

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

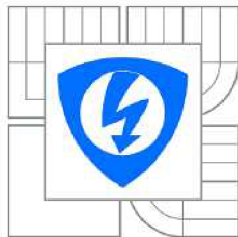
2D A 3D SIMULACE ELEKTRICKÝCH POLÍ VN ZDROJE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. MARTIN KOVÁČ

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. Martin Kováč  
**Ročník:** 2

**ID:** 72959  
**Akademický rok:** 2010/2011

**NÁZEV TÉMATU:**

**2D a 3D simulace elektrických polí VN zdroje**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Podrobná rešerše současně dostupných programů pro modelování elektromagnetických polí.
- 2) Zhodnocení výkonnosti, uživatelského prostředí a dostupnosti vybraných programů.
- 3) Aplikace vybraného produktu na příkladu řešení simulace elektrostatických polí VN sekcí napájecích zdrojů.
- 4) Sumarizace získaných poznatků.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 20.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

**Bibliografická citácia práce:**

KOVÁČ, M. *2D a 3D simulace elektrických polí VN zdroje* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D..

## **Prehlásenie:**

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému *2D a 3D simulace elektrických polí VN zdroje* som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa:

Podpis autora:

## **PodĎakovanie:**

Touto cestou by som rád poďakoval vedúcej tejto diplomovej práce, ktorou je doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D., ako aj odbornému konzultantovi, ktorým je Ing. Ivan Hruška (FEI Czech Republic), za jeho ochotu a odbornú pomoc.

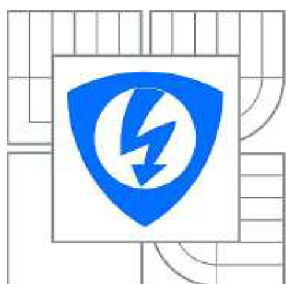
V Brne dňa:

Podpis autora:



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## 2D A 3D SIMULACE ELEKTRICKÝCH POLÍ VN ZDROJE

2D AND 3D SIMULATION OF ELECTRIC FIELDS OF MV SOURCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN KOVÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAVA ORSÁGOVÁ,  
Ph.D.

BRNO 2011

**Abstrakt:**

V diplomovej práci sa autor zaoberá problematikou simulácii elektromagnetických polí ako aj ich použitím v elektrotechnickej praxi pri návrhu elektrotechnických zariadení. V prvej časti práce je pojednávané o 3 programoch pre simuláciu polí, ich vzájomné porovnanie a výber najvhodnejšieho z nich pre prevedenie praktickej časti práce. Druhá časť práce obsahuje praktické využitie simulácii elektrostatického a elektromagnetického poľa vn sekcii napájacích zdrojov.

**Kľúčové slová:**

Elektromagnetické pole; simulácia; vn napájací zdroj; kapacita

**Abstract:**

In the master's thesis author deals with simulations of electromagnetic fields and their applications in the electric practice at the design of electromagnetic devices. The first part of thesis deals with 3 electromagnetic field simulation softwares, their comparison and selection of the best software for the practical part of the thesis. The second part contains the practical applications of electrostatic and electromagnetic field simulation of HT power supply.

**Key words:**

Electromagnetic field; simulation; HT power supply; capacitance

---

**Obsah:**

1	Úvod.....	14
2	Teoretický úvod.....	16
2.1	Pole.....	16
2.1.1	Základné fyzikálne veličiny elektrického a magnetického poľa .....	16
2.1.2	Základné rovnice poľa – Maxwellové rovnice .....	17
2.2	Metóda konečných prvkov - MKP (Finite element method - FEM) .....	18
2.2.1	MKP Obecné .....	18
2.2.2	Postup riešenia MKP .....	20
3	Programy pre modelovanie elektromagnetických polí .....	22
3.1	OPERA 3D.....	22
3.1.1	Opera 3D Obecné .....	22
3.1.2	Analyzačné programy zahrnuté v Opera 3D .....	23
3.1.3	Obmedzenia programu Opera 3D .....	24
3.1.4	Užívateľské rozhranie Opery 3D .....	25
3.1.5	Geometrický modelátor Opery 3D .....	26
3.1.6	Pre processor Opery 3D.....	27
3.1.7	Post processor Opery 3D .....	27
3.1.8	Postup práce v Opera 3D .....	28
3.1.9	Importovanie modelov a práca s importovanými modelmi.....	39
3.2	Maxwell 2D a 3D.....	41
3.2.1	Maxwell obecné.....	41
3.2.2	Užívateľské rozhranie .....	42
3.2.3	Modeler .....	44
3.2.4	Importovanie modelov.....	46
3.2.5	Spracovanie a zobrazenie výsledkov analýzy .....	46
3.3	FEMM – Finite Element Method Magnetics .....	49
4	Zhodnotenie daných programov .....	51
4.1	Porovnanie Opera 3D a Maxwell 3D .....	51
4.2	Tabuľkové a grafické zhodnotenie.....	53
4.3	Slovné zhodnotenie .....	55



---

<b>5</b>	<b>Praktická časť .....</b>	<b>56</b>
5.1	Výpočet kapacity kondenzátora .....	56
5.1.1	Výpočet kapacity kondenzátora z rozmerov a permitivity vzduchu .....	56
5.1.2	Výpočet v programe Opera 3D.....	57
5.1.3	Výpočet v programe Maxwell 3D .....	58
5.1.4	Výpočet v programe FEMM.....	59
5.1.5	Zhrnutie výsledkov .....	60
5.2	Riešenie simulácie elektrostatického poľa v okolí sekcii VN zdrojov .....	60
5.2.1	Elektrostatické pole .....	60
5.2.2	Výpočet kapacít v sústave elektród .....	61
5.2.3	Zdroj 120 kV.....	62
5.2.4	Zdroj 210 kV.....	68
5.3	Indukčnosť cievky transformátora .....	73
<b>6</b>	<b>Záver .....</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>Použitá literatúra a zdroje .....</b>	<b>80</b>

**Zoznam obrázkov**

Obr. 2.1 a.) príklad skalárneho poľa b.) príklad vektorového poľa.....	16
Obr. 2.2 Rozdelenie krivky na konečné prvky .....	19
Obr. 2.3 Rozdelenie plochy na konečné prvky .....	19
Obr. 2.4 Rozdelenie objemu na konečné prvky.....	19
Obr. 3.1 Prostredie Opera Manager .....	25
Obr. 3.2 Prostredie Modeler Opera 3D.....	26
Obr. 3.3 Prostredie Pre processor Opera 3D.....	27
Obr. 3.4 Kreslenie bloku v Opera 3D .....	28
Obr. 3.5 Editačné okno bloku v Opera 3D .....	28
Obr. 3.6 Editačné možnosti rôznych entít v Opera 3D.....	29
Obr. 3.7 Tvorba objektu valec a jeho editácia v Opera 3D .....	29
Obr. 3.8 Kopírovanie objektu valec v Opera 3D .....	30
Obr. 3.9 Boolovské operácie v Opera 3D.....	30
Obr. 3.10 Vlastnosti strán objektu v Opera 3D.....	31
Obr. 3.11 Vytvorenie okolia v Opera 3 .....	32
Obr. 3.12 Zneviditeľňovanie vytvorených objektov v Opera 3D .....	32
Obr. 3.13 Nastavenie analýzy a definovanie materiálov v Opera 3D .....	32
Obr. 3.14 Priradenie napätia v Opera 3D.....	33
Obr. 3.15 Tvorba tela pre analýzu a nastavenie sieťovania v Opera 3D .....	33
Obr. 3.16 Tvorba a nastavenie databázy pre analýzu v Opera 3D .....	34
Obr. 3.17 Výpis databázy a priebehu výpočtu v Opera 3D.....	35
Obr. 3.18 Nastavenie poľa v prostredí Post processor v Opera 3D.....	36
Obr. 3.19 Zobrazenie potenciálu častí modelu v Post processor Opera 3D .....	37
Obr. 3.20 Vytvorenie 2D rezu poľa v Opera 3D .....	38
Obr. 3.21 Zobrazenie rezov potenciálu a intenzity elektrického poľa v Opera 3D.....	38
Obr. 3.22 Vytvorenie okolia aby bola analyzovaná iba ¼ modelu v Opera 3D.....	39
Obr. 3.23 Vykreslenia priebehu intenzity elektrostatického poľa v Opera 3D .....	40
Obr. 3.24 Vykreslenie rozloženia potenciálu v rôznych rovinách v Opera 3D.....	40
Obr. 3.25 Typy podporovaných analýz v prostredí Maxwell .....	41
Obr. 3.26 Prostredie Maxwell 3D .....	42
Obr. 3.27 Materiálová knižnica v prostredí Maxwell.....	44
Obr. 3.28 Project Manager prostredia Maxwell 3D.....	45

---

Obr. 3.29	Priebeh tvorby a analýzy modelu v prostredí Maxwell.....	45
Obr. 3.30	Konvergenčná (výsledková) tabuľka výpočtu v prostredí Maxwell .....	46
Obr. 3.31	Vektory intenzity magnetického poľa vychýľovacích cievok v Maxwell ....	47
Obr. 3.32	Zobrazenie indukcie magnetického poľa vychýľovacích cievok v Maxwell	48
Obr. 3.33	Vektory indukcie magnetického poľa vychýľovacích cievok v Maxwell....	48
Obr. 3.34	Prostredie FEMM .....	50
Obr. 3.35	Zobrazenie intenzity elektrostatického poľa v prostredí FEMM .....	50
Obr. 3.36	Rozloženia potenciálu v okolí vodičov v prostredí FEMM .....	50
Obr. 4.1	Grafické porovnanie programov v dôležitých bodoch .....	54
Obr. 5.1	Zobrazenie výsledku integrálu cez celý objekt v Opera 3D.....	57
Obr. 5.2	Kondenzátor s rozložením potenciálu medzi elektródami v Opera 3D.....	57
Obr. 5.3	Kondenzátor a tabuľka s kapacitnou maticou kondenzátora v Maxwell 3D..	58
Obr. 5.4	Rozloženie potenciálu a výpočet elektrického náboja v prostredí FEMM ....	59
Obr. 5.5	Väzby elektrických nábojov medzi elektródami .....	61
Obr. 5.6	Zdvojovač napätia.....	62
Obr. 5.7	Princíp činnosti násobiča napätia 1 .....	62
Obr. 5.8	Princíp činnosti násobiča napätia 2 .....	63
Obr. 5.9	Štvornásobič napätia.....	63
Obr. 5.10	Intenzita elektrostatického poľa v okolí 120 kV zdroja .....	64
Obr. 5.11	Rozloženie potenciálu v okolí 120 kV zdroja .....	64
Obr. 5.12	Matica kapacitných koeficientov pre zdroj 120 kV .....	65
Obr. 5.13	Kapacity medzi elektródami pre zdroj 120 kV.....	65
Obr. 5.14	Dôležité kapacity pre zdroj 120 kV .....	67
Obr. 5.15	Intenzita elektrostatického poľa v okolí 210 kV zdroja .....	68
Obr. 5.16	Vektory intenzity elektrostatického poľa v okolí 120 kV zdroja .....	69
Obr. 5.17	Rozloženie potenciálu v okolí 210 kV zdroja .....	69
Obr. 5.18	Matica kapacitných koeficientov pre zdroj 210 kV .....	70
Obr. 5.19	Kapacity medzi elektródami pre zdroj 210 kV.....	70
Obr. 5.20	Dôležité kapacity pre zdroj 210 kV .....	72
Obr. 5.21	Napájací transformátor .....	73
Obr. 5.22	Závislosť indukčnosti cievky na vzduchovej medzere.....	75
Obr. 5.23	Vektory intenzity magnetostatického poľa v okolí jadra transformátora....	75
Obr. 5.24	Prevod transformátora z magnetického obvodu na elektrický .....	76

**Zoznam tabuliek:**

Tab. 2-1 Lokálne a globálne veličiny magnetického poľa .....	17
Tab. 2-2 Lokálne a globálne veličiny elektrického poľa .....	17
Tab. 2-3 Akcie a reakcie pri inžinierskych úlohách .....	20
Tab. 2-4 Matice konečného prvku a geometrické charakteristiky fyzikálnych polí ....	21
Tab. 3-1 Obmedzenia prostredia Pre processor v Opera 3D .....	24
Tab. 4-1 Porovnanie programov v dôležitých bodoch.....	53
Tab. 5-1 Vypočítané kapacity zadaného kondenzátora .....	60
Tab. 5-2 Dôležité kapacity pre zdroj 120 kV.....	66
Tab. 5-3 Dôležité kapacity pre zdroj 210 kV.....	72
Tab. 5-4 Namerané a vypočítané indukčnosti cievky transformátora za pomoci magnetostatickej analýzy.....	74
Tab. 5-5 Tabuľka s vypočítanými a nameranými hodnotami indukčnosti pre vzduchovú medzeru 1,5 mm.....	77

**Zoznam použitých znakov a symbolov**

Symbol	Veličina	Jednotka
$B$	Magnetická indukcia	T
$C$	Kapacita	F
$D$	Elektrická indukcia	C/m <sup>2</sup>
$E$	Intenzita elektrického poľa	V/m
$H$	Intenzita magnetického poľa	A/m
$I$	Elektrický prúd	A
$J$	Hustota elektrického prúdu	A/m <sup>2</sup>
$d$	Dĺžka, vzdialenosť	m
$Q$	Elektrický náboj	C
$S$	Plocha	m <sup>2</sup>
$t$	Čas	s
$U$	Elektrické napätie	V
$U_m$	Magnetické napätie	A
$V$	Objem	m <sup>3</sup>
$W$	Energia	J
$\alpha$	Potenciálový koeficient	F <sup>-1</sup>
$\beta$	Kapacitný koeficient	F
$\rho$	Objemová hustota náboja	C/m <sup>3</sup>
$\psi$	Elektrický indukčný tok	C
$\Phi$	Magnetický indukčný tok	Wb
$\phi$	Elektrický potenciál	V
$\varepsilon$	Permitivita	F/m

Vektory sú značené pruhom nad symbolom veličiny, matice tučným písmom.

## 1 Úvod

Modelovanie a simulovanie elektromagnetických polí v okolí elektrotechnických zariadení alebo ich častí je v súčasnosti dôležitou a v podstate už aj neodmysliteľnou súčasťou vývoja týchto zariadení, ktoré využívajú inžinieri po celom svete.

Simulovanie polí je taktiež v súčasnej dobe nedielnou súčasťou analýz, ktoré sú dôležité z hľadiska kvality zariadení s ohľadom na elektromagnetickú kompatibilitu. Tieto analýzy sú vykonávané spravidla vhodnými počítačovými programami. K zložitým analýzám dokonca niekedy nepostačuje výkonnosť jedného počítača a preto sú najvyspelejšie z týchto programov schopné rozdeliť výpočet na viacero spolupracujúcich počítačov.

Cieľom tejto práce je zhodnotenie a porovnanie možnosti, výkonnosti a dostupnosti programov, ktorú sú v súčasnosti k dispozícii pre modelovanie elektromagnetických polí v 2D a 3D prostredí, pre účely firmy FEI Czech Republic, s.r.o. a vybrať najvhodnejší program pre vykonanie praktickej časti práce a to nasimulovanie elektrostatických a elektromagnetostatických polí v okolí sekcii vysokonapäťových napájacích zdrojov.

V práci boli skúmane a hodnotené 3 programy : Opera 3D, Maxwell 2D (3D) a FEMM, využívajúce pre výpočet elektromagnetických polí jednu z najuniverzálnejších numerických počítačových metód, ktorou je metóda konečných prvkov. V počiatocnom štádiu vypracovávania práce boli absolvované odborné prednášky a školenia pod vedením odborníkov na daný produkt, na základe ktorých bolo možné získať podrobnejšie materiály a nadviazať kontakty s týmito odborníkmi. Ďalej boli poskytnuté časovo obmedzené licencie, za pomoci ktorých bola umožnená práca, na základe ktorej je možné porovnanie daných produktov a výber najvhodnejšieho z nich k praktickým aplikáciám. Rozhodujúcimi kritériami pri výbere vhodného programu sú predovšetkým prostredie, výkonnosť a dostupnosť daného produktu, na ktoré sa v tejto časti práce bude prihliadať. Veľmi podstatnou funkciou pre prax je aj možnosť efektívneho importovania sústav, ktoré sú namodelované v iných modelačných programoch a následná práca s týmito modelmi. V práci bola preto kladená pozornosť na vlastnosti a funkčnosť importu v reálnych aplikáciách.

Po porovnaní daných programov a zvolení najvhodnejšieho z nich, nasleduje praktická časť práce, ktorá je zameraná na statické polia, predovšetkým elektrostatické polia. Riešili sa praktické úlohy firmy FEI Czech Republic, s.r.o., ktorými boli analýzy polí v okolí vysokonapäťových napájacích zdrojov, určených pre napájanie elektrónových mikroskopov. Na základe týchto analýz boli určené potrebné parametre zariadenia ako sú vlastné a vzájomné kapacity ekvipotenciálnych krúžkov zdroja, indukčnosť cievky napájacieho transformátora a jej závislosť na veľkosti vzduchovej medzery medzi časťami feritového jadra transformátora. Súčasťou elektrostatickej analýzy vysokonapäťového zdroja je tiež overenie vhodnosti použitej geometrie zdroja z hľadiska elektrickej intenzity, a teda či nenastáva prekročené elektrickej pevnosti izolačného média, v ktorom je zdroj uložený.

---

## Introduction

Modeling and simulation of electromagnetic fields of electrical equipments or their parts is nowadays an important and in fact already an indispensable part of the development of these devices, used by engineers worldwide.

Simulating of fields is also in contemporary times an integral part of analyses that are important to the quality of facilities with regard to electromagnetic compatibility. These analyses are usually performed by appropriate computer programs. For the complicated analyses is sometimes not sufficient one PC performance and therefore are the most advanced of these programs able to divide the calculation to the number of cooperating computers.

The aim of this thesis is to evaluate and compare options, performance and availability of programs that are currently available for modeling electromagnetic fields in 2D and 3D environments for the purpose of FEI Company Czech Republic, Ltd. and select the most appropriate program for the performing of practical part of thesis that is the simulation of electrostatic and electromagnetostatic fields around HT power supply sections.

In the thesis has been researched and rated 3 programs: Opera 3D, Maxwell 2D (3D) and FEMM, using for the calculation of electromagnetic fields one of the most versatile computer numerical methods, which is the finite element method. In the early stage of the thesis has been visited vocational trainings and lectures led by experts in these products, which made it possible to obtain more detailed materials and liaise with these professionals.

There were also granted time limited licenses, for which assistance has been possible the work, which makes it possible to compare the products and select the most suitable one for practical applications. The decisive criteria in choosing the appropriate program are particularly environment, performance and availability of the product, which in this part of thesis will be taken into account. Very essential function for the practice is also the possibility of effective import of model assembly, that are modeled in other modeling programs, and subsequent work with these models. In the thesis was therefore lies with attention to the features and functionality of import in real applications.

After comparing the programs and selection of the most suitable of them follows the practical part of the thesis, which focuses on the static fields, first of all the electrostatic fields. There were solved the practical tasks for FEI Company Czech Republic, Ltd., which were the analyses of fields around HT power supplies, designed for electron microscopes. Based on these analyses were specified parameters of device such as self and mutual capacity of equipotential rings, inductance of transformer coil and its dependence on the size of the air gap between the parts of ferrite transformer core.

Part of the electrostatic analysis of the HT power supply is also verifying the suitability of the used power supply geometry from the point of view of electric intensity, and whether does not exceed the electric strength of the insulating medium in which the power supply is stored.

## 2 Teoretický úvod

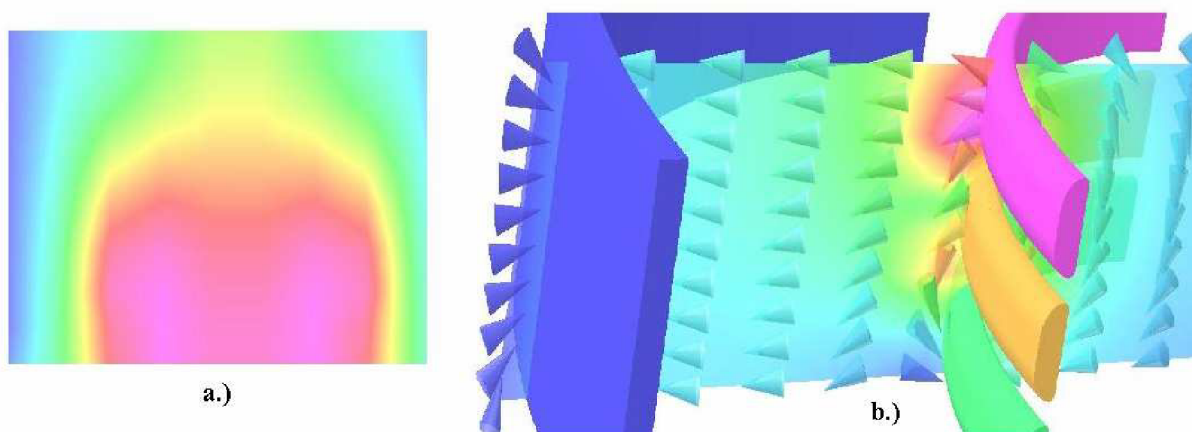
Cieľom tejto kapitoly je objasniť najdôležitejšie pojmy a metódy, ktoré sú pri práci s elektromagnetickými poľami využívané. Týmito pojmami sú predovšetkým základné fyzikálne veličiny elektrického a magnetického poľa a zákony popisujúce správanie poľa. V práci budú popisované programy, ktorých výpočet je založený na metóde konečných prvkov, ktorá bude v tejto kapitole taktiež objasnená.

### 2.1 Pole

Poľom rozumieme obecnú funkciu, ktorá popisuje danú fyzikálnu veličinu v priestore a čase. Poznáme pole skalárne, pri ktorom je analyzovaná veličina skalár, čiže zobrazuje iba veľkosť veličiny v danom bode, a pole vektorové, ktoré okrem veľkosti veličiny zobrazuje tiež smer veličiny.

Príkladom skalárneho poľa je pole elektrického potenciálu, ktoré je zobrazované pomocou ekvipotenciál, hladín s rovnakou hodnotou veličiny. Za pole vektorové považujeme napríklad pole elektrickej intenzity a indukcie, ktoré sú zobrazované predovšetkým pomocou vektorov.

Zobrazovanie polí sa vykonáva v rovine, prípadne vhodnými rezi trojrozmerného poľa. Počítačové programy vykresľujú ekvipotenciály rôznej farby, ktorá udáva veľkosť fyzikálnej veličiny.



Obr. 2.1 a.) príklad skalárneho poľa b.) príklad vektorového poľa

#### 2.1.1 Základné fyzikálne veličiny elektrického a magnetického poľa

Veličiny elektrických a magnetických polí rozdeľujeme podľa miesta ich pôsobenia na lokálne a globálne fyzikálne veličiny. Lokálne veličiny popisujú pole v danom bode, kým globálne veličiny charakterizujú danú oblasť a sú určené lokálnymi veličinami pomocou integrálov.



Tab. 2-1 Lokálne a globálne veličiny magnetického poľa

Lokálne veličiny		Globálne veličiny	
$\bar{B}$ [T]	Magnetická indukcia	$\bar{\Phi} = \int_s \bar{B} \cdot d\bar{S}$ [Wb]	Magnetický indukčný tok
$\bar{H}$ [A/m]	Intenzita magnetického poľa	$U_m = \int_d \bar{H} \cdot d\bar{d}$ [A]	Magnetické napätie

Tab. 2-2 Lokálne a globálne veličiny elektrického poľa

Lokálne veličiny		Globálne veličiny	
$\rho$ [C/m <sup>3</sup> ]	Objemová hustota náboja	$Q = \int_v \rho \cdot dV$ [C]	Elektrický náboj
$\bar{J}$ [A/m <sup>2</sup> ]	Hustota prúdu	$I = \int_s \bar{J} \cdot d\bar{S}$ [A]	Elektrický prúd
$\bar{D}$ [C/m <sup>2</sup> ]	Elektrická indukcia	$\bar{\Psi} = \int_s \bar{D} \cdot d\bar{S}$ [C]	Elektrický indukčný tok
$\bar{E}$ [V/m]	Intenzita elektrického poľa	$U = \int_d \bar{E} \cdot d\bar{d}$ [V]	Elektrické napätie

### 2.1.2 Základné rovnice poľa – Maxwellové rovnice

#### Ampérov zákon celkového prúdu – zákon magnetoelektrickej indukcie

Cirkulácia vektoru  $\bar{H}$  po orientovanej krivke  $d$  je rovná celkovému prúdu  $I$  a posuvnému prúdu  $\frac{d\bar{\Psi}}{dt}$ , ktorý prechádza v kladnom smere plochy  $S$ , ohraničenou krivkou  $d$ . Orientácia krivky sa určuje pravidlom pravej ruky.

$$\oint_d \bar{H} \cdot d\bar{d} = I + \frac{d\bar{\Psi}}{dt} \quad (2.1)$$

#### Faradayov indukčný zákon – zákon elektromagnetickej indukcie

Cirkulácia vektoru  $\bar{E}$  po orientovanej krivke  $d$  je rovná záporne vzatej časovej zmene magnetického toku, ktorý prechádza plochou  $S$ , ohraničenou krivkou  $d$ . Orientácia sa určuje pravidlom pravej ruky.

$$\oint_d \bar{E} \cdot d\bar{d} = -\frac{d\bar{\Phi}}{dt} \quad (2.2)$$

### Gaussová veta elektrostatiky

Výtok vektoru indukcie  $\vec{D}$  je rovný celkovému náboju  $Q$  v objeme  $V$ , ktorý je uzavretý plochou  $S$ .

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q \quad (2.3)$$

### Zákon kontinuity magnetickej indukcie

Výtok vektoru magnetickej indukcie z uzavretej plochy je vždy nulový.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.4)$$

## 2.2 Metóda konečných prvkov - MKP (Finite element method - FEM)

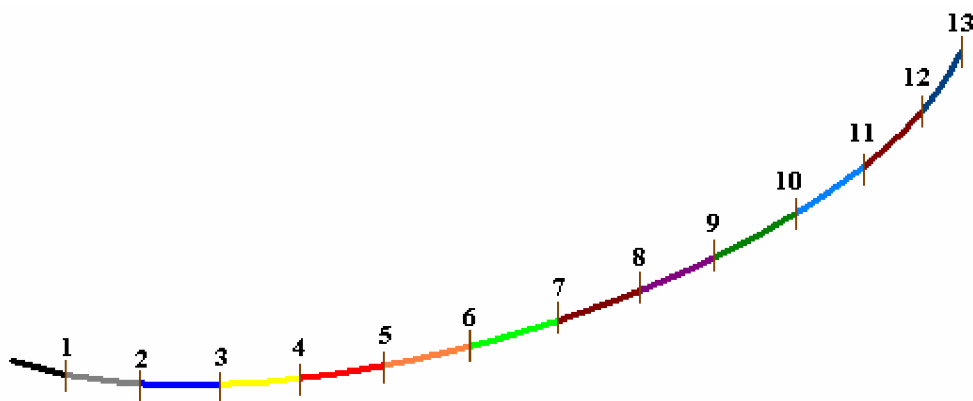
### 2.2.1 MKP Obecne

Vznik metódy si vyžiadala potreba inžinierov riešiť, pri modelovaní inžinierskych úloh, zložité systémy obyčajných a parciálnych diferenciálnych rovníc. MKP vyvíjali spoločne matematici, fyzici a inžinieri, aby sa už v 60 rokoch minulého storočia rozšírila a začala sa používať pri výpočtoch a riešení úloh poľa. Jej vývoj nieje ani dnes ukončený. Možno ju použiť v rôznych odvetviach fyziky, ako napríklad v mechanike pevných a poddajných telies, pri teplotných poliach, prúdení plynov a kvapalín, v elektrike a magnetizme, atď.

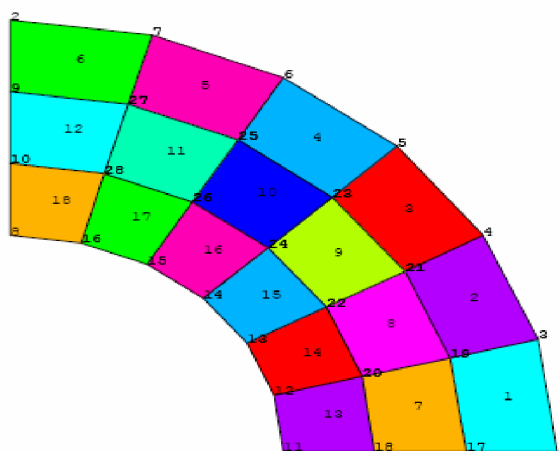
MKP je numerická metóda, ktorá transformuje systém obyčajných alebo parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré popisujú danú úlohu, na systém algebraických rovníc, ktoré sa dajú riešiť na počítači. Diferenciálne rovnice sú zostavené pre neznámu funkciu riešeného poľa, ako napríklad teplotu, elektrický potenciál, atď., na určitej konečnej súvislej oblasti (čiara, plocha, objem). Riešením rovníc je táto funkcia splňujúca počiatočné a okrajové podmienky riešenia.

Pri riešení sa pre neznámu funkciu poľa zvolí vhodná náhradná funkcia, splňujúca počiatočné a okrajové podmienky, ktorá pozostáva z určitého typu funkcie ako napríklad polynómy, goniometrické funkcie, rady atď. a z voľných koeficientov.

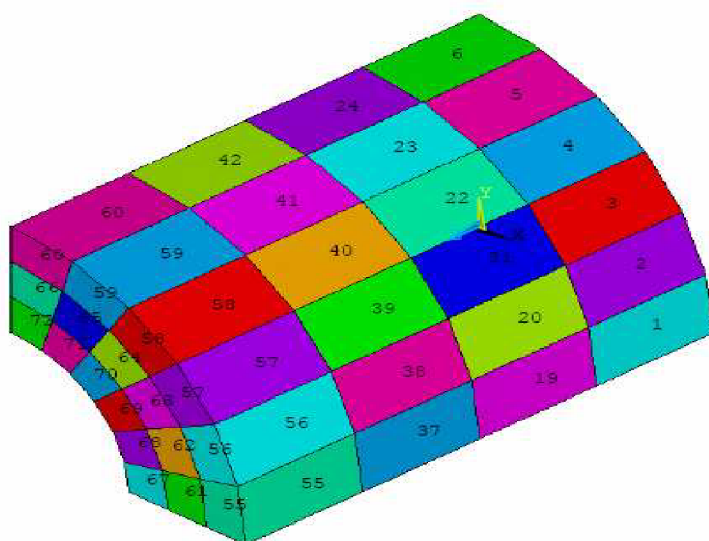
MKP sa od iných numerických metód líši tým, že náhradná funkcia sa nevolí pre celú oblasť, ale pre podobnosti konečných rozmerov – konečné prvky, na ktoré je daná oblasť rozdelená. Konečné prvky môžu mať tvar čiary, plochy alebo objemu konečných rozmerov.



Obr. 2.2 Rozdelenie krivky na konečné prvky



Obr. 2.3 Rozdelenie plochy na konečné prvky



Obr. 2.4 Rozdelenie objemu na konečné prvky

Náhradná funkcia je rovnaká pre všetky prvky, ktoré sú pospájané tzv. uzlovými bodmi. Voľnými parametrami potom sú neznáme riešeného poľa v uzlových bodoch. MKP počíta neznáme iba v uzlových bodoch a teda je metódou približnou a presnosť výpočtu závisí na jemnosti rozdelenia riešenej oblasti, čím je konečných prvkov a teda aj uzlových bodov viac, tým presnejší je výsledok.

## 2.2.2 Postup riešenia MKP

### 1) Zostavenie fyzikálneho modelu a definovanie podmienok

V tomto kroku sa zadáva z akej oblasti riešený problém pochádza – mechanika, termodynamika, prúdenie tekutín, elektriny, atď. Stanoví sa geometria, počiatkové a okrajové podmienky, vlastnosti materiálu, či ide o lineárnu alebo nelineárnu úlohu, stacionárnu alebo dynamickú úlohu, atď.

### 2) Rozdelenie riešenej oblasti na konečné prvky

V tomto kroku rozdeľujeme oblasť na čiarové, plošné alebo objemové konečné prvky. Čiarové sa používajú pri jednorozmerných úlohách, neznáma sa mení iba v jednom smere. Plošné konečné prvky sa používajú pri dvojrozmerných oblastiach, neznáma sa mení v dvoch smeroch. Objemové konečné prvky sú užívané pre trojrozmerné oblasti. Neznáma sa môže meniť v ľubovoľnom smere. Tieto prvky majú tvar kvádra (8 až 21 uzlové) alebo ihlana (4 a 10 uzlové) .

### 3) Identifikácia primárnych neznámych a voľba náhradných funkcií poľa

Primárne neznáme závisia od riešeného poľa, v mechanike pevných telies sú to premiestnenia bodov telesa, v elektrickom poli elektrický potenciál, pri prúdení tekutín rýchlosť prúdenia, atď. Najpoužívanejšie náhradné funkcie sú lineárne polynómy a Lagrangeové polynómy.

### 4) Definovanie konštitutívneho vzťahu medzi akciami a reakciami riešeného poľa

Tab. 2-3 Akcie a reakcie pri inžinierskych úlohách

Pole	Akcia	Reakcia	Závislosť
Silové	Sila	Premiestnenie	Hookeov zákon
Teplotné	Tepelný tok	Teplota	Fourierov zákon
Elektrické	Elektrický prúd	Elektrický potenciál	Ohmov zákon
Prúdenie tekutín	Tlak	Rýchlosť prúdenia	Bernoulliho rovnica

## 5) Odvodenie prvkových rovníc

Prvková rovnica vyjadruje závislosť medzi akciami a reakciami v uzlových bodoch prvku a je definovaná maticou konečného prvku poľa, ktorý obsahuje geometrické charakteristiky a materiálové vlastnosti.

**Tab. 2-4** Matice konečného prvku a geometrické charakteristiky fyzikálnych polí

<b>Pole</b>	<b>Matica</b>	<b>Charakteristika</b>
Silové pole	Matica tuhosti	Modul pružnosti
Teplotné pole	Matica tepelnej vodivosti	Koeficient teplotnej vodivosti
Elektrické pole	Matica elektrickej vodivosti	Elektrická vodivosť
Pole prúdenia	Matica odporu prúdenia	Viskozita

## 6) Odvodenie rovníc MKP pre celú riešenú oblasť a ich riešenie pre primárne neznáme

## 7) Výpočet sekundárnych neznámych

Sekundárne neznáme vypočítame pomocou fyzikálnych vzťahov z primárnych neznámych, ktoré boli vypočítané v predchádzajúcom kroku. Môžu nimi byť napríklad mechanické napätie, prúdová hustota, tlak prúdiacej tekutiny, atď.

## 8) Interpretácia výsledkov riešenia a optimalizácia riešenej úlohy

Výsledky sú zobrazené pomocou „Postprocessora“ vo forme tabuliek, grafov a grafických máp. Z týchto výsledkov môžeme previesť optimalizáciu riešeného problému.

### 3 Programy pre modelovanie elektromagnetických polí

V tejto kapitole je pojednávané o samotných programoch pre elektromagnetické simulácie, ktorými sú Opera 3D, Maxwell a FEMM, ktoré boli pre túto prácu zvolené na základe dostupnosti daných produktov na trhu, doporučení a komunikácie s firmami, ktoré sa touto problematikou zaoberajú. Práca v týchto programoch bola umožnená na základe časovo obmedzených verzií, ktoré boli poskytnuté výrobcami týchto produktov ako Cobham (Opera 3D) a Ansoft (Maxwell). Licencia na program Opera bola poskytnutá v časovom období od 20.10.2010 do 25.11.2010. Licencia na program Maxwell bola poskytnutá od 3.12.2010 do 31.1.2011. Ďalšia komunikácia so spoločnosťou Cobham, ktorá má svoje sídlo vo Veľkej Británii, bola zabezpečená prostredníctvom internetu. Spoločnosť Ansoft ma svoje zastúpenie v Českej republike spoločnosťou SVS FEM Brno a preto bola komunikácia ohľadne programu Maxwell oveľa jednoduchšia prostredníctvom osobných pohovorov so zamestnancami tejto spoločnosti. Dňa 30.11.2010 bolo taktiež absolvované školenie o programe Maxwell pod vedením Ing. Bachorca, zamestnanca firmy SVS FEM. K práci v programe Femm bol využívaný manuál k tomuto produktu, a keďže bol do tejto doby tento program využívaný firmou FEI Czech Republic, s.r.o. pre modelovanie polí, bolo možné konzultovať prácu v tomto programe aj so samotnými zamestnancami. Dôraz v tejto kapitole je kladený na prostredie a praktickú prácu v daných programoch.

#### 3.1 OPERA 3D

##### 3.1.1 Opera 3D Obecne

Opera 3D ( **OP**erating environment for **E**lectromagnetic **R**esearch and **A**nalysis) je Pre a Post processing systém pre známe elektromagnetické analyzačné programy ako Tosca, Elektra, Scala, Carmen, Soprano a Tempo.

Základnú metódu používanú v týchto analyzačných programoch tvorí metóda konečných prvkov (Finite element method), ktorá sa používa na riešenie parciálnych diferenciálnych rovníc. Opera 3D je teda prostredie, ktoré využíva teóriu konečných prvkov, pre kompletnú analýzu elektromagnetických polí v trojrozmernom priestore. Aby bolo možné použiť túto metódu pre výpočet elektromagnetických polí obsahuje Opera 3D nástroj pre geometrické modelovanie a „Pre processor“, ktoré poskytujú možnosť tvorby modelov, špecifikáciu komplikovaných geometrií, zadefinovanie materiálových charakteristík, vytvorenie siete prvkov z modelu pre výpočet elektromagnetických polí metódou konečných prvkov, atď. Samotný výpočet elektromagnetických polí metódou konečných prvkov zaistia analyzačné programy Tosca, Elektra, Scala, Carmen, Soprano a Tempo, podľa toho čo a na akom modeli chceme analyzovať. Výsledky analyzačných programov spracováva „Post processor“, ktorý ďalej zabezpečuje zobrazovanie grafov, obrysových máp a rezov vedúcich cez počítané elektromagnetické pole.

Opera 3D a jej súčasti bola vyvíjaná a vylepšovaná počas takmer 30 rokov, počas ktorých sa podarilo vytvoriť kompaktný program určený pre široký rozsah aplikácií ako napríklad riešenie statických, nízko frekvenčných a vysoko frekvenčných elektromagnetických polí, ako aj tepelných polí v rôznych odvetviach priemyslu.

### 3.1.2 Analyzačné programy zahrnuté v Opera 3D

#### Tosca

Tento program je určený na riešenie nelineárnych magnetostatických a elektrostatických polí. Používa sa už vyše 20 rokov, počas ktorých bol neustále vylepšovaný z hľadiska jeho presnosti a efektívnosti. Tosca je jeden z najrozšírenejších a najstarších programov využívajúcich metódu konečných prvkov pre elektromagnetickú analýzu v trojrozmernom priestore. Používa sa pre návrhy elektrických zariadení ako motorov, generátorov, elektrónových šošoviek, vedeckých prístrojov, časticových urýchľovačov, katodickej ochrany, elektromagnetického tienenia atď.

#### Electra

Elektra je používaná na analýzu časovo závislých elektromagnetických polí a vírivých prúdov v trojrozmernom priestore.

Obsahuje tri nastavenia analýzy:

TR (transient)– časová zmena je prechodná

SS (steady state) – ustálený stav

VL – vírivé prúdy sa indukujú v pohybujúcom sa vodiči s danou priamočiarou alebo otáčavou rýchlosťou v prítomnosti statického poľa

Dynamické simulácie rešpektujú skin efekt vo vodivých materiáloch a môžu zahrňovať nelineárne magnetické, anisotropické a hysterézne správanie. Elektra umožňuje prispôbiť časové krokovanie a sledovať zmeny polí v ľubovoľnom čase.

Je určená na návrhy zariadení v širokom rozsahu, ako napríklad :

Elektrických zariadení (motory, generátory, atd.)

Nedeštruktívnych testovacích zariadení

Magneticko-rezonančných zariadení

Vírivo prúdových ohrievačov

Časticových urýchľovačov

Elektromagnetického tienenia

Atď.

#### Scala

Počíta efekt priestorového náboja tvoreného lúčmi nabitých častíc v elektrostatickom poli v trojrozmernom priestore.

Typické použitie:

elektronové delá a lúče, iónové delá a lúče, mikroskopy využívajúce studenú emisiu, analýza lúčov v CRT obrazovkách, analýza lúčov röntgenových trubíc , analýza lúčov elektrónových mikroskopov, atd.

## Carmen

Tento program analyzuje prechodné magnetické polia v otáčavých strojoch s konštantnou otáčavou rotorovou rýchlosťou a v zariadeniach s priamočiarym pohybom. Používa sa napríklad na modelovanie komutačných efektov, prechodných a nevyvážených stavov rotačných strojov. V tomto programe je možné namodelovať straty vírivými prúdmi vo všetkých materiáloch ako aj dynamické správanie indukčných motorov (generátorov). Program umožňuje užívateľovi pohybovať s časťou modelu určitou rýchlosťou a zrýchlením nezávisle na ostatných častiach modelu. Simulator umožňuje špecifikovať vzduchovú medzeru, ktorá spája nepohyblivé a pohyblivé časti modelu.

## Soprano

Soprano je využívané na analýzu vysoko frekvenčných elektromagnetických polí v trojrozmernom priestore. Je ľahko použiteľný v prípade analýzy vlnovodných súčiastok a rezonančných zariadení.

## Tempo

Program Tempo je určený na analýzu prechodných (teplota sa mení podľa zdrojov tepla) a ustálených (teplota sa nemení) tepelných polí vystupujúcich ako výsledok elektromagnetického ohrevu – importovaný z iných analyzačných programov Opery 3D alebo vonkajších tepelných zdrojov – definovaných užívateľom. Dokáže počítať trojdimenzionálne teplotné a tepelno-gradientné polia, tepelný tok a hustotu tepelného toku. Tepelná vodivosť, hustota, kapacita a hustota tepelných zdrojov môže byť závislá na teplote alebo môže byť zadaná ako funkcia. Pre zadanie prepojenia tepelného systému a jeho okolia sa udávajú okrajové podmienky.

### 3.1.3 Obmedzenia programu Opera 3D

Program Opera 3D ma z hľadiska počtu objektov a entít, s ktorými pracujeme, určité obmedzenia. „Pre processor“ Opery 3D má obmedzenie na maximálny počet entít (celkový počet bodov, čiar, strán a dielov), ktoré sa môžu vytvoriť. „Modeller“, analyzačné programy a „post processor“ majú jedinú obmedzujúcu hranicu a to je veľkosť virtuálnej pamäte počítača, na ktorom je analýza prevádzaná.

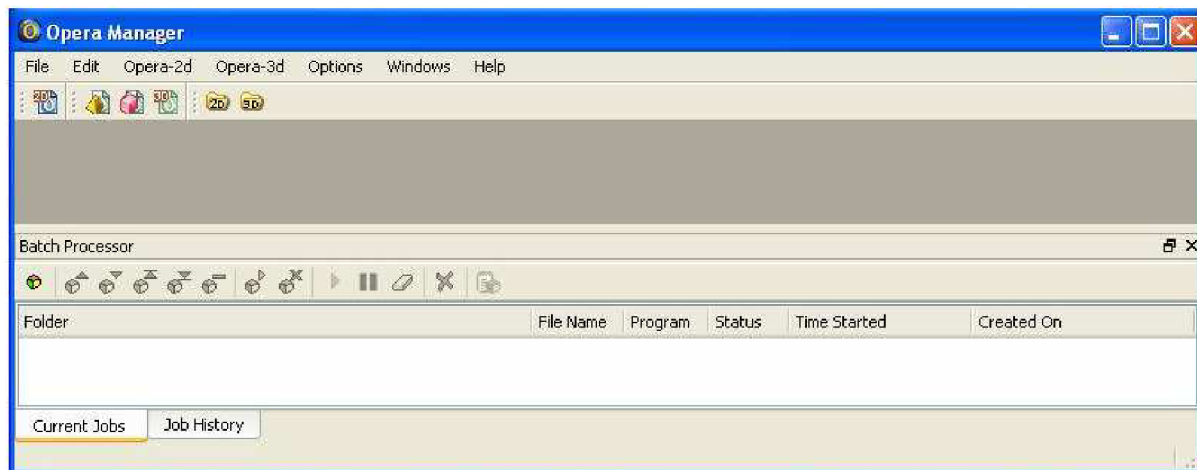
Tab. 3-1 Obmedzenia prostredia Pre processor v Opera 3D

Pre processor	
Počet entít	5 000 000
Dostupné vodiče	Žiadne obmedzenie
Zobrazené vodiče	20 000



### 3.1.4 Uživatelské rozhranie Opery 3D

Vstupným dvermi do systému Opera 3D je „Opera Manager“, ktorý zabezpečuje spustenie jednotlivých častí Opery 3D ako „modeller“, „Pre Processor“ a „Post Processor“, ďalej kontroluje licencie a spúšťa analýzy. Tvorí prepojenie medzi jednotlivými časťami Opery 3D.



Obr. 3.1 Prostredie Opera Manager

V Opere 3D sú užívateľovi k dispozícii ako príkazový riadok tak grafické užívateľské rozhranie. V prípade, že sa užívateľ rozhodne používať grafické rozhranie, v príkazovom riadku sa generujú príkazy, ktoré majú rovnakú syntax ako keby sme dané príkazy písali priamo do príkazového riadku pomocou klávesnice. Avšak existuje zopár príkazov, ktoré sa v grafickom rozhraní nedajú previesť a musia sa napísať prostredníctvom klávesnice priamo do príkazového riadku. Text napísaný v príkazovom riadku pozostáva z príkazu, ktorý vykoná danú akciu, spolu s parametrami, ktoré stanovujú ako sa má daná akcia vykonať. Každý príkaz a jeho parametre sa môžu skrátiť na minimálnu jednoznačnú (jasnú) formu. Napríklad príkaz DISPLAY sa dá napísať ako Displa, Displ, Disp, Dis, Di, ale samostatné D nemôžeme použiť, pretože na D začínajú aj iné príkazy a v tom prípade by bol príkaz nejednoznačný. Do príkazového riadku môžeme napísať aj tzv. pomocný znak, ktorým je výkričník (!). V prípade, že výkričník napíšeme na nový riadok, zobrazí sa nám zoznam všetkých príkazov, ktoré môžeme použiť, s krátkym popisom.

```

OPERA > !
Valid commands are:
BHDATA  Define and modify BH data
SOLVE   Create or update an analysis database
READ    Read a file of OPERA-3d pre processor data
END      End OPERA-3d pre processor
:
:

```

V prípade, že výkričník napíšeme za určitý príkaz, tak sa zobrazí popis daného príkazu so zoznamom parametrov s ich aktuálnou hodnotou a popis ich funkcie.

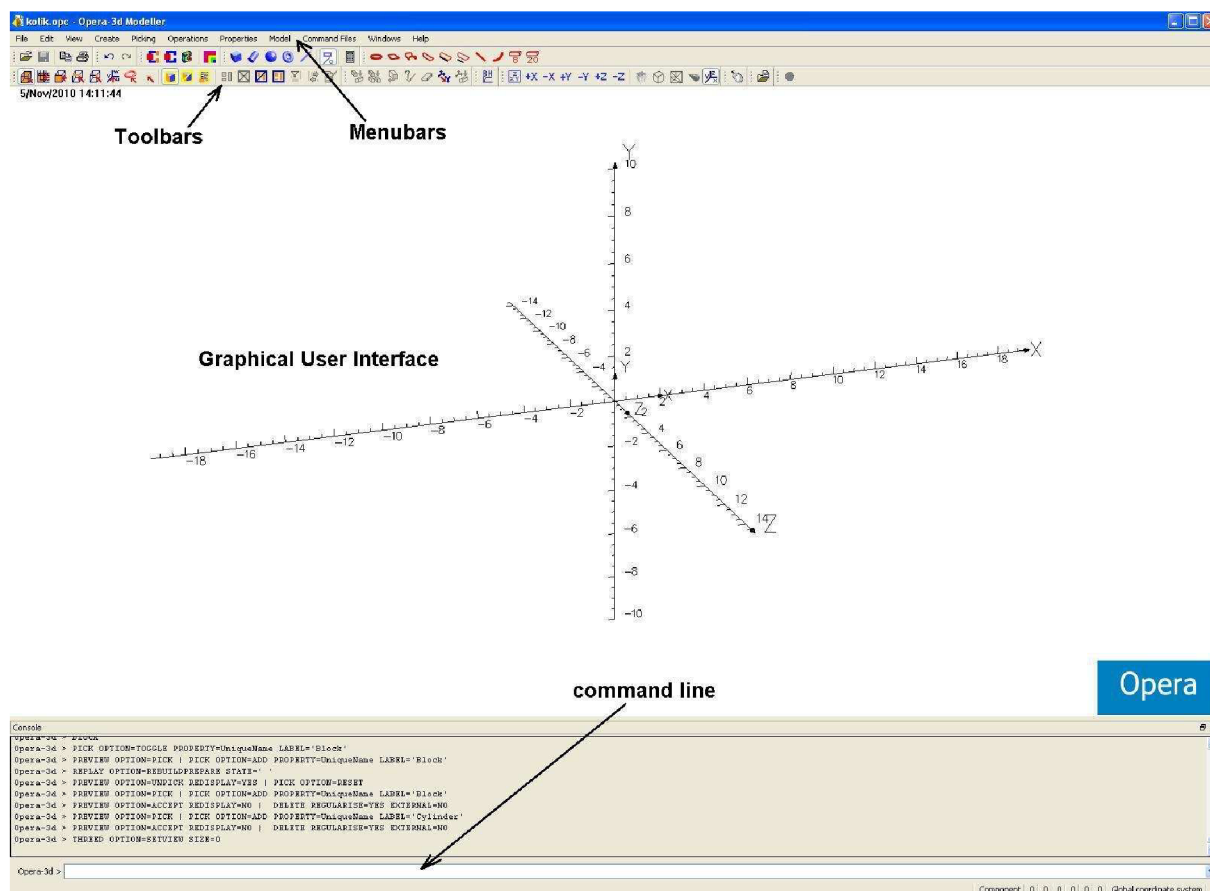
### 3.1.5 Geometrický modelátor Opery 3D

Tento modul slúži v Opere 3D na tvorbu modelov, ktoré ďalej môžu byť spracované v analyzačných moduloch a v post procesore.

Základne objekty, ktorými sú bloky, valce, prstence, gule a ihlany, môžeme vytvoriť kdekoľvek v pracovnom priestore. Ďalej tieto objekty môžeme editovať, upravovať a premiestňovať podľa potreby. K dispozícii sú aj boolovské operácie, pomocou ktorých je možné jednotlivé objekty spájať s inými, vzájomne ich odčítavať (orezávať) alebo prelínať, okrem týchto funkcií existuje v „modelátore“ množstvo iných funkcií, pomocou ktorých máme možnosť vytvárať aj zložitejšie objekty. K dispozícii je taktiež 2D náčrt, nastavenie materiálových vlastností, pripojenie externých obvodov a „meshing“.

„Modelátor“ Opery 3D spolupracuje s CAD systémami a ich súbormi (Pro-Engineer, Catia, STEP, IGES, atď.), z ktorých sa dá model priamo nainportovať a ďalej s ním pracovať. Postup funguje aj opačne, model vytvorený v Opere 3D sa dá nainportovať do CAD systému.

Pri spustení „modelátora“, je užívateľovi dostupné grafické rozhranie v trojrozmernom priestore – s tromi osami. V hornej časti prostredia sú k dispozícii „Toolbar“, s najpoužívanejšími príkazovými tlačítkami, a „Menubar“, s rozvíjacím menu, v ktorom sú obsiahnuté všetky príkazy a možnosti „modelátora“. V dolnej časti prostredia sa nachádza príkazový riadok, ktorý je možné vypnúť pomocou nastavení v „Menubar“ v položke „Windows“.

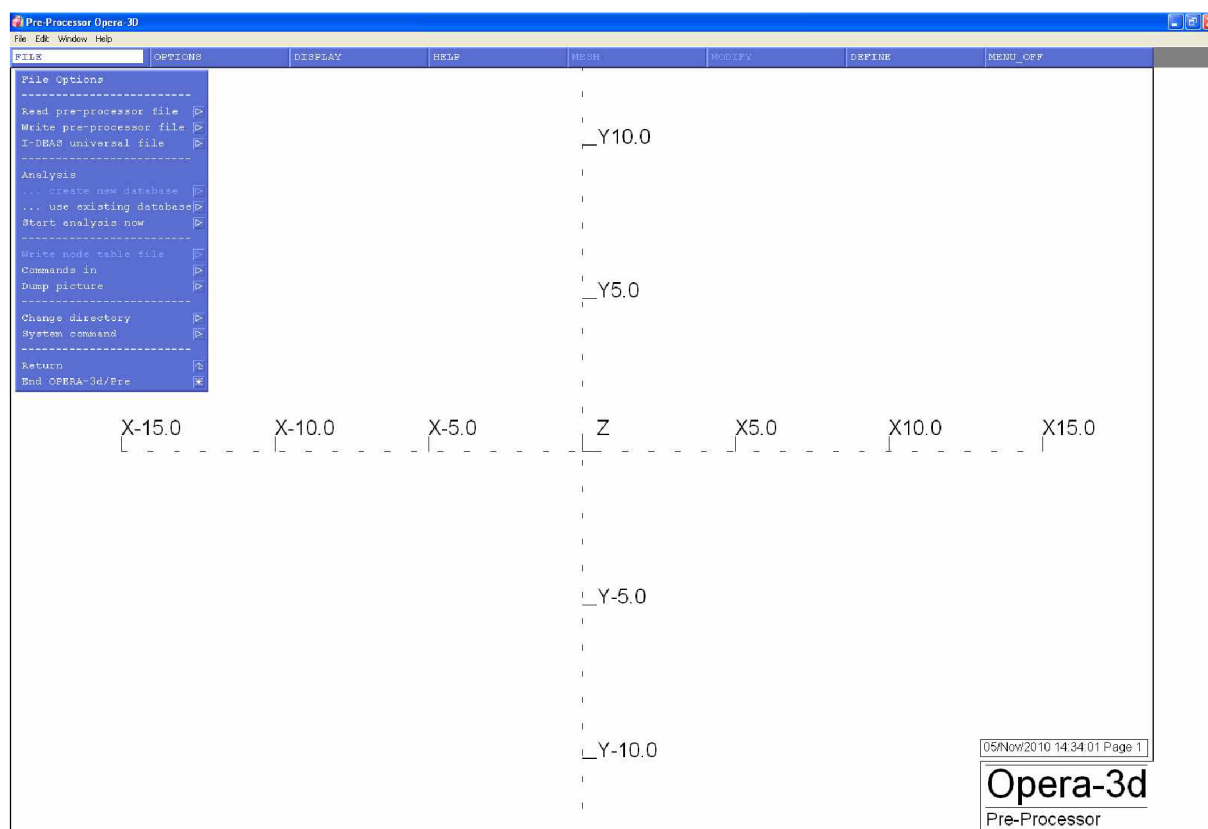


Obr. 3.2 Prostredie Modeler Opere 3D

### 3.1.6 Pre processor Opery 3D

„Pre processor“ Opery 3D slúži k príprave dát, určených pre analýzu elektromagnetických polí, tak, aby bolo možné previesť túto analýzu pomocou analyzačných programov.

„Pre processor“ je interaktívny program určený k tvorbe a úprave trojrozmerných modelov pozostávajúcich z konečného počtu prvkov, k definícií charakteristík použitých materiálov, k zadávaní okrajových podmienok, k presnému určeniu zložitých geometrií vodičov s predpisom budenia a vytvoríť výstupy vo formáte, ktorý akceptujú analyzačné programy. Program poskytuje aj možnosť pripojenia externých obvodov, zdrojov a systémových simulátorov.





Obr. 3.3 Prostredie Pre processor Opera 3D

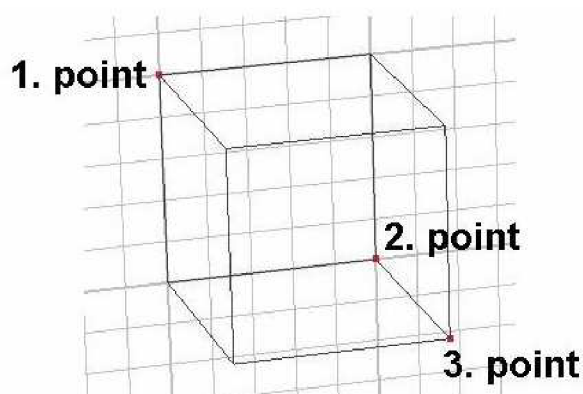
### 3.1.7 Post processor Opery 3D

„Post processor“ Opery 3D je určený k 3D zobrazovaniu a uskutočňovaniu následných výpočtov s výsledkami programov, ktoré previedli analýzu elektromagnetického poľa, ako Carmen, Elektra, Scala, Soprano, Tempo a Tosca. Poskytuje možnosť prezerat' data konečných prvkov, spracovávať a zobrazovať výsledky pozdĺž krivky a v dvojrozmernej oblasti, zobrazovanie grafov, priebehov a máp. Pomocou „Post processoru“ je taktiež možné počítať rôzne fyzikálne veličiny analyzovanej oblasti ako silu, moment, energiu, atd. . Grafické prostredie je podobné ako v „modelatore“ , samozrejme s inými nástrojmi.

### 3.1.8 Postup práce v Opera 3D

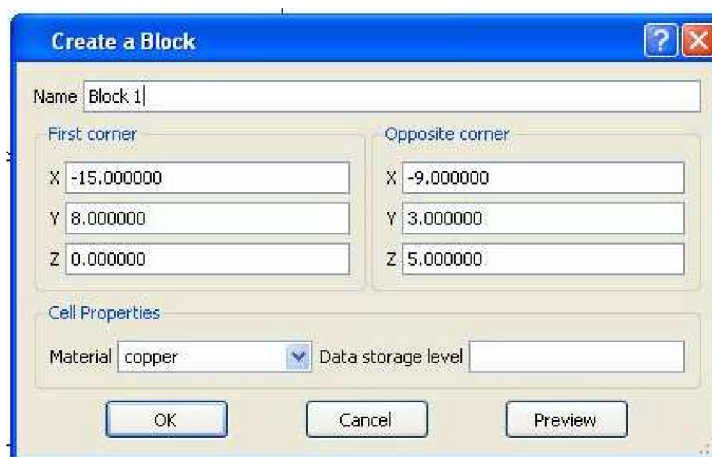
#### 1) Vytvorenie modelov v prostredí Modeler

V prípade, že chceme zadávať súradnice telesa za pomoci myši musíme vybrať z ponuky „Toolbar“ nástroj „Sketching activ“  a následne objekt, ktorý chceme vytvoriť napríklad „Block“ . V prípade, že by sme nemali zapnutý nástroj „Sketching activ“ zadávali by sme súradnice objektu pomocou klávesnice priamo do editačného okna daného objektu. Teraz môžeme pomocou myši zadať tri body v priestore tak, aby prvý a druhý bod v poradí boli uhlopriečne body v rovine a tretí bod určoval vysunutie do priestoru. Bod sa zadáva dvoj kliknutím ľavého tlačítka myši.



Obr. 3.4 Kreslenie bloku v Opera 3D

Po vykonaní danej postupnosti sa objaví okno „Create a block“ (editačné okno), kde môžeme zadať meno objektu, upraviť jeho určujúce body (súradnice), a určiť materiál.



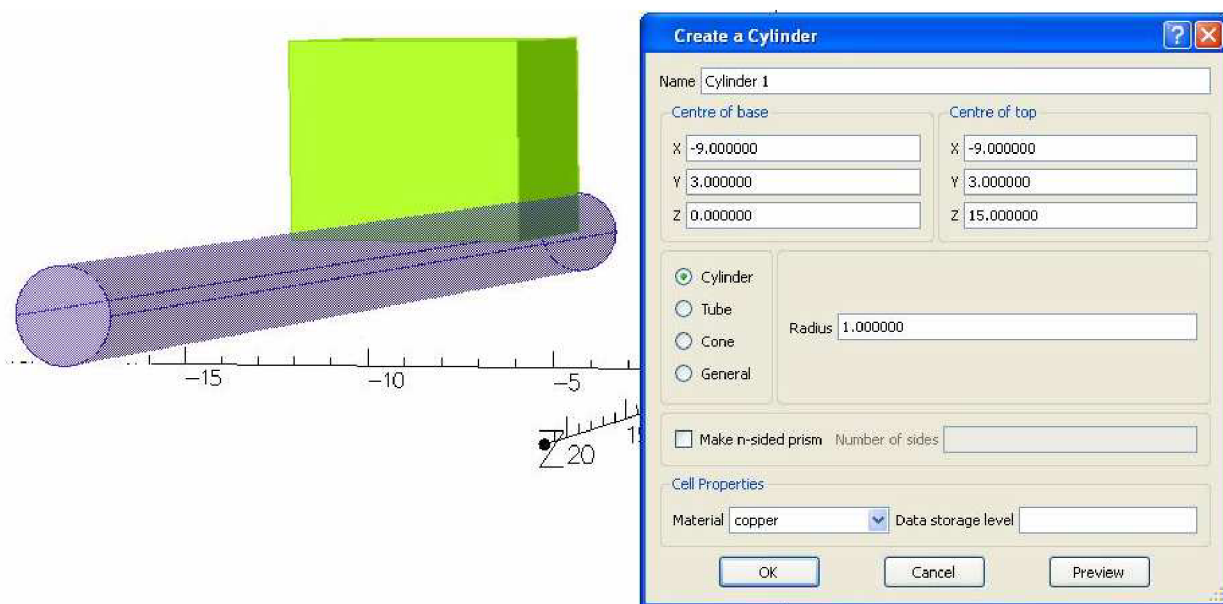
Obr. 3.5 Editáčn  okno bloku v Opera 3D

Teraz máme k dispozícii prvý objekt, ktorý je možné ďalej editovať za pomoci pravého tlačítka myši. Systém rozlišuje, ktorá časť objektu je vybraná (celý objekt, stena, hrana) a podľa toho je po stlačení pravého tlačítka myši k dispozícii aj ponuka možnosti.

Body	Cell	Face	Edge
<ul style="list-style-type: none"> <li>Transform...</li> <li>Copy...</li> <li>Morphing ▶</li> <li>Cover</li> <li>Rebuild...</li> <li>Delete... Del</li> <li>Check...</li> <li>Cell Properties...</li> <li>List Properties</li> <li>Default selection</li> <li>Selection...</li> <li>Set View...</li> <li>Views ▶</li> <li>Picking ▶</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Copy...</li> <li>Delete... Del</li> <li>Cell Properties...</li> <li>List Properties</li> <li>Default selection</li> <li>Selection...</li> <li>Set View...</li> <li>Views ▶</li> <li>Picking ▶</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transform...</li> <li>Copy...</li> <li>Sweep Face...</li> <li>Offset...</li> <li>Shell...</li> <li>Move WCS</li> <li>Delete... Del</li> <li>Face Properties...</li> <li>List Properties</li> <li>Default selection</li> <li>Selection...</li> <li>Set View...</li> <li>Views ▶</li> <li>Picking ▶</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Copy...</li> <li>Blend or Chamfer...</li> <li>Cover</li> <li>Move WCS</li> <li>Delete... Del</li> <li>Edge Properties...</li> <li>List Properties</li> <li>Default selection</li> <li>Selection...</li> <li>Set View...</li> <li>Views ▶</li> <li>Picking ▶</li> </ul>

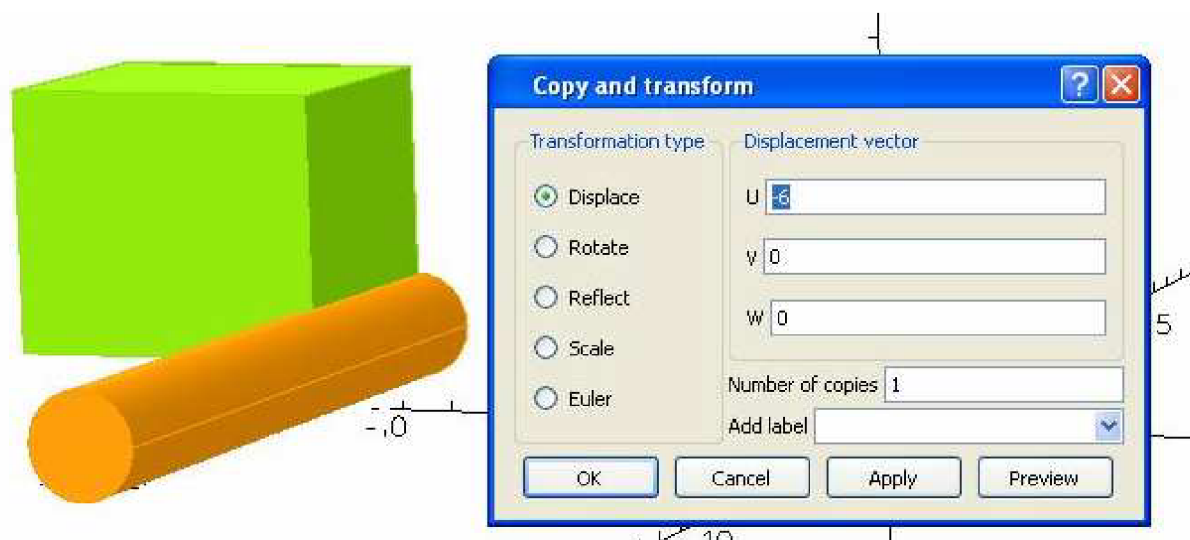
Obr. 3.6 Editáčné možnosti rôznych entít v Opera 3D

V následnom kroku vytvorím ďalšie teleso - valec (cylinder 1) tak aby bolo možné previesť boolovské operácie.




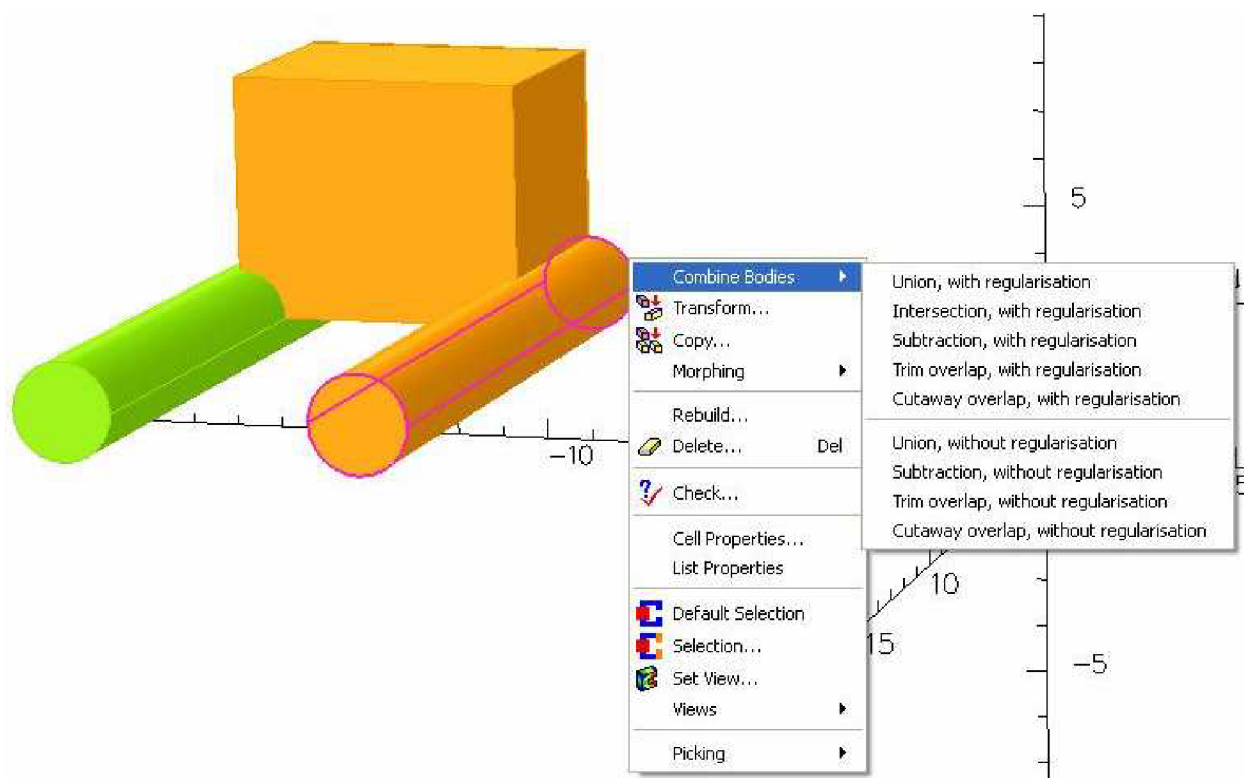
Obr. 3.7 Tvorba objektu valec a jeho editácia v Opera 3D

Máme vytvorené dva objekty, využitím kopírovania vytvorím ďalší valec, ktorý pomenujem cylinder 2. Teraz máme tri telesa, medzi ktorými môžeme previesť boolovské operácie.




Obr. 3.8 Kopírovanie objektu valec v Opera 3D




Vyberieme, ako „Body“ , napríklad block 1 a cylinder 1, a prevedieme ich spojenie do jedného objektu pomocou príkazu „Union“, ktorý sa bude volať Block 1. Následne vyberiem objekt Block 1 a cylinder 2 a prevediem „Subtraction“. Čím sme dospeli opäť k jedinému telesu s komplikovanejšou geometriou.



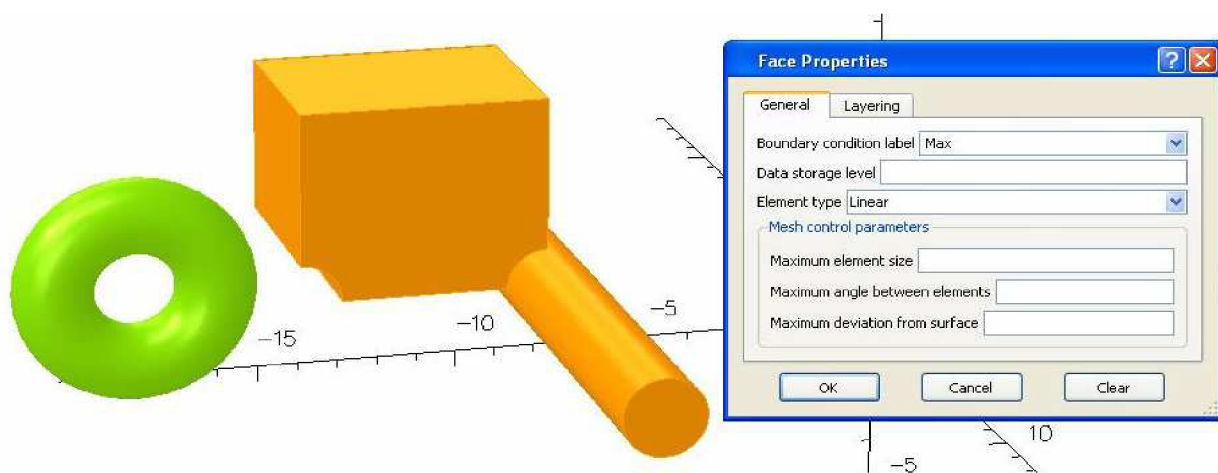
Obr. 3.9 Boolovské operácie v Opera 3D

Podľa predchádzajúceho postupu a príkazu  vytvorím ďalšie teleso Torus 1. V tomto okamžiku máme vytvorené objekty, ktoré chceme analyzovať. Nasleduje priradenie vlastností a okrajových podmienok .

Chceme na Block 1 priradiť potenciál a to následne:

označíme všetky jeho strany (faces) a to tak, že objekt vyberieme ako „Body“ , stlačíme nástroj na vybraní strán  – tým dosiahneme vybraní všetkých strán daného objektu. Dôležité je ale previesť ešte túto zmenu pomocou „Change type of picked entities“ , po čom program už teleso nerozpoznáva ako jedno teleso ale ako sústavu strán..

Teraz môžeme pravým tlačítkom myši editovať vlastnosti strán – „Face properties“, kde zadáme názov pre okrajovú podmienku napríklad Max, ďalej tu môžeme editovať „mesh control parameters“ pre daný objekt, a to v prípade, že by sme prikladali tejto časti modelu zvláštnu pozornosť pri analýze, môžeme nastaviť menšiu veľkosť konečných prvkov, ktoré budú vytvorené v danej oblasti a tým bude výpočet v tejto oblasti presnejší.

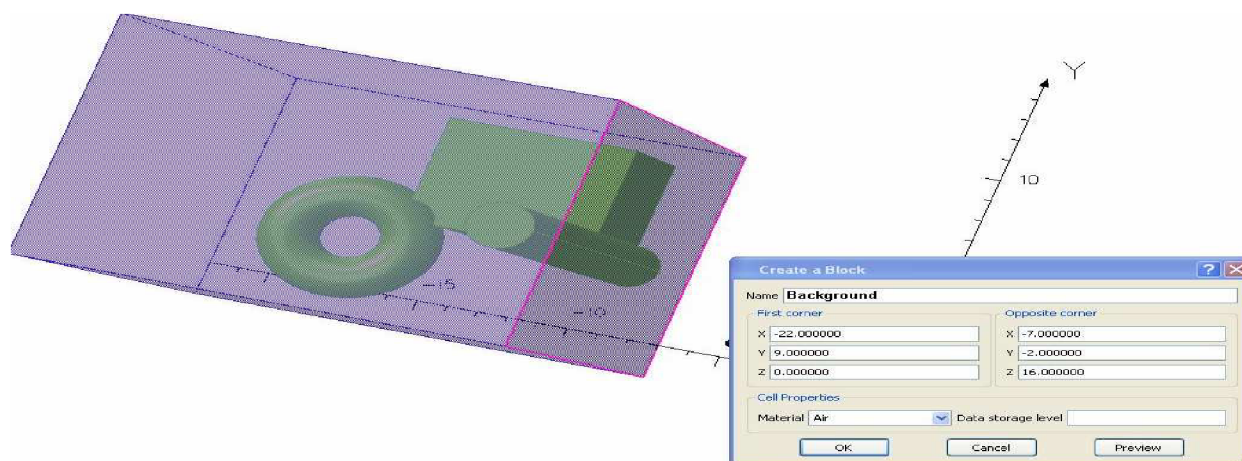


Obr. 3.10 Vlastnosti strán objektu v Opera 3D

To iste prevediem pre druhý objekt torus 1, a priradíme mu podmienku Min.

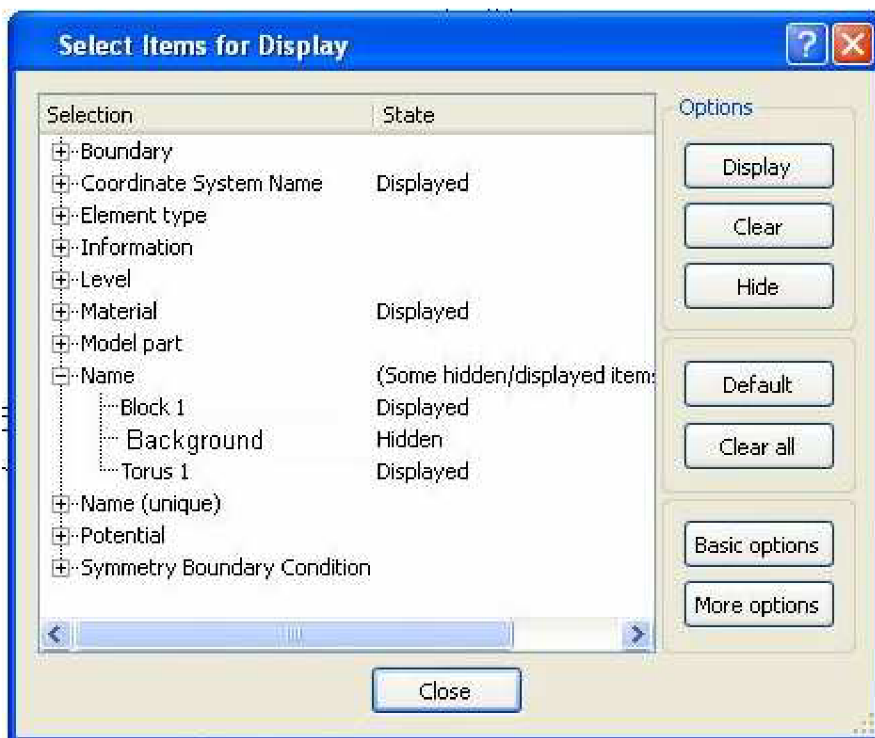
## 2) Vytvorenie okolia

Okolité prostredie vytvoríme pomocou ďalšieho telesa s názvom Background, ktoré bude naše dva objekty obklopovať, a jeho materiál bude vzduch. Ďalšou možnosťou vytvorenia okolia je príkaz „BACKGROUND“ v záložke „Model - Model symmetry“.



Obr. 3.11 Vytvorenie okolia v Opera 3

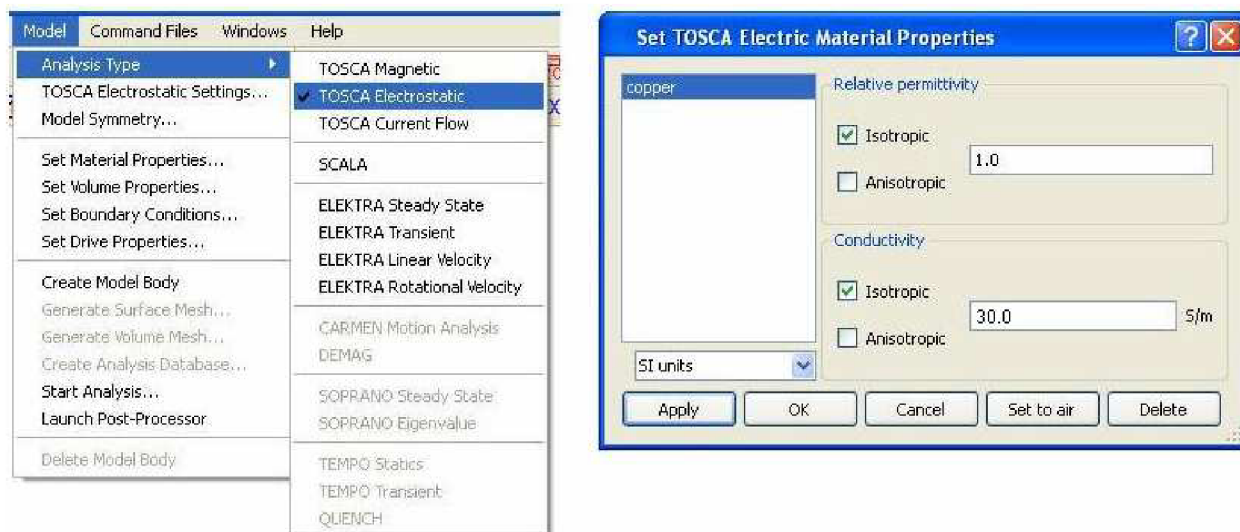
Objekty môžeme zneviditeľniť pomocou „View – Selection“, kde nájdeme položku „Name“, v ktorej sú obsiahnuté všetky vytvorené objekty, vyberieme napríklad objekt Background (okolie) a dáme „Hide“.



Obr. 3.12 Zneviditeľňovanie vytvorených objektov v Opera 3D

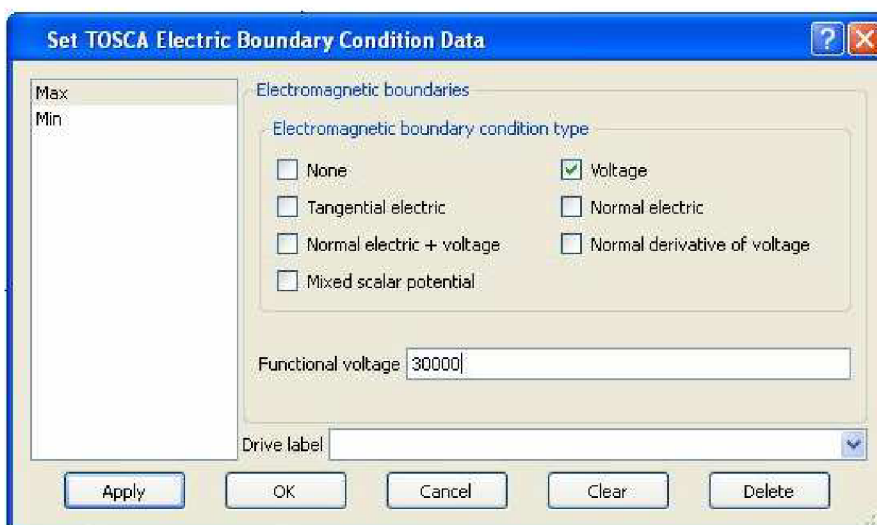
### 3) Výber a nastavenie analýzy, definovanie materiálov a okrajových podmienok

V ďalšom kroku vyberieme typ analýzy, ktorú chceme previesť, a nastavíme materiály a okrajové podmienky. („set material properties“, „set boundary conditions“). Všetky tieto možnosti nájdeme v záložke „Model“ v Menubar.



Obr. 3.13 Nastavenie analýzy a definovanie materiálov v Opera 3D



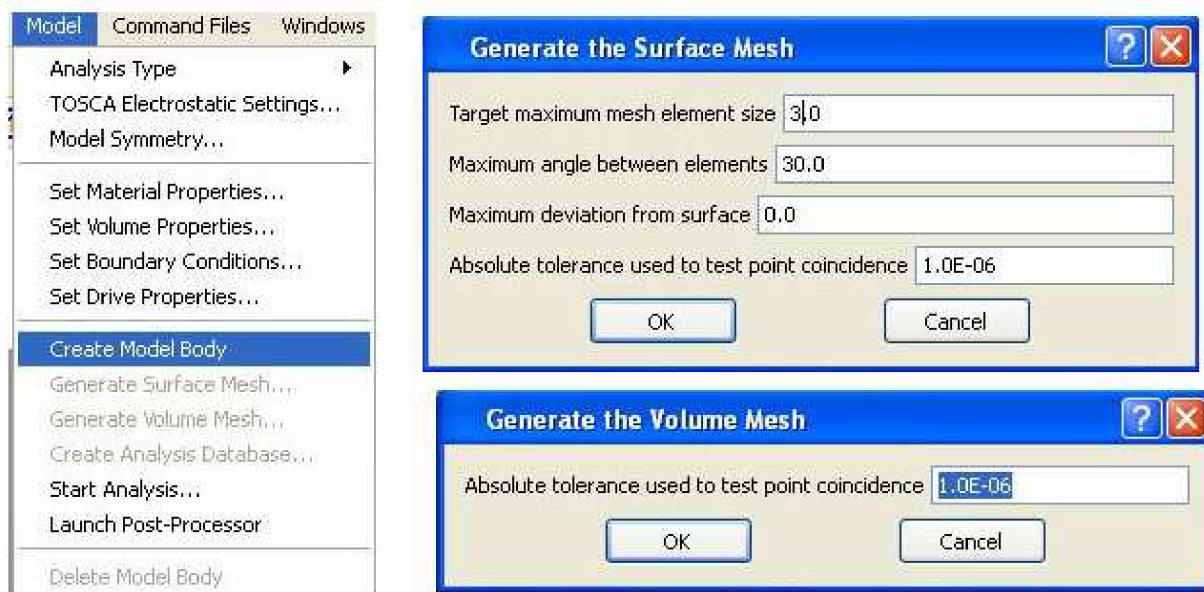


Obr. 3.14 Priradenie napätia v Opera 3D

Ako vidieť materiály a podmienky, ktoré sme zadávali objektom, boli v skutočnosti doteraz iba názvy, ktorým bolo nutné priradiť skutočné vlastnosti pomocou „set material properties“ a „set boundary conditions“. V materiáloch vidíme iba materiál s názvom cooper, pretože materiál air je, ako jediný materiál v opere 3D, preddefinovaný a iný materiál sme v objektoch nevyužili.

V okrajových podmienkach nastavíme pre Max a Min napätia (Voltage) a to následne: Max 30000V a Min 100V.

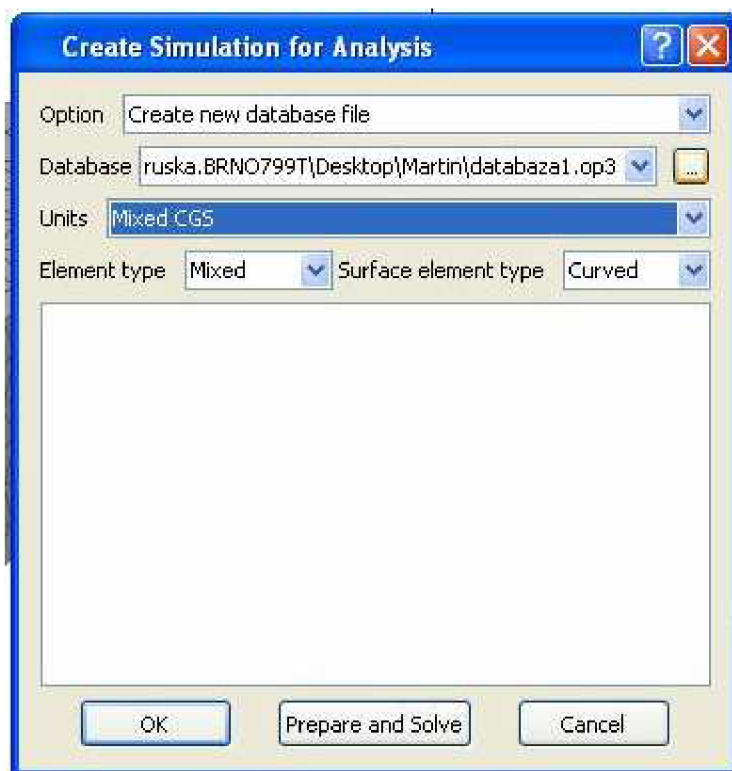
Teraz môžeme vytvoriť tzv. telo pre analýzu pomocou „Create Body“.



Obr. 3.15 Tvorba tela pre analýzu a nastavenie sieťovania v Opera 3D

Ako už bolo spomenuté Opera 3D pracuje s metódou konečných prvkov a preto je v nasledujúcom kroku potrebné vytvoriť sieť konečných prvkov pomocou „Surface mesh“ a „Volume mesh“ (v záložke „Model“) a zadať vlastnosti ako veľkosť elementov, tolerancie, atd. Tieto nastavenia sa nevzťahujú na prípadne oblasti, pri ktorých už bolo zadefinované toto nastavenie pomocou „Cell properties“, napríklad pri oblastiach, ktoré nás zaujímajú pri analýze viac, ako už bolo spomenuté.

Po prevedení meshovania (rozdelenia na konečné prvky) môžeme vytvoriť databázu pre analýzu (v záložke „Model“) a spustiť samotnú analýzu pomocou „Prepare and solve“. Pri tvorbe analýzy je potrebné vybrať jednotky, v ktorých bol model kreslený napr. milimetre, a to tak, že v rozvíjacom okne „Units“ vyberieme požadovaný jednotkový systém. Ďalej je dôležité zadať názov a cestu databázy.



Obr. 3.16 Tvorba a nastavenie databázy pre analýzu v Opera 3D

Následne sa nám vytvorí databáza a prebehne analýza, v Opera manager sa ukáže priebeh analýzy a výsledok si môžeme prezrieť pomocou post processora (tlačítko: „post process“).

```

Loading model description           complete 00:00:00.17 (00:00:00.01 cp)
Checking periodicity transformations
Preparing data                       complete 00:00:00.15 (00:00:00.10 cp)
Model size information
-----
Number of elements   : 4036
Number of nodes     : 2969
Number of equations  : 1133
Number of non-zeros  : 8300
Forming Matrix Sparsity           complete 00:00:00.04 (00:00:00.03 cp)
Solving linear solution
Generating matrix                 complete 00:00:00.06 (00:00:00.03 cp)
DSLUCG iterations: 26, Relative change=5.86378681119183E-09
Iterative matrix solution         complete 00:00:00.01 (00:00:00.00 cp)

Calculating nodal fields           started
Generating nodal E fields         complete 00:00:00.04 (00:00:00.04 cp)
Enforcing E fields on boundaries  complete 00:00:00.03 (00:00:00.03 cp)
Adjusting midside nodal values    complete 00:00:00.04 (00:00:00.04 cp)
Generating nodal D fields         complete 00:00:00.03 (00:00:00.03 cp)
Estimated error in D Field: RMS = 17.88751%, Weighted RMS = 13.74699%
Calculating error estimate        complete 00:00:00.06 (00:00:00.06 cp)
Calculating nodal fields         complete 00:00:00.21 (00:00:00.21 cp)
Simulation 1                      complete at 11:39:26
                                00:00:00.67 (00:00:00.40 cp)

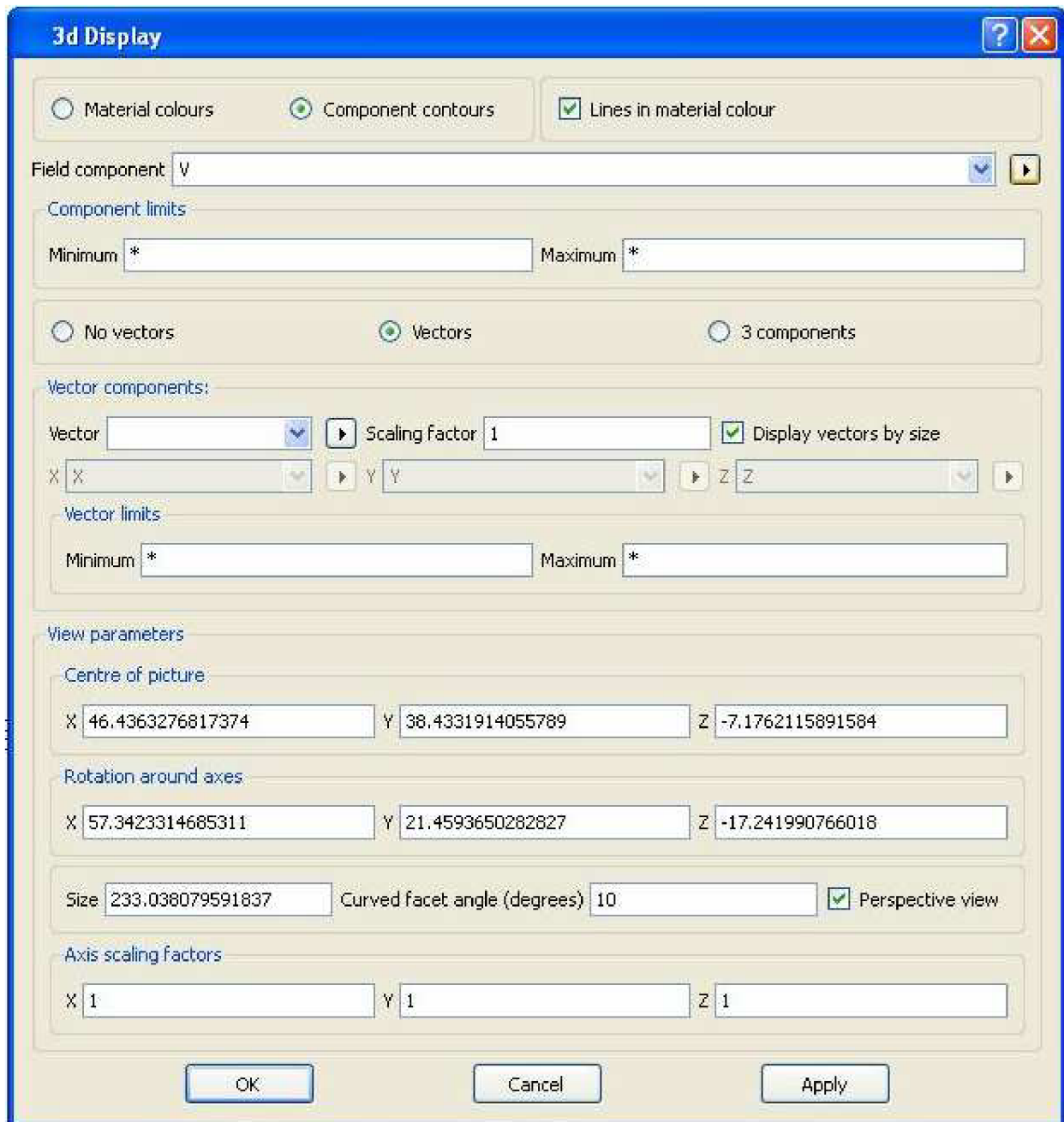
-----
| Opera-3d Analysis version 13.039           complete on 09/Nov/2010 at 11:39:26 |
|                                           00:00:02.29 (00:00:00.78 cp) |
|-----|

```

Obr. 3.17 Výpis databázy a priebehu výpočtu v Opera 3D

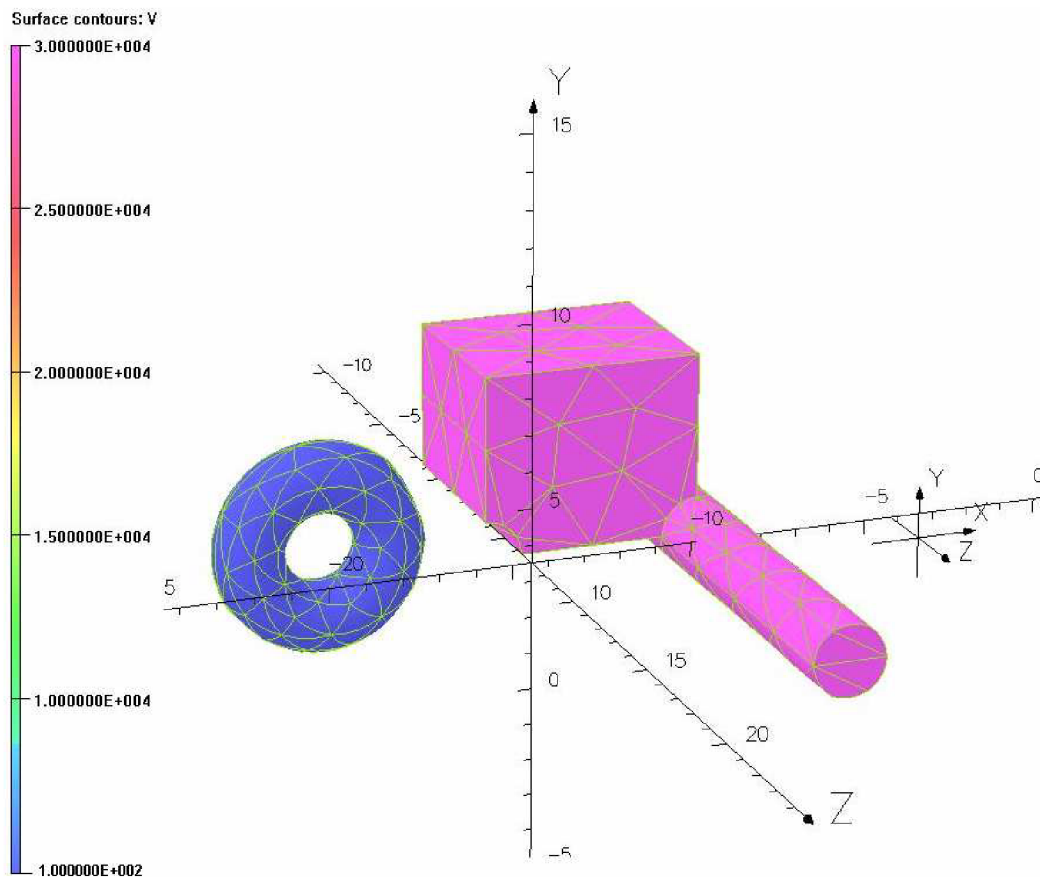
#### 4) Post processor

Post processor je prostredie, v ktorom môžeme prehliadať grafické výsledky analýzy. Pre zobrazenie celého modelu aj s vypočítanými veličinami (potenciál, intenzita) použijeme možnosť View 3D display v záložke View a zadáme čo a ako chceme zobrazit'. Mame možnosť vykresliť aj vektory pri vektorovej veličine ako napríklad intenzita.




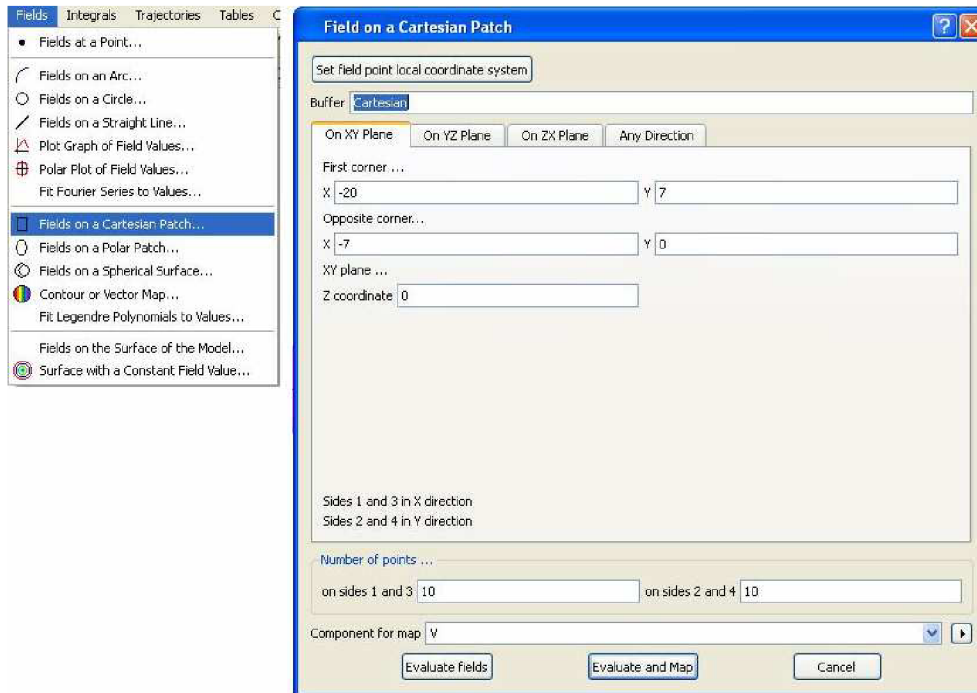
Obr. 3.18 Nastavenie poľa v prostredí Post processor v Opera 3D

Vyberieme napríklad priebeh potenciálu  $V$ .

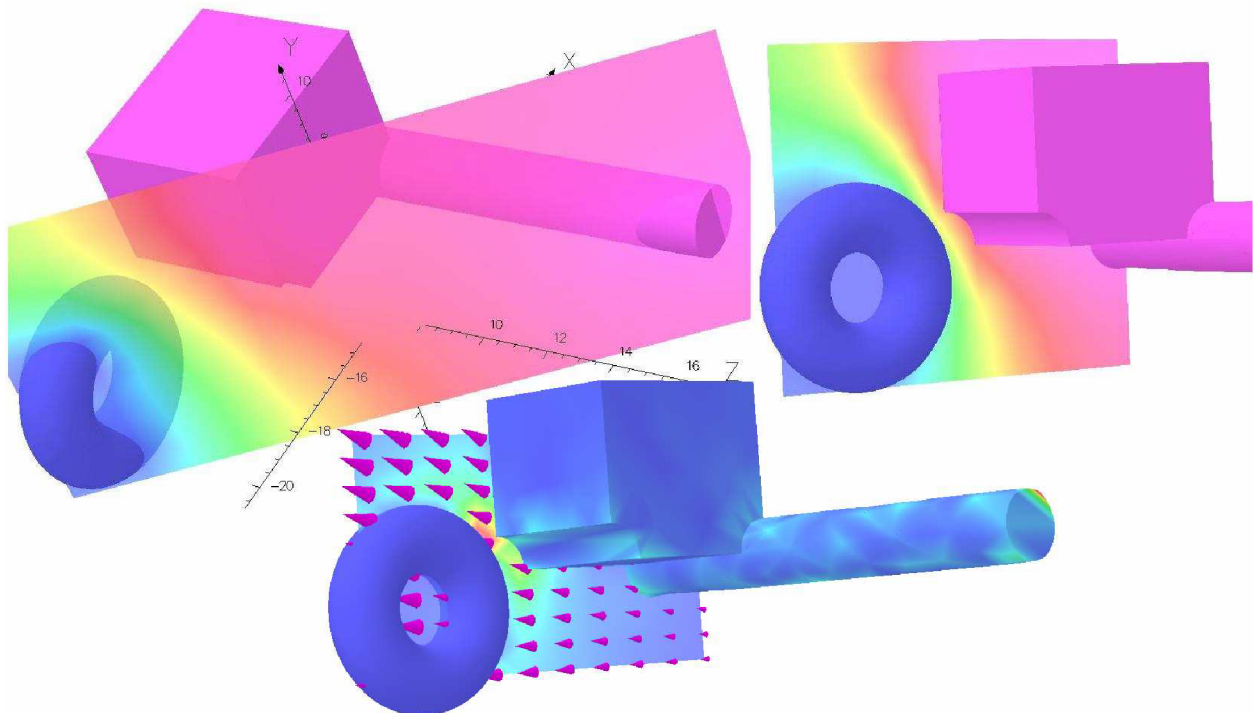


Obr. 3.19 Zobrazenie potenciálu častí modelu v Post processor Opera 3D

Ak chceme vykresliť priebeh v určitej rovine rezu, musíme vytvoriť pole, pomocou záložky „Fields“ v Menubar napríklad „fields on a cartesian path“. Môžeme vytvoriť viacej polí a prepínať medzi nimi pomocou „contour or vector map“ . V každom poli volíme čo chceme vykresliť popríklad môžeme pridať vektory. Vytváranie týchto polí je zložité, pretože užívateľ musí vedieť presne súradnice a umiestnenie oblasti, ktorú chce vykresliť. V prípade, že užívateľ zadá súradnice mimo analyzovanú oblasť (mimo BACKGROUND okolia), ktorú v prostredí Post processor nevidieť, systém vyhlási chybu a pole sa nezobrazí.



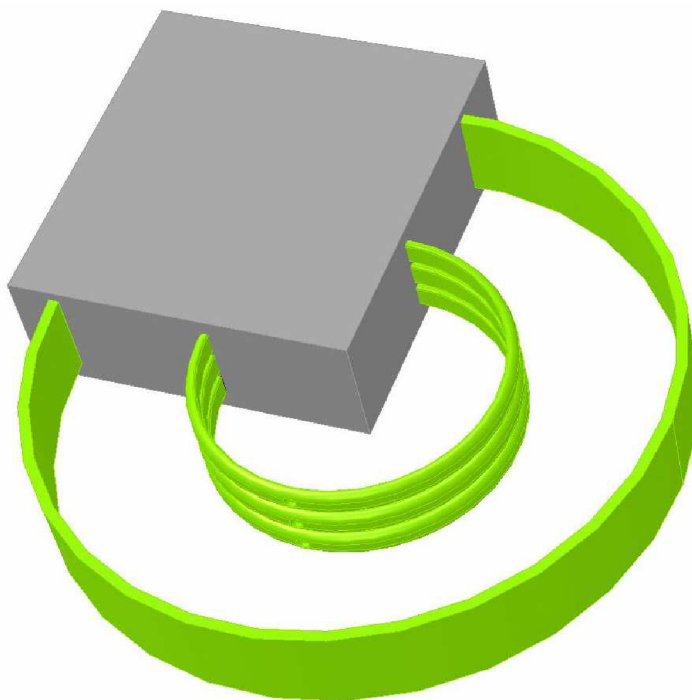
Obr. 3.20 Vytvorenie 2D rezu poľa v Opera 3D



Obr. 3.21 Zobrazenie reзов потенциálu a интенсивы электрического поля в Opera 3D

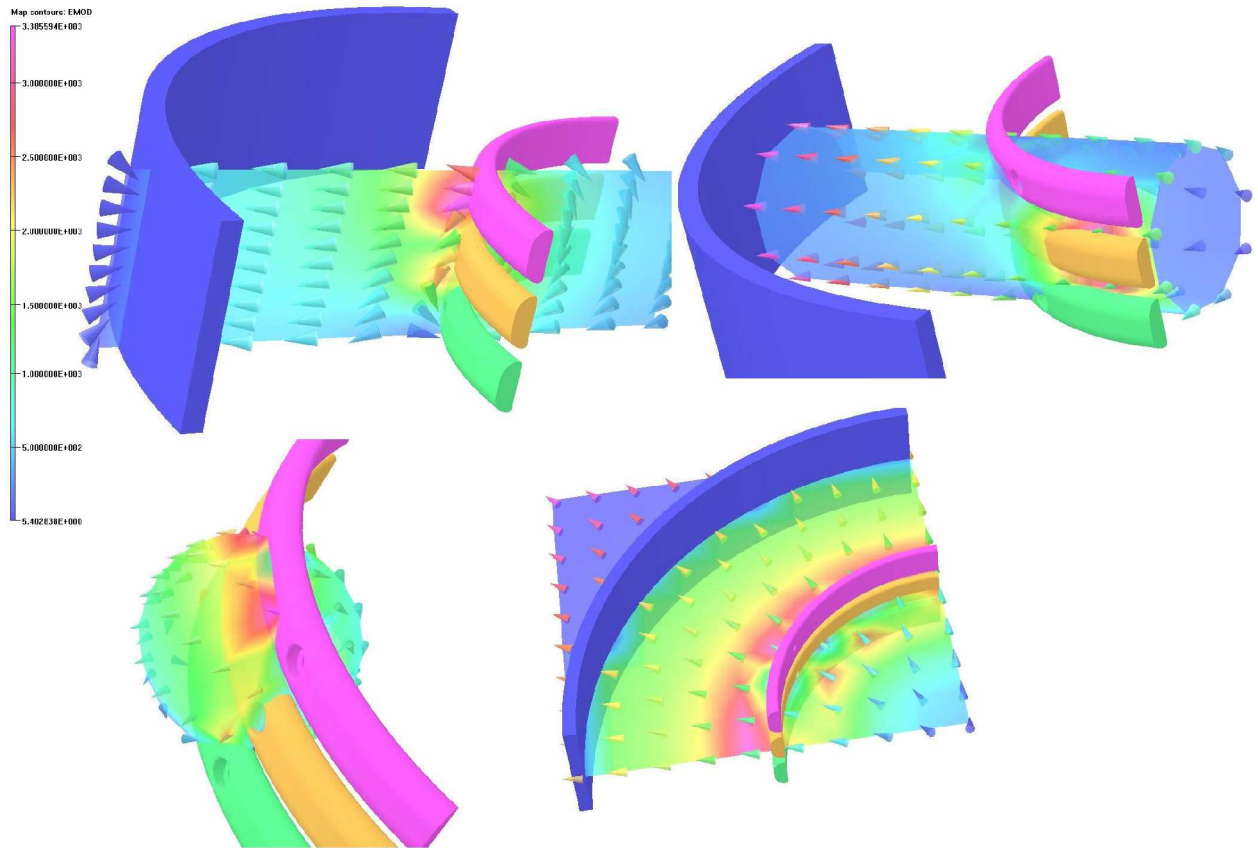
### 3.1.9 Importovanie modelov a práca s importovanými modelmi

Najjednoduchšia cesta ako naimportovať objekt do prostredia modeler Opery 3D je pomocou príkazu „open“ v záložke „file“. Najvhodnejší formát importovaného modelu je STP formát. Po naimportovaní objektu je potrebné previesť kontrolu a opravu geometrie modelu pomocou nástroja „check“, ktorý je prístupný po kliknutí pravým tlačítko na daný model. Tento nástroj odstráni v prevažnej väčšine všetky chyby v geometrii, ktoré vznikli importom modelu do prostredia Opera 3D. Po tomto kroku je možné pracovať s modelom ako s modelom vytvorením v prostredí Modeler Opery 3D. Ak je model zložitý a osovo súmerný môžeme analyzovať iba časť tohto modelu, aby sme ušetrili čas a znížili nároky na výkon počítača. V mnoho prípadoch je to jediná šanca ako previesť analýzu zložitejšieho objektu v Opere 3D, pretože ak by sme nechali analyzovať celý objekt, ktorý by sa mal rozdeliť na veľký počet konečných prvkov, je veľká pravdepodobnosť, že výpočet vyhlási chybu a program skolabuje. Časť objektu, ktorú chceme analyzovať vyberiem pomocou okolia Background, tak aby Background obklopoval iba potrebnú časť objektu.

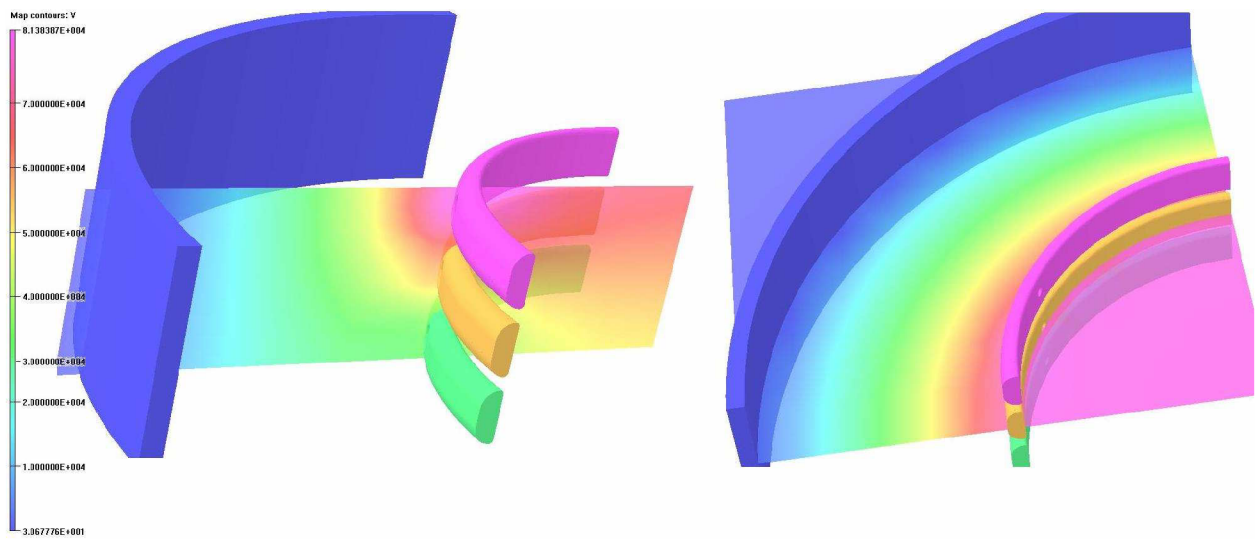


Obr. 3.22 Vytvorenie okolia aby bola analyzovaná iba  $\frac{1}{4}$  modelu v Opera 3D

Následné kroky zadávania materiálov, okrajových podmienok a tvorby databázy sú rovnaké ako bolo spomenuté.



Obr. 3.23 Vykreslenia priebehu intenzity elektrostatického poľa v Opera 3D



Obr. 3.24 Vykreslenie rozloženia potenciálu v rôznych rovinách v Opera 3D



## 3.2 Maxwell 2D a 3D

### 3.2.1 Maxwell obecně

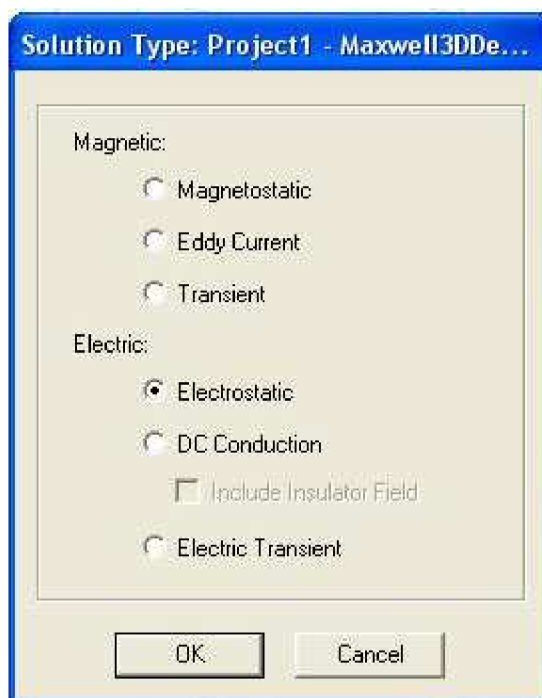
Maxwell je program, který je určený na simulaci elektromagnetických polí. Používá se na návrhy a analýzu elektromagnetických a elektromechanických zařízení v dvojrozměrném a trojrozměrném prostoru. K řešení trojrozměrných elektromagnetických a elektrických polí využívá metodu konečných prvků.

Maxwell má plně automatizovaný průběh řešení polí, který se postará o nejvhodnější a nejefektivnější cestu řešení zadaného problému, od uživatele se vyžaduje iba zadání geometrických a materiálových vlastností modelu a požadovaného výstupu.

Pro výpočet tepelné analýzy a analýzy vnitřního pnutí je možné připojit Maxwell s Ansys Mechanical v prostředí Workbench.

Maxwell podporuje 6 typů řešení:

- 1) Elektrostatické polia
- 2) Magnetostatické polia
- 3) Řešení vířivých proudů
- 4) Transientné magnetické polia
- 5) Transientné elektrické polia
- 6) Elektrické vodivostné polia



Obr. 3.25 Typy podporovaných analýz v prostředí Maxwell

### 3.2.2 Uživatelské rozhranie

Všetky možnosti Maxwellu sú prístupné prostredníctvom hlavného užívateľského rozhrania. Program umožňuje prispôsobenie prostredia tak, aby spĺňovalo požiadavky užívateľa.

Prostredie Maxwellu 3D pozostáva z :

The menubar – tu sú umiestnené všetky príkazy a možnosti Maxwellu

The toolbar – obsahuje grafické symboly najpoužívanejších príkazov

The 3D modeler window – zobrazuje výsledok modelačných operácií – model

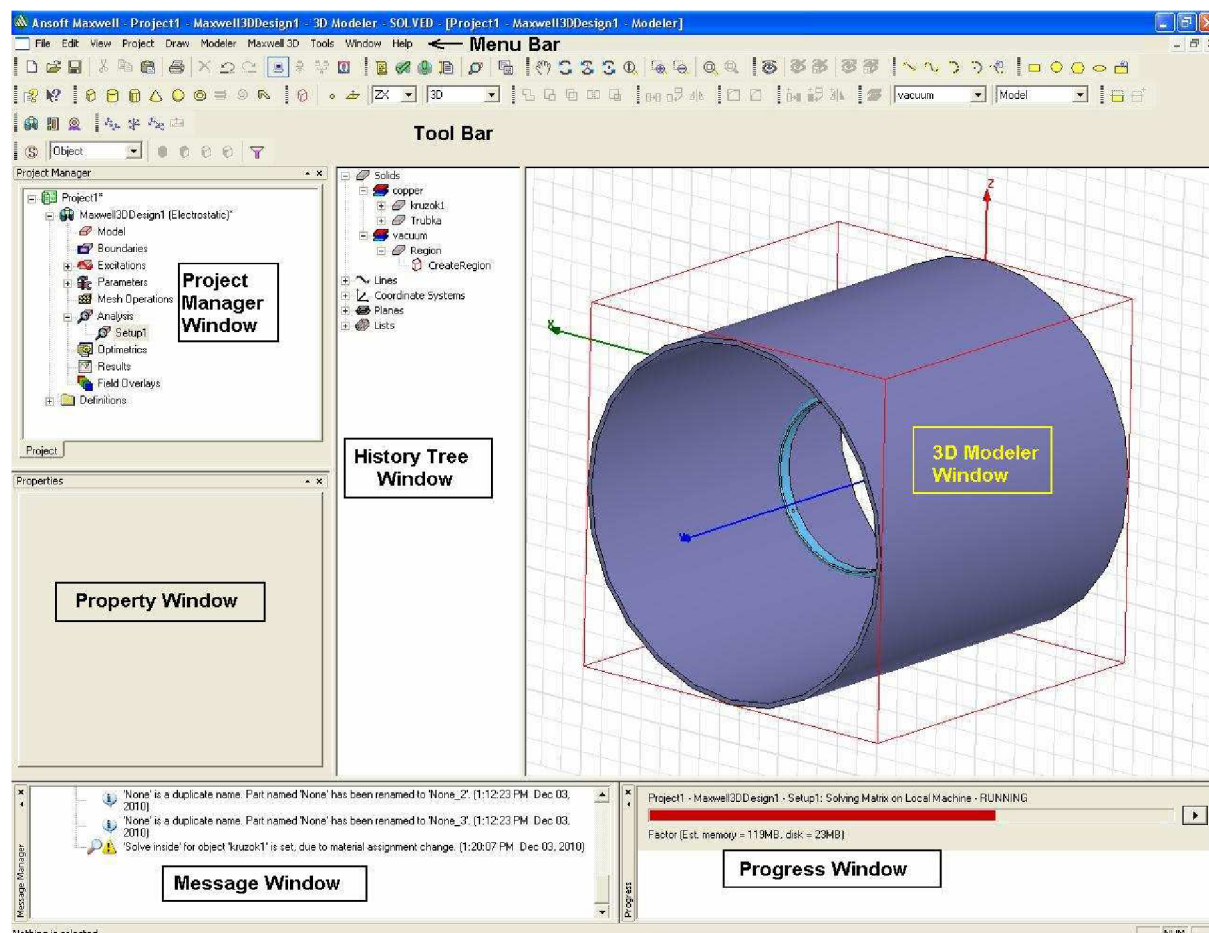
The history tree window – zahŕňa výpis všetkých prevedených modelačných operácií a definícií s možnosťou úprav

The property window – zobrazuje vlastnosti vybraných objektov alebo parametre príkazov

The projekt manager – obsahuje možnosti hlavných nastavení, či už vo fáze modelovania alebo analýzy

The message window – zobrazuje informácie, varovania a chyby

The progress window – ukazuje postup v aktuálnom procese riešenia



Obr. 3.26 Prostredie Maxwell 3D

---

To čo program vyžaduje od užívateľa je zhrnuté v následných bodoch:

- 1) vybranie typu elektromagnetickej analýzy, ktorú chce užívateľ previesť
- 2) nakreslenie geometrie modelu využitým modelačným nástrojov, poprípade importovanie modelu
- 3) zadanie materiálových vlastností všetkým objektom modelu, poprípade zadefinovať materiálové vlastnosti materiálom, ktoré nie sú obsiahnuté v knižnici materiálov
- 4) špecifikácia zdrojov polí a okrajových podmienok pre dané riešenie  
definovanie prídavných parametrov, ktoré majú byť počítané (ako sila, moment, kapacita, indukčnosť, atd.)
- 5) určenie prípadnej oblasti zvýšeného záujmu, a zadefinovanie sieťovania v danej oblasti
- 6) nastavenie vlastnosti riešenia
- 7) spustenie procesu riešenia
- 8) po skončení výpočtu, využitie post processingu, ako napríklad vykreslenie grafov, atď

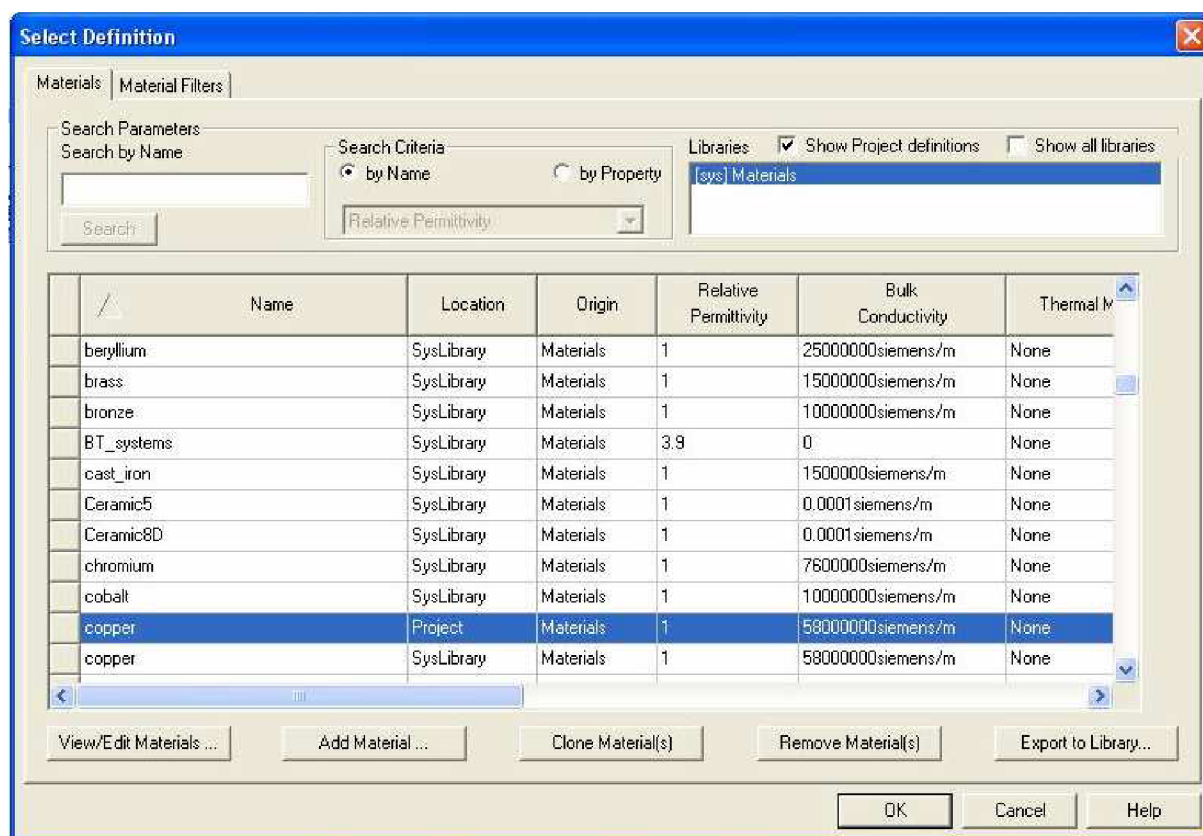
Maxwell 3D prevádza analýzy problémov elektromagnetických polí riešením Maxwellových rovníc v konečnej oblasti s vhodnými okrajovými a počiatocnými podmienkami, ktoré sú zadefinované užívateľom. Geometria modelu je rozložená automaticky na konečný počet tetrahedronových prvkov pri 3D a trojuholníkov pri 2D modeloch, prostredníctvom nástroja pre tvorbu prvkovej siete. Presnosť výpočtu závisí od veľkosti a počtu prvkov. Riešenie založené na väčšom počte prvkov s menšou veľkosťou sa vyznačuje väčšou presnosťou výpočtu ale analýza prebieha dlhšie a je zložitejšia, preto je úlohou automatickej tvorby siete prvkov, vytvoriť sieť, ktorá splňuje požiadavky na presnosť danej analýzy, ale súčasne zbytočne nezaťažuje počítač a nezaberá priveľa času. Maxwell dokáže rozoznať oblasti, v ktorých „sa niečo deje“, a tam zväčšuje počet konečných prvkov. V ostatných oblastiach počet a veľkosť prvkov už nemení, čím zbytočne nezaťažuje počítač s výpočtami v nepotrebných oblastiach modelu.

### 3.2.3 Modeler

Maxwell poskytuje užívateľovi plnohodnotné prostredie, v ktorom je možné vytvoriť ako 2D tak 3D modely veľmi podobne ako v CAD systémoch. Obsahuje všetky možnosti tvorby modelov od základných objektov ako kváder, guľa, prstenc, atď až po najzložitejšie editačné funkcie, ktoré je možné na tieto objekty uplatniť, a vytvoriť skutočné zložité modely priamo v prostredí Maxwell.

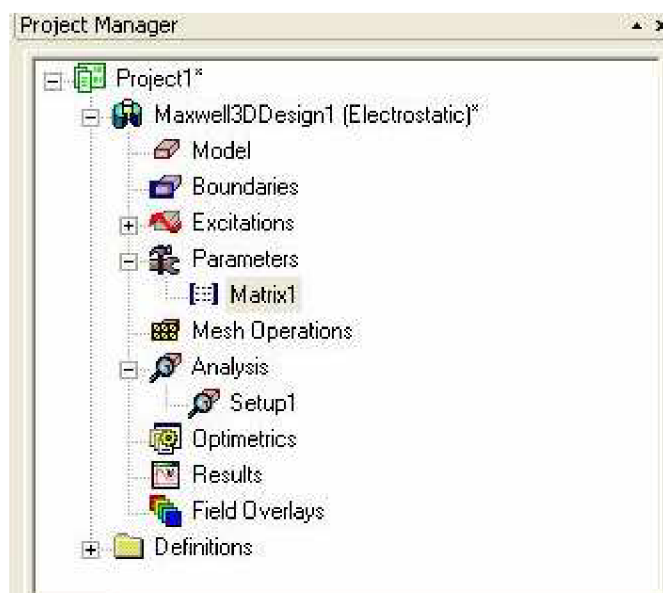
Práca s modelmi a ich editácia je pomocou „History tree window“ a „Property window“ veľmi efektívna a prehľadná.

Priradenie materiálov je z dôvodu obsiahlych materiálových knižníc a za pomoci „History tree window“ veľmi jednoduché. V prípade, žeby materiálová knižnica neobsahovala požadovaný materiál je možné tento materiál dodatočne dedefinovať alebo stiahnuť zo stránok výrobcu dodatočnú knižnicu s novými materiálmi.



Obr. 3.27 Materiálová knižnica v prostredí Maxwell

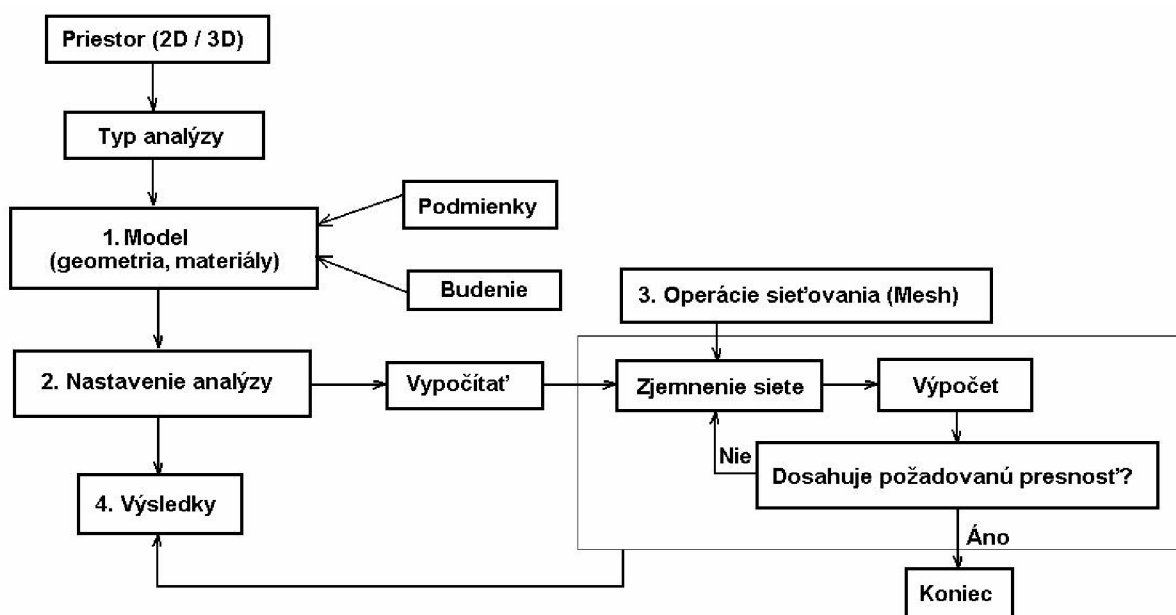
Taktiež zadávanie budenia, okrajových podmienok, nastavenie analýzy a sieťovania je pomocou „Project Manager Window“ veľmi efektívne a prehľadné. Všetky nastavenia ostávajú po prevedení viditeľne v okne „Project Manager“ a je možné ich jednoducho vyvolať a upraviť podľa potreby. Užívateľ má vďaka týmto skutočnostiam skutočne veľký prehľad o tom čo bolo v projekte nastavované a vykonané.



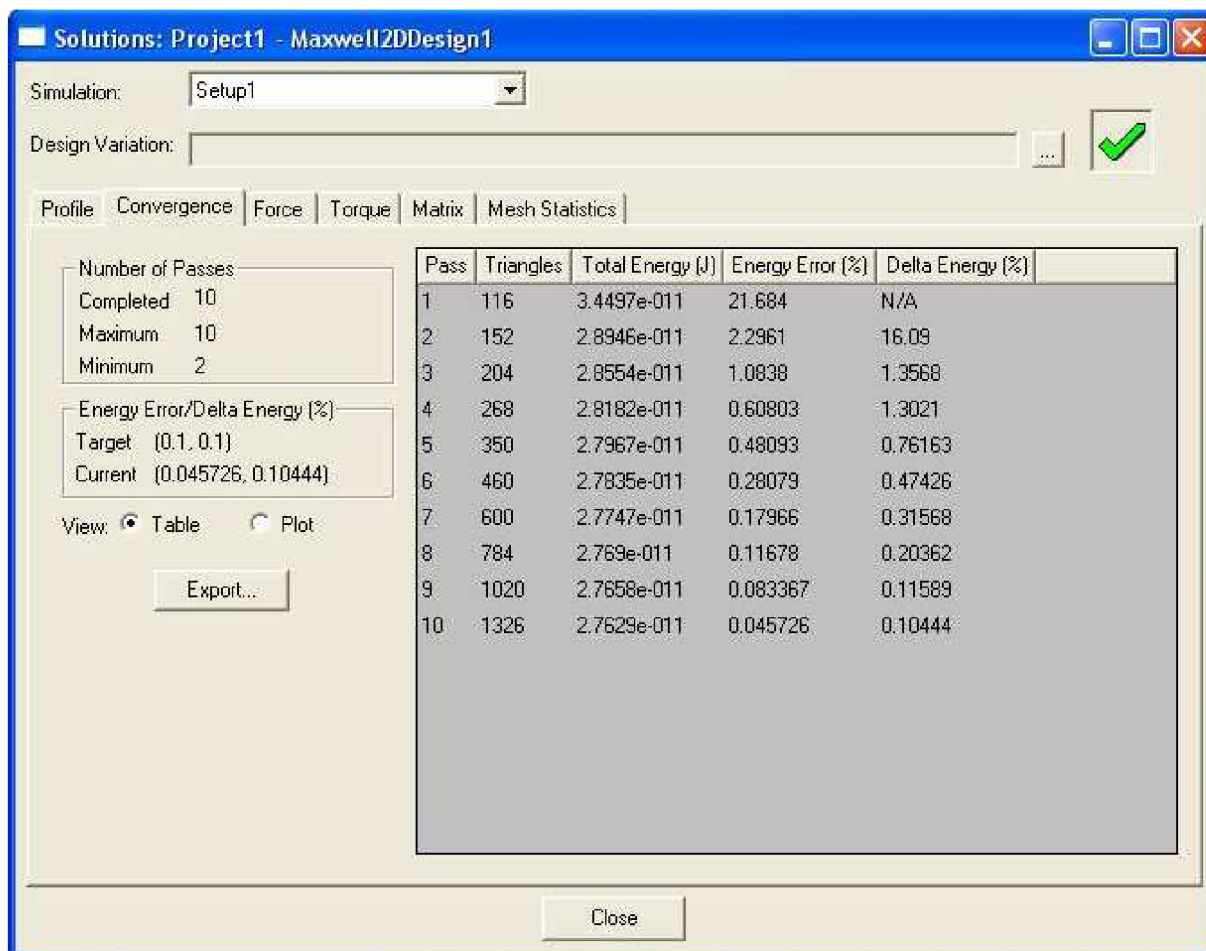
Obr. 3.28 Project Manager prostredia Maxwell 3D

Po spustení analýzy je vidieť v „Progress Window“ priebeh výpočtu. Užívateľ má možnosť tento proces prerušiť, nastaviť alebo zmeniť parametre výpočtu a pokračovať vo výpočte od miesta kde bol výpočet prerušený. Program sám vyhľadá zmenené miesta a tieto miesta prepočíta s novými parametrami. Proces výpočtu prebieha automaticky a opakuje sa dovtedy pokiaľ nieje dosiahnuté zadanej presnosti výpočtu alebo pokiaľ sa nedosiahne maximálny počet opakovaní zadaný užívateľom. Pred každým opakovaním sa nastaví väčší počet konečných prvkov, zjemňuje sa sieť konečných prvkov, čím sa zvyšuje presnosť výpočtu.

Po každom opakovaní, bez ohľadu na to či bola alebo nebola dosiahnutá presnosť výpočtu, sa výsledok odošle do tabuľky výsledkov, v ktorej je potom možné tieto výsledky prehliadať a vidieť ako sa menili a ako sa zvyšoval počet konečných prvkov a zmenšovala chyba výpočtu.



Obr. 3.29 Priebeh tvorby a analýzy modelu v prostredí Maxwell



The screenshot shows the 'Solutions: Project1 - Maxwell2DDesign1' window. The 'Simulation' dropdown is set to 'Setup1'. The 'Design Variation' field is empty. The 'Convergence' tab is selected. On the left, there are settings for 'Number of Passes' (Completed: 10, Maximum: 10, Minimum: 2) and 'Energy Error/Delta Energy (%)' (Target: (0.1, 0.1), Current: (0.045726, 0.10444)). The 'View' is set to 'Table'. An 'Export...' button is visible. The main area contains a table with the following data:

Pass	Triangles	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	116	3.4497e-011	21.684	N/A
2	152	2.8946e-011	2.2961	16.09
3	204	2.8554e-011	1.0838	1.3568
4	268	2.8182e-011	0.60803	1.3021
5	350	2.7967e-011	0.48093	0.76163
6	460	2.7835e-011	0.28079	0.47426
7	600	2.7747e-011	0.17966	0.31568
8	784	2.769e-011	0.11678	0.20362
9	1020	2.7658e-011	0.083367	0.11589
10	1326	2.7629e-011	0.045726	0.10444

Obr. 3.30 Konvergenčná (výsledková) tabuľka výpočtu v prostredí Maxwell

### 3.2.4 Importovanie modelov

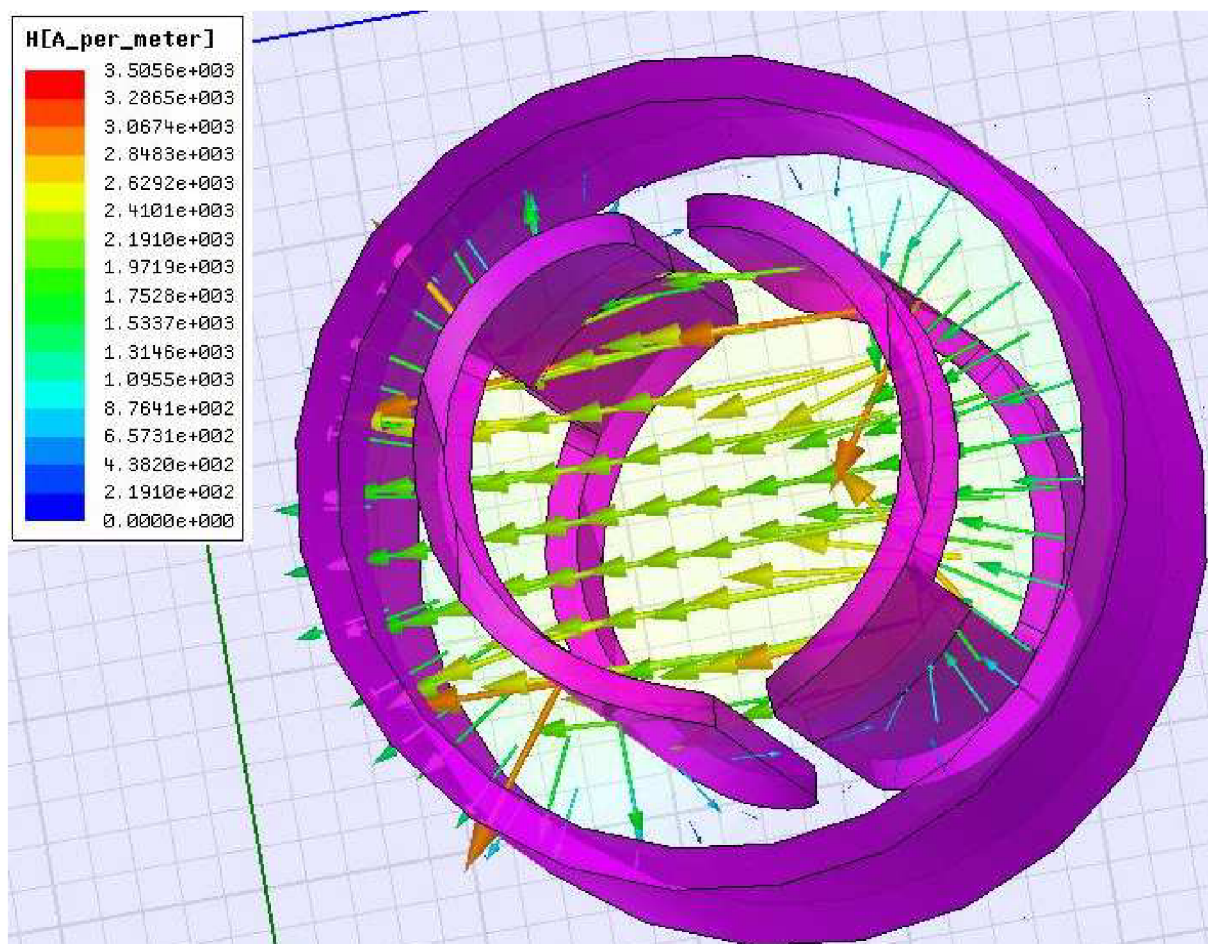
Samozrejmosťou programu Maxwell je aj možnosť efektívneho importovania modelov z CAD systémov. Najvhodnejším formátom pre import je STP. Pri importe modelu sa automaticky prevedie kontrola a prípadná oprava geometrie modelu. Následne je možné premenovanie a priradenie materiálov naimportovaným objektom pomocou „History tree window“, v ktorom sa po importe všetky časti modelu zobrazia a po označení niektorého z nich je možné previesť jeho editáciu v „Property Window“.

### 3.2.5 Spracovanie a zobrazenie výsledkov analýzy

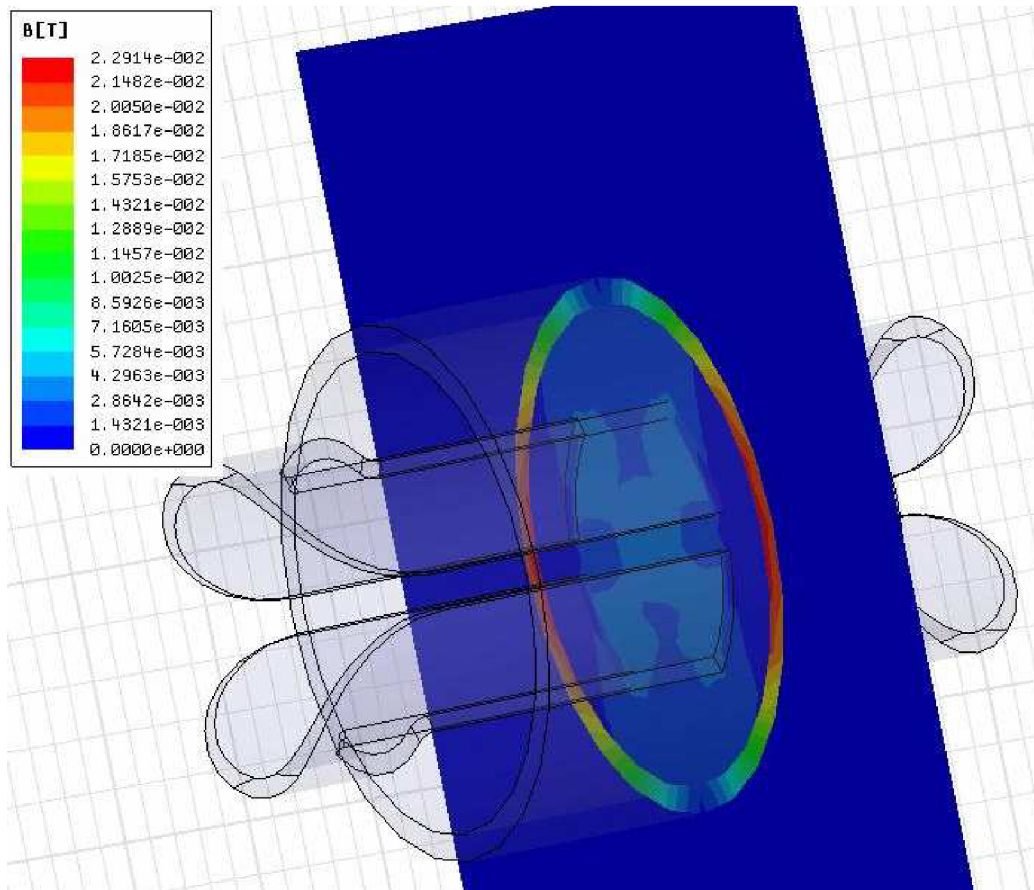
Po prevedení výpočtu sú užívateľovi výsledky dostupné v tom istom prostredí, v ktorom bolo prevedené zadávanie geometrie a nastavenie výpočtu. Pomocou položky „Fields“ v okne „Project Manager“ je možné vykresliť potrebné grafy a mapy s požadovanou vypočítanou veličinou. Po vytvorení sa všetky polia nachádzajú v položke „Fields“ a je možné medzi nimi prepínať.

Užívateľ si môže vybrať z piatich typov zobrazení - Kontúrové mapy, Skalárne mapy, Vektorové mapy, Grafy pozdĺž preddefinovanej krivky a Animované zobrazenia veličín poľa. Maxwell teda umožňuje aj tvorbu animácií vytvorených polí

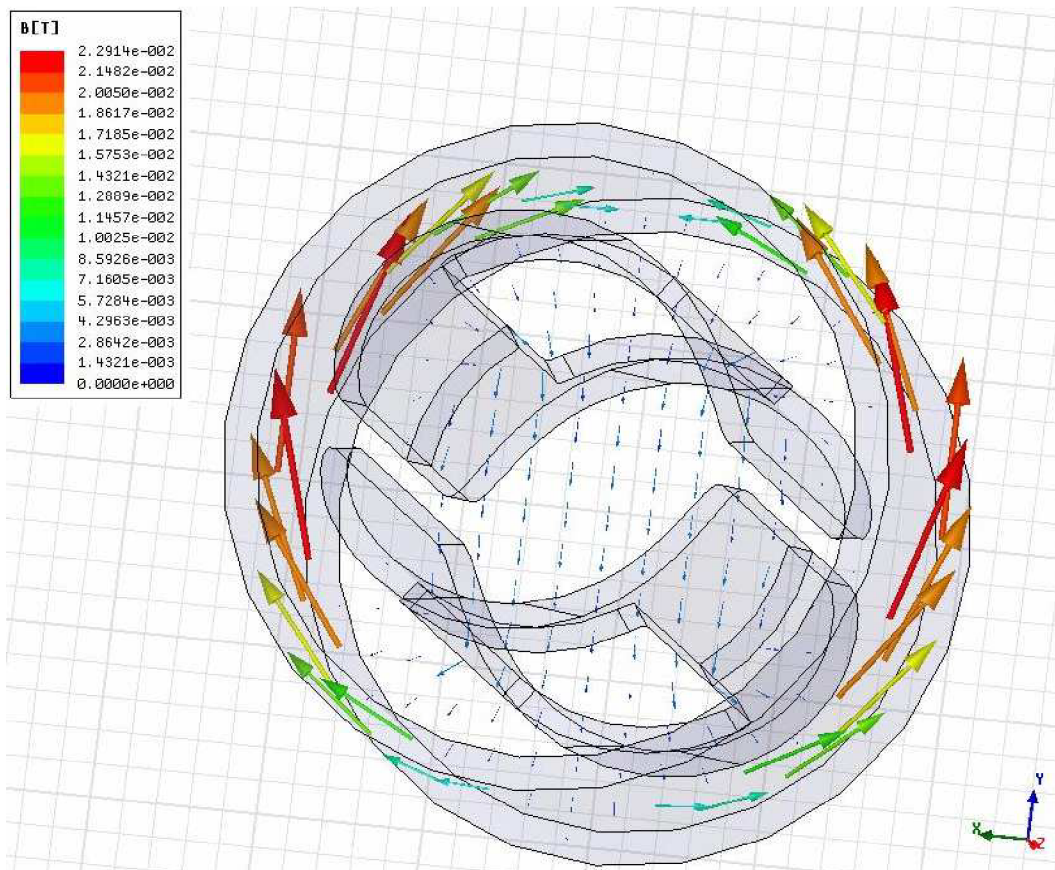
závislých například na čase, polohe alebo fázovom uhle. Tieto animácie je možné vyexportovať vo formáte .gif alebo .avi. Ďalšou možnosťou programu Maxwell je definovanie akéhokoľvek výpočtu požadovanej veličiny (funkcie) v analyzovanej oblasti pomocou „Fields Calculator“. V okne „Project Manager“ môže užívateľ pracovať s viacerými analýzami súčasne. Ďalšie analýzy môžeme vytvoriť z prvej analýzy jednoduchým kopírovaním. Tieto analýzy môžeme potom upraviť podľa potreby.



Obr. 3.31 Vektory intenzity magnetického poľa vychýľovacích cievok v Maxwell



Obr. 3.32 Zobrazení indukce magnetického pole vychýlovacích cievok v Maxwell



Obr. 3.33 Vektory indukce magnetického pole vychýlovacích cievok v Maxwell



### 3.3 FEMM – Finite Element Method Magnetics

Femm je program určený na riešenie dvojrozmerných elektrostatických a nízkofrekvenčných magnetických polí.

Femm môžeme rozdeliť na tri časti:

**Interaktívne prostredie** (femm.exe), ktoré tvorí rozhranie, v ktorom je možné previesť všetky časti simulácie od zadefinovania geometrie, materiálov a podmienok, až po samotný výpočet a zobrazenie výsledkov. Geometriu analyzovaného prostredia vytvoríme buď priamo v prostredí FEMM pomocou dostupných nástrojov, alebo pomocou importu DXF súborov z prostredia Autocad. Riešenie polí je zobrazené pomocou obrysových máp. V súčasnosti je toto prostredie rozdelené do 6 hlavných sekcií :

Magnetický Preprocessor, Elektrostatický Preprocessor, Preprocessor tepelného toku, Magnetický postprocessor, Elektrostatický postprocessor, Postprocessor tepelného toku

**Mesh** (triangle.exe) – úlohou tohto programu je rozdeliť analyzovanú oblasť na množstvo trojuholníkov, ktoré sú potom využité pre riešenie metódou konečných prvkov.

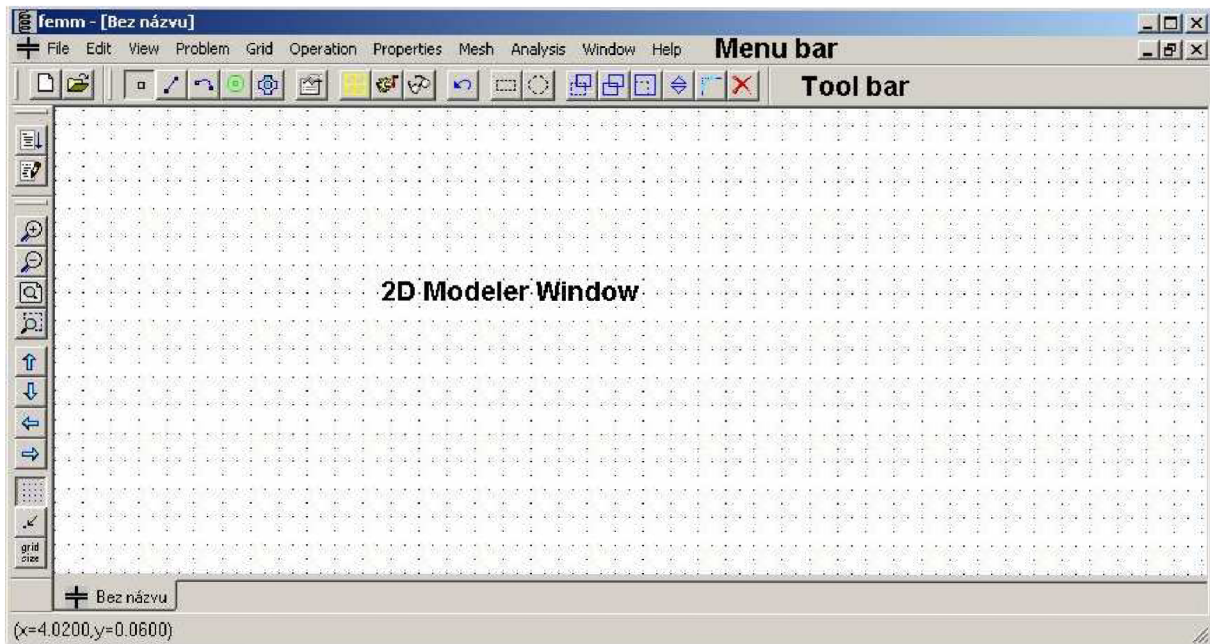
**Analýzy** – spracovávajú údaje, ktoré charakterizujú daný problém a sú zadané užívateľom, a riešia zodpovedajúce parciálne diferenciálne rovnice, aby zistili hodnoty pre vykreslenie polí okolo analyzovanej oblasti.

Femm obsahuje tieto analýzy:

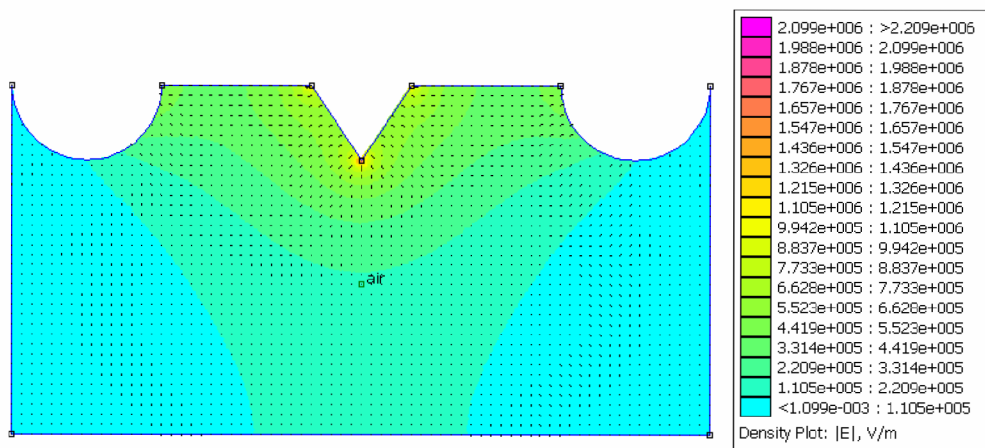
- fkern.exe pre riešenie magnetických polí
- belasolv.exe pre riešenie elektrostatických polí
- hsolv.exe pre riešenie tepelného toku
- csolv.exe pre riešenie prúdového toku

Modelačné prostredie programu Femm pozostáva z okna 2D Modeler, do ktorého sa zadáva geometria dvojrozmerného modelu. Ďalšími časťami prostredia sú Tool bar s ikonami najčastejšie používaných nástrojov a ďalej Menu bar, v ktorom sa nachádzajú všetky možnosti programu.

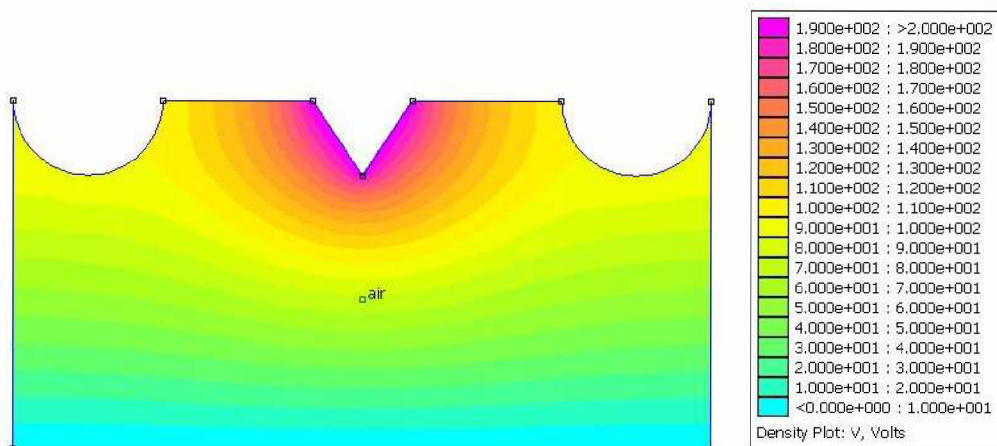
Štruktúra prostredia Modeler je v podstate zhodná s prostredím Postprocessor, v ktorom sa zobrazujú vypočítané polia a v ktorom prebieha spracovanie výsledkov užívateľom.



Obr. 3.34 Prostredie FEMM



Obr. 3.35 Zobrazenie intenzity elektrostatického poľa v prostredí FEMM



Obr. 3.36 Rozloženia potenciálu v okolí vodičov v prostredí FEMM

## 4 Zhodnotenie daných programov

Cieľom tejto kapitoly je porovnať spomenuté programy pre modelovanie elektromagnetických polí a vybrať najvhodnejší program pre využitie v technickej praxi, čo bolo hlavnou úlohou práce.

Prvým skúmaným programom bol program Opera 3D, ktorý bol z počiatku, na základe prvotných materiálov, považovaný za najvhodnejší pre praktické využitie. Žiaľ behom získavania nových praktických skúsenosti s týmto programom sa od tohto konštatovania upustilo. Práca v tomto prostredí bolo veľmi neintuitívna, neprehľadná a zložitá. Z tohto dôvodu sa presunula pozornosť na ďalší produkt, ktorým bol Maxwell 3D.

Program Maxwell už na prvý pohľad vzbudzoval dojem prehľadnosti, ktorý bol pri praktickej práci s týmto programom potvrdený. Práca v prostredí Maxwell je prehľadná, k dispozícii sú všetky potrebné nástroje a nastavenia, ktoré sa dajú ľahko editovať pomocou okien, ktoré sa nachádzajú hneď vedľa hlavného modelačného okna.

Tretím, zo skupiny skúmaných programov, je program FEMM, ktorý umožňuje prácu iba s dvojrozmernými štruktúrami, ale napriek tomuto faktoru je to výborný program pre rýchle a jednoduché analýzy.

### 4.1 Porovnanie Opera 3D a Maxwell 3D

Keďže programy Opera 3D a Maxwell 3D umožňujú prácu s trojrozmerným priestorom a mali by ponúkať, podľa ich reklamných materiálov, podobne funkcie prevediem slovné zrovnanie práve týchto dvoch programov v najdôležitejších bodoch podľa mojich praktických skúseností s danými programami.

Prostredie programu Opera 3D zaostáva za prostredím Maxwell 3D vo viacerých smeroch. Ten najdôležitejší je prehľadnosť a intuitívnosť práce v programe.

Pri simuláciách polí je nutné zadávať a nastavovať veľké množstvo parametrov, a preto je dôležité aby užívateľ mal prehľad o prevedených operáciách. V Opera 3D sú tieto nastavenia neprehľadne a hlavne skryté v rozvíjacom menu. Každé nastavenie je v inom okne a je zložitá tieto nastavenia v Opera 3D dohľadávať a pracovať s nimi. Tento problém je v prostredí Maxwell vyriešený prehľadným stromovým menu v ľavej strane obrazovky, v ktorom sú umiestnené a prehľadne zoradené všetky nastavenia, postupy a výsledky práce.

Ďalšími položkami, v ktorých Opera zaostáva za Maxwell sú modelovanie samotnej geometrie, jej úprava a aj prípadný import z CAD systémov. Pri modelovaní geometrie chýbajú v prostredí Opera uchopovacie pomôcky, bez ktorých je takmer nemožná práca pomocou myši, a teda sa musia zadávať presne súradnice bodu v priestore pomocou klávesnice, čo značne komplikuje prácu ak v modeleri, tak v post processore programu. V programe Maxwell je práca s geometriou, za pomoci uchopovacích pomôcok, oveľa jednoduchšia.

---

Problémy v Opere nastávali aj pri importovaní modelov z CAD systémov, a to tak, že na importovaných modeloch sa vyskytovali chyby v geometrii, ktoré komplikovali a v niektorých prípadoch aj znemožňovali vytvorenie siete konečných prvkov. V programe Maxwell bolo importovanie pomocou STP súborov, z CAD systémov, zväčša bezproblémové, po nainportovaní zostavy program sám rozlíšil súčiastky s rovnakou geometriou a farebne ich rozlíšil od ostatných častí modelu, ktorým priradil iné farby. Výsledkom je prehľadná farebná zostava, s ktorou sa pohodlne pracuje.

Ako výhodu programu Maxwell tiež vidím obsiahle materiálové knižnice, zatiaľ čo v prostredí Opera sa musel každý materiál definovať pomocou jeho vlastností, čo výrazne zdržuje prácu s modelom.

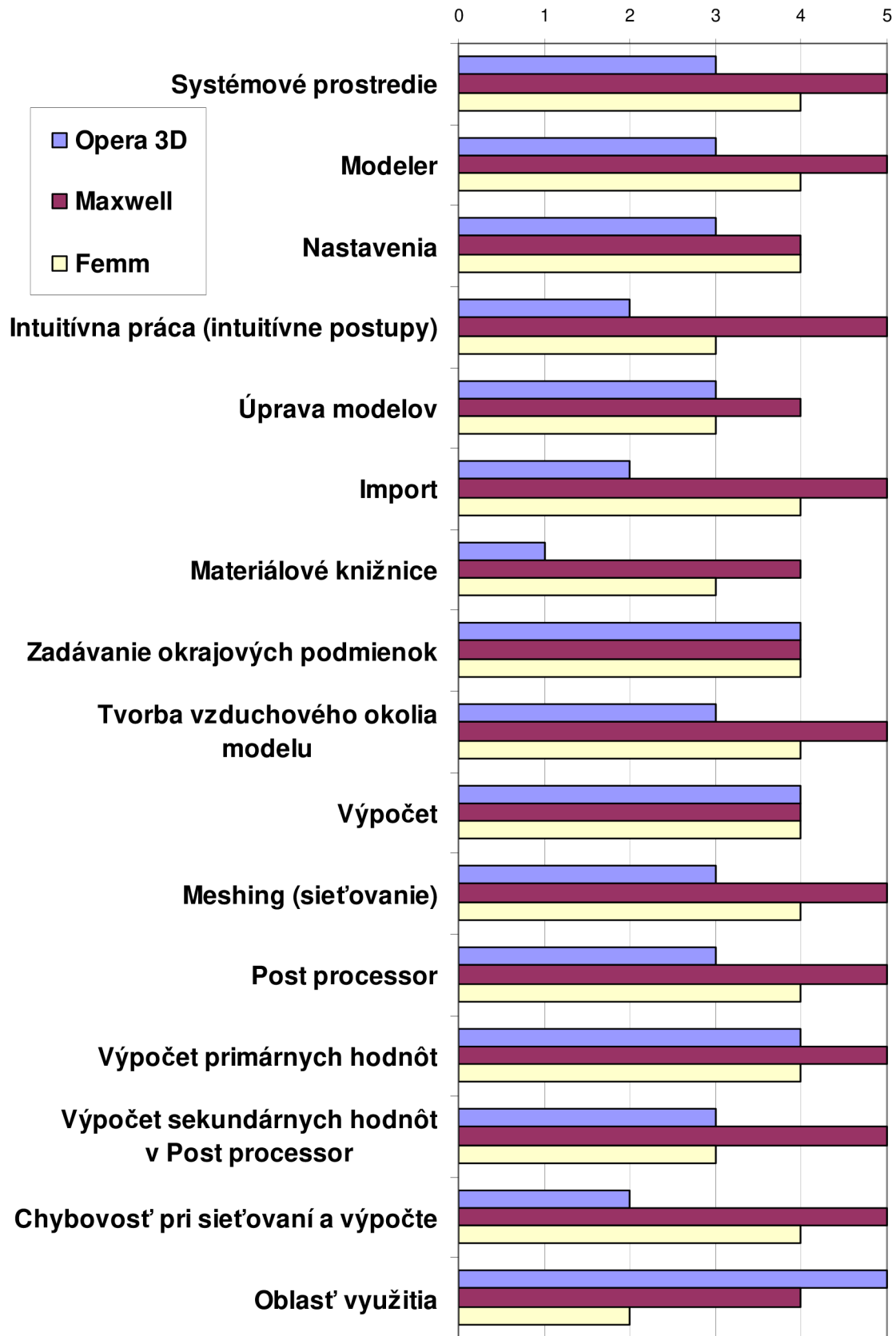
Vytvorenie siete konečných prvkov je v Opere rozdelené do dvoch krokov a to do vytvorenia siete na povrchu a v objeme modelu, tieto kroky musí vykonať v Opere sám užívateľ ešte pred spustením samotného výpočtu, zatiaľ čo v prostredí Maxwell je vytvorenie siete konečných prvkov oveľa sofistikovanejšie, a je súčasťou samotného výpočtu, počas ktorého sa počet konečných prvkov zväčšuje, aby bolo dosiahnuté zadanej presnosti riešenia.

## 4.2 Tabuľkové a grafické zhodnotenie

V tabuľke je uvedené zrovnanie všetkých troch programov v jednotlivých dôležitých bodoch pričom najlepšie hodnotenie je 5 a najhoršie 1. Znamky boli priradzované jednotlivým programom podľa subjektívneho dojmu z jednotlivých programov na základe vykonaných praktických úloh.

Tab. 4-1 Porovnanie programov v dôležitých bodoch

	Opera 3D	Maxwell	Femm
Systémové prostredie – prehľadnosť, riešenie pracovnej plochy, usporiadanie pracovných nástrojov	3	5	4
Modeler – možnosti kreslenia modelu v programe	3	5	4
Nastavenia – možnosti prispôsobenia pracovného prostredia	3	4	4
Intuitívna práca (intuitívne postupy)	2	5	3
Úprava modelov	3	4	3
Import	2	5	4
Materiálové knižnice	1	4	3
Zadávanie okrajových podmienok	4	4	4
Tvorba vzduchového okolia modelu	3	5	4
Výpočet	4	4	4
Meshing (sieťovanie)	3	5	4
Post processor	3	5	4
Výpočet primárnych hodnôt	4	5	4
Výpočet sekundárnych hodnôt v Post processor	3	5	3
Výskyt chýb pri sieťovaní a výpočte	2	5	4
Oblasť využitia	5	4	2



Obr. 4.1 Grafické porovnanie programov v dôležitých bodoch

---

### **4.3 Slovné zhodnotenie**

Zo spomenutého vyplýva, že najvhodnejší program z hľadiska výkonnosti a prostredia je z daných programov program Maxwell 3D. Tento program umožňuje efektívnu a presnú prácu avšak je zo spomínaných programov aj najdrahší, jeho cena je 55 000 €, čo značne komplikuje rozhodovanie firmy o jeho výbere. Opera 3D je síce lacnejšia, jej cena je s analyzačnými programami Tosca a Elektra 20 000 €, avšak je na zváženie jej obstaranie, pretože jej prostredie výrazne zaostáva za ostatnými produktmi. Program FEMM je vhodný predovšetkým na jednoduchšie analýzy, ale jeho obstaranie nieje problém, pretože je to voľne dostupný program, ktorý sa dá jednoducho stiahnuť z internetu.

Na trhu samozrejme existuje viacero iných programov pre výpočet elektromagnetických polí, o ktorých nebolo v práci pojednávané z dôvodu, že neboli v čase vypracovávania práce k dispozícii. Sú to napríklad programy ako Hermes, Comsol Multiphysics, CST Studio, Vizimag, Vorpall, FemLab, Amperes, Coulomb, atď.

K dispozícii sú teda na výber viaceré produkty, ktoré majú svoje výhody a nevýhody, a je len na rozhodnutí spoločnosti, ktorá uvažuje o zaobstaraní niektorého z nich, ktorý z nich vyberie.

## 5 Praktická časť

Kapitola pozostáva z viacerých praktických úloh, ktoré boli riešené počas tvorby práce. Úlohy sú riešené prevažne za pomoci programu Maxwell, ktorý bol na základe predošlej kapitoly určený ako najvhodnejší k praktickým aplikáciám.

### 5.1 Výpočet kapacity kondenzátora

V tejto cvičnej úlohe, na porovnanie možnosti jednotlivých programov, bude riešená kapacita plošného kondenzátora za pomoci elektrostatičného poľa analyzovaného postupne pomocou všetkých troch spomínaných programov. Výsledky budú porovnané s numerickým výpočtom za pomoci rozmerov kondenzátora a permitivity prostredia, ktoré sa nachádza medzi elektródami kondenzátora.

#### Zadanie úlohy:

Kondenzátor pozostáva z dvoch plochých elektród, z ktorých jedná ma potenciál 1V a druhá 0 V. Medzi elektródami sa nachádza vzduch. Rozmery elektród sú 4cm x 4cm a vzdialenosť plôch je 0,5 cm. Určite kapacitu daného kondenzátora.

#### 5.1.1 Výpočet kapacity kondenzátora z rozmerov a permitivity vzduchu

Pre doskový kondenzátor platí:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad (5.1)$$

kde  $S$  je plocha kondenzátorovej dosky,  $d$  je vzdialenosť elektród,  $\varepsilon_0$  je permitivita vákua a  $\varepsilon_r$  je relatívna permitivita vzduchu

Permitivita vákua :  $\varepsilon_0 = 8,8541 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Relatívna permitivita vzduchu:  $\varepsilon_r = 1$

Plocha dosky  $S = 4 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-2} = 16 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Vzdialenosť elektród  $d = 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} = 8,8541 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot \frac{16 \cdot 10^{-4}}{0,5 \cdot 10^{-2}} = 283,49 \cdot 10^{-14} = 2,8349 \text{ pF}$$

Kapacita daného kondenzátora je podľa numerického výpočtu 2,8349pF.



### 5.1.2 Výpočet v programe Opera 3D


V programe Opera 3D je možné dopočítať pomocou hodnôt, získaných analýzou daného objektu s jeho okrajovými podmienkami, v prostredí Post processor kapacitu skúmaného objektu a to pomocou vzťahu

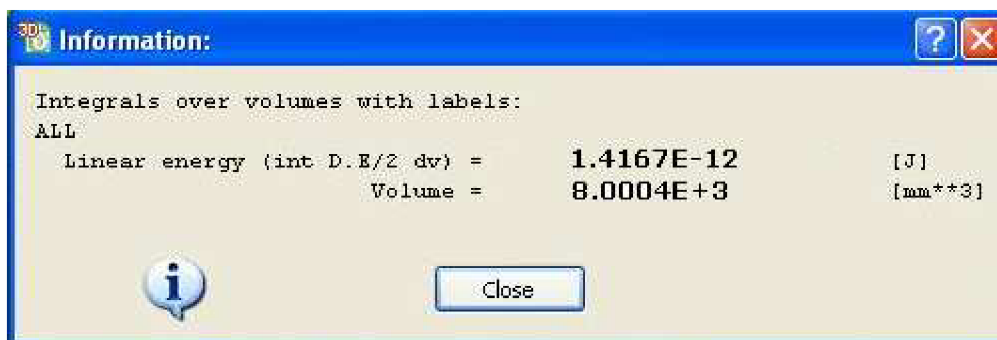
$$W = \frac{C.U^2}{2} \quad (5.2)$$

Kde  $W$  je energia analyzovaného elektrostatického poľa,  $U$  je elektrické napätie (rozdiel potenciálov časti modelu) a  $C$  je hľadaná kapacita.

Vyjadrením dostávame:

$$C = \frac{2.W}{U^2} \quad (5.3)$$


Energiu skúmaného poľa, potrebnú pre výpočet, zistíme pomocou integrálu cez celý model. Túto možnosť ponúka v prostredí Post processor príkaz  („Energy, Power and Force“), po využití ktorého sa vypočíta energia poľa ako aj objem celej analyzovanej oblasti.



Obr. 5.1 Zobrazenie výsledku integrálu cez celý objekt v Opera 3D



Obr. 5.2 Kondenzátor s rozložením potenciálu medzi elektródami v Opera 3D

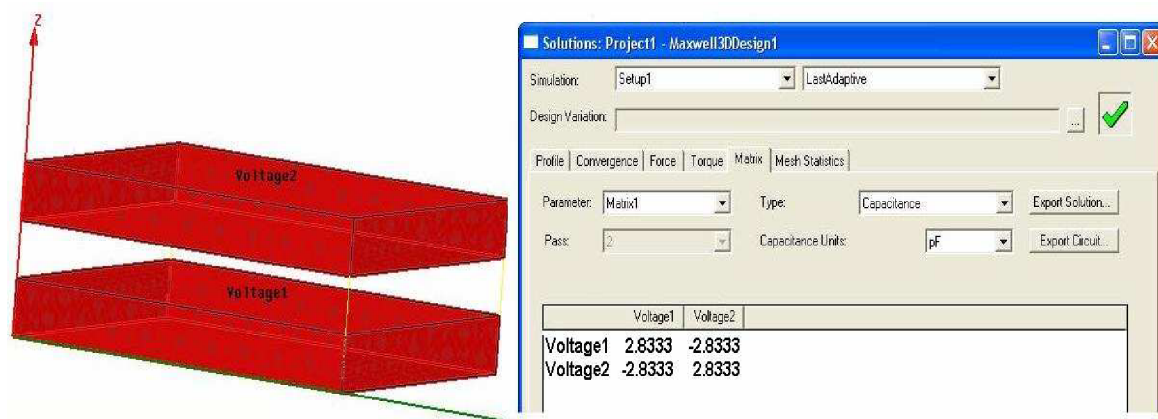
Energia pomocou nástroja  v oblasti medzi elektródami je  $W=1,4167 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  a teda kapacita vypočítaná pomocou tejto hodnoty bude:

$$C = \frac{2 \cdot W}{U^2} = \frac{2 \cdot 1,4167 \cdot 10^{-12}}{(1-0)^2} = 2,8334 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 2,8334 \text{ pF}$$

Kapacita kondenzátora vypočítaná za pomoci elektrostatického poľa v prostredí Opera 3D je 2,8334 pF.

### 5.1.3 Výpočet v programe Maxwell 3D

V prostredí Maxwell 3D je možný priamy výpočet kapacít medzi jednotlivými objektmi v elektrostatickej analýze poľa pomocou tzv. matice kapacitných koeficientov, ktorá sa zadefinuje ešte pred výpočtom poľa. V tejto matici sú v tomto prípade po prevedení analýzy priamo uvedené veľkosti jednotlivých kapacít medzi objektmi. A teda odpadá výpočet kapacity z energie poľa ako tomu je v prostredí Opera 3D.

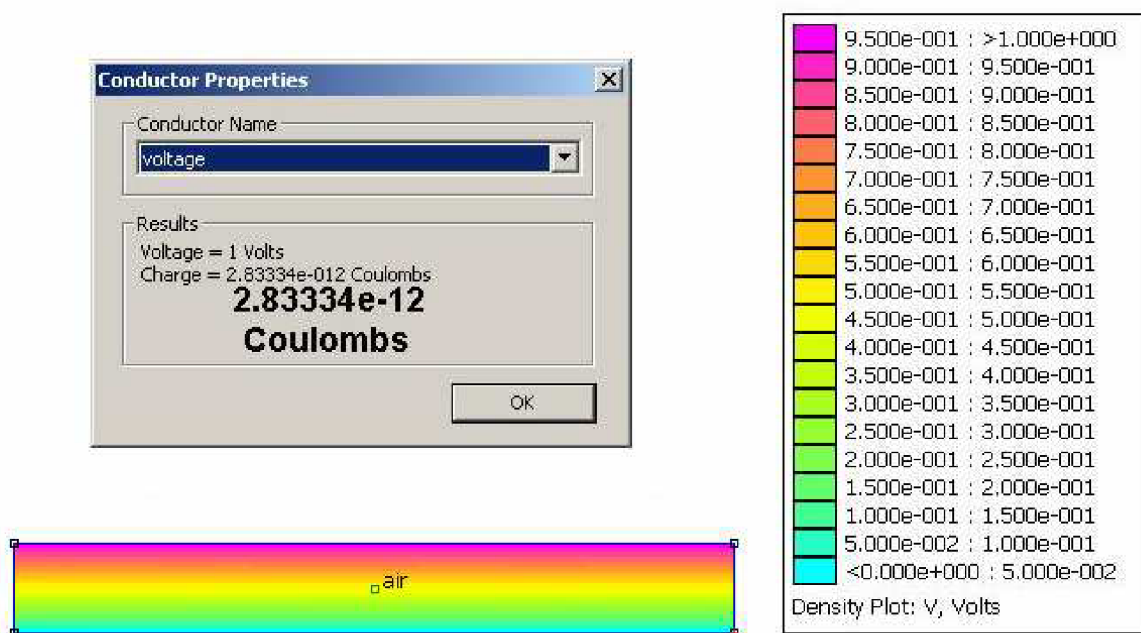


Obr. 5.3 Kondenzátor a tabuľka s kapacitnou maticou kondenzátora v Maxwell 3D

Kapacita vypočítaná v programe Maxwell 3D pre daný kondenzátor je teda 2,8333pF.

### 5.1.4 Výpočet v programe FEMM

V programe Femm postačuje pre riešenie daného problému nakresliť vzduchovú medzeru a na hornú a spodnú čiaru priradiť potenciály. Na hornú čiaru bolo priradený potenciál 1 V na dolnú čiaru bol priradený potenciál 0V. V tomto programe je možné za pomoci post processora určiť elektrický náboj, z ktorého vypočítame kapacitu kondenzátora.



Obr. 5.4 Rozloženie potenciálu a výpočet elektrického náboja v prostredí FEMM

Kapacitu kondenzátora vypočítame zo znalosti elektrického náboja  $Q$  a napätia  $U$ , ktoré spája nasledujúci vzťah

$$Q = CU \quad (5.4)$$

Po vyjadrení kapacity  $C$  :

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2,8333 \cdot 10^{-12}}{1} = 2,8333 \cdot 10^{-12} F = 2,8333 \text{ pF}$$

Kapacita kondenzátora vypočítaná pomocou elektrostatického poľa v programe FEMM je 2,8333 pF.

### 5.1.5 Zhrnutie výsledkov

Získané výsledky sú uvedené v následnej tabuľke

Tab. 5-1 Vypočítané kapacity zadaného kondenzátora

	Numerický výpočet	Výpočet v Opera 3D	Výpočet v Maxwell 3D	Výpočet vo FEMM
<b>Kapacita [pF]</b>	2,8349	2,8334	2,8333	2,8333
<b>Odchýlka od numerického výpočtu [%]</b>	-	0,0529	0,0564	0,0564

Ako vidieť výsledky kapacity zadaného kondenzátora získané za pomoci rôznych metód sa od seba líšia iba minimálne, čo môže byť spôsobené nepresnosťami danej metódy výpočtu, a teda výpočet kapacít za pomoci elektrostatického poľa je možný vo všetkých troch skúmaných programoch. Avšak výpočet kapacít za pomoci Opera 3D a FEMM je v prípade zložitejšej geometrie a prítomnosti viacerých elektród s rôznym potenciálom veľmi nepraktický a v niektorých prípadoch nemožný. Z tohto dôvodu je pre výpočet kapacít vhodnejší program Maxwell 3D, ktorý poskytuje po prevedení elektrostatickej analýzy zadaného modelu tzv. maticu kapacitných koeficientov, z ktorej je výpočet kapacít oveľa jednoduchší ako bude ukázané na následnej praktickej úlohe.

## 5.2 Riešenie simulácie elektrostatického poľa v okolí sekcií VN zdrojov

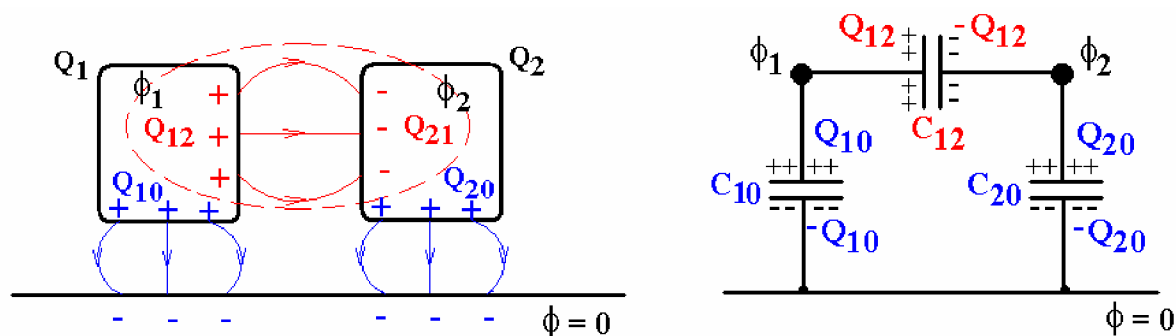
Cieľov tejto kapitoly je simulácia elektrostatického poľa v okolí sekcií VN napájacích zdrojov a výpočet vlastných a vzájomných kapacít medzi týmito sekciami za pomoci programu Maxwell 3D. Úlohou tejto simulácie je aj overenie, či geometria zdroja vyhovuje z hľadiska intenzity elektrostatického poľa, a teda či nedochádza v niektorých miestach zdroja k prekročeniu elektrickej pevnosti izolačného média a teda k prerazu alebo koróne medzi časťami zdroja s rôznym potenciálom.

### 5.2.1 Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je pole, ktoré vytvárajú náboje umiestnené na povrchu elektród pripojených na konštantný zdroj napätia alebo náboje viazané v objemu dielektrika.

## 5.2.2 Výpočet kapacit v sístave elektród

V sístave elektród, ktorých náboje nie sú rovnaké, je náboj ľubovoľnej elektródy viazaný s odpovedajúcim nábojom na ostatných elektródach. Veľkosť tejto väzby je daná tvarom, geometriou a usporiadaným elektród v priestore a udáva vlastnú kapacitu a vzájomné kapacity elektród. Vlastnou kapacitou sa rozumie väzba medzi danou a uzemnenou elektródou. Vzájomné kapacity sú väzby medzi jednotlivými zvyšnými elektródami.



Obr. 5.5 Väzby elektrických nábojov medzi elektródami

$$Q_1 = Q_{10} + Q_{12} = C_{10} \cdot \phi_1 + C_{12} (\phi_1 - \phi_2) \quad (5.5)$$

$$Q_2 = Q_{20} + Q_{21} = C_{20} \cdot \phi_2 + C_{21} (\phi_2 - \phi_1) \quad (5.6)$$

Platí maticový zápis:

$$\phi = \alpha \cdot Q \quad (5.7)$$

$$Q = \alpha^{-1} \cdot \phi = \beta \cdot \phi \quad (5.8)$$

kde  $\alpha$  je matica potenciálových koeficientov a  $\beta$  je matica kapacitných koeficientov.

Potom môžeme písať:

$$Q_1 = \beta_{10} \cdot \phi_1 + \beta_{12} \cdot \phi_2 = \beta_{10} \cdot \phi_1 + \beta_{12} \cdot \phi_1 - \beta_{12} \cdot \phi_1 + \beta_{12} \cdot \phi_2 = (\beta_{10} + \beta_{12}) \cdot \phi_1 - \beta_{12} (\phi_1 - \phi_2) \quad (5.9)$$

$$Q_2 = \beta_{21} \cdot \phi_1 + \beta_{20} \cdot \phi_2 = -\beta_{21} \cdot \phi_2 + \beta_{21} \cdot \phi_1 + \beta_{21} \cdot \phi_2 + \beta_{20} \cdot \phi_2 = -\beta_{21} \cdot (\phi_2 - \phi_1) + (\beta_{21} + \beta_{20}) \phi_2 \quad (5.10)$$

Pri porovnaní s rovnicami (5.5) a (5.6) môžeme napísať obecné výrazy pre vlastnú a vzájomnú kapacitu:

$$\text{Vlastná kapacita :} \quad C_{ii} = C_{i0} = \sum_{\text{Elektródy}} \beta_{ij} \quad (5.11)$$

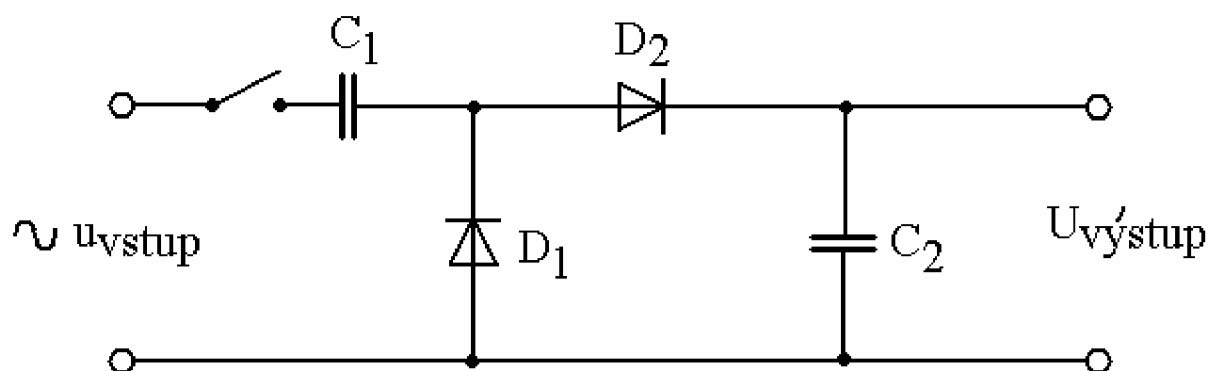
$$\text{Vzájomná kapacita :} \quad C_{ij} = -\beta_{ij} \quad (5.12)$$

### 5.2.3 Zdroj 120 kV

Pre činnosť elektrónových mikroskopov sú nedeľňou súčasťou zdroje vysokého jednosmerného napätia, ktoré musia pre správnu činnosť zariadenia splňovať vysoké kvalitatívne vlastnosti. Medzi tieto požadované vlastnosti patrí veľmi nízky elektrický prúd (menší ako 1 mA), vysoké jednosmerné napätie (10 až 300 kV) a vysoká stabilita napätia. Aby boli tieto požiadavky dodržané musia mať inžinieri, ktorí pracujú na vývoji týchto zariadení, prehľad o všetkých parametroch navrhnutých zdrojov. Jedným z týchto parametrov sú aj parazitné kapacity medzi jednotlivými časťami zdroja.

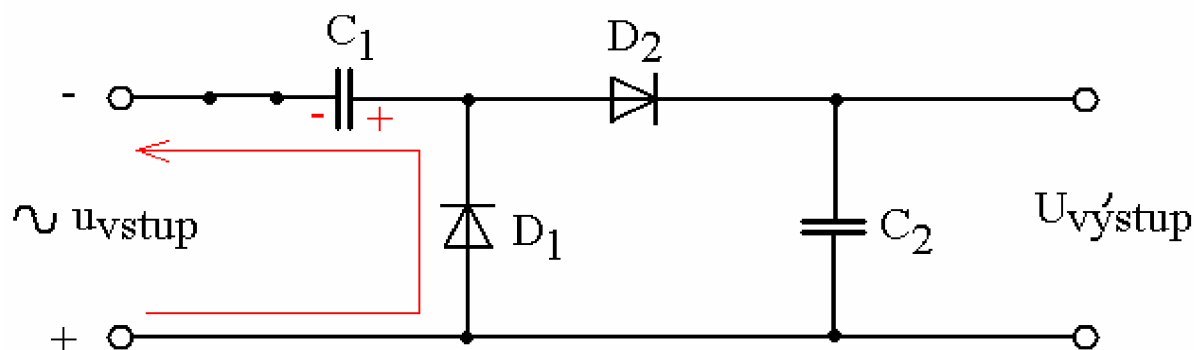
Jedným zo spôsobov generácie vysokého jednosmerného napätia je kaskádny generátor.

Základný princíp generácie vysokého napätia tohoto zariadenia je zdvojovač alebo násobič napätia, ktorého zapojenie a princíp sú znázornené na obr. 5.6.



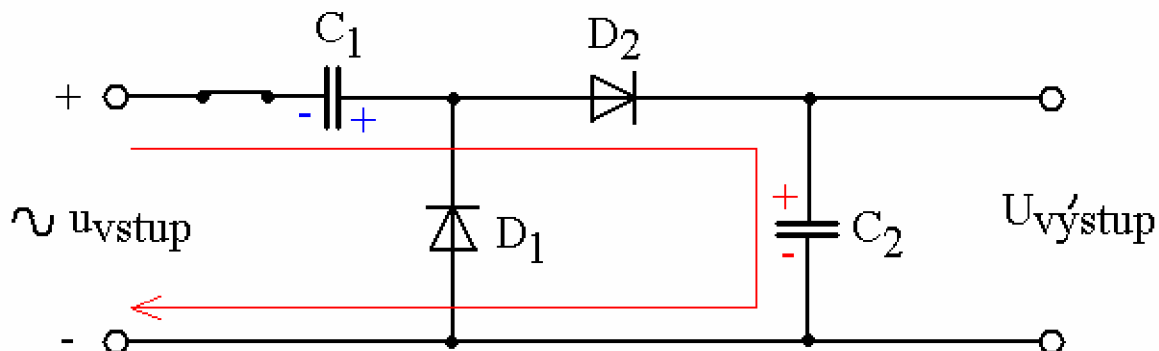
Obr. 5.6 Zdvojovač napätia

V prípade zopnutia spínača sa začne v zápornej polperióde striedavého napájacieho napätia kondenzátor  $C_1$  napíjať cez diódu  $D_1$ . Kondenzátor sa počas tejto zápornej polperiódy nabije na napätie amplitúdy napájacieho napätia.



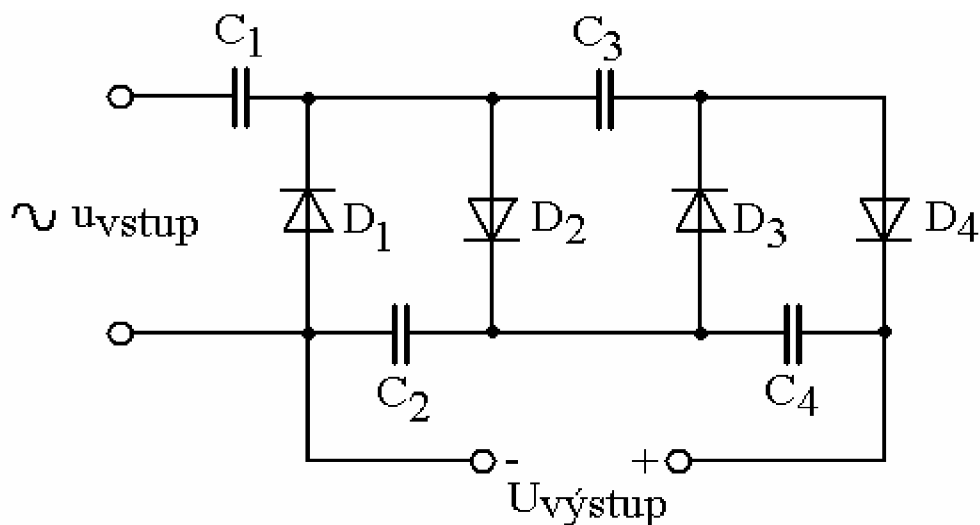
Obr. 5.7 Princíp činnosti násobiča napätia 1

Pri následnej kladnej polperióde napájacieho napätia sú napätie na kondenzátore  $C_1$  a napätie napájacieho zdroja v sérii a kondenzátor  $C_2$  sa cez diódu  $D_2$  nabije na napätie dvojnásobku amplitúdy napájacieho napätia. Tým získame na výstupe zdvojovala napätia jednosmerné napätie o veľkosti dvojnásobku amplitúdy zdroja.



Obr. 5.8 Princíp činnosti násobiča napätia 2

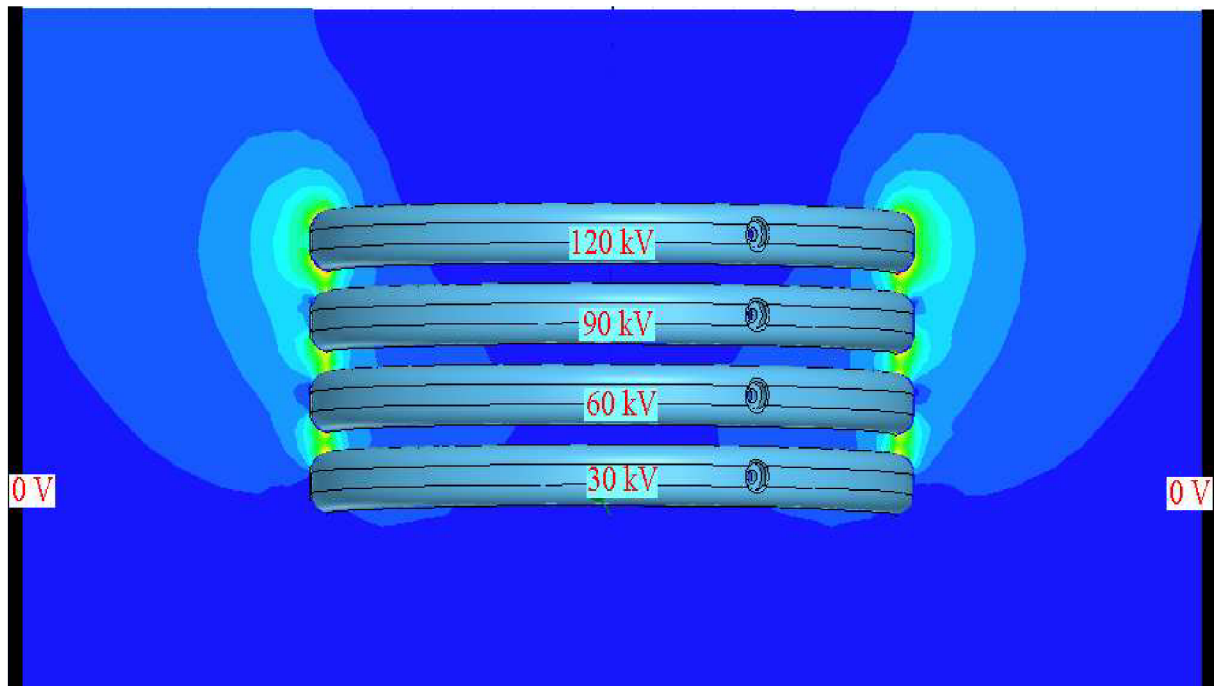
V prípade potreby ešte vyššieho napätia na výstupe, ako je tomu u zdrojov pre elektronové mikroskopy, je potrebné viacnásobné, kaskádne zapojenie. Zapojenie pre násobenie vstupného napätia štyrmi je na nasledujúcom obrázku.



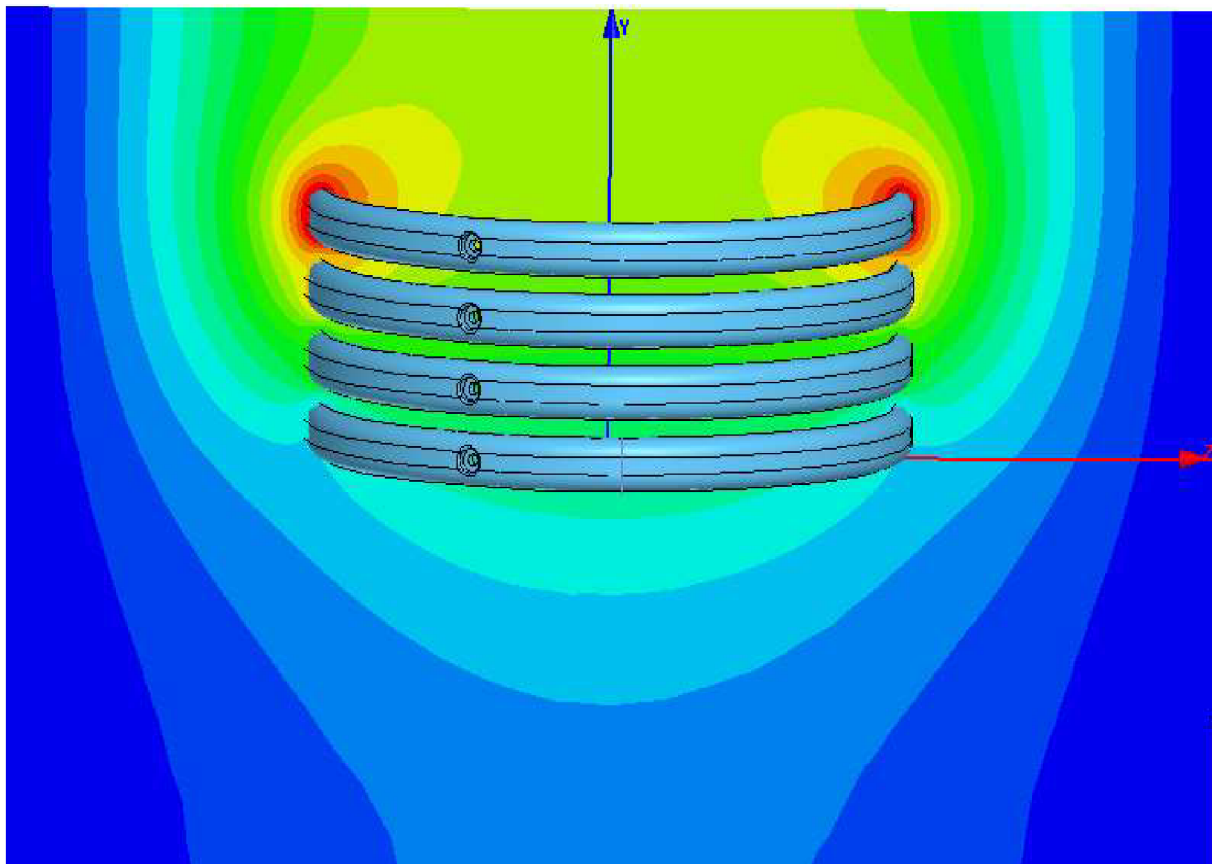
Obr. 5.9 Štvornásobič napätia

Kaskádny generátor teda pozostáva z viacerých stupňov násobiča napätia. Medzi každým stupňom analyzovaného typu zdroja je umiestnený ekvipotenciálny krúžok so stálym potenciálom. Na každom ekvipotenciálnom krúžku je potenciál zvýšený oproti predošlému o 30kV. Takže zdroj 120kV pozostáva zo štyroch ekvipotenciálnych krúžkov, medzi ktorými sú hľadané vzájomné kapacity. Celý tento zdroj je umiestnený v uzemnenom kovovom obale v tvare valca, a teda medzi každým krúžkom a valcovým obalom sú vlastné kapacity, ktoré sú taktiež hľadané. Tieto kapacity budú vypočítané na základe elektrostatického poľa v okolí zdroja, za pomoci programu Maxwell 3D.

Pre výpočet elektrostatického poľa je podstatná geometria ekvipotenciálnych krúžkov, valcového obalu a ich potenciály. Preto sú niektoré časti zdroja, ako napríklad plošné spoje medzi jednotlivými krúžkami, jednotlivé vývody, atď., zanedbané.



Obr. 5.10 Intenzita elektrostatického poľa v okolí 120 kV zdroja



Obr. 5.11 Rozloženie potenciálu v okolí 120 kV zdroja

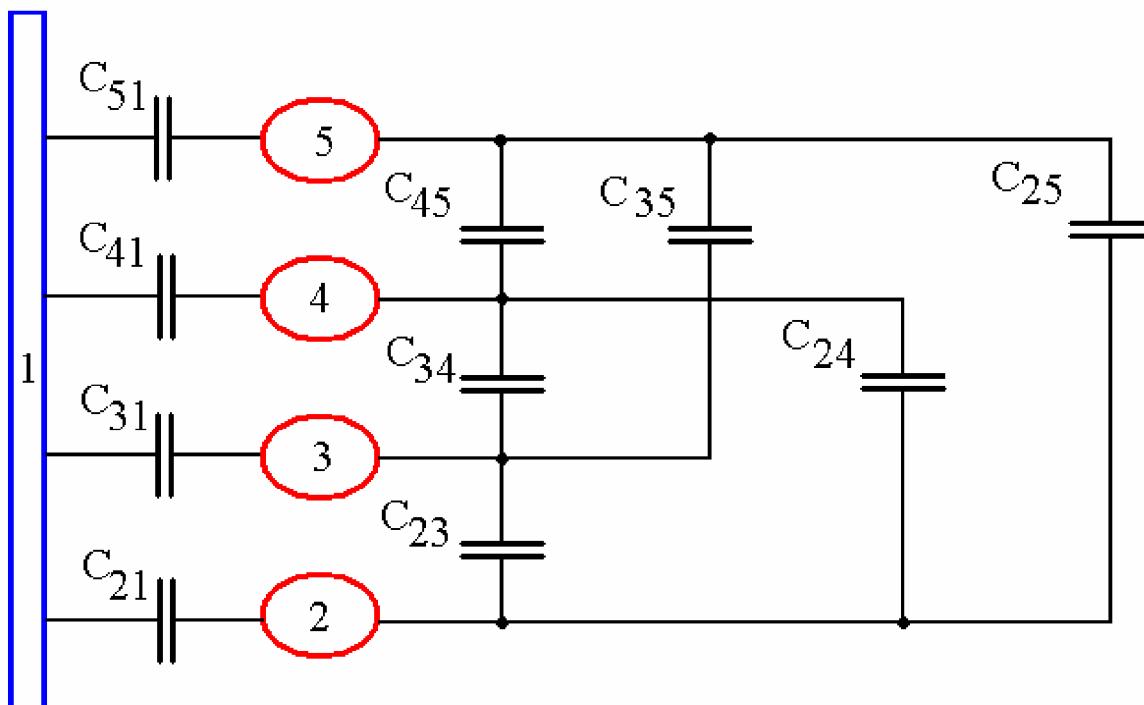


Matica kapacitných koeficientov, vypočítaná pomocou programu Maxwell 3D za pomoci elektrostatického poľa v okolí daného zdroja (názvy „Voltage 2 až 5“ označujú jednotlivé ekvipotenciálne krúžky):

	Voltage2	Voltage3	Voltage4	Voltage5
Voltage2	14.423	-9.0819	-0.94898	-0.56696
Voltage3	-9.0819	20.506	-8.5607	-0.99276
Voltage4	-0.94898	-8.5607	20.485	-9.1913
Voltage5	-0.56696	-0.99276	-9.1913	13.898

Obr. 5.12 Matica kapacitných koeficientov pre zdroj 120 kV

Principiálna schéma jednotlivých kapacít medzi elektródami je znázornená na nasledujúcom obrázku (5.13). Valcový obal a ekvipotenciálne krúžky sú zakreslené v priereze v polovičnom profile zdroja. Modro je znázornený valcový obal a červeno jednotlivé ekvipotenciálne krúžky. Čísla 1 až 5 majú čisto popisný charakter.



Obr. 5.13 Kapacity medzi elektródami pre zdroj 120 kV

Výpočet vlastných kapacít:

$$C_{21} = \sum_{j=2}^5 \beta_{2j} = 14,423 - 9,0819 - 0,94898 - 0,56696 = 3,8251 \text{ pF}$$

$$C_{31} = \sum_{j=2}^5 \beta_{3j} = -9,0819 + 20,506 - 8,5607 - 0,99276 = 1,8706 \text{ pF}$$

$$C_{41} = \sum_{j=2}^5 \beta_{4j} = -0,94898 - 8,5607 + 20,485 - 9,1913 = 1,7840 \text{ pF}$$

$$C_{51} = \sum_{j=2}^5 \beta_{5j} = -0,56696 - 0,99276 - 9,1913 + 13,898 = 3,1469 \text{ pF}$$

Vzájomné kapacity:

$$C_{23} = -\beta_{23} = 9,0819 \text{ pF}$$

$$C_{34} = -\beta_{34} = 8,5607 \text{ pF}$$

$$C_{45} = -\beta_{45} = 9,1913 \text{ pF}$$

$$C_{24} = -\beta_{24} = 0,9489 \text{ pF}$$

$$C_{35} = -\beta_{35} = 0,9927 \text{ pF}$$

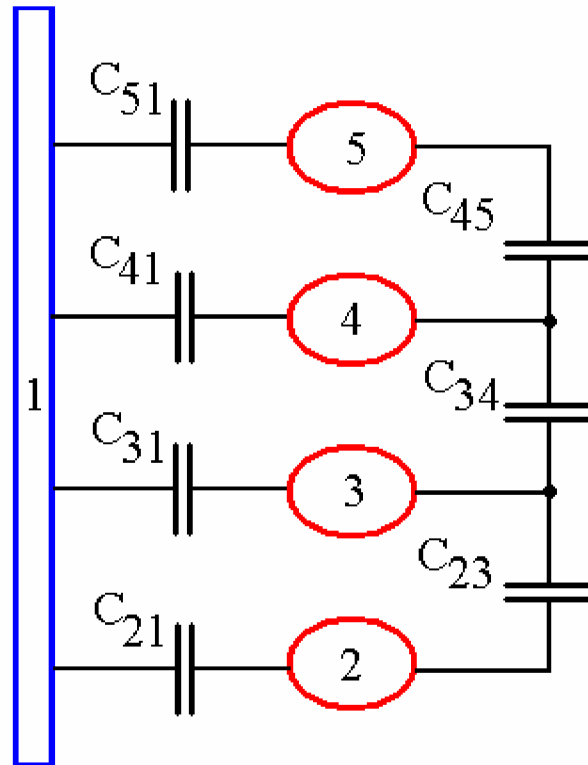
$$C_{25} = -\beta_{25} = 0,5669 \text{ pF}$$

Ako vidieť, z určených kapacít, jednotlivé kapacity sa od seba výrazne líšia veľkosťou a teda je možné konštatovať, že z praktického hľadiska majú význam hlavne vlastné kapacity a niektoré zo vzájomných kapacít. Tieto, z praktického hľadiska významné kapacity, sú uvedené v následnej tabuľke.

Tab. 5-2 Dôležité kapacity pre zdroj 120 kV

	$C_{45}$	$C_{23}$	$C_{34}$	$C_{21}$	$C_{51}$	$C_{31}$	$C_{41}$
<b>Kapacita [pF]</b>	9,1913	9,0819	8,5607	3,8252	3,1470	1,8706	1,7840

Schému kapacit pre zdroj 120 kV môžeme teda pre prax zjednodušiť ako ukazuje nasledujúci obrázok.

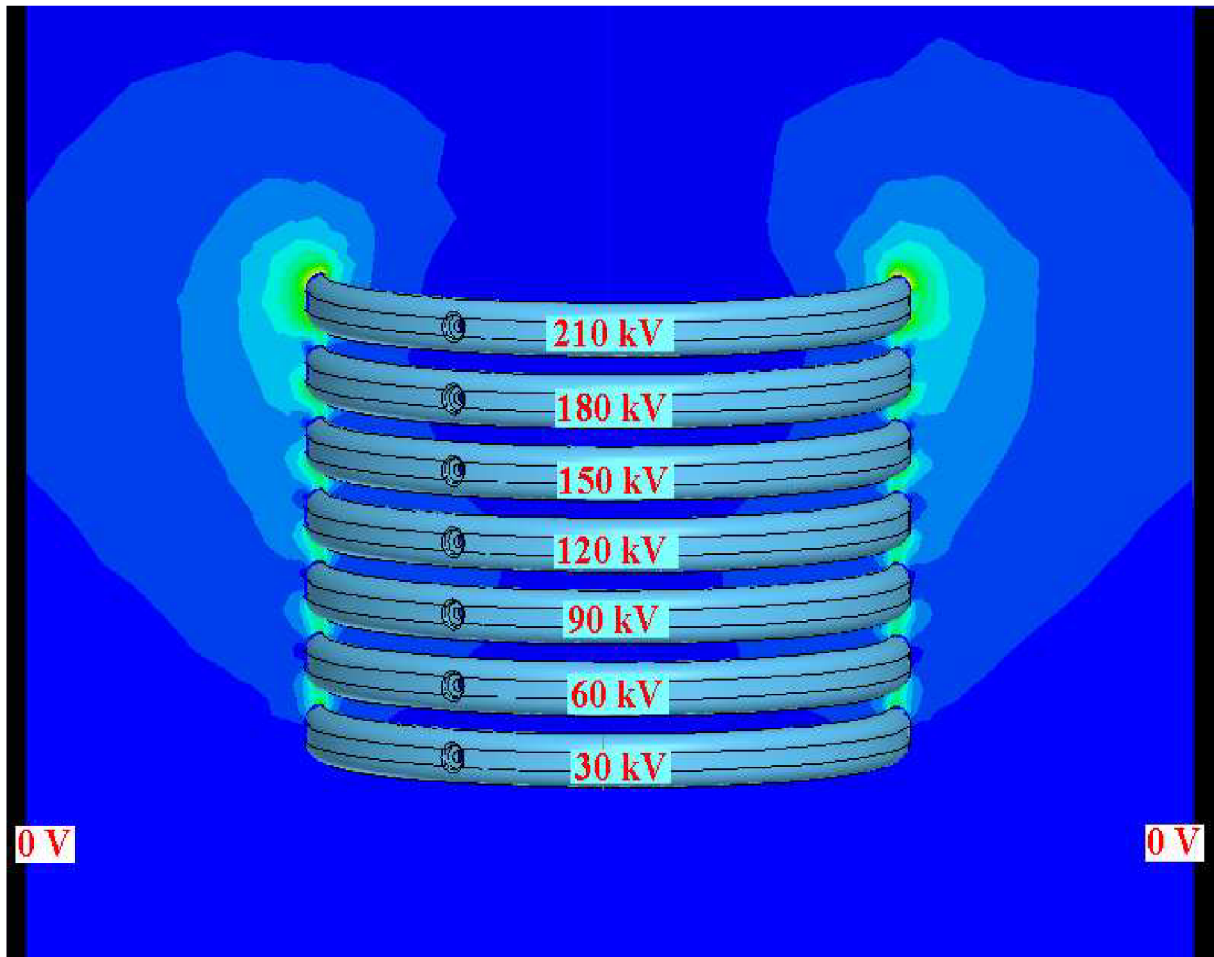


Obr. 5.14 Dôležité kapacity pre zdroj 120 kV

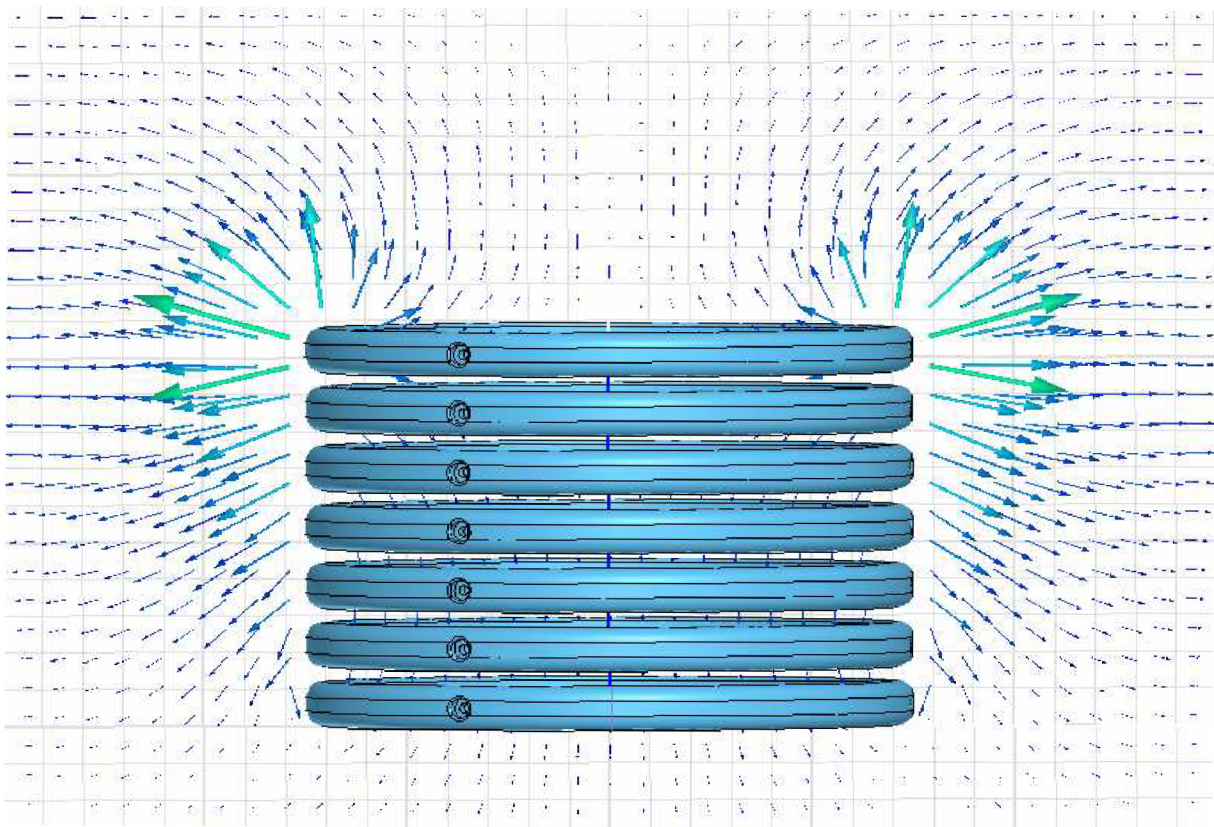
Zo simulácie elektrostatického poľa ďalej vyplýva, že geometrické usporiadanie sekcií zdroja je vhodné, pretože nenastáva prekročenie elektrickej pevnosti izolačného média, a teda nenastáva nežiadúci prerez medzi jednotlivými ekvipotenciálnymi krúžkami.

### 5.2.4 Zdroj 210 kV

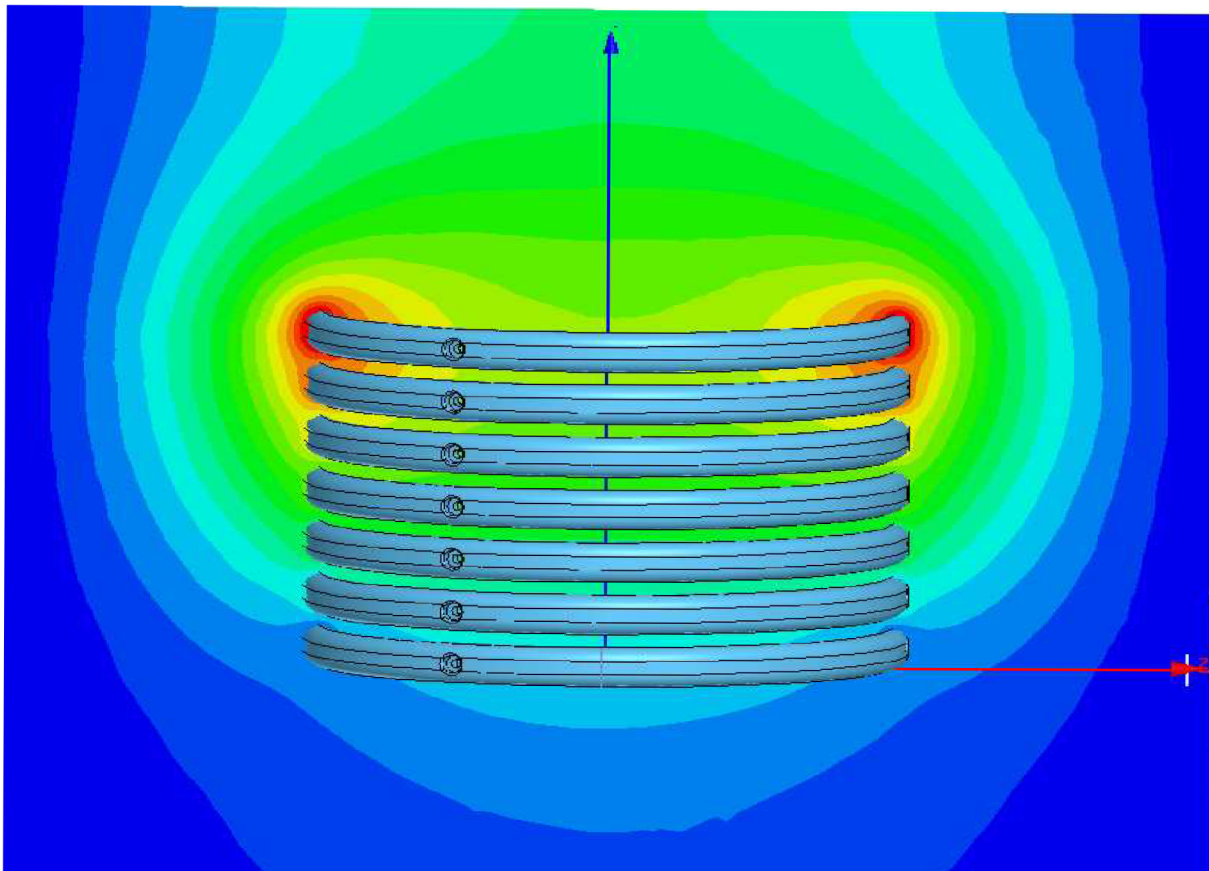
Pre zdroj 210 kV platí to isté ako pre zdroj 120 kV, taktiež je tvorený kaskádnym násobičom napätia, ale ma až 7 stupňov – 7 ekvipotenciálnych krúžkov.



Obr. 5.15 Intenzita elektrostatického poľa v okolí 210 kV zdroja



Obr. 5.16 Vektory intenzity elektrostatického poľa v okolí 120 kV zdroja

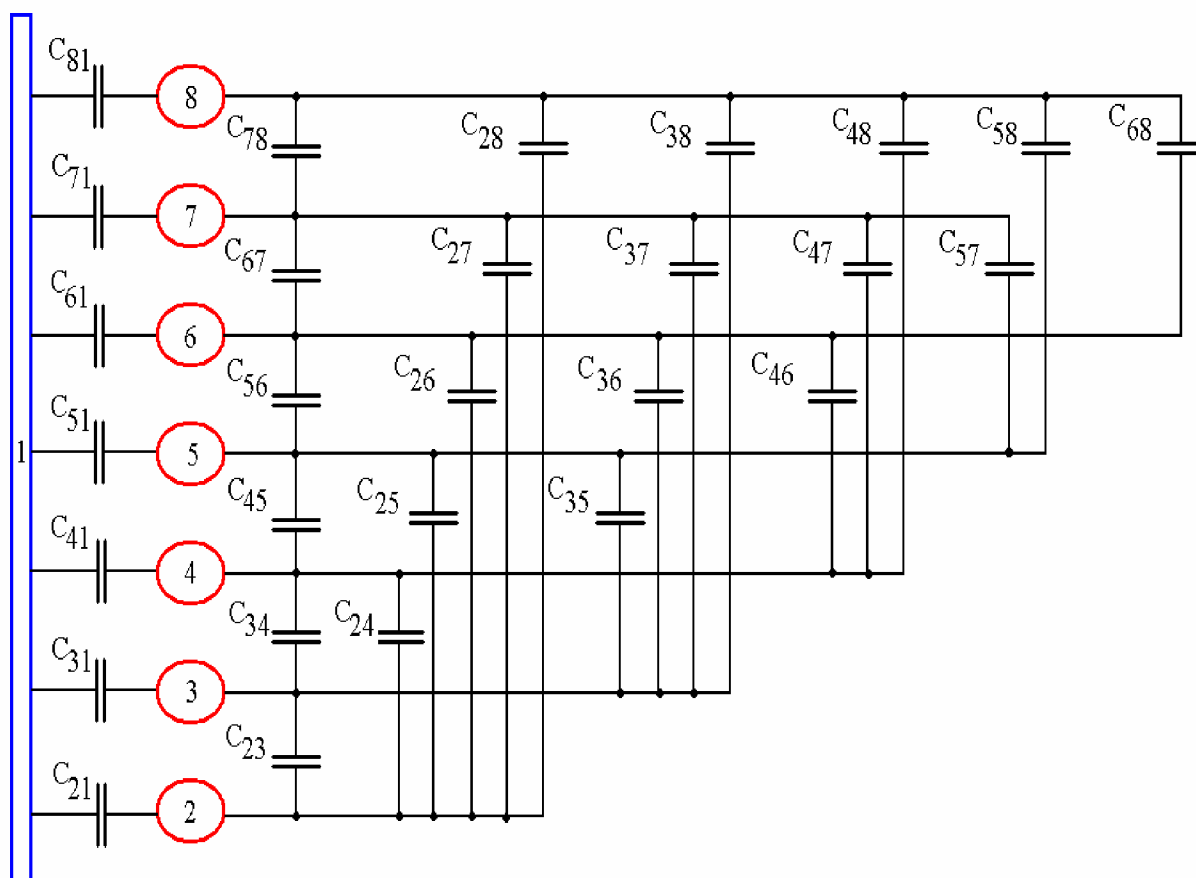


Obr. 5.17 Rozloženie potenciálu v okolí 210 kV zdroja

Matica kapacitných koeficientov, vypočítaná pomocou programu Maxwell 3D za pomoci elektrostatického poľa v okolí daného zdroja (názvy „Voltage 2 až 8“ označujú jednotlivé ekvipotenciálne krúžky):

	Voltage2	Voltage3	Voltage4	Voltage5	Voltage6	Voltage7	Voltage8
Voltage2	14.494	-9.1084	-0.91705	-0.35922	-0.17255	-0.091815	-0.073235
Voltage3	-9.1084	20.599	-8.5438	-0.70173	-0.25798	-0.12283	-0.09199
Voltage4	-0.91705	-8.5438	20.65	-8.5184	-0.69146	-0.25804	-0.17296
Voltage5	-0.35922	-0.70173	-8.5184	20.658	-8.5168	-0.70176	-0.36001
Voltage6	-0.17255	-0.25798	-0.69146	-8.5168	20.648	-8.5455	-0.91653
Voltage7	-0.091815	-0.12283	-0.25804	-0.70176	-8.5455	20.584	-9.0978
Voltage8	-0.073235	-0.09199	-0.17296	-0.36001	-0.91653	-9.0978	14.432

Obr. 5.18 Matica kapacitných koeficientov pre zdroj 210 kV



Obr. 5.19 Kapacity medzi elektródami pre zdroj 210 kV

Výpočet vlastních a vzájemných kapacit:

$$C_{21} = \sum_{j=2}^8 \beta_{2j} = 14,494 - 9,1084 - 0,91705 - 0,35922 - 0,091815 - 0,073235 = 3,9442 \text{ pF}$$

$$C_{31} = \sum_{j=2}^8 \beta_{3j} = -9,1084 + 20,599 - 8,5438 - 0,70173 - 0,25798 - 0,12283 - 0,09199 = 1,7722 \text{ pF}$$

$$C_{41} = \sum_{j=2}^8 \beta_{4j} = -0,91705 - 8,5438 + 20,65 - 8,5184 - 0,69146 - 0,25804 - 0,17296 = 1,5482 \text{ pF}$$

$$C_{51} = \sum_{j=2}^8 \beta_{5j} = -0,35922 - 0,70173 - 8,5184 + 20,658 - 8,5168 - 0,70176 - 0,36001 = 1,5 \text{ pF}$$

$$C_{61} = \sum_{j=2}^8 \beta_{6j} = -0,17255 - 0,25798 - 0,69146 - 8,5168 + 20,648 - 8,5455 - 0,91653 = 1,5471 \text{ pF}$$

$$C_{71} = \sum_{j=2}^8 \beta_{7j} = -0,091815 - 0,12283 - 0,25804 - 0,70176 - 8,5455 + 20,584 - 9,0978 = 1,7662 \text{ pF}$$

$$C_{81} = \sum_{j=2}^8 \beta_{8j} = -0,073235 - 0,09199 - 0,17296 - 0,36001 - 0,91653 - 9,0978 + 14,432 = 3,7194 \text{ pF}$$

$$C_{23} = -\beta_{23} = 9,1084 \text{ pF}$$

$$C_{24} = -\beta_{24} = 0,9170 \text{ pF}$$

$$C_{25} = -\beta_{25} = 0,3592 \text{ pF}$$

$$C_{26} = -\beta_{26} = 0,1725 \text{ pF}$$

$$C_{27} = -\beta_{27} = 0,0918 \text{ pF}$$

$$C_{28} = -\beta_{28} = 0,0732 \text{ pF}$$

$$C_{34} = -\beta_{34} = 8,5438 \text{ pF}$$

$$C_{35} = -\beta_{35} = 0,7017 \text{ pF}$$

$$C_{36} = -\beta_{36} = 0,2579 \text{ pF}$$

$$C_{37} = -\beta_{37} = 0,1228 \text{ pF}$$

$$C_{38} = -\beta_{38} = 0,0919 \text{ pF}$$

$$C_{45} = -\beta_{45} = 8,5184 \text{ pF}$$

$$C_{46} = -\beta_{46} = 0,6914 \text{ pF}$$

$$C_{47} = -\beta_{47} = 0,2580 \text{ pF}$$

$$C_{48} = -\beta_{48} = 0,1729 \text{ pF}$$

$$C_{56} = -\beta_{56} = 8,5168 \text{ pF}$$

$$C_{57} = -\beta_{57} = 0,7017 \text{ pF}$$

$$C_{58} = -\beta_{58} = 0,36 \text{ pF}$$

$$C_{67} = -\beta_{67} = 8,5455 \text{ pF}$$

$$C_{68} = -\beta_{68} = 0,9165 \text{ pF}$$

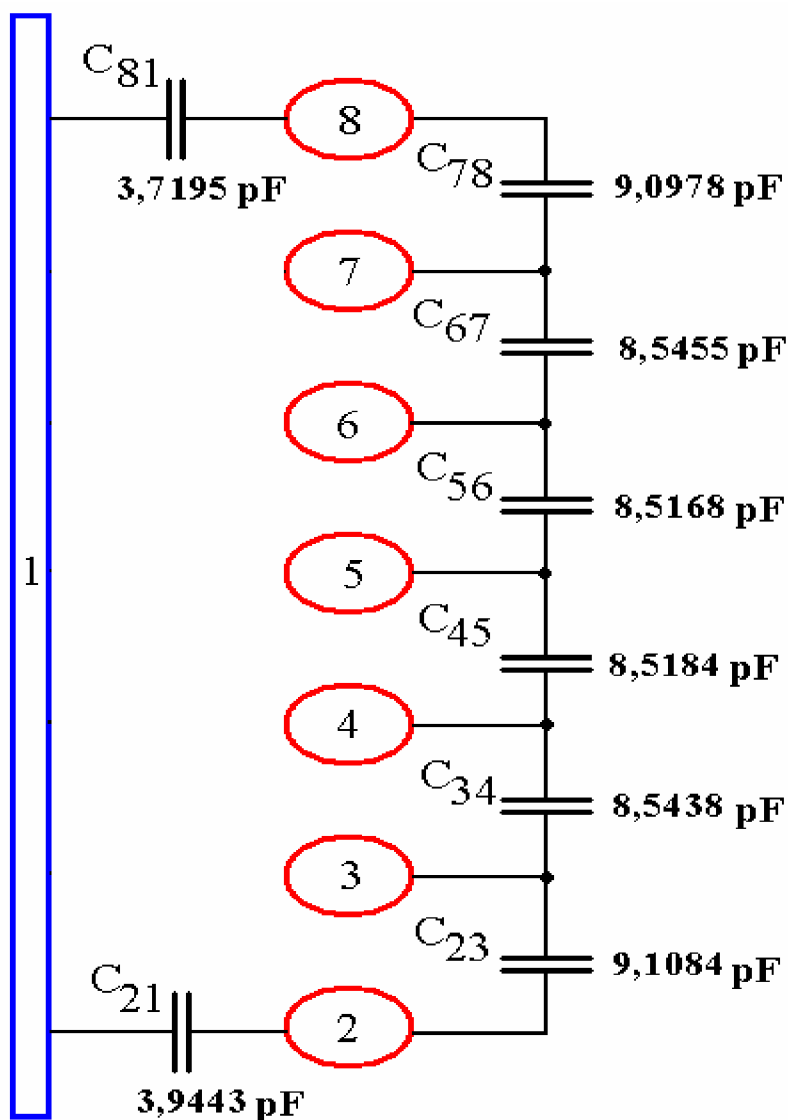
$$C_{78} = -\beta_{78} = 9,0978 \text{ pF}$$

Zo získaných výsledkov je patrné, že niektoré z vypočítaných kapacít nemajú praktický význam, sú omnoho menšie ako ostatné, a je teda možné určiť kapacity, ktoré sú pre prax významné. Tieto významné kapacity obsahuje následná tabuľka.

Tab. 5-3 Dôležité kapacity pre zdroj 210 kV

	$C_{23}$	$C_{78}$	$C_{67}$	$C_{34}$	$C_{45}$	$C_{56}$	$C_{21}$	$C_{81}$
<b>Kapacita [pF]</b>	9,1084	9,0978	8,5455	8,5438	8,5184	8,5168	3,9443	3,7195

Schému kapacít pre zdroj 210 kV môžeme teda pre prax zjednodušiť ako ukazuje nasledujúci obrázok.



Obr. 5.20 Dôležité kapacity pre zdroj 210 kV

Zo simulácie elektrostatického poľa ďalej vyplýva, že geometria zdroja odpovedá predpokladom a nenastáva prekročenie elektrickej pevnosti izolačného média medzi ekvipotenciálnymi krúžkami.

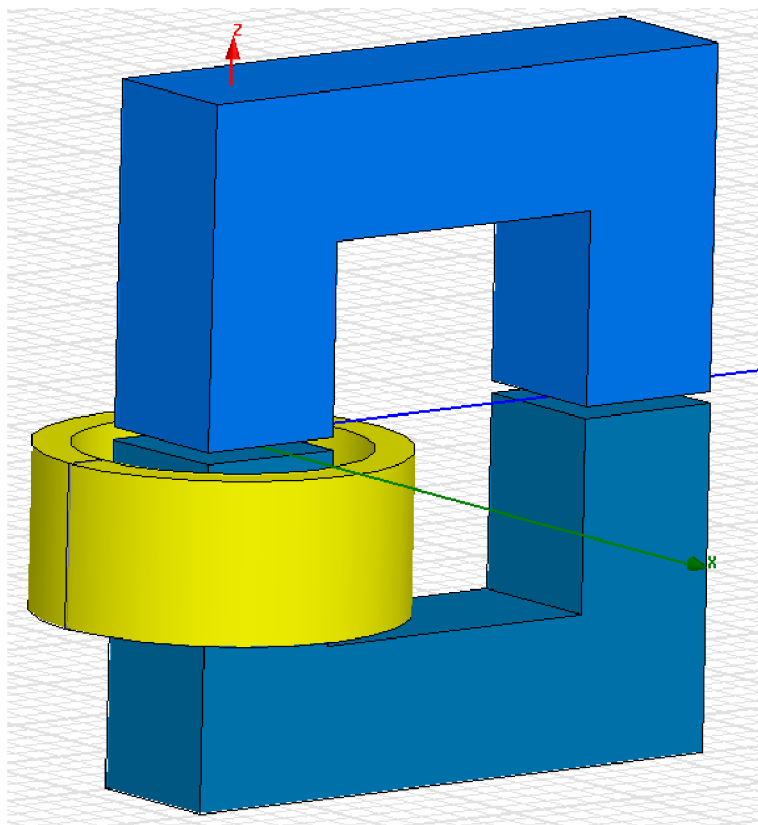


### 5.3 Indukčnosť cievky transformátora

Cieľom tejto úlohy je zistiť indukčnosť cievky transformátora, ktorého časti feritového jadra sú od seba oddelene vzduchovou medzerou o veľkosti 1,5 mm, za pomoci analýzy v programe Maxwell 3D. Dôvodom tejto analýzy je odlišnosť výsledku fyzického merania indukčnosti cievky daného transformátora, ktorá bola nameraná na úrovni 111,18 mH, a vypočítanou hodnotou, zo znalosti parametrov transformátora a magnetického toku, ktorá bola určená na úrovni 74,29 mH. Úlohou simulácie je teda zistiť, ktorá z hodnôt bude považovaná za referenčnú hodnotu.

Ďalej bude za pomoci analýzy zmeraná závislosť indukčnosti cievky transformátora na veľkosti vzduchovej medzere.

Transformátor pozostáva z feritového jadra, ktoré sa skladá z dvoch častí tvaru U, ktoré sú spojené prostredníctvom vzduchovej medzery ovplyvňujúcej indukčnosť cievky namotanej okolo feritového jadra. Cievka má 540 závitov a na jeden závit pripadá 150 mA.



Obr. 5.21 Napájací transformátor

Úloha bude riešená pomocou programu Maxwell 3D a magnetostatickej analýzy, v ktorej je možné zdefinovať výpočet indukčnosti cievky, ktorý je viazaný na definovaný prúd cievkou. Výsledkom je indukčnosť na jeden závit  $A_l$ , z ktorého je možné dopočítať celkovú indukčnosť cievky.

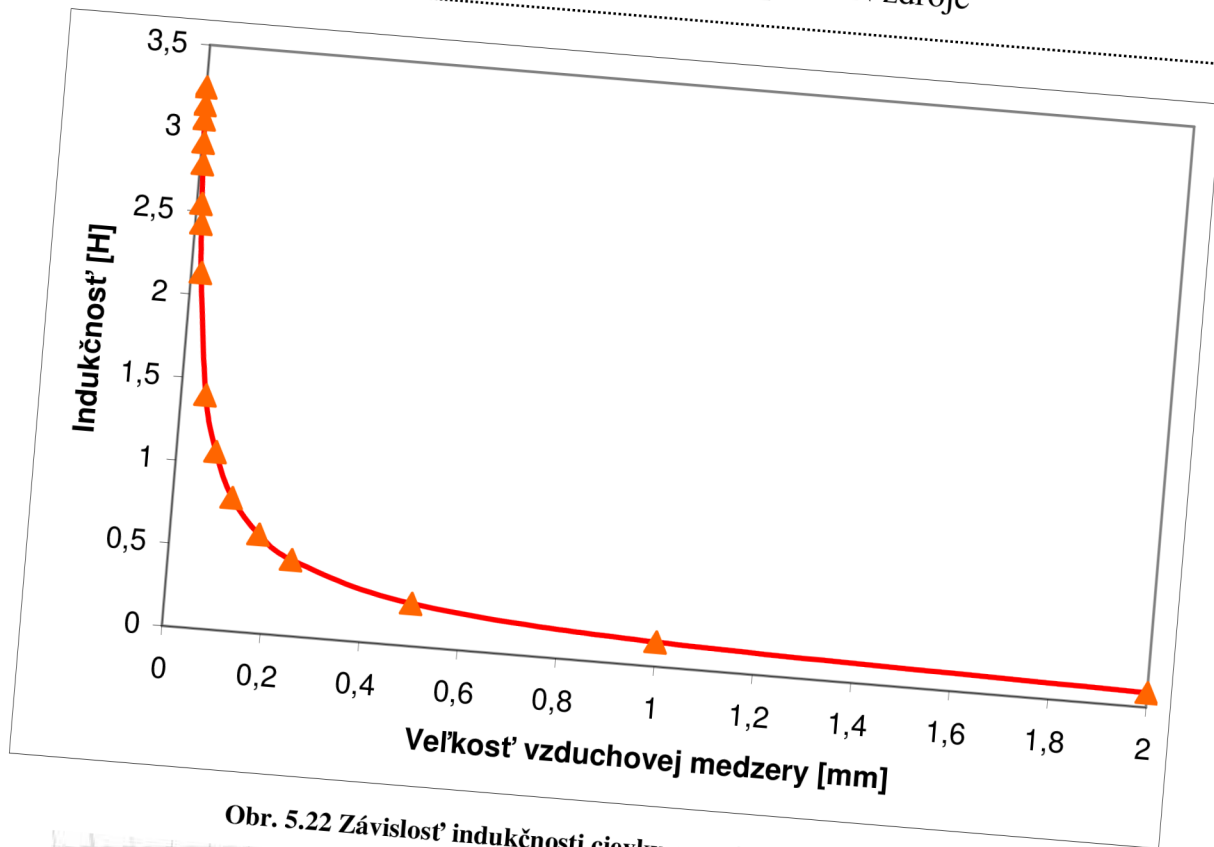
Meranie bolo vykonávané postupným odd'ľovaním feritových častí a za každým bola doložená indukčnosť pomocou magnetostatickej analýzy a zapísané do tabuľky.

Príklad výpočtu indukčnosti pre medzeru 1,5 mm :

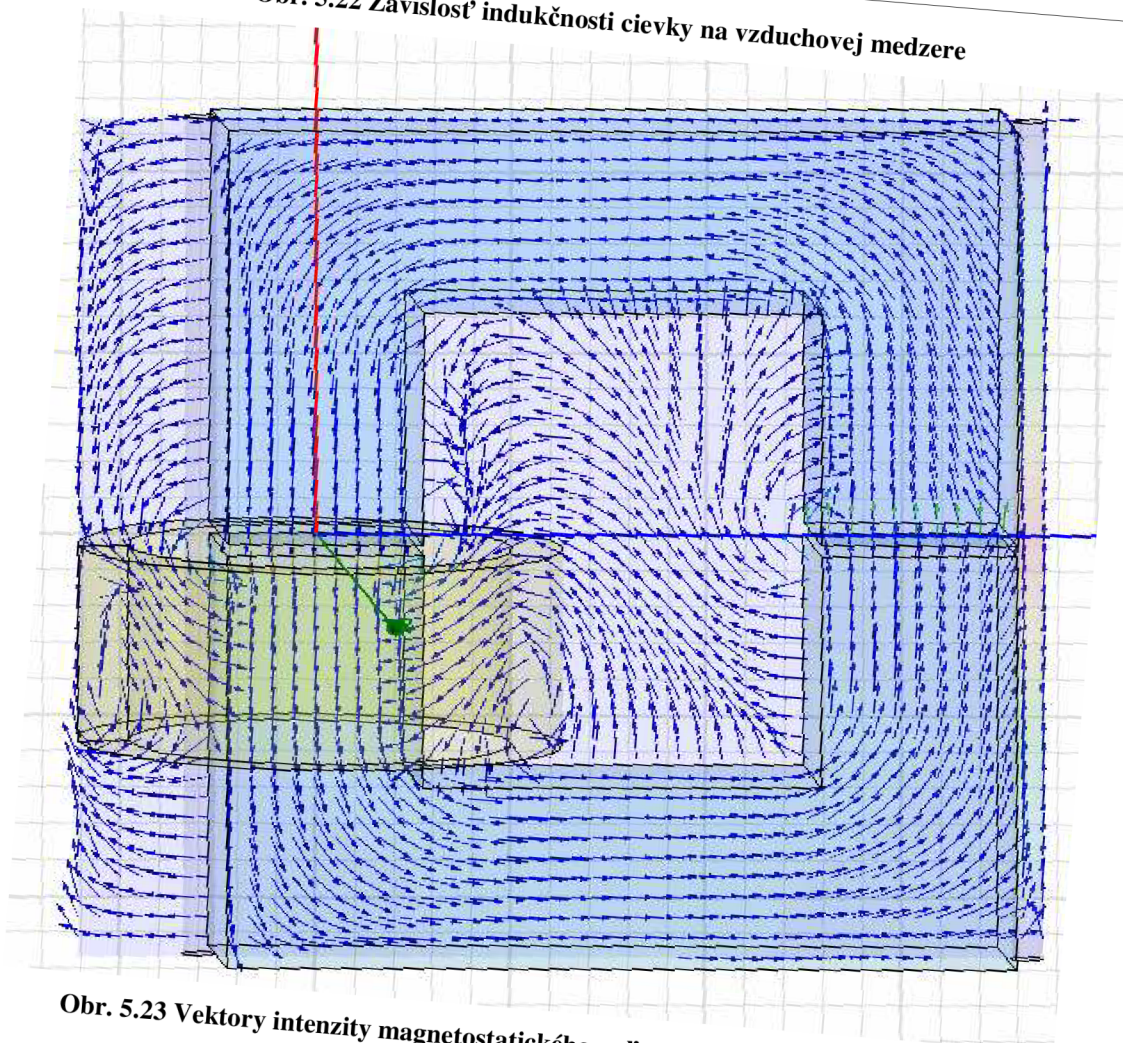
$$L = A_l \times N^2 = 0,375 \times 540^2 = 109350 \mu\text{H} = 0,1094 \text{ H} \quad (5.13)$$

Tab. 5-4 Namerané a vypočítané indukčnosti cievky transformátora za pomoci magnetostatickej analýzy

medzera [mm]	$A_l$ [ $\mu\text{H}$ ]	$L$ [H]
0	11,133	3,2463
0,001	10,768	3,1399
0,002	10,475	3,0545
0,004	9,99	2,9131
0,006	9,55	2,7848
0,01	8,732	2,5463
0,013	8,323	2,4271
0,02	7,319	2,1340
0,05	4,811	1,4028
0,08	3,663	1,0681
0,12	2,747	0,8009
0,18	2,046	0,5964
0,25	1,573	0,4586
0,5	0,886	0,2584
1	0,507	0,1477
1,5	0,375	0,1094
2	0,304	0,0885



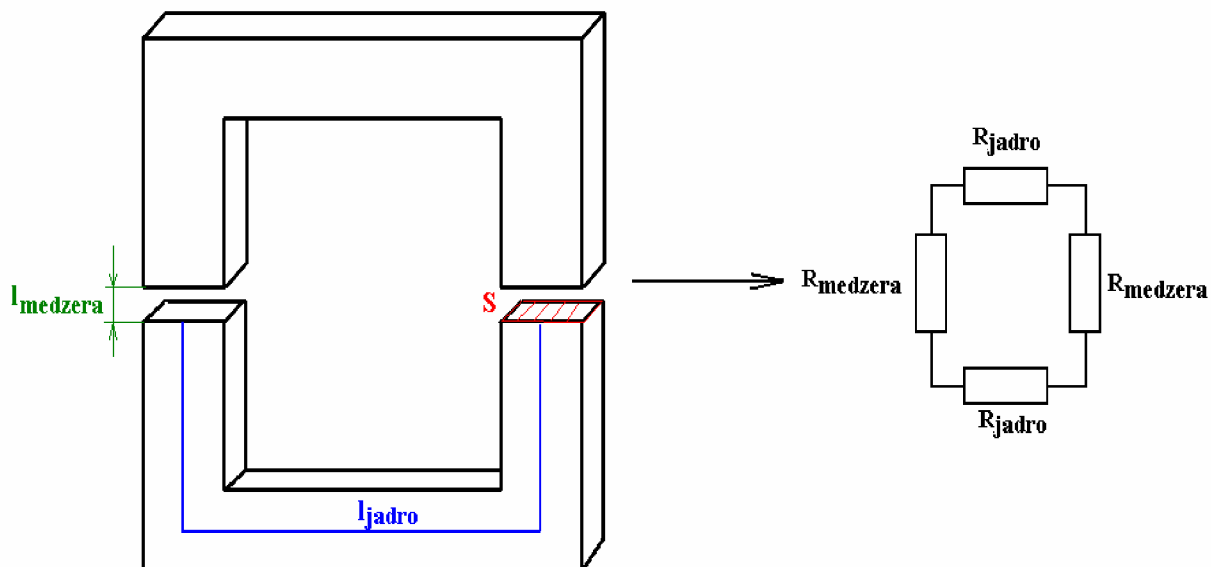
Obr. 5.22 Závislosť indukčnosti cievky na vzduchovej medzere



Obr. 5.23 Vektory intenzity magnetostatického poľa v okolí jadra transformátora

**Výpočet indukčnosti cievky z parametrov transformátora:**

Parametre transformátora:

Stredná dĺžka feritového jadra U:  $l_{jadro} = 165 \text{ mm}$ Dĺžka vzduchovej medzery:  $l_{medzera} = 1,5 \text{ mm}$ Obsah prierezu feritového jadra:  $S = 625 \text{ mm}^2$ Permeabilita vákuua :  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ Relatívna permeabilita feritu:  $\mu_r = 4000$ 

Obr. 5.24 Prevod transformátora z magnetického obvodu na elektrický

Magnetický odpor jadra :

$$R_{jadro} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{165 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4000 \cdot 625 \cdot 10^{-6}} = 52,5211 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (5.14)$$

Magnetický odpor vzduchovej medzery:

$$R_{medzera} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 625 \cdot 10^{-6}} = 1,9099 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

Celkový magnetický odpor obvodu:

$$R = 2 \cdot R_{jadro} + 2 \cdot R_{medzera} = 2 \cdot 52,5211 \cdot 10^3 + 2 \cdot 1,9099 \cdot 10^6 = 3,9248 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

Indukčnosť na jeden závit:

$$A_l = \frac{1}{R} = \frac{1}{3,9248 \cdot 10^6} = 0,2548 \text{ } \mu\text{H} \quad (5.15)$$

Celková indukčnosť cievky o 540 závitoch:

$$L = A_l \cdot N^2 = 0,2548 \cdot 10^{-6} \cdot 540^2 = 0,07429 \text{ H}$$

Tab. 5-5 Tabuľka s vypočítanými a nameranými hodnotami indukčnosti pre vzduchovú medzeru 1,5 mm

	<b>Fyzické meranie</b>	<b>Výpočet z parametrov</b>	<b>Simulácia</b>
<b>Indukčnosť [mH]</b>	111,18	74,29	109,437

Pri porovnaní hodnôt nameraných, pomocou fyzického merania, a vypočítaných z parametrov transformátora a cievky je vidieť veľkú odlišnosť a preto bolo pristúpené k simulácii v prostredí Maxwell 3D, ktorá potvrdila výsledky fyzického merania. Výsledky simulácia sa veľmi približujú k nameranej hodnote, čím bolo dokázané, že v praktických úlohách takéhoto typu sa považuje za referenčnú hodnotu iba hodnota nameraná. Výpočet z parametrov transformátora nemôže byť považovaný za presný, pretože nezahrňuje vplyv rozptylových polí a teda sa od skutočnej hodnoty v tomto prípade odlišuje o približne 33 %. Rýchlosť výpočtu pomocou simulácie je časovo porovnateľný s klasickým výpočtom, ale výpočet pomocou simulácie je oveľa presnejší.

Z vypočítaných hodnôt pomocou simulácie, ktoré boli vynesené do grafu, je vidieť ako vzduchová medzera výrazne vplýva na indukčnosť cievky. Hlavne pri malých medzerách je vidieť aká výrazná je zmena indukčnosti. Pri zmene medzery z 0 mm na 1  $\mu\text{m}$  je zmena indukčnosti približne 0,1 H čo je značná hodnota, ktorá môže vplývať na činnosť celkového zariadenia. Pri medzere 0,05 mm je indukčnosť oproti indukčnosti pri medzere 0 mm už menej ako polovica. Od veľkosti medzery 1 mm je zmena indukčnosti oveľa menšia a pomaly sa ustáľuje.

Z merania vyplýva, že vzduchová medzera má veľký vplyv na indukčnosť cievky transformátora a táto skutočnosť musí byť pri návrhu a výrobe týchto zariadení zohľadňovaná.

## 6 Záver

Práca poskytla prehľad možnosti 3 programov pre simulovanie dvojrozmerných a trojrozmerných elektromagnetických polí a to Opera 3D, Maxwell 2D (3D) a FEMM. Na základe odborných prednášok, školení, konzultácii s odborníkmi a samotnej práce v daných programoch bolo vykonané porovnanie a výber najvhodnejšieho z nich. Zo zrovnania týchto programov je zrejmé, že najlepšie z hľadiska prostredia, užívateľského komfortu a celkovo možností obstál program Maxwell, ktorý je však zo spomínaných programov najdrahší. Cena tohoto produktu sa pohybuje okolo 55 000 €. Opera 3D ponúka tiež množstvo možností avšak vo viacerých smeroch zaostáva za programom Maxwell, hlavne v užívateľskom prostredí a komforte. Cena tohto produktu, zahrňujúca analyzačné programy Tosca a Elektra, je okolo 20 000 €. Posledným programom, o ktorom bolo v práci pojednávané, je program FEMM, avšak len z jediného dôvodu a to, že umožňuje modelovanie iba v dvojrozmernom priestore. V iných ohľadoch je to jednoduchý a prehľadný program, v ktorom je možné riešiť aj zložitejšie geometrie. Jeho obrovskou výhodou je jeho dostupnosť, pretože ako jediný z programov, ktorým som sa v práci venoval, je zadarmo a môže si ho voľne stiahnuť ktokoľvek.

V praktickej časti práce boli riešene 3 úlohy, ktorými boli výpočet kapacity kondenzátora, riešenie elektrostatického poľa v okolí sekcií VN zdroja a riešenie indukčnosti cievky transformátora za pomoci magnetostatickej analýzy. Výpočet kapacity plošného kondenzátora bol prevedený prostredníctvom všetkých troch programov a výsledky boli porovnané s numerickým ručným výpočtom. Úloha ukázala možnosti riešenia kapacít v daných programoch. Výpočet pomocou Opery 3D a FEMM bol nepraktický a pre riešenie kapacít väčšej zostavy takmer nemožný, preto na riešenie kapacít je vhodný hlavne program Maxwell 3D. Ďalšia z praktických úloh sa zaoberala problematikou a analýzou elektrostatického poľa v okolí VN sekcií napájacích zdrojov. Konkrétne boli analyzované dva kaskádne generátory vysokého jednosmerného napätia 120 kV a 210 kV, pozostávajúce z viacerých stupňov násobiča napätia, medzi ktorými sa nachádzajú ekvipotenciálne krúžky. Na základe vypočítaného rozloženia elektrostatického poľa v programe Maxwell 3D boli určené vlastné a vzájomné kapacity medzi jednotlivými ekvipotenciálnymi krúžkami, ktorých znalosť je dôležitá pri samotnom vývoji spomínaných zdrojov. Ďalej bol overený predpoklad neprekročenia elektrickej pevnosti izolačného média medzi ekvipotenciálnymi krúžkami a teda nenastáva prieraz medzi krúžkami. Poslednou praktickou úlohou bolo riešenie indukčnosti cievky transformátora za pomoci magnetostatickej analýzy a porovnanie tejto hodnoty s hodnotou nameranou a vypočítanou. Súčasťou tejto úlohy bolo aj zmeranie závislosti indukčnosti na veľkosti vzduchovej medzery medzi časťami feritového jadra transformátora. Táto úloha ukázala, že aj veľmi malá vzduchová medzera ma veľký vplyv na indukčnosť cievky. Čím väčšia bola vzduchová medzera tým menšia bola indukčnosť cievky.

Práca ukázala možnosti a prednosti počítačového simulovania elektromagnetických polí, ktoré výrazne uľahčujú, ale hlavne spresňujú prácu vývojových inžinierov. Počítačové simulácie polí je možné uplatniť na široký rozsah návrhových prác, a preto sa ich používanie v budúcnosti bude určite rozširovať do rôznych oblasti priemyslu.

---

## Conclusion

The thesis provided an overview of possibilities of 3 programs for simulating two-dimensional and three-dimensional electromagnetic fields, which are the Opera 3D, Maxwell 2D (3D) and FEMM. On the basis of presentations, trainings, consultation with experts and the work in these programs was done the comparison and selection of the most suitable of them.

The reconciliation of these programs shows that the best in terms of environment, user comfort and overall program options is program Maxwell, which is the most expensive of the mentioned programs. The price of this product is around € 55 000. Opera 3D offers many opportunities too but in many ways is behind the Maxwell program, especially in the user environment and comfort. The price of this product, including analysis programs Tosca and Elektra, is around € 20 000. The recent program, which was mentioned in the thesis, is the FEMM program, but only for one reason and that it allows modeling of only two-dimensional structures. In other respects, it's simple and transparent program, which can also deal with more complicated geometry. Its great advantage is its availability, because as one of the programs, which I mentioned in the thesis, is free and can be freely downloaded by anyone.

In the practical part of thesis were solved three tasks which were calculating the capacity of a capacitor, solution of the electrostatic field around the sections of HT power supply and solution of transformer coil inductance using magnetostatic analysis. Calculation of surface condenser capacity was performed by all three programs and the results were compared with numerical calculation. The task proved possible solutions of capacities in these programs. Calculation using Opera 3D and FEMM was impractical and for solving of greater structures nearly impossible, therefore, to solve capacity is especially suited Maxwell 3D. The next one of the practical tasks dealt with the problems and analysis of the electrostatic field around HT power supply sections. Specifically were analyzed two cascade generators DC high voltage 120 kV and 210 kV, consisting of several stages of voltage multiplier, between which are equipotential rings. On the basis of the calculated electrostatic field by Maxwell 3D were evaluated self and mutual capacities between equipotential rings, whose knowledge is important for the development of the power supplies. Furthermore, the assumption was verified, that the electrical strength of insulating medium between equipotential rings doesn't exceed and therefore does not occur breakdown between the rings. The last practical task was solution of the coil inductance of the transformer using magnetostatic analysis and comparison of this value with the value measured and calculated. Part of this task was the measurement of inductance depending on the size of the air gap between the ferrite core transformer. This task has shown that very small air gap has a considerable impact on the coil inductance too. The greater the air gap the smaller the coil inductance was.

The thesis has shown the possibilities and advantages of computer simulation of electromagnetic fields, which make the work of development engineers easier, but mainly detailing. Computer simulations of fields can be applied to a wide range of design works, and therefore their use in the future will surely expand into different areas of industry.

---

## 7 Použitá literatura a zdroje

- [1] FEMM User's manual
- [2] Opera 3D, User Guide, Cobham Technical Services, Vector Fields Software, Kidlington, England
- [3] Maxwell v12, Ansoft Maxwell Field Simulator v12, Training Seminar, SVS FEM
- [4] Maxwell v13 User Guide, Ansoft
- [5] Barkanov, E., Introduction to Finite Element Methods, Riga, 2001
- [6] Dědková, J., Modelování elektromagnetických polí, Brno, 2009
- [7] Webové stránky společnosti COBHAM dostupné na: [www.cobham.com](http://www.cobham.com)
- [8] Webové stránky společnosti ANSOFT dostupné na: [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com)
- [9] Webové stránky společnosti HiMARC dostupné na: [www.himarcsimulations.com](http://www.himarcsimulations.com)