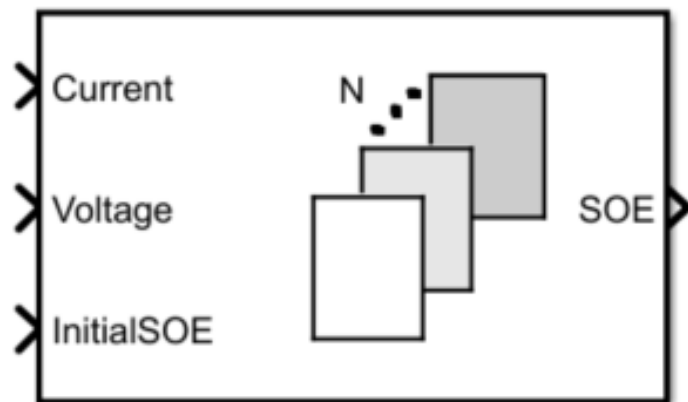
- Pomocí Kalmanových filtrů
 - Použité Kalmanovy filtry jsou stejné nelineární filtry jako pro odhad SOC
- Také: [Adaptive Kalman Filter](#) (odpor článku R0 zahrnut jako další stav)
 - Lze spojit s estimátorem SOH
- Lze nastavit kapacitu článku jako s dodatečný vstupem:
 - [SOE Estimator \(Adaptive Kalman Filter, Variable Energy Capacity\)](#)
 - [SOE Estimator \(Kalman Filter Variable Capacity\)](#)

SOE Estimator – Energy Counting

- Odhaduje zbývající hodnotu SOE na základě proudu a kapacity článku.
- Kapacita článku C_{rated} může být konstantní nebo vstupní parametr:

$$SOE = SOE(t_0) + \frac{1}{E_{rated}} \int V_{batt} I_{batt}$$

- Chyba odhadu je velmi citlivá na zadanou počáteční hodnotu



Děkuji za pozornost.

Otázky?