

# Integrace multifyzikálního FEM modelu do prostředí MATLAB® a Simulink®



Matouš Lorenc

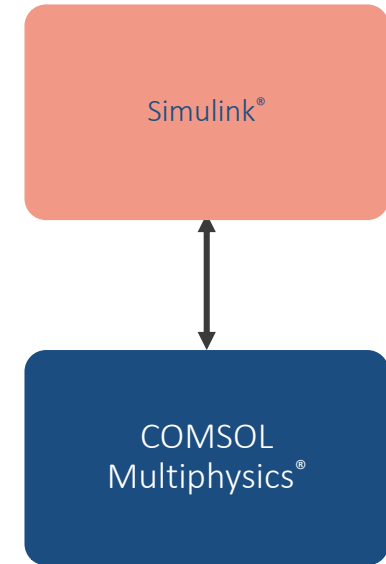
HUMUSOFT s.r.o.

[lorenc@humusoft.cz](mailto:lorenc@humusoft.cz)

284011745

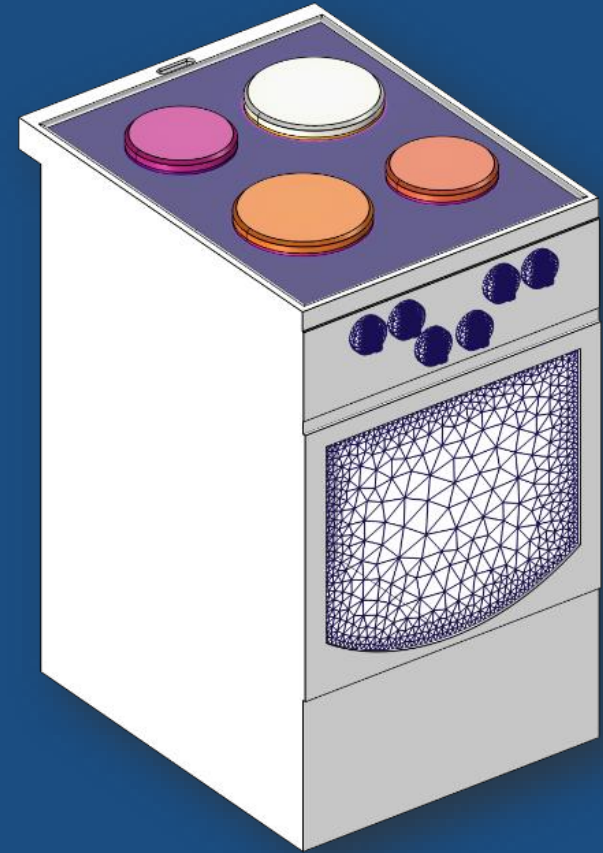
# LiveLink™ propojení

- 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

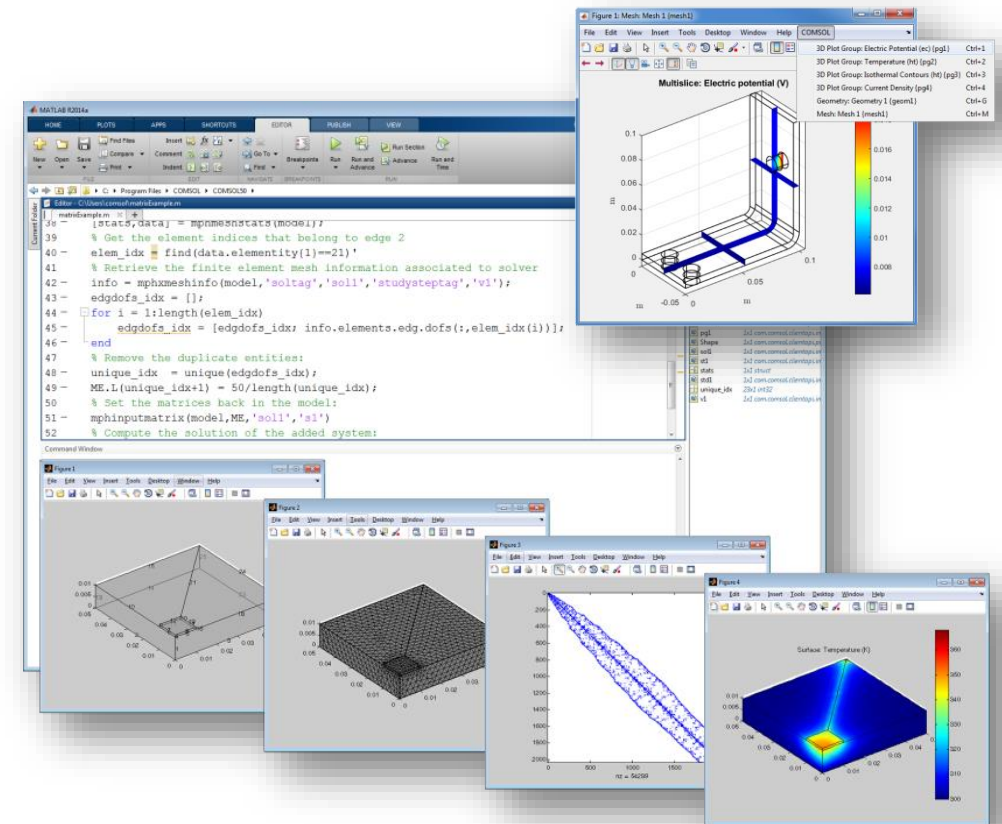
- COMSOL Multiphysics
  - PDE Toolbox -> FEMLAB -> COMSOL Multiphysics / Server / Compiler
  - LiveLink for MATLAB & LiveLink for SIMULINK
- MATLAB
  - Data pre/postprocessing
    - Signal Processing, Image Processing
  - Plná kontrola nad nastavením modelu
    - MATLAB Script skrz COMSOL API
  - Externí 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



The image displays the COMSOL Multiphysics 5.5 with MATLAB interface. The central window shows a 3D plot of a vacuum flask with a temperature distribution. The plot is titled "Surface: Temperature (K)" and shows a color gradient from 315 K (red) to 360 K (blue). The plot is set to "Revolution 2D" and "Automatic" view. The console window shows the following text:

```
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 ml for more information  
Type addmodellibrary to open the Model Library
```

The code editor shows the following MATLAB code:

```
1 model = mphopen('electric_stove');  
2 %  
3 Td_max = str2double(model.param.get('Td_max'));  
4 I1 = str2double(model.param.get('I1'));  
5 ht = model.physice('ht');  
6 T_control = 29;  
7  
8 %  
9 for i = 1:100  
10     T_max = (Td_max - (9-I1)*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('sol1').run;  
19  
20     if i==1  
21         opt1 = model.result.dataset.create('opt1','OutPoints3D');  
22         opt1.set('points', {'40;0;0'});
```

The MATLAB logo and license information are also visible:

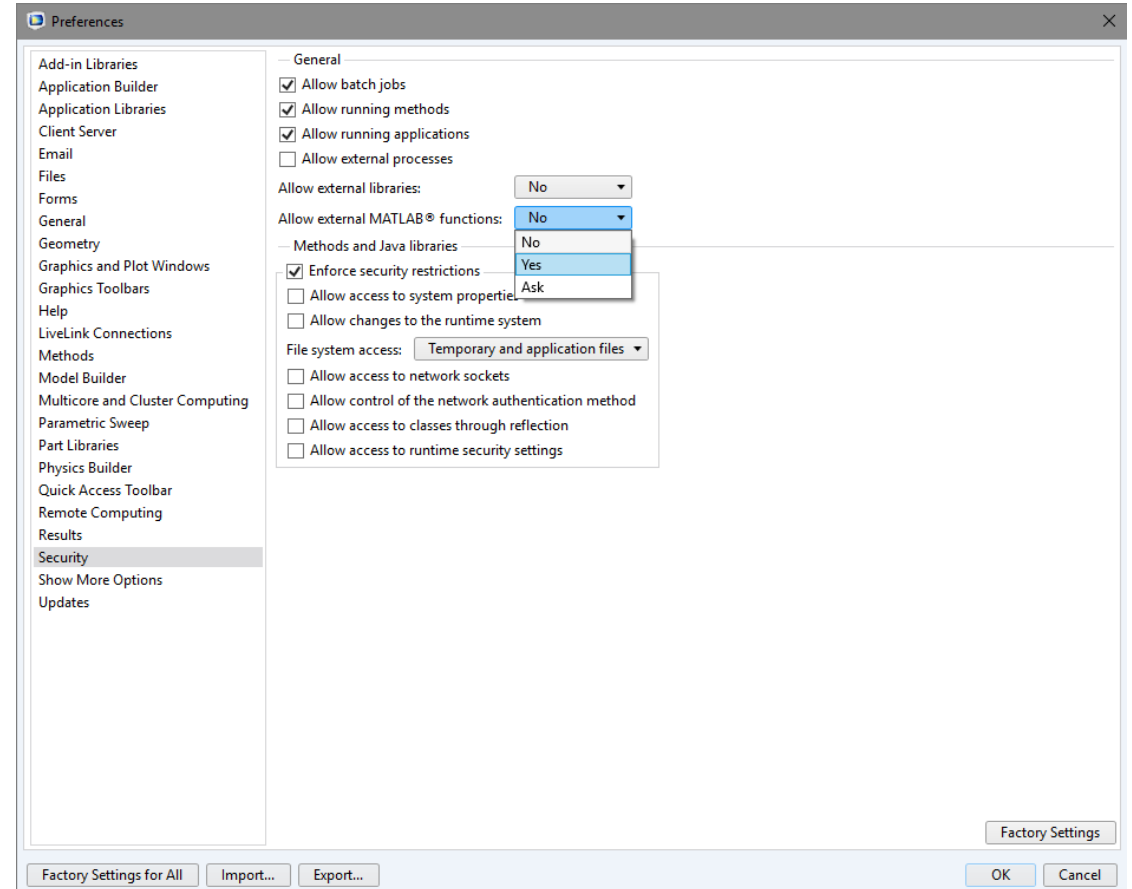
R2020a (9.8.0.1323502)  
64-bit (win64)  
February 25, 2020  
License Number: 40467207

© 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

# „Odemčení“ funkcí

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



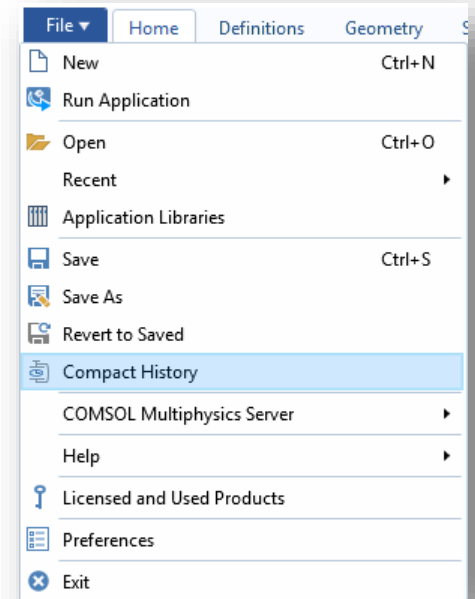
# Funkcionalita

- 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



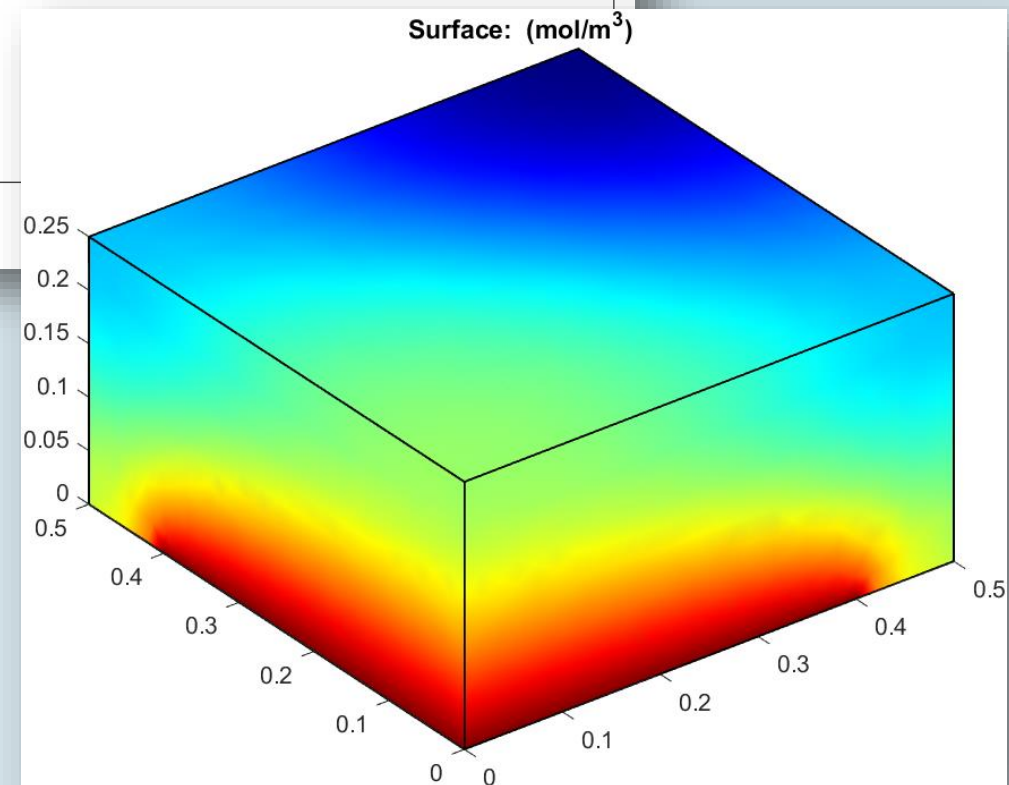
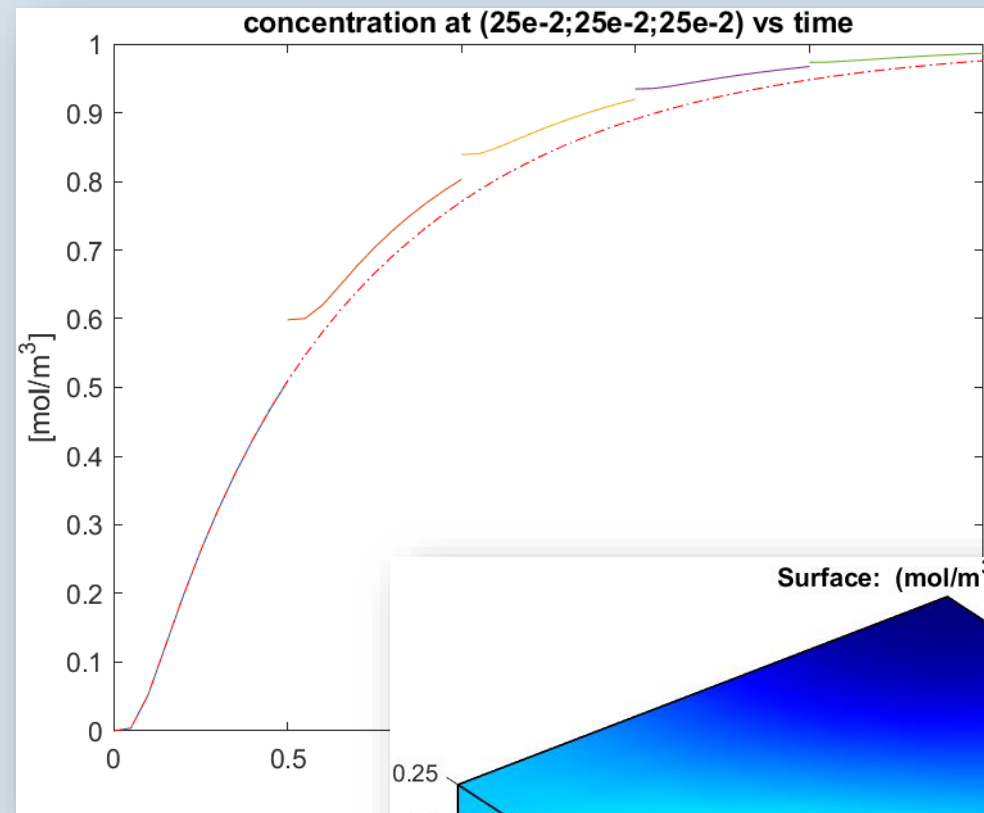
# Ukládání a struktura m-file

- 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



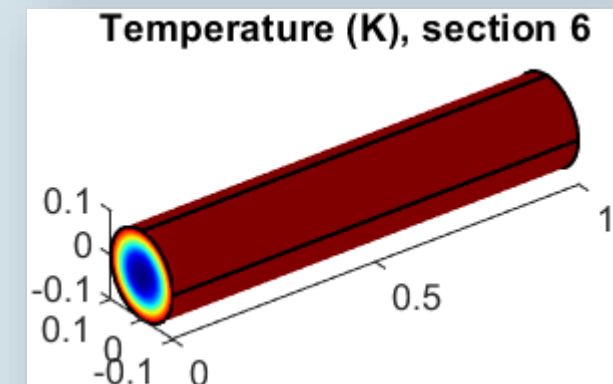
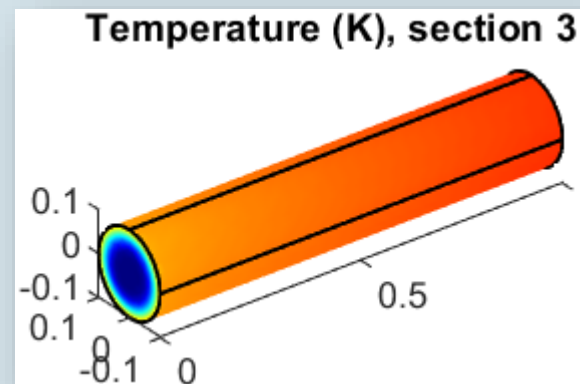
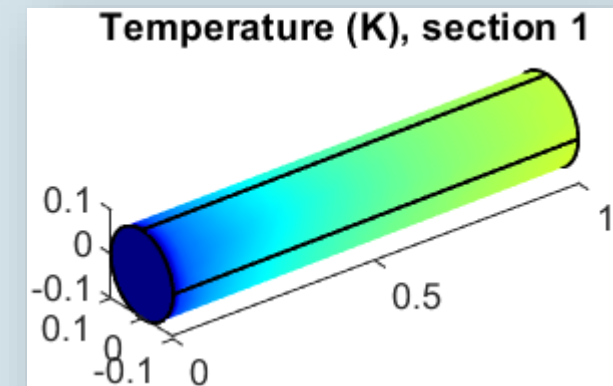
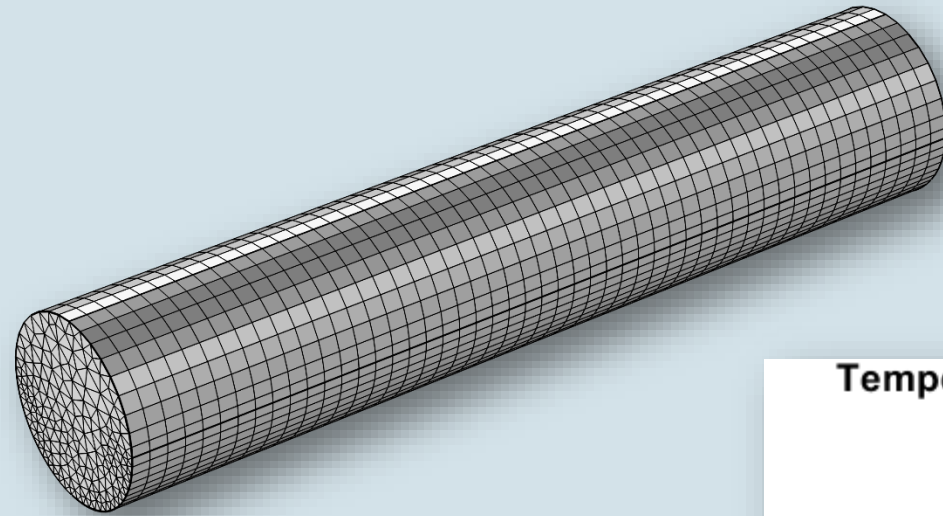
## Spouštění modelu ve smyčce: chemický reaktor

- 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  $i+1$

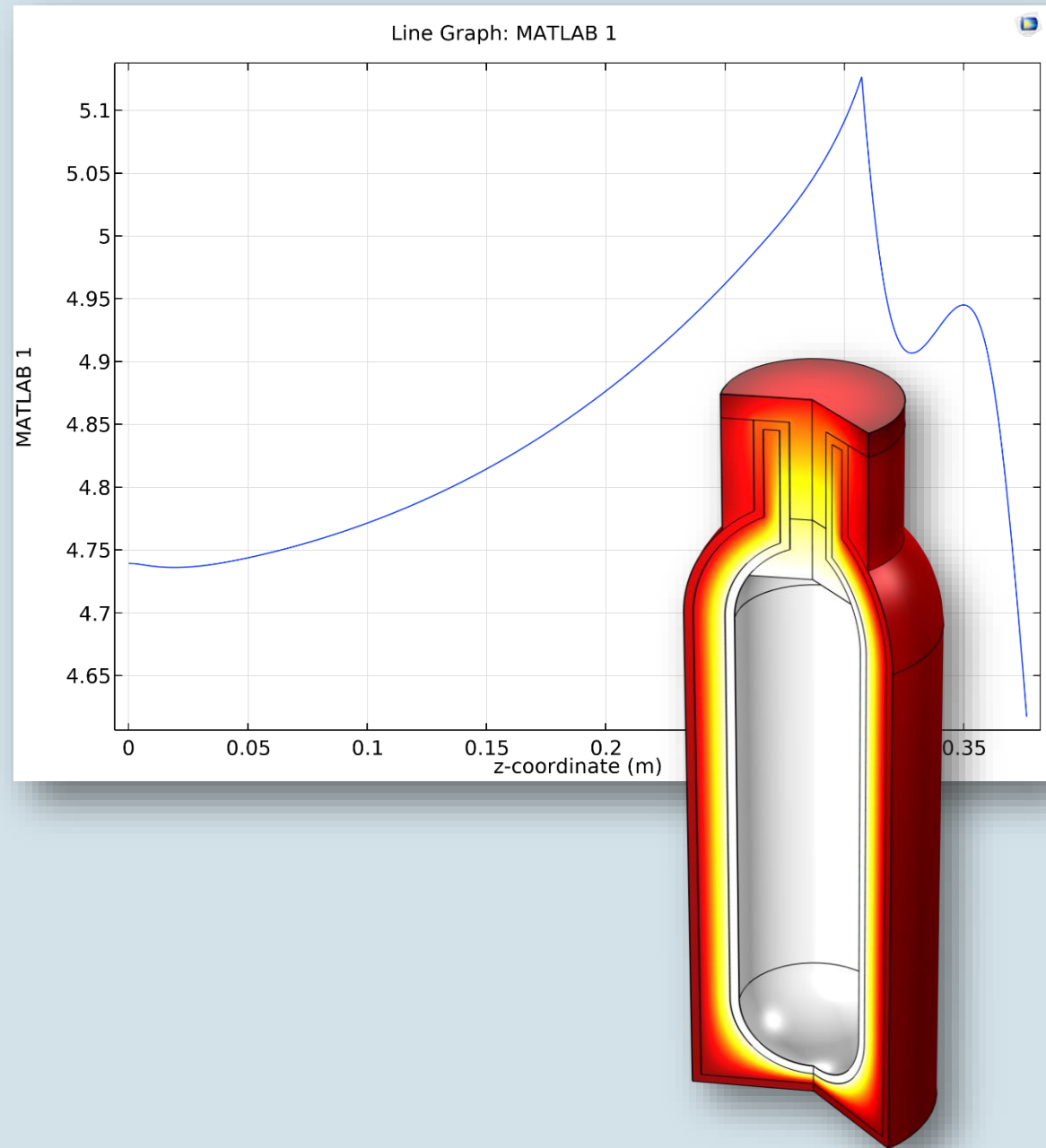


# MATLAB funkce v COMSOL Multiphysics

- 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*)

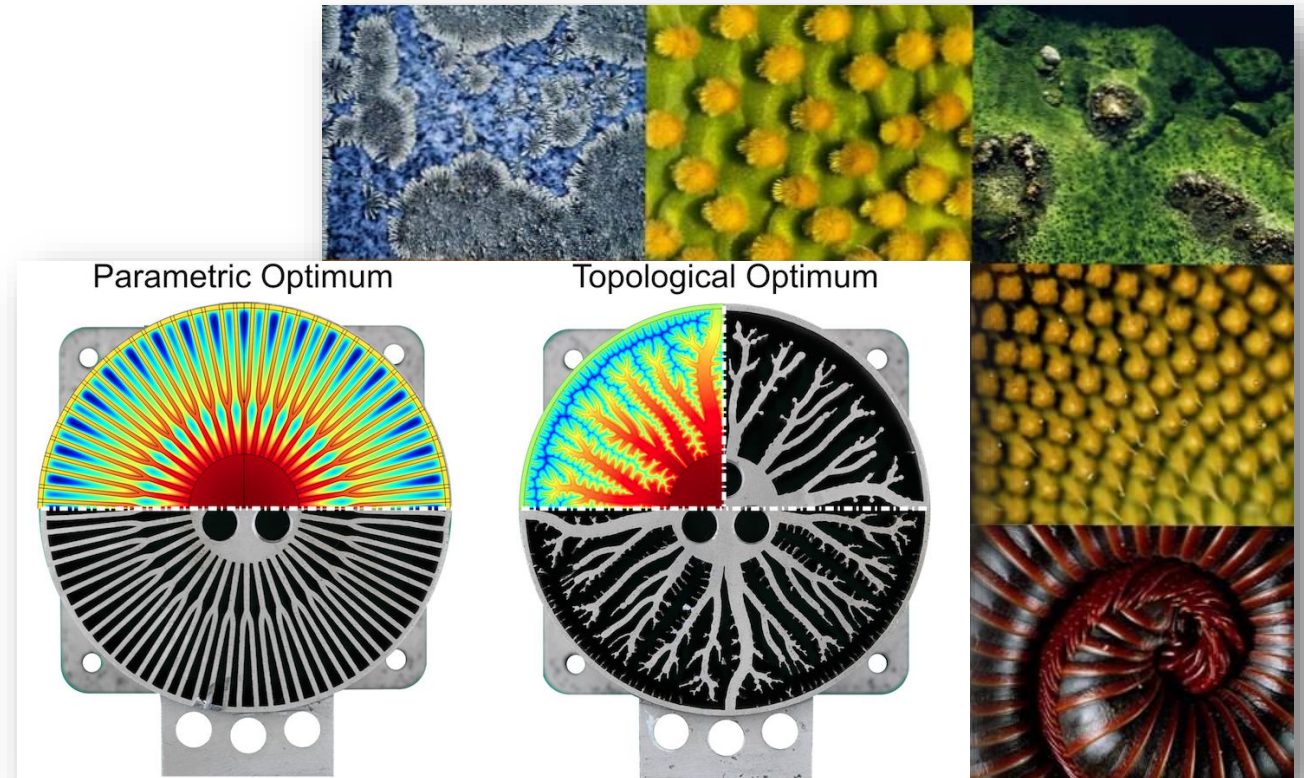
# Použití MATLAB materiálových funkcí: termoska

- 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

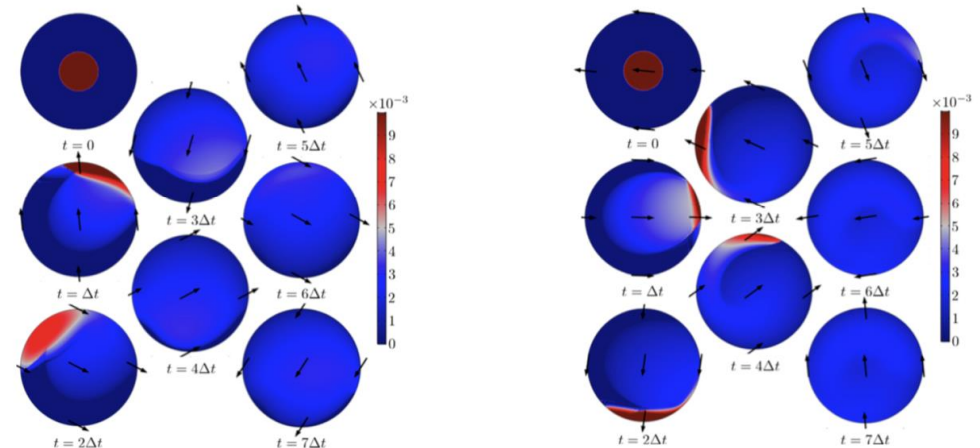
- COMSOL
  - (Bez)gradientní metody součástí Optimization Module
  - Rozměrová, tvarová a topologická optimalizace
- MATLAB
  - (Global) Optimization Toolbox
  - Genetické algoritmy
  - Monte Carlo
  - Uzavření modelu do smyčky





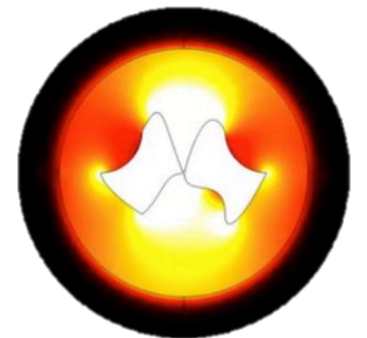
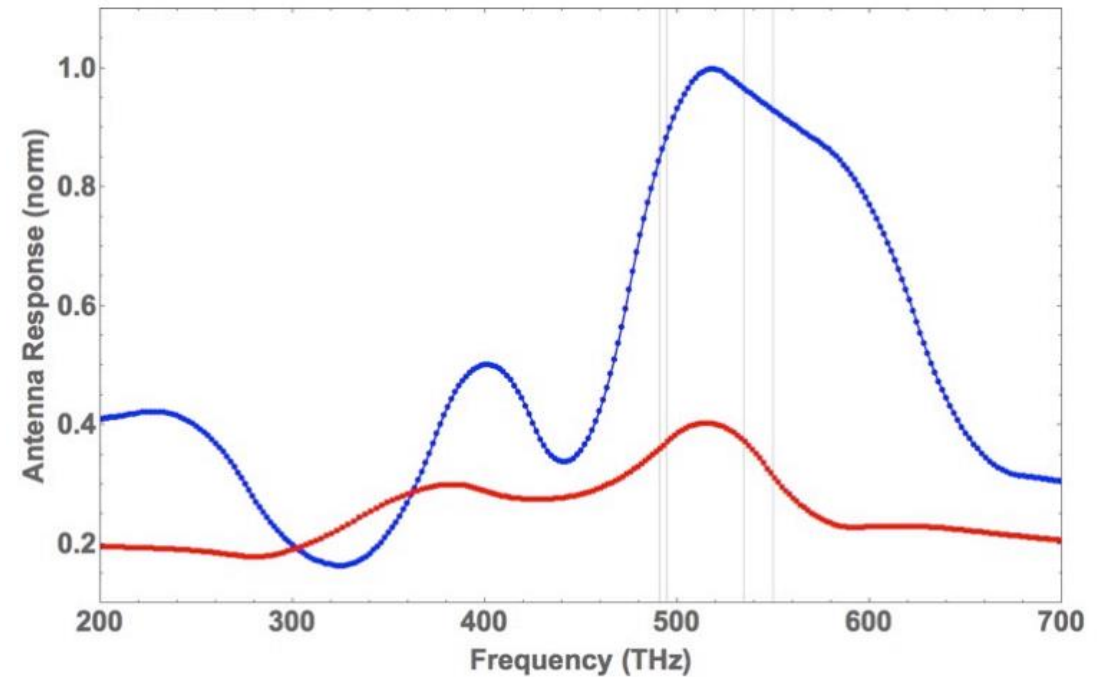
# Jak připravit nejlepší palačinky?

- 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

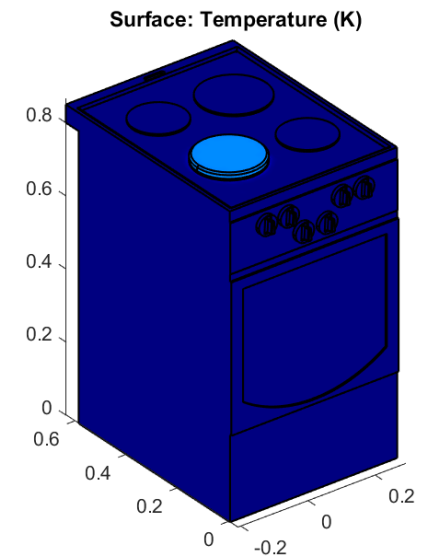
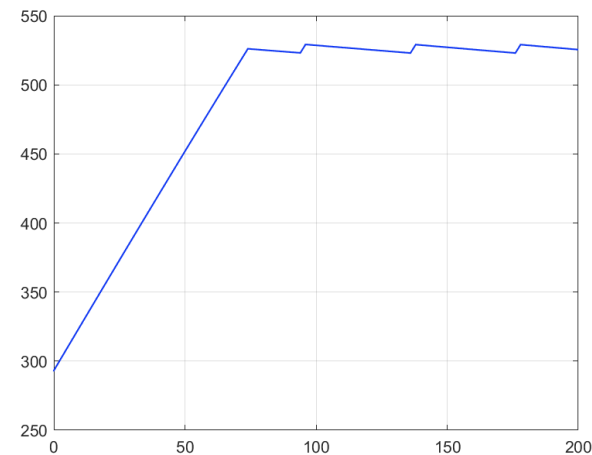
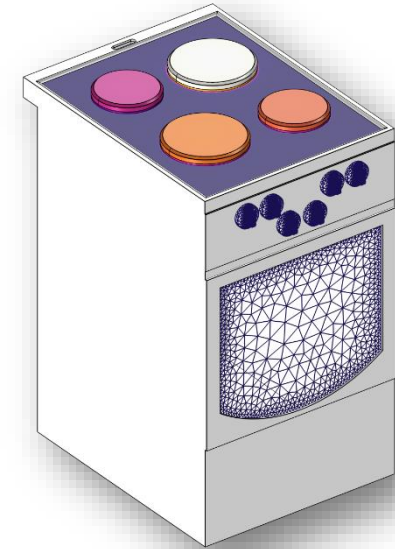
- Dipól nanoanténa s rezonanční frekvencí okolo 500 THz
- Využití genetických algoritmů pro vytvoření antény s ideální vyzařovací charakteristikou a nejnižšími ztrátami





# Elektrická trouba

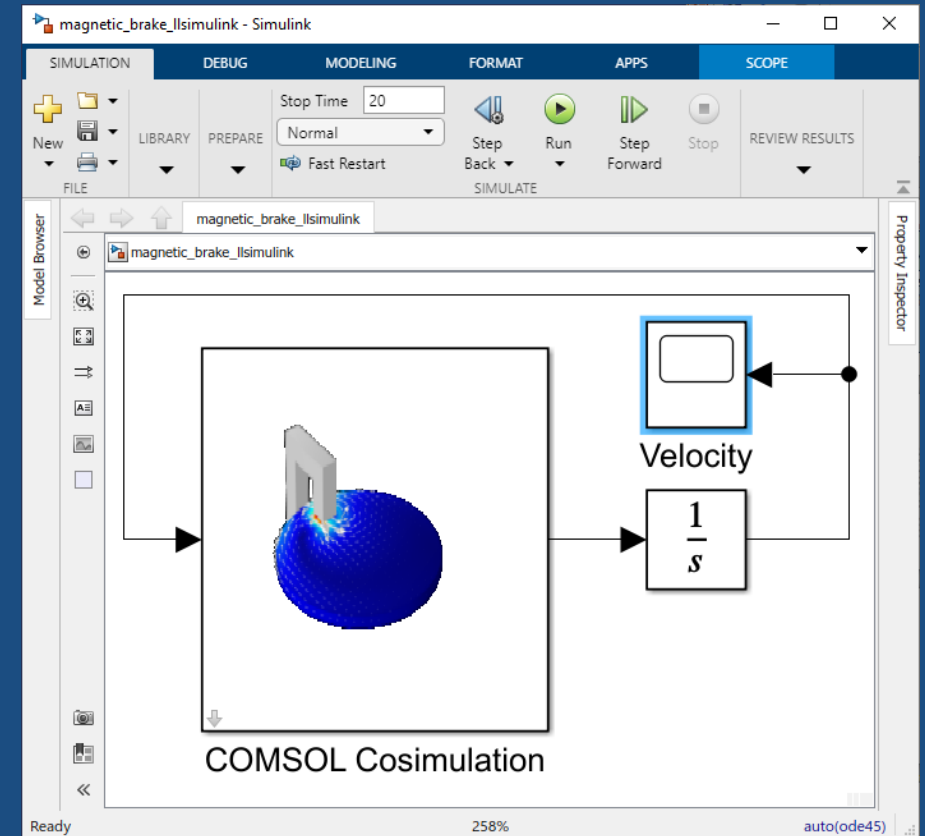
- Regulátor výkonu
- Trouba je ovládaná diskrétními hodnotami na vstupu
- Fyzikální model nastavený v COMSOL spouštěný a ovládaný v MATLAB
- Načítání .mph souboru, předávání parametrů a výsledků, vykreslování grafů



# 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®)

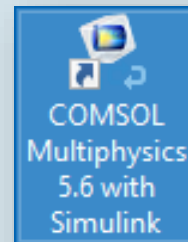
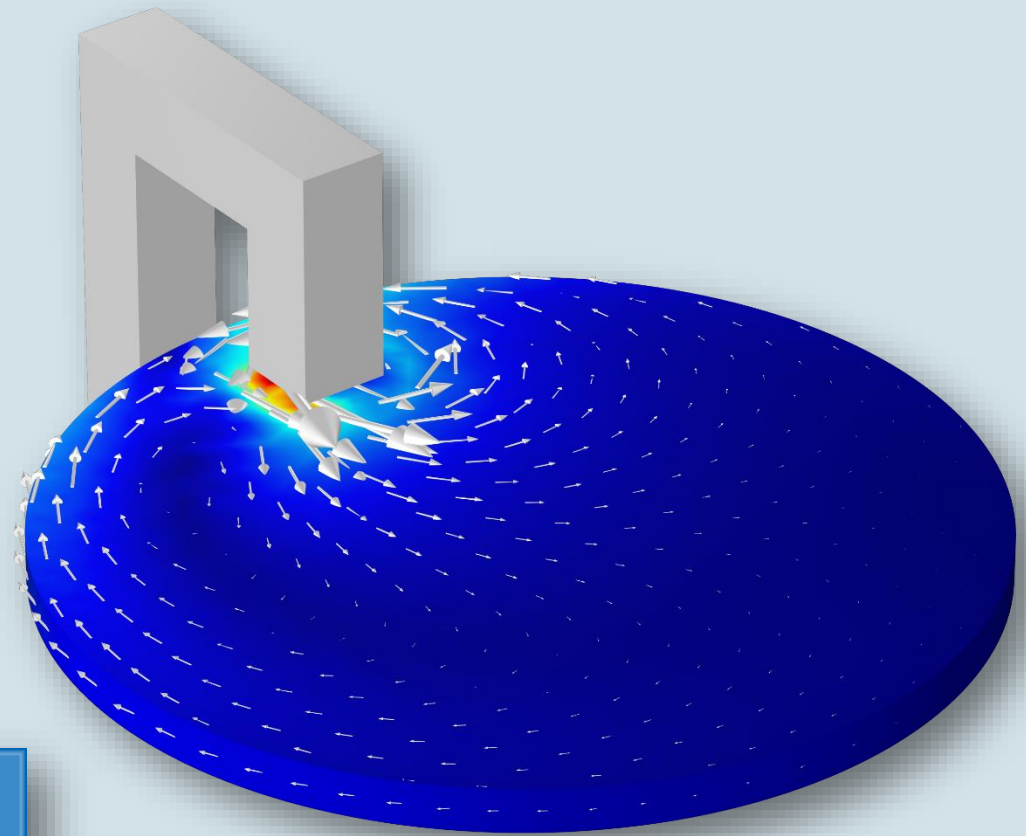


LiveLink™ for Simulink®

*Výpočet úhlové rychlosti ze  
Simulink*

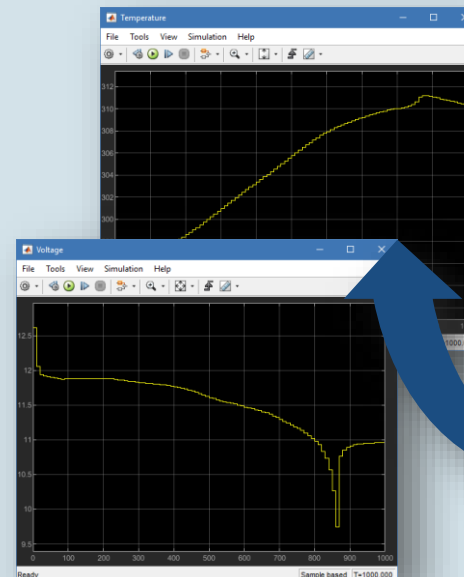
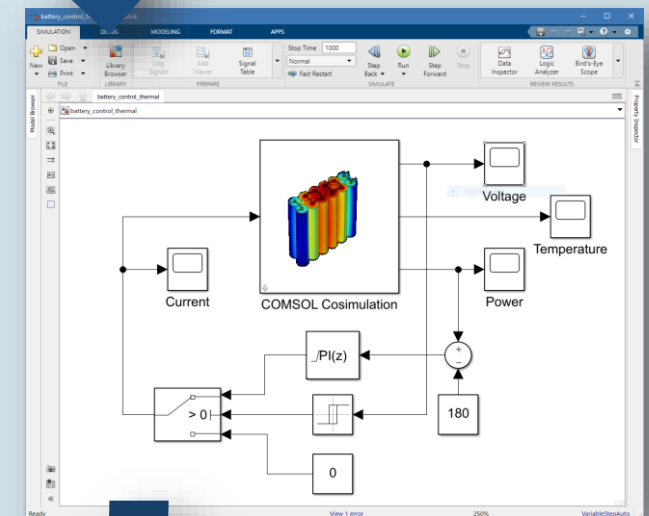
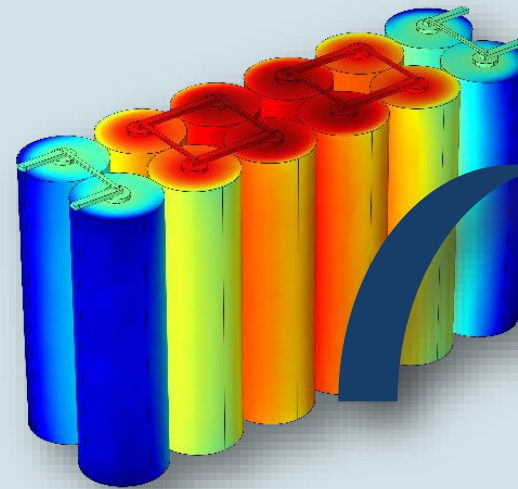
## LiveLink™ for Simulink®

- 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) {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

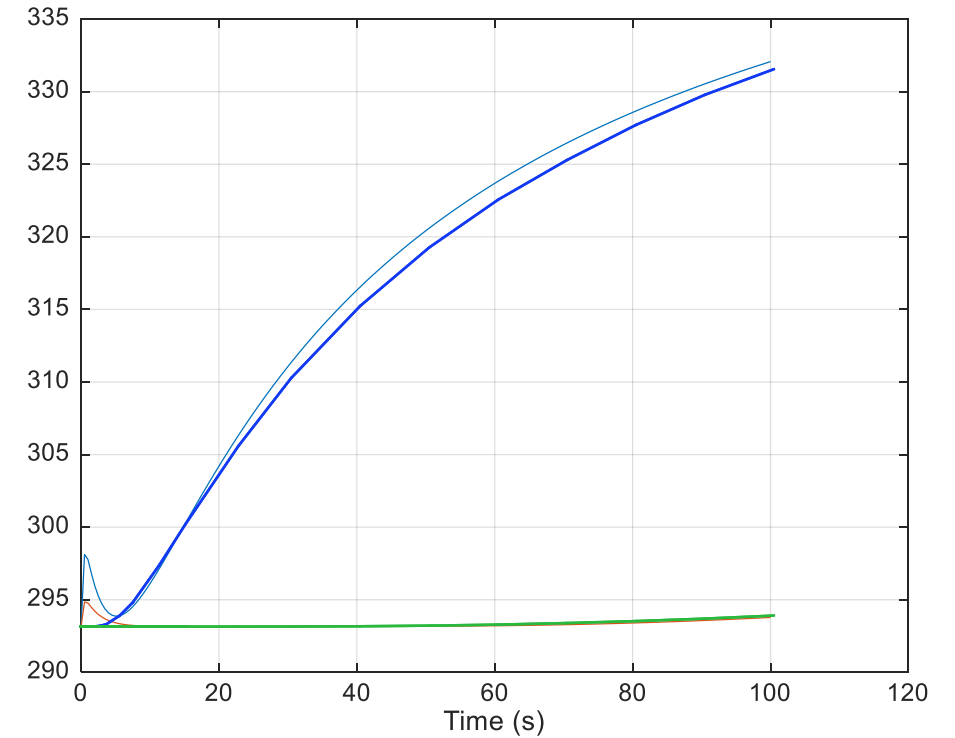
**Outputs**

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

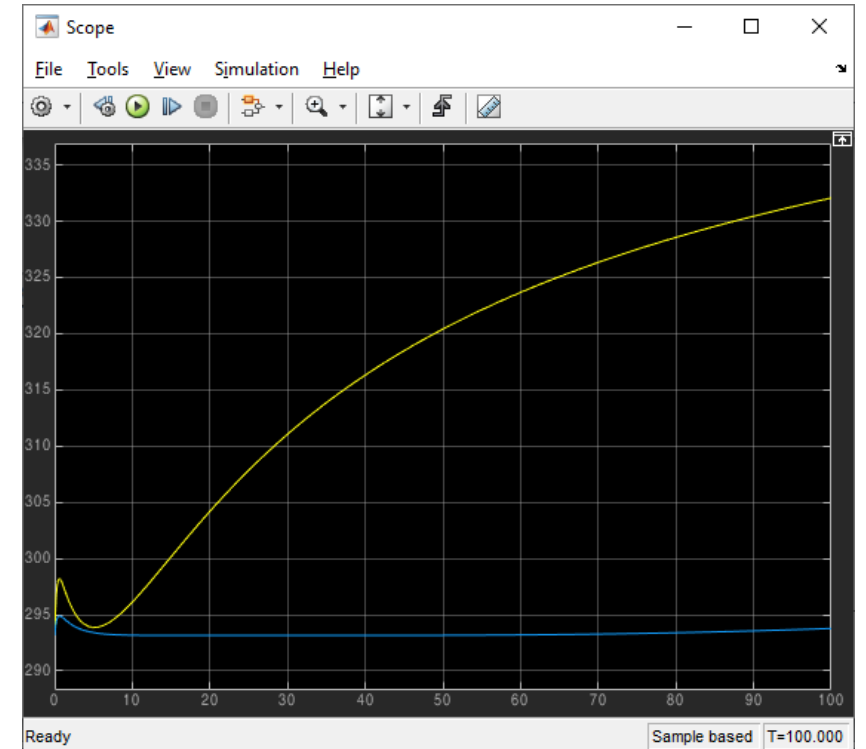
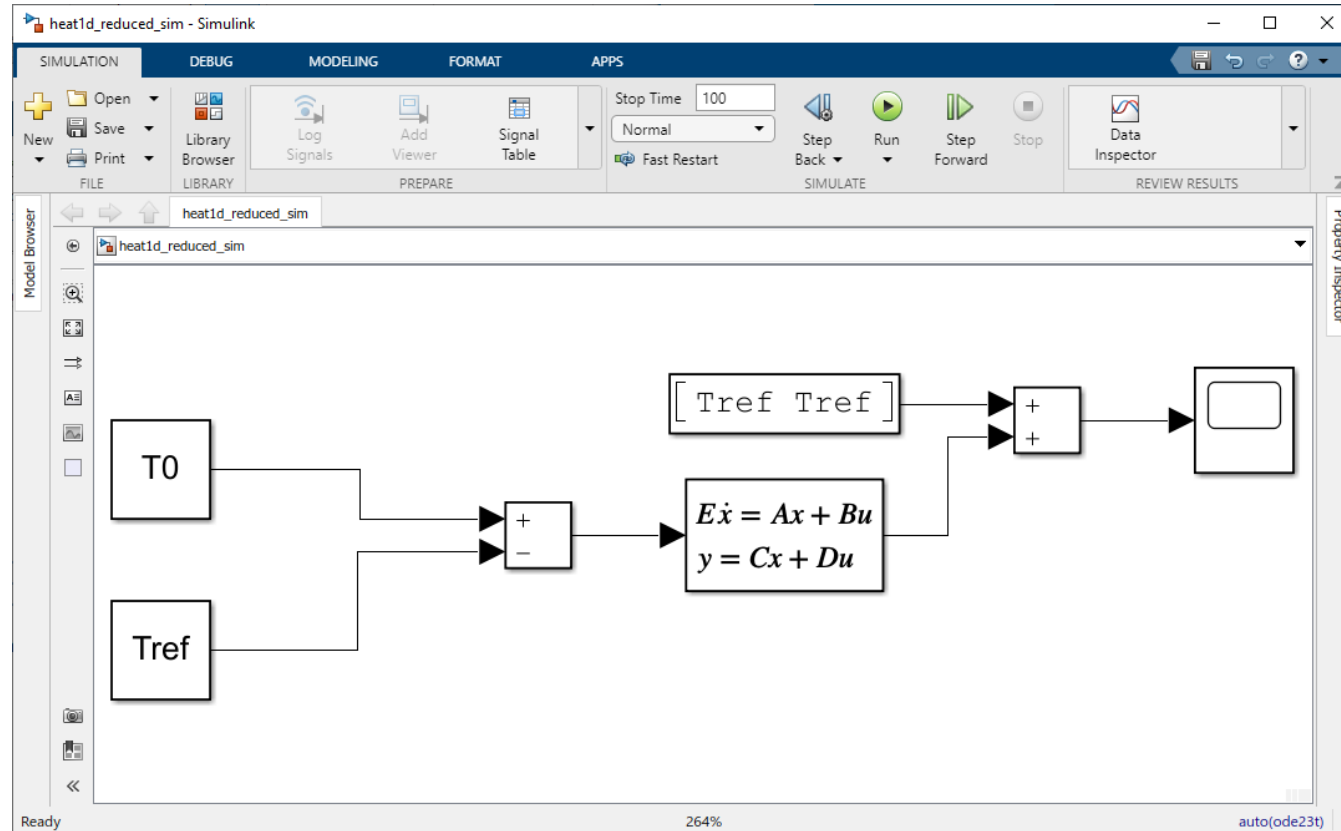


# Redukce řádu modelu (ROM)

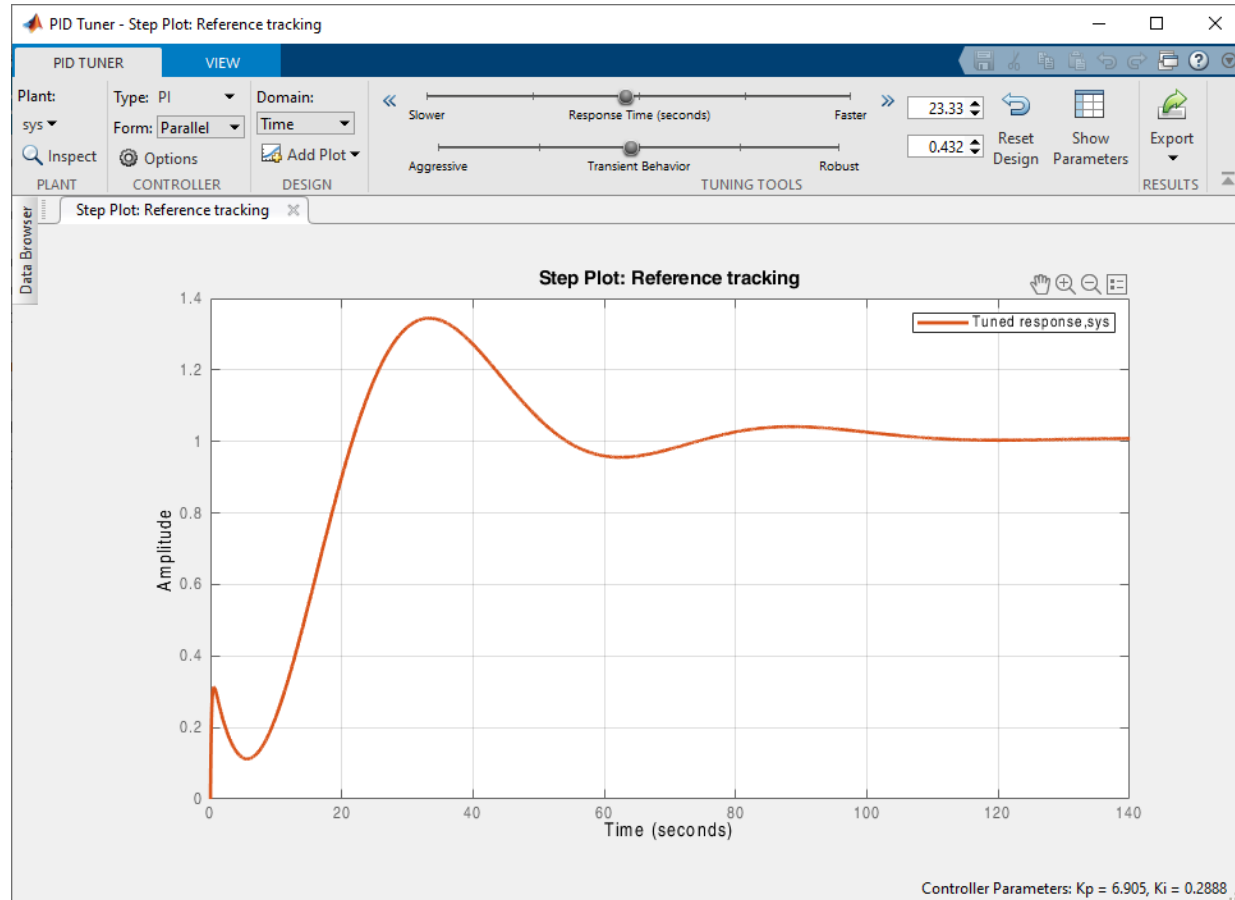
```
MR = mphreduction(model, 'rom1', ...  
    'out', {'MA' 'MB' 'A' 'B' 'C' 'D' 'Mc' 'x0'})  
  
Tref = 293.15;  
T0 = 373;  
input = T0-Tref;  
func = @(t,x) MR.MA*x + MR.MB*input';  
opt = odeset('mass', MR.Mc, 'Jacobian', MR.MA, 'stats', 'on');  
x0 = zeros(size(MR.MA,1),1);  
[t,x2] = ode23s(func,0:0.5:100,x0,opt);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



# Redukce řádu modelu (ROM)



# Návrh řízení: PID lazení

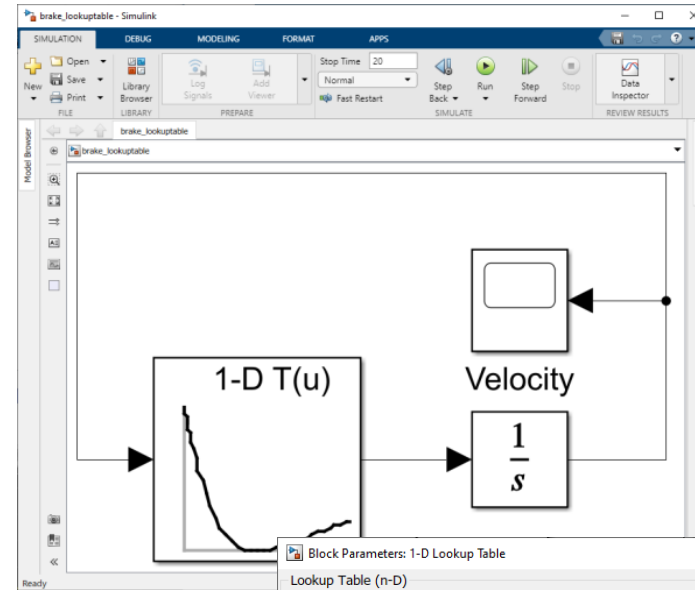
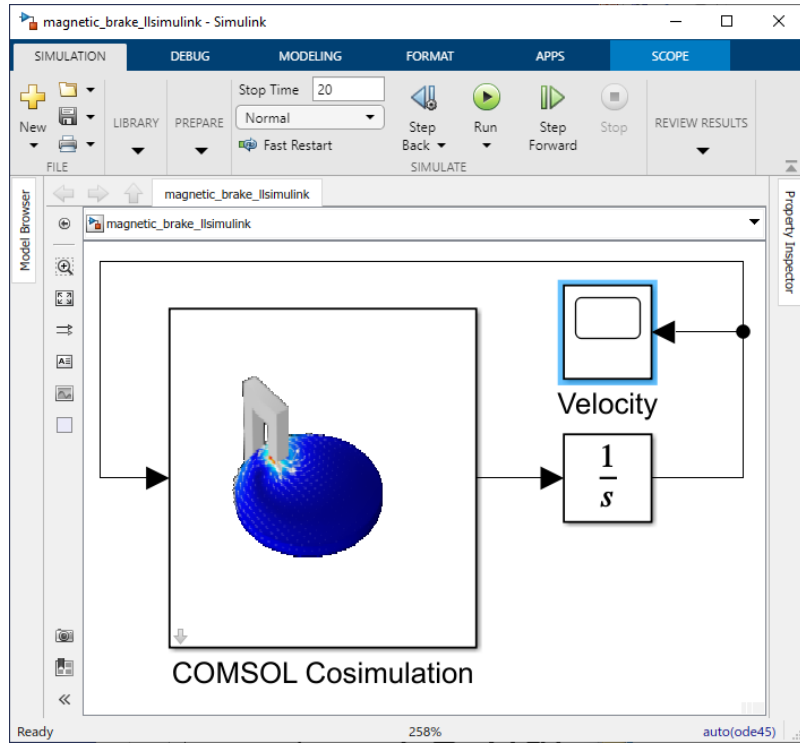


Controller Parameters	
	Tuned
Kp	6.9053
Ki	0.28875
Kd	n/a
Tf	n/a

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

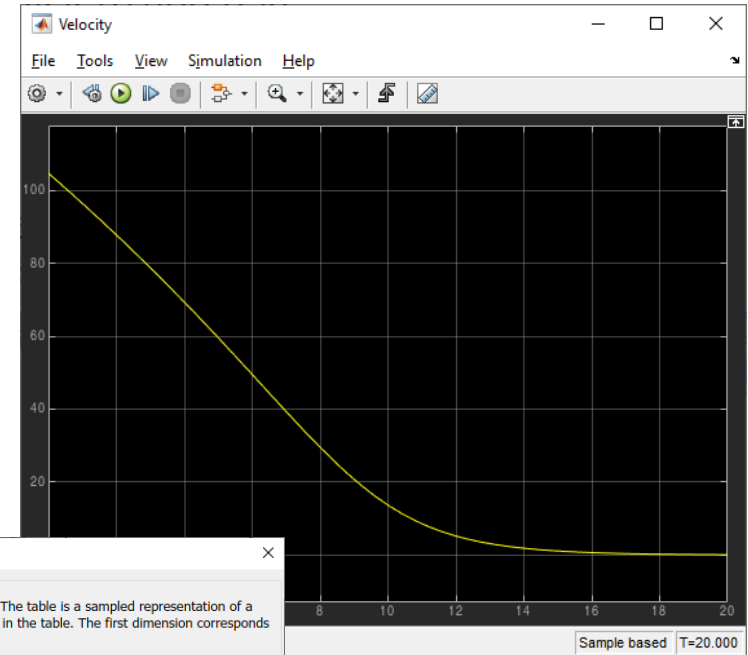
Table data: y

Breakpoints specification: Explicit values

Breakpoints 1: u

Edit table and breakpoints...

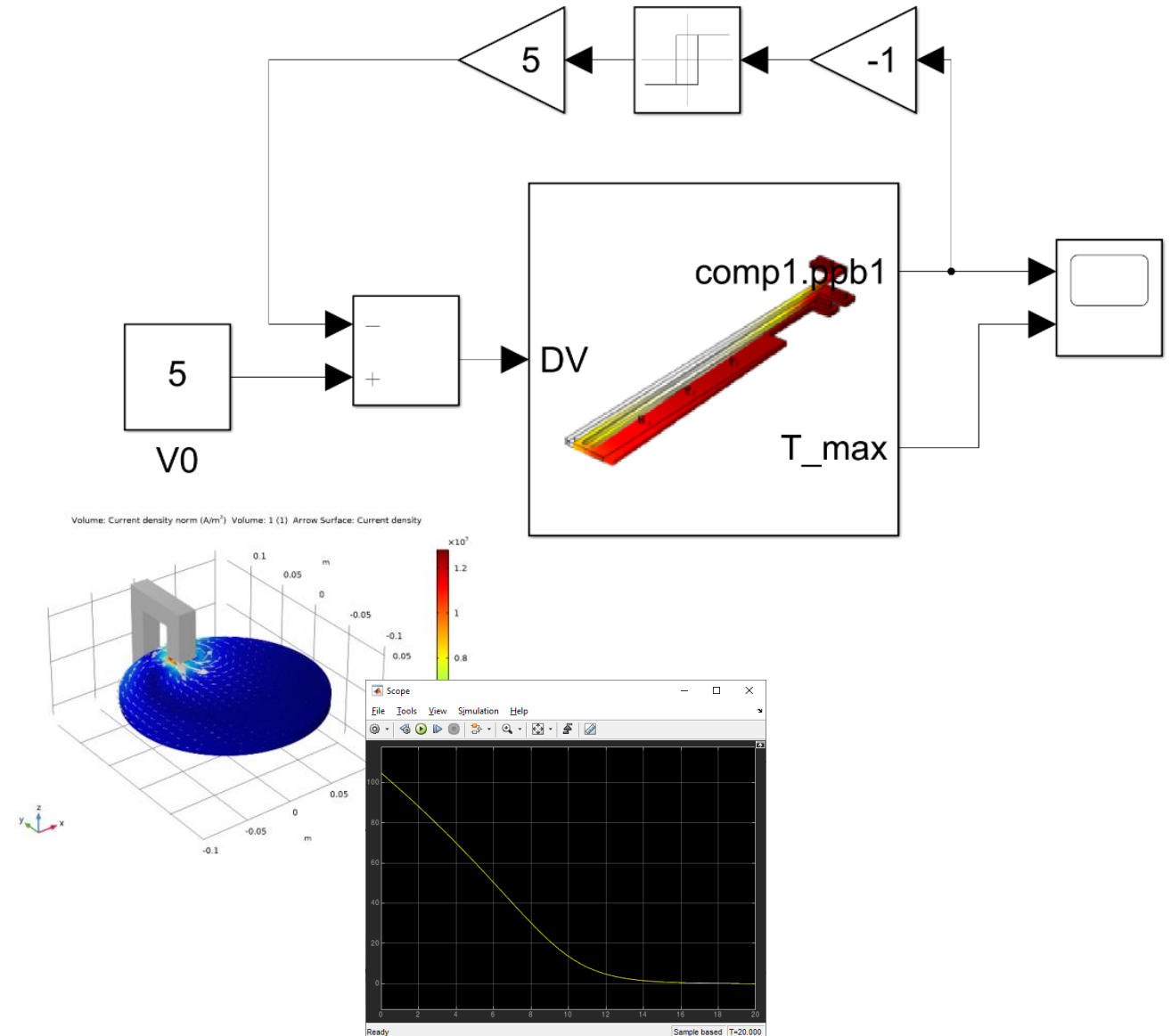
OK    Cancel    Help    Apply



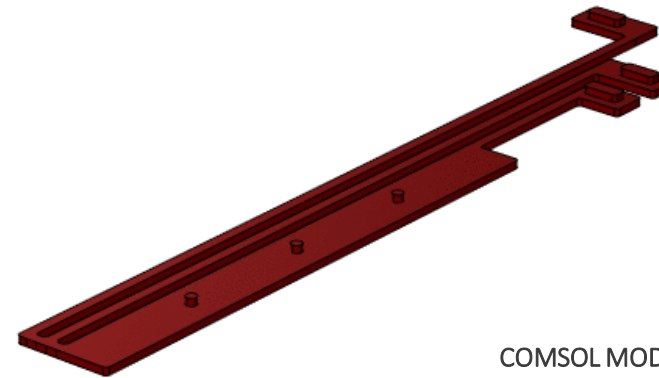
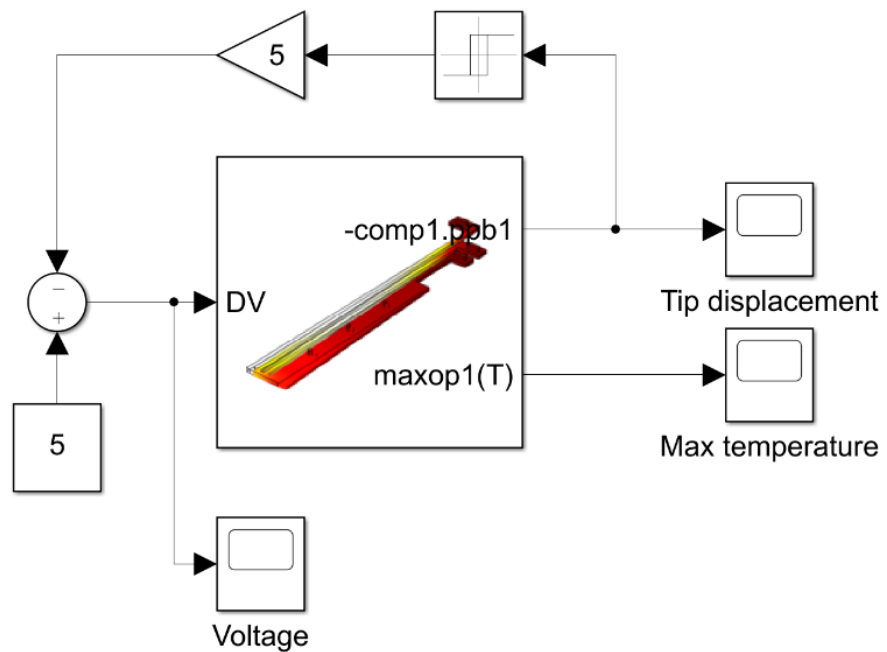
Extrakce dat

# Modely

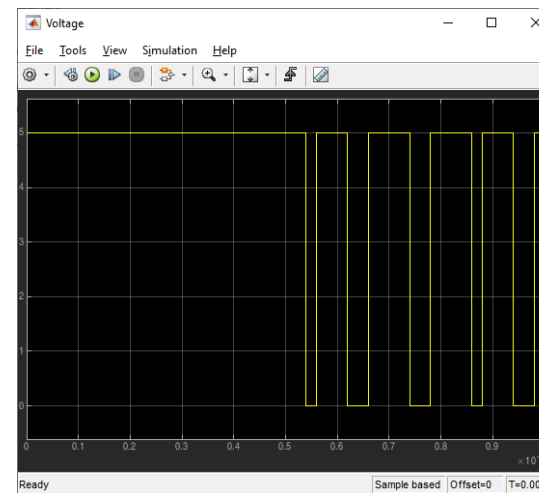
- Teplotně řízený aktuátor
  - Joulovo teplo a tepelná deformace
- Inverzní kyvadlo
  - Multibody
- Úbytek kapacity
  - Bateriový článek
- Teplotní management baterie
  - Elektrochemie a teplotní analýza
- Elektromagnetická brzda
  - Statická elektromagnetická pole



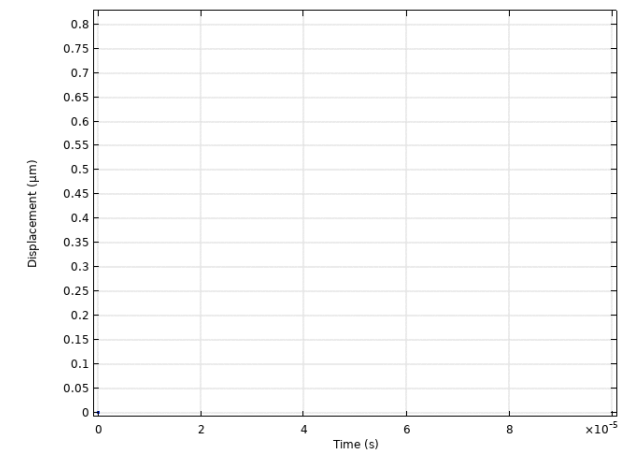
# Teplotně řízený aktuátor



COMSOL MODEL  
*Teplotní deformace*



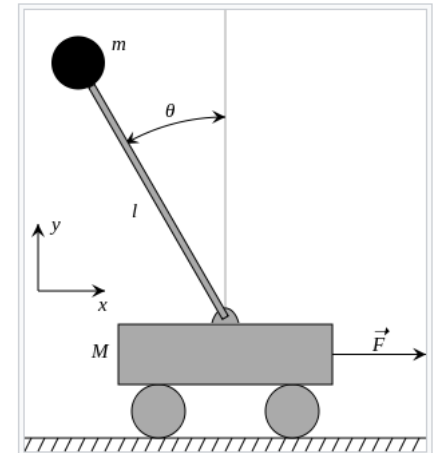
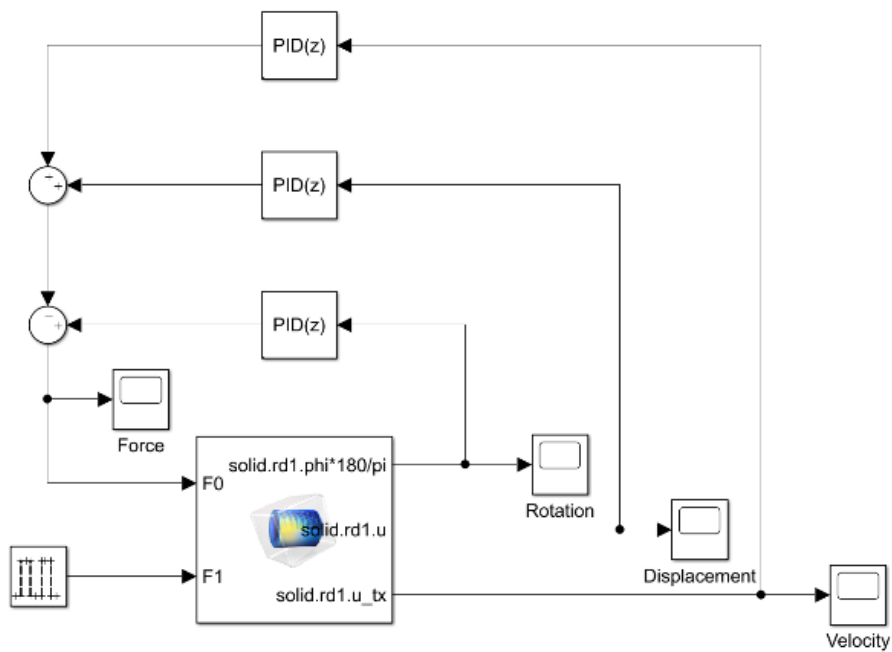
VSTUPNÍ PARAMETR  
*Napětí*



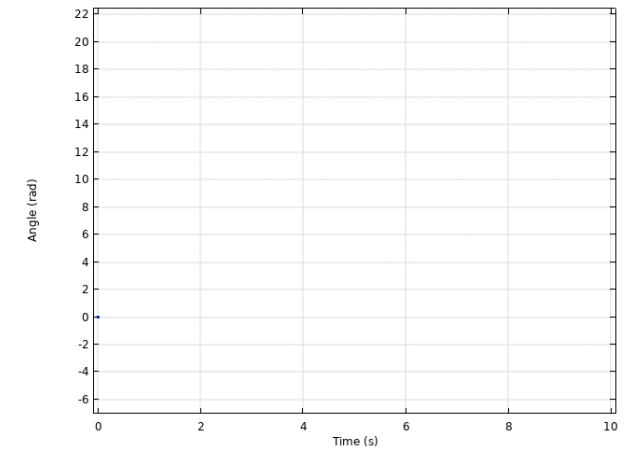
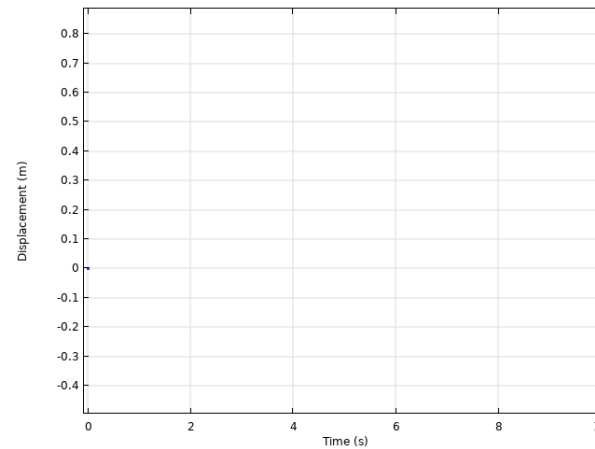
KONTROLNÍ PARAMETR  
*Deformace hrotu aktuátoru*

# Inverzní kyvadlo

VSTUPNÍ PARAMETR  
*Síla působící na vozík*



COMSOL MODEL  
*Multibody dynamics*



KONTROLNÍ PARAMETR  
*Úhel náklonu, souřadnice základny kyvadla, rychlost kyvadla*

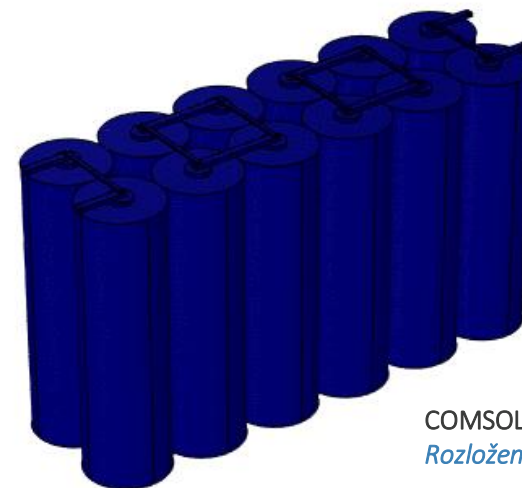
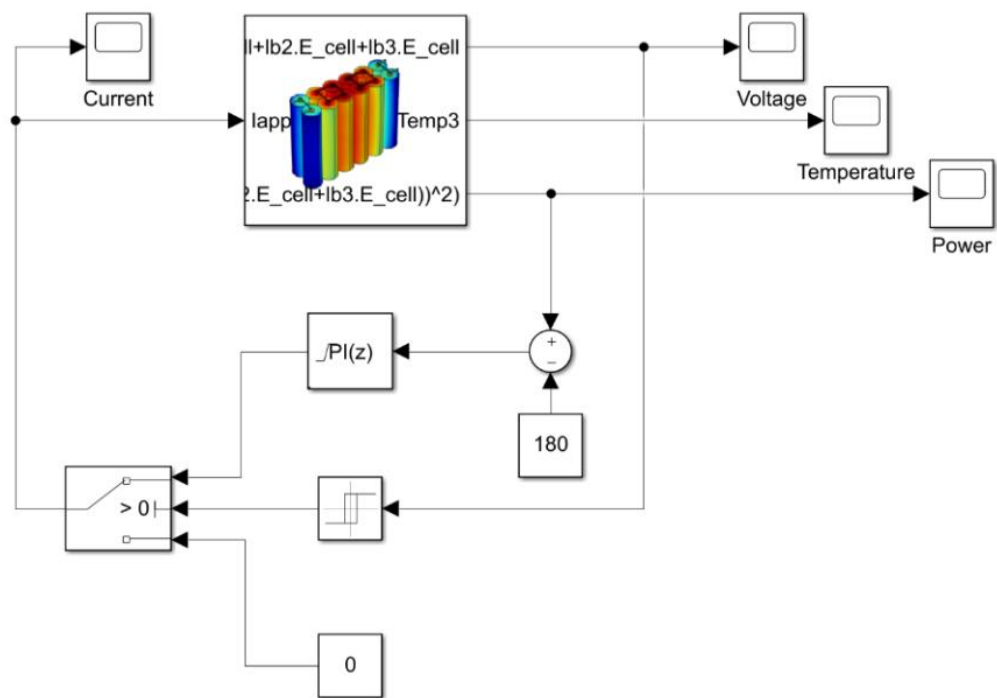




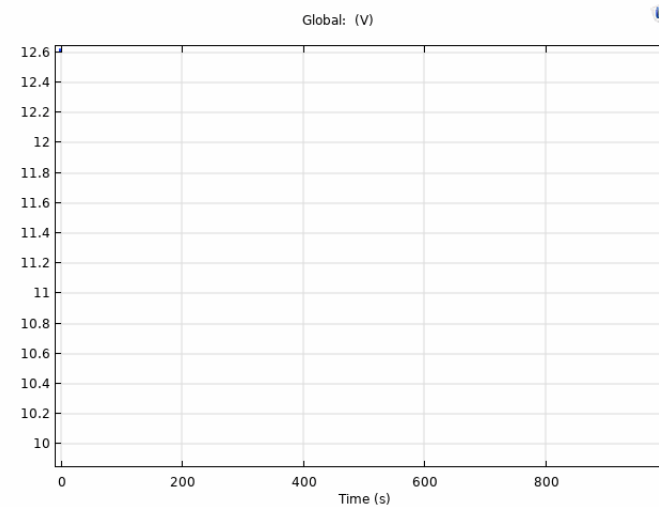
# Teplotní management baterie

VSTUPNÍ PARAMETR

*Proud*



COMSOL MODEL  
*Rozložení teploty*

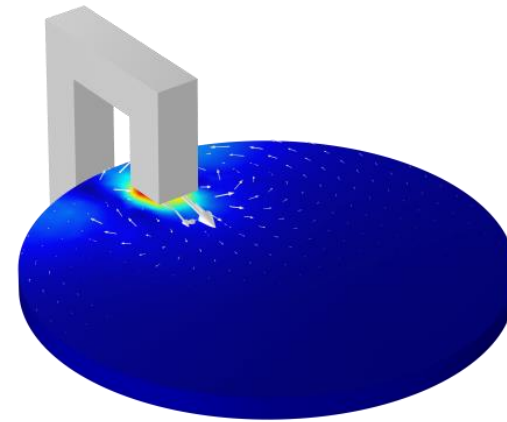


KONTROLNÍ PARAMETR

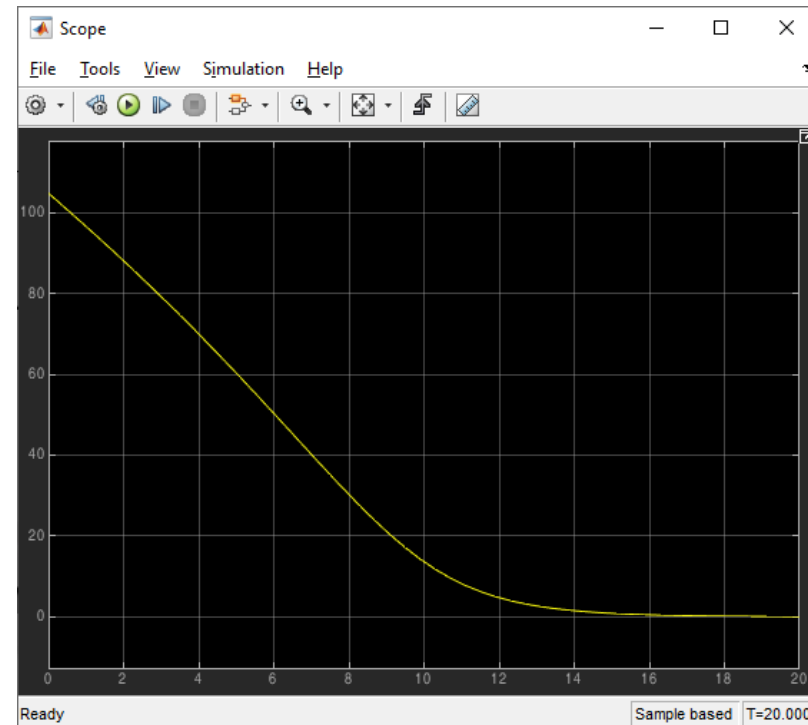
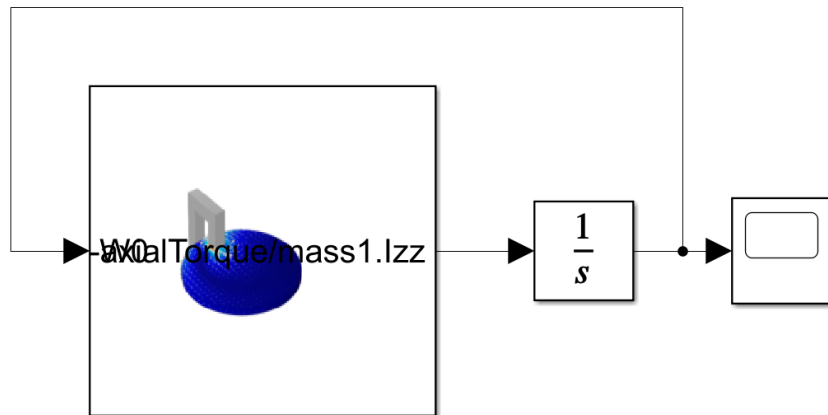
*Napětí, výkon*

# Magnetická brzda

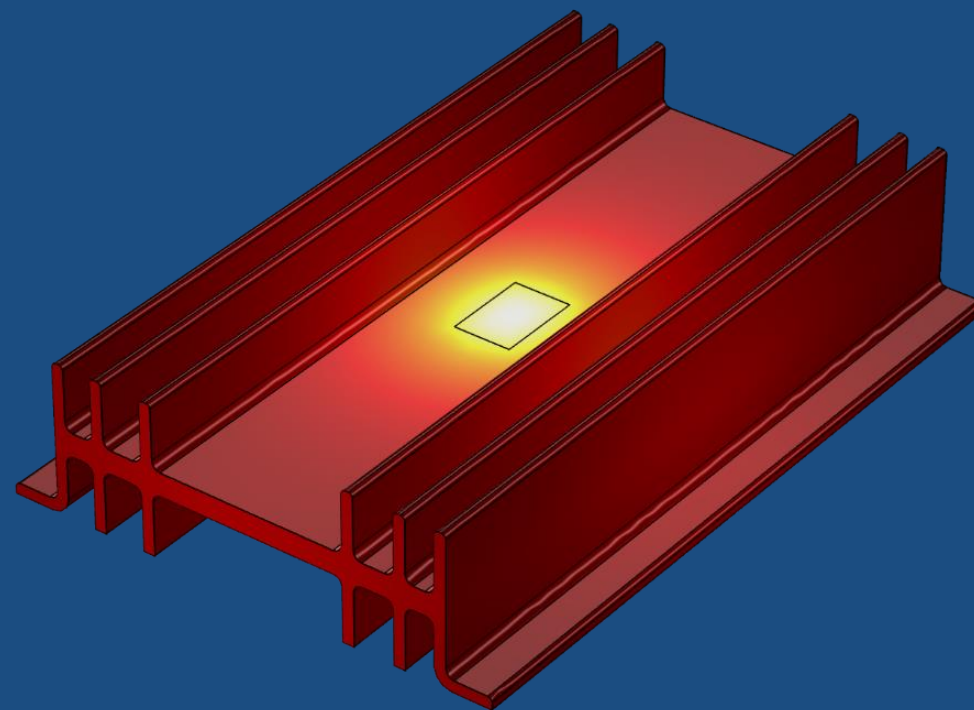
VSTUPNÍ PARAMETR  
*Úhlová rychlost*



COMSOL MODEL  
*Proudová hustota*



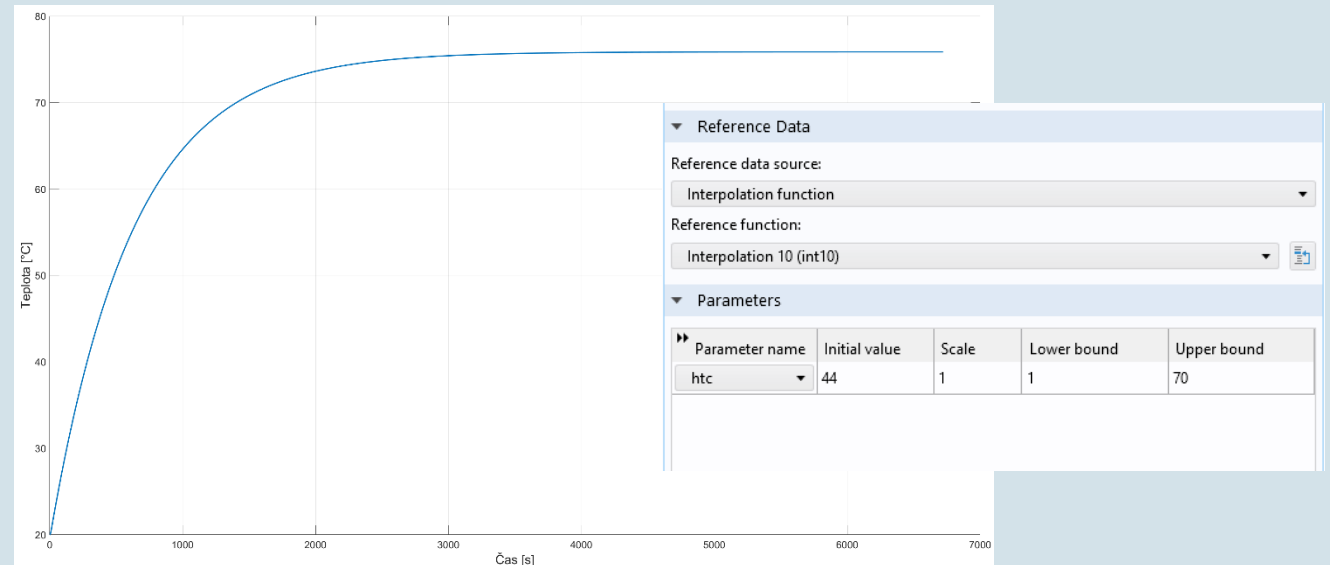
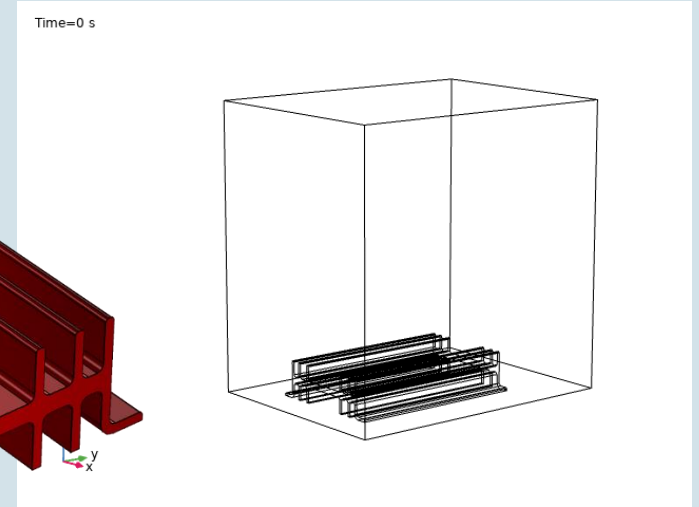
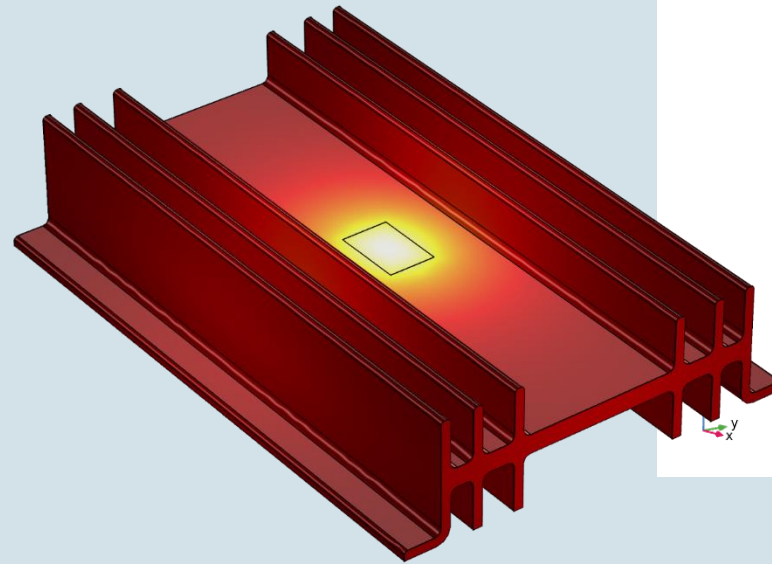
KONTROLNÍ PARAMETR  
*Kroutící moment*



Naše vlastní digitální dvojče

# Základní kuchačka

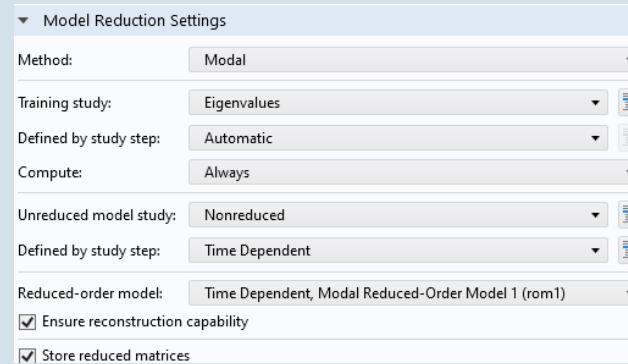
- Měření a import experimentálních dat
- Vytvoření věrohodného multifyzikálního modelu
  - Přirozená/nucená konvekce a radiace
- Zjednodušení multifyzikálního modelu
  - Odebrání vzduchové domény
  - Nahrazení okrajovými podmínkami
  - Parameter Estimation



# Základní kuchařka

- Vytvoření redukovaného modelu
  - Studie vlastních čísel
- Import matic z COMSOL do MATLAB
  - State-space
  - Descriptor State-space

```
model=mphload("New.mph"); %Nacteni souboru
MR=mphreduction(model, 'rom1','out',{'Mc' 'MA' 'MB' 'A' 'B' 'C' 'D' 'x0'});
% vytahnuti matic ze systemu
input=16;% vstup
func=@(t,x) MR.MA*x+MR.MB*input;% vypoctova rovnice
opt=odeset('mass',MR.Mc, 'Jacobian',MR.MA,'stats','on');
x0=zeros(size(MR.MA,1),1);
[t,x2]=ode23s(func,0:0.05:900,x0,opt);
y2t=MR.C*x2';
y20=MR.C*MR.x0;
y2=y2t+y20;
```

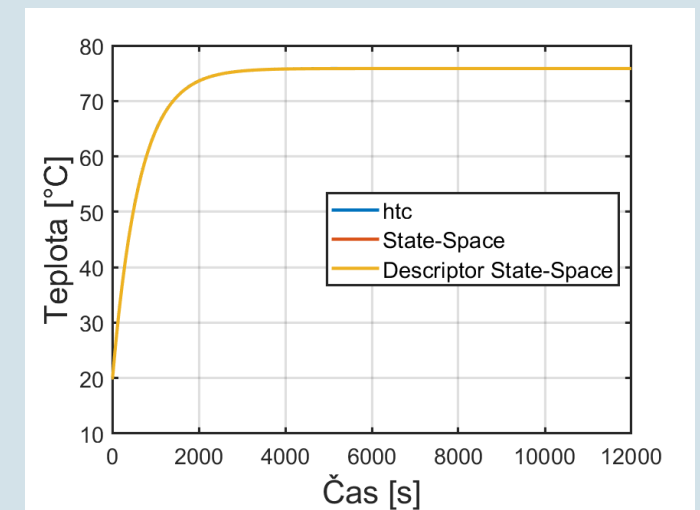
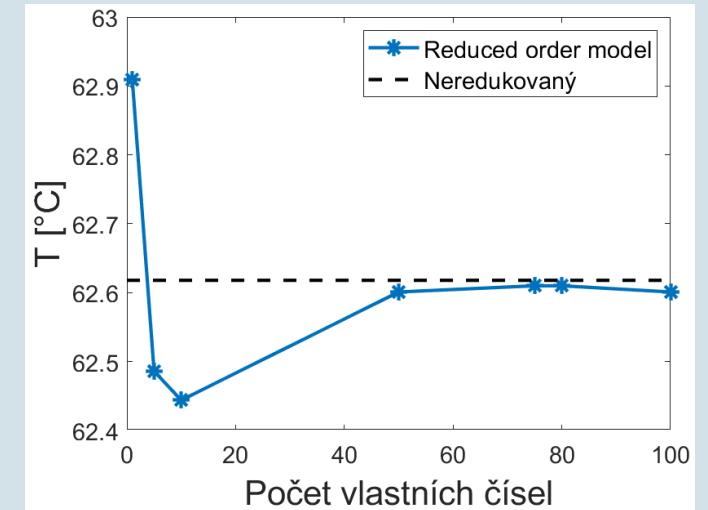


$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

State-space

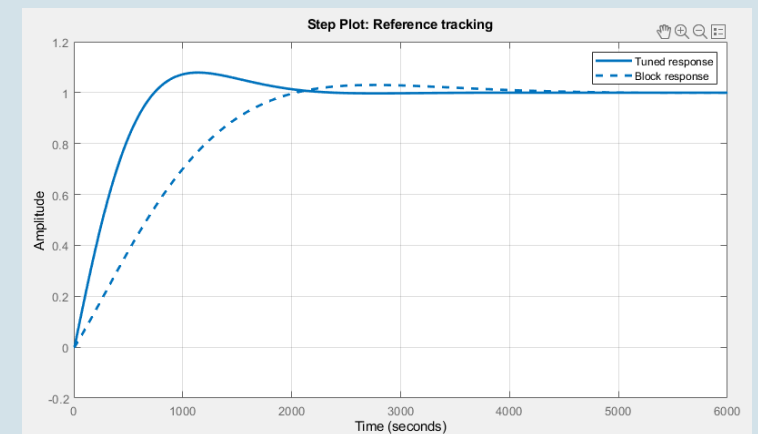
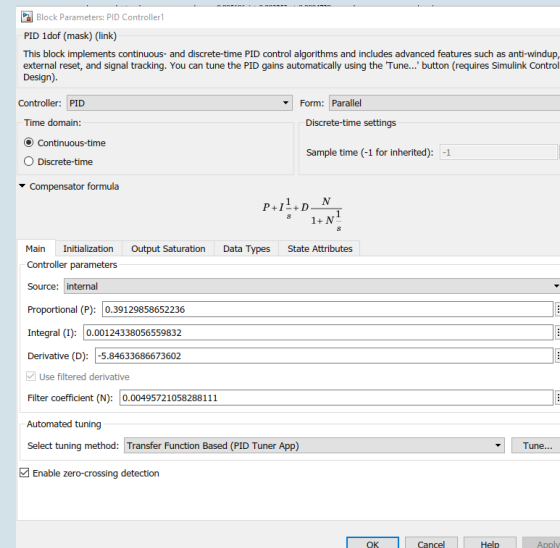
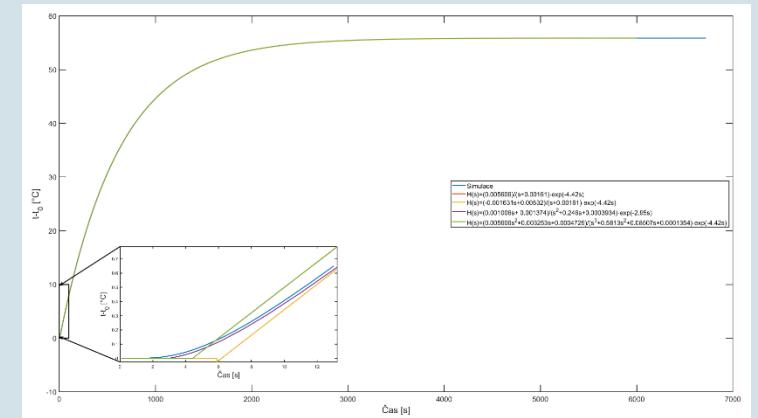
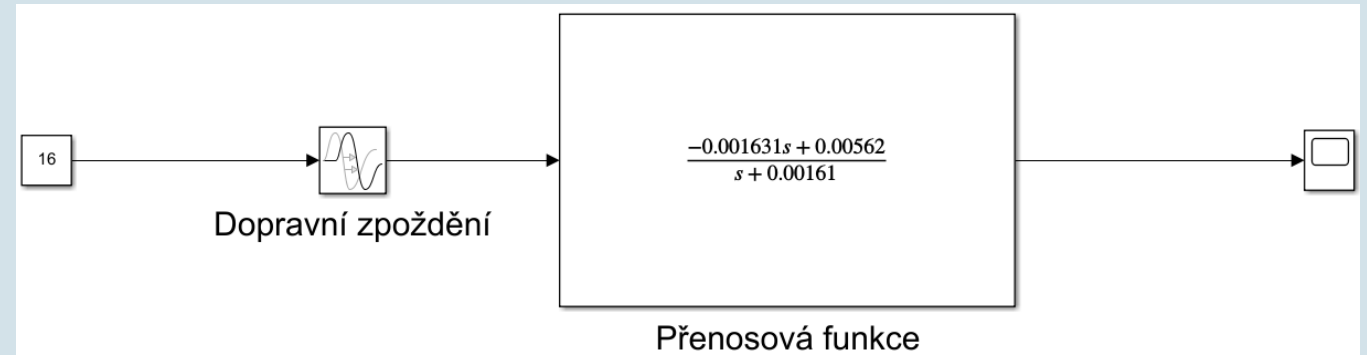
$$\begin{cases} E\dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Descriptor State-Space

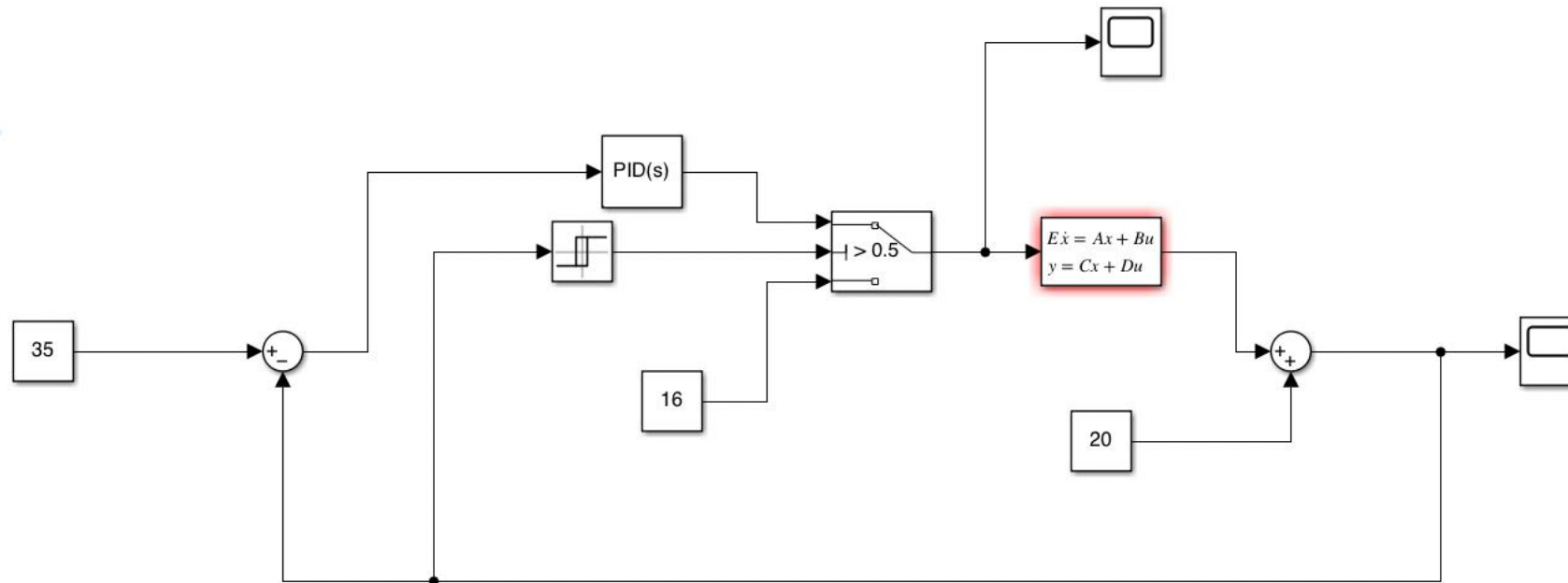


# Řízení

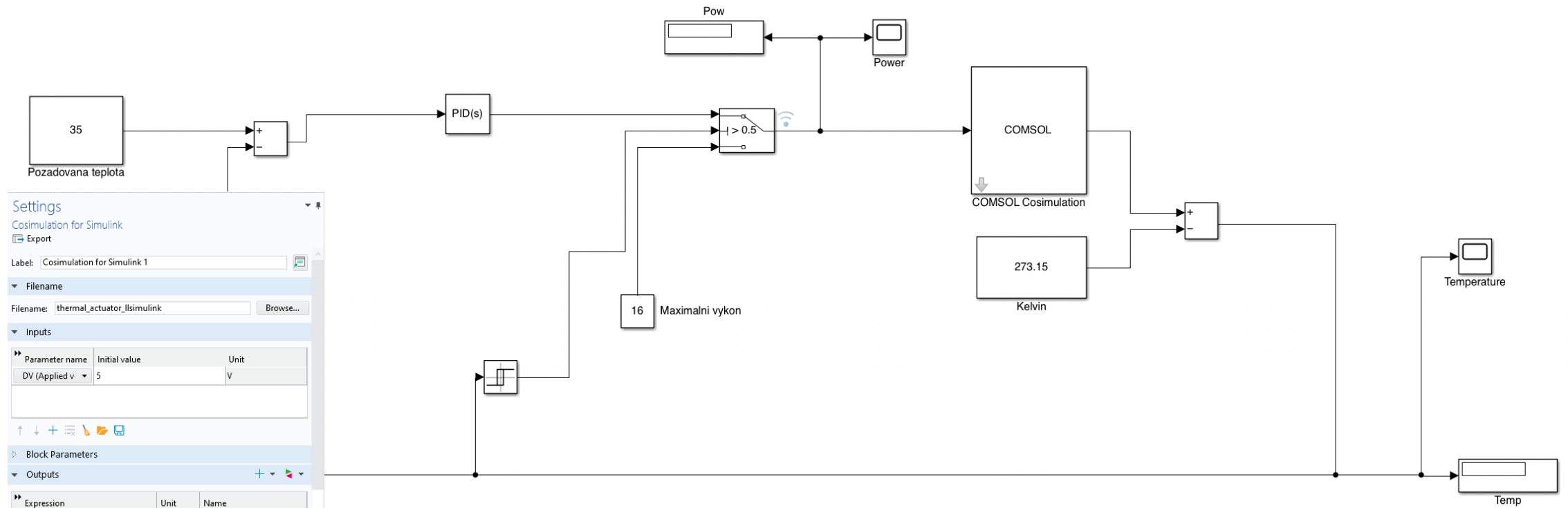
- Získání přenosové funkce
- Lazení PID controlleru pomocí přenosové funkce systému



# Schéma s maticemi z redukovaného systému



# Schéma s kosimulačním blokem



Settings  
Cosimulation for Simulink  
Export

Label: Cosimulation for Simulink 1

Filename  
Filename: thermal\_actuator\_1simulink Browse...

Inputs

Parameter name	Initial value	Unit
DV (Applied v)	5	V

Block Parameters

Outputs

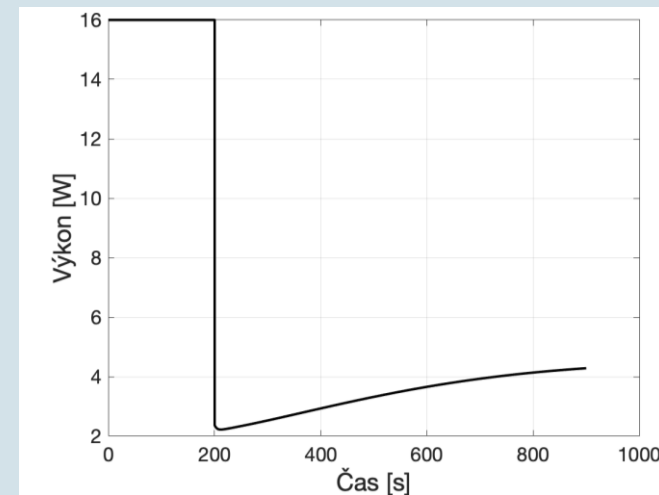
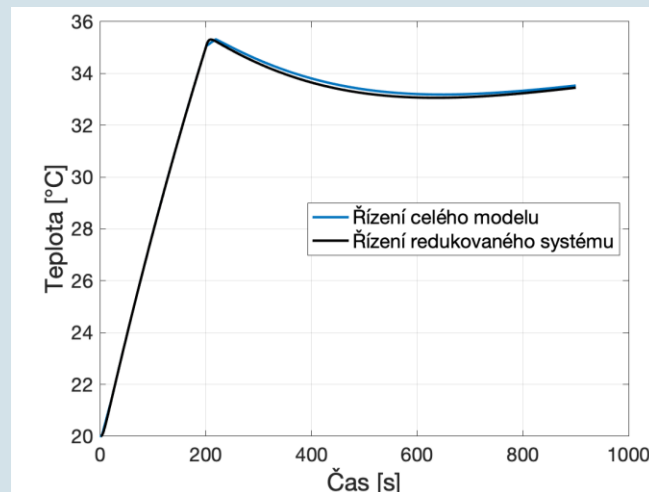
Expression	Unit	Name
-comp1.ppb1	m	Disp
maxop1(T)		Max temp

Expression:  
Name:



# Kosimulace vs Redukovaný model

- Kosimulace
  - Snazší implementace
  - Flexibilní řešení validní pro široké spektrum vstupů
- Redukovaný model
  - Řádově rychlejší simulační časy
    - Řešení v reálném čase
  - Možnost exportu mimo MATLAB/Simulink



Metoda	Čas
Co-simulace	15 min 19 sec
Import matic	2 sec