

SVS FEM

Pokročilé nástroje, algoritmy a nejvýznamnější novinky elektromagnetických simulací

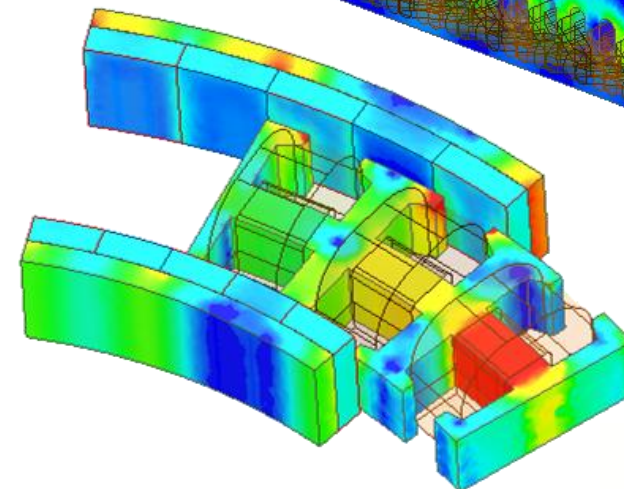
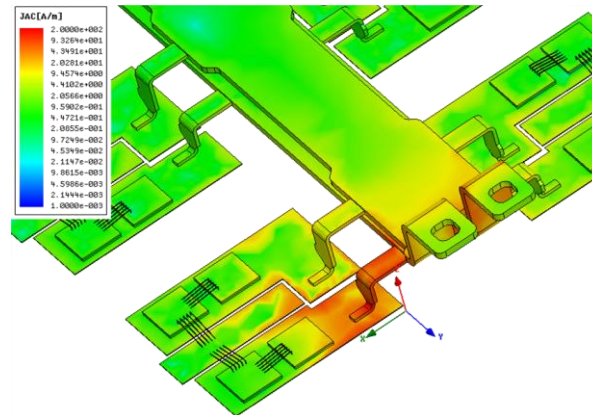
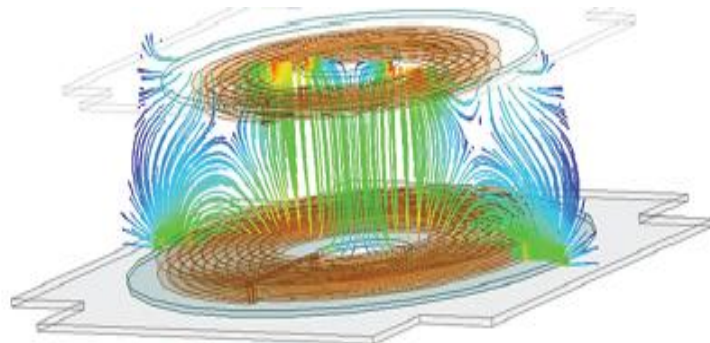
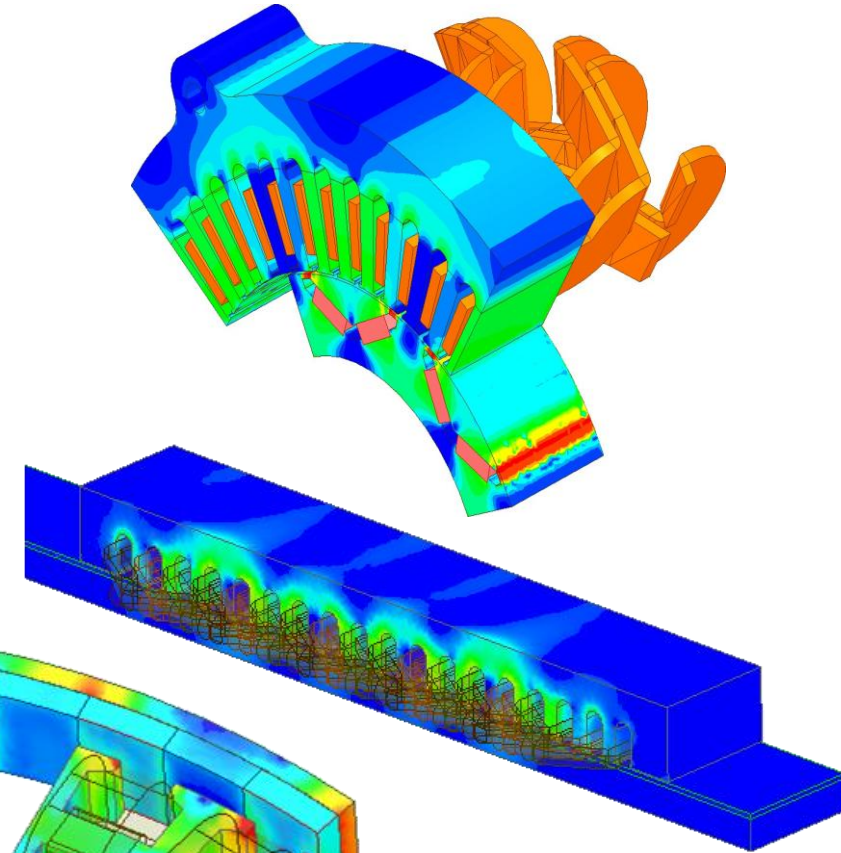
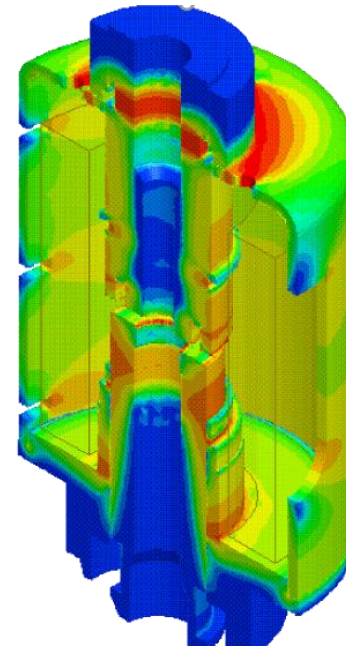
Jsme experti v oblasti simulací

Tibor Bachorec

— Pokročilé nástroje, algoritmy a nejvýznamnější novinky elektromagnetických simulací

Obsah

- 1) Pokročilé magnetické materiálové modely.
- 2) Triky na efektivní modelování.
- 3) Triky na urychlení simulací.
- 4) Závěr.
- 5) Diskuse.





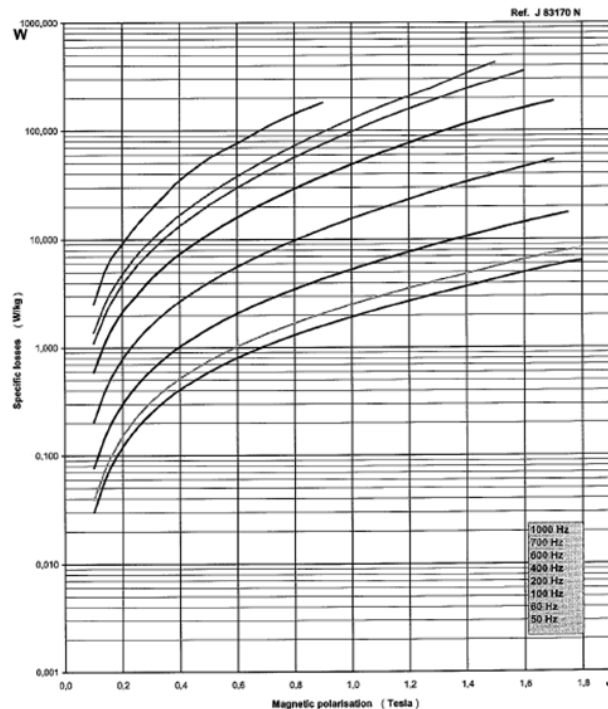
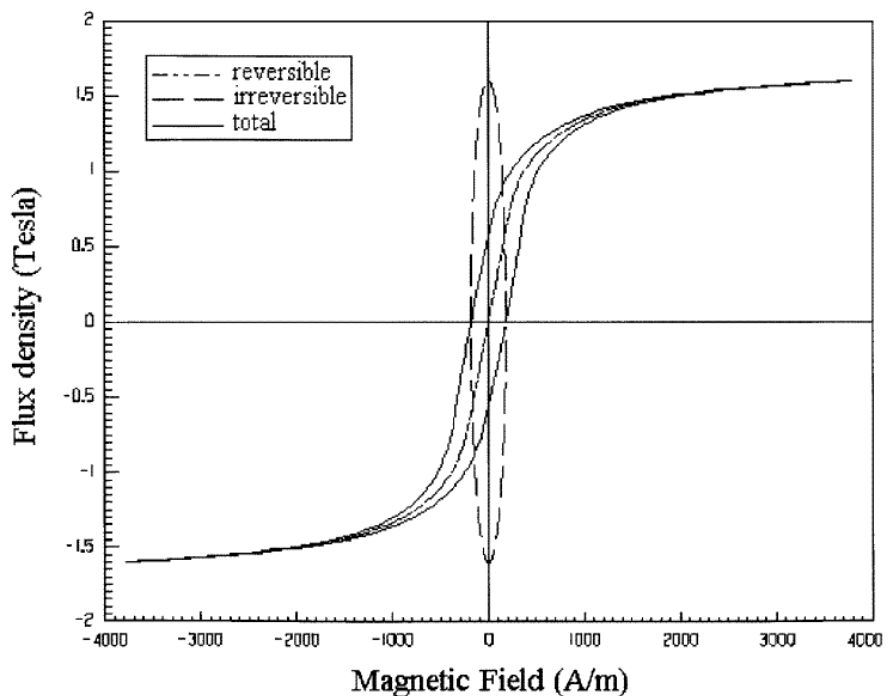
1. Pokročilé magnetické materiálové modely

Frekvenční závislost ztrát v magnetických materiálech

- Ekvivalentní eliptická smyčka – trasování eliptické smyčky, jejíž plocha je shodná s původní hysterezní smyčkou.
- Výhoda - popis ztrát na základě běžně dostupných ztrátových koeficientů

$$P_v = P_h + P_C + P_e$$

$$P_v = K_h f B_m^2 + K_C (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1.5}$$



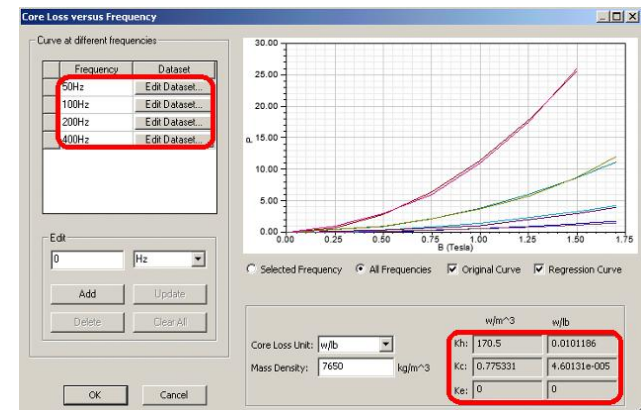
Magnetická permeabilita

Ztrátové koeficienty

Volba mat. modelů

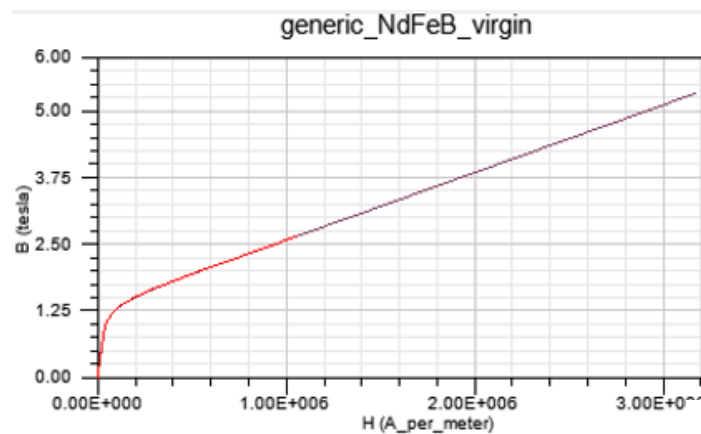
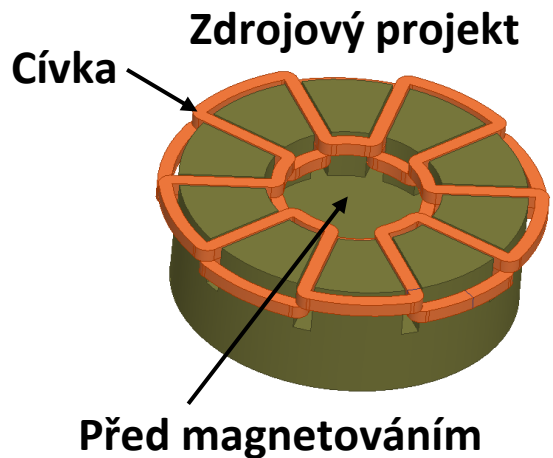
Teplotní závislost

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	1960000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
Core Loss Type		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	164.2	
- Kc	Simple	1.3	
- Ke	Simple	1.72	
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3

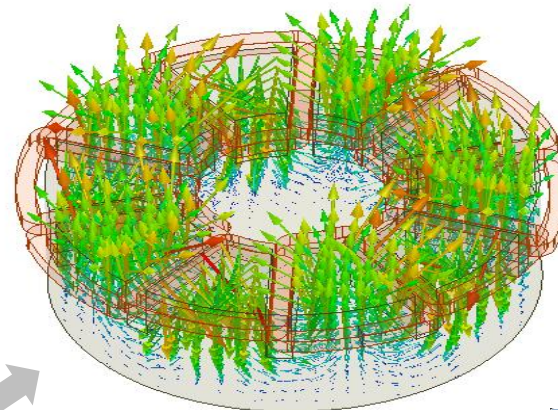


Magnetizace a demagnetizace PM

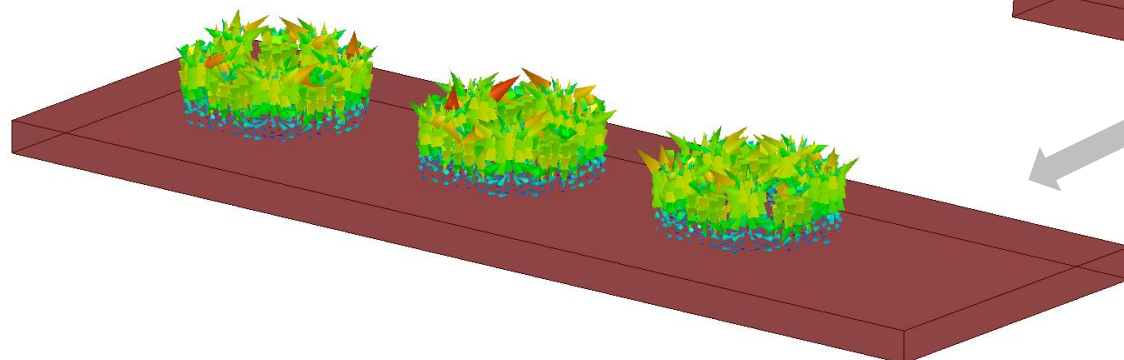
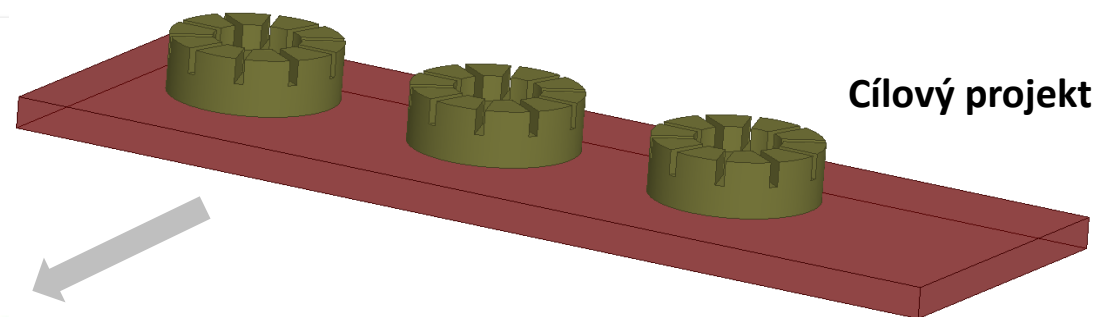
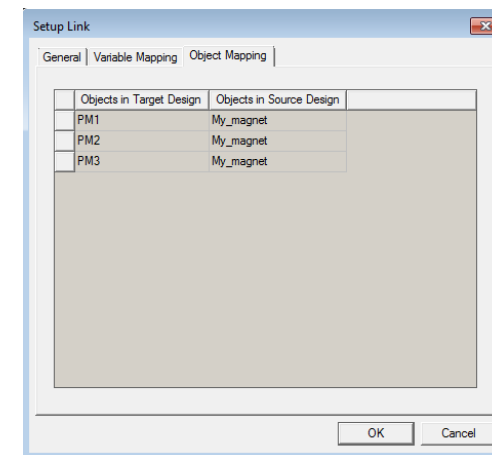
- Cílový projekt může obsahovat různé instance magnetů pocházejících z různých zdrojů.
- Zdrojový a cílový projekt mohou mít různé geometrie.
- Mapování je založeno na souřadnicových systémech objektů.



Křivka prvotní magnetizace

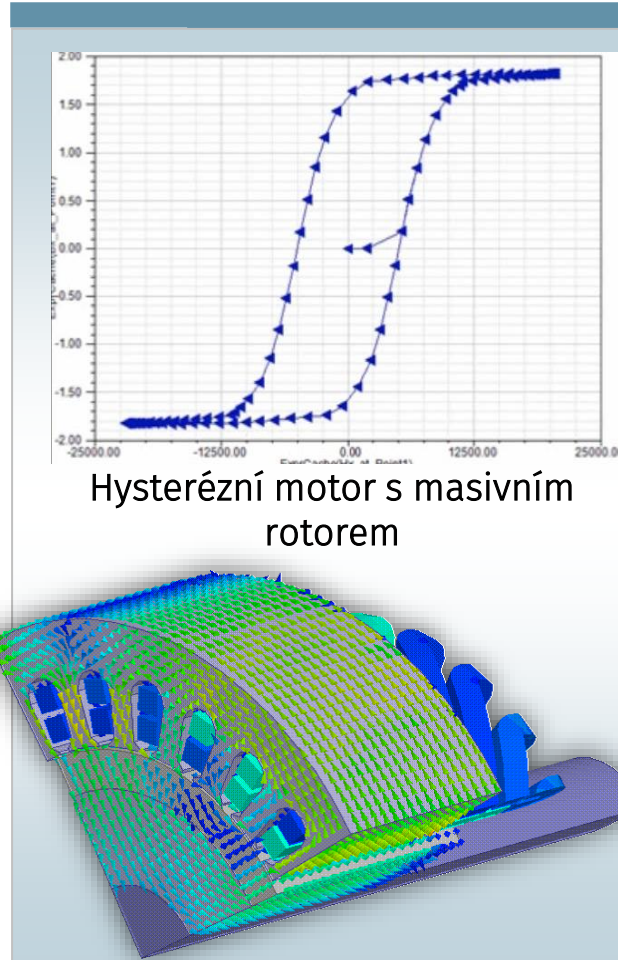


Nastavení propojení

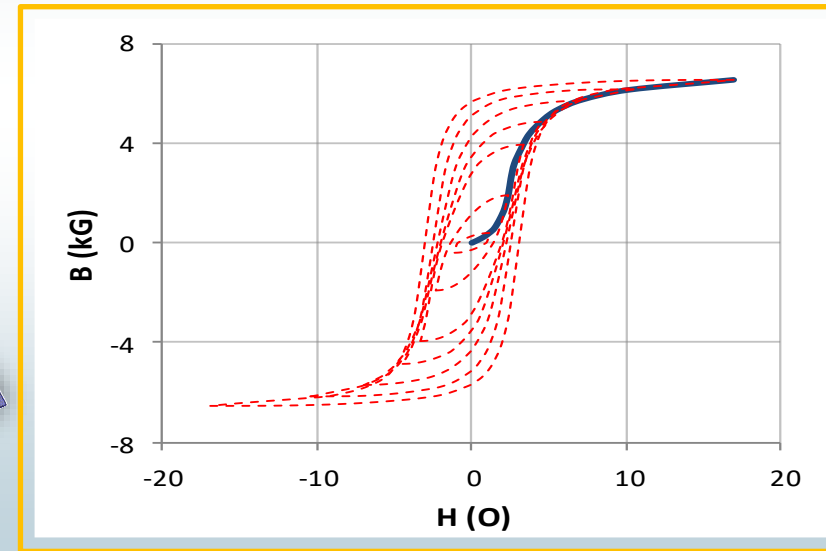


Vektorový hysterezní model

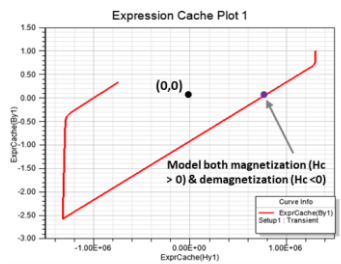
- Funguje ve všech čtyřech kvadrantech.
- Zároveň modelujte proces magnetizace i demagnetizace.
- **Magnetizace/demagnetizace ve všech směrech.**
- Použitelné pro všechny nelineární PM.
- Efektivní modelování reálných fyzikálních vlastností.



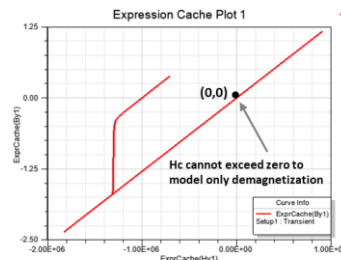
- Zohledňuje hysterezní chování mag. materiálů
- Paměťově nenáročný
- Běžné experimentální nároky



Minoritní smyčky
- automaticky zahrnuty



Hysteresis model based approach



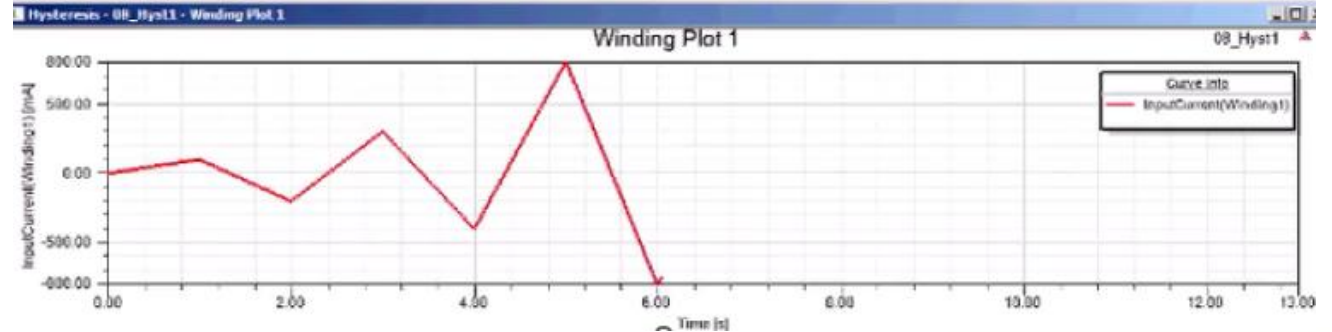
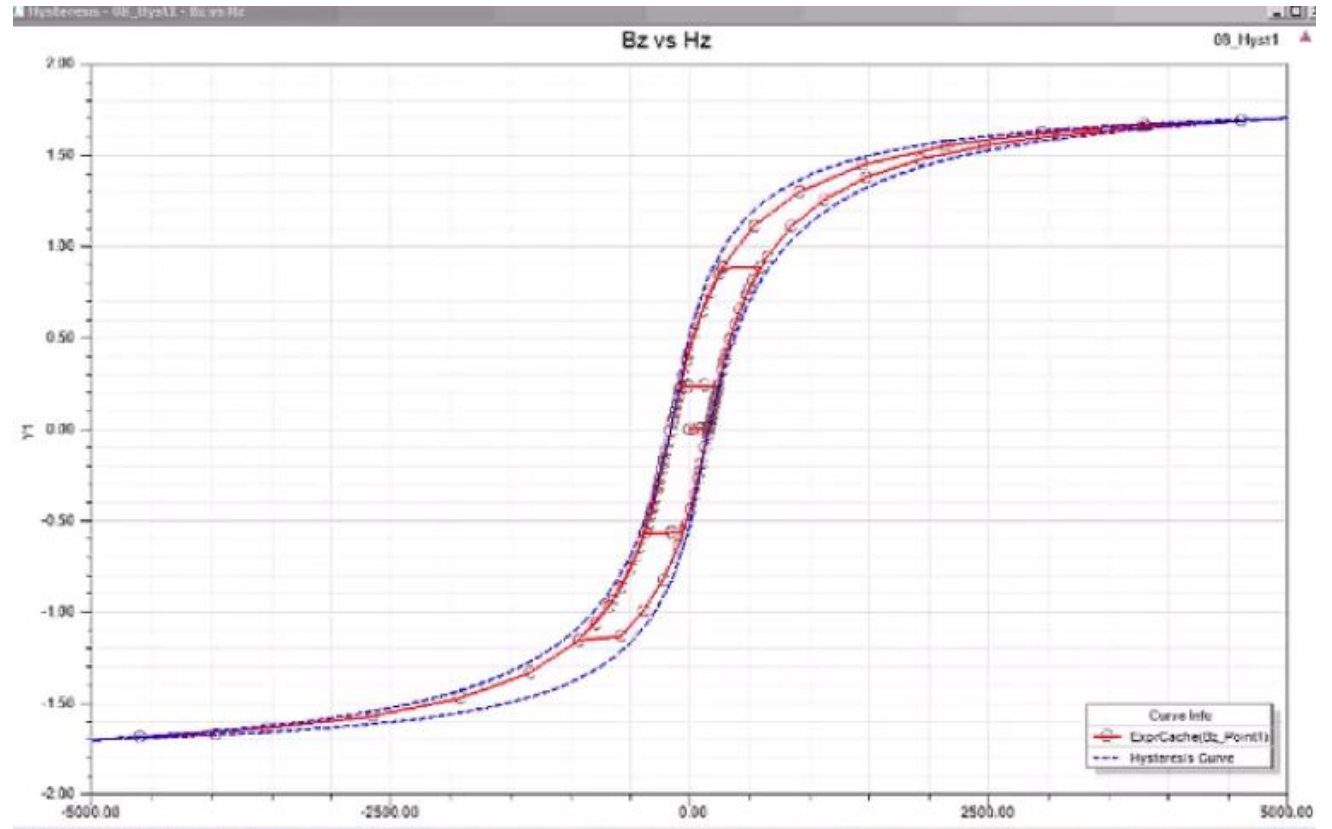
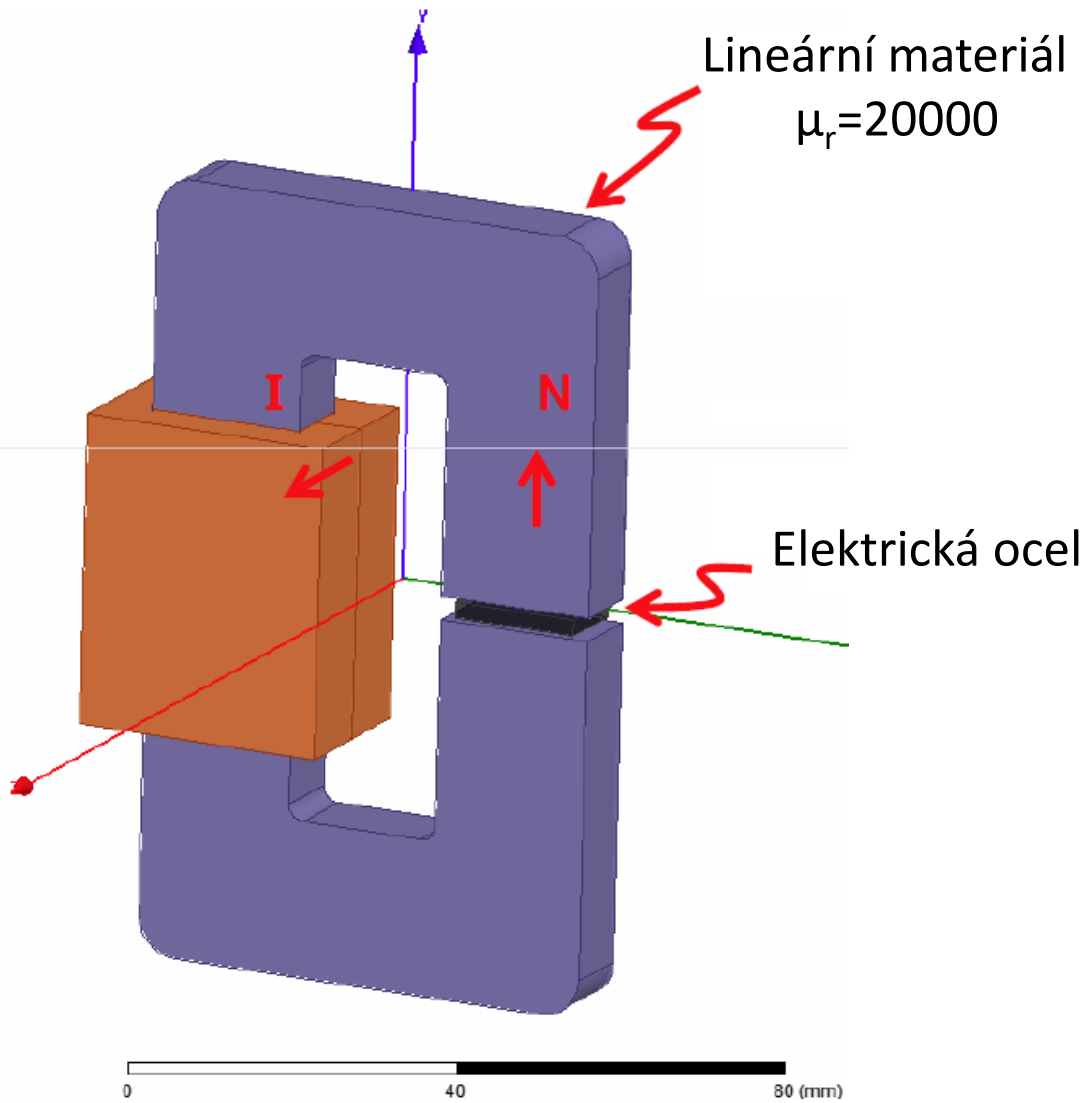
Non-Hysteresis PM approach

Time =0.002s
Speed =300.000004rpm
Position =3.600003deg

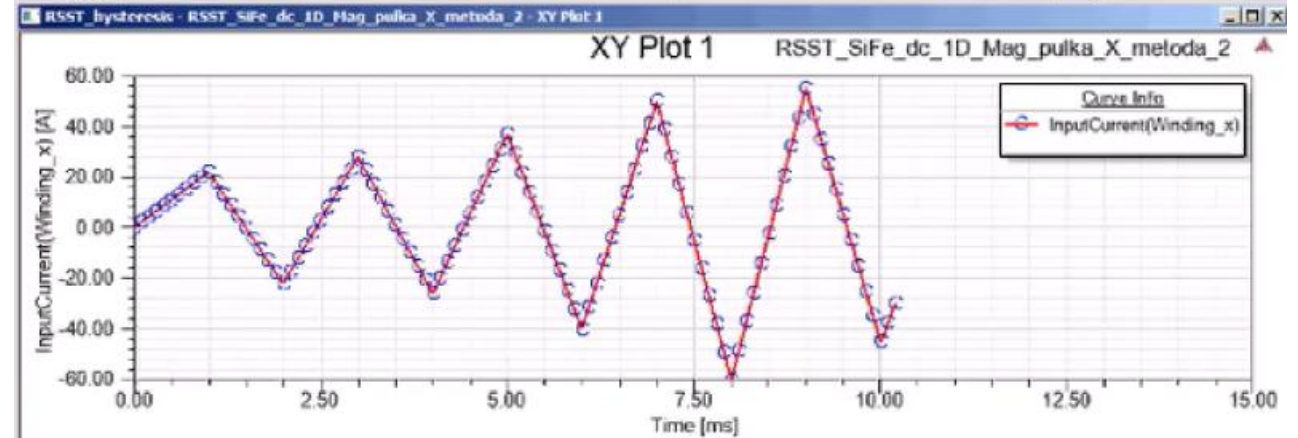
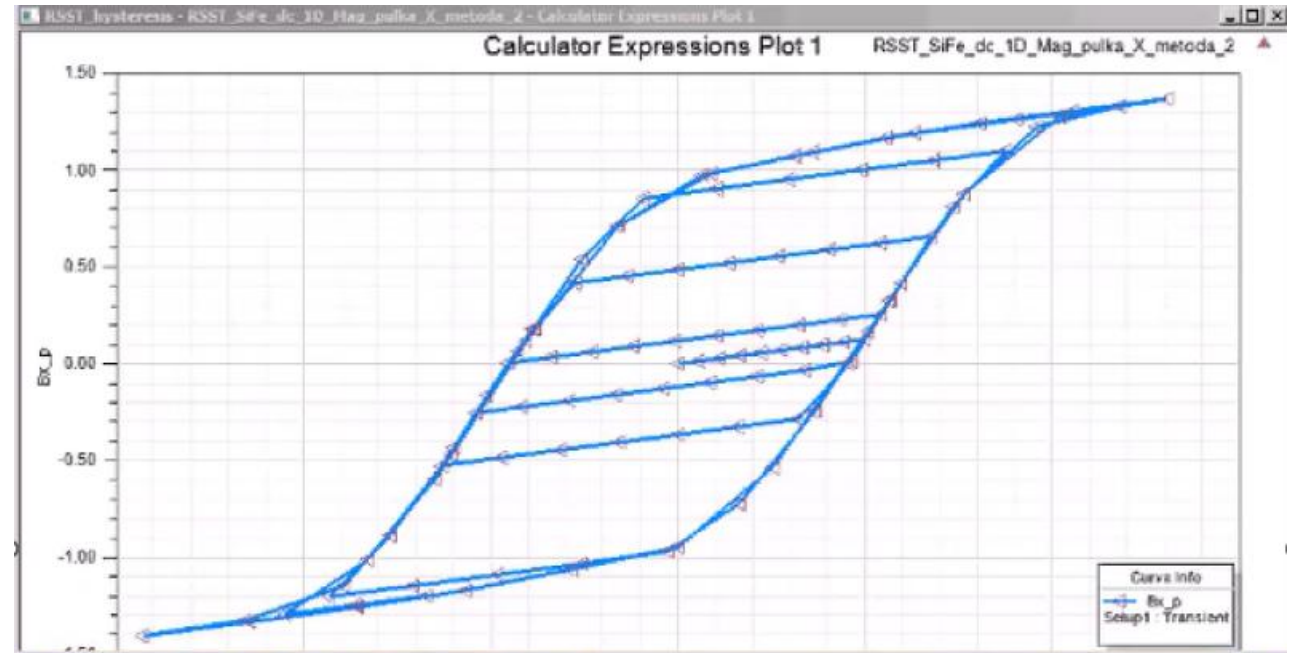
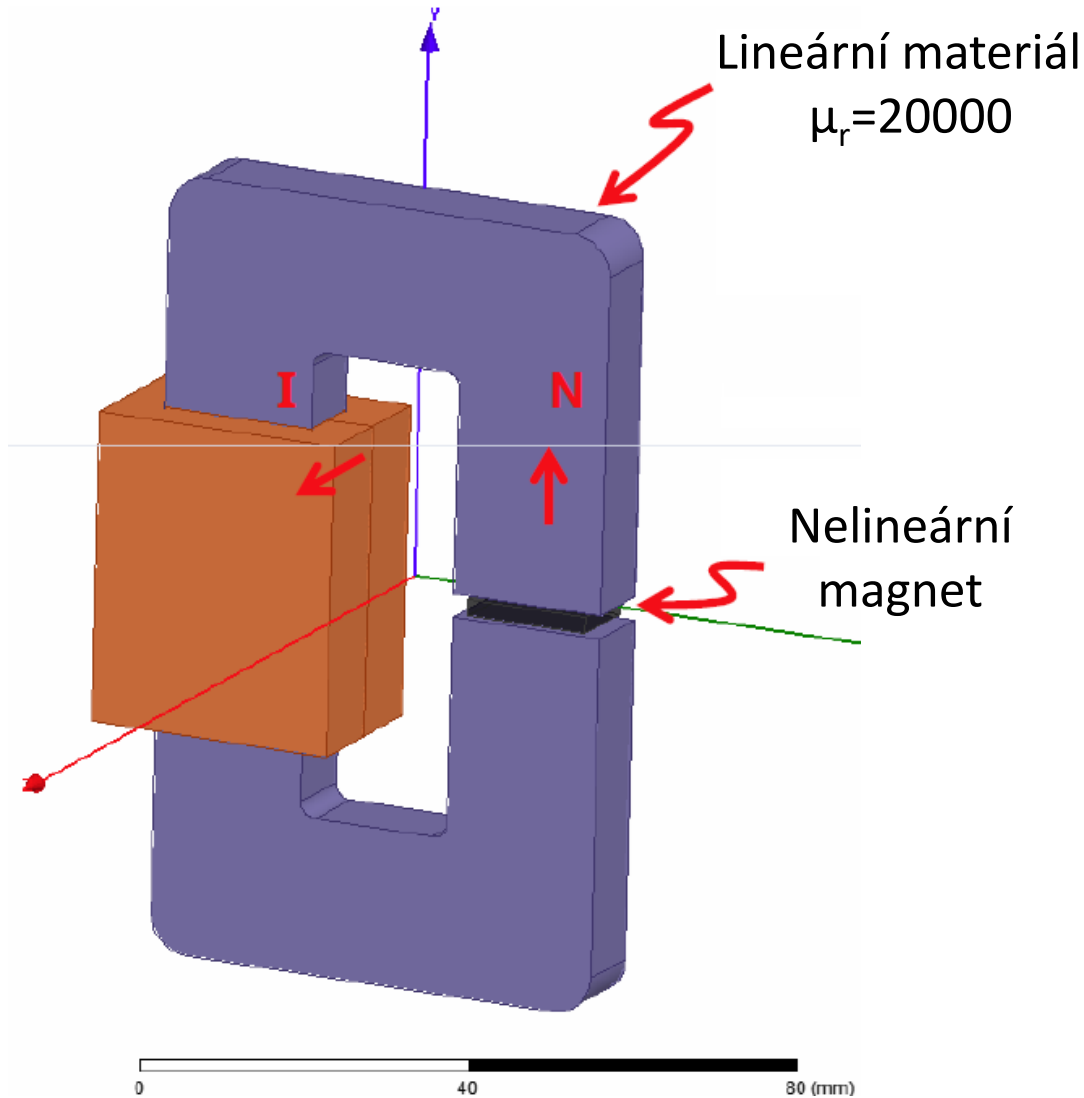
0 20 40 (mm)

04.06.2026 12:05:54

Vektorový hysterezní model



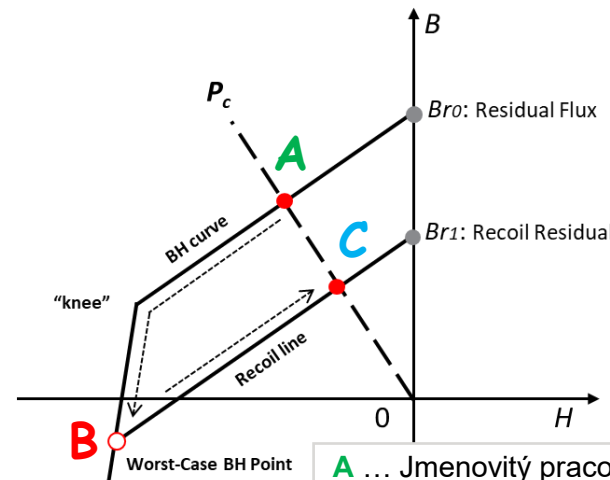
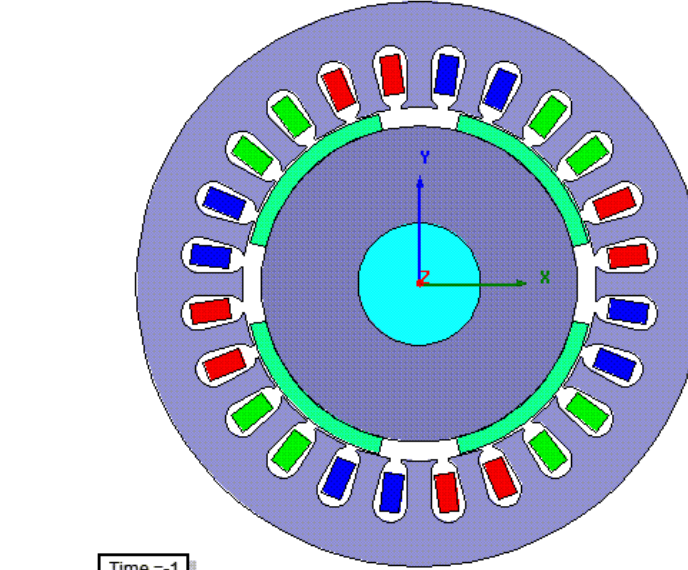
Vektorový hysterezní model



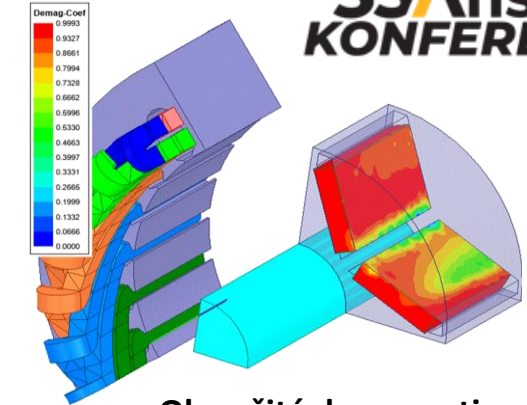
Demagnetizace permanentních magnetů

- U elektrických strojů s PM se můžou vyskytnout stavy, které mohou vést ke změně jejich normálního pracovního bodu.
- Kombinace přetížení s teplotou, kterých důsledkem může být demagnetizace permanentních magnetů.
- Demagnetizaci lze modelovat zjednodušeně sérií reverzních křivek vycházejících z demagnetizační křivky ve 2. a 3. kvadrantu.
- **Demagnetizační koeficient:**

$$\text{Demag_koef} = \frac{Br_1}{Br_0} \cdot 100\%$$
- Demag_koef = 1 ... žádná demagnetizace
- Demag_koef = 0 ... úplná demagnetizace
- Pokles účinnosti a funkce stroje.



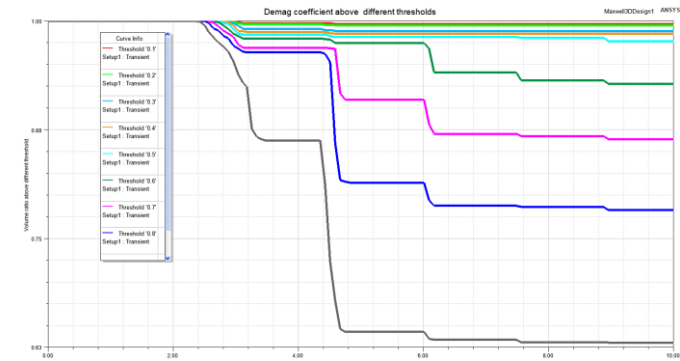
A ... Jmenovitý pracovní bod
B ... Porucha (demagnetizace)
C ... Posunutý pracovní bod



Okamžitá demagnetizace



Lokální demagnetizační koeficient



Procentuální křivky demagnetizace

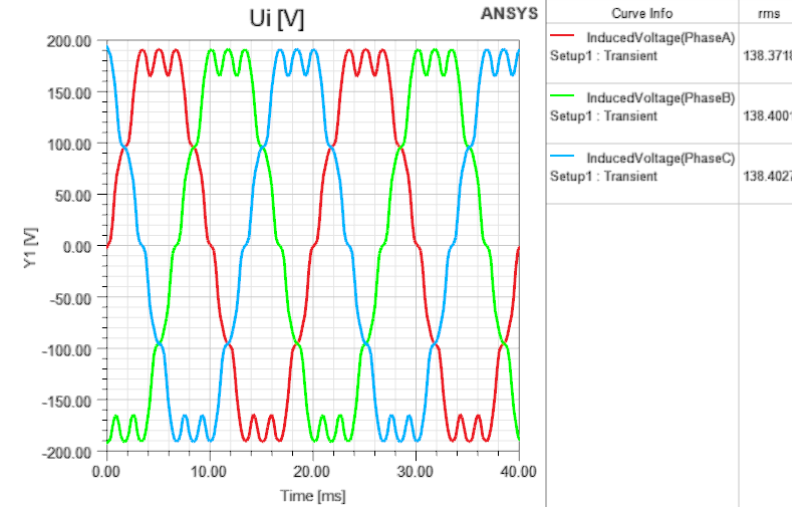
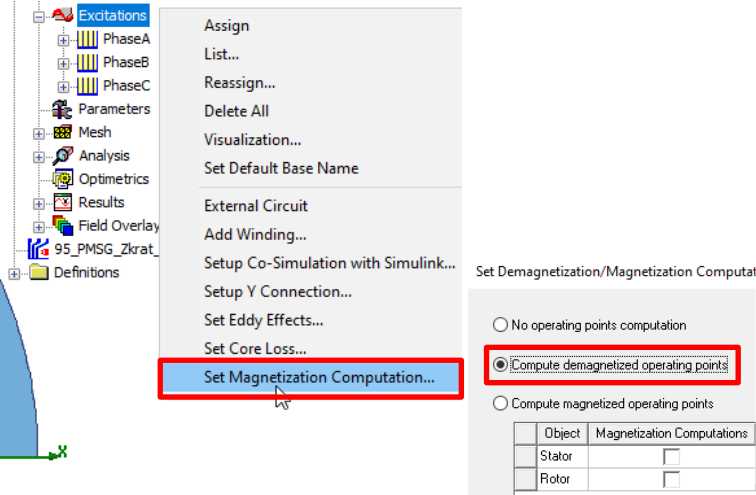
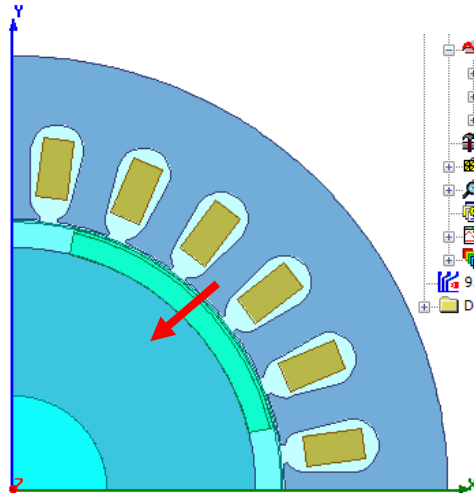
Demagnetizace permanentních magnetů

Popis

- 3 fázový 4 pólový generátor s PM
- 550 W, 50 Hz
- 1500 ot min⁻¹
- PM: Ceramic 8D

Porucha

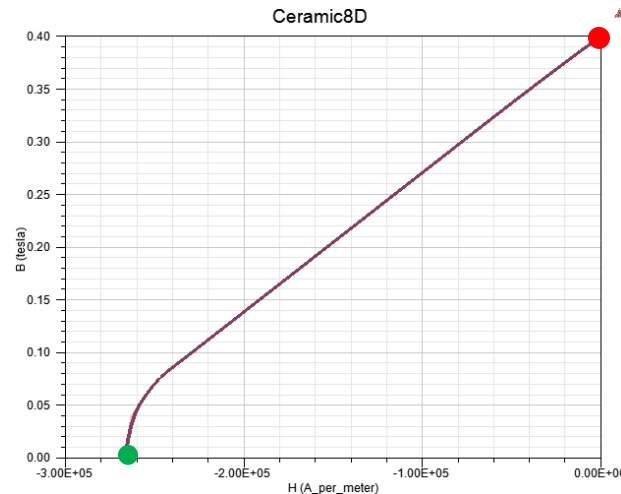
- Zkrat všech fází v okamžiku maxima proudu fází A



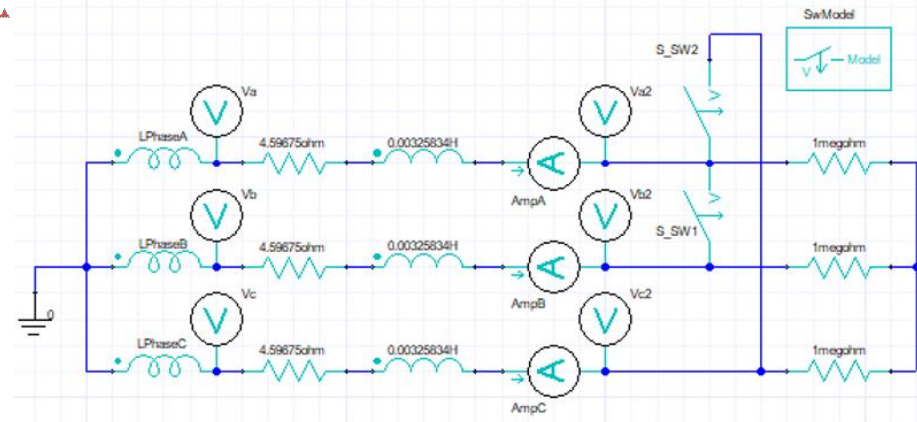
Indukované napětí naprázdno

Material Name: Ceramic8D
Material Coordinate System Type: Cylindrical

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	0.0001	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	-266585	A_per_meter
- R Component	Unit Vector	-1	
- Phi Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model	None		w/m^3
Mass Density	Simple	4900	kg/m^3
Composition	Solid		
Young's Modulus	Simple	170000000000	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0	
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostriction	Custom	Edit...	



BH charakteristika PM



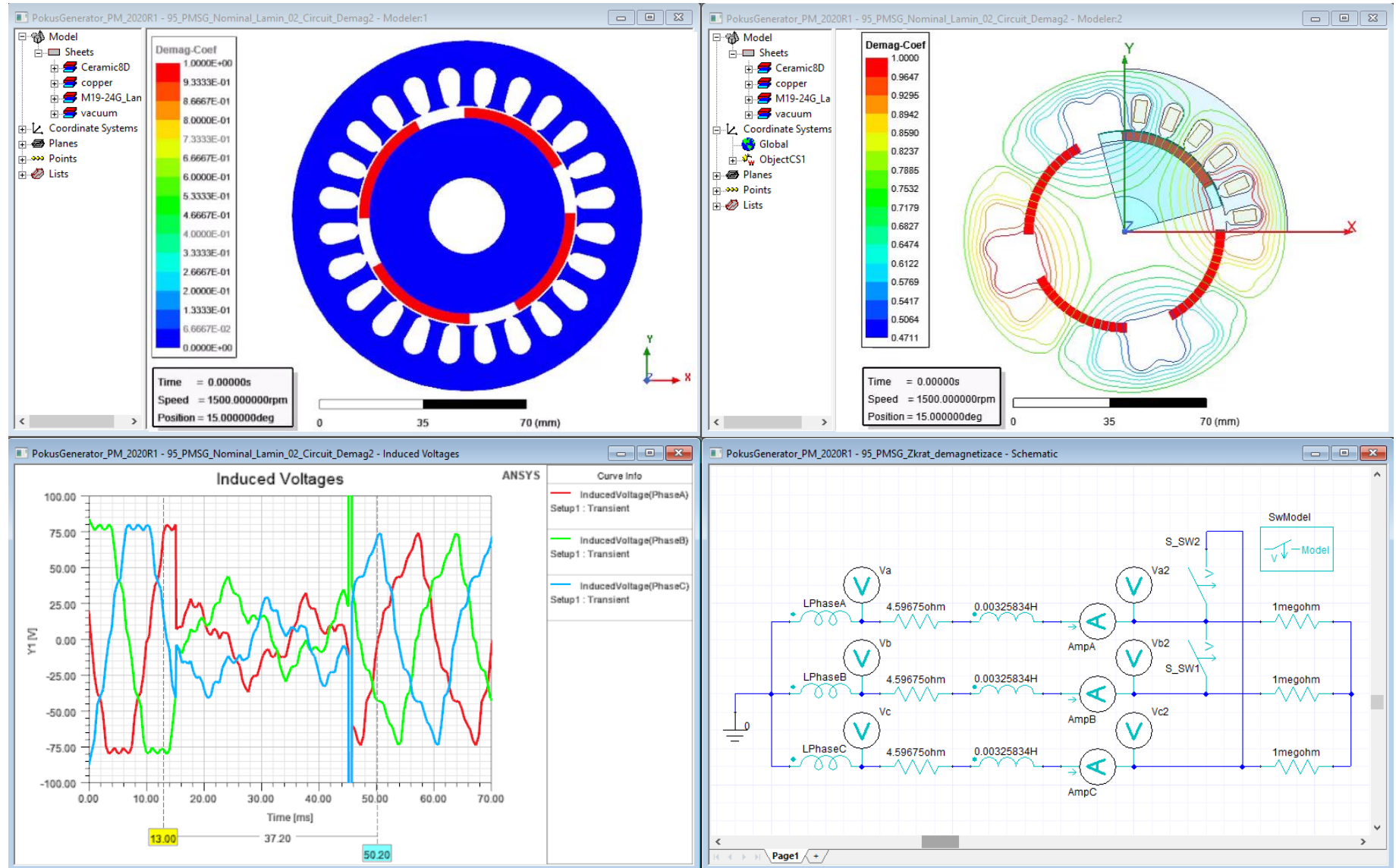
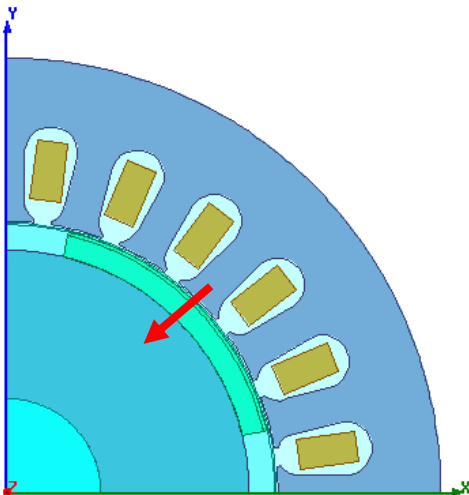
Demagnetizace permanentních magnetů

Popis

- 3 fázový 4 pólový generátor s PM
- 550 W, 50 Hz
- 1500 ot min⁻¹
- PM: Ceramic 8D

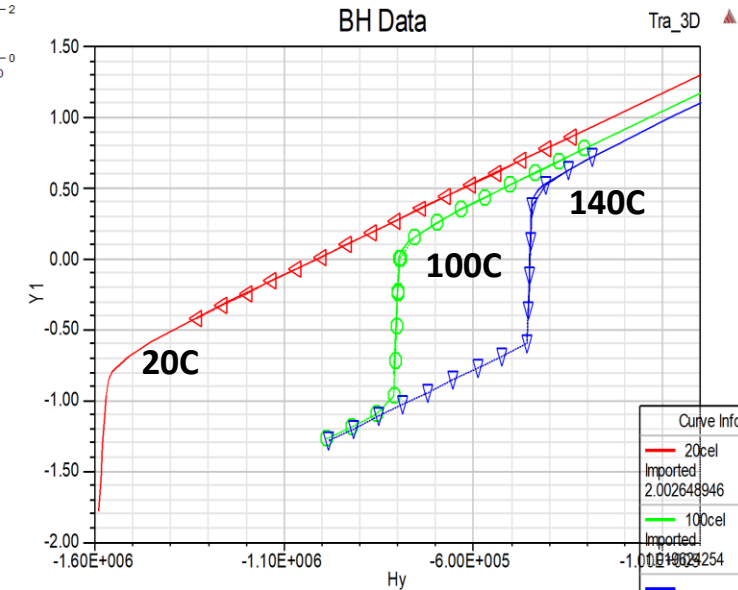
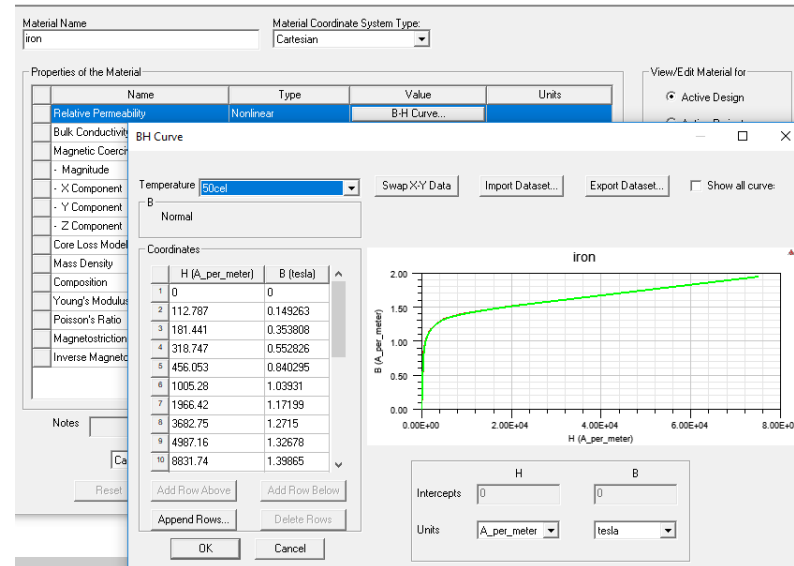
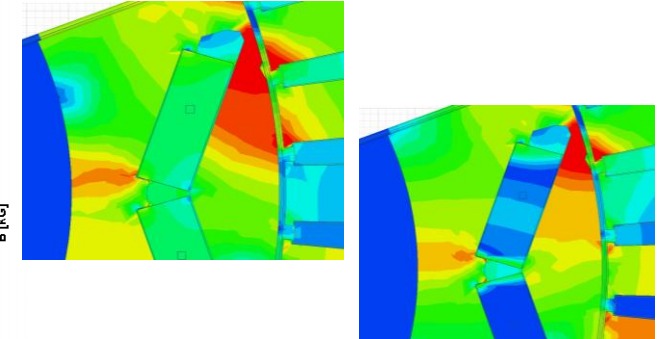
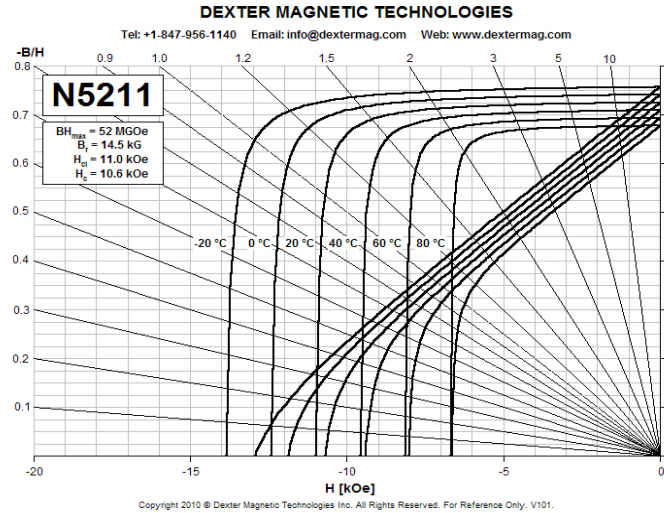
Porucha

- Zkrat všech fází v okamžiku maxima proudu fází A



Teplotně závislé BH křivky

- Kromě stávajícího **teplotního modifikátoru** je možnost zadání **více BH křivek závislých na teplotě**.
- Solver vytvoří novou nelineární BH křivku na základě zadané nebo vypočtené teploty pro každý element zvlášť.
- Podporována je obousměrná tepelná vazba.
- Platí pro
 - 2D i 3D simulace.
 - Magnetostatiku.
 - Harmonický ustálený stav.
 - Transientní řešič.



Podpora anizotropních ztrátových koeficientů

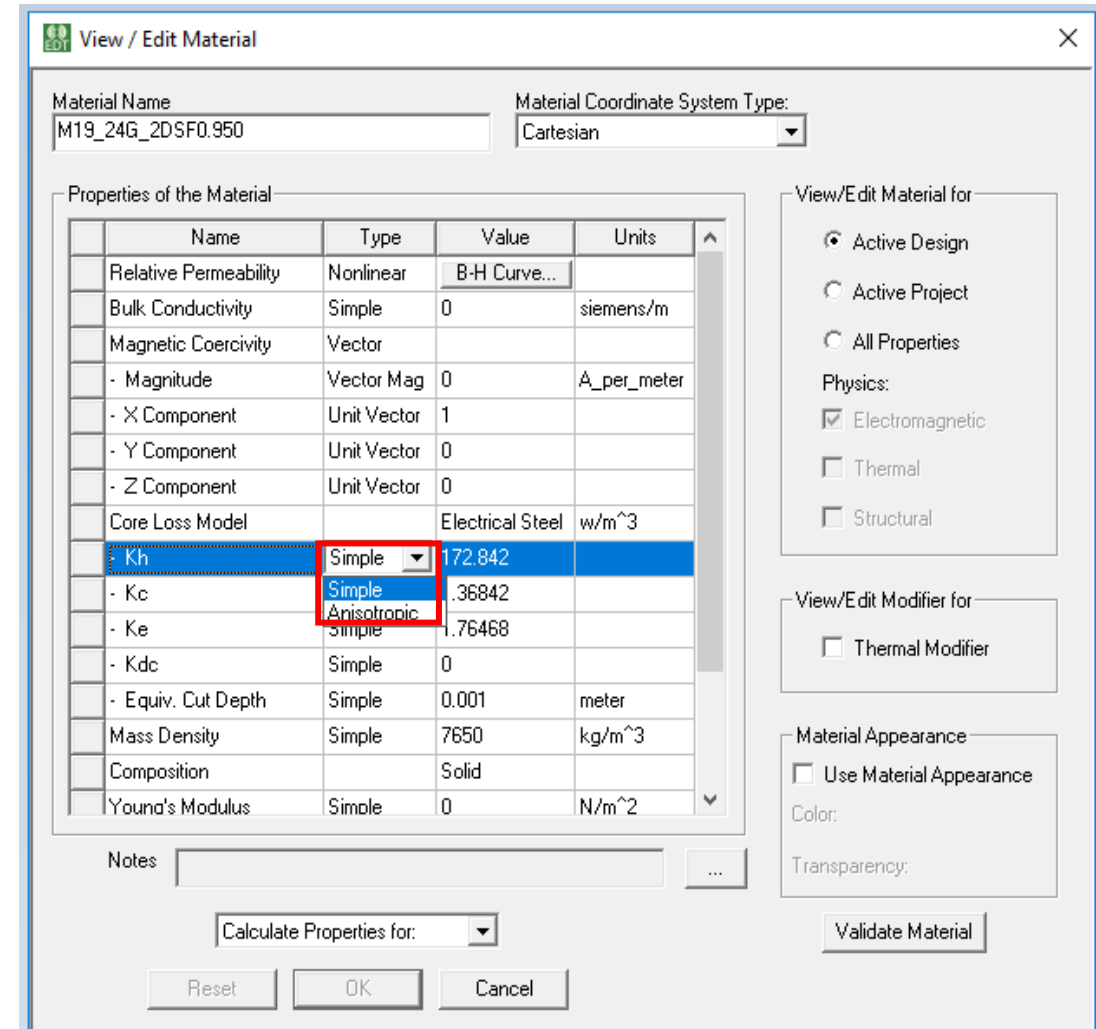
- Pro **izotropní** koeficienty **ztrát v železe** jsou ztráty ve frekvenční oblasti:

$$P_v = P_h + P_c + P_e = K_h f(B_m)^2 + K_c (fB_m)^2 + K_e (fB_m)^{1.5}$$

- Pro **anizotropní koeficienty** mají koeficienty různé hodnoty v jednotlivých hlavních směrech:

$$(K_{hx}, K_{hy}, K_{hz}), (K_{cx}, K_{cy}, K_{cz}) \text{ and } (K_{ex}, K_{ey}, K_{ez})$$

- Anizotropní koeficienty se zadávají volbou „Anisotropic“.



Teplotně závislé ztrátové křivky P(B,T)

- Nový model ztrát jádra „B-P Curve“ v transientním a harmonickém řešiči.
- Pro jednu nebo více teplot uživatel zadává ztráty jádra P(B) v jednotkách:

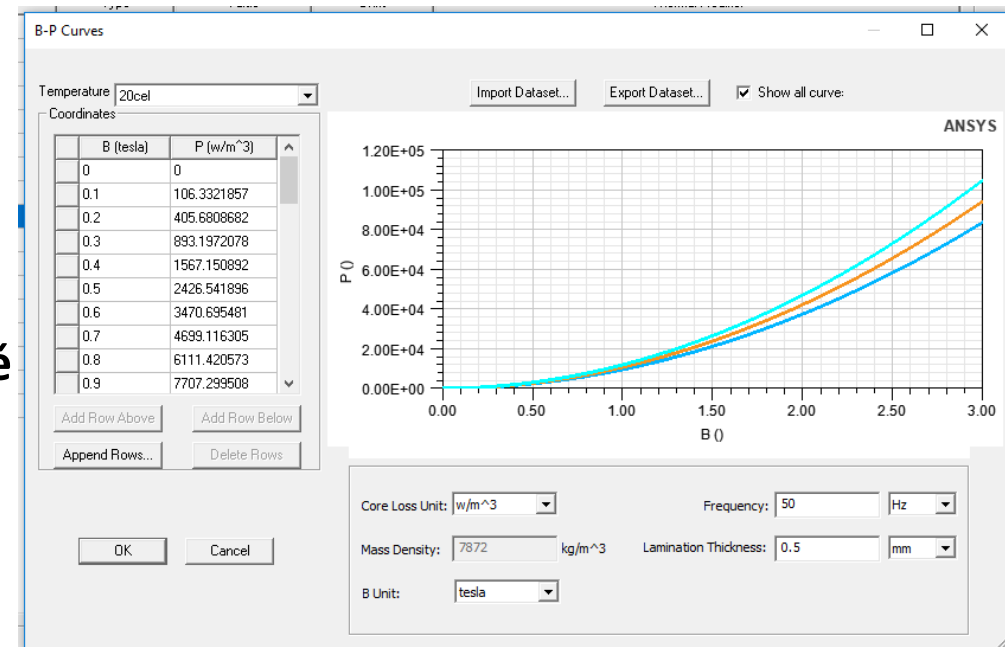
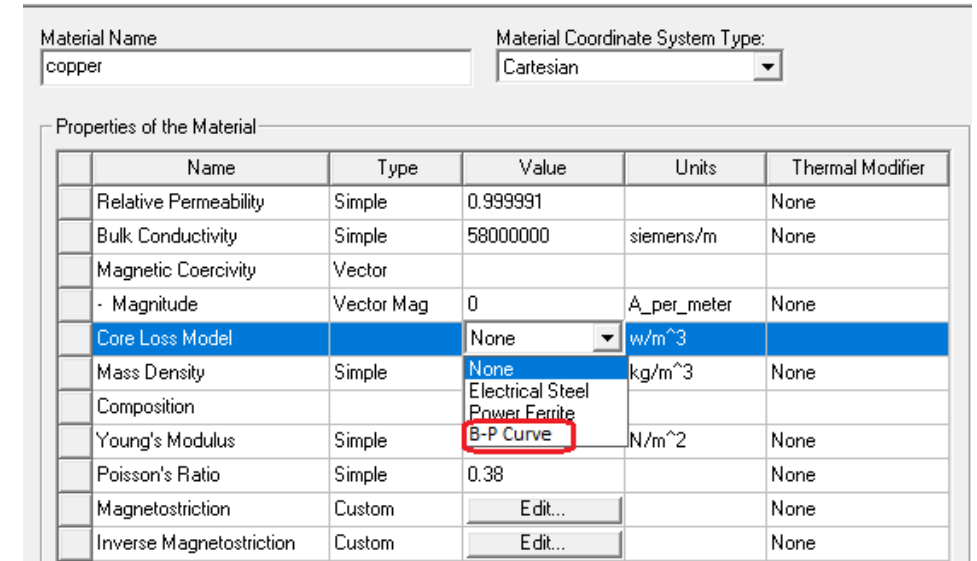
W/m^3 , kW/m^3 , W/lb , W/kg

- Automatická extrakce Steinmetzových koeficientů ztrát jádra:

K_h , K_c , K_e

pro každou teplotu.

- Odvozené koeficienty ztrát jádra jsou prostorově závislé a mohou se měnit jak s magnetickou indukci, tak s teplotou.

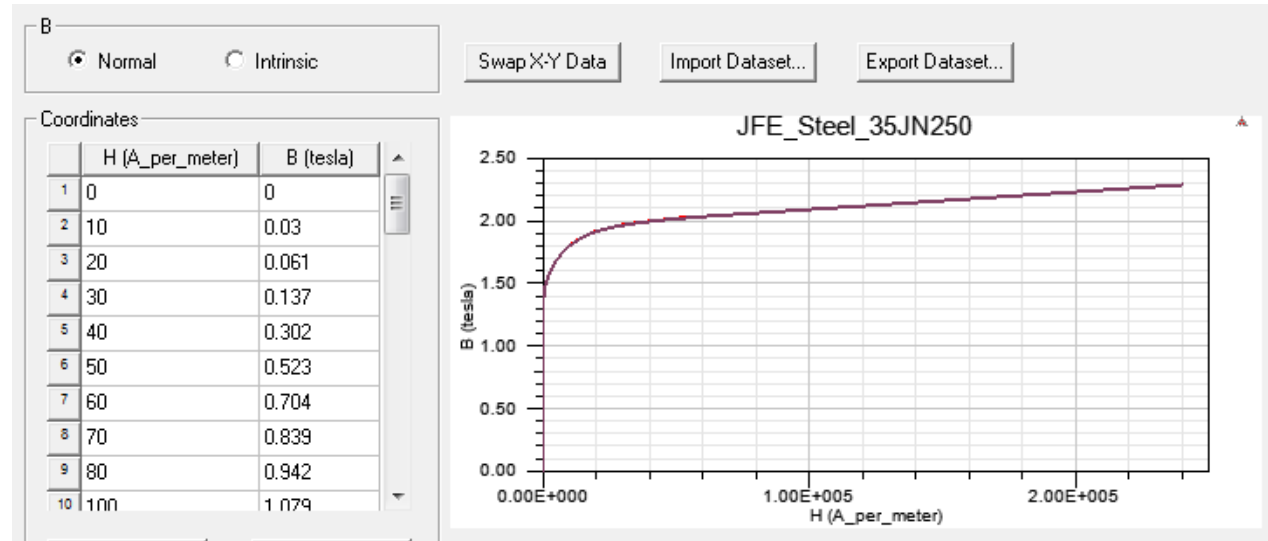


Rozšíření knihovny materiálů

V rámci instalace dostupné knihovny výrobců:

- **Arnold Technologies** (permanentní magnety)
- **ShinEtsu** (permanentní magnety)
- **Hitachi Metals** (elektrotechnická ocel)
- **China Steel** (elektrotechnická ocel)
- **JFE Steel** (elektrotechnická ocel)

Další budou následovat...



Name	Location	Origin	Color	Relative Permeability
Arnold_Magnetics_Alnico 8, Sintered_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics		B-H Curve...
Arnold_Magnetics_Alnico 8B, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics		B-H Curve...
Arnold_Magnetics_Alnico 8B, Sintered_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics		B-H Curve...
Arnold_Magnetics_Alnico 8H, Cast_20C	SysLibrary	ArnoldMagnetics		B-H Curve...

Material Name: JFE_Steel_35JN250
 Material Coordinate System Type: Cartesian

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	1851852	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector Mag	0	A_per_meter
- X Component	Unit Vector	1	
- Y Component	Unit Vector	0	
- Z Component	Unit Vector	0	
Core Loss Model		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	268.326610297612	
- Kc	Simple	0.227103027671392	
- Ke	Simple	2.22473804712886	
- Kdc	Simple	0	
Mass Density	Simple	7600	kg/m^3

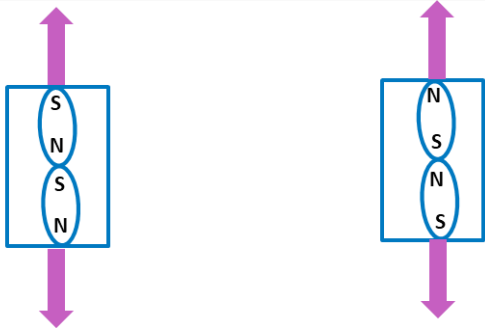
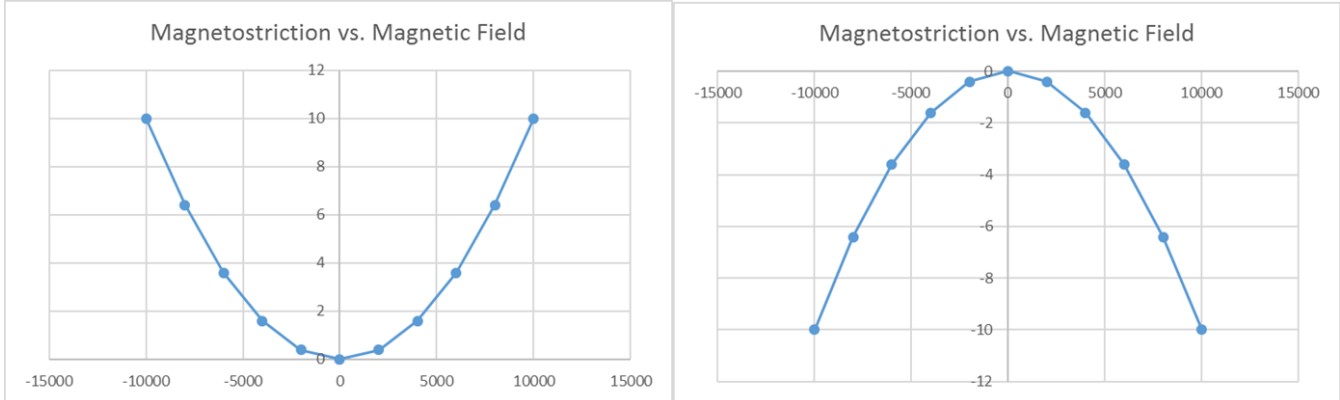


Magnetostrikce

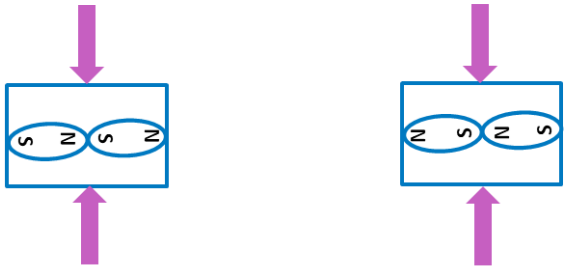
Základy magnetostrikce

Magnetostrikce je proces změny fyzických rozměrů materiálu vlivem působícího magnetického pole.

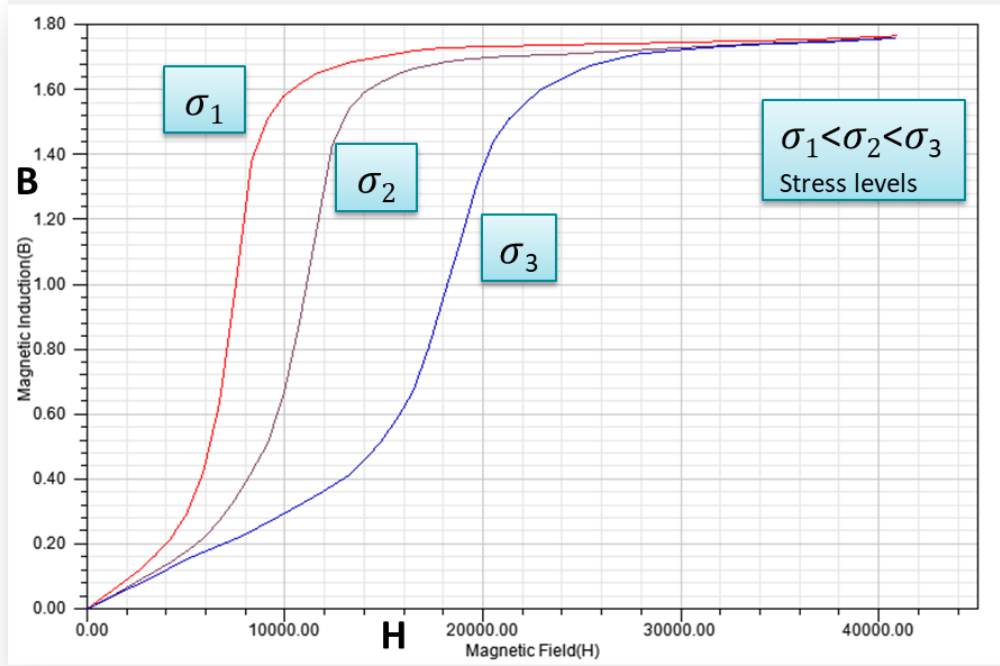
Inverzní magnetostrikční (Villariho) efekt – změna charakteristik feromagnetického materiálu při působení mechanického napětí.



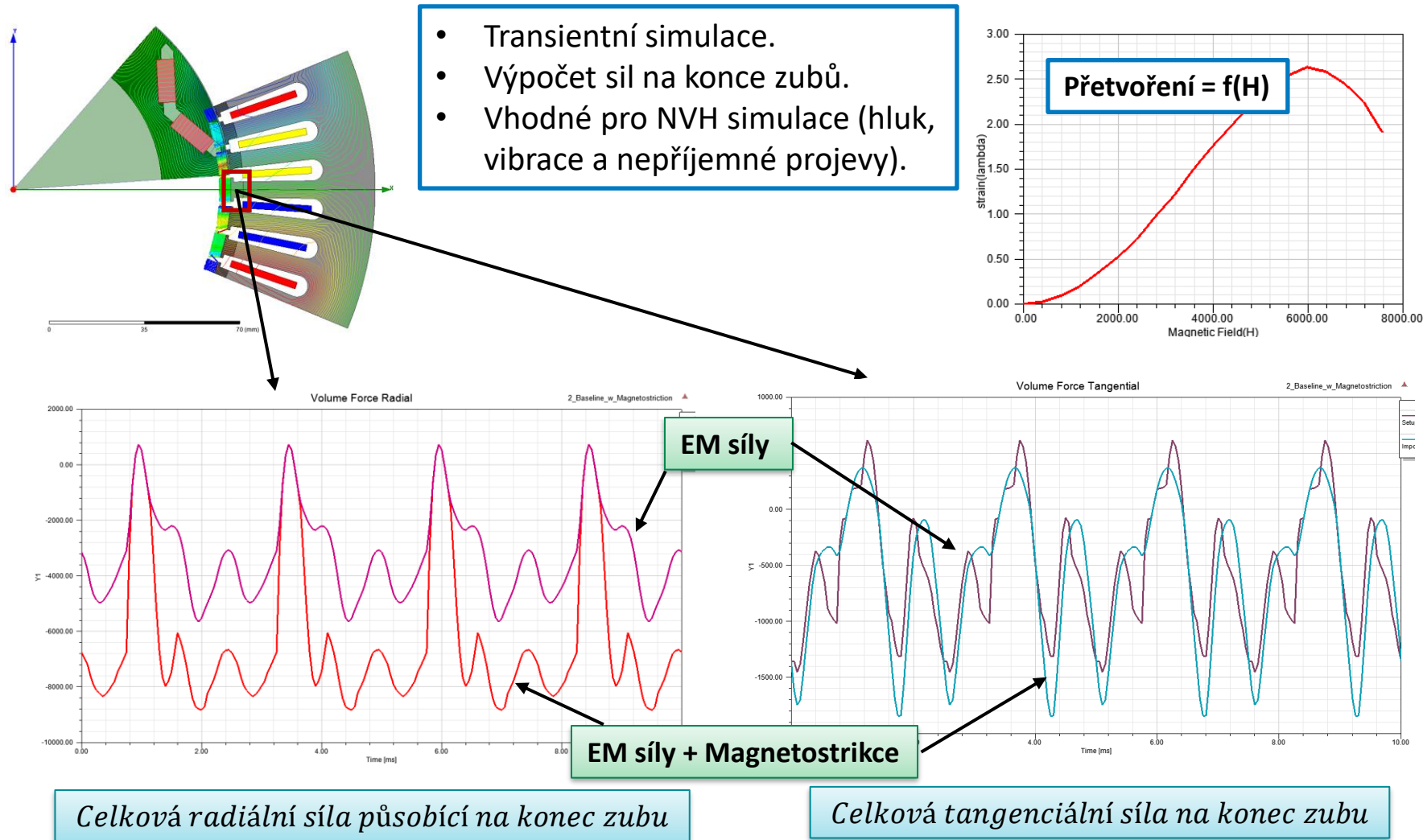
Tahové napětí



Tlakové napětí

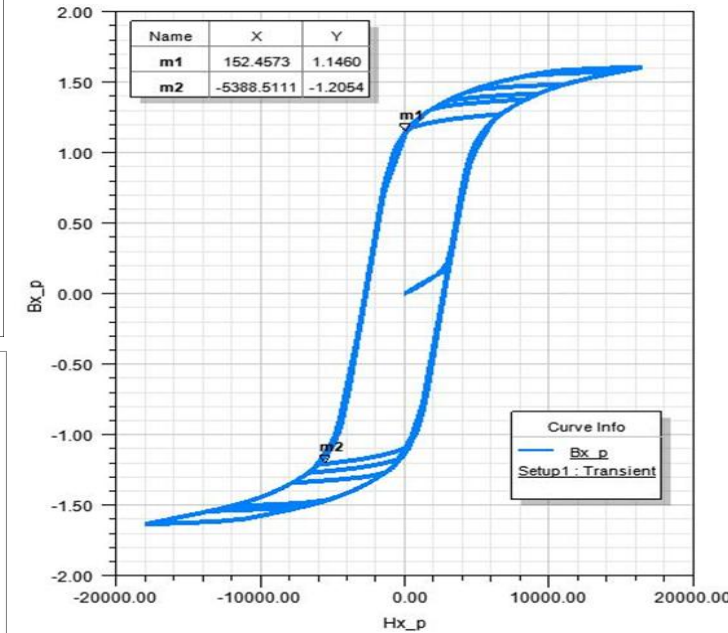
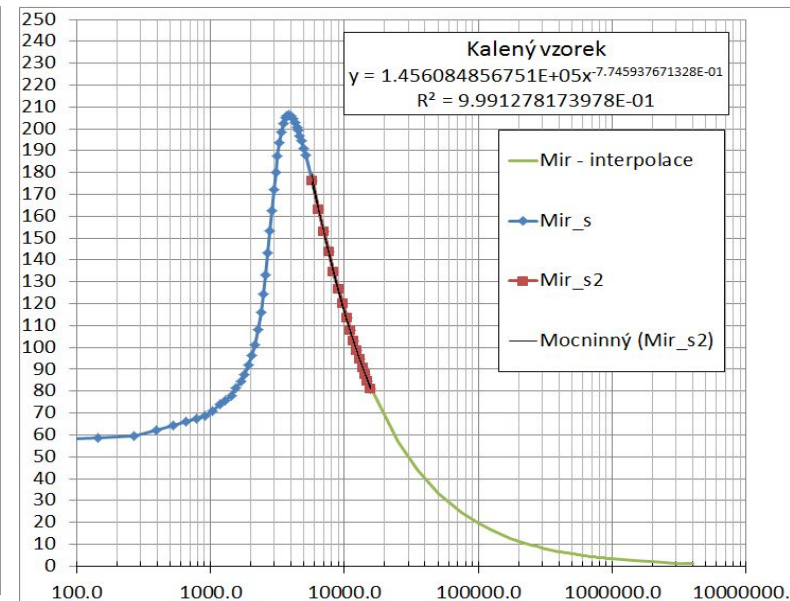
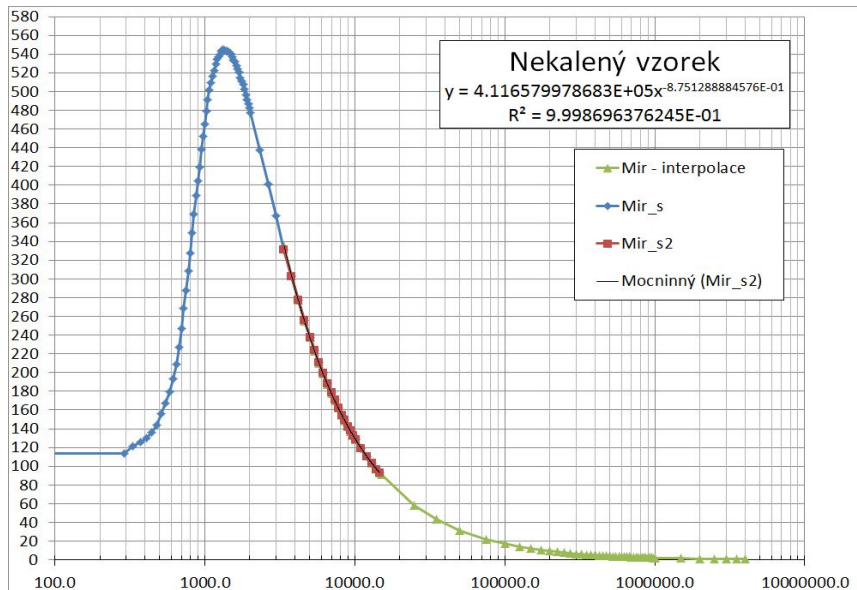
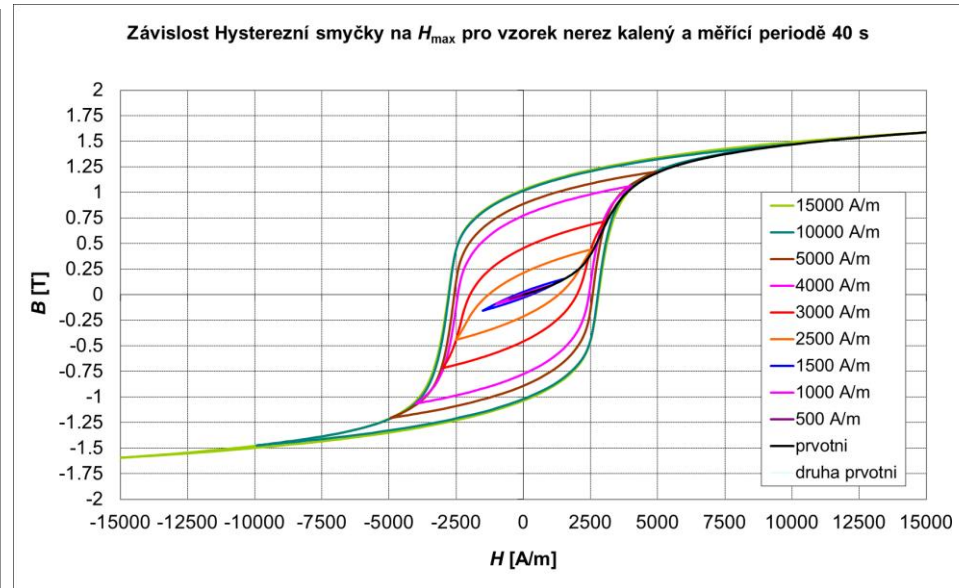
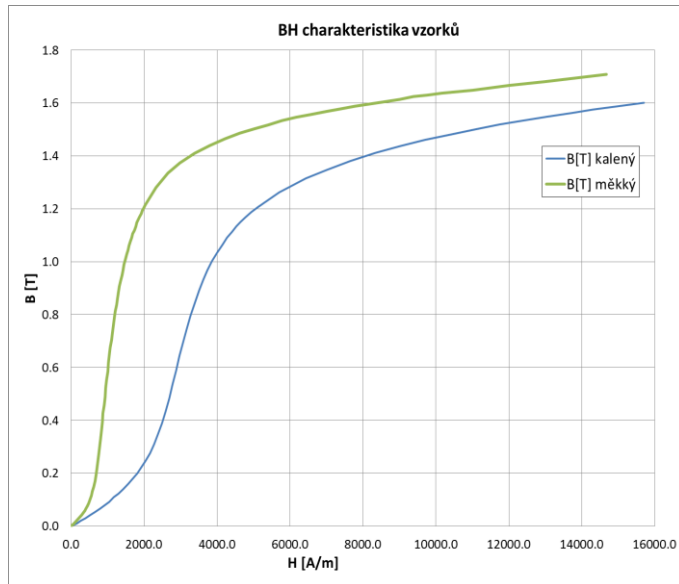


Vliv magnetostricke na výpočet sil





Porovnání magnetických vlastností kaleného a žíhaného vzorku

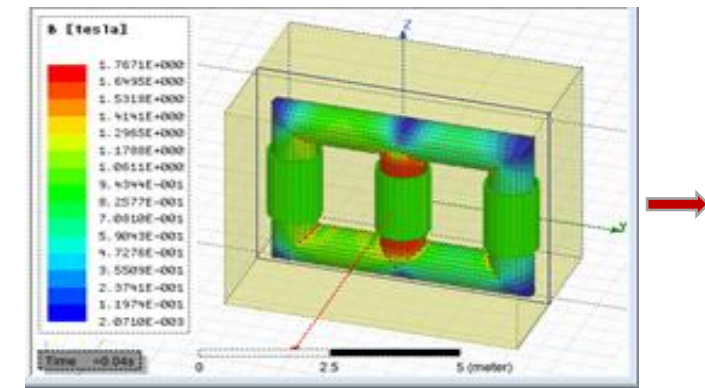
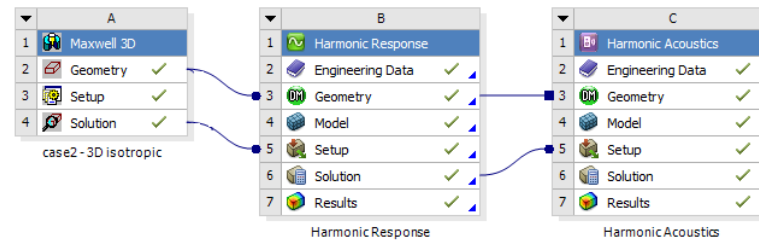




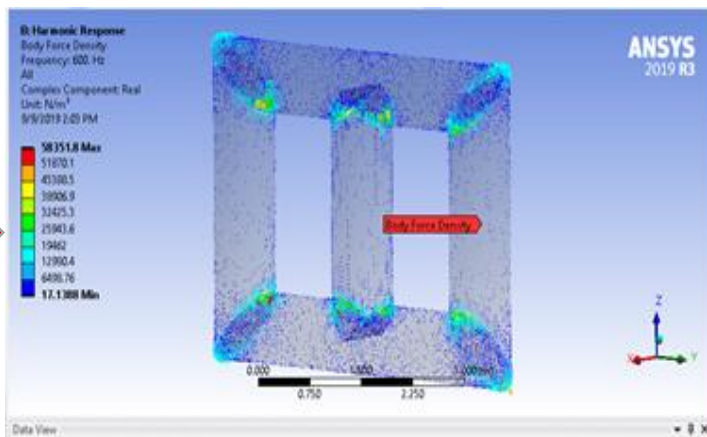
Hluk a vibrace elektrických strojů

— Přenos objemové hustoty sil na základě elementů

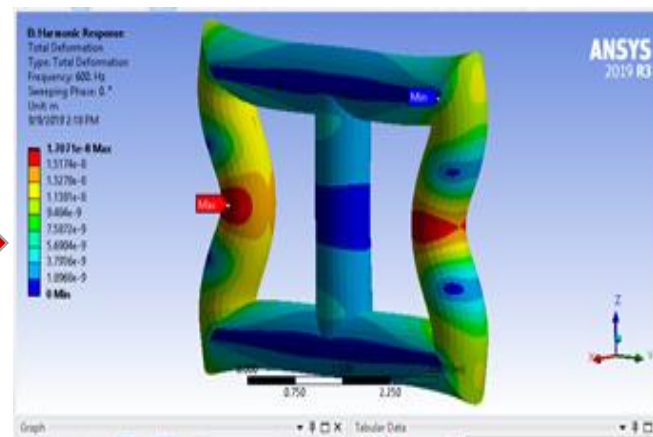
- Maxwell Eddy Current / Transient do Mechanical Harmonic Response
- Používá DFT k převodu sil do frekvenční oblasti
- Harmonická odezva a akustika



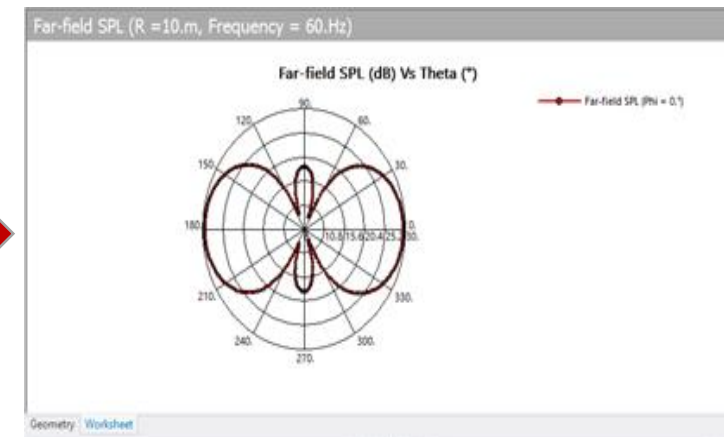
Maxwell 3D



Mapovaná objemová hustota sil

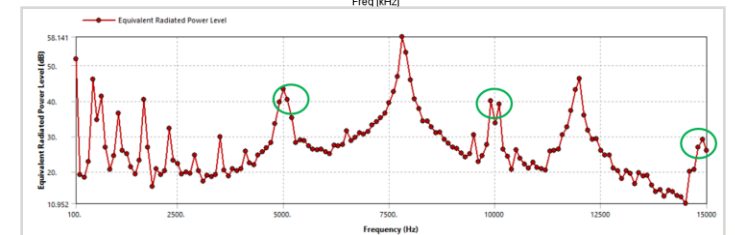
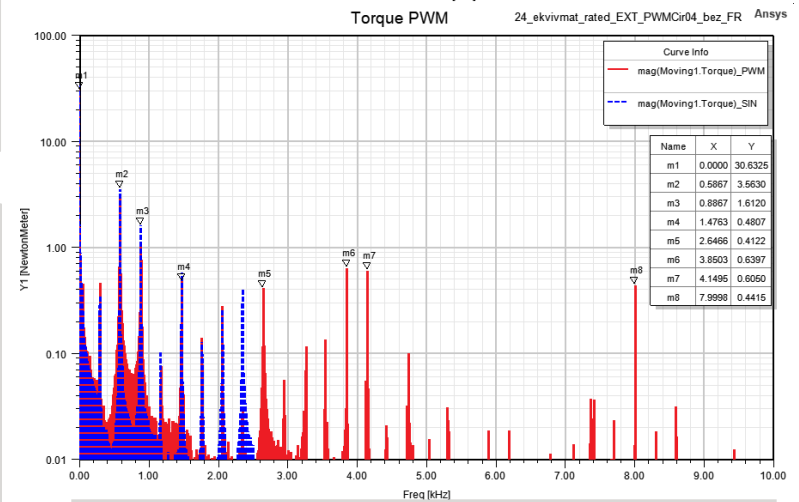
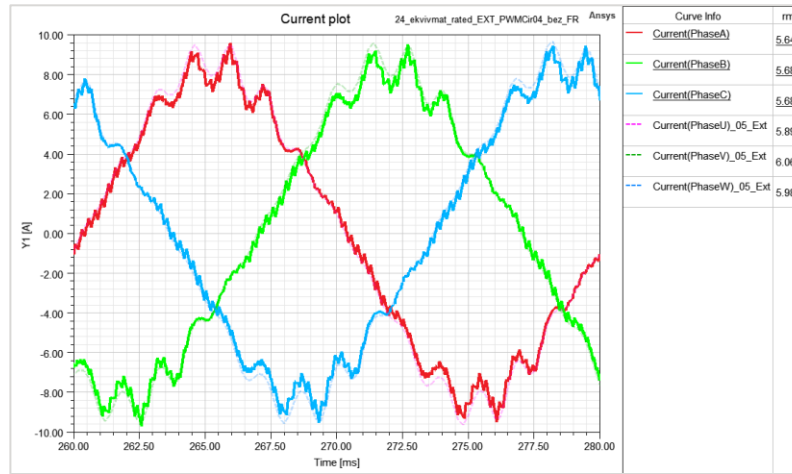
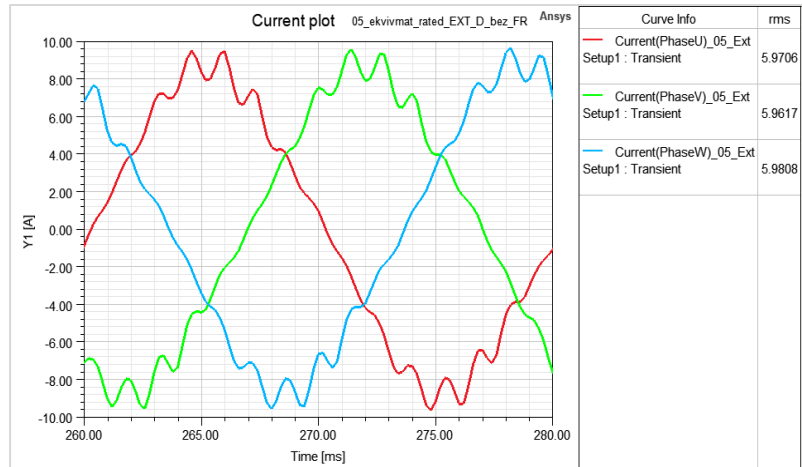
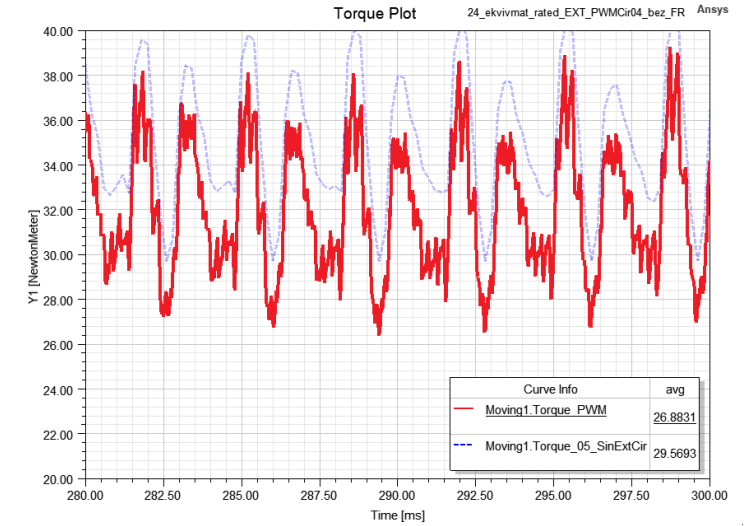
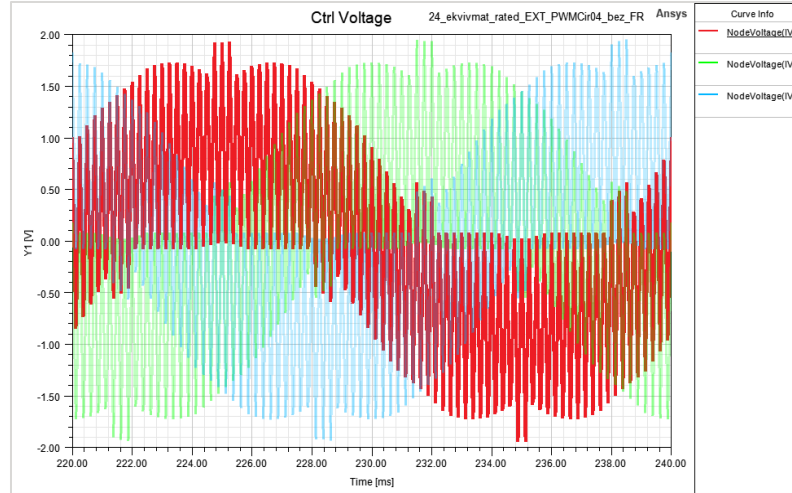
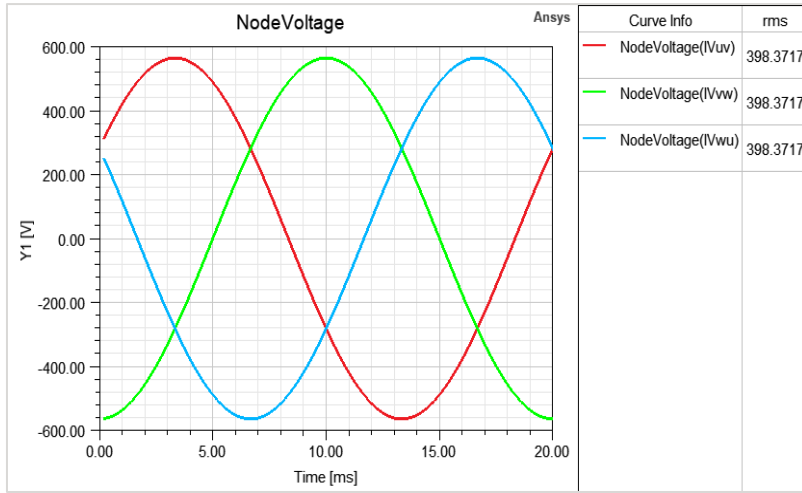


Harmonická odezva



Akustika

Napájení motoru zdrojem SVPWM



Modelování vibrací a hluku elektrických strojů

Transfer Sil

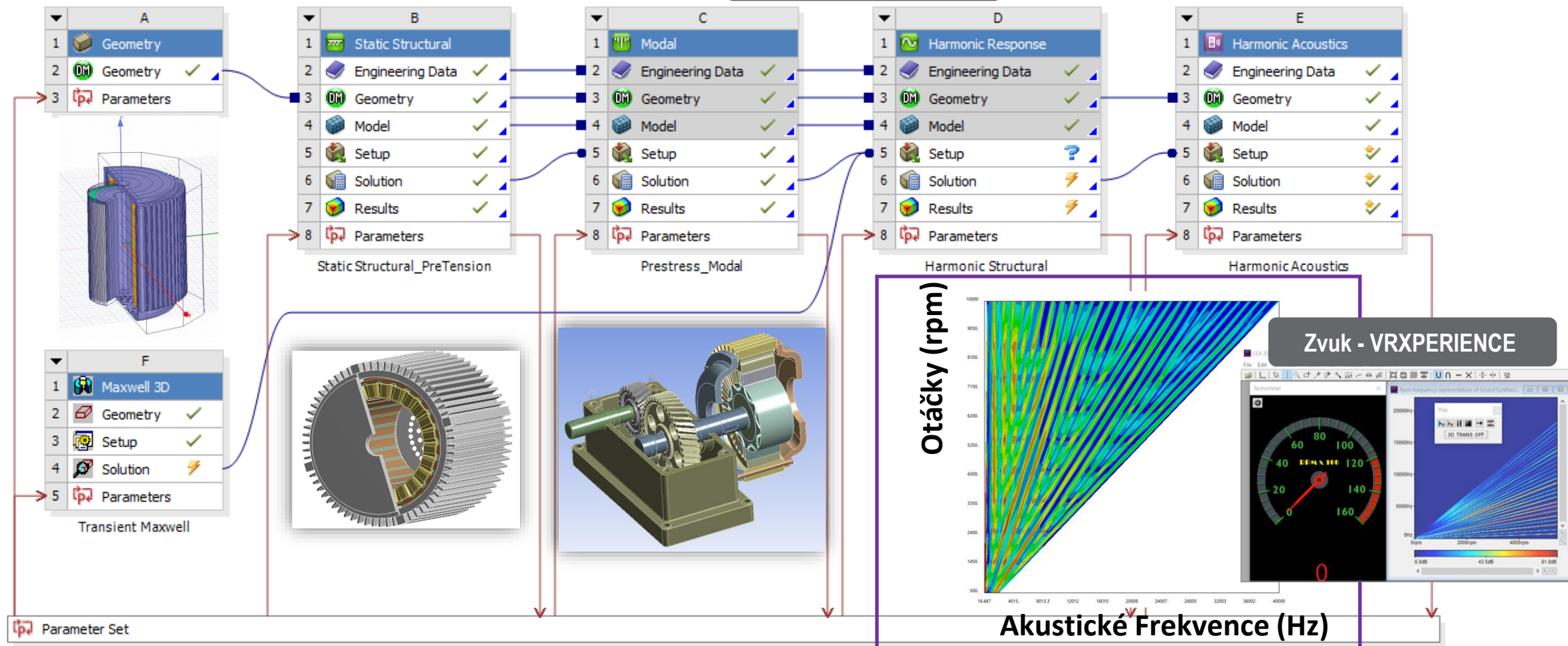
Tvorba ERP a kaskádových diagramů

Maxwell NF Analýza



Harmonická Analýza

Akustická Analýza



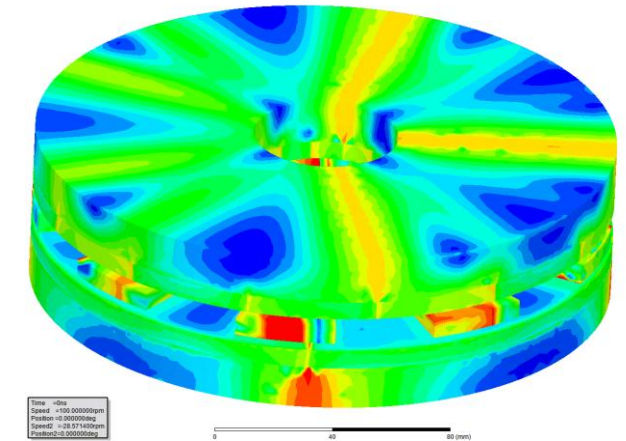
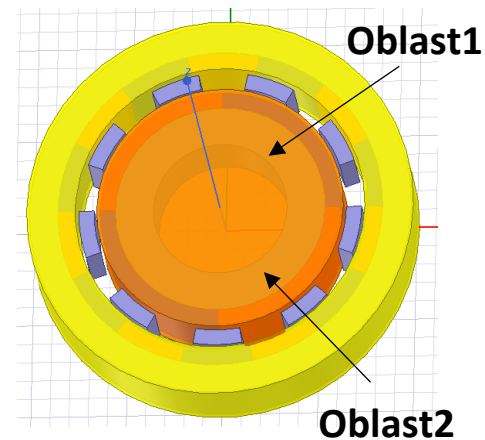
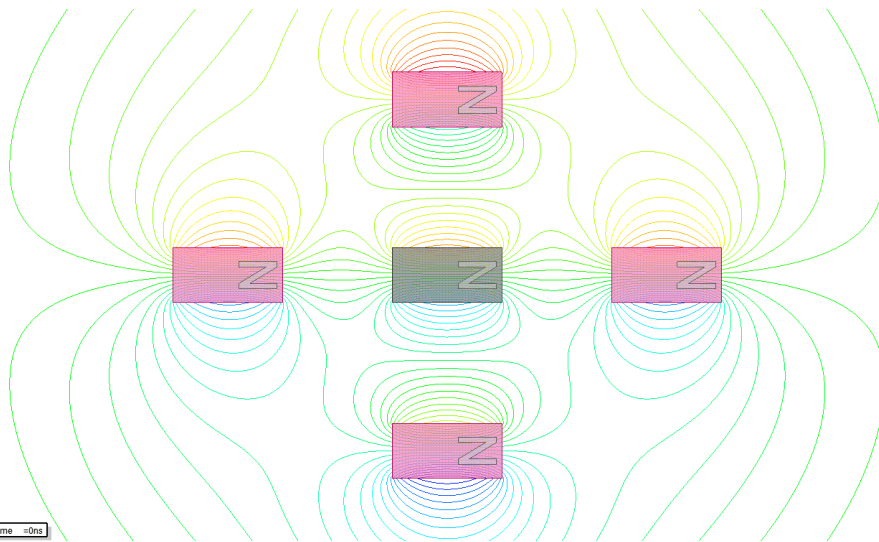


2. triky na efektivní modelování

Pohyb soustavy těles v magnetickém poli

— Pohyb většího počtu těles v magnetickém poli

- Kombinace různých typů pohybu v jednom projektu (**cylindrický** rotační pohyb, **necylindrický** rotační pohyb, **periodický** translační pohyb a **neperiodický** translační pohyb).
- Oblasti mezi jednotlivými typy pohybu se vzájemně nedotýkají.
- Typické aplikace:
 - Elektrické motory, například **vícerotorové motory** pro optimální výkon v různých rozsazích otáček
 - **Simulace systémů** – obvykle zahrnující více pohybových komponent
 - Magnetické převodovky



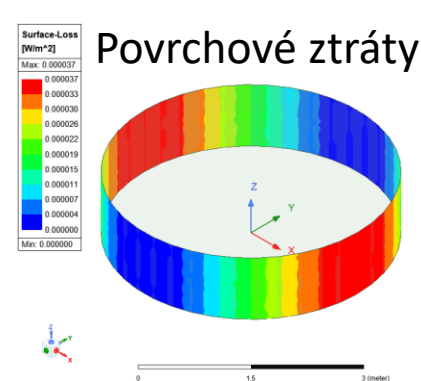
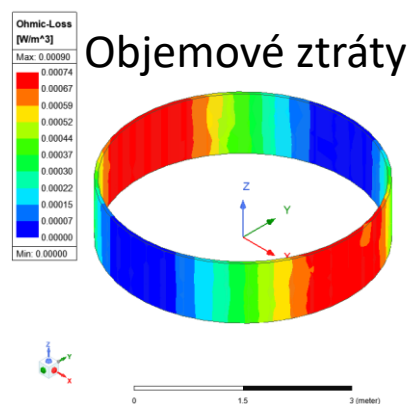
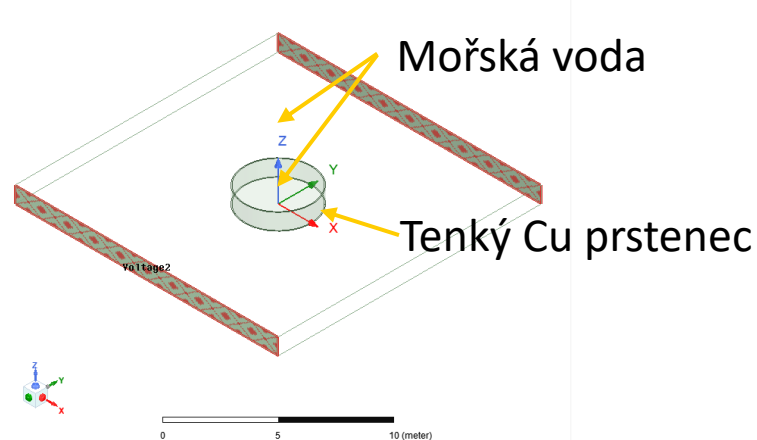
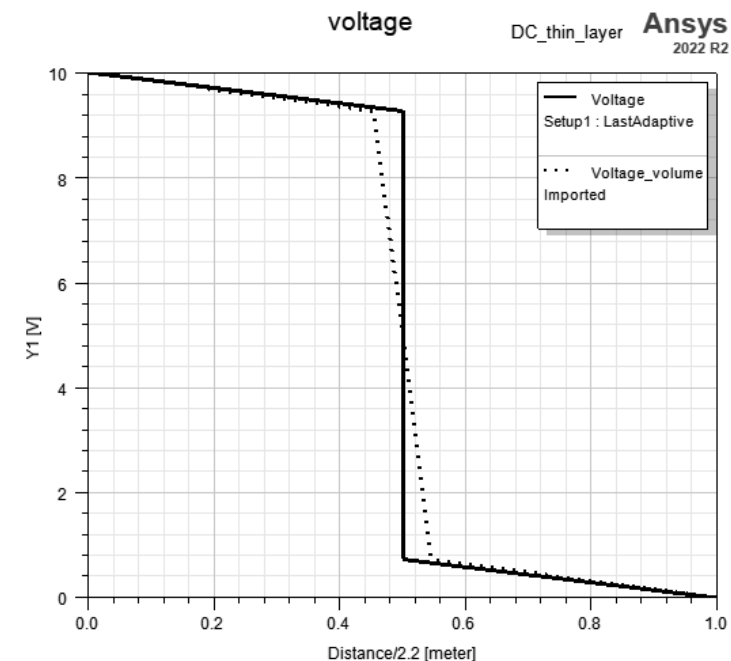
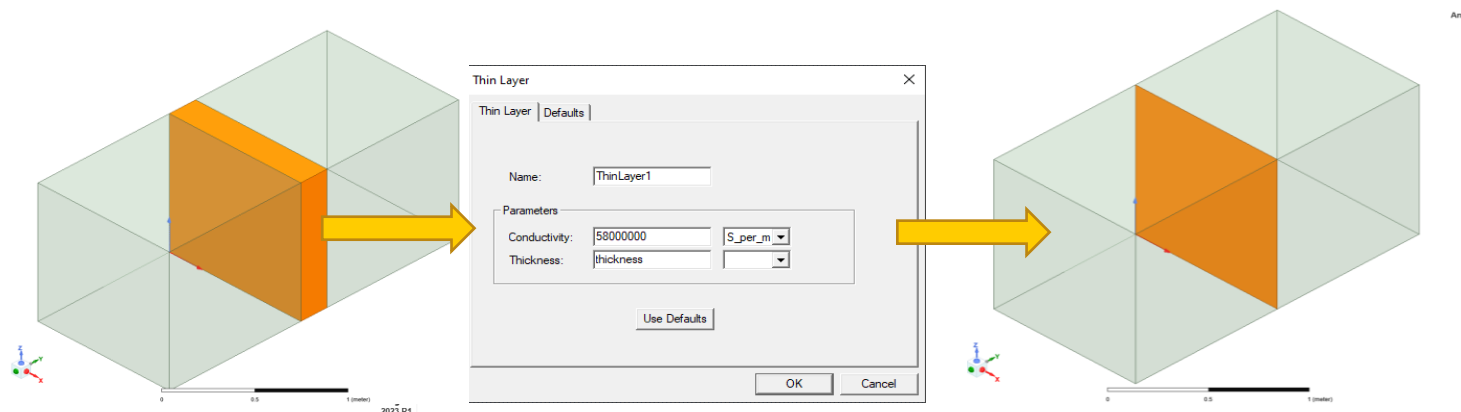
Axiální magnetické ložisko



Simulace tenkých vrstev

Tenké vrstvy – 3D proudové pole

- Model tenké vrstvy založený na elementech.
 - Mezi uzly na obou stranách povrchu je definován **potenciálový skok**.
- Umožňuje obousměrnou tepelnou vazbu (AEDT a WB).

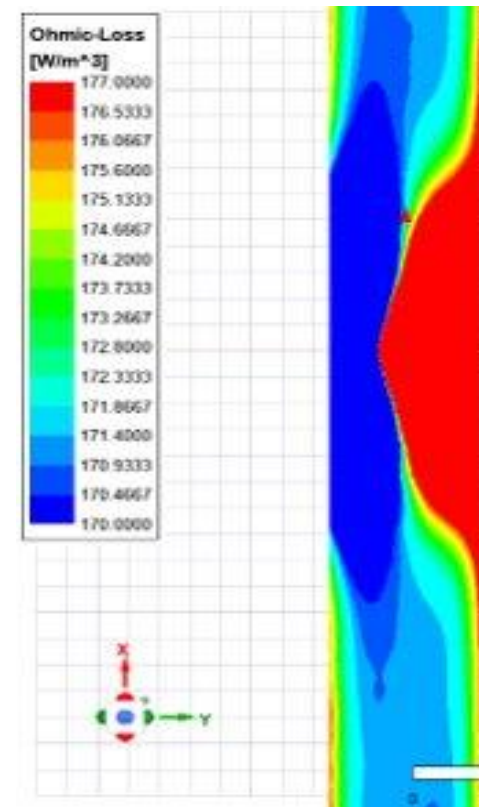


— Rezistivní vrstva – harmonický ustálený stav

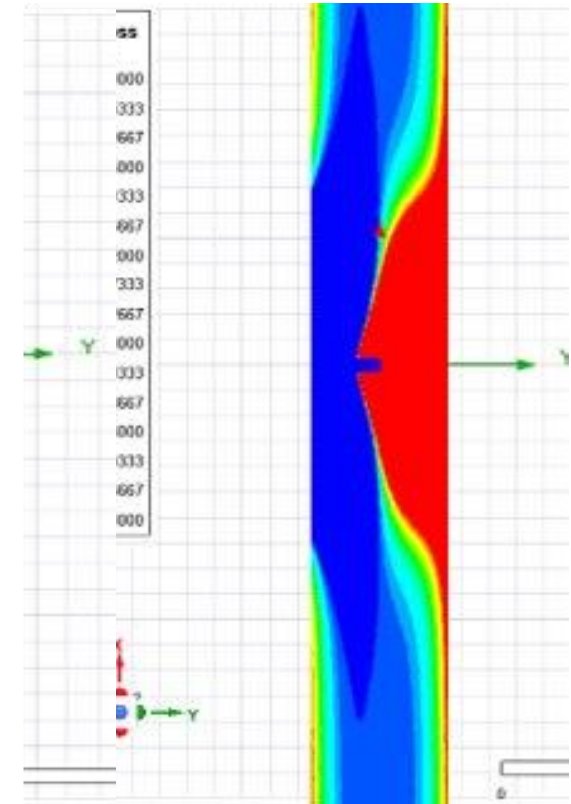
- Rozšíření aplikace rezistivní vrstvy z **transientní** simulace i na simulaci **harmonického** ustáleného stavu.
- Rezistivní vrstvu lze definovat pro:
 - Masivní proudový zdroj.
 - Vinutí libovolného typu.
 - Vodič s aktivovaným výpočtem vířivých proudů.

Předpoklady

- Proud teče **kolmo** k rezistivní vrstvě.
- Podpora DDM řešiče.
- Hustotu povrchových ztrát lze zobrazit na povrchu.



Rezistivní vrstva



Tenký objem

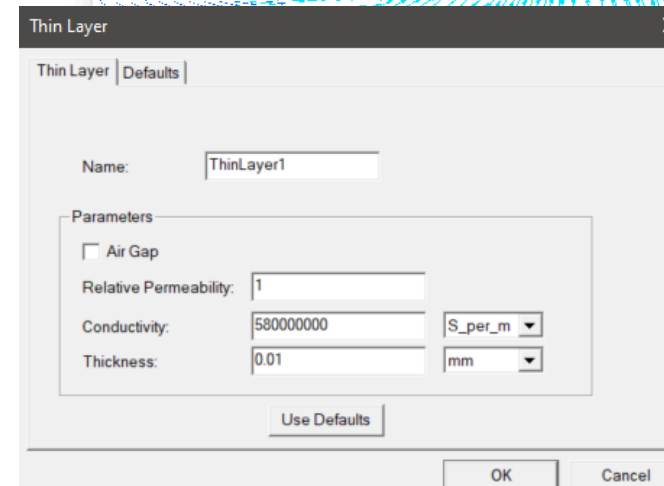
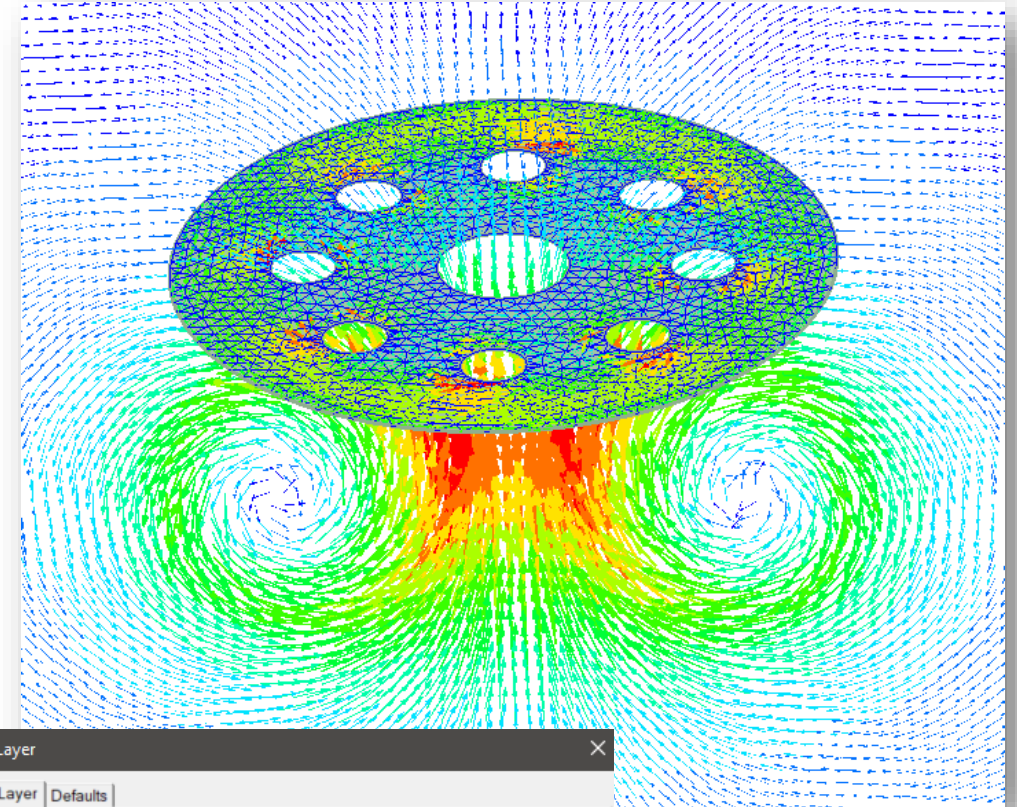
— Skořepinové elementy pro modelování tenkých vodivých vrstev

Motivace

- Vzhledem k **velkému poměru rozměrů** vede **hrubá diskretizace tenkých objemů** v MKP prostředí k **nekvalitní síti**, která snižuje přesnost a zhoršuje konvergenci.
- **Jemná diskretizace** výrazně zvyšuje výpočetní **náročnost** simulace.

Řešení

- **Objem tenkého vodiče** je v numerické oblasti nahrazen geometrií se **sníženou dimenzí** (povrch nebo skořepinový objekt).



— Nelineární rezistivní vrstva – magnetostatický 3D řešič

Motivace

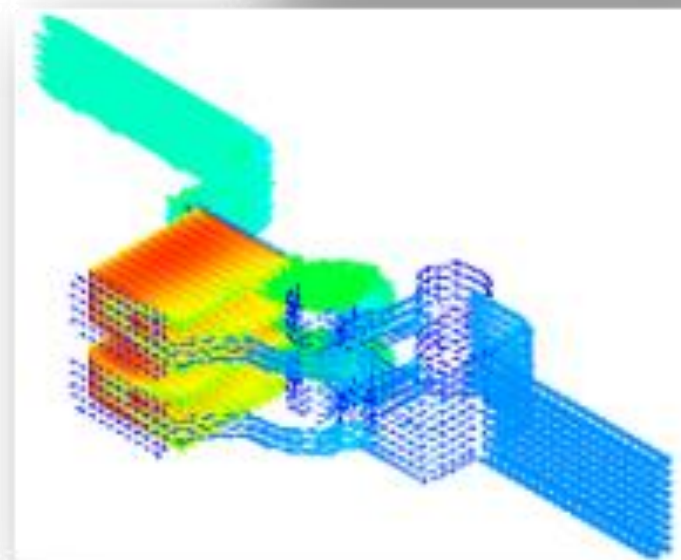
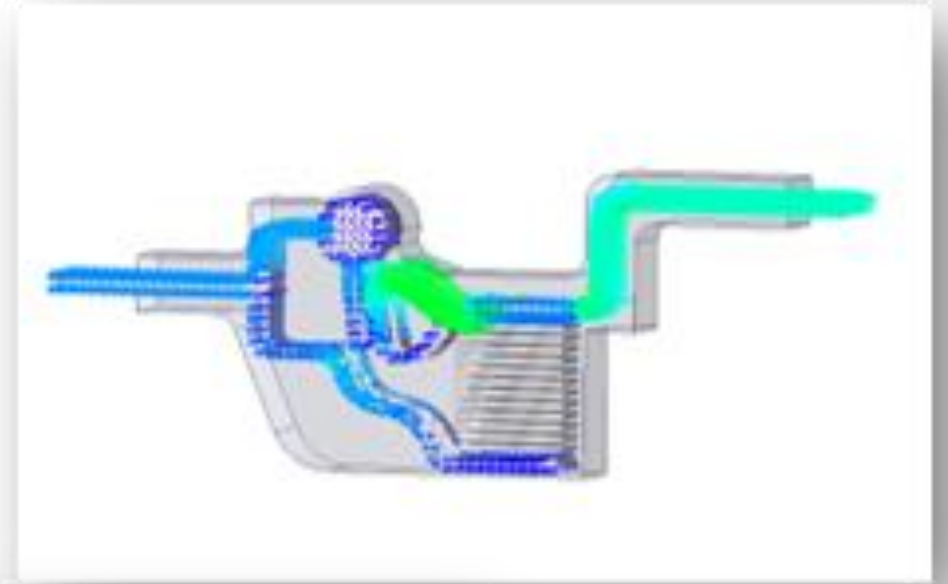
- Velký poměr rozměrů způsobený přítomností tenké vodivé vrstvy ve velké proudové dráze.

Řešení

- Použití povrchu jako okrajové podmínky reprezentující tenkou vodivou vrstvu.

Předpoklady

- Rezistivní vrstva musí být **uvnitř proudové dráhy**.
- Proud **musí protékat** rezistivní vrstvou.
- **Proud** v tenké vrstvě je považován za **kolmý k povrchu**. (Neznamená to, že proud vystupující z rezistivní vrstvy musí být kolmý.)
- **Povrchové ztráty** na rezistivní vrstvě jsou dostupné jako výstup.



— Nelineární rezistivní vrstva pro magnetostatický 3D řešič

Nelineární vztah lze popsat lokální elektrickou vodivostí závislou na proudové hustotě:

- $\sigma(J) = L(c + J^d)/(a + bJ^{d-1})$

Coefficient	Anode	Cathode
a	$3,0 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^8$
b	5,0	$1,0 \cdot 10^1$
c	$1,1 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
d	2,0	2,0

Name:

Parameters

Nonlinear

Resistance:

Anode (current flows out)

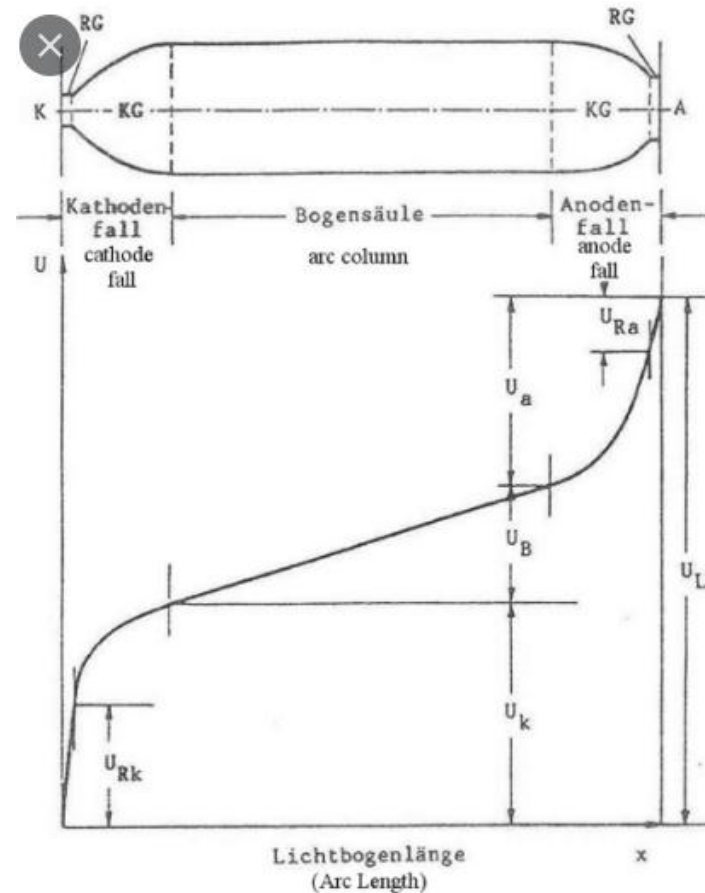
a: b:

c: d:

Cathode (current flows in)

a: b:

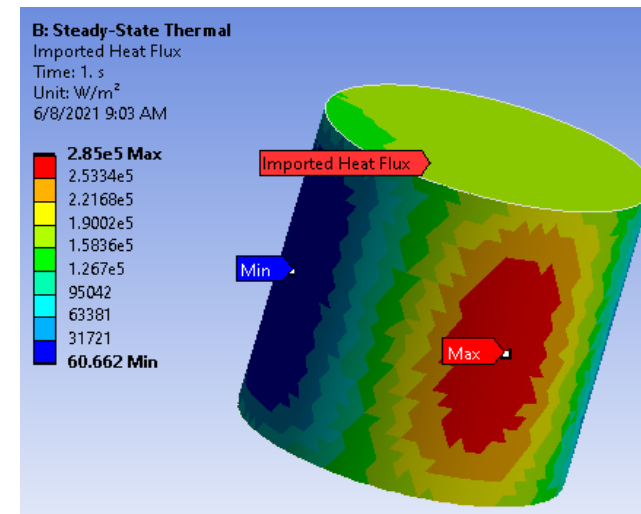
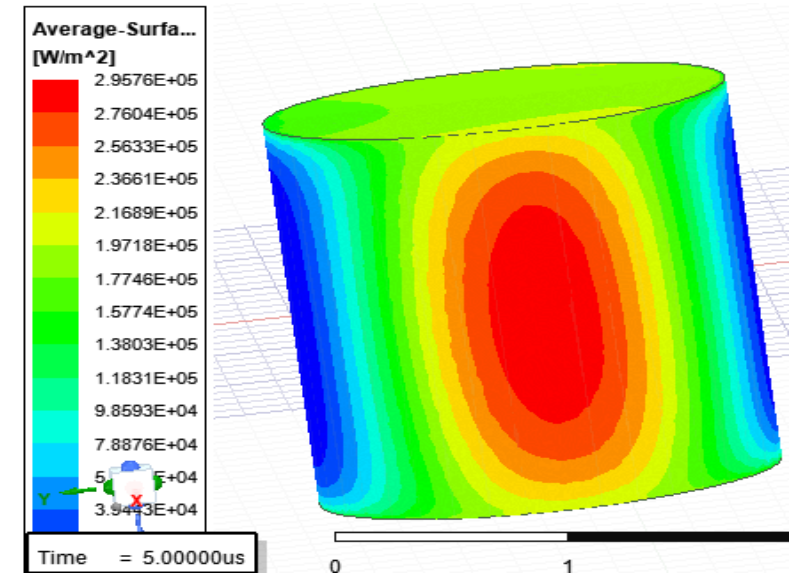
c: d:



- K, A = cathode and anode
- RG = space charge region
- KG = region of contraction
- $U_{a,k}$ = anode and cathode voltage fall
- $U_{Ra,k}$ = voltage drop across space charge region
- U_B = voltage drop across arc column
- U_{LB} = arc voltage

3D transienční impedanční okrajová podmínka

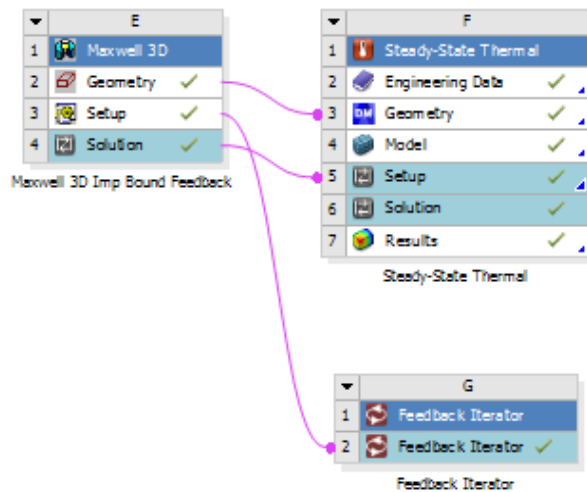
- Impedanční okrajová podmínka dostupná v časové oblasti.
- Časový integrál hustoty povrchových ztrát.
 - Flexibilní výpočet průměrné hustoty ztrát v časovém interval definovaném uživatelem.
 - Časově průměrovanou hustotu povrchových ztrát lze zobrazit na impedanční okrajové podmínce.
- Na vodivost a permeabilitu materiálu impedanční okrajové podmínky lze aplikovat teplotní modifikátor.



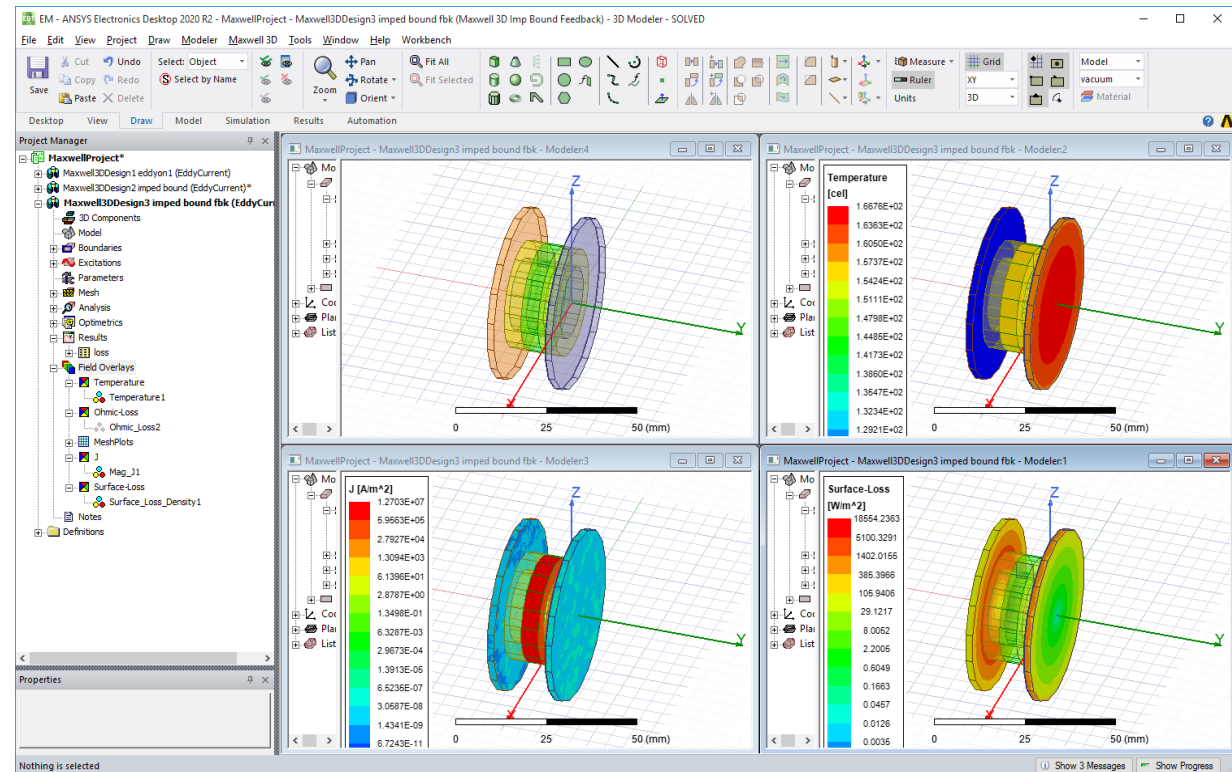
Vypočtené a mapované rozložení hustoty tepelných ztrát

— Tepelná vazba s impedanční okrajovou podmínkou

- Impedanční okrajová podmínka využívá teplotně závislé materiály.
- Umožňuje **obousměrnou** vazbu s teplotními solvery.



Temperature of Objects				
<input checked="" type="checkbox"/> Include Temperature Dependence		<input checked="" type="checkbox"/> Enable Feedback		
Object Name	Material	Temperature Dependent	Temperature	Unit
plate_iron	mild_steel_temp	<input checked="" type="checkbox"/>	70	cel
plate_copper	copper_temp	<input checked="" type="checkbox"/>	60	cel





Splétané vodiče

Modelování splétaných vodičů Litz

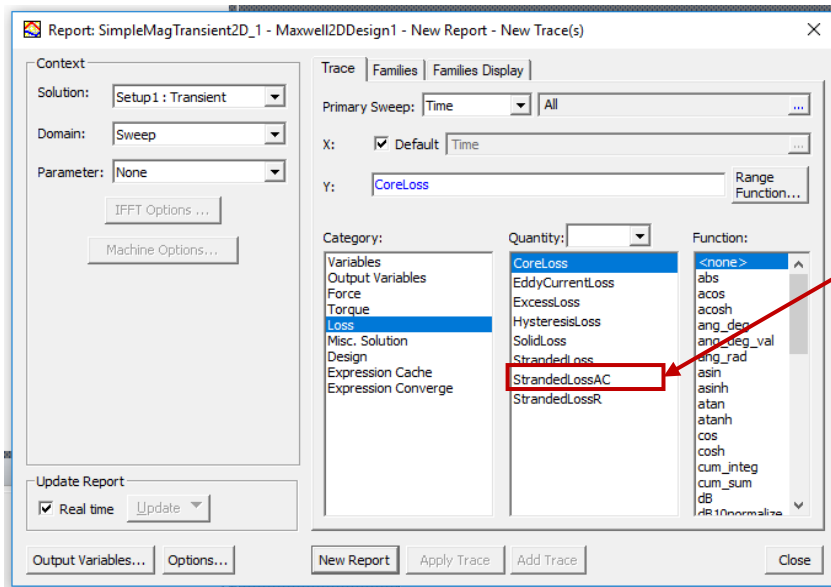
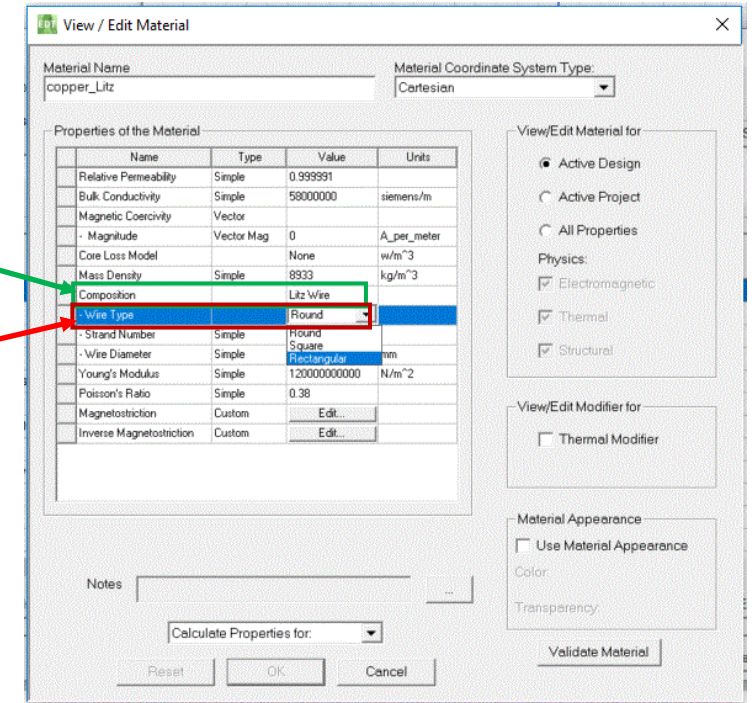
- Vícežilový vodič složený z mnoha velmi tenkých, navzájem izolovaných drátků.
 - Volba materiálové vlastnosti: Kompozice – **Litz Wire**
 - Průřez vláken: **kruhové, čtvercové, obdélníkové**
- Zohledňuje přídavné ohmické ztráty způsobené **povrchovým jevem** a jevem **blízkosti**.
- Vyčíslení ztrát: **StrandedLossAC**.



Litzendraht = „splétaný vodič“

Kompozice

Průřez drátků

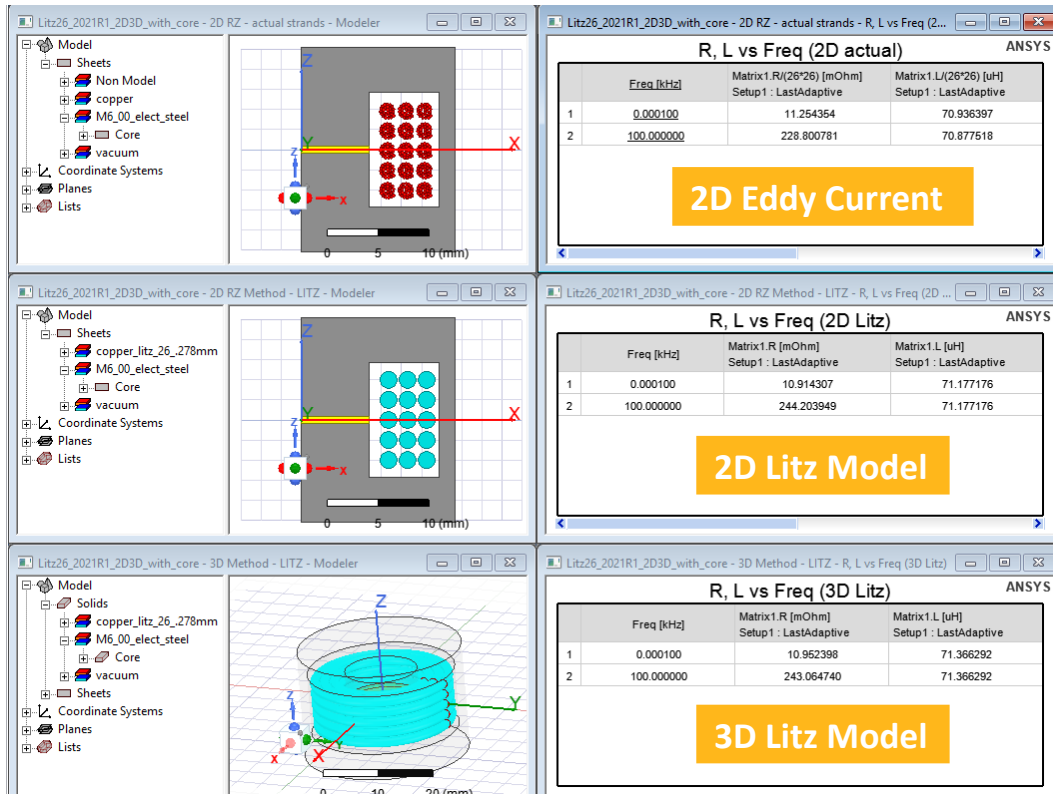


StrandedLossAC

Simulace			
	X	✓	2DRZ
	Model Litz	Model Litz	Vodič po vodiči
Ztráty	314.3 mW	1013.2 mW	1003.9 mW

Ztráty ve vodiči typu Litz – impedanční matice 2D/3D

- V rámci harmonické analýzy.
- Model Litz zohledňuje **přídavné ztráty** způsobené **povrchovým jevem** a jevem **blízkosti** ve vláknech vodiče.
- **Reálná** část matice impedance zahrnuje vliv těchto ztrát.



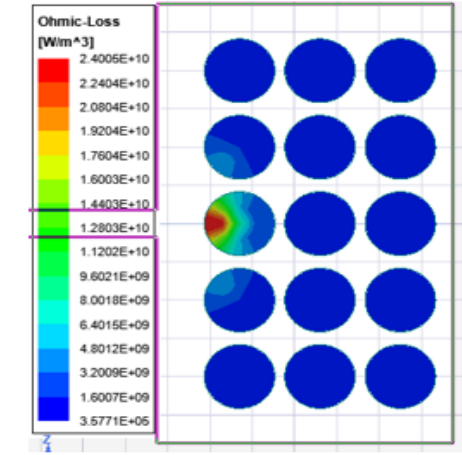
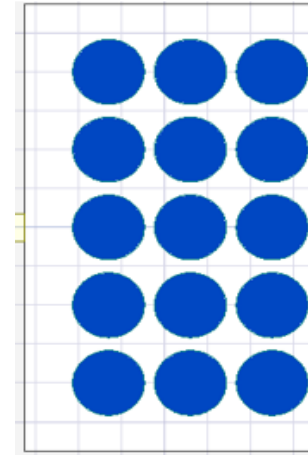
R,L v rámci 6% tolerance pro všechny uvažované případy

Freq	Solver	R (mΩ) 100kHz	L (uH)
DC	2D Eddy Current	11.25	70.9
	2D Litz Model	10.91	71.2
	3D Litz Model	10.95	71.4

Freq	Solver	R (mΩ) 100kHz	L (uH)
100 kHz	2D Eddy Current	228.8	70.9
	2D Litz Model	244.2	71.2
	3D Litz Model	243.1	71.4

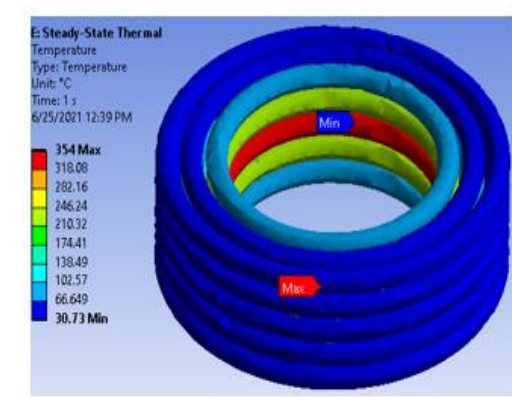
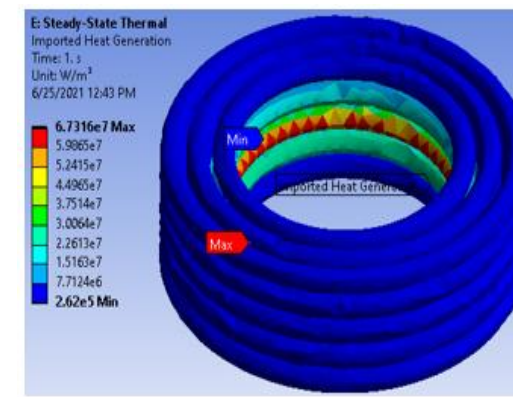
Obousměrná tepelná vazba ztrát vodiče Litz

- DC ztráty a AC ztráty jsou přiřazeny jako **Emloss** pro tepelnou vazbu u Litz vinutí.
- Zobrazení pole ztrát Emloss.
- Integrovaný výpočet ztrát Litz vodiče v transientním solveru.
- Soubor .lss ve 3D solveru vířivých proudů pro výstup ztrát Litz vodiče.
- Podpora pro **2D/3D harmonický i transientní solver**.
- Obousměrná tepelná vazba WB – AEDT.
- Na elektrickou vodivost materiálu lze aplikovat **teplotní modifikátor** pro zahrnutí modelu **teplotně závislých ztrát** Litz vodiče.



EM ztráty – X Model Litz

EM ztráty – ✓ Model Litz



Importovaná hustota ztrát

Rozložení teplotního pole

Vliv kroucení vodiče Litz na AC/DC odpory a ztráty

Stávající model

- Na svorkách vinutí typu Litz je efekt vířivých proudů zohledněn **semianalyticky**.
- Přesnost stávajícího modelu: Litz vodiče jsou uvnitř svazku dokonale zkroucení, aby se zabránilo cirkulačním proudům mezi jednotlivými prameny vodiče.
- Při **zanedbání vlivu kroucení** jsou **AC/DC ztráty podhodnoceny**.

Vylepšený Litz model

- **Není nutné vytvářet geometrii** jednotlivých zkroucených plných vodičů po jednom.
- Vyžaduje pouze jeden dodatečný parametr – **faktor délky zkroucení** (Twisting Length Factor), tj. **poměr délky zkrouceného vodiče k délce přímého svazku**.
- Zohledňuje **vliv kroucení na AC/DC odpory a ztráty v 2D/3D transientních simulacích** a simulacích **vířivých proudů**.
- Podporuje kroucení různých typů Litz vodičů: kruhových, čtvercových i obdélníkových vodičů.



Properties of the Material

Name	Type	Value	Un
Relative Permeability	Simple	0.999991	
Bulk Conductivity	Simple	58000000	sieme
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector...	0	A_pe
Core Loss Model		None	w/m'
Mass Density	Simple	8933	kg/m
Composition		Litz Wire	
- Wire Type		Round	
- Strand Number	Simple	1	
- Twisting Length Factor	Simple	1	
- Wire Diameter	Simple	0	mm
Young's Modulus	Simple	12000000...	N/m'
Poisson's Ratio	Simple	0.38	

View/Edit Material for

- Active Design
- Active Project
- All Properties

Physics:

- Electromagnetic
- Thermal
- Structural

View/Edit Modifier for

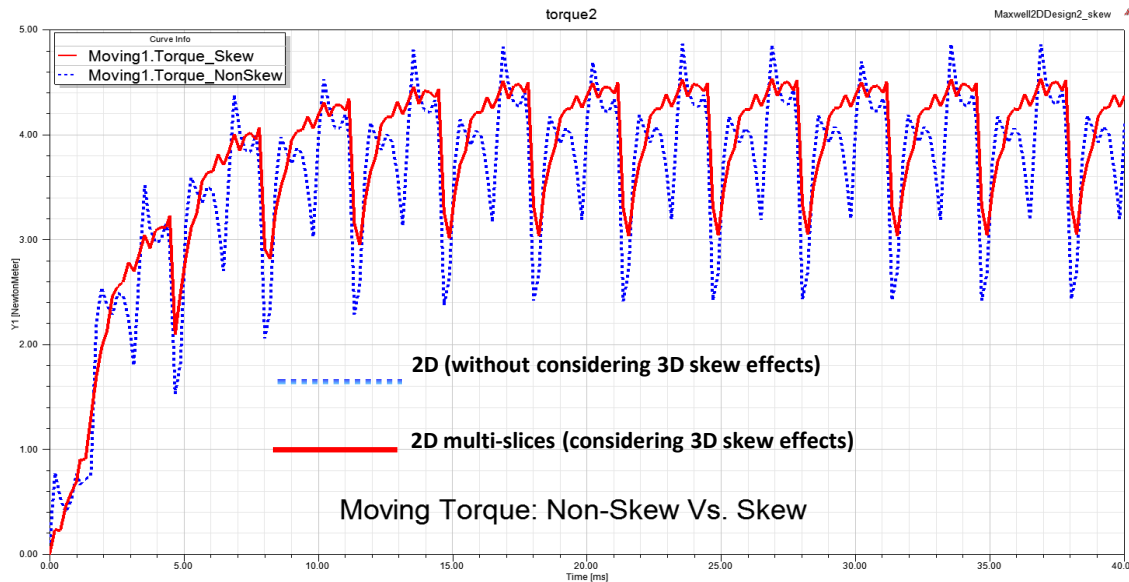
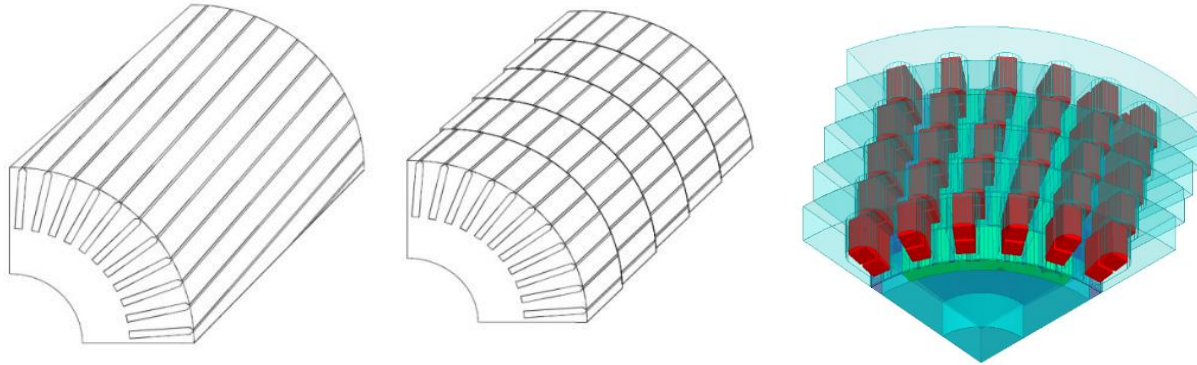
- Thermal Modifier
- Spatial Modifier



Zešikmení drážek

Podpora zešikmených drážek ve více řezných rovinách – 2D transient

- Vícevrstvý model zešikmení.
- Porovnání simulací s a bez efektu zešikmení.



2D Design Settings

Advanced Product Coupling | Background | Matrix Computation | Validations

Material Thresholds | Symmetry Multiplier | Model Settings | Preserve Transient Solution

Model Depth: 250 mm

Skew Model

Use Skew Model

Skew Part: Rotor Stator

Skew Type: Continuous

No. of Slices: 5

Skew Angle: 5 deg

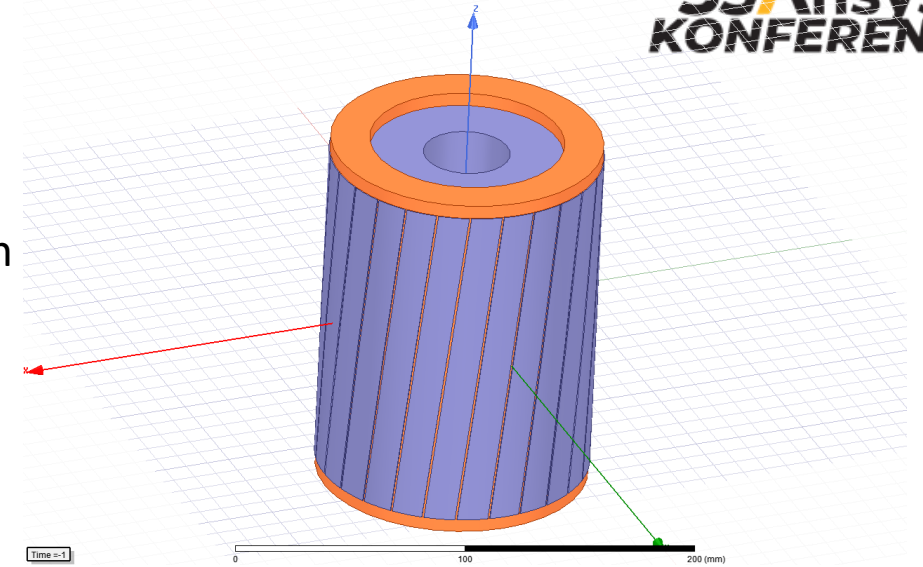
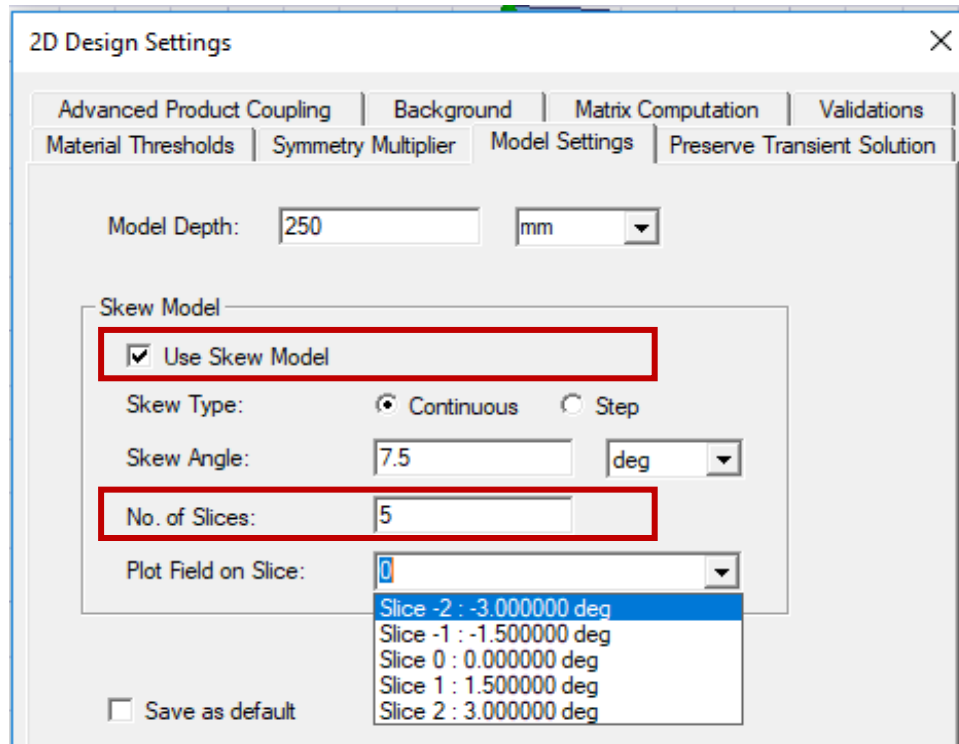
Slice No.	Skew Angle (deg)	Slice Length (mm)
1	-2	50
2	-1	50
3	0	50
4	1	50
5	2	50

Save as default

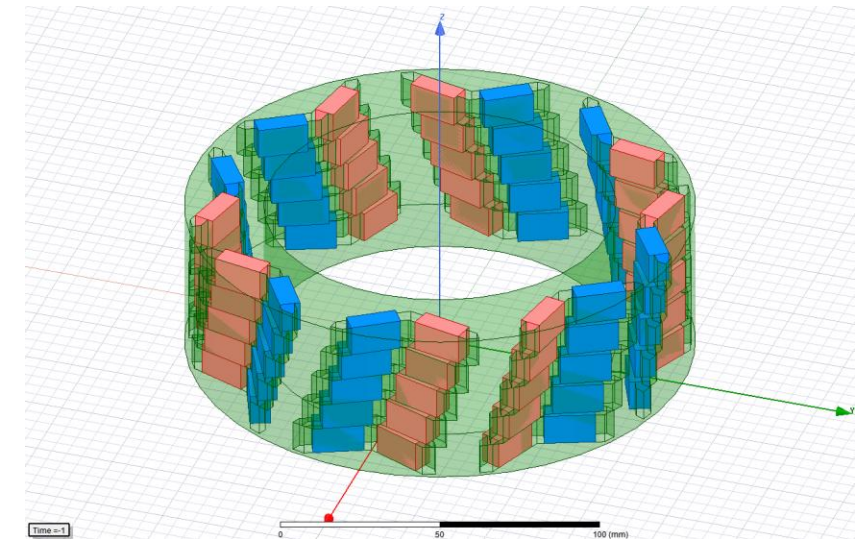
OK Cancel

2D vylepšení zešikmení

- Podpora pro **spojité** i **krokové** zešikmení.
- Spojité zešikmení se obvykle používá k modelování šikmých drážek.
- Krokové zešikmení se obvykle používá k modelování magnetů nebo vícestupňových rotorů.
- Podpora sudého i lichého počtu řezů.



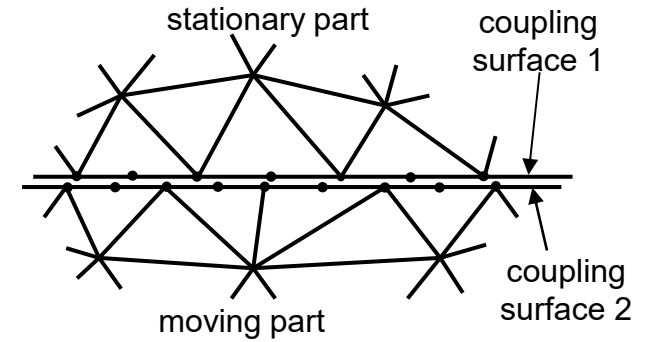
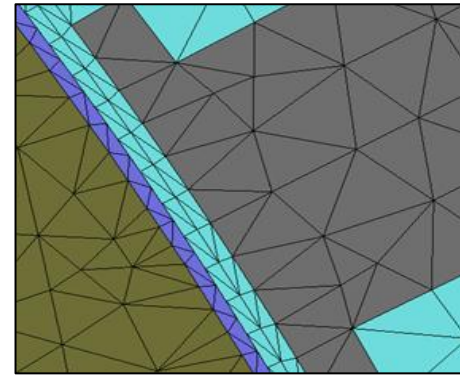
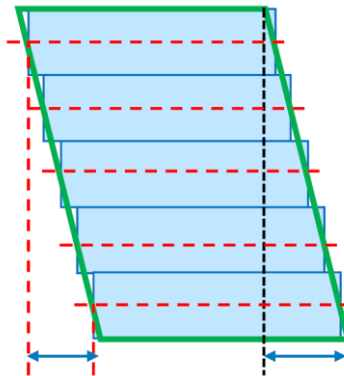
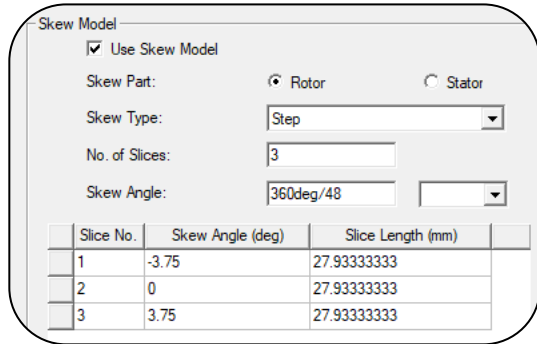
3D - Spojité zešikmení



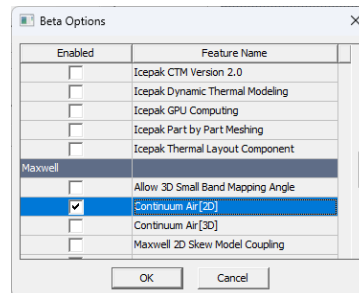
3D - Krokové zešikmení

— Vyšší přesnost – zešikmení se spojitým vzduchem

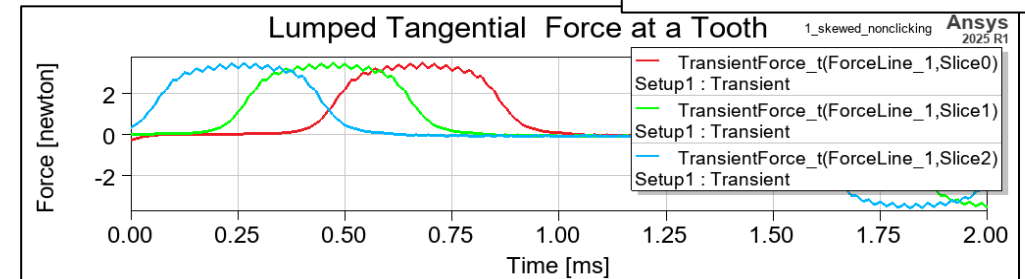
- Vylepšené rozhraní pro zešikmení ve 2D.



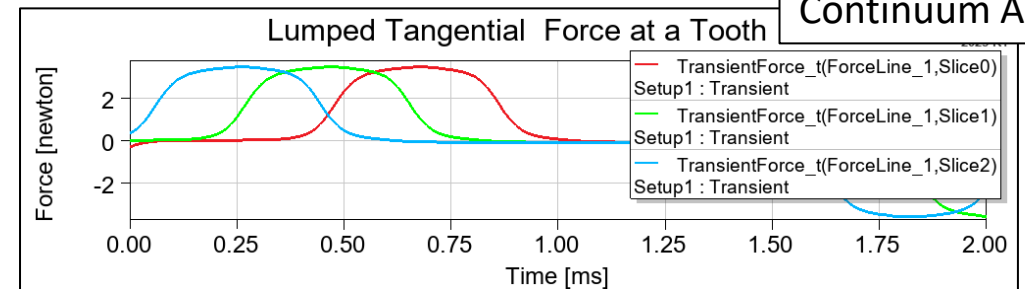
- Vysoká přesnost i bez:
 - Synchronizace časových kroků se sítí.
 - Konstantního časového kroku/rychlosti.



Without Continuum Air

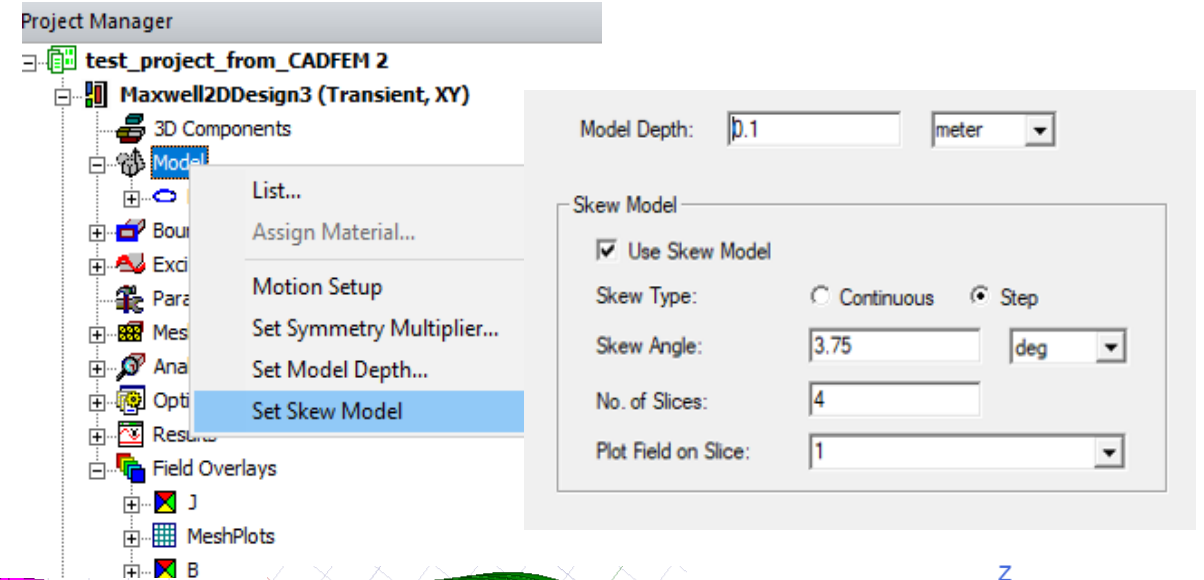
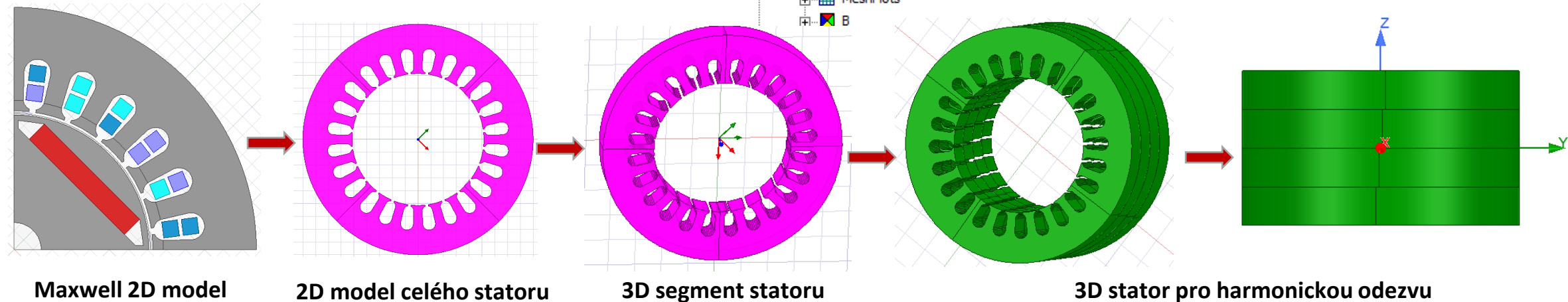


Continuum Air



— Přenos harmonických sil z 2D modelu se zešikmením drážek na 3D model

- Kvazi-3D efekt zešikmení drážek uvažovaný v Maxwellu na 2D řezech.
- Objektově orientovaná harmonická síla.
- Harmonická síla přenášená do mechaniky na celý 3D model.





3. triky na urychlení simulací

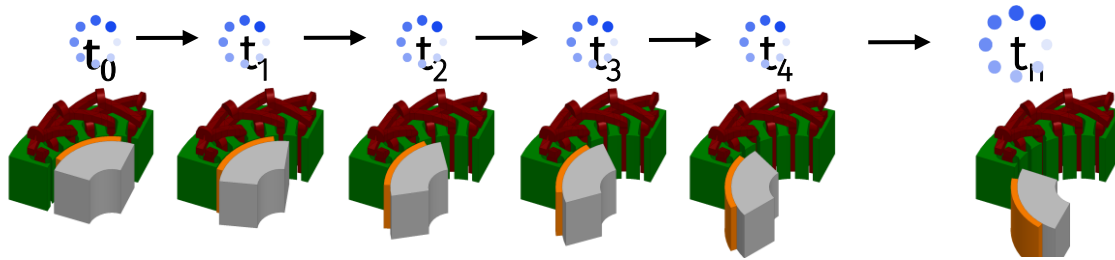


Metoda časové dekompozice TDM řešič

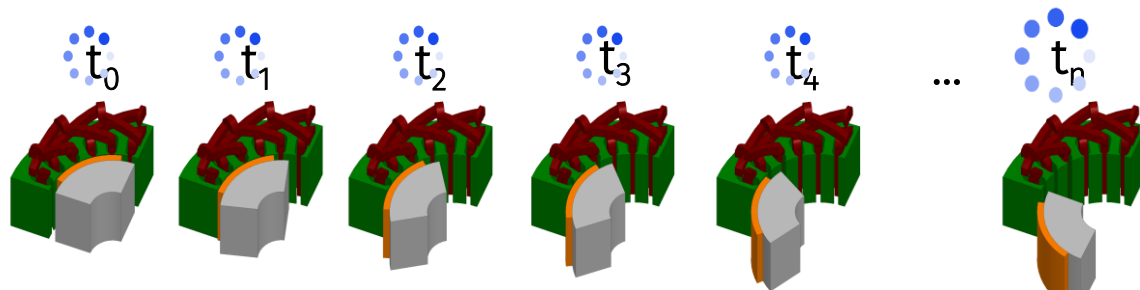
Metoda časové dekompozice

Rychlé výpočetní metody – časová dekompozice

Klasický postup – **sekvenční** výpočet časových kroků:




Nová metoda (**TDM**) – **simultání** výpočet časových kroků:

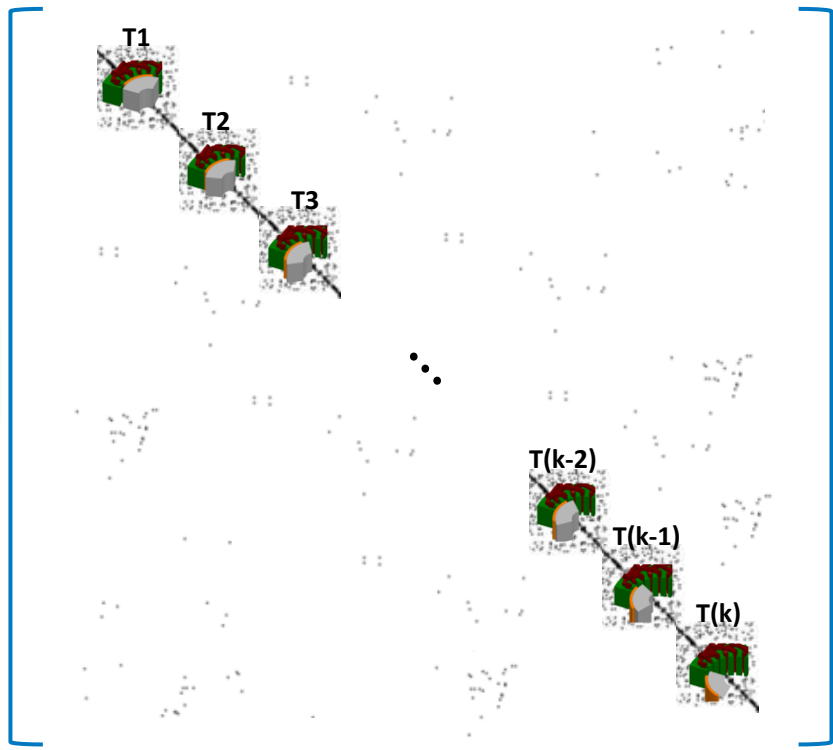
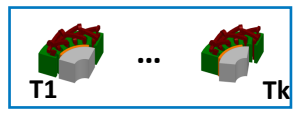


k – Simultaneous Time Steps
n – Parallel Distributed Tasks

FEM Matrix
Simultaneous Simulation

Matrix Size
() x k

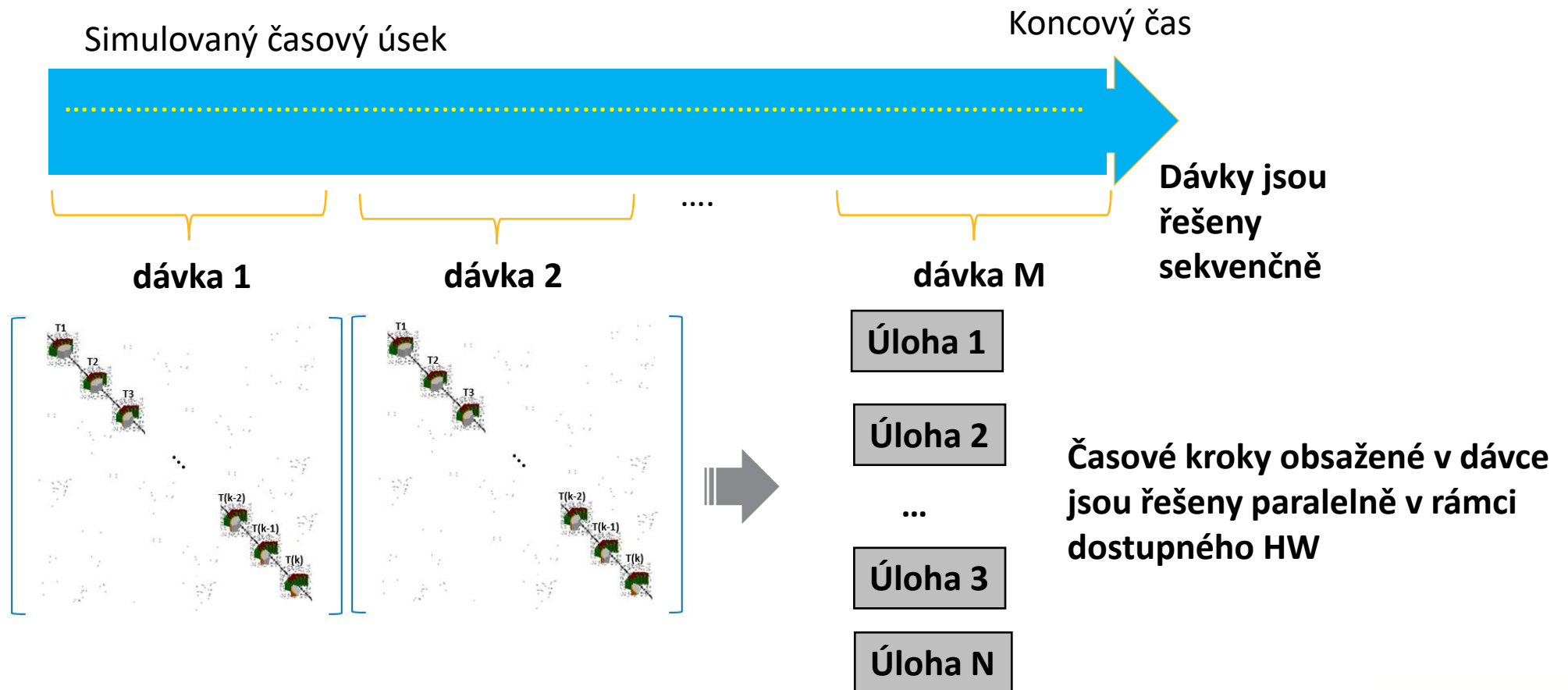
ANSYS Patent



Metoda časové dekompozice (TDM)

ANSYS Patent

- Během jedné dávky Maxwell distribuje řešení časových kroků v rámci dostupných HW možností



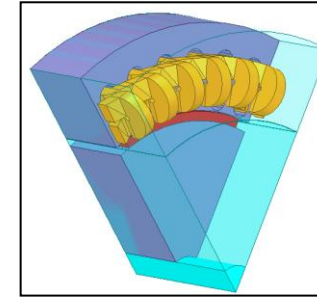
Metoda časové dekompozice – testovací úloha

The screenshot displays the ANSYS Electronics Desktop 2019 R2 interface for a simulation project named 'WSS_1_30 - 10_ assm_6p - Machine'. The interface is divided into several panels:

- Project Manager:** Shows the project hierarchy, including '10_ assm_6p (Adjust-Speed Synchron...', '25_MaxCir_2D', '30_Maxwell3DDesign (Transient)*', and '35_MaxCir_3D'.
- Properties:** A table with machine parameters:

Name	Value
Machine Type	Adjust-Speed Synchron...
Number of Poles	6
Rotor Position	Inner Rotor
Frictional Loss	12
Windage Loss	0
Reference Speed	1000
Control Type	PWM
Circuit Type	Y3
- Winding Editor:** Shows a 2D cross-section of the machine's stator and rotor windings.
- Schematic:** Displays a circuit diagram with a DC source, a bridge rectifier, and a three-phase inverter.
- 3D Modeler:** Shows a 3D perspective view of the machine's internal components, including the stator and rotor.
- Torque Plot:** A graph showing 'Moving1.Torque [NewtonMeter]' versus 'Time [ms]'. The torque fluctuates between approximately -100 and 300 Nm over a 150 ms period.

Metoda časové dekompozice -testovací úloha

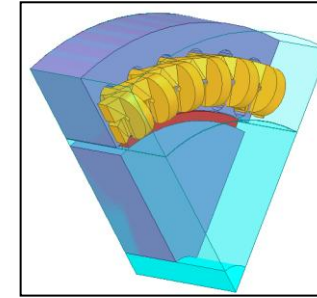


Configurace: Small

```
Maxwell 3D Profile
Project:      WSS_1_30
Design:      30_Maxwell3DDesign
Solution setup: Setup1
Design variation: endRegion='48.374740024775mm' fractions='6' halfAxial='1'
```

Task	Real Time	CPU Time	Memory	Information
Start				Time: 12/09/2019 11:44:50; Host: c731b63b7fda493c8c5dd65b27c861aa000000; Processor: 8 OS: Linux 3.10.0-693.21.1.el7.x86_64; Maxwell 3D 2019.2.0 Executing from /ansys_inc/AnsysEM/AnsysEM19.4/Linux64/MAXWELLCOMENGINE.exe HPC Enabled Desired RAM limit not set.
		At=200 us -> 750 ts		
<u>Mesh TAUS</u>	00:00:04	00:00:10	85 M	39920 tetrahedra
Mesh TAU (Coarsening)	00:00:02	00:00:02	85 M	17365 tetrahedra
Mesh Post	00:00:52	00:00:52	101 M	<u>18079 tetrahedra</u>
Mesh (volume, seed)	00:00:01	00:00:01	50.4 M	18990 tetrahedra Length_Coil, Length_Mag, Length_Main
Start Simulation	00:00:01	00:00:01	161 M	18990 tetrahedra
Start Preprocessing for TDM General Transient Model	00:00:01	00:00:00	23 M	<u>7 Time Domains</u>
Finish Preprocessing for TDM General Transient Model	00:00:00	00:00:00	25 M	7 Time Domains
Solver Progress				<u>Requested from t = 0 to t = 0.15</u>
Start TDM Simulation	00:00:01	00:00:01	165 M	18990 tetrahedra
TDM General Transient Model <u>Subdivision 1</u>	00:00:50	00:00:49	346 M	21 Nonlinear iterations <u>7 Time steps</u>
Solver Progress				Completed time point <u>0.0012s</u>
TDM General Transient Model Subdivision 2	00:00:49	00:00:49	407 M	23 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0026s
TDM General Transient Model Subdivision 3	00:00:43	00:00:42	416 M	20 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.004s
TDM General Transient Model Subdivision 4	00:00:42	00:00:41	416 M	20 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0054s
TDM General Transient Model Subdivision 5	00:00:33	00:00:32	418 M	16 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0068s
TDM General Transient Model Subdivision 106	00:00:35	00:00:34	429 M	17 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.1482s
TDM General Transient Model Subdivision 107	00:00:34	00:00:34	428 M	17 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.1496s
TDM General Transient Model <u>Subdivision 108</u>	00:00:37	00:00:36	430 M	18 Nonlinear iterations 7 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.15s
Solution Process				<u>Elapsed time : 01:15:21</u> , Maxwell ComEngine Memory : 1.74 G
Total	01:07:20	01:05:38		Time: 12/09/2019 13:00:11, Status: Normal Completion

Metoda časové dekompozice - testovací úloha



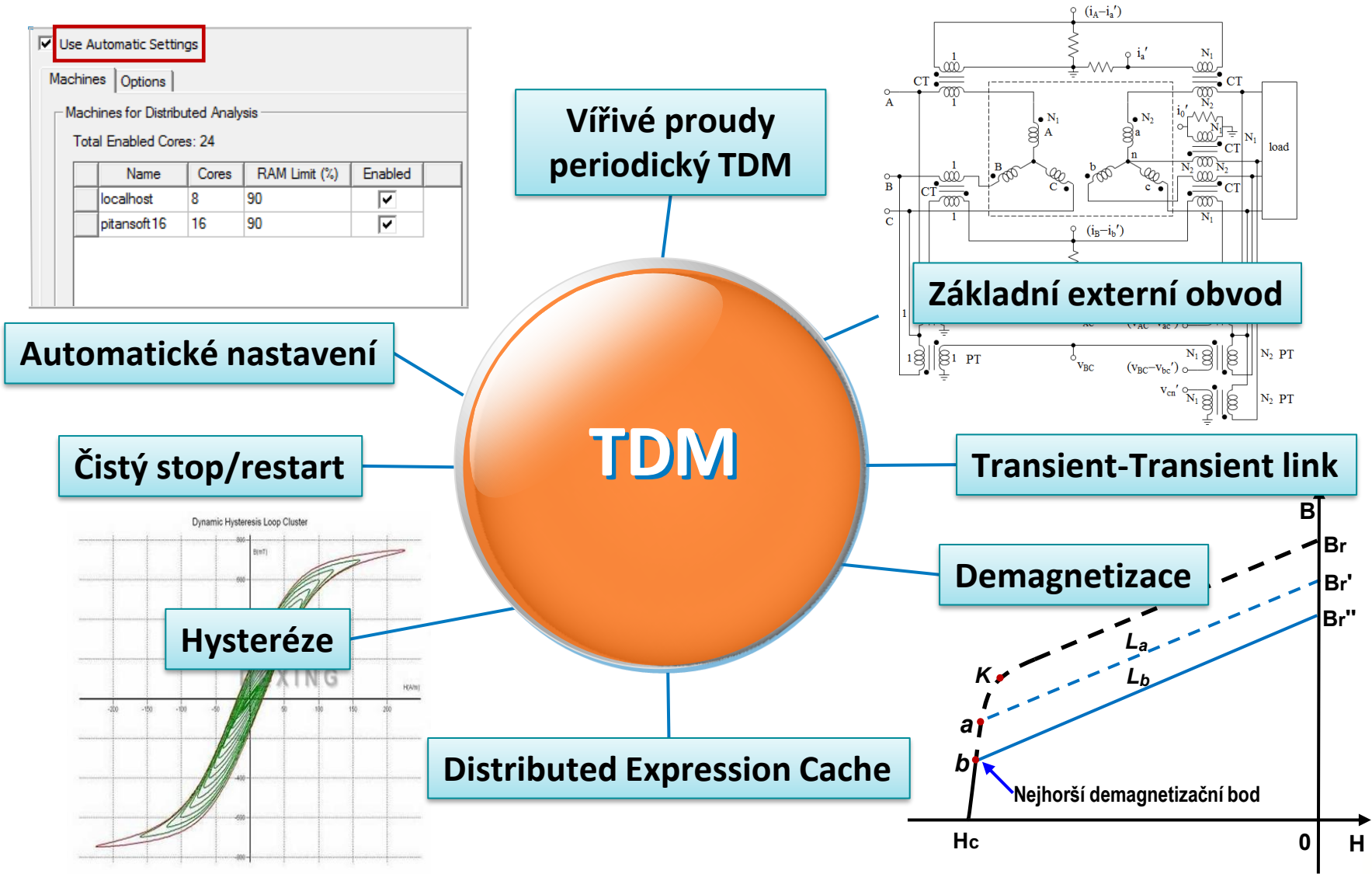
Configurace: Large

```
Maxwell 3D Profile
Project:          WS5_1_30
Design:          30_Maxwell3DDesign
Solution setup:  Setup1
Design variation: endRegion='48.374740024775mm' fractions='6' halfAxial='1'
```

Task	Real Time	CPU Time	Memory	Information
Start				Time: 12/09/2019 10:51:48; Host: 070121ec98334b229e718362e52a7dfd000000; Processor: 32 OS: Linux 3.10.0-693.21.1.el7.x86_64; Maxwell 3D 2019.2.0 Executing from /ansys_inc/AnsysEM/AnsysEM19.4/Linux64/MAXWELLCOMENGINE.exe HPC Enabled Desired RAM limit not set.
<u>Mesh TAU16</u>	00:00:04	00:00:18	85 M	39920 tetrahedra
Mesh TAU (Coarsening)	00:00:02	00:00:02	85.9 M	17365 tetrahedra
Mesh Post	00:00:52	00:00:51	102 M	<u>18079 tetrahedra</u>
Mesh (volume, seed)	00:00:01	00:00:01	50.4 M	18990 tetrahedra Length_Coil, Length_Mag, Length_Main
Start Simulation	00:00:01	00:00:01	160 M	18990 tetrahedra
Start Preprocessing for TDM General Transient Model	00:00:00	00:00:00	23 M	<u>31 Time Domains</u>
Finish Preprocessing for TDM General Transient Model	00:00:01	00:00:01	26 M	<u>31 Time Domains</u>
Solver Progress				<u>Requested from t = 0 to t = 0.15</u>
Start TDM Simulation	00:00:01	00:00:00	159 M	18990 tetrahedra
TDM General Transient Model <u>Subdivision 1</u>	00:01:20	00:01:20	350 M	<u>23 Nonlinear iterations 31 Time steps</u>
Solver Progress				<u>Completed time point 0.006s</u>
TDM General Transient Model Subdivision 2	00:00:41	00:00:40	370 M	17 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0122s
TDM General Transient Model Subdivision 3	00:00:43	00:00:43	370 M	18 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0184s
TDM General Transient Model Subdivision 4	00:00:45	00:00:44	373 M	18 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.0246s
Solver Progress				Completed time point 0.13s
TDM General Transient Model Subdivision 22	00:00:39	00:00:38	426 M	17 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.1362s
TDM General Transient Model Subdivision 23	00:00:40	00:00:40	423 M	17 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.1424s
TDM General Transient Model Subdivision 24	00:00:40	00:00:39	425 M	17 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.1486s
TDM General Transient Model <u>Subdivision 25</u>	00:00:41	00:00:40	424 M	17 Nonlinear iterations 31 Time steps
Solver Progress				Completed time point 0.15s
Solution Process				<u>Elapsed time : 00:26:28</u> , Maxwell ComEngine Memory : 2.32 G
Total	00:18:44	00:18:30		Time: 12/09/2019 11:18:16, Status: Normal Completion



Vlastnosti TDM řešiče



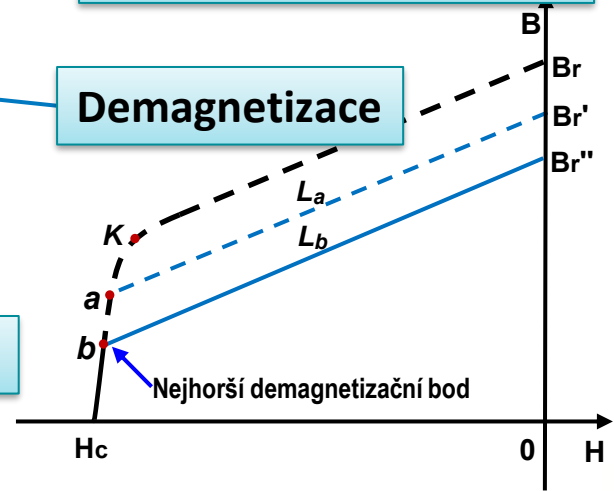
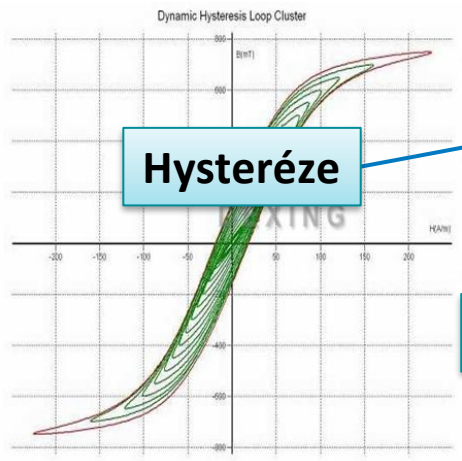
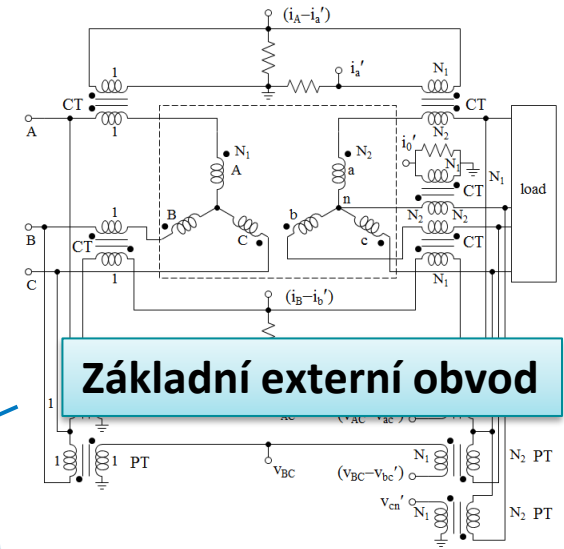
Use Automatic Settings

Machines | Options

Machines for Distributed Analysis

Total Enabled Cores: 24

Name	Cores	RAM Limit (%)	Enabled
localhost	8	90	<input checked="" type="checkbox"/>
pitansoft16	16	90	<input checked="" type="checkbox"/>

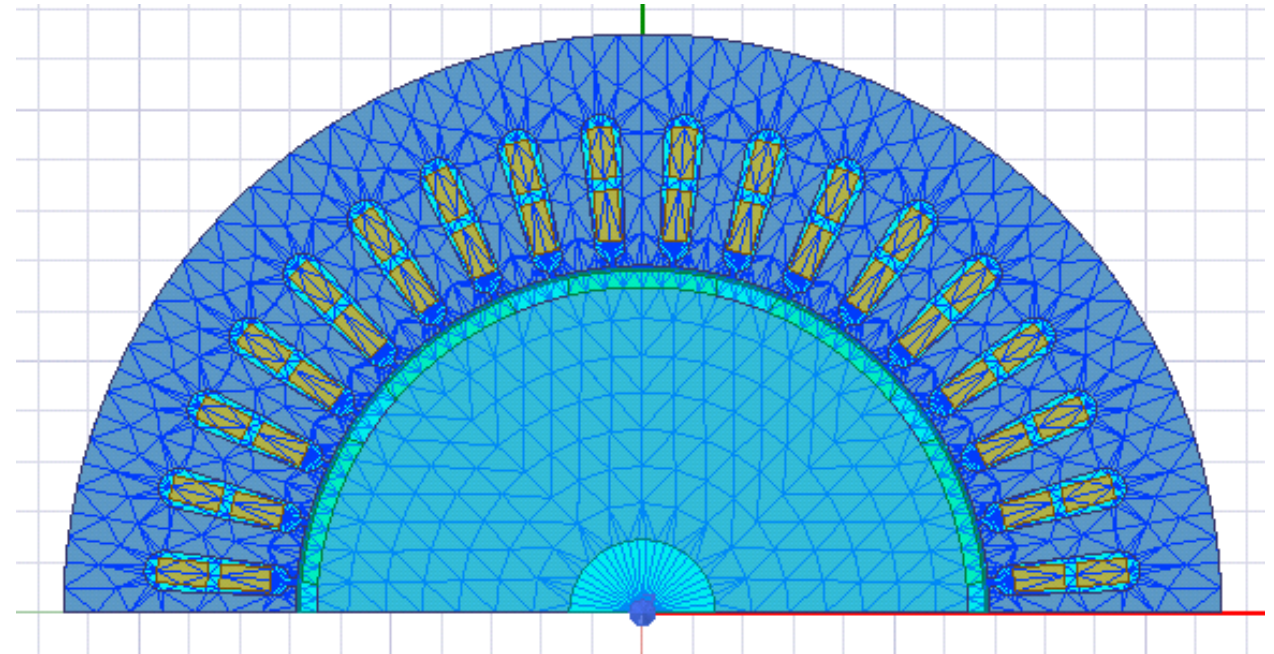




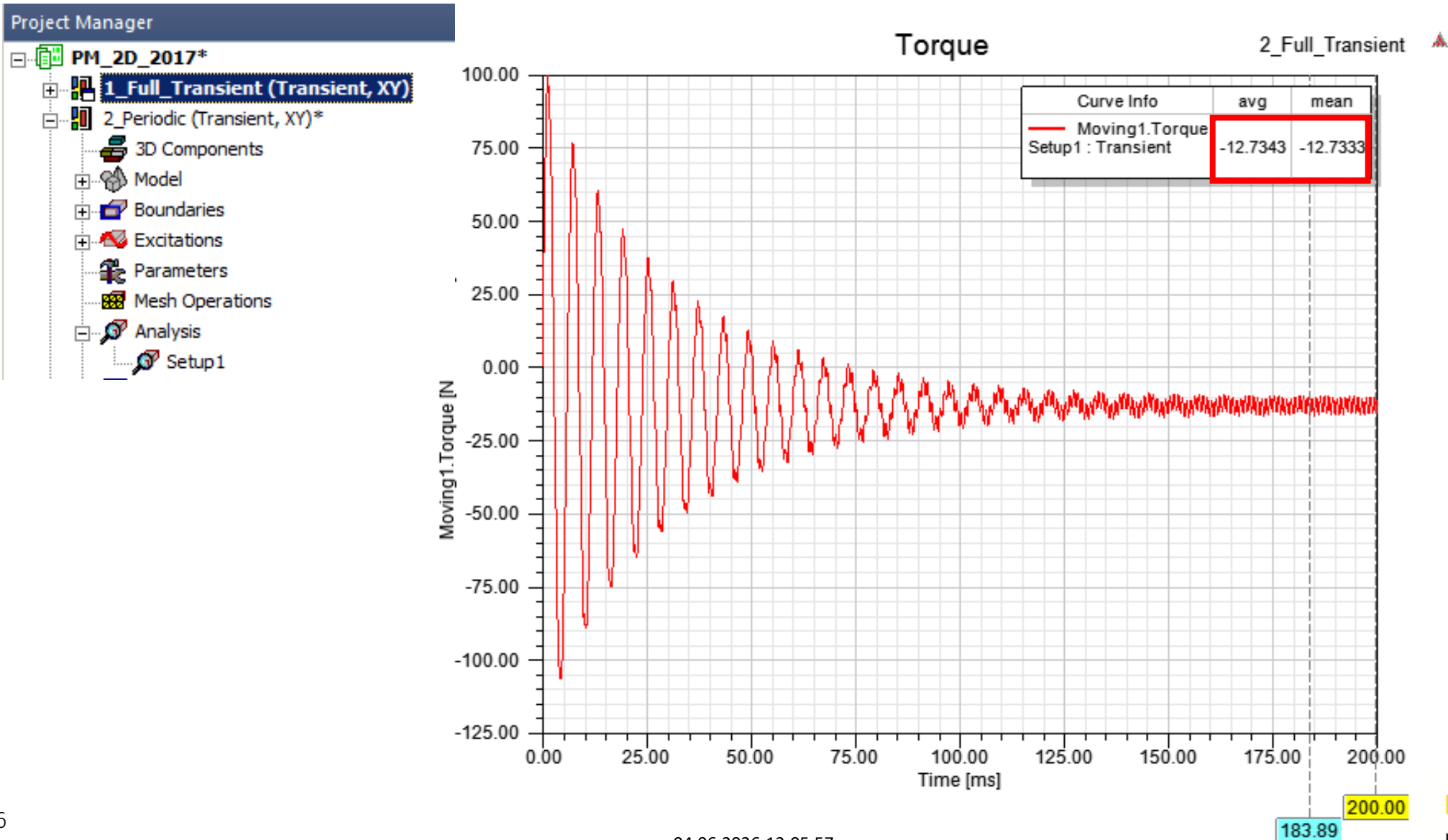
Metoda časové dekompozice Periodický TDM řešič

Periodický TDM řešič – příklad

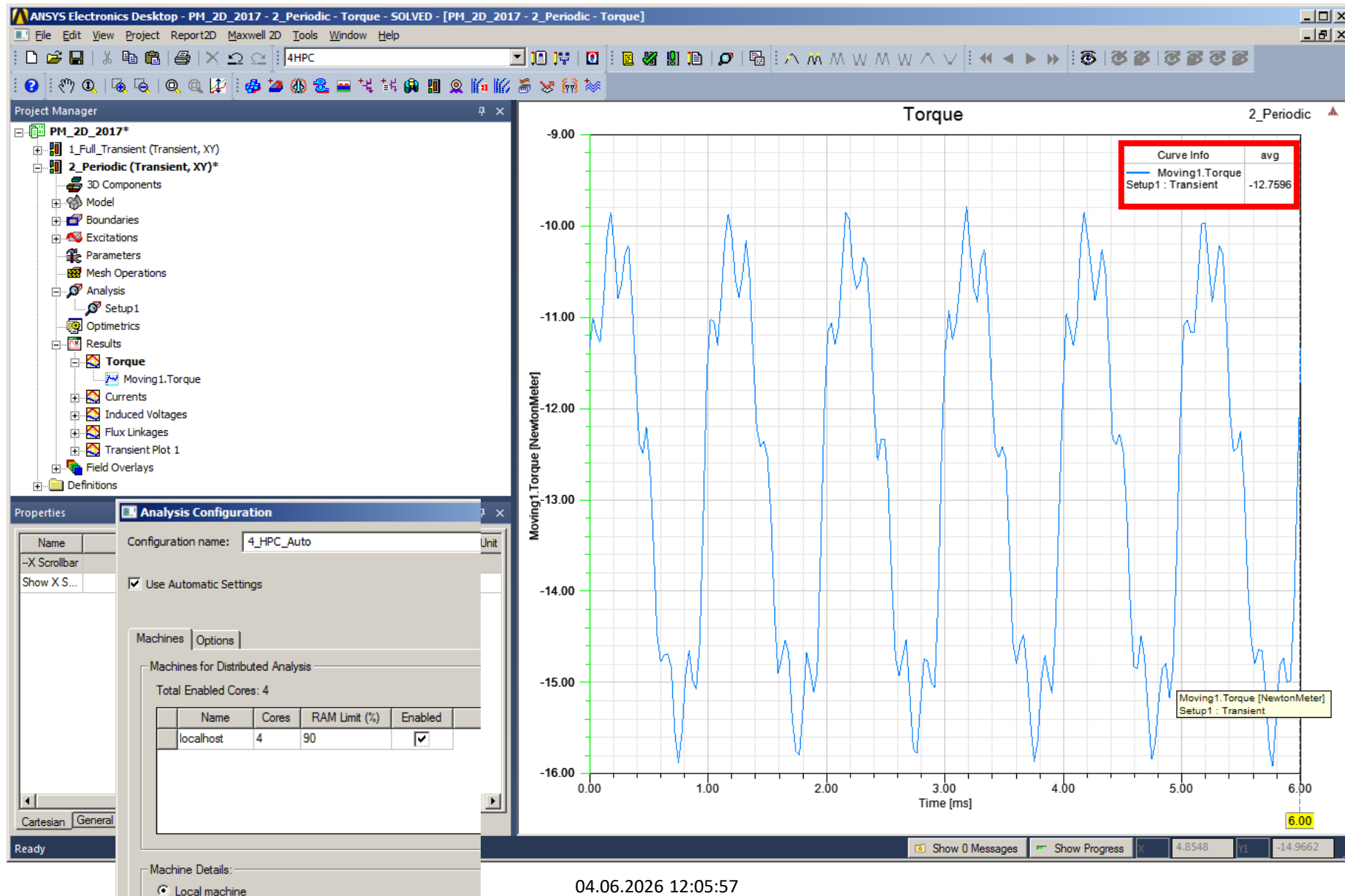
- 10 pólový stroj s PM na povrchu rotoru.
- 2D Model – 3354 elementů.
- Napěťový zdroj s velkým poměrem **L/R**.
- Periodický průběh 166 Hz..
- 3 simulace:
 - 1 jádro, 30 elektrických period .
 - 8 jader, HPC (**TDM general transient**), 30 elektrických period.
 - 8 jader, HPC (**TDM periodic**), 1 elektrická perioda.



TDM řešič – příklad na přechodový děj



Periodický TDM řešič – příklad

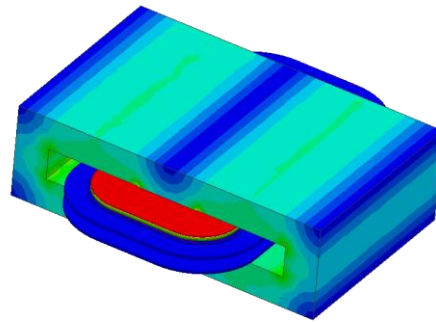


TDM – magnetické prvky pro výkonovou elektroniku

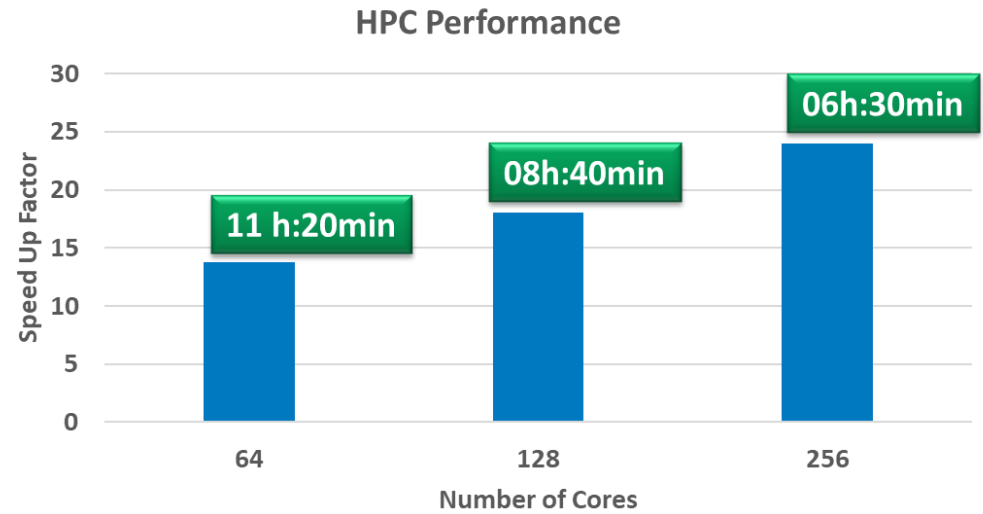
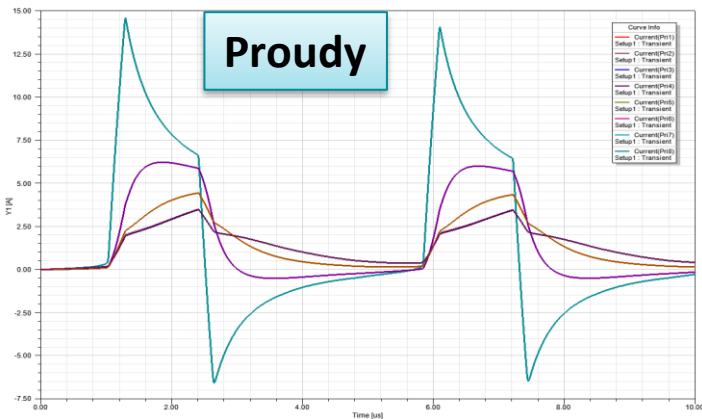
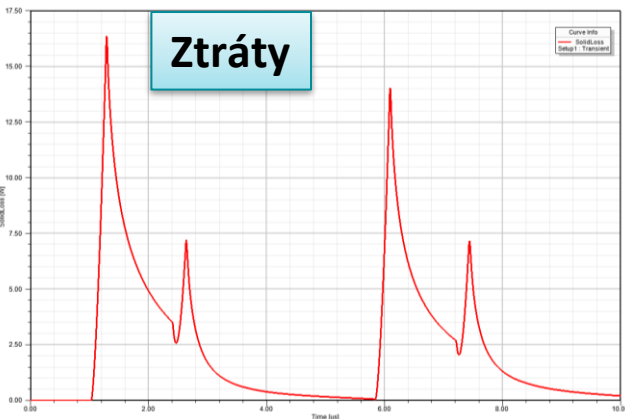
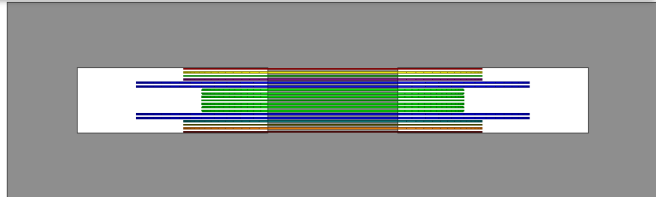
- Simulace elektronického transformátoru.

Finite Elements: 900k
DOFs': 1.5Mil
Time Steps: 1,000
Input Voltage Rising Time: 20ns

Nelineární jádro



Masivní primární a sekundární vinutí



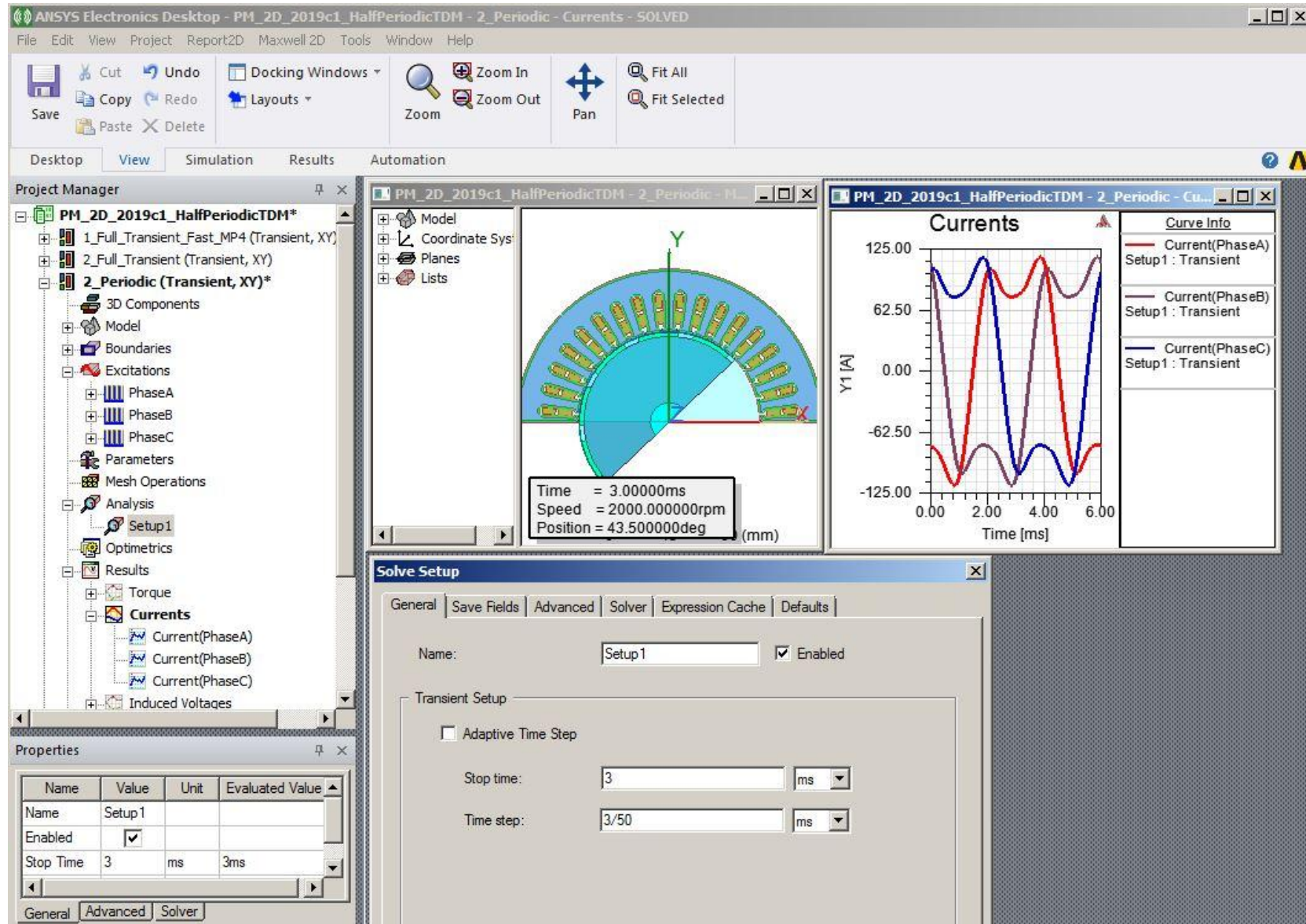
No-TDM: 6.5 day (1 core)

# Cores	# Core Distribution	TDM Simulation Time	Speed up
64	32 tasks x 2 cores/task	11h:20min	14X
128	64 tasks x 2 cores/task	8h:40min	18X
256	128 tasks x 2 cores/task	6h:30min	24x

Benchmark system used: Windows Server 2012 R2; 512 GB RAM per node; Clock Speed 2 GHz; 16 nodes and 448 cores (28 cores per node)

Metoda časové dekompozice $\frac{1}{2}$ periodický TDM řešič

½ periodický TDM řešič - příklad



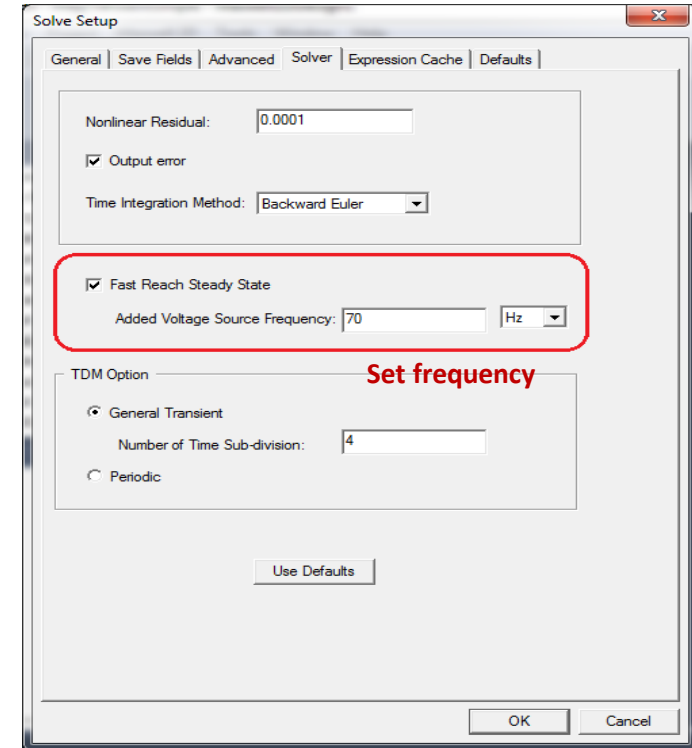
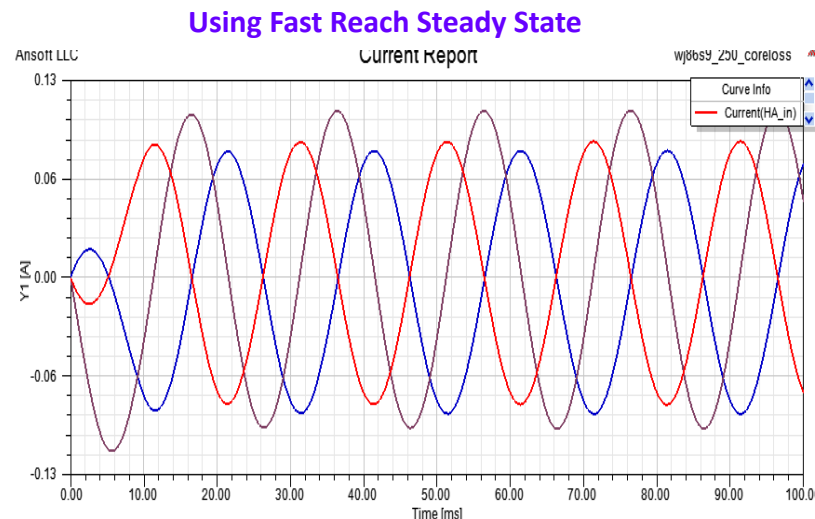
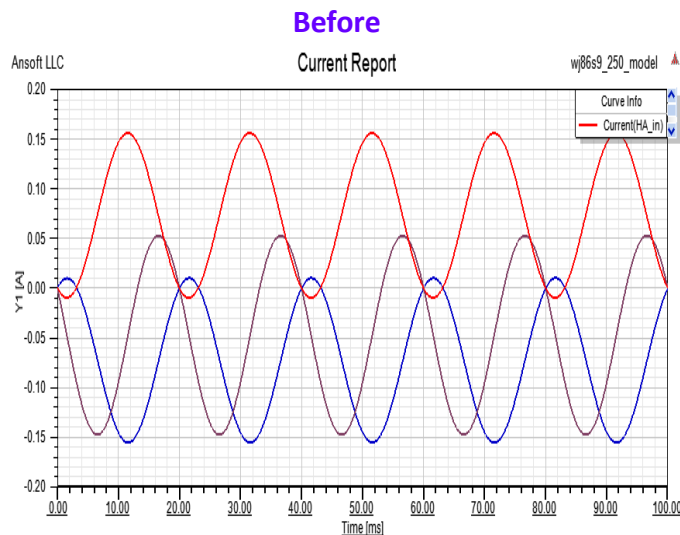


Urychlení dosažení ustáleného stavu

(Transient Fast Reach Steady State)

Urychlení dosažení ustáleného stavu

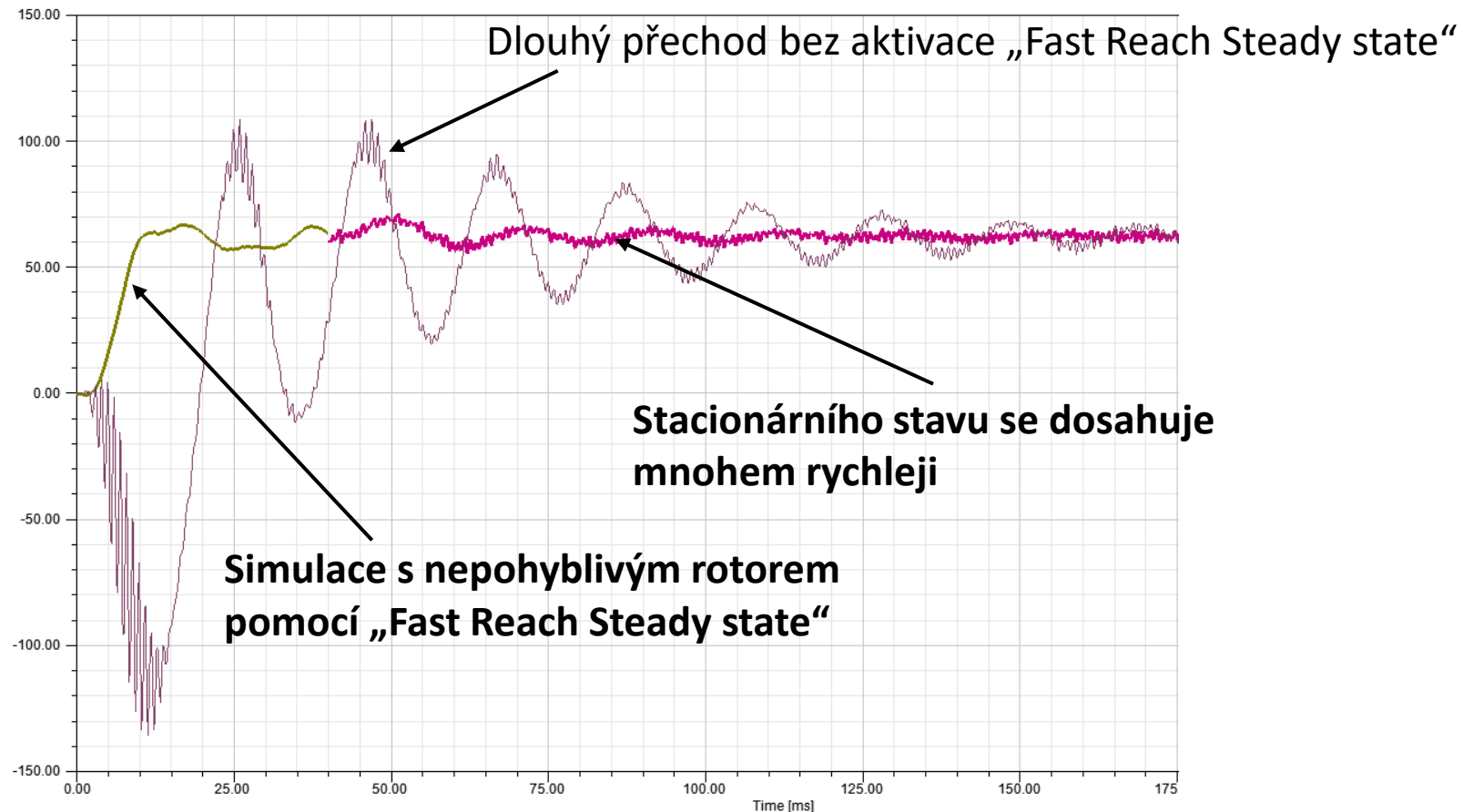
- **Problém:** Trvá velmi dlouho, než dosáhne ustáleného stavu kvůli velmi pomalému úbytku stejnosměrné složky toku, zejména při velké časové konstantě.
- **Řešení:** přidat napěťový zdroj během první poloviny cyklu, aby DC tok rychle klesl na nulu.
- Použitelné pro všechny typy nestacionárních aplikací.
- Lze kombinovat s metodou časové dekompozice.





Urychlení dosažení ustáleného stavu

- U elektrických strojů lze další zrychlení výpočtů dosáhnout pomocí simulace s **nepohyblivým rotorem** jako inicializačního kroku





Urychlení dosažení ustáleného stavu

(Restart transientní analýzy z harmonického ustáleného stavu)

Urychlení dosažení ustáleného stavu

$\sigma_0 = \sigma \cdot s_n$

where σ_0 is the transformed conductivity from speed n to speed zero, which is to be set in the eddy current simulation, σ is the real conductivity in transient simulation, and s_n is the slip, defined as:

$$s_n = \frac{n_s - n}{n_s}$$

where n_s is the synchronous speed.

If there is an end connection, the end resistance R used in the transient simulation also has to be referred to the value R_0 associated with zero speed before being used in the eddy current solution by:

$$R_0 = R / s_n$$

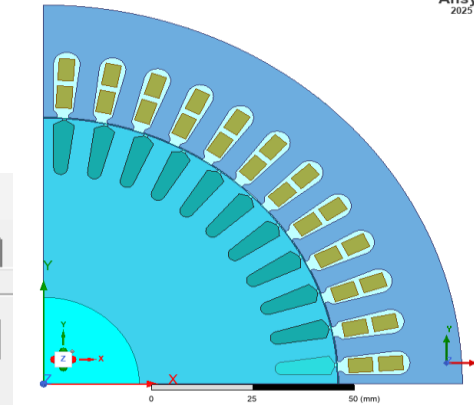
Prerequisites

- Source design - Maxwell 2D (or 3D) Eddy Current (Last Adaptive solution only)
- Target design - Maxwell 2D (or 3D) Transient
- The source and target designs must be identical (identical geometries, boundaries, excitations, windings, etc).

To setup and use a 2D (or 3D) eddy current solution as the initial condition for a corresponding 2D (or 3D) transient solution:

1. Create an eddy current source design, and ensure that **Solve Matrix: After last pass** is selected on the **General** tab of the eddy current **Solve Setup** dialog.
2. Solve the eddy current design.
3. Create a transient target design, whose geometry, boundary conditions, excitations, windings, etc., are identical to the the source eddy current design.
4. On the transient target design's **Solve Setup** dialog box, **Advanced** tab, click **Start/Continue from a previously solved setup** to open the **Setup Link** dialog.
5. On the **Setup Link** dialog **General** tab, select the source eddy current design and solution (Last Adaptive solution only). Refer to "[Setup Link for Transient Solutions](#)" on page 16-42 for details on setting up this link.
6. Solve the target transient design.

Note	
	• If the source and target designs are not identical, an error message displays.
	• If the eddy current source design has not been solved, an error message displays.



Urychlení dosažení ustáleného stavu

$\sigma_0 = \sigma \cdot s_n$

where σ_0 is the transformed conductivity from speed n to speed zero, which is to be set in the eddy current simulation, σ is the real conductivity in transient simulation, and s_n is the slip, defined as:

$$s_n = \frac{n_s - n}{n_s}$$

where n_s is the synchronous speed.

If there is an end connection, the end resistance R used in the transient simulation also has to be referred to the value R_0 associated with zero speed before being used in the eddy current solution by:

$$R_0 = R / s_n$$

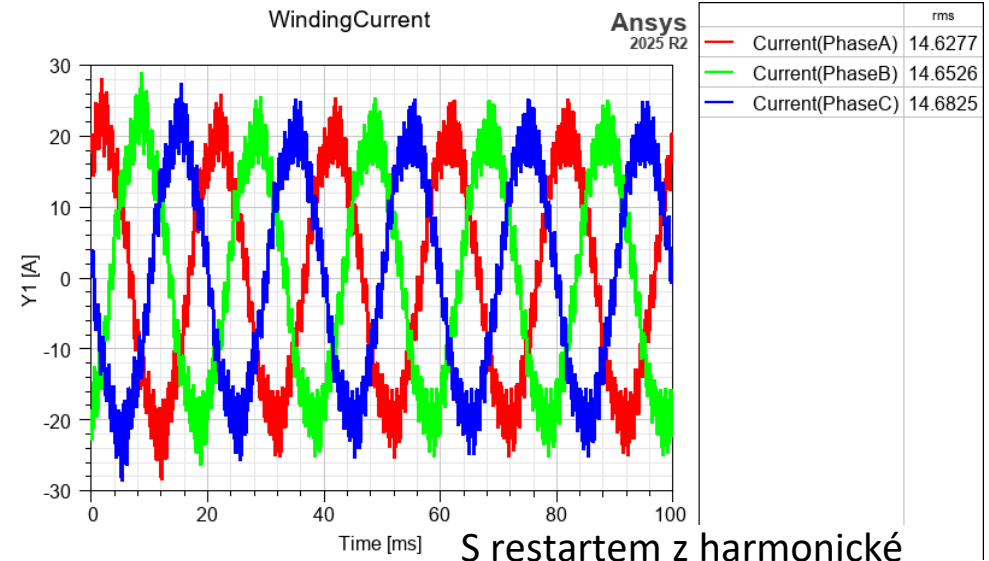
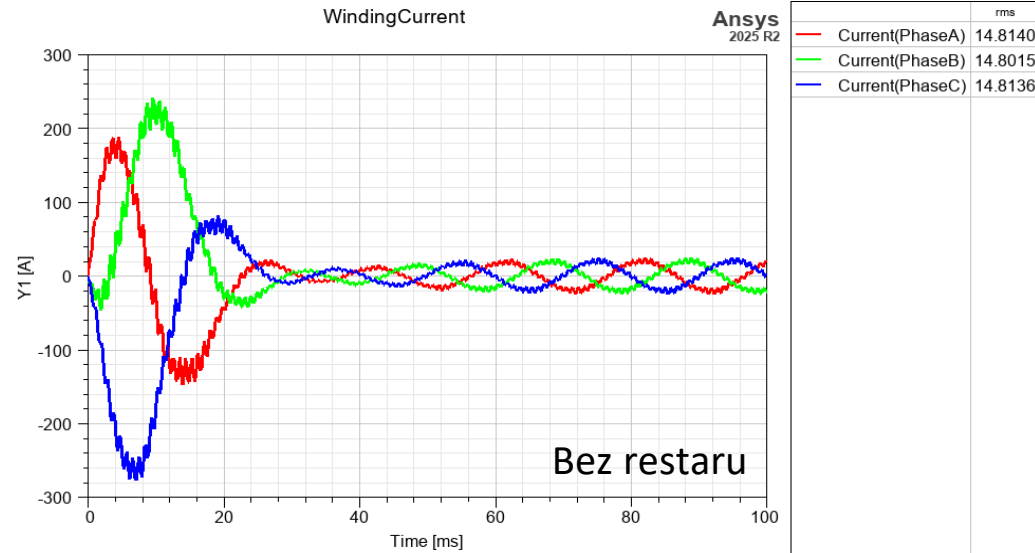
Prerequisites

- Source design - Maxwell 2D (or 3D) Eddy Current (Last Adaptive solution only)
- Target design - Maxwell 2D (or 3D) Transient
- The source and target designs must be identical (identical geometries, boundaries, excitations, windings, etc).

To setup and use a 2D (or 3D) eddy current solution as the initial condition for a corresponding 2D (or 3D) transient solution:

1. Create an eddy current source design, and ensure that **Solve Matrix: After last pass** is selected on the **General** tab of the eddy current **Solve Setup** dialog.
2. Solve the eddy current design.
3. Create a transient target design, whose geometry, boundary conditions, excitations, windings, etc., are identical to the the source eddy current design.
4. On the transient target design's **Solve Setup** dialog box, **Advanced** tab, click **Start/Continue from a previously solved setup** to open the **Setup Link** dialog.
5. On the **Setup Link** dialog **General** tab, select the source eddy current design and solution (Last Adaptive solution only). Refer to "[Setup Link for Transient Solutions](#)" on page 16-42 for details on setting up this link.
6. Solve the target transient design.

Note	<ul style="list-style-type: none"> • If the source and target designs are not identical, an error message displays. • If the eddy current source design has not been solved, an error message
-------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------





Urychlení výpočtů volbou řádu elementů

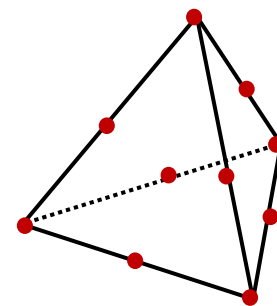
Elementy 1. řádu pro rychlejší 3D simulaci nestacionárních úloh

Maxwell využívá numerickou formulaci T- Ω omega

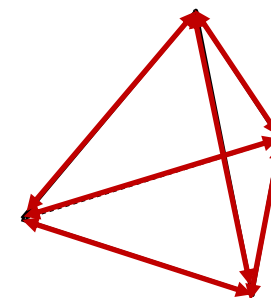
- **T** představuje **vektorový potenciál** (vířivé proudy odvozené z **T**) pomocí **hranových** prvků 1. řádu (u vodivých objektů).
- **Ω** představuje **skalární potenciál** (H je odvozeno z T, Ω) pomocí **uzlových prvků** druhého řádu.

Zavedena nová možnost, kde:

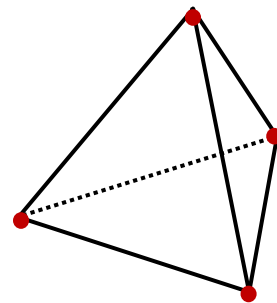
- T se stále řeší pomocí hranových prvků prvního řádu.
- Ω se řeší pomocí prvků prvního řádu.



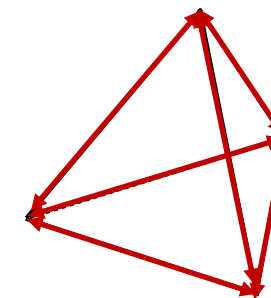
Uzlová reprezentace
Pro Ω (2. řád)



Hranová reprezentace
pro T (1. řád)



Uzlová reprezentace
Pro Ω (1. řád)



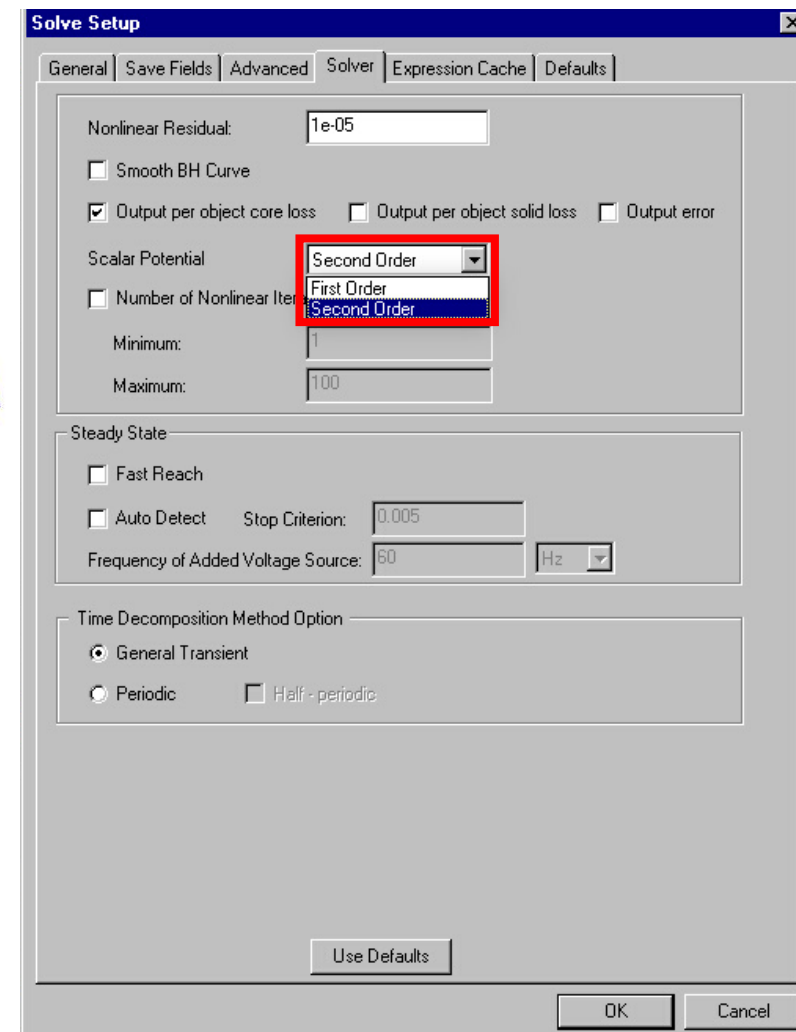
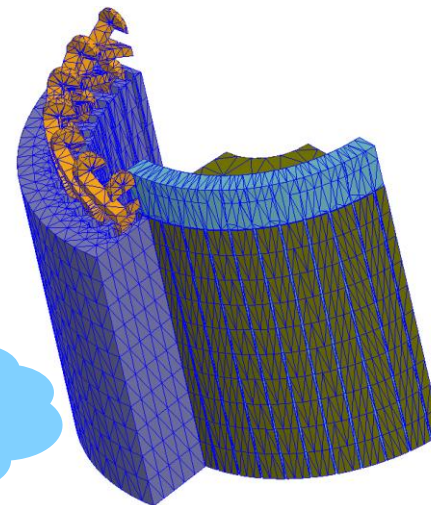
Hranová reprezentace
pro T (1. řád)

Elementy 1. řádu pro rychlejší 3D simulaci nestacionárních úloh

Asynchronní motor

57k elementů – 500 časových-kroků

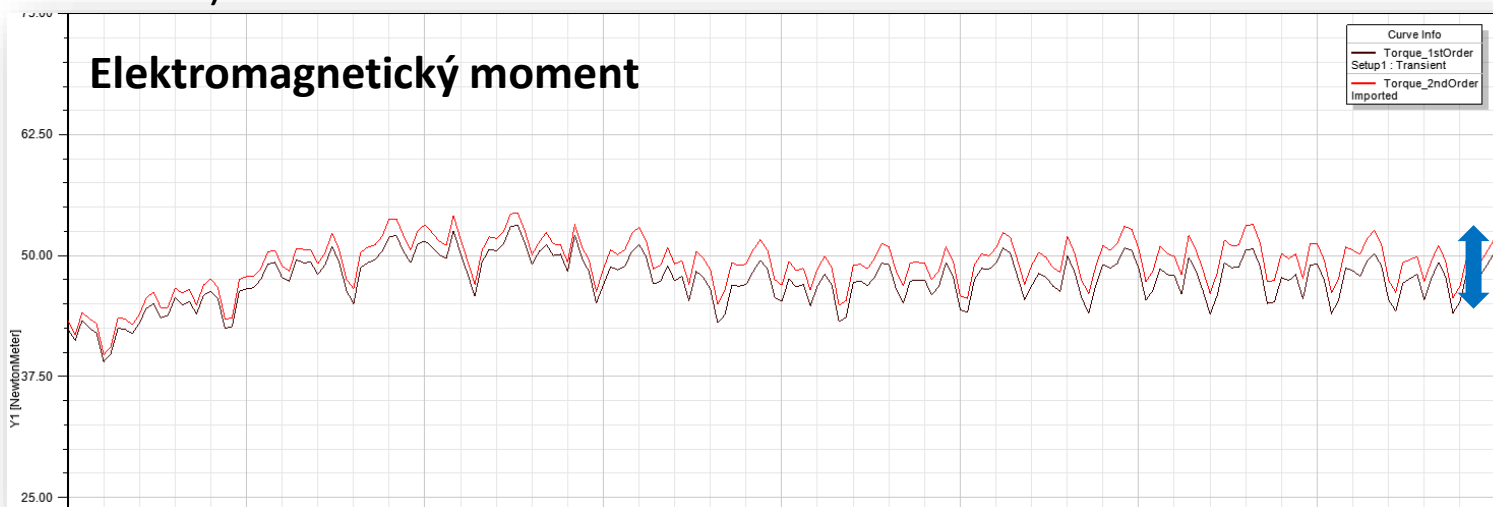
Bez TDM



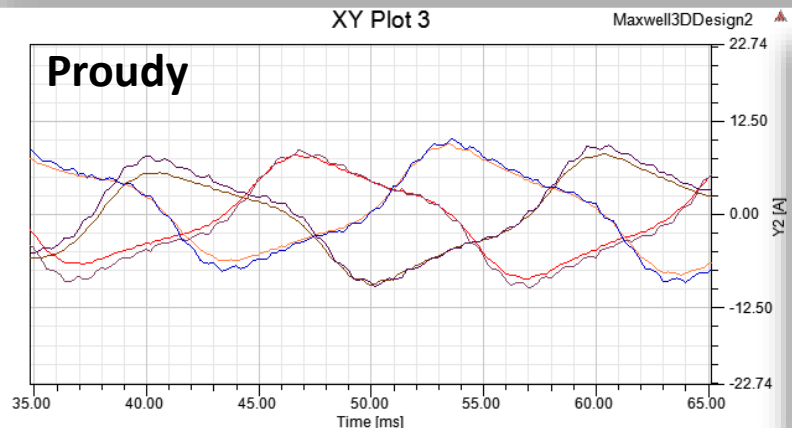
	Velikost matice	Čas řešení
Prvky 1. řádu	14,700	1h11m
Prvky 2. řádu	84,000	3h45m

Srovnání

- Při použití stejné sítě poskytují prvky 1. řádu dostatečnou přesnost pro výpočet momentu, proudů a magnetického toku, ale nižší přesnost pro odvozené veličiny (např. ztráty v masivních vodičích).



**Průměrný moment:
Rozdíl 1%**



**Průměrné Jouleovy ztráty:
Rozdíl 10%**

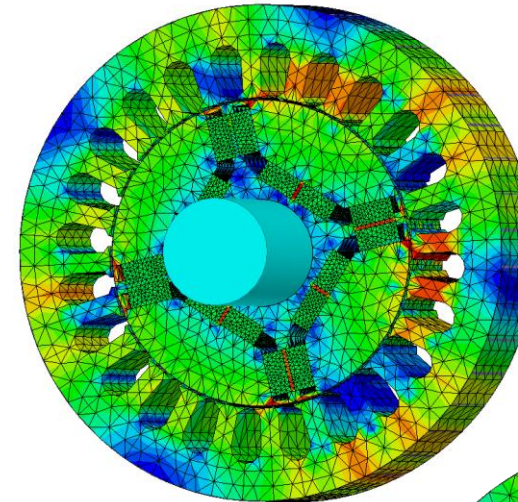
Elementy 1. řádu pro rychlejší 3D simulaci přechodných jevů

IPM

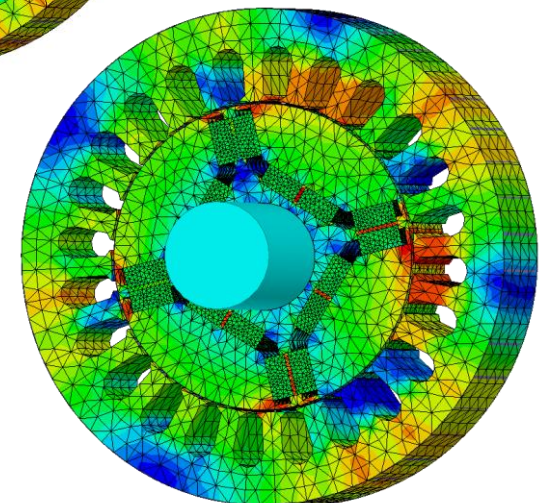
460k elementů – 1000 časových kroků

Bez TDM

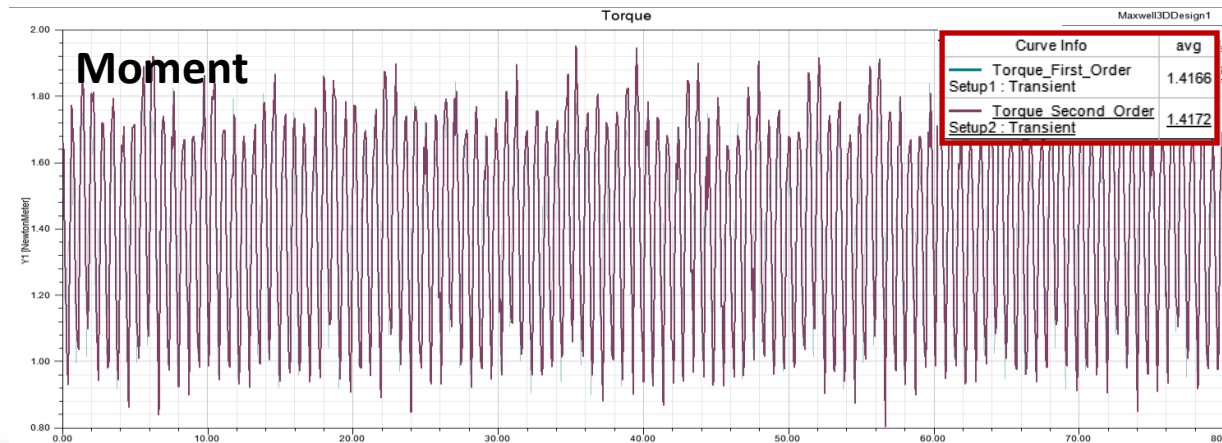
	Velikost matice	Čas řešení
Prvky 1. řádu	337,000	24h
Prvky 2. řádu	892,000	91h



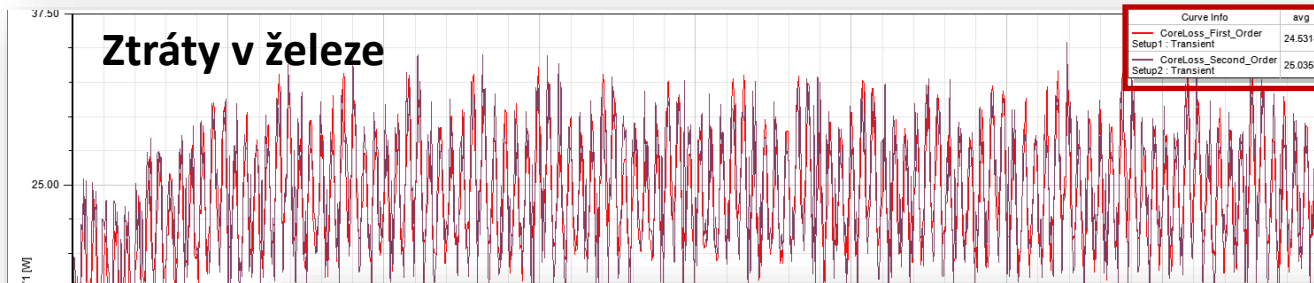
2. řád



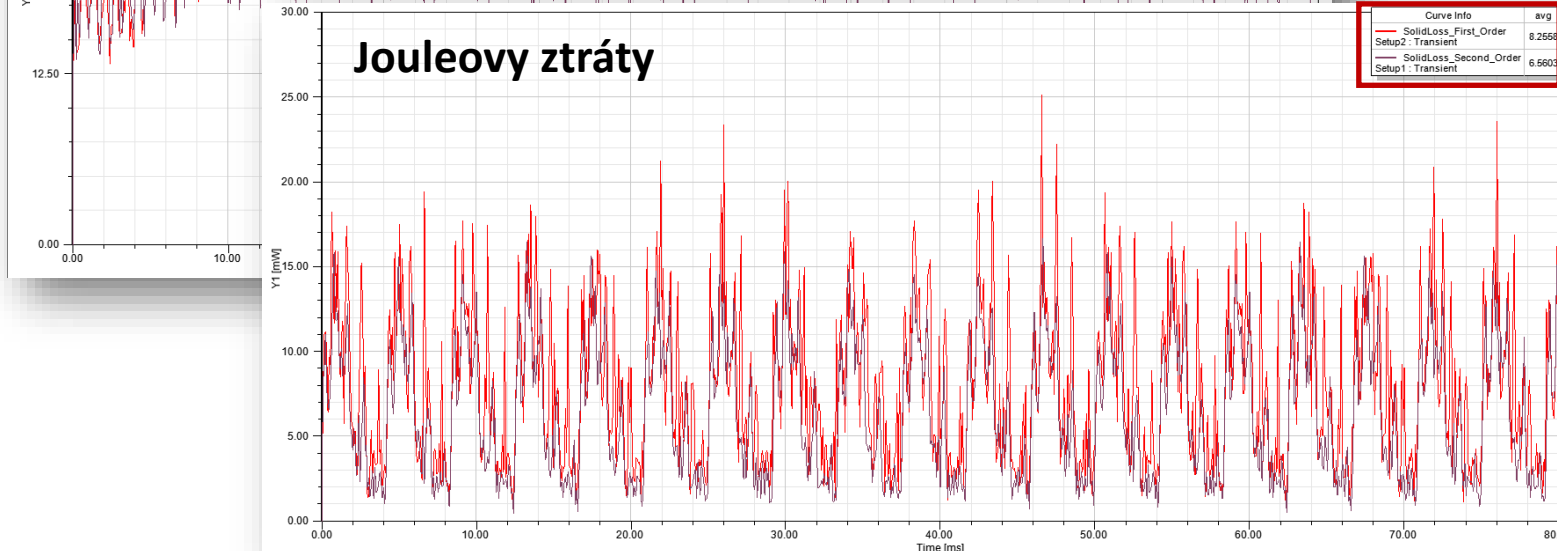
1. řád



Moment:
<1% Rozdíl



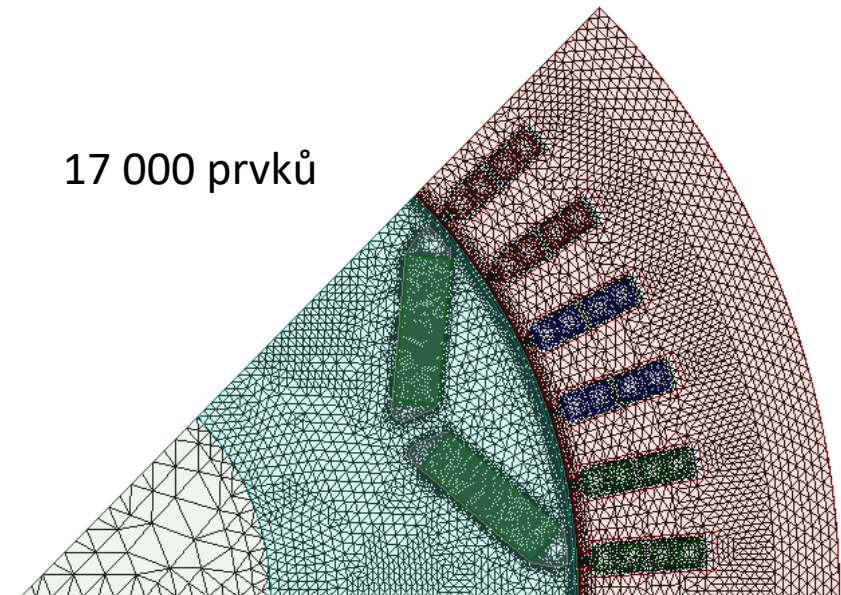
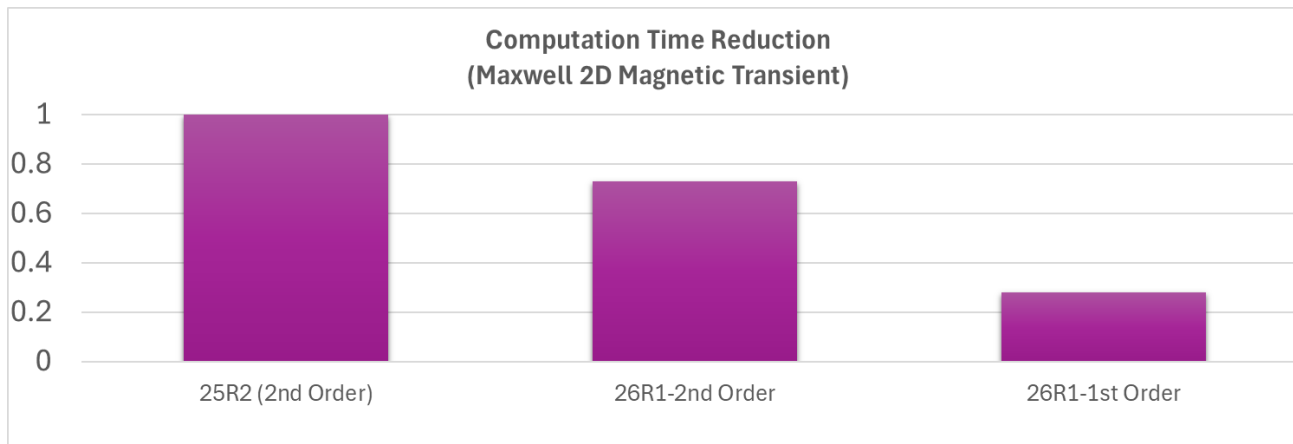
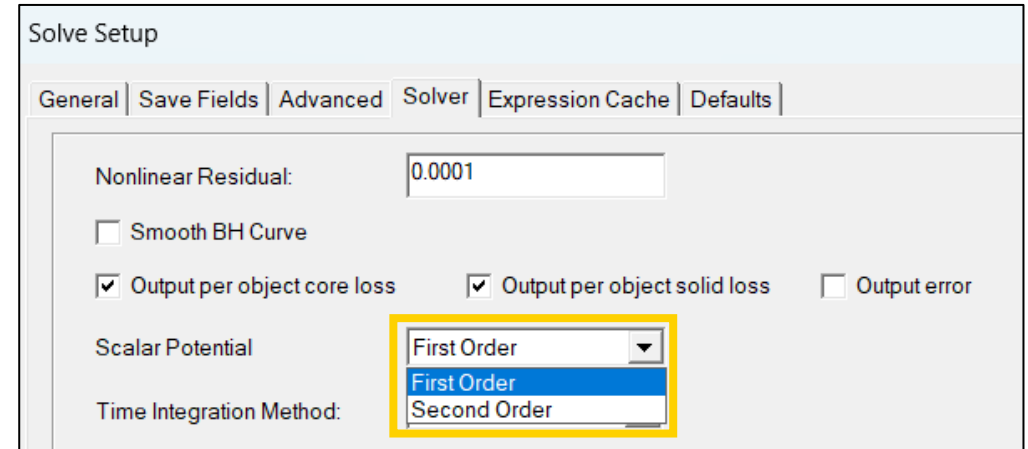
CoreLoss:
<2% Rozdíl



JouleLoss:
26% Rozdíl

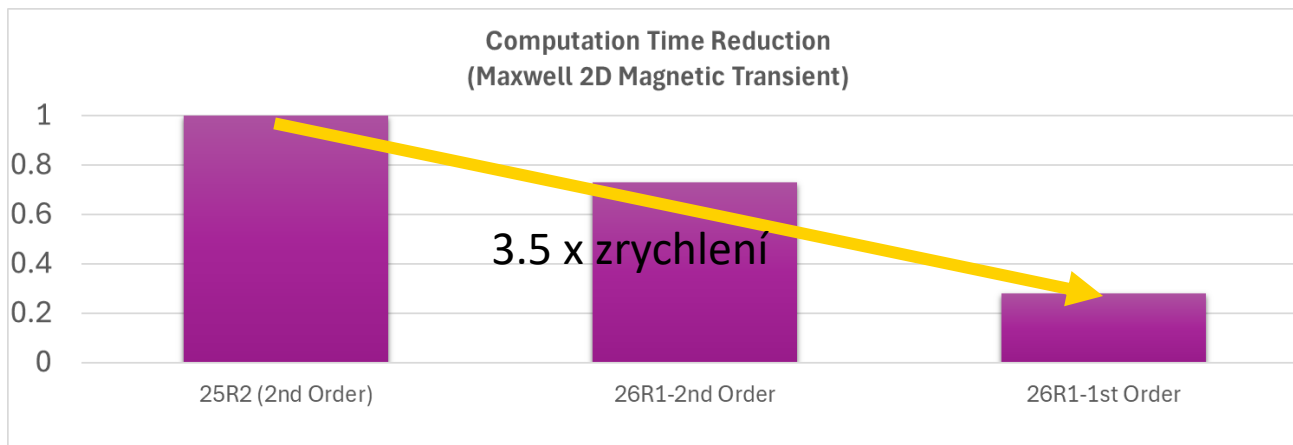
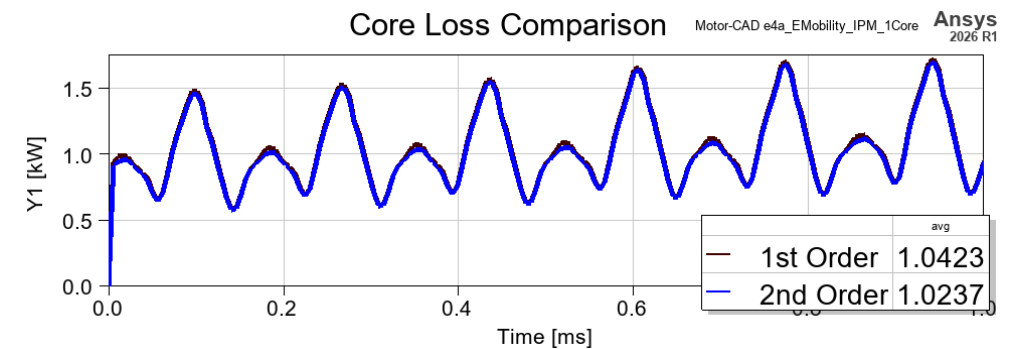
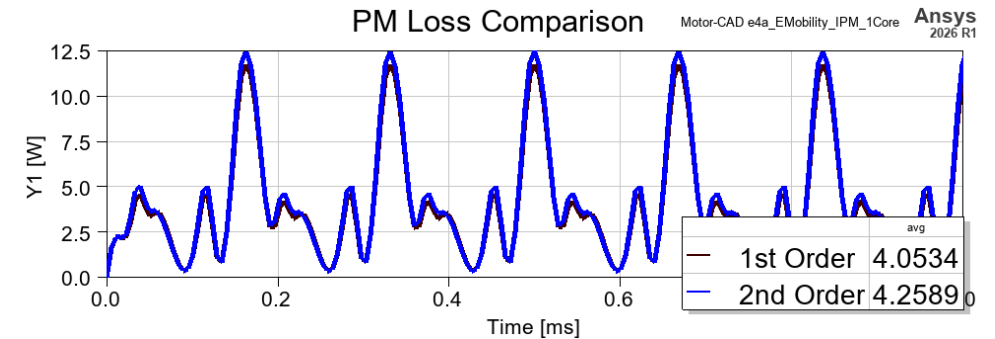
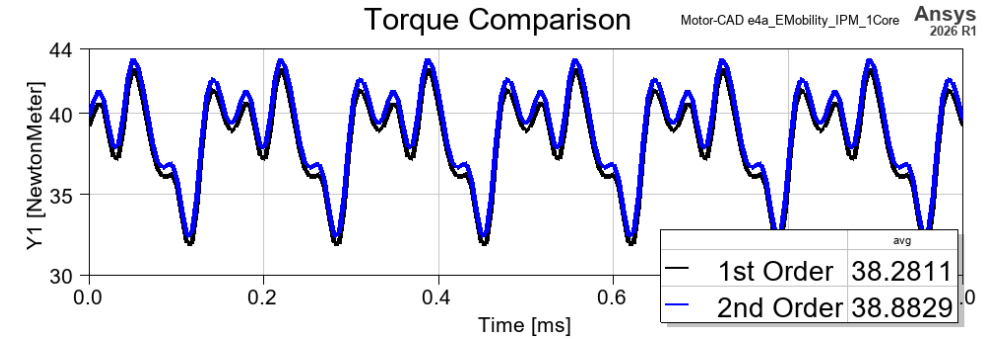
Masivní zrychlení 2D řešiče nestacionárního magnetického pole

- Nová možnost – prvky 1. řádu
 - Nastavení řešiče – Solver
 - Bylo dostupné jen v 3D řešiči magnetic transient
 - Od 2026R1 je dostupná i ve 2D
- Vylepšení kódu a snížení režie
 - Platí to pro prvky 2. a 1. řádu



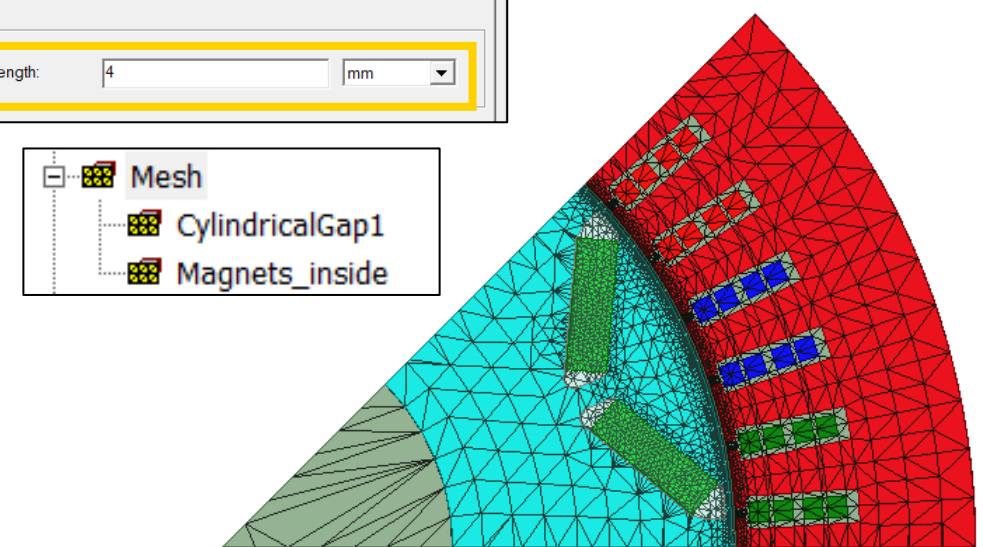
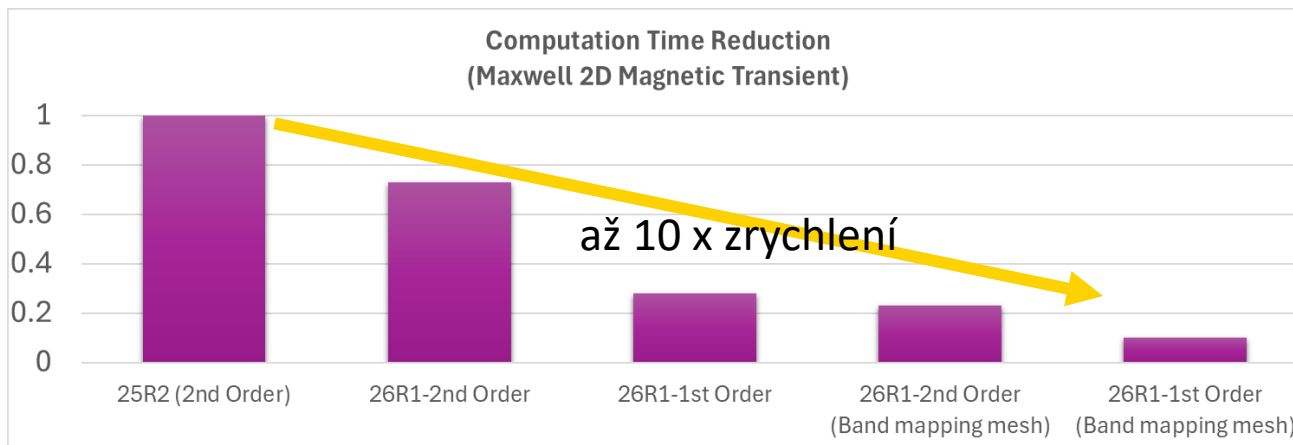
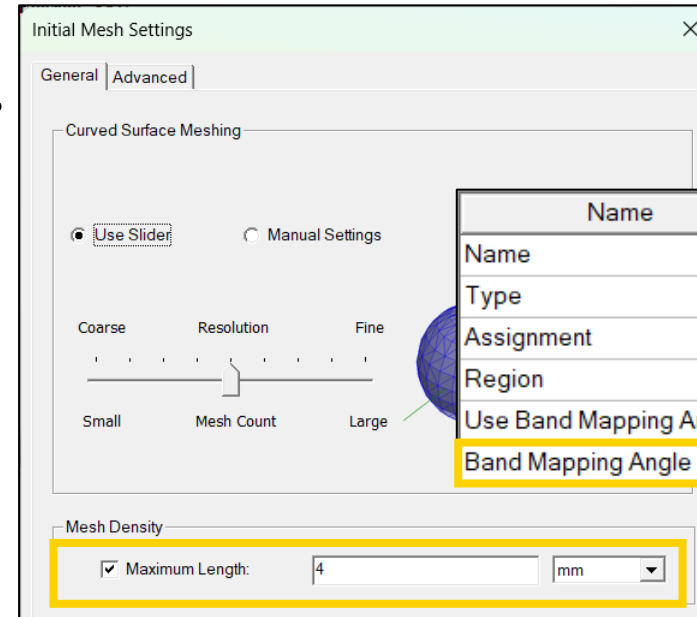
Masivní zrychlení 2D řešiče nestacionárního magnetického pole

- Nová možnost prvku 1. řádu
 - Nastavení řešení – Solver
 - Byla dostupná jen v 3D řešiči magnetic transient
 - Od 2026R1 je dostupná i ve 2D
- Vylepšení kódu a snížení režie
 - Platí to pro prvky 2. a 1. řádu



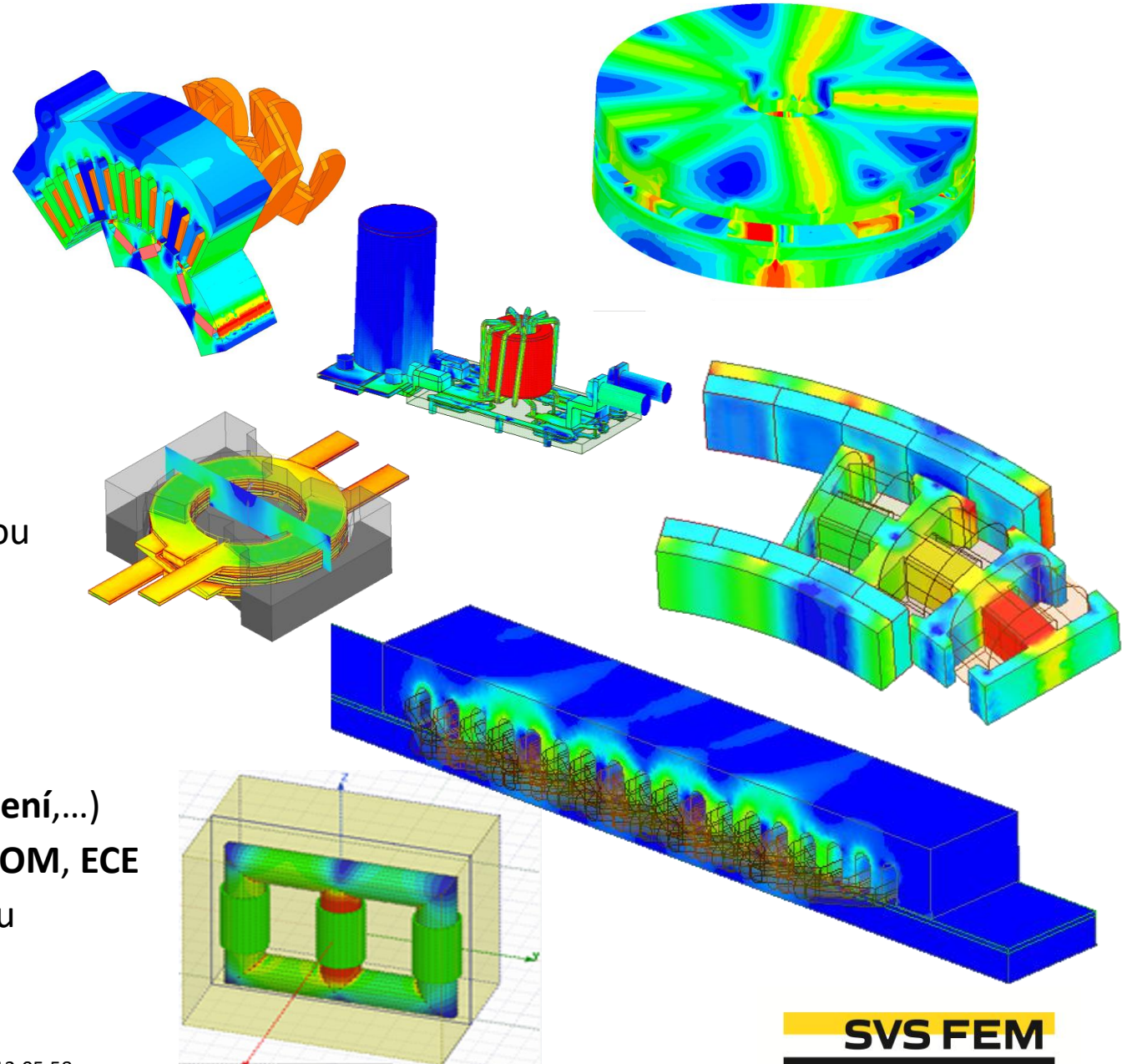
Masivní zrychlení 2D řešiče nestacionárního magnetického pole 33/Ansys KONFERENCE

- Vylepšení mapování sítě pro pohyb (Band mapping).
 - Globální nastavení maximální velikosti elementů
 - Počáteční nastavení sítě
 - Nastavení úhlu segmentace
 - Cylindrical Gap MeshOP
 - Zjemňování na základě délky (v případě potřeby)



Závěr

- Pohyb těles v magnetickém poli
- Simulace **vířivých** proudů
- Pokročilé materiálové modely
 - **Magnetizace, Demagnetizace, Magnetostrikce**
 - Magnetický **vektorový hysterézní model**
 - Ztráty v železe, feritech
 - Teplotní závislost materiálů
- Vinutí ze splétaných vodičů (Litz)
- **Sešikmení drážek: soustava 2D řezů se zpětnou vazbou**
- **Excentricita: 2D & 3D**
- Pokročilý **transfer sil 2D&3D pro akustiku**
- Spolupráce s programy **Twinbuilder** a **Simulink**
 - **Ztráty** indukované střídačem
 - Simulace různých provozních stavů (**zkrat, rozpojení,...**)
- Extrakce modelů s redukováným stupněm volnosti: **ROM, ECE**
- **Mapy účinnosti** na ROM i detailním fyzikálním modelu
- **HPC** (TDM, DDM, DSO-Optimization/DOE)



SVS FEM

Děkujeme Vám za pozornost !

Jsme experti v oblasti simulací