

Propojení FEM simulací s MATLAB® a Simulink®



Matouš Lorenc

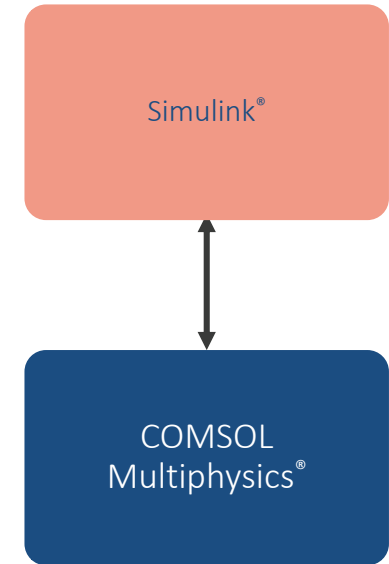
HUMUSOFT s.r.o.

lorenc@humusoft.cz

284011745

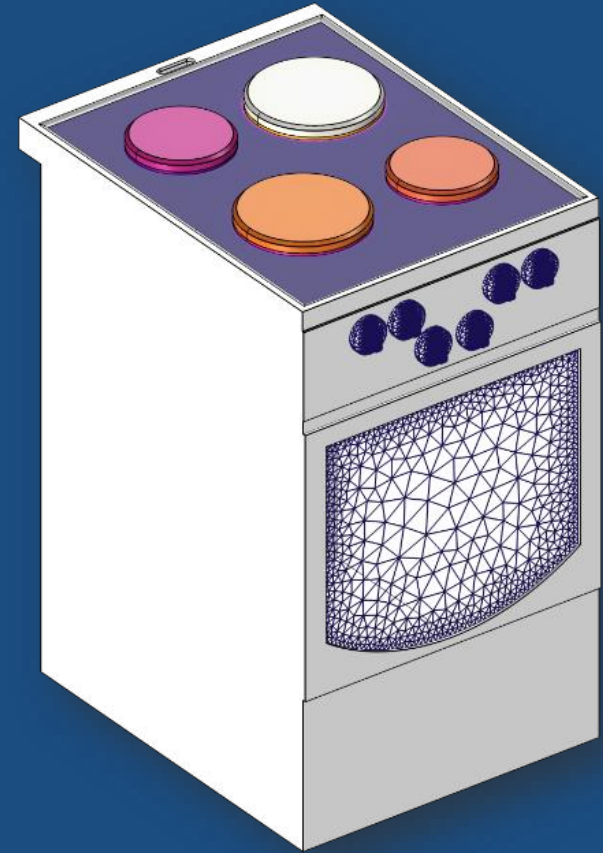
LiveLink™ propojení

- LiveLink™ pro CAD modeláře
 - Oboustranná integrace s CAD software
- LiveLink™ *for* Excel®
 - Výměna dat, automatizace simulace, tvorba reportů
- LiveLink™ *for* MATLAB®
- LiveLink™ *for* Simulink®



Symbióza mezi produkty The Mathworks a COMSOL Multiphysics

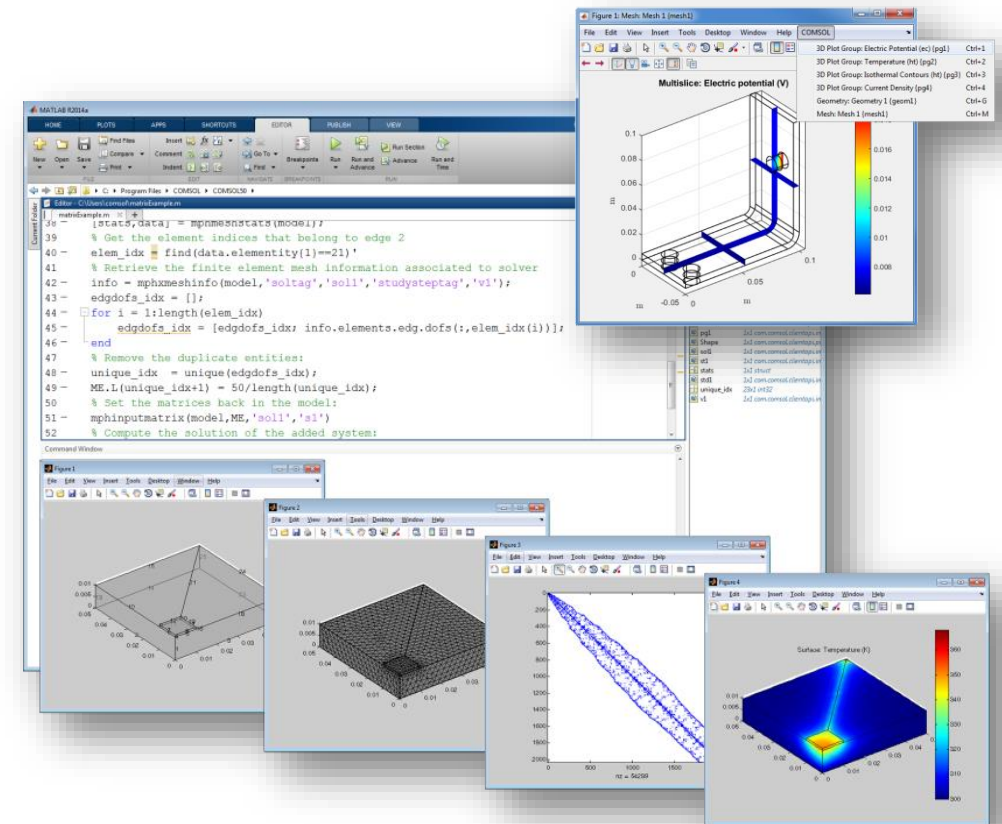
- COMSOL Multiphysics
 - PDE Toolbox -> FEMLAB -> COMSOL Multiphysics / Server / Compiler
 - LiveLink for MATLAB & LiveLink for SIMULINK
- MATLAB
 - Data pre/postprocessing
 - Signal Processing, Image Processing
 - Plná kontrola nad nastavením modelu
 - MATLAB Script skrz COMSOL API
 - Externí funkce a algoritmy
 - Global Optimization, Optimization Toolbox
- SIMULINK
 - Systémová integrace
 - Pokročilé algoritmy řízení
 - Zpracování signálu
 - DSP System Toolbox



LiveLink™ *for* MATLAB®

LiveLink™ for MATLAB®

- Rozšíření FEM software COMSOL Multiphysics® o skriptovací jazyk a prostředí MATLAB®
- Aplikace
 - Předzpracování vstupních dat: experimentální a obrazová data
 - Další zpracování a analýza výsledků FEM simulací
 - Přístup do niterní struktury modelu
 - Rozšíření multifyzikálních modelů o externí algoritmy jako je Monte Carlo nebo genetické algoritmy
 - Export redukovaných modelů pro digital twin apod.



Struktura propojení



```
1 model = mphopen('electric_stove');
2 %
3 Td_max = at2double(model.param.get('Td_max'));
4 %
5 ht = model.physice('ht');
6 T_control = 25;
7
8 %
9 i = 1:100;
10 T_max = (Td_max - (9-i)*T5);
11
12 if T_control > T_max
13     ht.feature('ht1').active(false);
14 else
15     ht.feature('ht1').active(true);
16 end
17
18 model.study('std1').run;
19
20 if i==1
21     opt1 = model.result.dataset.create('opt1','OutPoints3D');
22     opt1.set('points','+0.00');
```

Starting COMSOL Multiphysics LiveLink(TM) for MATLAB (R) - 5.5.0.359.
Checking for additional startup script (comsolstartup.m)
In: C:\Users\lorenzo
Checking for startup script on the MATLAB path
Type `help_mli` for more information
Type `mphmodellibrary` to open the Model Library

```
COMSOL Multiphysics 5.5 with MATLAB
Port number 2036 was busy, using 2037 instead
COMSOL Multiphysics 5.5 (Build: 359) started listening on port 2037
Use the console window 'close' to exit the program
```

R2020a (9.8.0.1323502)
64-bit (win64)
February 25, 2020
License Number: 40467207

Professional License

© 1984-2020 The MathWorks, Inc. Protected by U.S. and international patents. See mathworks.com/patents. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

MathWorks 2020

Temperature, 3D (ht)

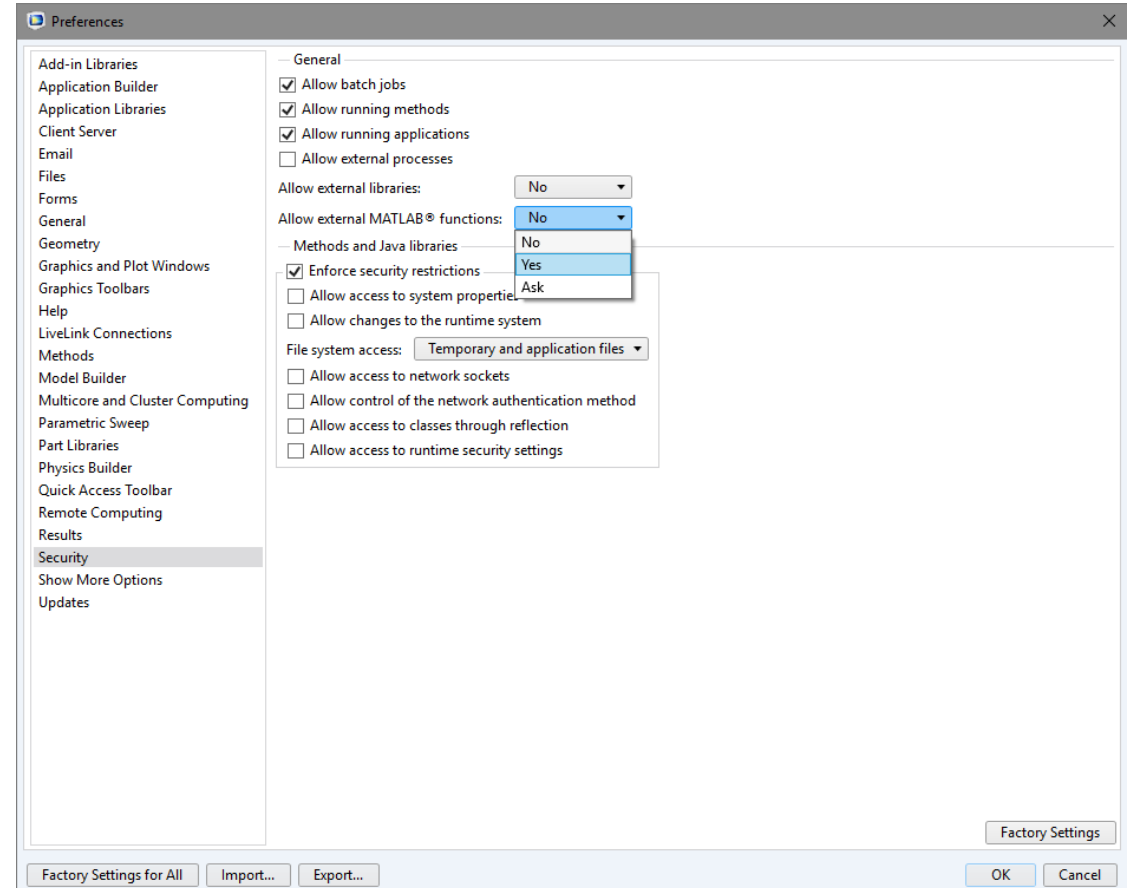
Surface: Temperature (K)

h_nat(T,293.2,0.38)

Temperature (K)
315
320
325
330
335
340
345
350
355
360

„Odemčení“ funkcí

- LiveLink for MATLAB
- Zadání cesty
 - Při instalaci
 - V Preferences > LiveLink Connections
- Povolení externích funkcí a procesů
- Deklarace funkce v globálních proměnných

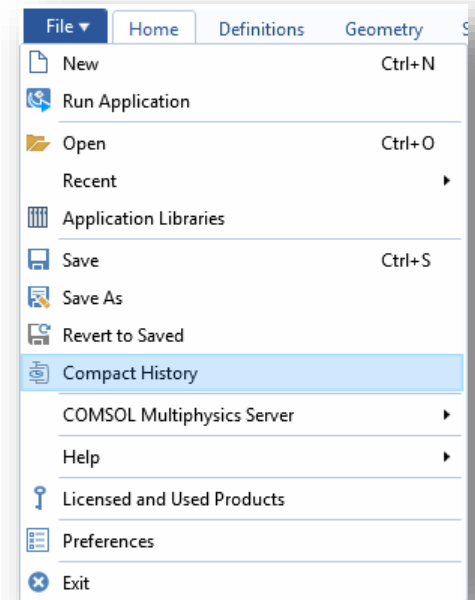


Funkcionalita

- Rozhraní pro propojení COMSOL Multiphysics a COMSOL Server s MATLAB
 - MATLAB jako skriptovací nástroj pro vytváření, ovládání a spouštění COMSOL modelů
 - Homogenizace modelu, spouštění modelu ve smyčce, posprocessing a analýza dat
 - Implementace externích MATLAB funkcí při řešení FEM modelu
 - Materiálové a obrazové funkce, optimalizační algoritmy
- Podporované verze (pro COMSOL 5.6)
 - Starší verze bez technické podpory
 - 2020b
 - 2021a

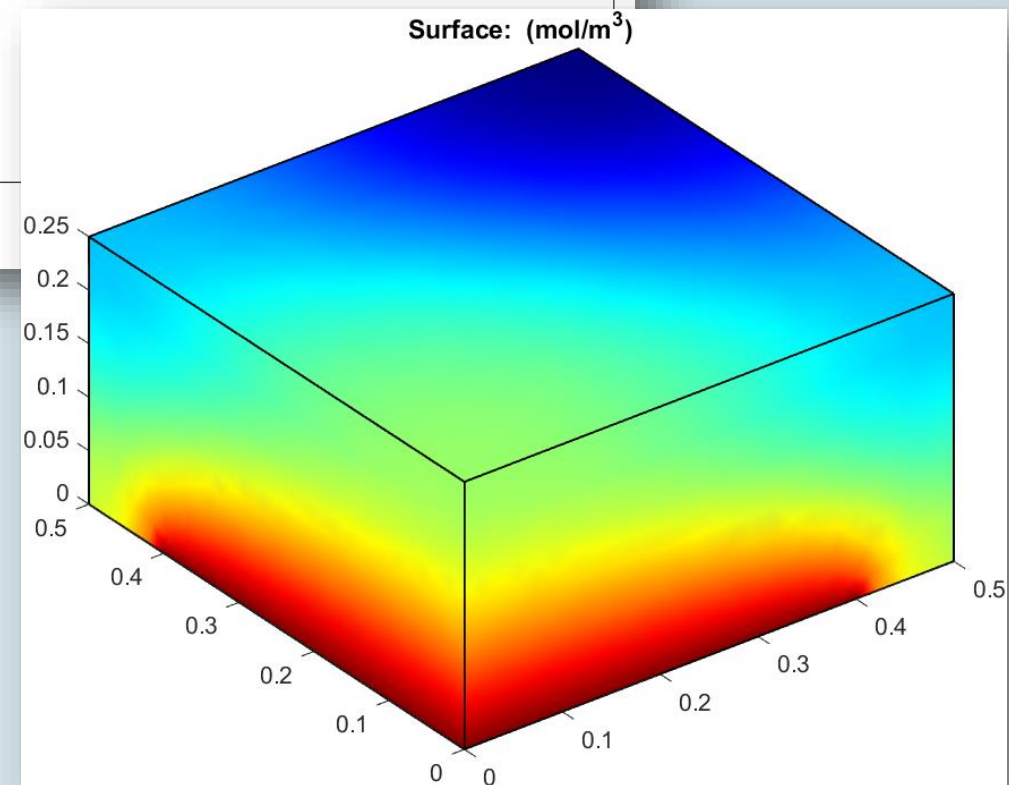
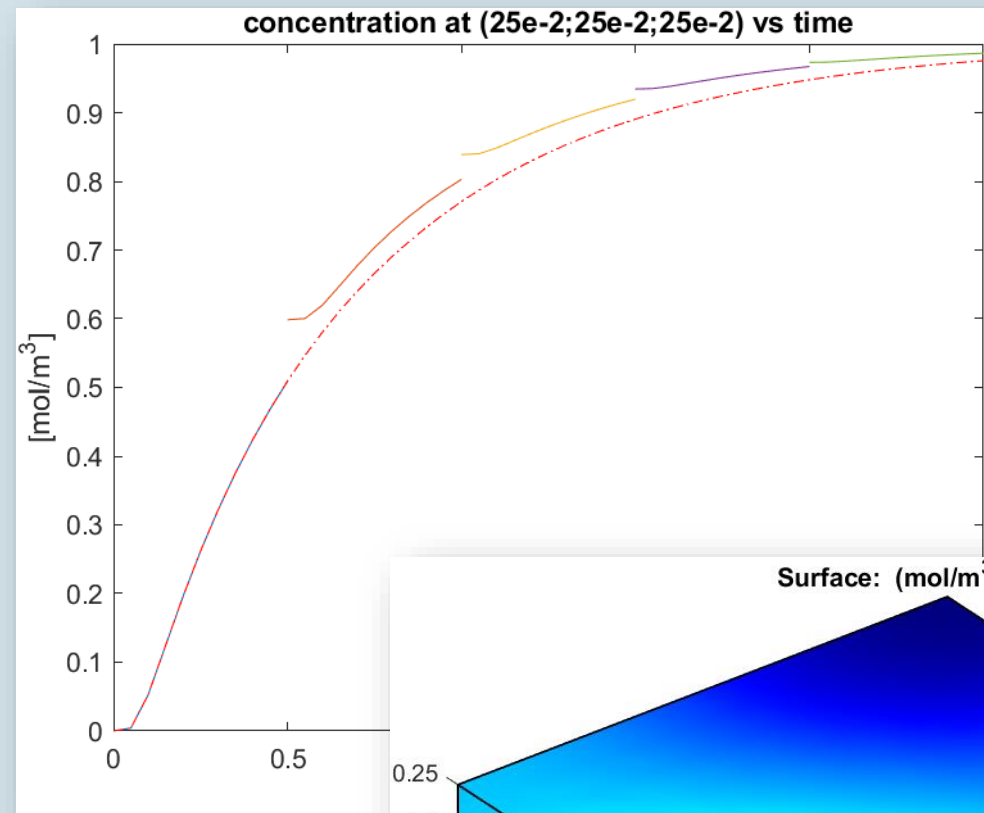
Ukládání a struktura m-file

- Kompletní FEM model lze exportovat jako m-file (a další *.m, *.java..)
- „knihovna příkazů“
- Compact History -> začištění zdrojového souboru
- Kontrola nad celým modelem: od parametrů, přes řešiče, po výsledky



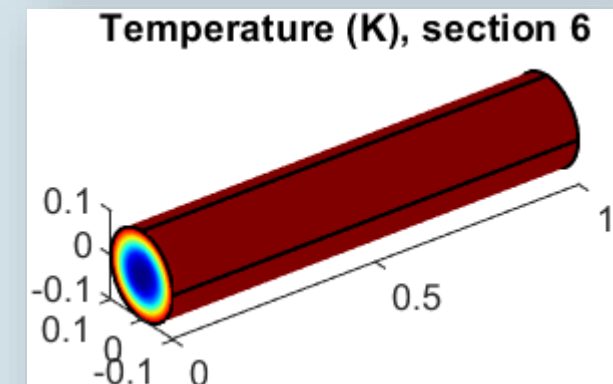
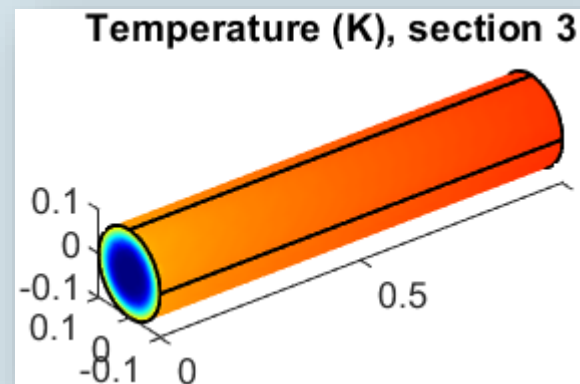
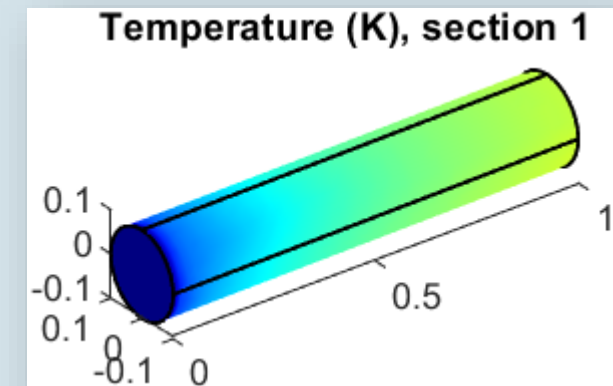
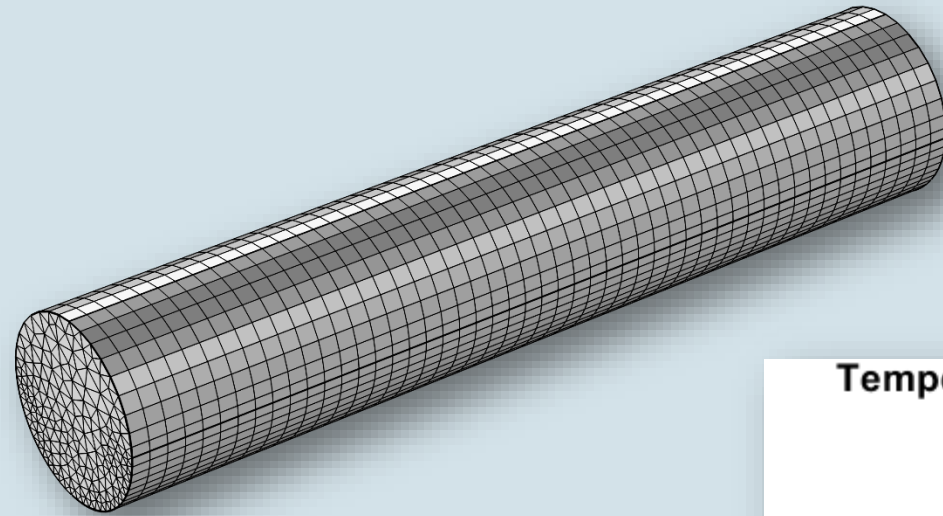
Spouštění modelu ve smyčce: chemický reaktor

- Simulace periodických a homogenizovaných dějů u časově závislých problémů
- Homogenizace probíhá každých 30 minut
- Počáteční podmínkou nové iterace jsou zprůměrované výsledky předchozího kroku



Import/Export z/do MATLAB: tepelná konvekce v dlouhém potrubí

- Skutečnou geometrií je dlouhá trubice
- Výpočet proudění v 1/6 trubice
- Výstup segmentu i je použit jako vstup segmentu $i+1$

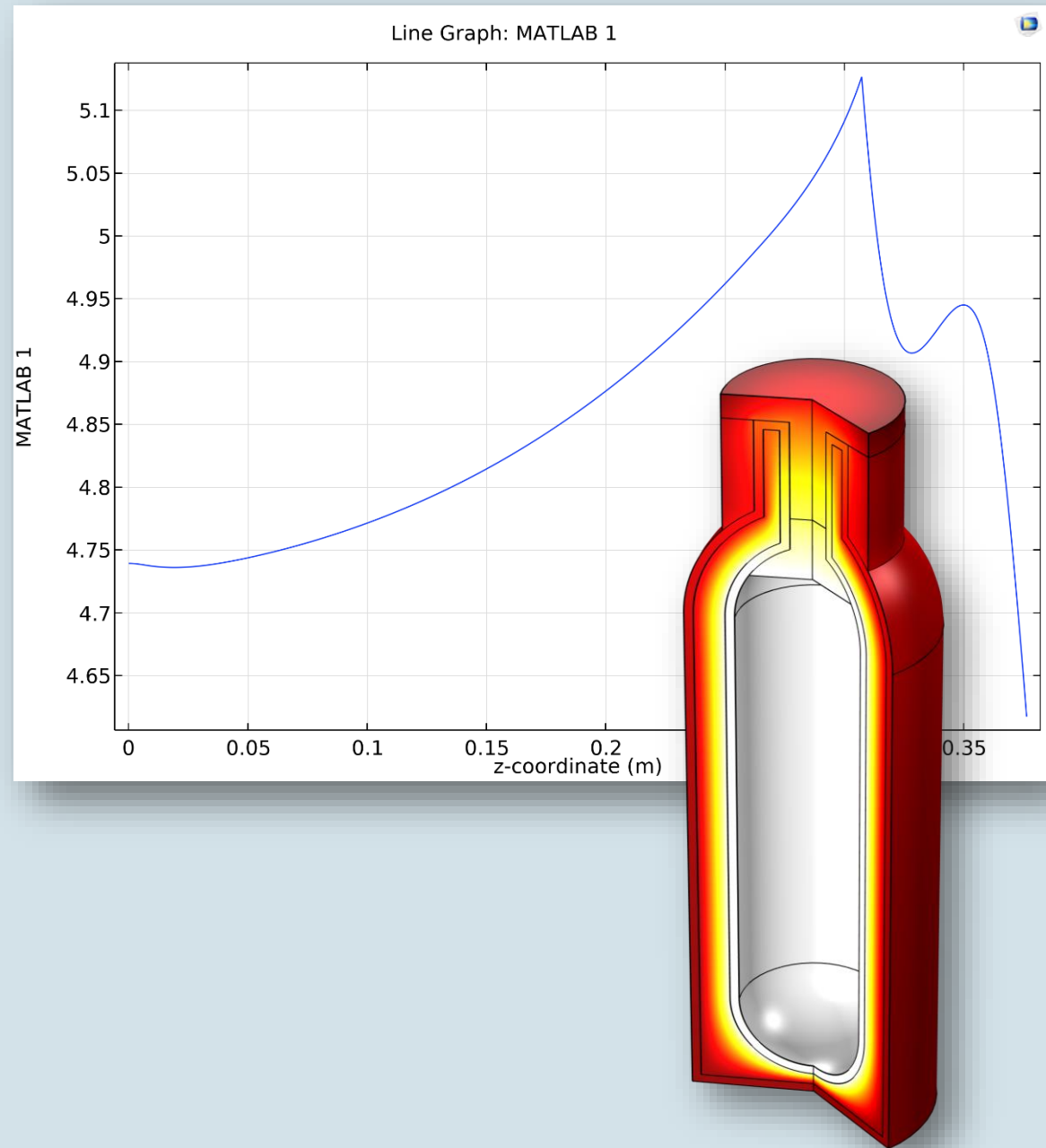


MATLAB funkce v COMSOL Multiphysics

- Nutné odemknout externí funkce a procesy
- Globální definice
 - Po importu se volá stejně jako standardní interní funkce
 - Pro nenulové derivace je potřeba definovat vlastní soubor s $df(x)$
 - Funkce běží externě v MATLAB, pro COMSOL se chová jako black box
- m-soubor i mph-soubor musí být viditelné pro COMSOL i MATLAB
- Použití nativních MATLAB funkcí (*std*), vlastních funkcí („mojefunkce.m“) a LiveLink funkcí (*mphinterp*)

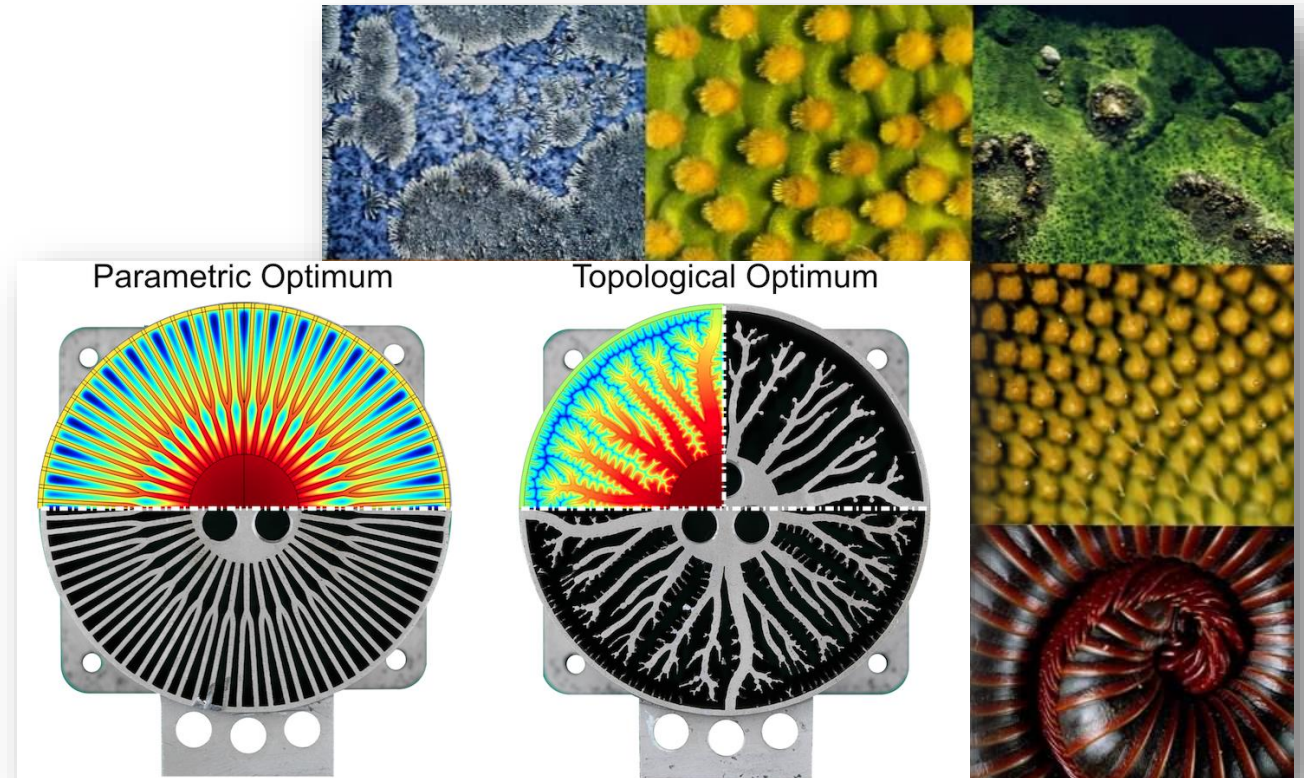
Použití MATLAB materiálových funkcí: termoska

- Výpočet teplotního pole v termosce
- Využití externích funkcí pro definici:
 - Teplotně závislých materiálových vlastností: tepelné vodivosti izolační pěny a koeficientů přestupu tepla pro přirozenou konvekci podél svislé stěny



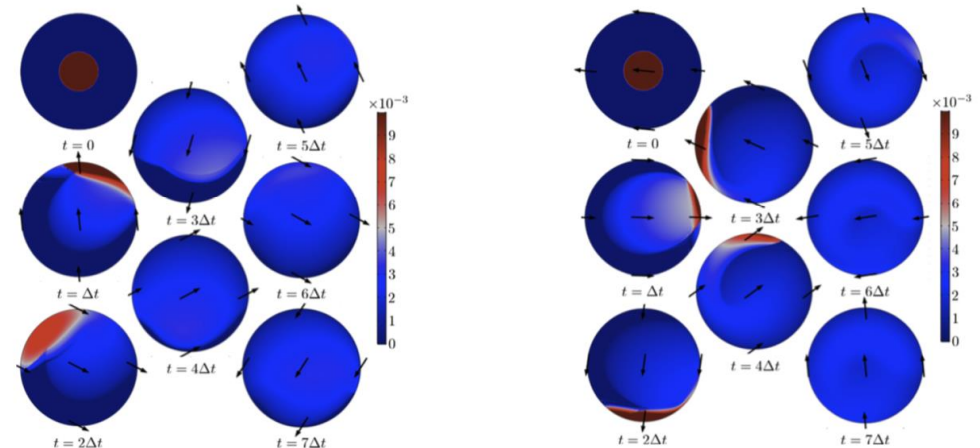
Externí optimalizační algoritmy

- COMSOL
 - (Bez)gradientní metody součástí Optimization Module
 - Rozměrová, tvarová a topologická optimalizace
- MATLAB
 - (Global) Optimization Toolbox
 - Genetické algoritmy
 - Monte Carlo
 - Uzavření modelu do smyčky



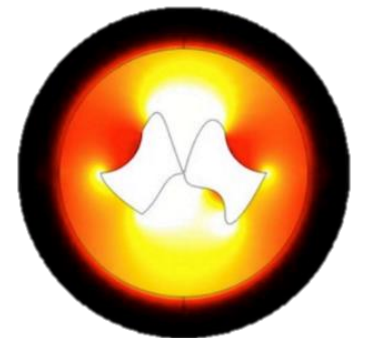
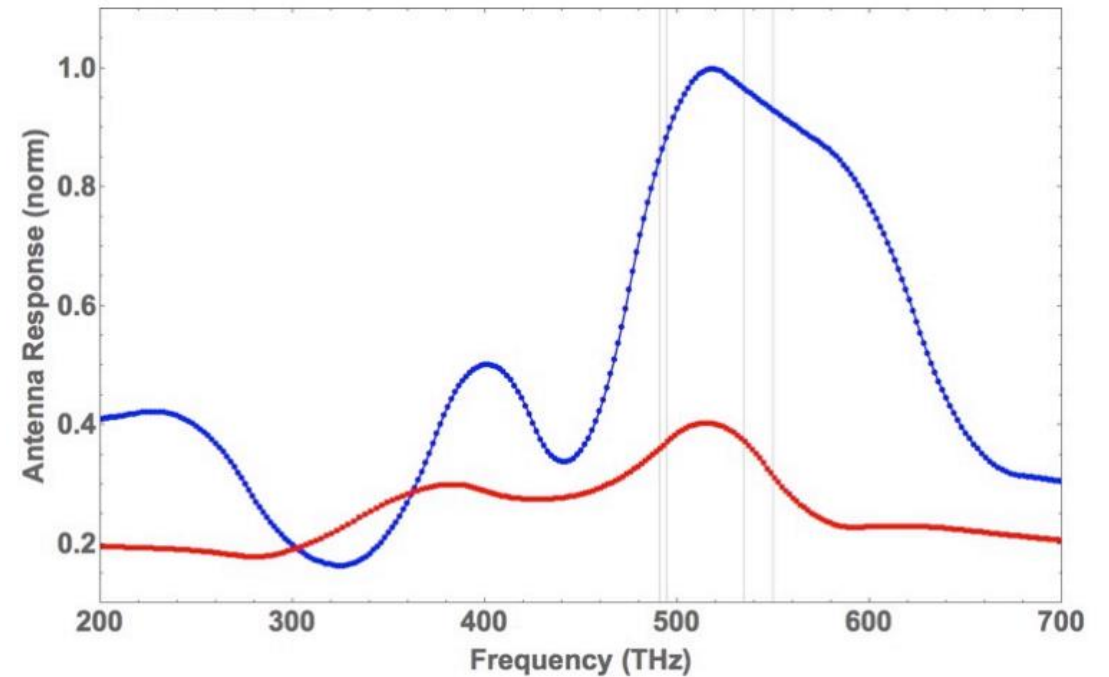
Jak připravit nejlepší palačinky?

- Optimalizace procesu smažení palačinek pomocí numerického modelu
- Zobecnění pro tvrdnoucí tenké vrstvy – výroba displejů, solárních článků, základových desek atp.
- Fyzikální model v COMSOL + optimalizace v MATLAB



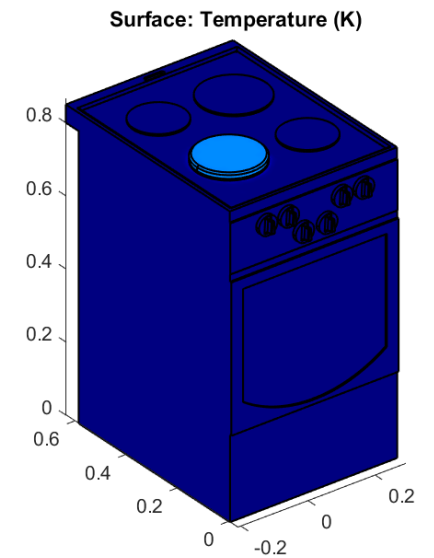
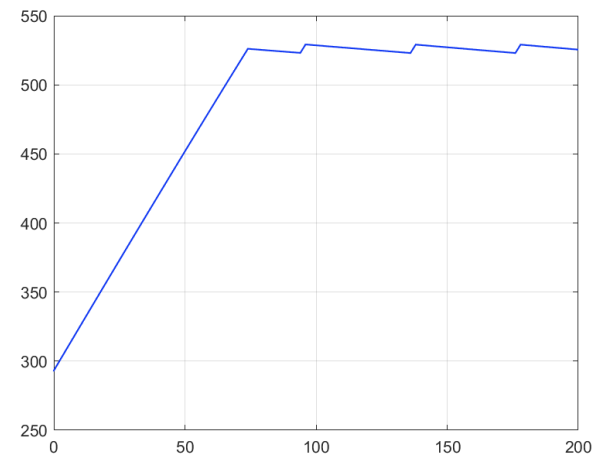
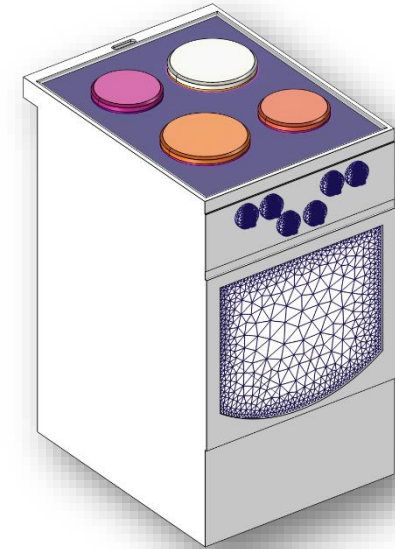
Zmuchlaná anténa

- Dipól nanoanténa s rezonanční frekvencí okolo 500 THz
- Využití genetických algoritmů pro vytvoření antény s ideální vyzařovací charakteristikou a nejnižšími ztrátami



Elektrická trouba

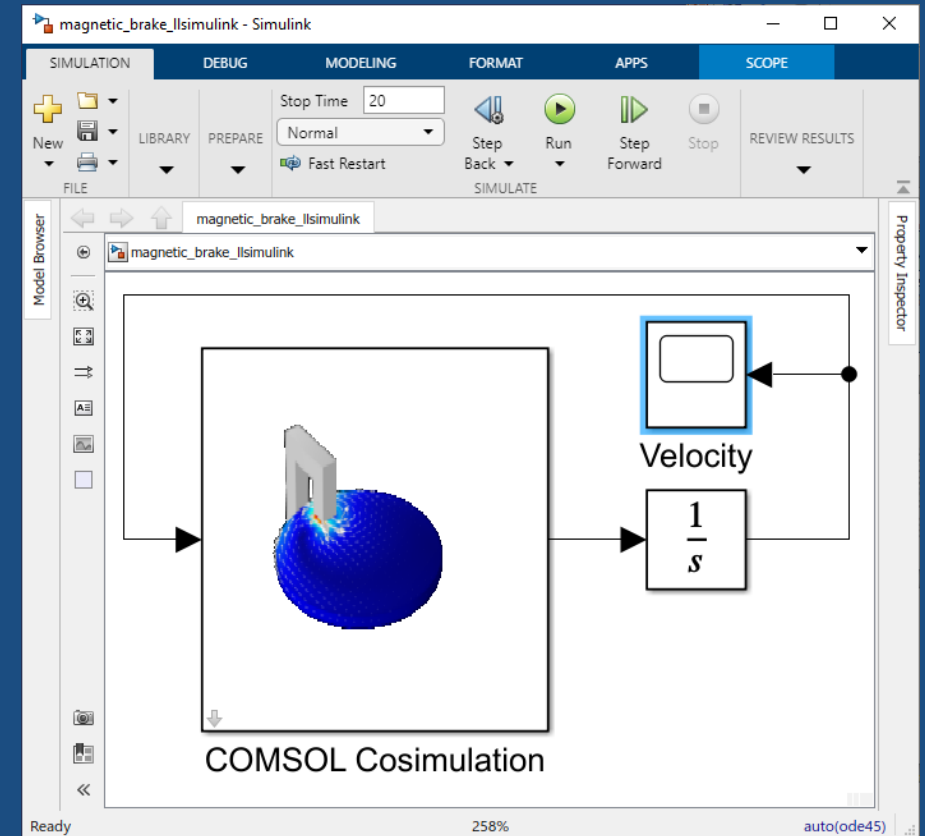
- Regulátor výkonu
- Trouba je ovládaná diskrétními hodnotami na vstupu
- Fyzikální model nastavený v COMSOL spouštěný a ovládaný v MATLAB
- Načítání .mph souboru, předávání parametrů a výsledků, vykreslování grafů



Uživatelská rozhraní

- COMSOL nabízí spoustu forem, jak vytvořit aplikaci, nebo GUI
- Application Builder
 - COMSOL Server™
 - COMSOL Compiler™
 - Nebo s COMSOL Desktop
- MATLAB®
 - GUIDE
 - App Designer
- LiveLink™ *for* Simulink®
- Excel®
- Java®

Za použití COMSOL API
(založené na jazyce Java®)

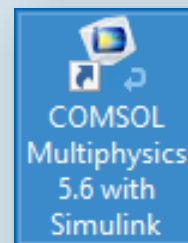
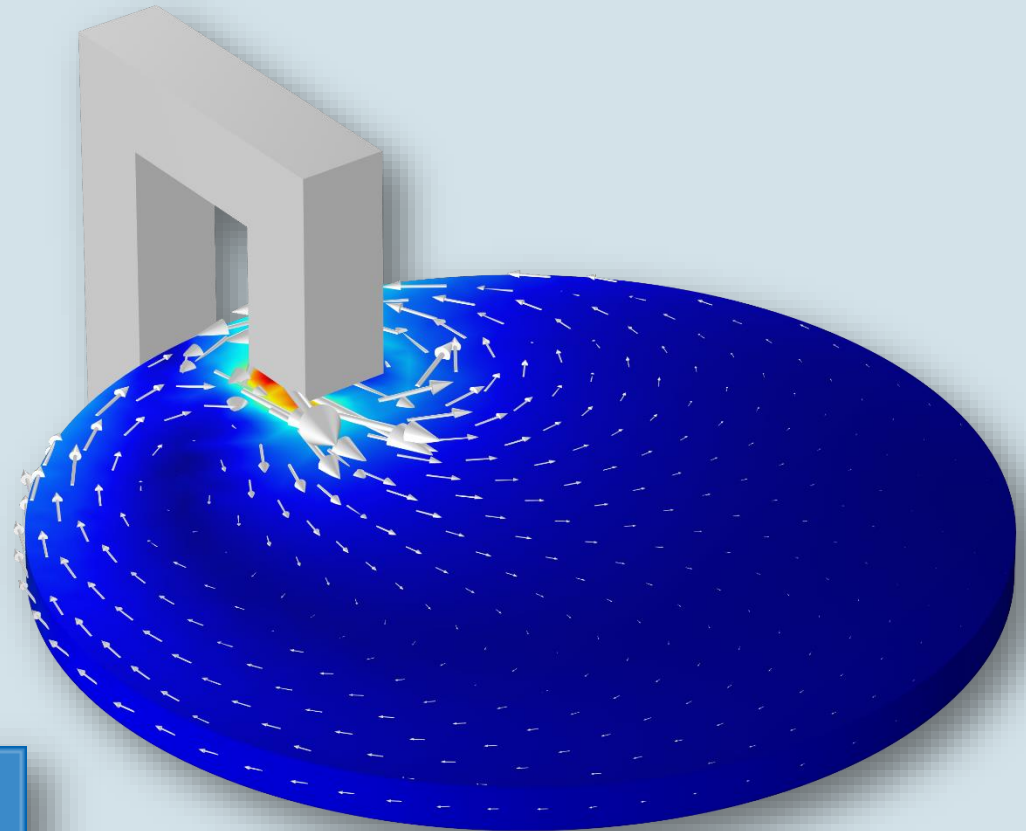


LiveLink™ for Simulink®

*Výpočet úhlové rychlosti ze
Simulink*

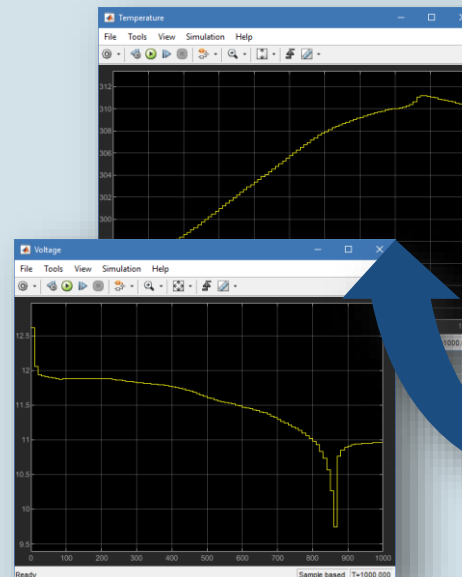
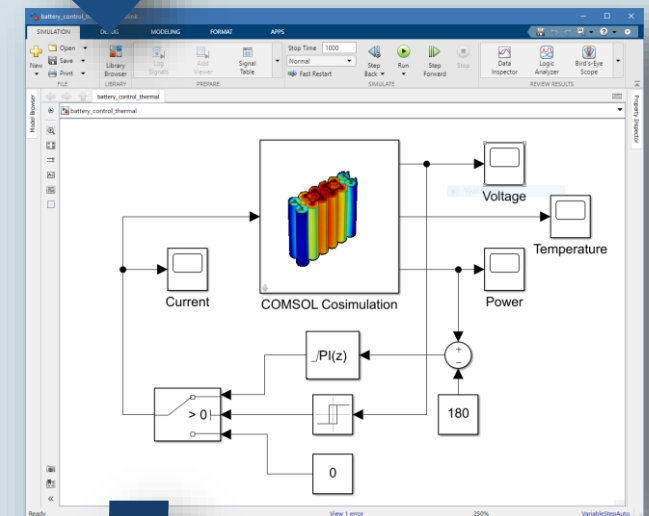
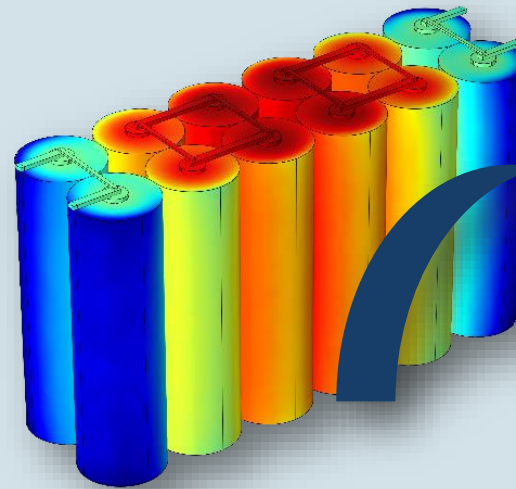
LiveLink™ for Simulink®

- Unikátní spojení mezi FEM software a Simulink:
 - Systémová integrace
 - Pokročilé algoritmy řízení
 - Moderní nástroje pro zpracování signálů
 - Digitální dvojče
- Požadavky
 - MATLAB 2021a & Simulink
 - COMSOL Multiphysics 5.6 & LiveLink for Simulink



Kosimulace

- Nastavte FEM model v COMSOL Multiphysics
- Exportujte kosimulační soubor do Simulink
- Integrujte jeden či více COMSOL bloků v Simulink schématu
- Spusťte simulaci v Simulink
- Pracujte dále s výsledky v MATLAB, Simulink nebo COMSOL Multiphysics



Řízení napájecího proudu v Simulink k zajištění stabilního výkonu a teplotního managementu bateriového packu

Redukce řádu modelu (ROM)

- Stavové bloky
 - Exportujte redukovaný model (ROM) z COMSOL Multiphysics
 - Exportujte kompletní model ve formě stavových bloků z COMSOL Multiphysics
- Model
 - Lineární model stavů
 - Výsledkem redukce je pouhých např. 5–20 stavů
 - Plnohodnotný model má až miliony stavů (DOF)
- Slouží pro
 - Systémovou analýzu
 - Návrh řízení
 - Výkonovou optimalizaci

$$\begin{array}{l} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{array}$$

$$\begin{array}{l} E\dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{array}$$

$$E\ddot{u} + D\dot{u} + Ku = L$$

Redukce řádu modelu (ROM)

Model Builder

- heat1dcond_reduced.mph (root) {Model}
 - Global Definitions
 - Parameters 1 {default}
 - Default Model Inputs {cminpt}
 - Materials
 - Reduced-Order Modeling**
 - Global Reduced Model Inputs 1 {grmi1}
 - Time Dependent, Modal Reduced-Order M
 - Component 1 (comp1) {comp1}
 - Definitions
 - Geometry 1 {geom1}
 - Materials
 - Heat Transfer in Solids (ht) {ht}
 - Solid 1 {solid1}
 - Initial Values 1 {init1}
 - Thermal Insulation 1 {ins1}
 - Temperature 1 {temp1}
 - Out-of-Plane Heat Flux 1 {ophf1}
 - Heat Flux 1 {hfl1}
 - Mesh 1 {mesh1}
 - Study 1 {std1}
 - Step 1: Time Dependent {time}
 - Solver Configurations
 - Study 2 {std2}
 - Step 1: Eigenvalue {eigv}
 - Solver Configurations
 - Study 3 {std3}
 - Model Reduction {mr}**
 - Solver Configurations
 - Job Configurations
 - Results
 - Datasets
 - Derived Values

Settings

Model Reduction

Compute Update Solution

Label: Model Reduction

Model Reduction Settings

Method: Modal

Training study: Study 2 {std2}

Defined by study step: Eigenvalue {eigv}

Compute: Always

Unreduced model study: Study 1 {std1}

Defined by study step: Time Dependent {time}

Reduced-order model: Time Dependent, Modal Reduced-Order Model 1 {rom1}

Ensure reconstruction capability

Store reduced matrices

Model Control Inputs

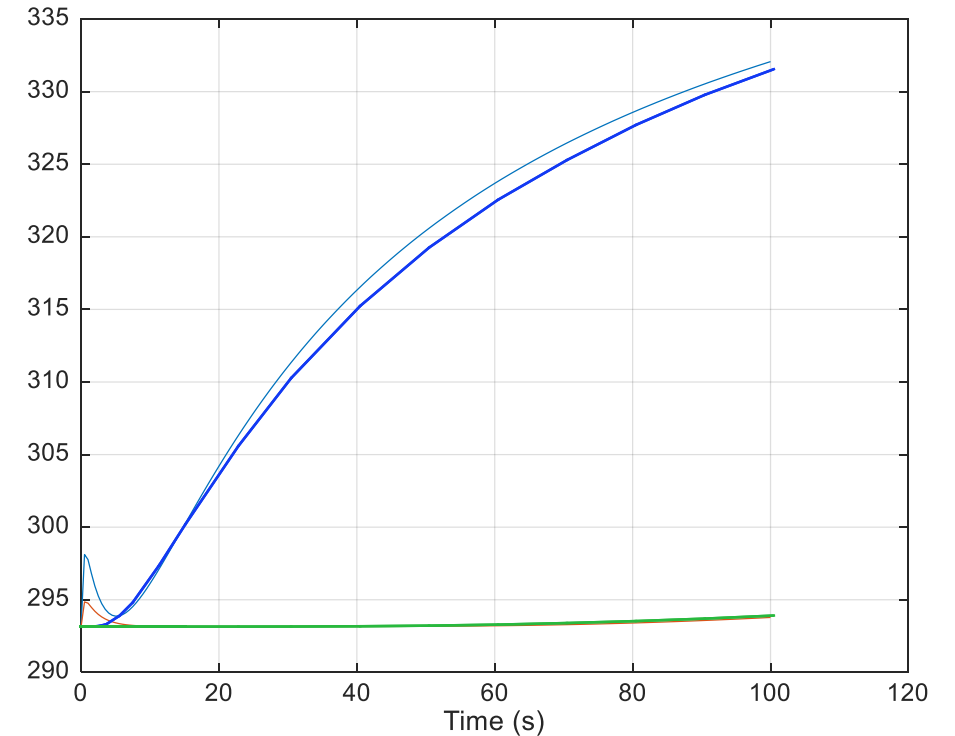
Reduced model input	Use	Training expression
Global reduced model inputs (T0)	<input checked="" type="checkbox"/>	373

Outputs

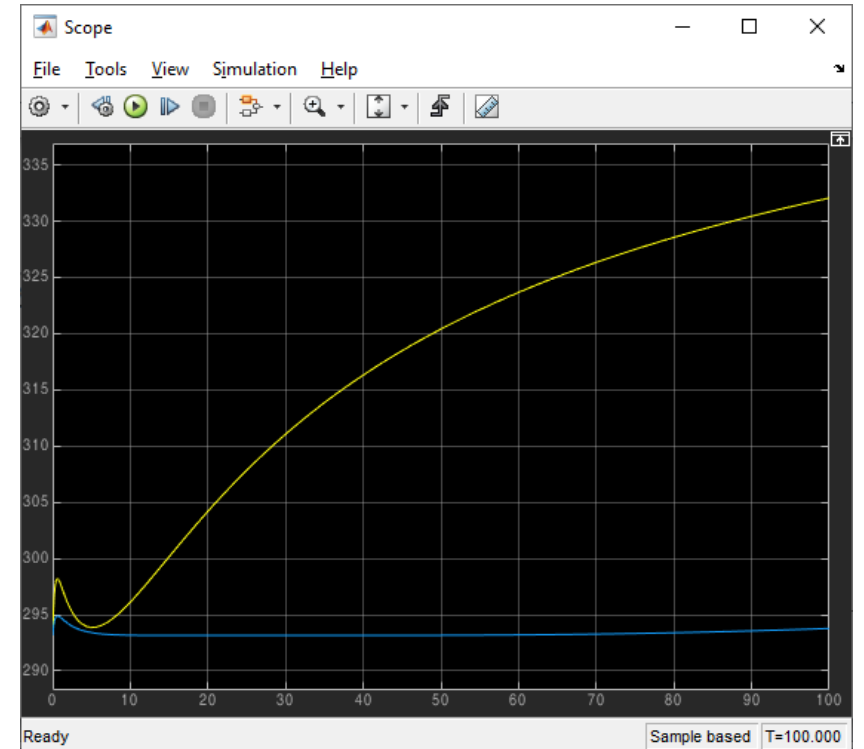
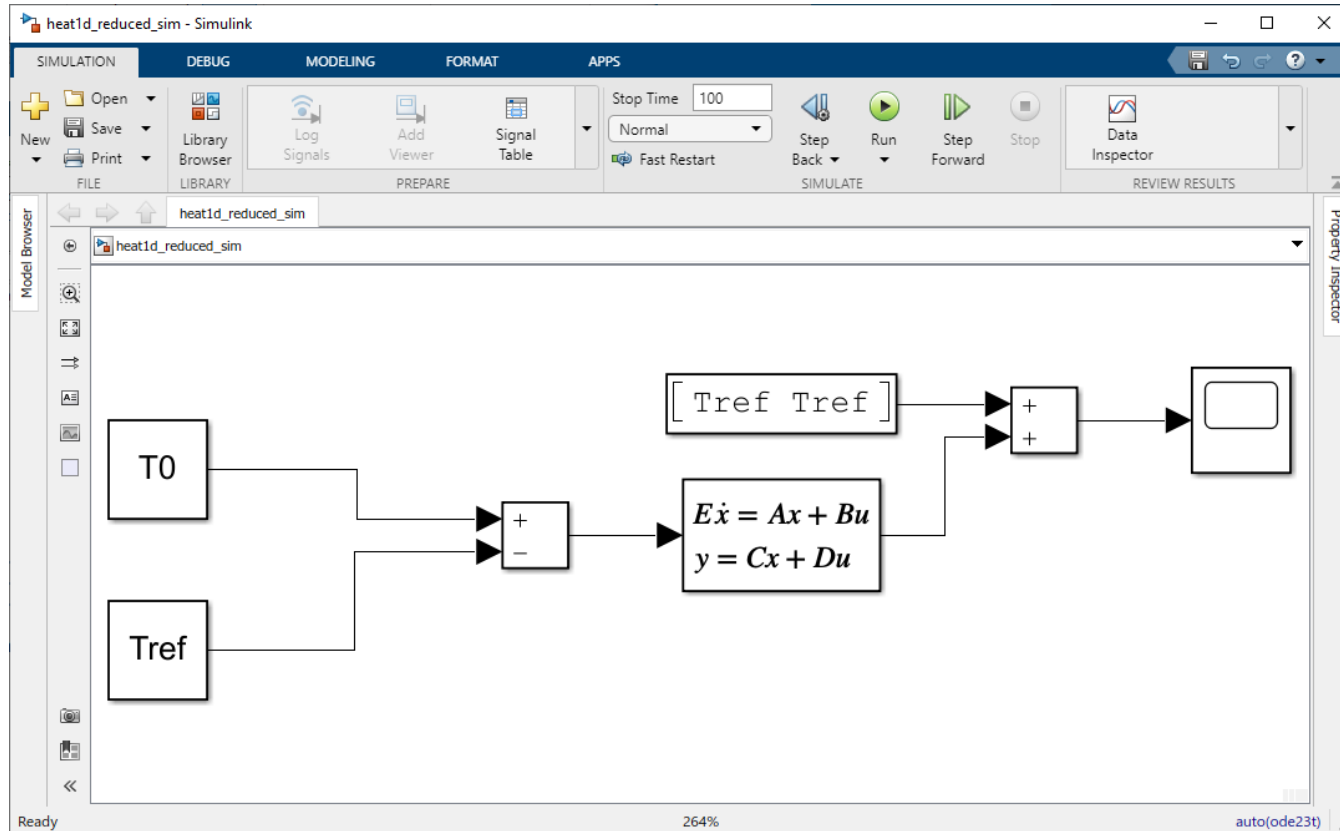
Variable	Expression	Description
out0	comp1.point1	Point Probe 1
out1	comp1.point2	Point Probe 2

Redukce řádu modelu (ROM)

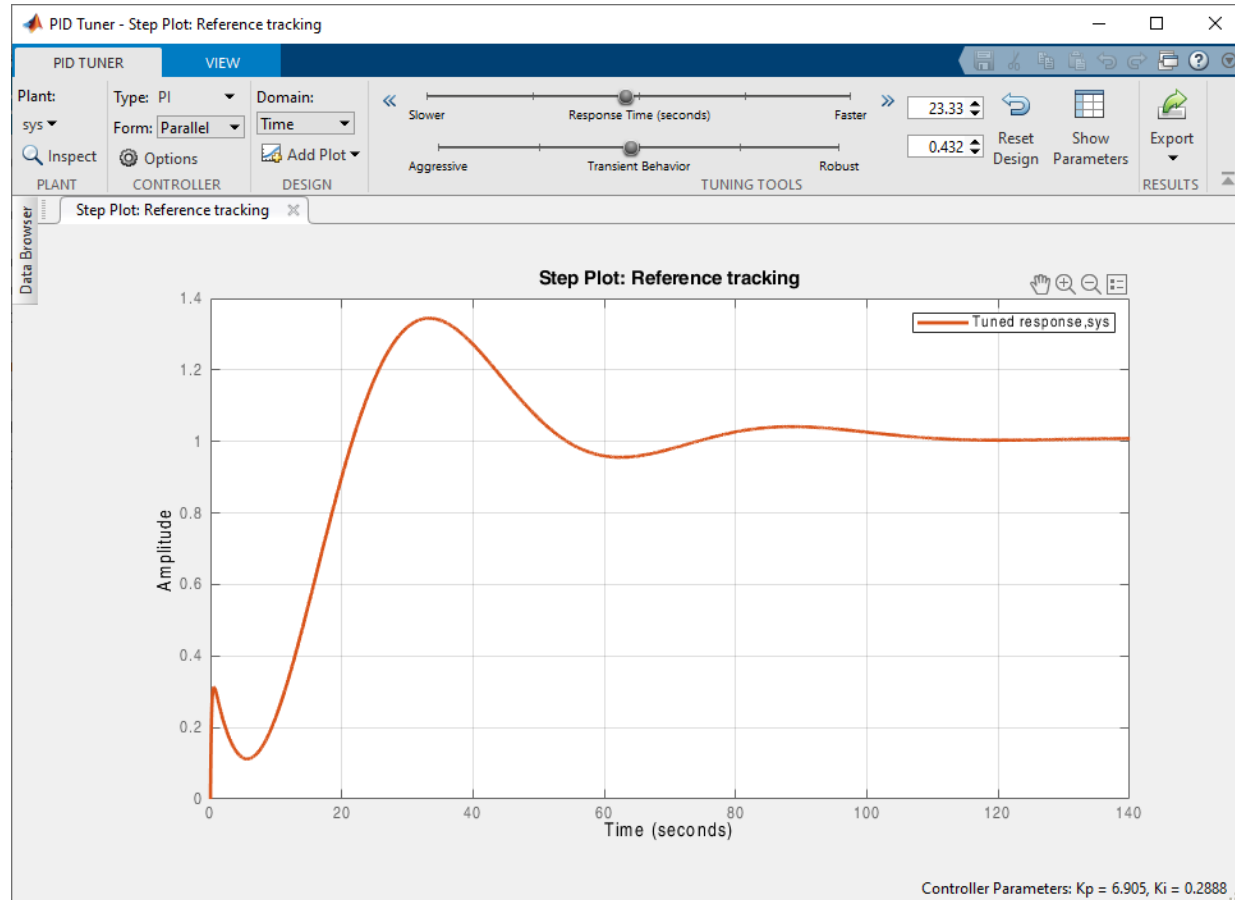
```
MR = mphreduction(model, 'rom1', ...  
    'out', {'MA' 'MB' 'A' 'B' 'C' 'D' 'Mc' 'x0'})  
  
Tref = 293.15;  
T0 = 373;  
input = T0-Tref;  
func = @(t,x) MR.MA*x + MR.MB*input';  
opt = odeset('mass', MR.Mc, 'Jacobian', MR.MA, 'stats', 'on');  
x0 = zeros(size(MR.MA,1),1);  
[t,x2] = ode23s(func,0:0.5:100,x0,opt);  
y2t = MR.C*x2';  
y20 = MR.C*MR.x0;  
y2 = y2t+y20;
```



Redukce řádu modelu (ROM)



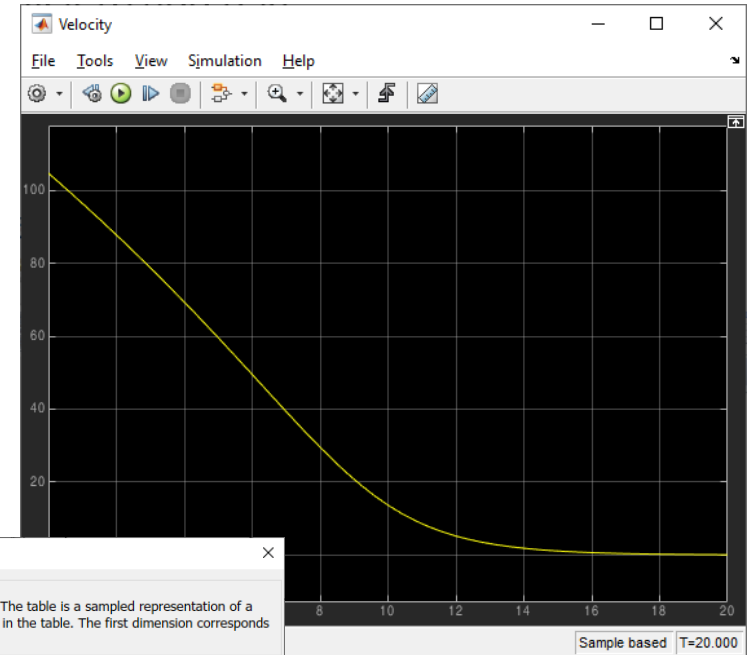
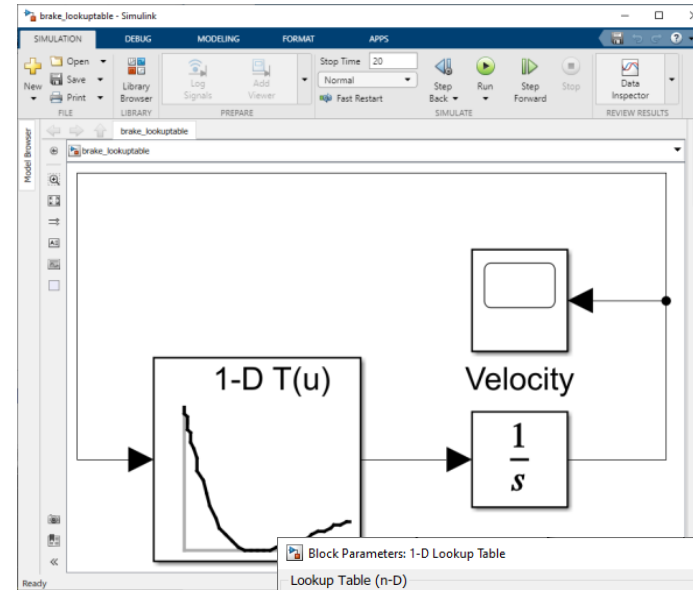
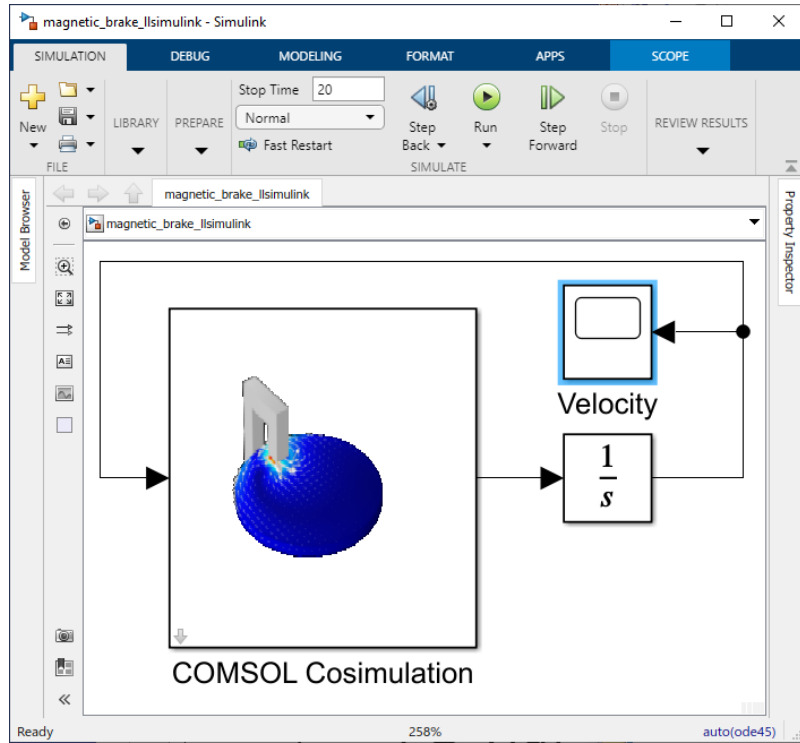
Návrh řízení: PID lazení



Controller Parameters	
	Tuned
K_p	6.9053
K_i	0.28875
K_d	n/a
T_f	n/a

Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	19.9 seconds
Settling time	103 seconds
Overshoot	34.5 %
Peak	1.34
Gain margin	7.81 dB @ 0.157 rad/s
Phase margin	43.2 deg @ 0.0857 rad/s
Closed-loop stability	Stable

LUT



Block Parameters: 1-D Lookup Table

Lookup Table (n-D)
Perform n-dimensional interpolated table lookup including index searches. The table is a sampled representation of a function in N variables. Breakpoint sets relate the input values to positions in the table. The first dimension corresponds to the top (or left) input port.

Table and Breakpoints Algorithm Data Types

Number of table dimensions: 1

Data specification: Table and breakpoints

Table data: y

Breakpoints specification: Explicit values

Breakpoints 1: u

Edit table and breakpoints...

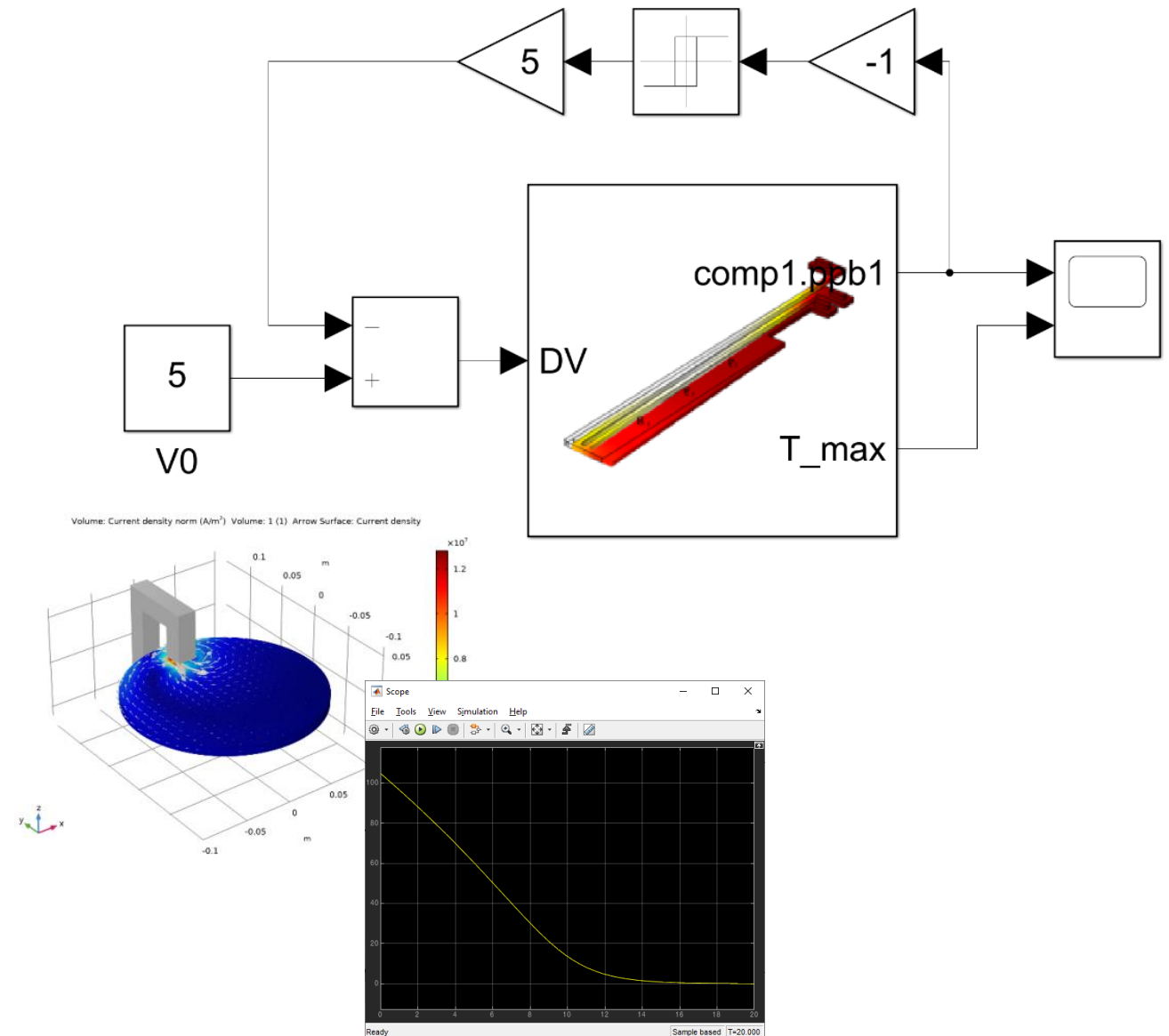
OK Cancel Help Apply



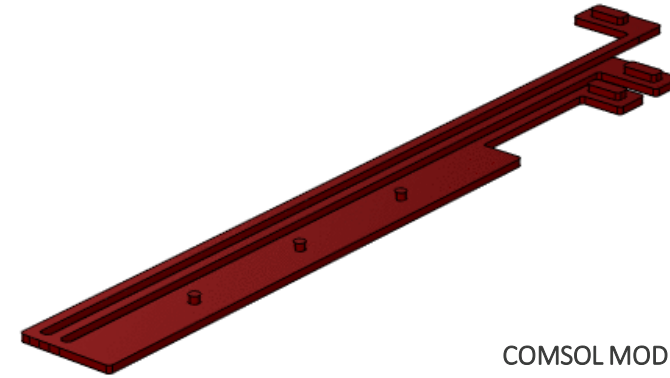
Extrakce dat

Modely

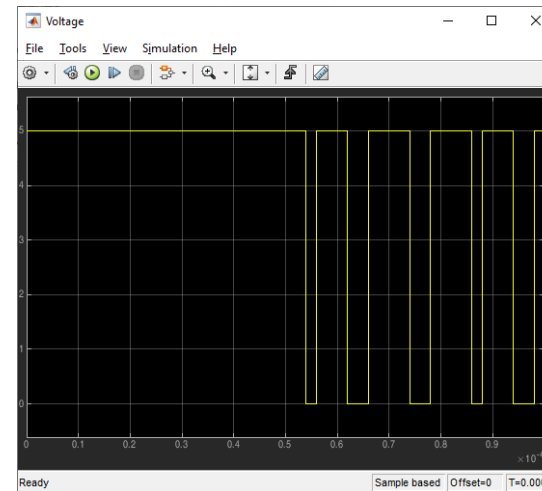
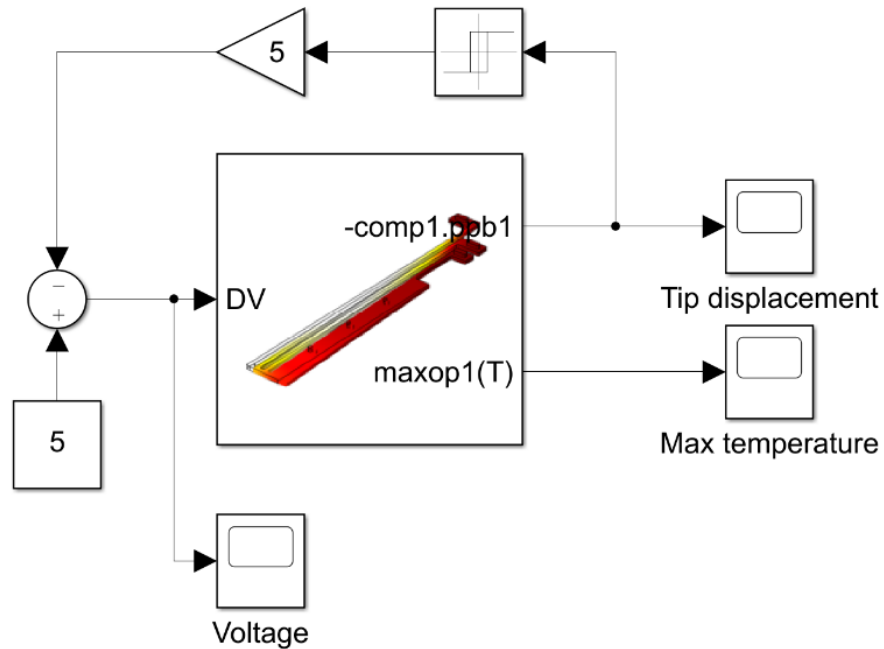
- Thermal actuator
 - Multiphysics
- Inverted pendulum
 - Multibody dynamics
- Capacity fade
 - Battery
- Battery control thermal
 - Multiphysics battery
- Disc brake
 - Static electromagnetics



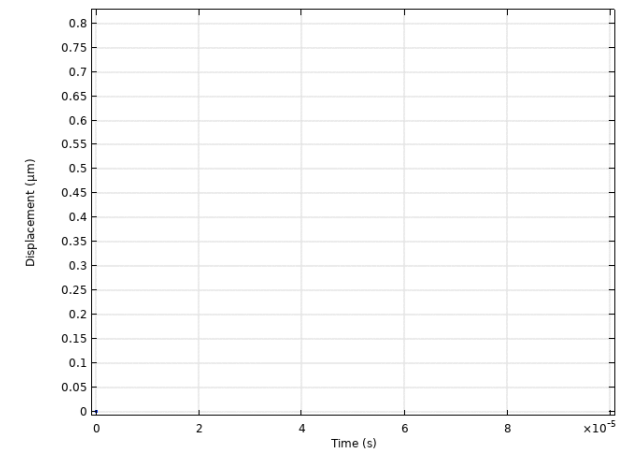
Thermal Actuator



COMSOL MODEL
Electrothermal deformation



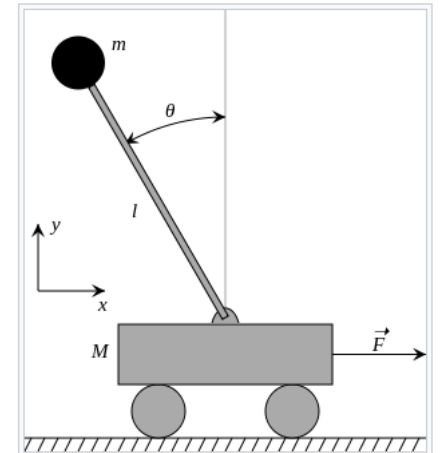
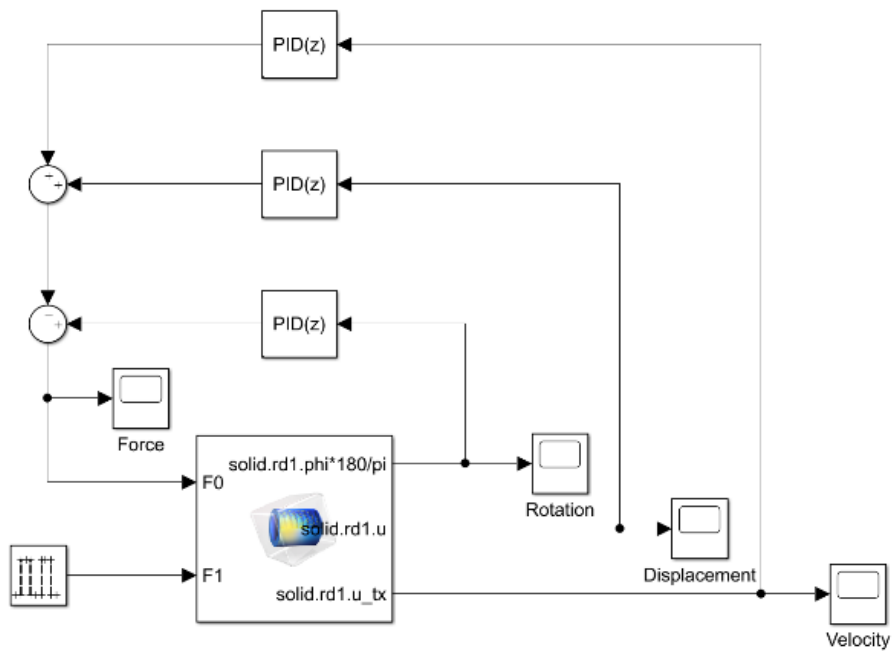
INPUT PARAMETER
Voltage



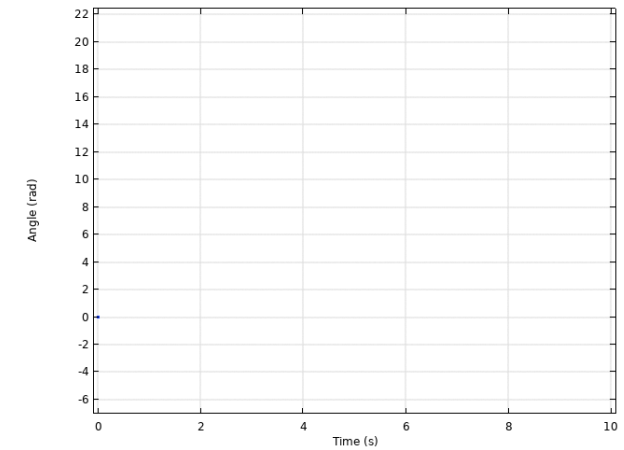
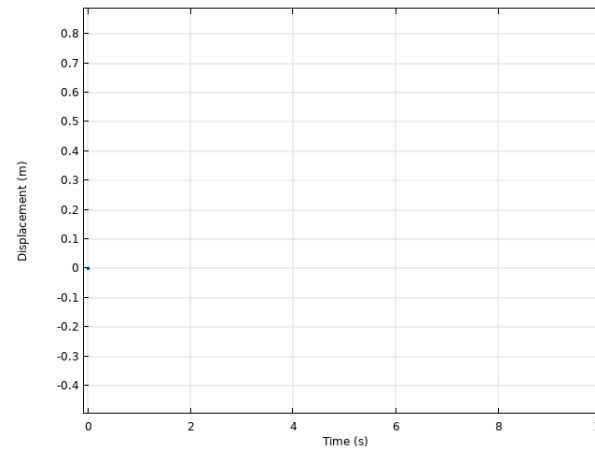
CONTROL PARAMETER
Tip displacement

Inverted Pendulum

INPUT PARAMETER
Force on cart



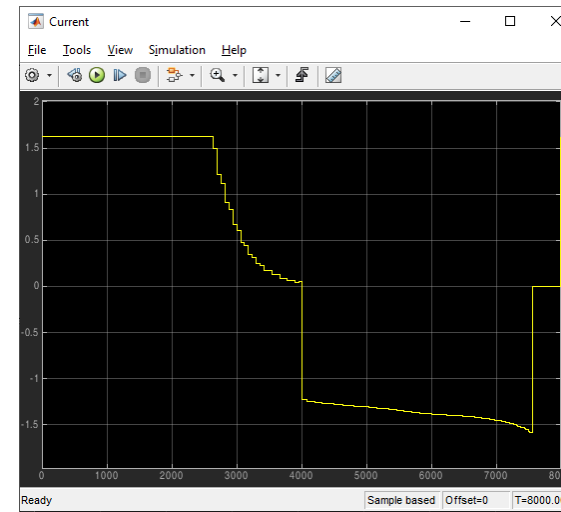
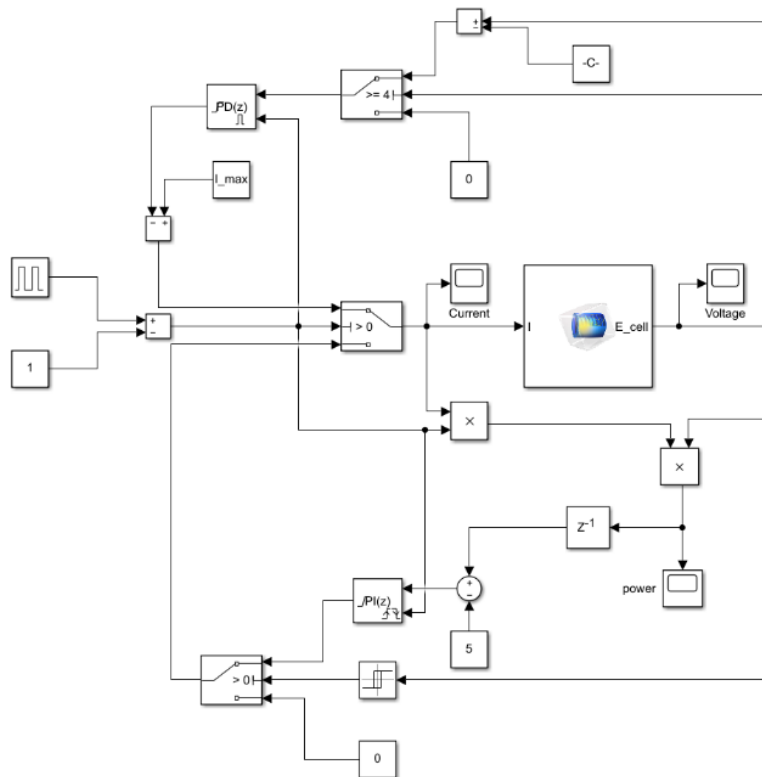
COMSOL MODEL
Multibody dynamics



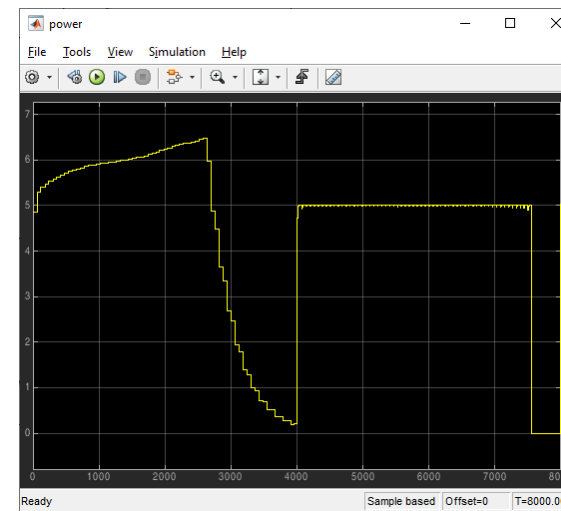
CONTROL PARAMETER
Tilting angle, base pendulum position, pendulum velocity

Capacity Fade

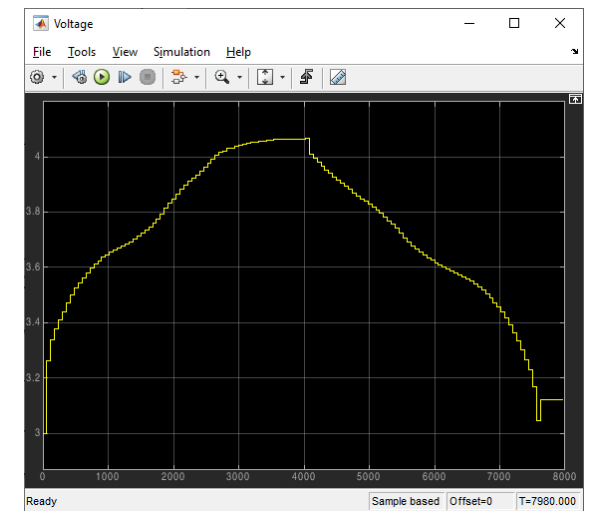
COMSOL MODEL
Battery



INPUT PARAMETER
Current



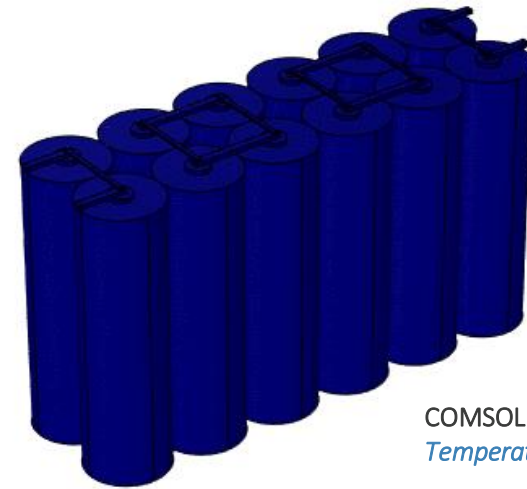
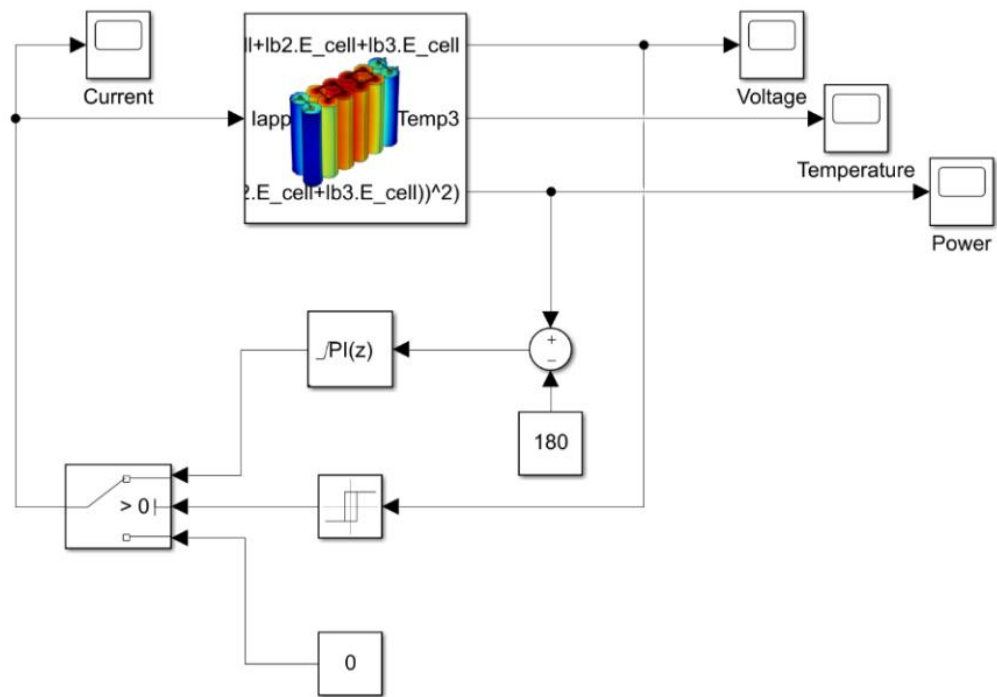
CONTROL PARAMETER
Voltage; limiting voltage during charge, discharge at constant power



Battery Thermal Control

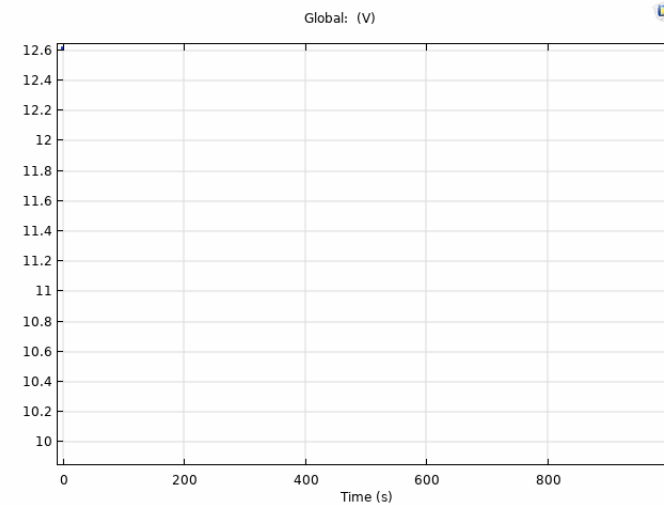
INPUT PARAMETER

Current



COMSOL MODEL

Temperature distribution

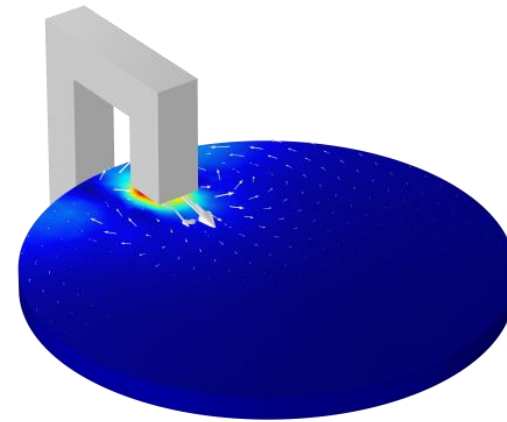


CONTROL PARAMETER

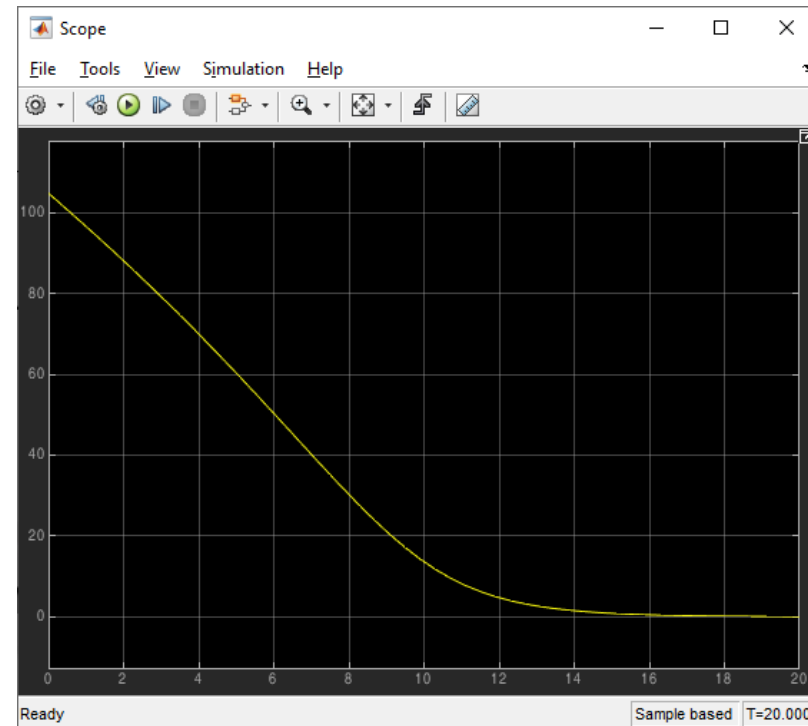
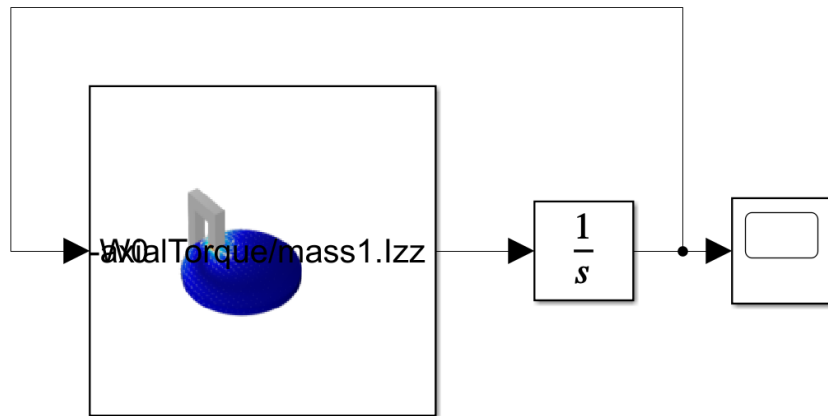
Voltage, power

Magnetic Brake

INPUT PARAMETER
Angular velocity



COMSOL MODEL
Current density



CONTROL PARAMETER
Torque