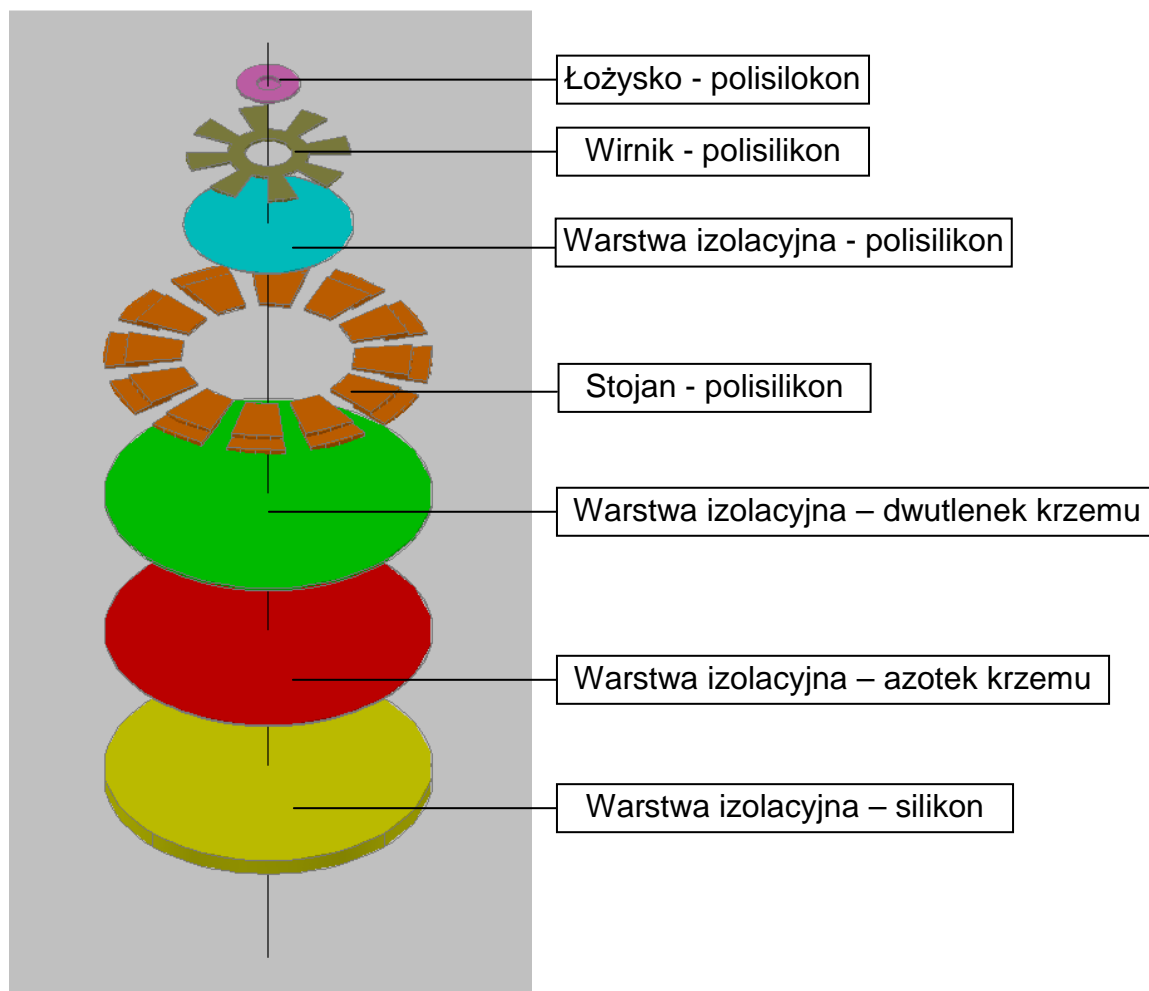


1. Mikrosilnik krzemowy 8/12

1.1. Analiza budowa mikrosilnika krzemowego 8/12

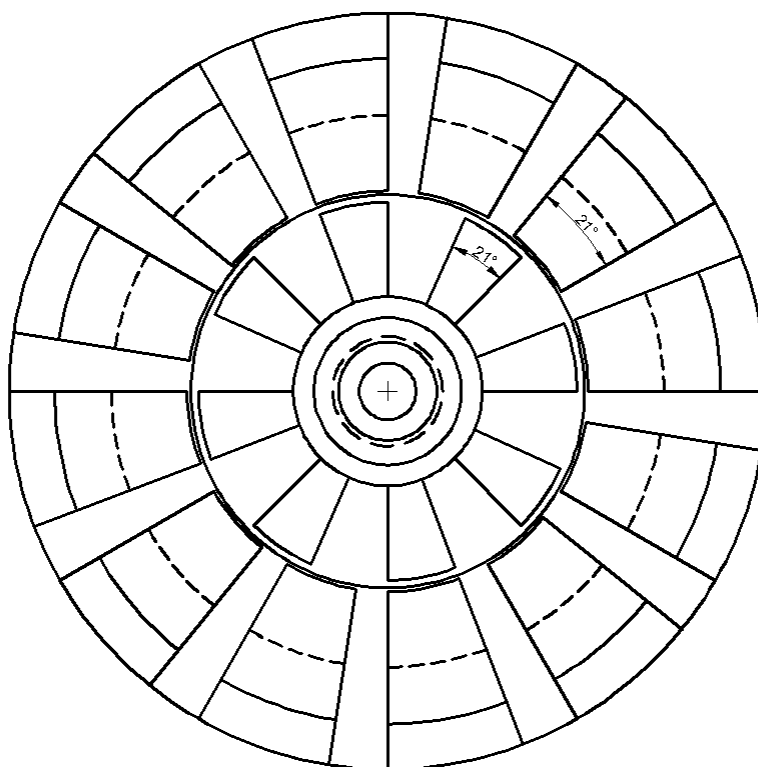
W silniku krzemowym można wyróżnić następujące elementy (warstwy):



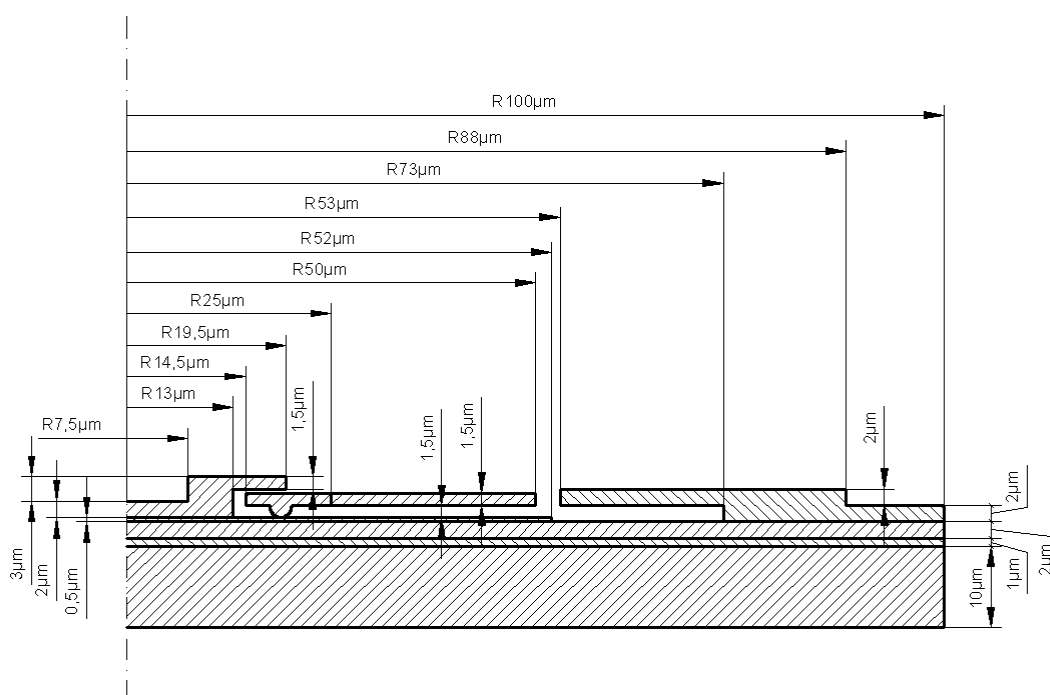
Rys. 1-1 Warstwy w mikrosilniku krzemowym.

Ponadto występują warstwy izolacyjne elektrod stojana i zębów wirnika. Warstwy te ze względu na to że są bardzo cienkie (napylane) można pominąć w modelowaniu.

Mikrosilnik krzemowy typu 8/12 zbudowany jest z 8 zębów wirnika i 12 elektrod umieszczonych na stojanie. Wymiary zębów wirnika i elektrod stojana pokazano na Rys. 1-2 i Rys. 1-3.



Rys. 1-2 Wymiary elektrod stojana i zębów wirnika w mikrosiłniku krzemowym 8/12 – widok z góry.



Rys. 1-3 Wymiary warstw mikrosiłnika krzemowego 8/12 w widoku przekroju.

Na podstawie powyższych danych zostanie utworzony model połowy mikrosiłnika krzemowego.

1.2. Budowa modelu polowego

Model polowy mikrosilnika krzemowego typu 8/12 zostanie utworzony w programie Modeller pakietu Opera 3D.

1.2.1. Tworzenie warstw izolacyjnych

W pierwszym etapie tworzenia modelu zostaną narysowane warstwy izolacyjne mikrosilnika. Warstwy izolacyjne to walce o wymiarach:

Tab. 1-1 Wymiary warstw izolacyjnych w mikrosilniku.

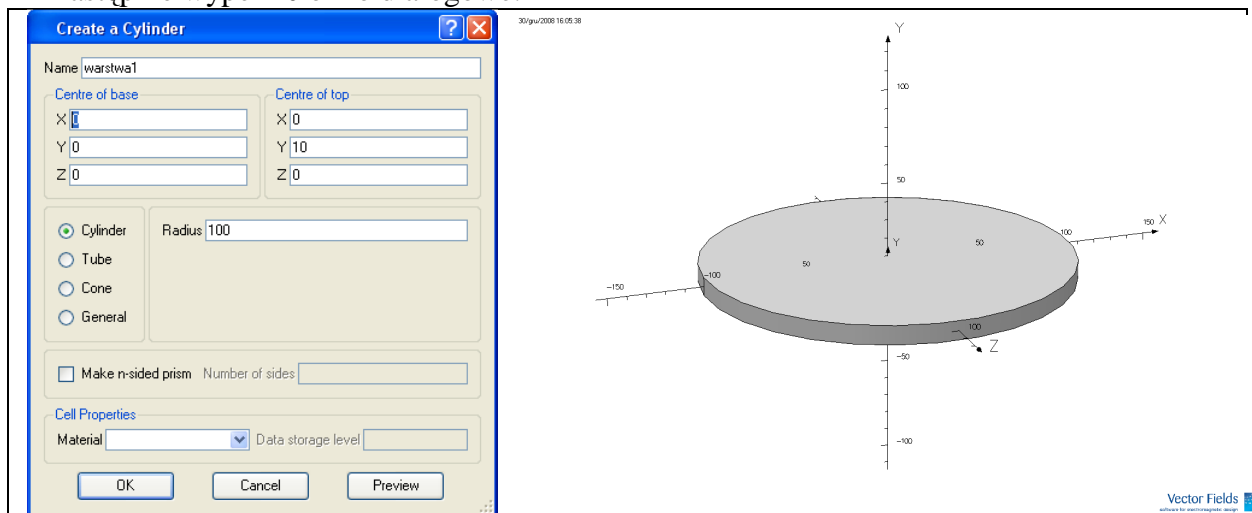
Warstwa izolacyjna	Promień [μm]	Wysokość [μm]
1 – silikon	100	10
2 – azotek krzemu	100	1
3 – dwutlenek krzemu	100	2
4 – polisilikon	52	0.5

Tworzenie warstwy izolacyjnej 1:

z menu górnego wybrać: **Create** → **Object** → **Cylinder/Cone**

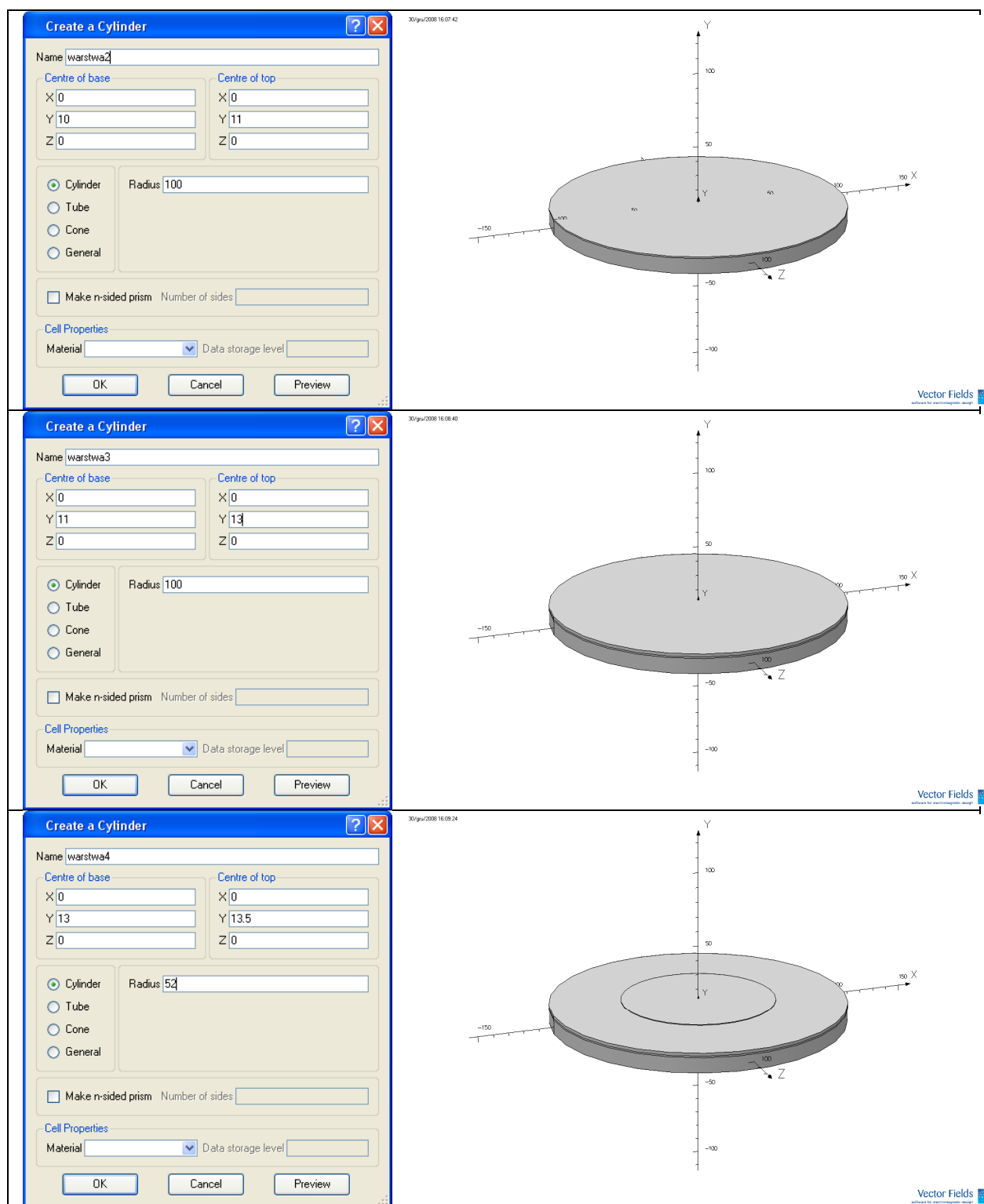
lub z paska narzędziowego: 

A następnie wypełnić okno dialogowe:



Wysokość walca została określona przez współrzędne x dolnej i górnej podstawy.

W analogiczny sposób utworzyć warstwy 2, 3 i 4:





Utworzonym warstwom zostaną przypisane etykiety materiałów, z których są wykonane oraz parametry siatki jaka ma zostać wygenerowana w tych warstwach, a także parametry określające ich ważność.

Etykiety materiałów przypisywane są do komórek, dlatego też należy ustawić tryb zaznaczania komórek:

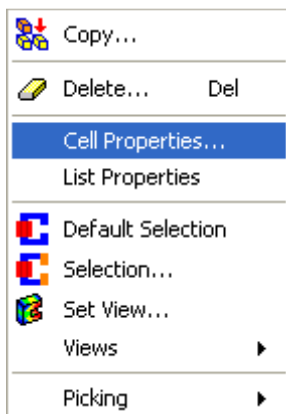
z menu górnego wybrać: **Picking** → **Pick Cells** – tryb wyboru komórek (Cells)

oraz: **Picking** → **Pick Entity** – tryb zaznaczania

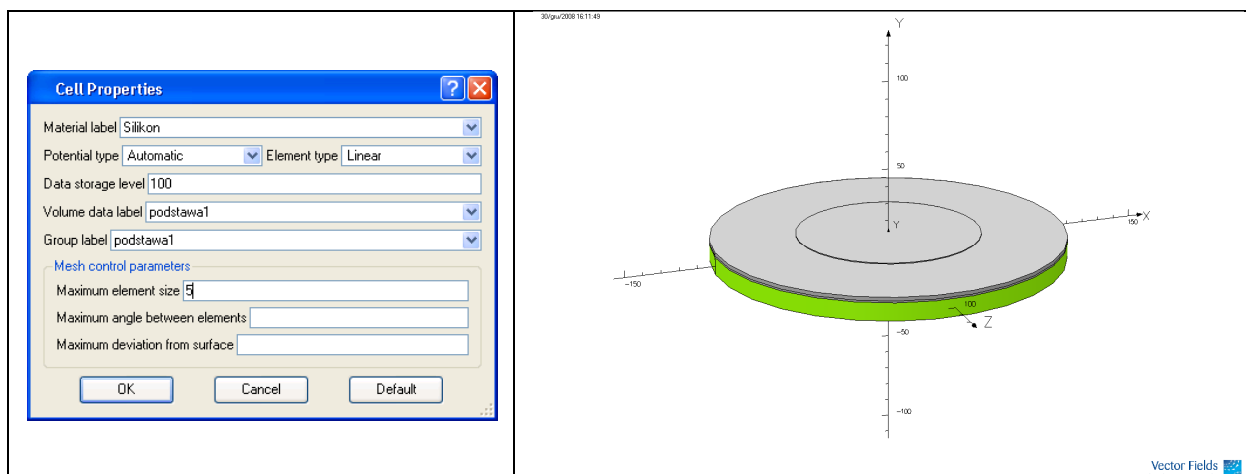
lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

Zaznaczyć warstwę izolacyjną 1 i wybrać z menu górnego: **Properties** → **Cell properties**

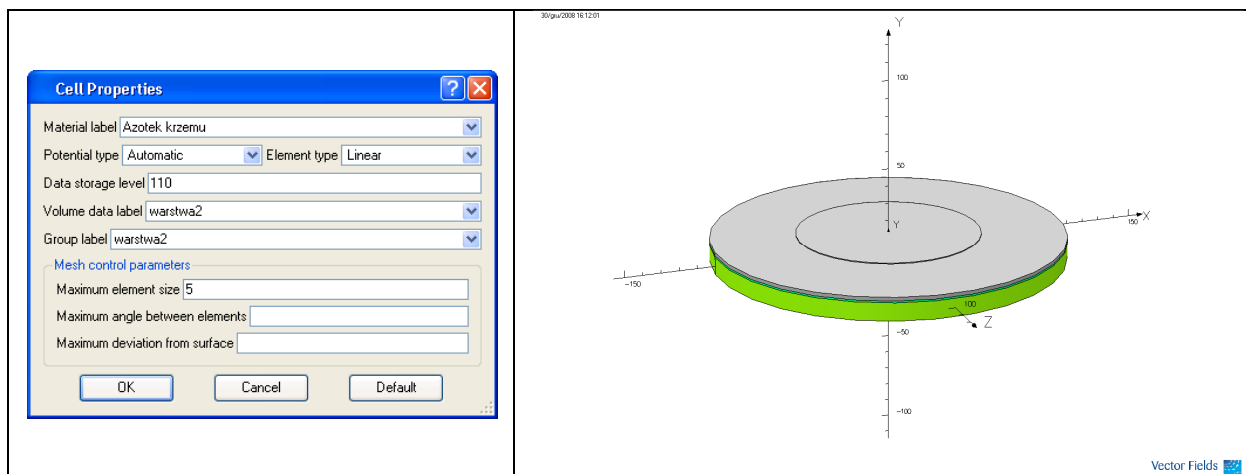
lub nacisnąć prawy przycisk myszy i z menu podręcznego wybrać: **Cell properties** – Rys. 1-4



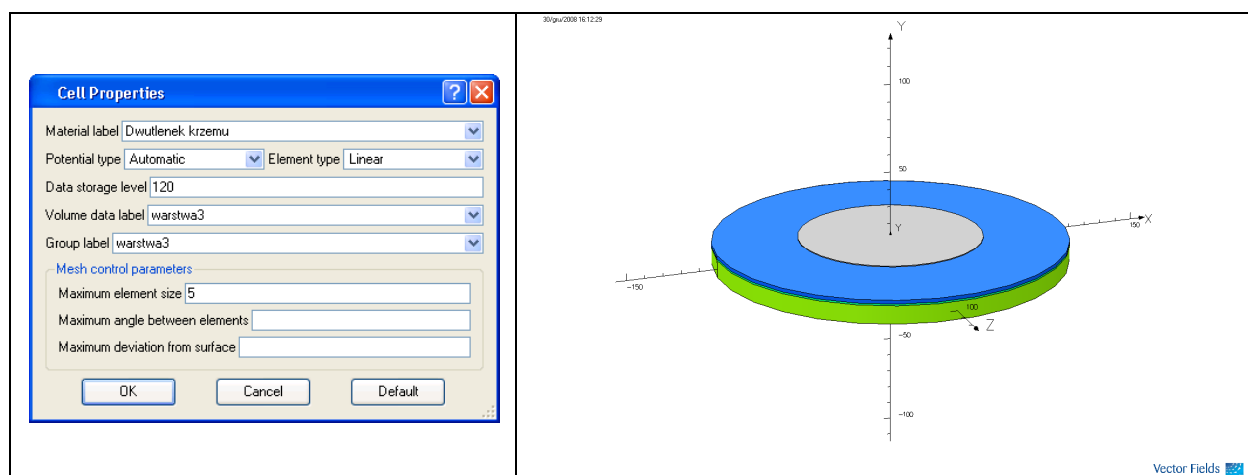
Rys. 1-4 Okno menu podręcznego przy zaznaczonej komórce.



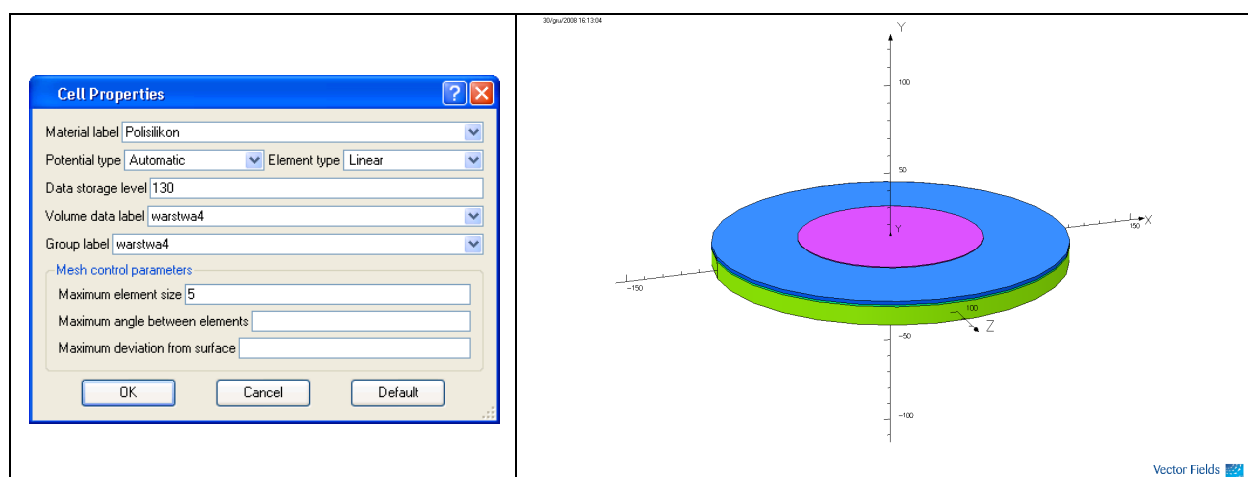
Dla komórki warstwy 2:







Dla komórki warstwy 3:



Dla komórki warstwy 4:



Tab. 1-2 Zestawienie etykiet materiałów i kolorów dla poszczególnych warstw.

Warstwa	Etykieta materiału	Kolor
1	Silikon	
2	Azotek krzemu	
3	Dwutlenek krzemu	
4	Polisilikon	

Uwaga: Dla poszczególnych etykiet mogą zostać wygenerowane inne kolory niż te przedstawione w Tab. 1-2.

1.2.2. Tworzenie stojana mikrosilnika

Drugim etapem tworzenia modelu mikrosilnika jest narysowanie stojana. Na stojanie modelowanego mikrosilnika umieszczone są elektrody.

Zostaną narysowane dwa prostokąty o wymiarach przedstawionych na Rys. 1-3, a następnie zostaną one wyciągnięte po łuku o kąt 21° . Tak utworzona jedna elektroda zostanie skopiowana.


Prostokąty tworzące elektrodę mają parametry przedstawione w Tab. 1-3.

Tab. 1-3 Parametry prostokątów tworzących elektrodę.

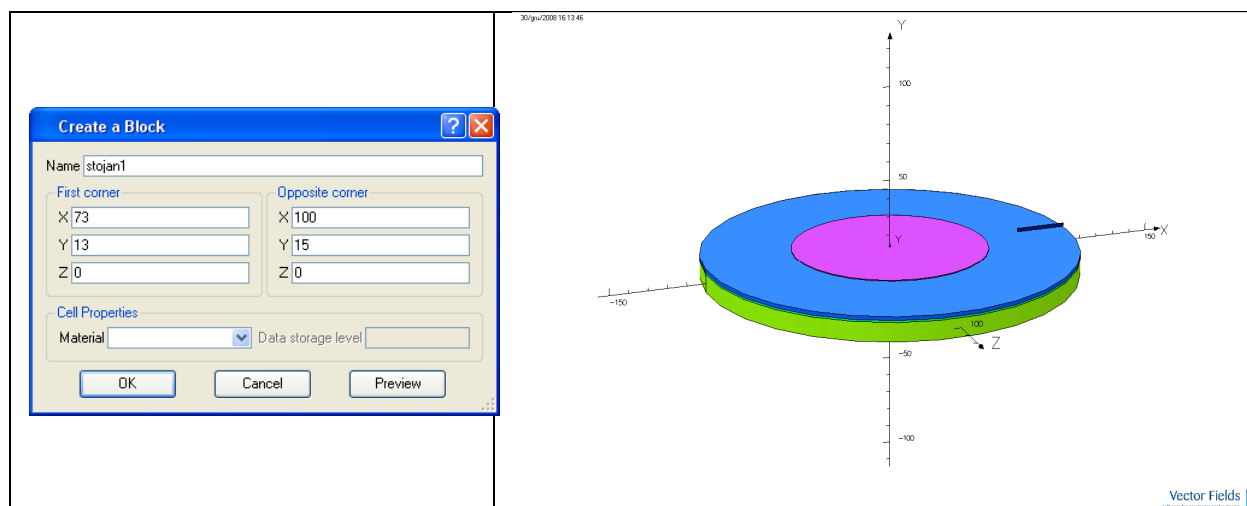
Name	First corner	Opposite corner
stojan1	x=73 y=13 z=0	x=100 y=15 z=0
stojan2	x=53 y=15 z=0	x=88 y=17 z=0

Tworzenie pierwszego prostokąta:

z menu górnego wybrać: **Create** → **Object** – **Block**,
lub

z pasków narzędziowych ikonę: 

A następnie wypełnić okno dialogowe:




Zaznaczyć utworzony prostokąt, a następnie wyciągnąć go z obrotem o kąt 21° :

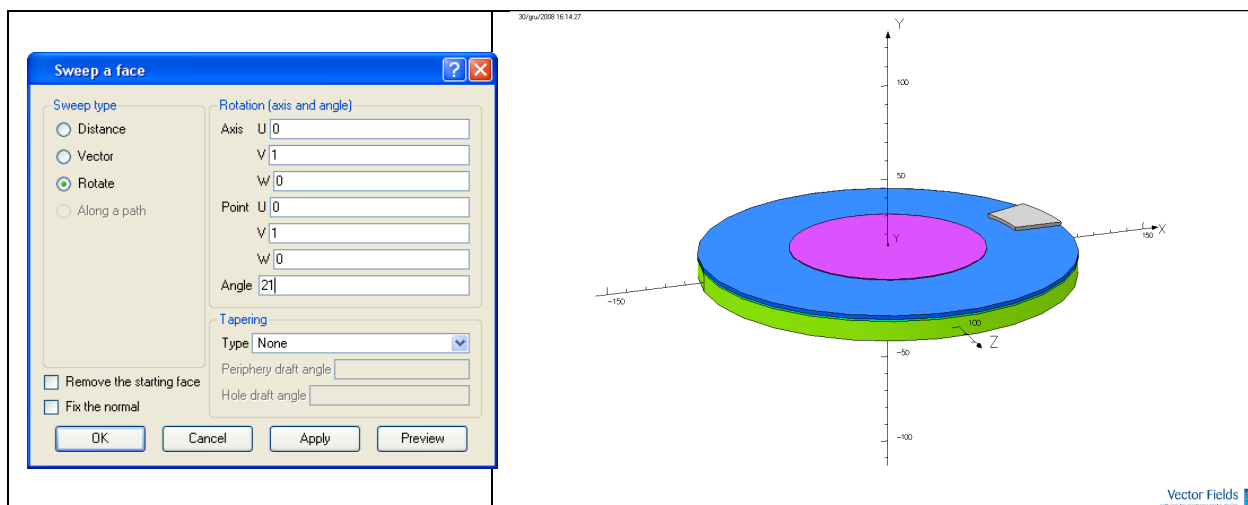
z menu górnego wybrać:

Picking → **Pick Faces**

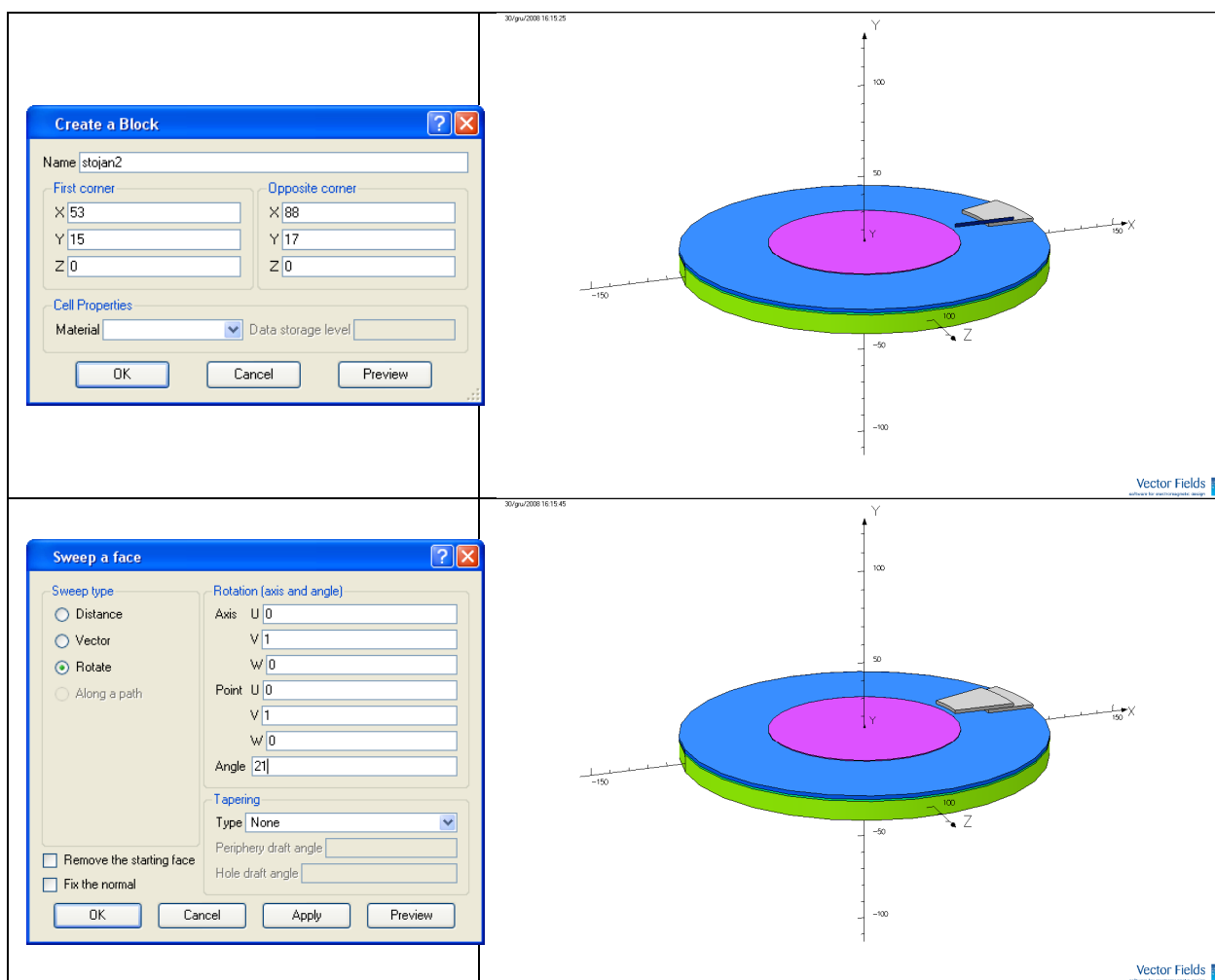
Picking → **Pick Entity**

lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

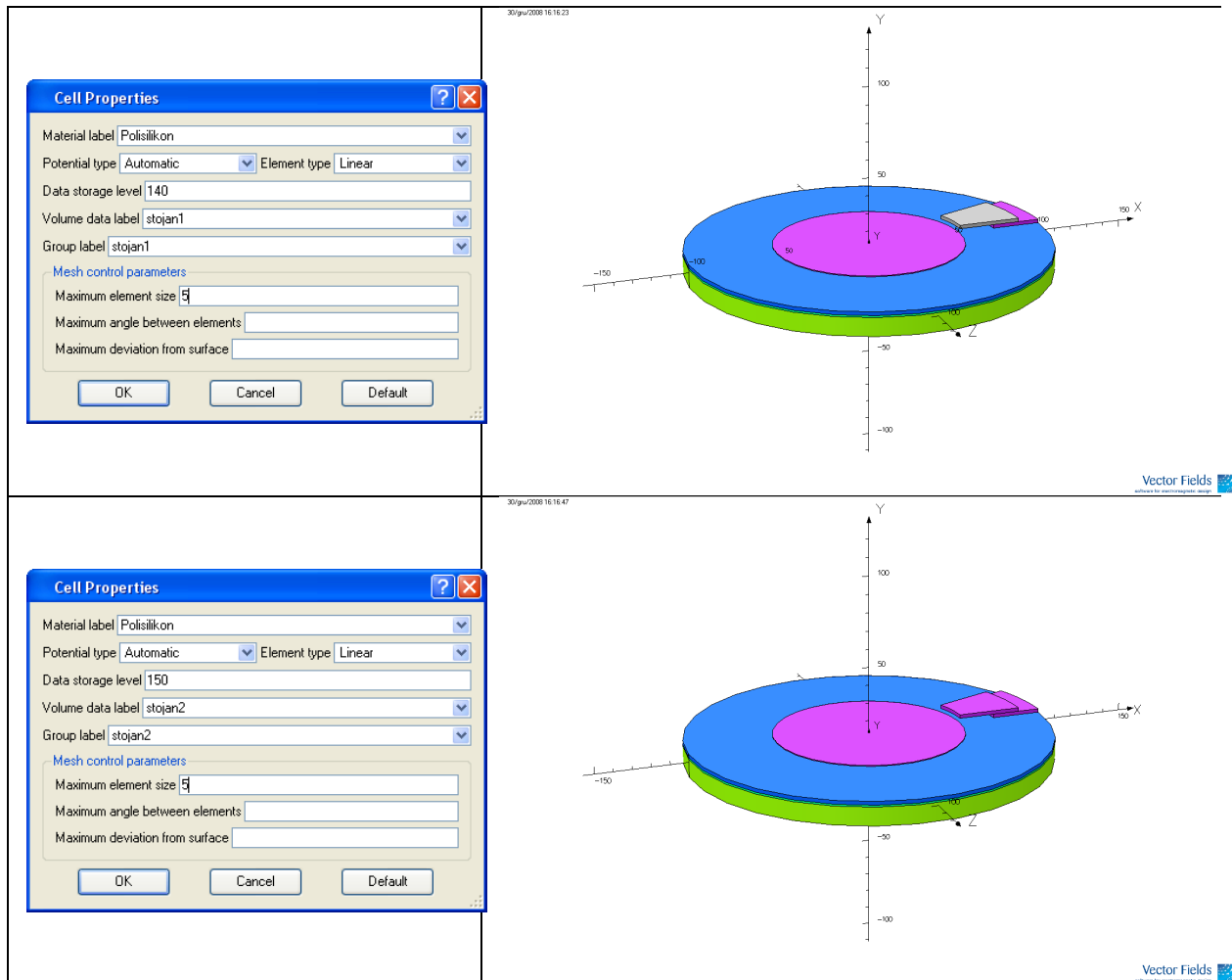
Zaznaczyć prostokąt i z menu górnego wybrać: **Operations** → **Sweep Face...** (lub z menu podręcznego) i wypełnić okno dialogowe:



W analogiczny sposób narysować drugą część elektrody.





Utworzonym komórkom przypisać etykiety materiałów (zgodnie z Rys. 1-1), parametry siatki analogicznie jak dla poprzednich warstw.



Zsumować bryły tworzące elektrodę bez podziału na komórki:

z menu górnego wybrać:
Picking → **Pick Bodies**
Picking → **Pick Entity**

lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

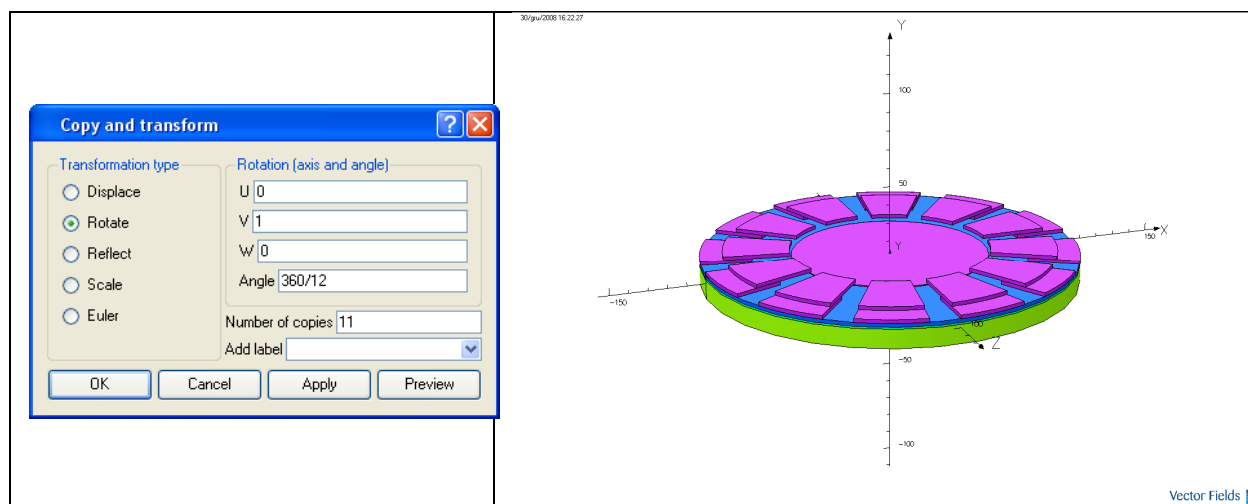
Zaznaczyć obie części elektrody, z menu górnego wybrać: **Operations** → **Combine Bodies** → **Union, without regularization**.

Skopiować elektrodę tak aby na stojanie było 12 elektrod:

z menu górnego wybrać:
Picking → **Pick Bodies**
Picking → **Pick Entity**

lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

Zaznaczyć elektrodę, z menu górnego wybrać: **Operations** → **Copy...** (lub z menu podręcznego) i wypełnić okno dialogowe.



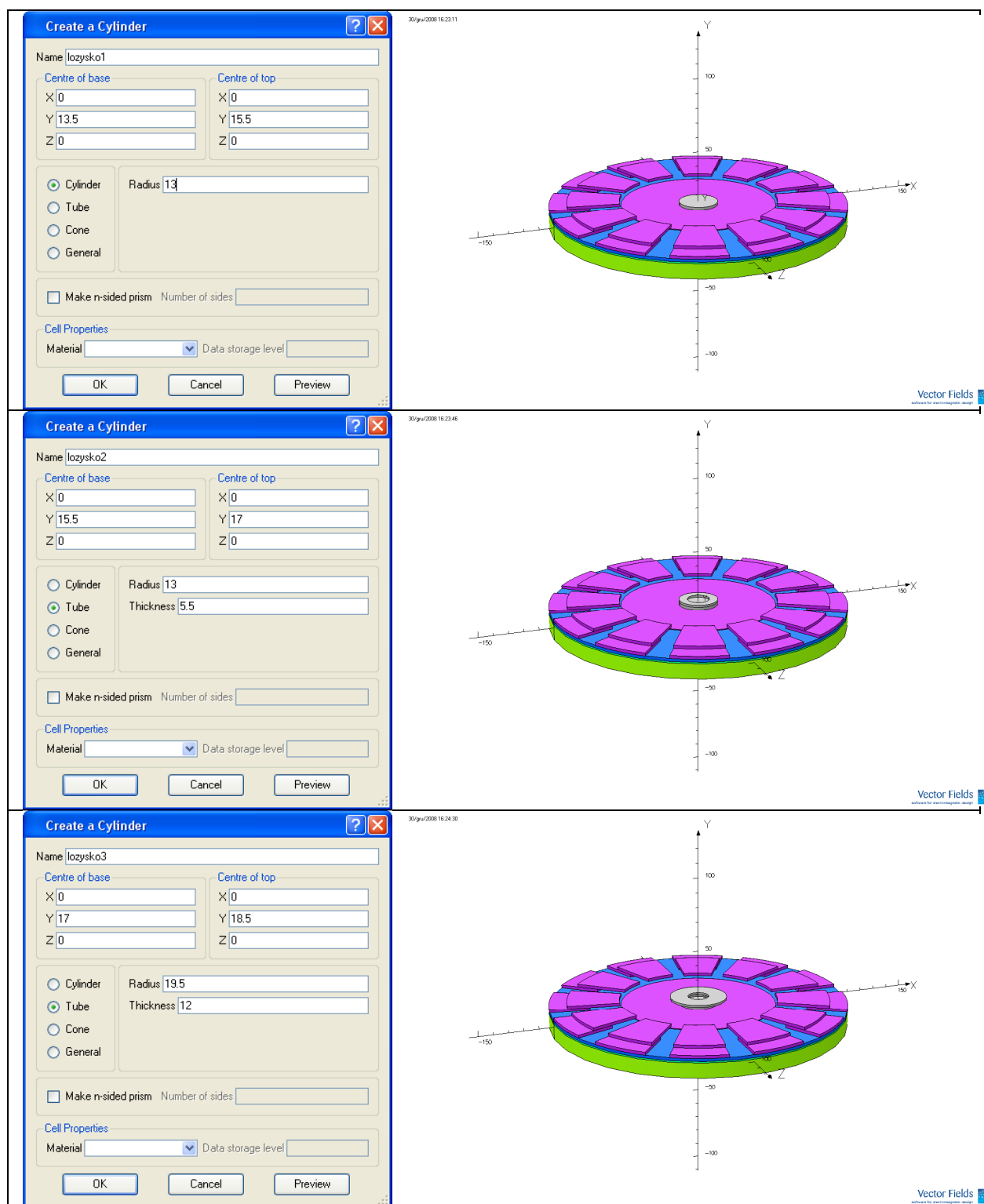
1.2.3. Tworzenie łożyska wirnika

Łożysko składa się z 3 brył: 2 pierścienie i 1 walec. Bryły te mają parametry (Tab. 1-4) wynikające z wymiarów przedstawionych na Rys. 1-2.

Tab. 1-4 Parametry brył tworzących łożysko.

Name	Centre of base	Centre of top	Radius	Thickness
łożysko1	x=0 y=13.5 z=0	x=0 y=15.5 z=0	13	-
łożysko2	x=0 y=15.5 z=0	x=0 y=17 z=0	13	5.5
łożysko3	x=0 y=17 z=0	x=0 y=18.5 z=0	19.5	12

Przy pomocy polecenia Cylinder narysować 3 bryły tworzące łożysko.



Komórkom tworzącym łożysko przypisać etykiety materiału, zgodnie z Rys. 1-1, oraz parametry siatki.

Cell Properties

Material label: Polisiikon

Potential type: Automatic Element type: Linear

Data storage level: 160

Volume data label: lozysko1

Group label: lozysko1

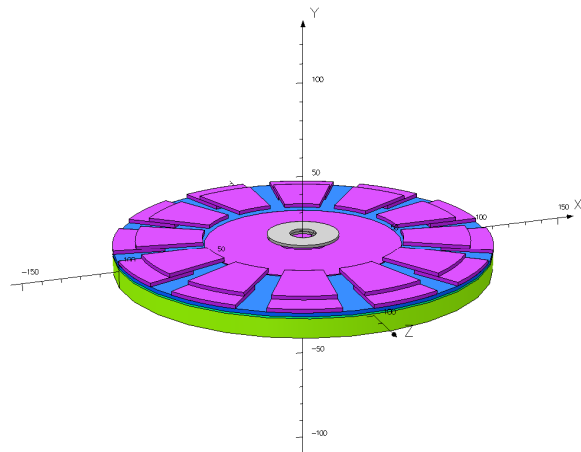
Mesh control parameters

Maximum element size: 5

Maximum angle between elements:

Maximum deviation from surface:

OK Cancel Default



Vector Fields

Cell Properties

Material label: Polisiikon

Potential type: Automatic Element type: Linear

Data storage level: 170

Volume data label: lozysko2

Group label: lozysko2

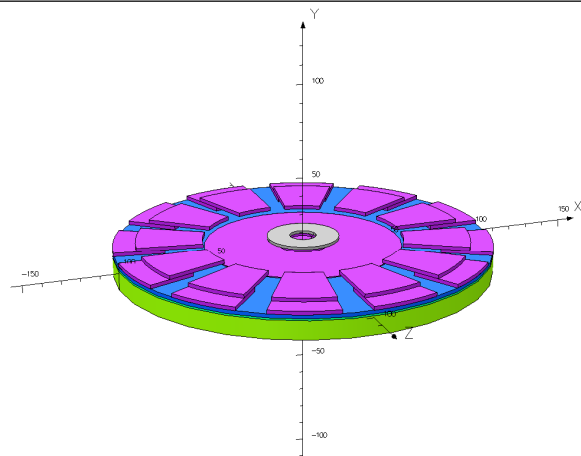
Mesh control parameters

Maximum element size: 5

Maximum angle between elements:

Maximum deviation from surface:

OK Cancel Default



Vector Fields

Cell Properties

Material label: Polisiikon

Potential type: Automatic Element type: Linear

Data storage level: 180

Volume data label: lozysko3

Group label: lozysko3

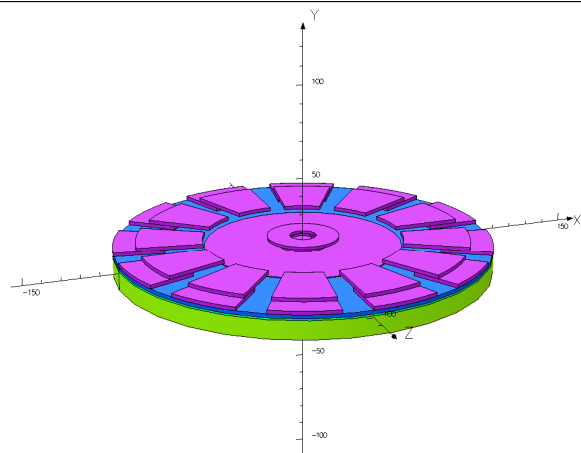
Mesh control parameters

Maximum element size: 5

Maximum angle between elements:

Maximum deviation from surface:

OK Cancel Default



Vector Fields

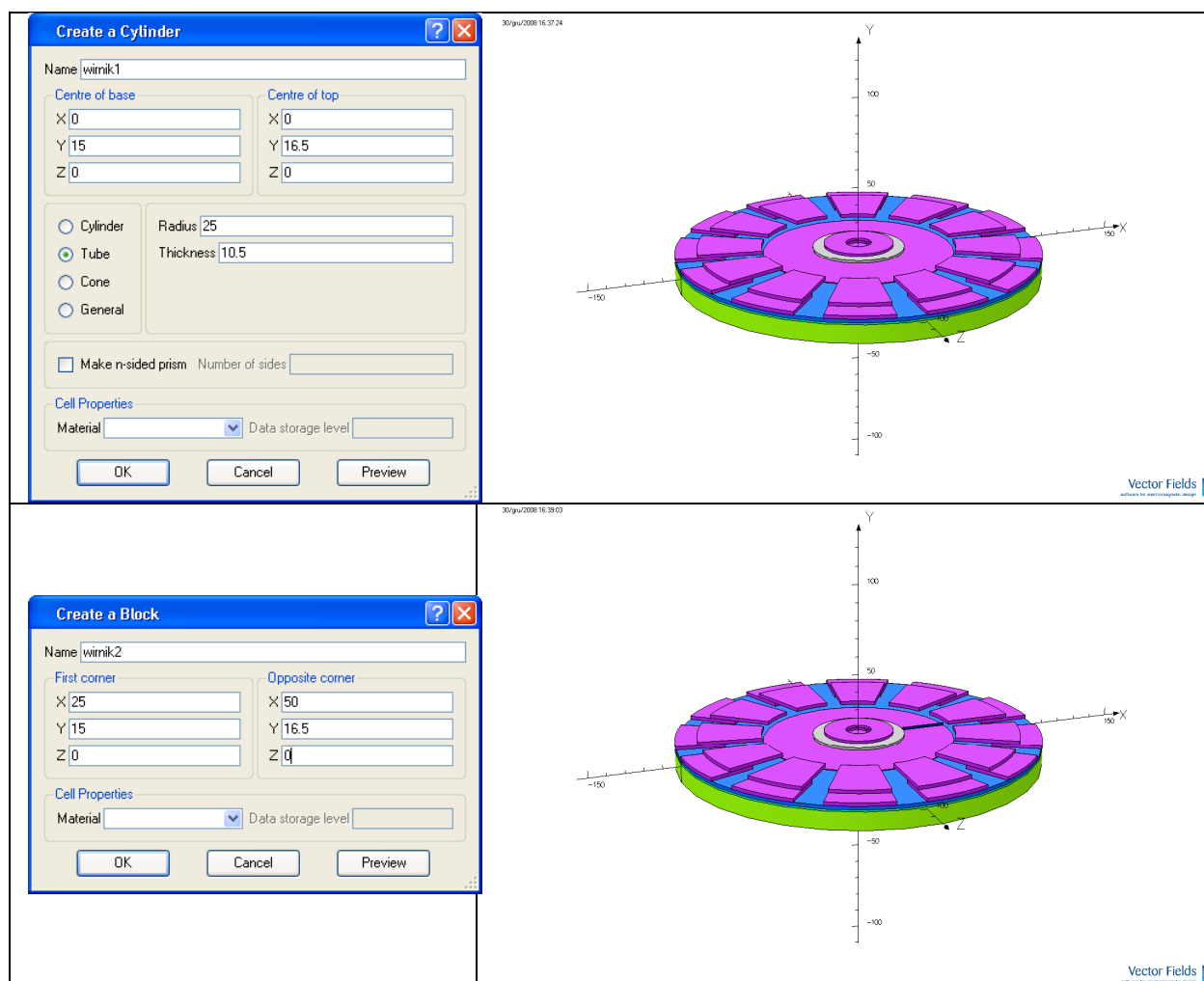
1.2.4. Tworzenie wirnika

Wirnik składa się z pierścienia i 8 wycinków koła tworzących zęby. Pierścień i pojedynczy ząb wirnika mają parametry jak Tab. 1-5.

Tab. 1-5 Parametry pierścienia i zęba wirnika.

Name	Centre of base	Centre of top	Radius	Thickness
wirnik1	x=0 y=15 z=0	x=0 y=16.5 z=0	50	35.5
Name	First corner		Opposite corner	
wirnik2	x=25 y=15 z=0		x=50 y=16.5 z=0	

Pierścień tworzący bryłę **wirnik1** narysować przy pomocy polecenia **Cylinder**, natomiast przy pomocy polecenia **Block** narysować prostokąt i wyciągnąć go z obrotem o kąt 21° tworząc w ten sposób jeden z zębów wirnika. Pozostałe zęby utworzyć jako kopie. Utworzonym komórkom nadać odpowiednie etykiety materiału i ustawić parametry siatki.



Sweep a face

Sweep type

☐ Distance

☐ Vector

☒ Rotate

☐ Along a path

Rotation (axis and angle)

Axis U 0

V 1

W 0

Point U 0

V 1

W 0

Angle 21

Tapering

Type None

Periphery draft angle

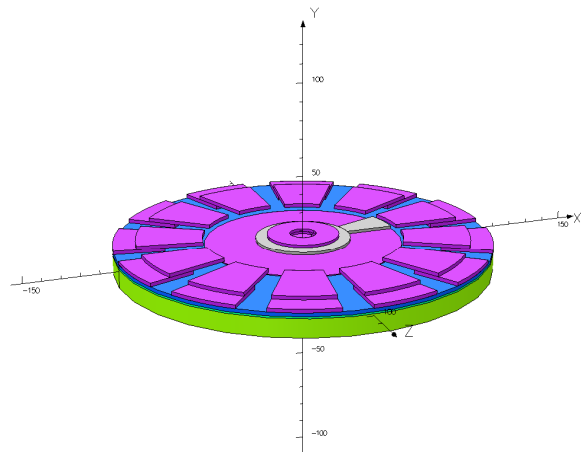
Hole draft angle

☐ Remove the starting face

☐ Fix the normal

OK Cancel Apply Preview

30/gnu/2008 16:39:24



Vector Fields

Cell Properties

Material label Polysilikon

Potential type Automatic Element type Linear

Data storage level 180

Volume data label wirnik1

Group label wirnik1

Mesh control parameters

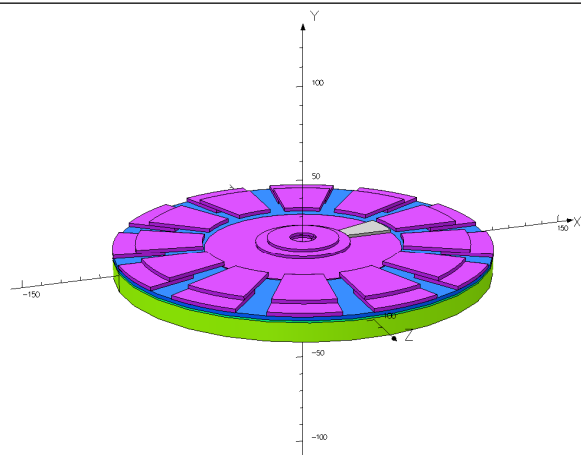
Maximum element size 5

Maximum angle between elements

Maximum deviation from surface

OK Cancel Default

30/gnu/2008 16:39:56



Vector Fields

Cell Properties

Material label Polysilikon

Potential type Automatic Element type Linear

Data storage level 190

Volume data label wirnik2

Group label wirnik2

Mesh control parameters

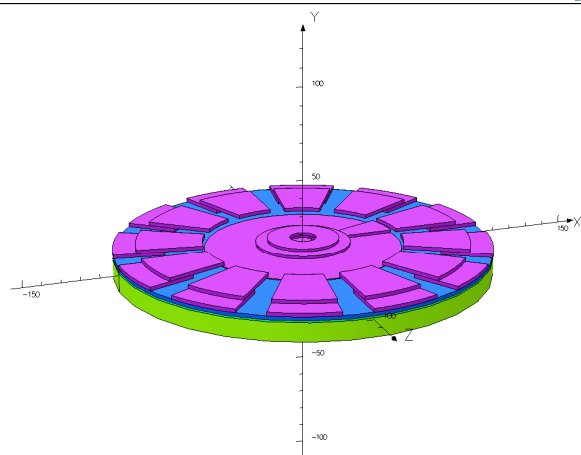
Maximum element size 5

Maximum angle between elements

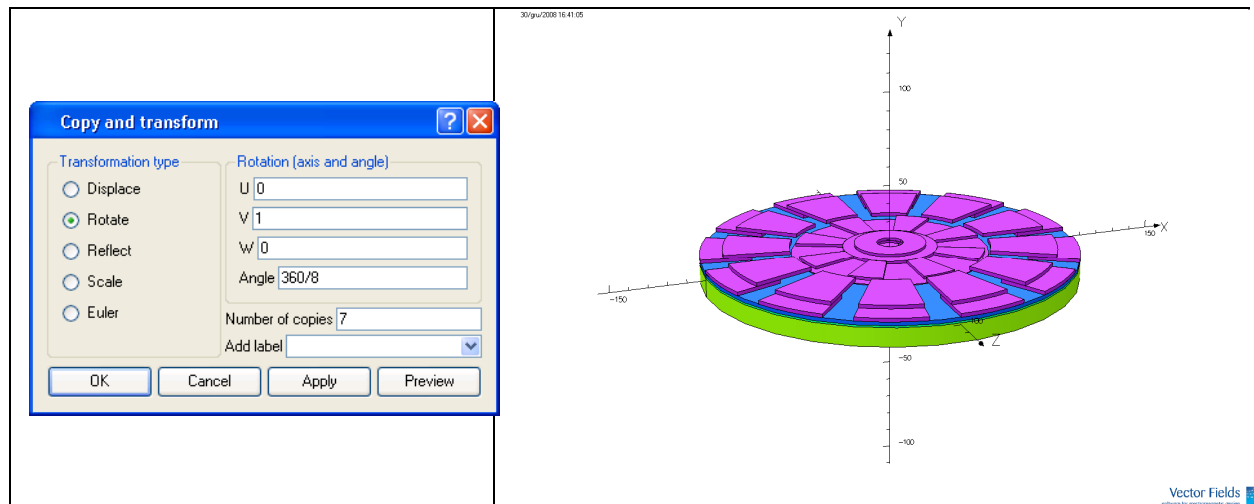
Maximum deviation from surface

OK Cancel Default

30/gnu/2008 16:40:29



Vector Fields





Zsumować bryły tworzące wirnik bez podziału na komórki:

z menu górnego wybrać:

Picking → **Pick Bodies**

Picking → **Pick Entity**

lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

Zaznaczyć bryły tworzące wirnik, z menu górnego wybrać: **Operations** → **Combine Bodies** → **Union, without regularisation**.

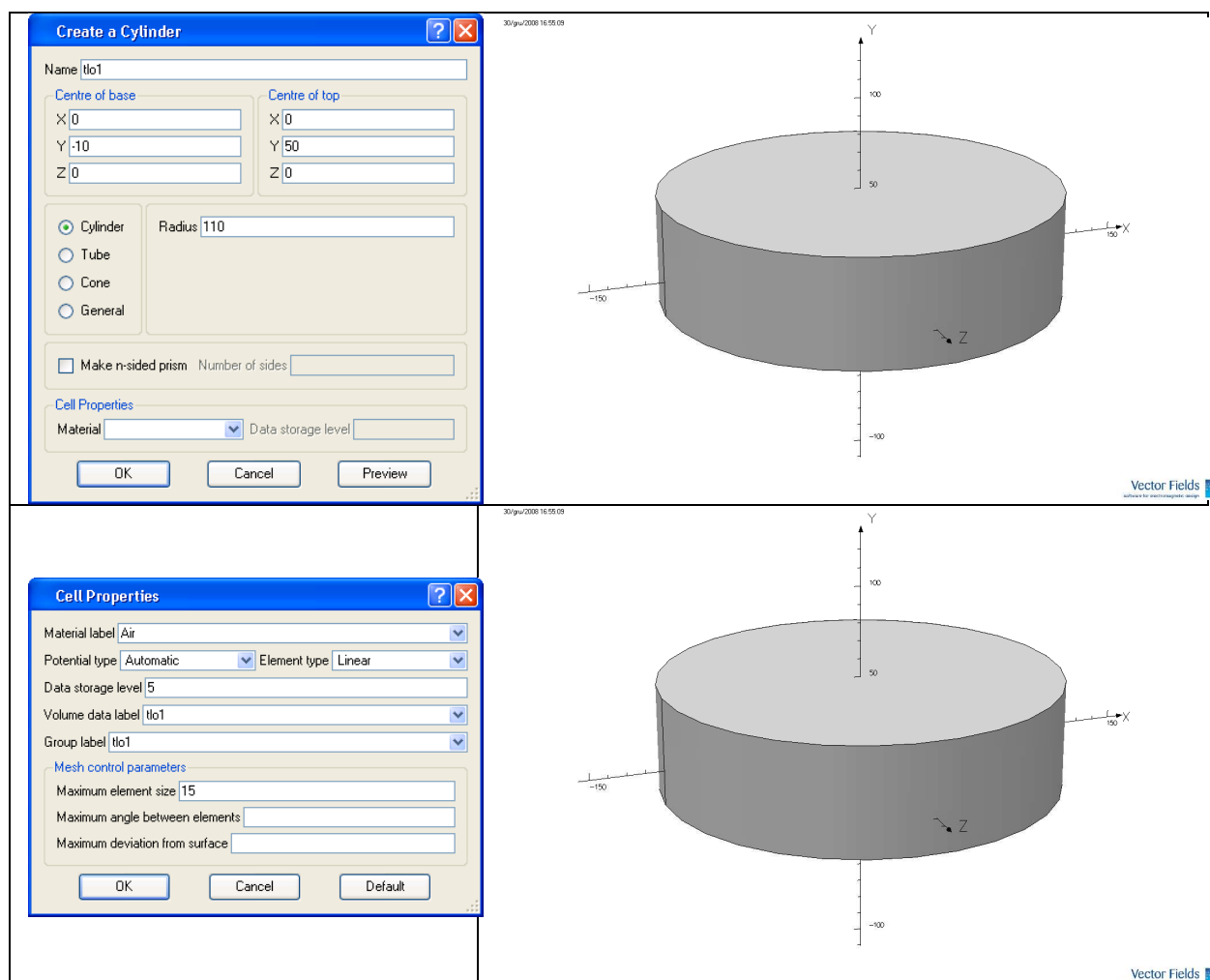
1.2.5. Tworzenie tła

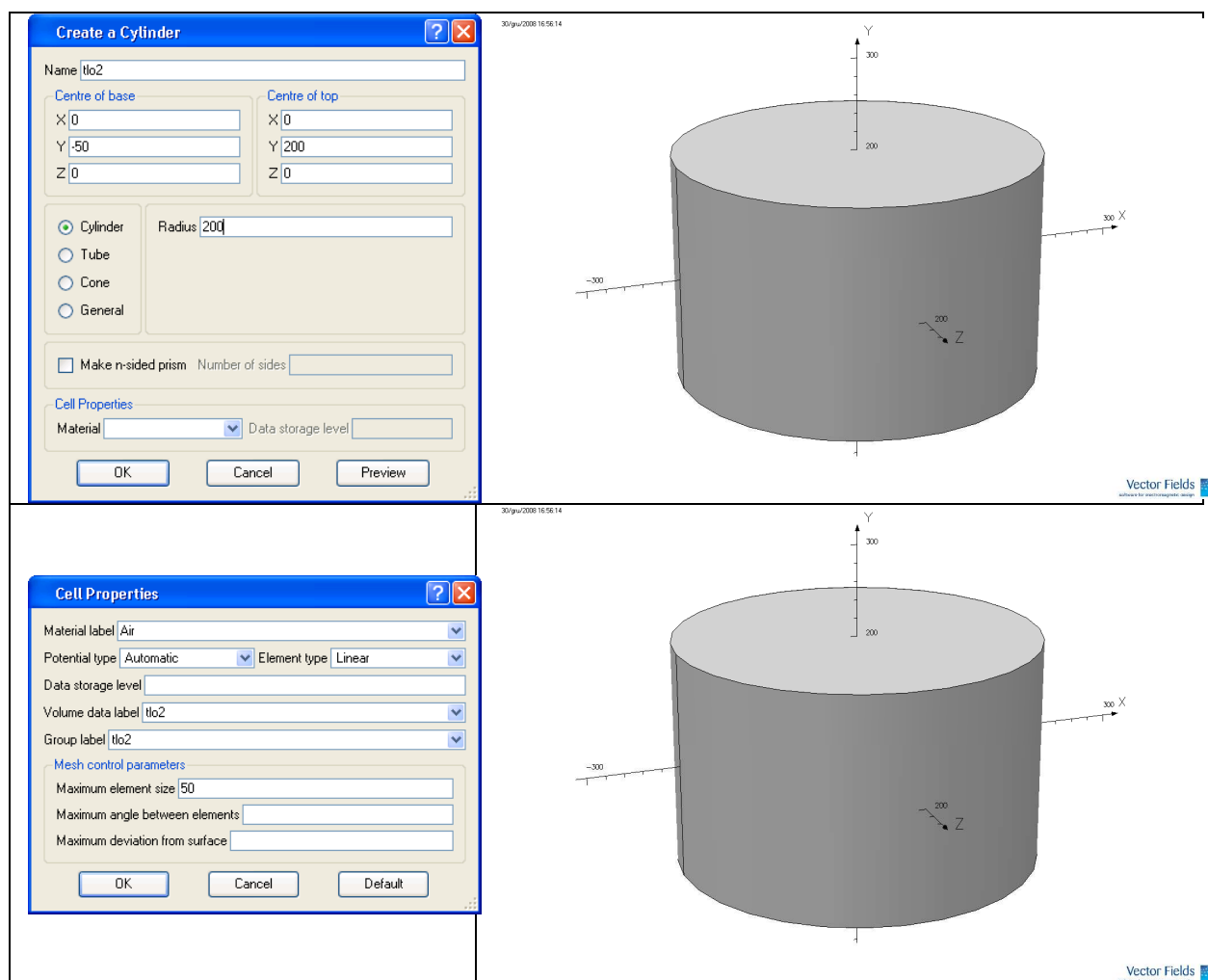
Tło – obszar powietrza wokół modelu silnika – zostanie utworzone jako 2 walce. Parametry obu walców są przedstawione w Tab. 1-6.

Tab. 1-6 Parametry walców tworzących tło.

Name	Centre of base	Centre of top	Radius
tlo1	x=0 y=-10 z=0	x=0 y=50 z=0	110
tlo2	x=0 y=-50 z=0	x=0 y=200 z=0	200

Narysować oba walce i ustawić w komórkach parametry siatki.





1.2.6. Parametry materiałowe

Z Rys. 1-1 wynika, że w modelowanym mikrosilniku krzemowym można wyróżnić 4 rodzaje materiałów oraz powietrze. Z punktu widzenia analizy elektrostatycznej istotną cechą tych materiałów jest przenikalność dielektryczna względna. Przy założeniu liniowości tych materiałów przenikalność dielektryczna jest jak w Tab. 1-7.

Tab. 1-7 Przenikalność dielektryczna materiałów mikrosilnika krzemowego.

Materiał	Przenikalność dielektryczna względna
Silikon	11.7
Polisilikon	1e-3
Azotan krzemu	6
Dwutlenek krzemu	3.9

Parametry materiałowe zostaną przypisane do etykiet materiałów zdefiniowanych w poprzednich krokach.

Pierwszym krokiem jest wybór odpowiedniego solvera – w tym przypadku musi to być solver obliczający pole elektrostatyczne. W pakiecie OPERA 3D jest nim program TOSCA Electrostatic.

Z menu górnego wybrać:

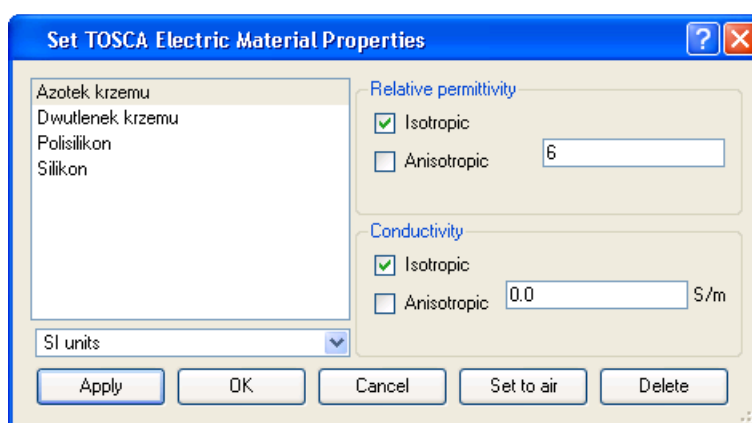
Model → **Analysis Type** → **TOSCA Electrostatic**

Następnie przypisać do etykiet materiałów odpowiednie wartości przenikalności dielektrycznej względnej – parametr **Relative permittivity**.

Z menu górnego wybrać:

Model → **Set Material Properties...**

a następnie z listy materiałów wybrać etykietę **Azotek krzemu** i w polu **Relative permittivity** wpisać **6** i nacisnąć **Apply** – Rys. 1-5.



Rys. 1-5 Okno dialogowe do definiowania parametrów materiałów.

W analogiczny sposób zdefiniować parametry pozostałych materiałów.



1.2.7. Definiowanie warunków brzegowych

Warunki brzegowe zostaną ustawione na zewnętrznych powierzchniach obszaru **t1o2**.

Z menu górnego wybrać:

Picking → **Pick Faces**

Picking → **Pick Entity**

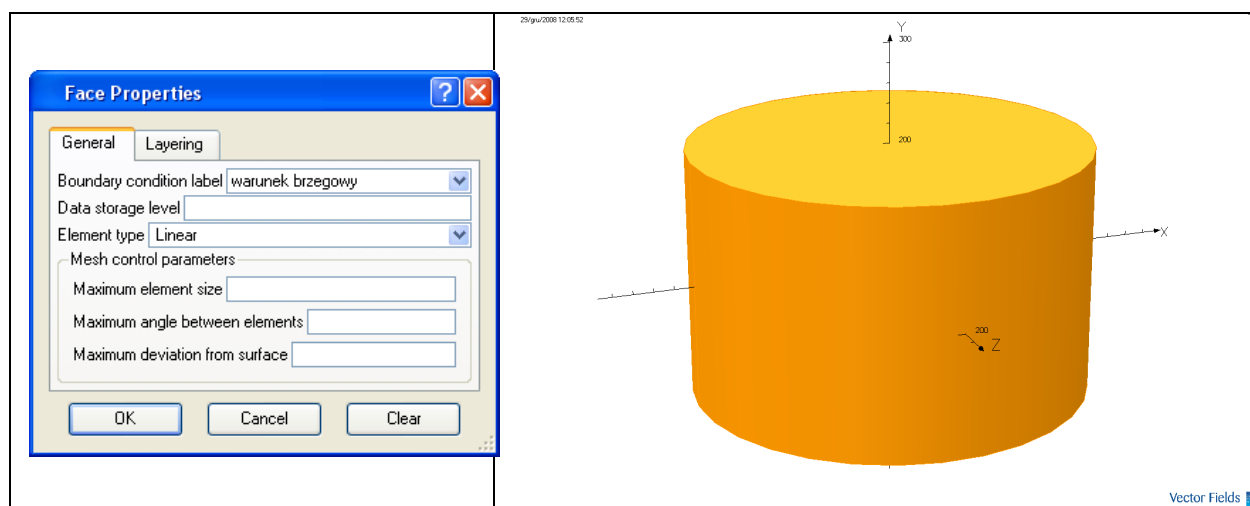
lub z pasków narzędziowych ikony:  i 

i zaznaczyć zewnętrzne powierzchnie walca tworzącego komórkę **t1o2**.

Z menu górnego wybrać:

Properties → **Face Properties...**

i uzupełnić okno dialogowe.

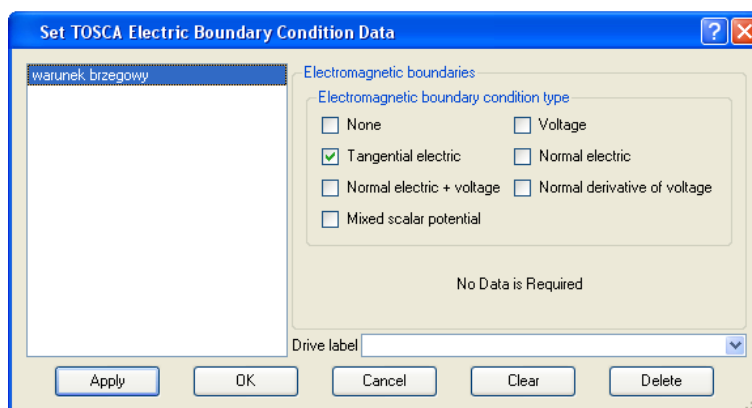


Dla etykiety warunek brzegowy zdefiniować odpowiedni warunek brzegowy.

Z menu górnego wybrać:

Model → **Set Boundary Conditions...**

Z listy etykiet wybrać etykietę **warunek brzegowy**, a następnie z dostępnych warunków brzegowych wybrać warunek **Tangential electric**, a następnie wcisnąć przycisk **Apply** i **OK** – Rys. 1-6.



Rys. 1-6 Okno dialogowe do definiowania warunków brzegowych.

1.2.8. Ustawianie potencjałów

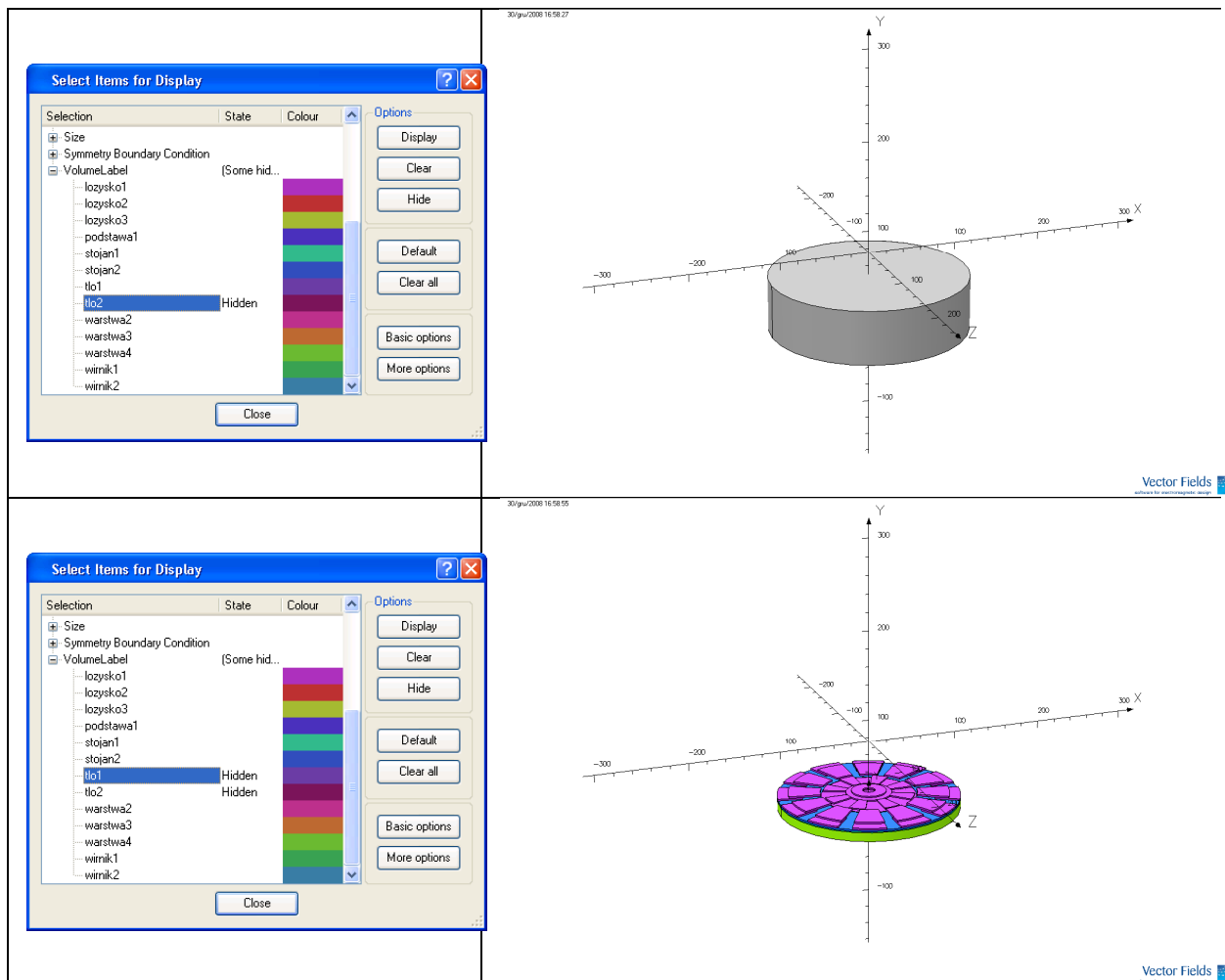
Ponieważ mikrośilnik jest przykryty tłem, pierwszym krokiem jest wyłączenie tego elementu modelu.

Z menu górnego wybrać:

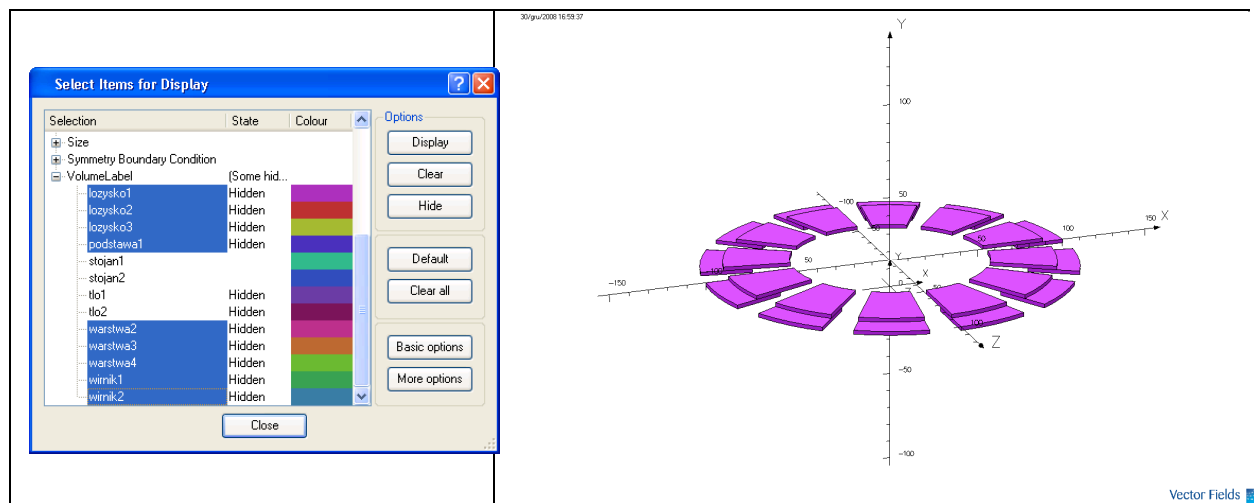
View → Selection... → Volume Label

lub z paska narzędziowego wybrać ikonę: 

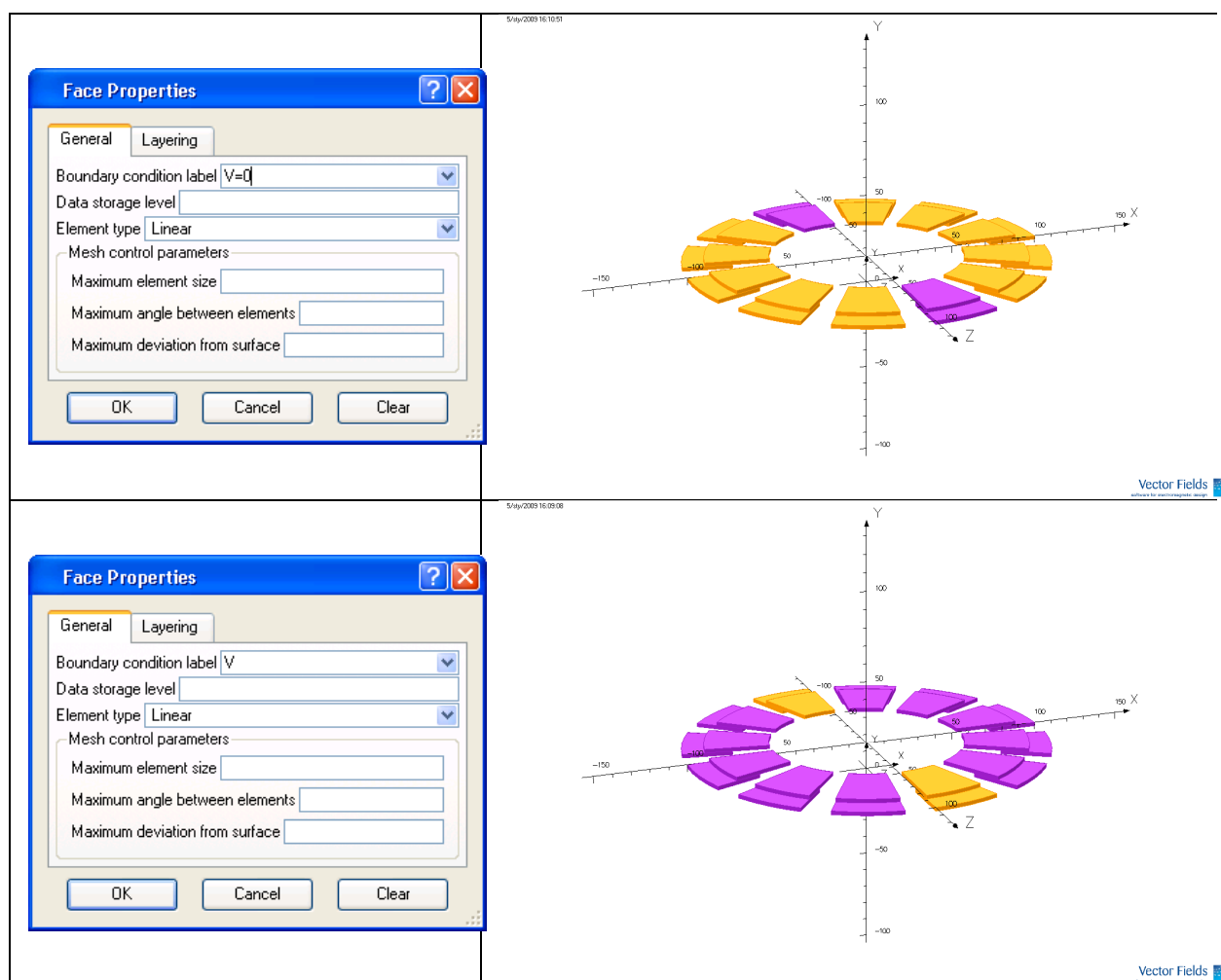
z listy etykiet odnaleźć **t1o2**, zaznaczyć i nacisnąć przycisk **Hide**. W podobny sposób ukryć **t1o1**.



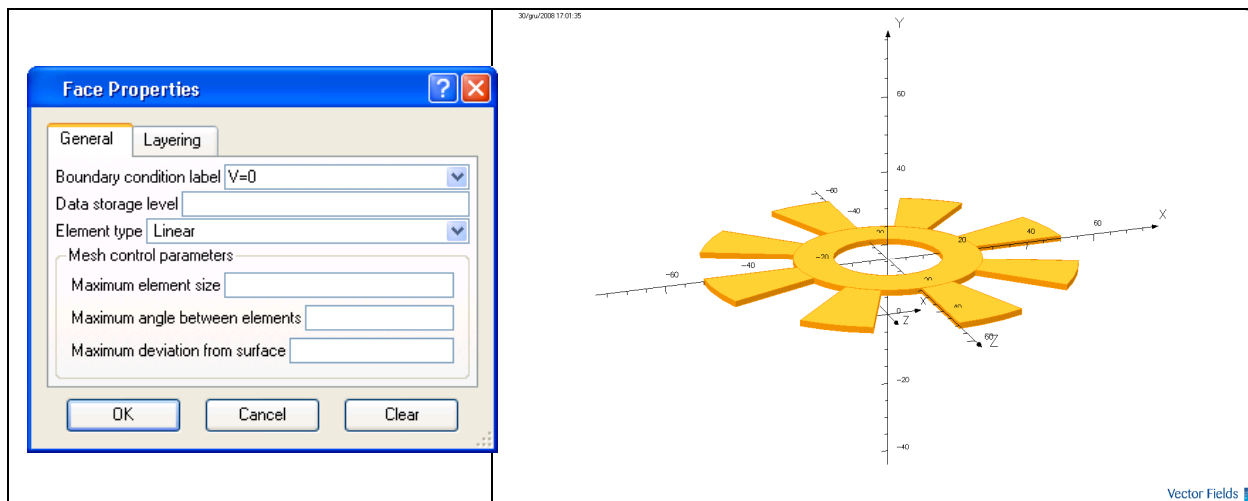
Ukryć wszystkie komórki poza elektrodami stojana (z klawiszem **Shift** i **Ctrl** można zaznaczyć z listy więcej niż jedną etykietę).



Zaznaczyć wszystkie powierzchnie elektrod stojana poza jedną parą elektrod i we właściwościach powierzchni zdefiniować parametr **Boundary condition label**, a następnie powtórzyć czynności dla niezaznaczonej pary elektrod:



Ukryć stojan oraz wyświetlić wirnik. Dla powierzchni wirnika ustawić parametr **Boundary condition label**.

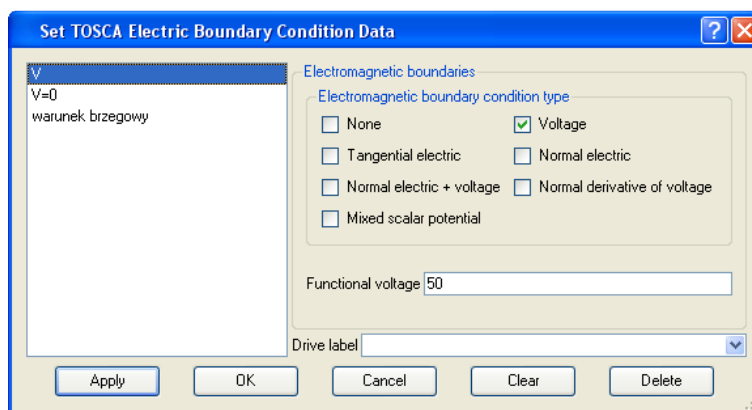


Dla etykiet $V=0$ i V przypisać wartości potencjałów.

Z menu górnego:

Model → **Set Boundary Conditions...**

Z listy etykiet wybrać etykietę V , a następnie z dostępnych warunków brzegowych wybrać warunek **Voltage** i w polu **Functional voltage** wpisać wartość **50**, a następnie wcisnąć przycisk **Apply** – Rys. 1-7.



Rys. 1-7 Okno dialogowe do definiowania warunków brzegowych.

W analogiczny sposób dla etykiety $V=0$ wprowadzić wartość potencjału **0**.

1.3. Generowanie siatki elementów skończonych

Generowanie siatki elementów skończonych odbywa się w trzech etapach:

1. Tworzenie bryły modelu:

Z menu górnego wybrać:

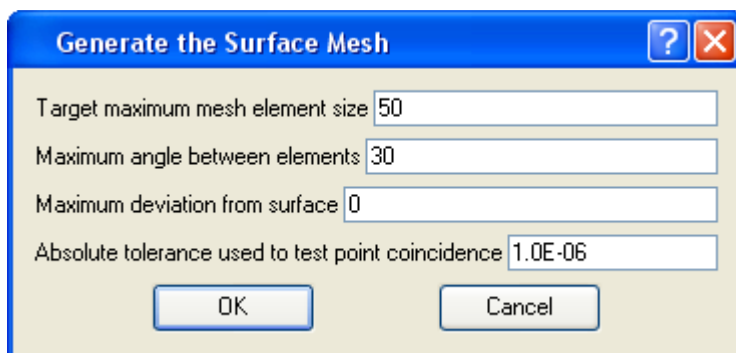
Model → Create Model Body

2. Generowanie siatki powierzchniowej.

Z menu górnego wybrać:

Model → Generate Surface Mesh...

i w oknie dialogowym wpisać wartości jak na Rys. 1-8 i nacisnąć przycisk **OK**.



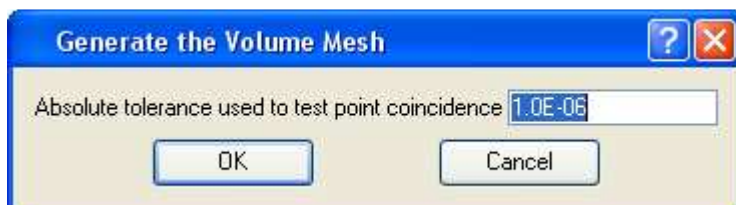
Rys. 1-8 Okno dialogowe do definiowania globalnych parametrów siatki elementów skończonych.

3. Generowanie siatki objętościowej.

Z menu górnego wybrać:

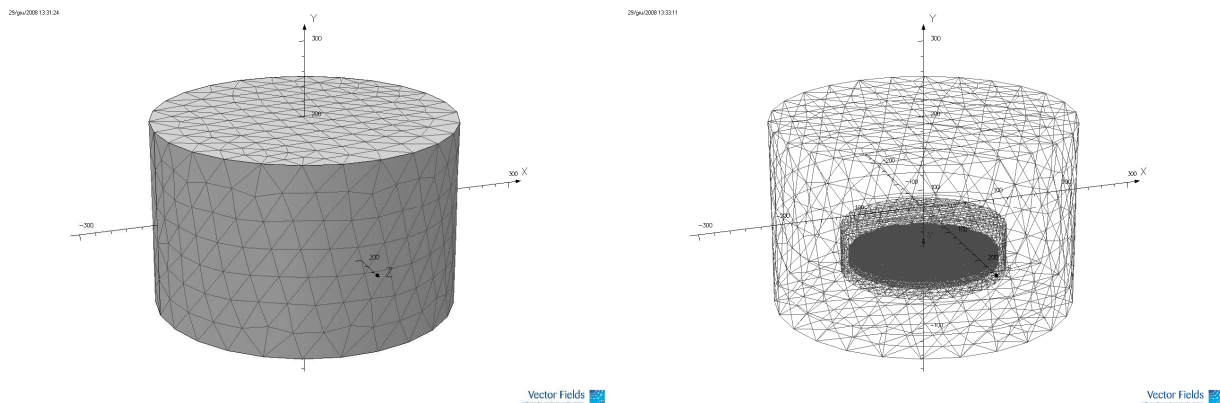
Model → Generate Volume Mesh...

i w oknie dialogowym wpisać wartości jak na rys. 12.



Rys. 1-9 Okno dialogowe do definiowania parametru objętościowej siatki elementów skończonych.

Wygenerowana siatka elementów skończonych przedstawiona jest na Rys. 1-9.



Rys. 1-10 Siatka elementów skończonych.

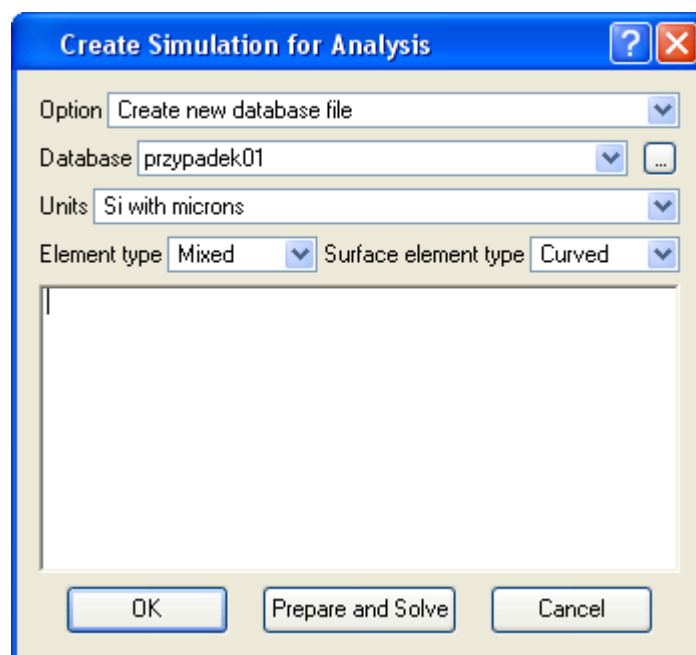
1.4. Przygotowanie i uruchomienie obliczeń

Przygotowanie bazy do obliczeń:

z menu górnego wybrać

Model → Create Analysis Database...

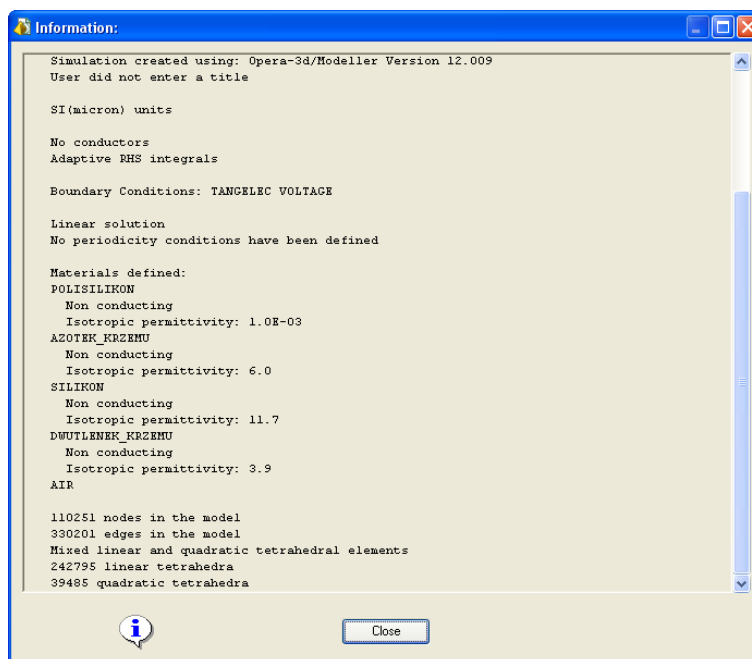
a następnie wypełnić okno dialogowe jak na Rys. 1-11 i nacisnąć przycisk **OK**.



Rys. 1-11 Okno dialogowe ustawień analizy.

Plik obliczeniowy zostanie utworzony w domyślnym katalogu roboczym z nazwą **przypadek01.op3**.

Po zakończeniu tworzenia pliku obliczeniowego pojawi się okno z informacjami o utworzonej bazie obliczeniowej – Rys. 1-12.



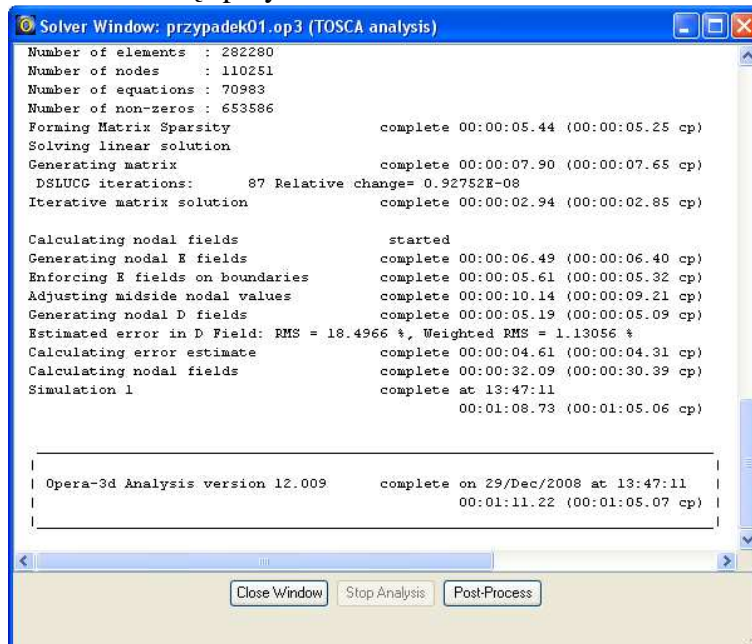
Rys. 1-12 Informacje o utworzonym pliku obliczeniowym.

Aby uruchomić obliczenia należy z menu górnego wybrać:

Model → Start Analysis...

a następnie wskazać plik obliczeniowy.

Po zakończeniu obliczeń nacisnąć przycisk **Close Window** w oknie solvera – Rys. 1-13.



Rys. 1-13 Okno solvera TOSCA Electrostatic.

1.5. Analiza wyników w programie Post-Processor

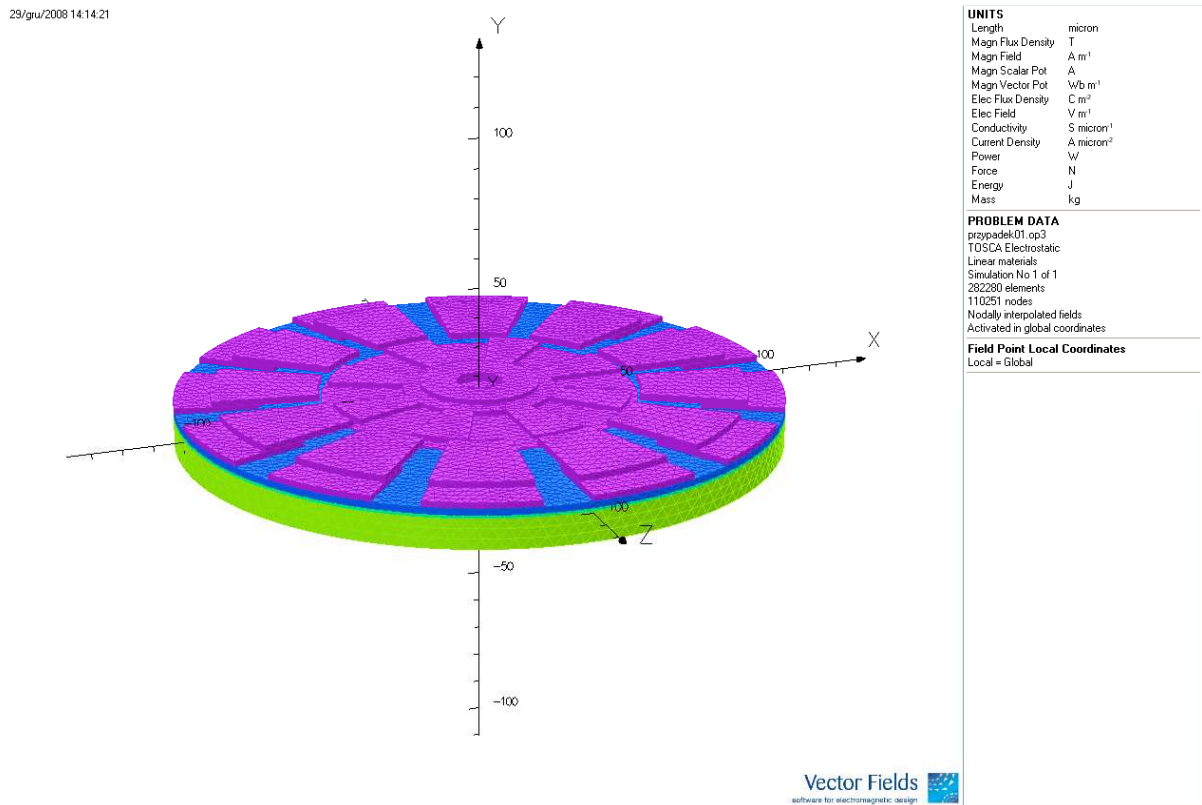
Wizualizację wyników obliczeń oraz dodatkowe obliczenia można wykonać w programie Post-Processor. Uruchomienie postprocesora możliwe jest z poziomu programu Modeller oraz z poziomu Menadżera pakietu OPERA.

W programie Modeller Post-Processor uruchamiany jest następująco:

z menu górnego wybrać

Model → Launch Post-Processor

Po uruchomieniu postprocesora zostanie wczytany ostatnio policzony plik. Okno programu po uruchomieniu z poziomu Modellera przedstawiono na Rys. 1-14.



Rys. 1-14 Okno programu Post-Processor.

Wyświetlić:

- Rozkład potencjału,
- Rozkład modułu natężenia pola,

Wyświetlanie rozkładu potencjału:


z menu górnego wybrać **View → 3D Display...**

lub z paska narzędziowego wybrać ikonę 

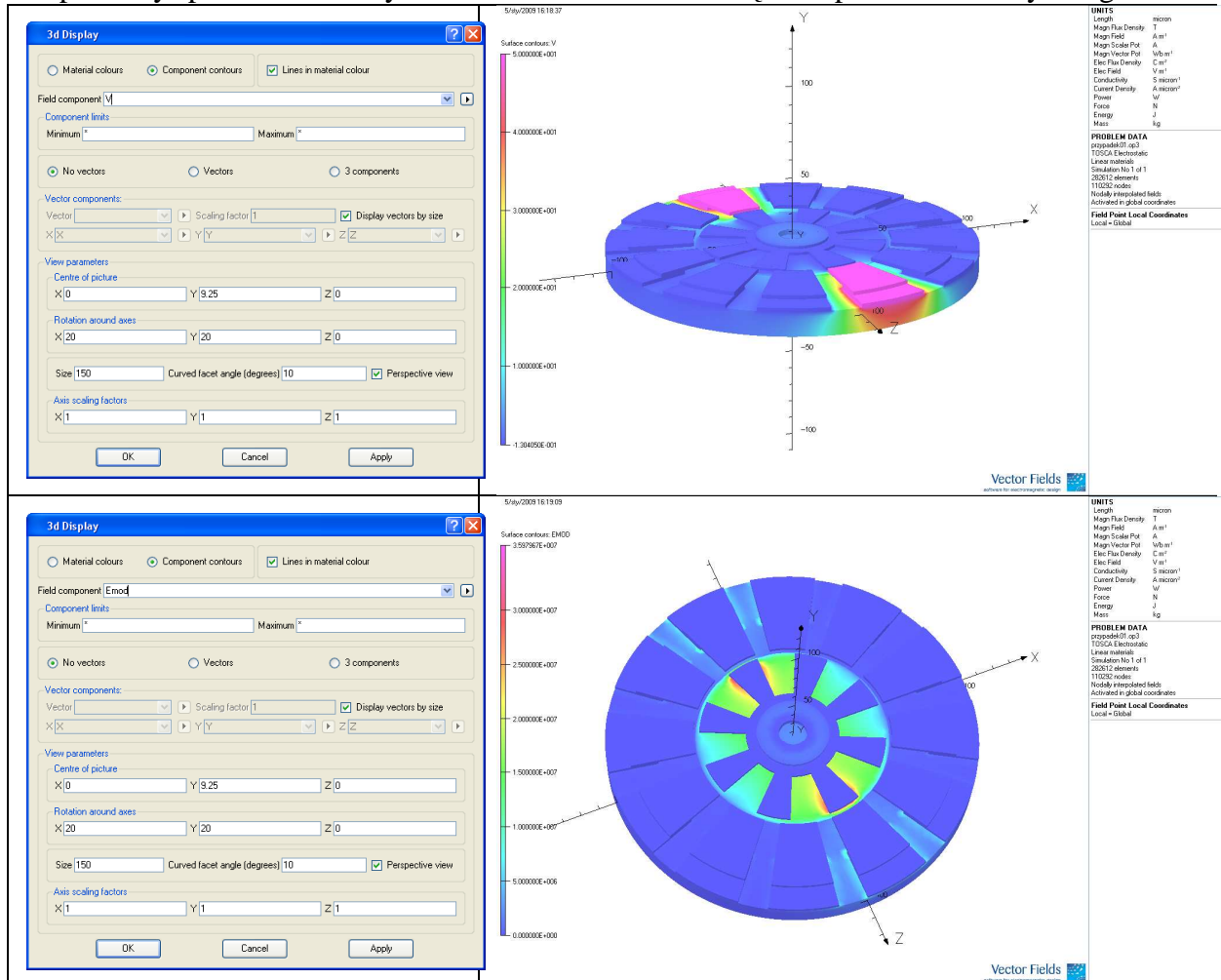
a następnie wprowadzić ustawienia w oknie dialogowym.

Dla poprawienia czytelności rysunku można wyłączyć krawędzie i siatkę:

z menu górnego wybrać **View** → **Parts of the Display** → **Outline View of Model**

lub z paska narzędziowego wybrać ikonę .

W podobny sposób można wyświetlić rozkład modułu natężenia pola elektrostatycznego.



Oba rozkłady można także wyświetlić w postaci histogramów.

Z menu górnego wybrać:

Fields → **Fields on a Polar Patch...**

lub z paska narzędziowego wybrać ikonę .

Wypełnić okno dialogowe jak na rys. 18a, nacisnąć przycisk **Set field point local coordinate system** i w kolejnym oknie dialogowym wybrać ustawienie

a) **Field on a Polar Patch**

Set field point local coordinate system

Buffer: Polar

Disks and Sectors of Disks | Cylinders and Segments of Cylinders

Radius: 100 Z coordinate: 13

Angular extent of sector

☒ Complete disk

Starting angle: Final angle:

Number of points ...

on radius: 100 on arc: 100

Component for map: Emod

Evaluate fields Evaluate and Map Cancel

b) **Field Point Local Coord...**

Origin

X: 0 Y: 0 Z: 0

Orientation

Rotation: Local XYZ = Global ZXY

Local XYZ = Global XYZ

Local XYZ = Global YZX

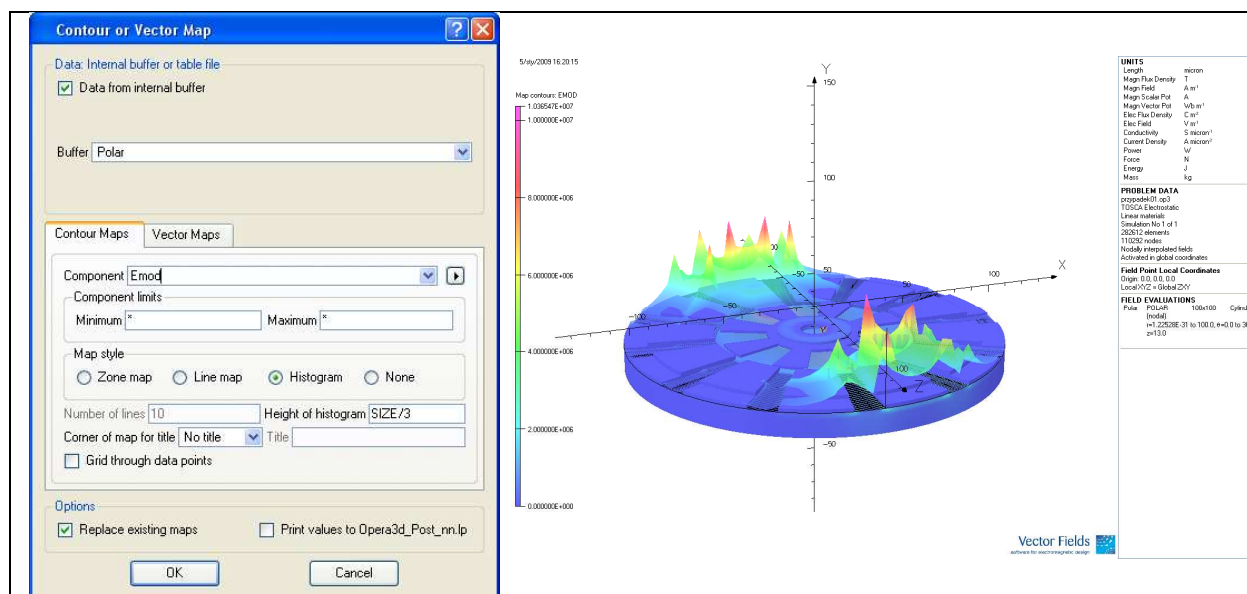
Local XYZ = Global ZXY

Other

Rotation Around: Around new Z: 0

OK Cancel


Zaznaczyć opcję **Histogram** i nacisnąć **OK**.



28

Z menu górnego wybrać:

Fields → **Contour or Vector Map...**

lub z paska narzędziowego wybrać ikonę .

W polu **Component** wpisać **V** i nacisnąć **OK**.

