

# Metody i Narzędzia Programowe w Akustyce część I – MES

Ireneusz Czajka

2018

## Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	1
1.1. Procedura budowy modelu	2
1.1.1. Kilka uwag o obsłudze programu gmsh	2
<b>2. Model 1 – rozkład ciśnienia akustycznego w obecności ekranu</b>	4
2.1. Obszar analizy	4
2.1.1. gmsh	4
2.1.2. ElmerGrid	5
2.2. Określenie parametrów i rozwiązanie problemu	6
2.2.1. Plik sterujący obliczeniami	7
2.3. Wyniki	9
2.4. Więcej częstotliwości	10
2.5. Komentarz	10
<b>3. Wizualizacja wyników w Matlab-ie</b>	10
<b>4. Sztuczki i kruczki</b>	10
<b>Literatura</b>	11

## 1. Wstęp

Modelowanie rozkładu pola akustycznego można zrealizować na różne sposoby. Niezależnie od wybranej metody takie modelowanie sprowadza się do rozwiązania równania różniczkowego cząstkowego opisującego rozkład parametrów pola akustycznego w zadanym obszarze.

W niniejszym bloku zagadnień w przedmiocie Metody i Narzędzia Programowe w Akustyce przedstawione zostaną wybrane zagadnienia dotyczące praktycznej strony metody elementów skończonych.

Równania opisujące elementy skończone w MES można wyprowadzić na kilka sposobów. Jednym z nich jest poszukiwanie minimum funkcjonału odpowiadającego rozwiązywanemu równaniu różniczkowemu (metoda Rayleigha-Ritza), w innym wykorzystuje się metodę residuów ważonych, np. metodę Galerkina. Przy czym ta druga jest ogólniejsza.

W zakresie niewielkich poziomów ciśnienia akustycznego pole akustyczne można opisać przez równanie falowe

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla^2 p \quad (1)$$

gdzie  $c$  jest prędkością fali akustycznej w ośrodku,  $p$  jest ciśnieniem akustycznym zaś  $\nabla^2$  jest operatorem różniczkowym Laplace'a.

Należy pamiętać, iż rozkład pola akustycznego może zostać opisany na przykład zmianami ciśnienia akustycznego, prędkości akustycznej czy potencjału akustycznego. W wyniku uzyskuje się sformułowania ciśnieniowe, prędkościowe czy potencjalne.

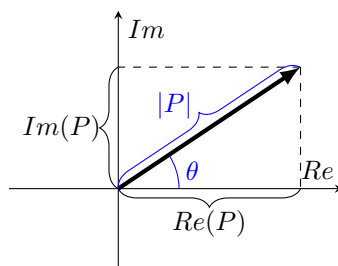
Rozwiązując równanie (1) metodą Fouriera przyjmuje się rozwiązanie w postaci iloczynu funkcji zależnej od czasu i funkcji zależnej od zmiennych przestrzennych. Funkcja zależna od czasu opisuje drgania harmoniczne o częstotliwości  $\omega$ . Jako wynik uzyskuje się równanie (2), zwane równaniem Helmholtza.

$$k^2 P + \nabla^2 P = 0 \quad (2)$$

gdzie  $P$  jest zespolonym ciśnieniem akustycznym,  $k = \omega/c$  jest liczbą falową.

Ciśnienie akustyczne wylicza się jako

$$p(t) = \text{Re}(P e^{i\omega t})$$



Rysunek 1. Interpretacja zespolonego ciśnienia akustycznego

lub

$$p(t) = \operatorname{Re}(P) \cos(\omega t) - \operatorname{Im}(P) \sin(\omega t)$$

Metodą elementów skończonych zazwyczaj rozwiązuje się równanie Helmholtza. Efektem tego postępowania jest rozkład pola akustycznego w stanie ustalonym dla określonej częstotliwości.

Ponieważ wynikiem jest ciśnienie akustyczne w postaci zespolonej, zachowuje się informację o stosunkach fazowych między drganiami w poszczególnych punktach analizowanego obszaru.

Aby w sposób jednoznaczny rozwiązać równanie różniczkowe cząstkowe w wybranym obszarze, konieczne jest nałożenie warunków brzegowych. Poniżej zostaną przedstawione wybrane warunki brzegowe używane w pakiecie Elmer, który ma zaimplementowane ciśnieniowe sformułowanie opisu pola akustycznego

- warunek Dirichleta – dana wartość  $p$ ,
- warunek Neumana – dana wartość  $\frac{\partial p}{\partial n}$ ,
- warunek impedancyjny –  $Z = \frac{p}{v}$
- warunek Sommerfelda (wypromieniowania), implementowany jako  $Z = -c$  (dla fali wypromieniowywanej).

Aby rozwiązać problem akustyczny metodą elementów skończonych, konieczne jest nałożenie siatki na analizowany obszar, co wymaga dodatkowych narzędzi.

### 1.1. Procedura budowy modelu

W trakcie przygotowywania modelu będą wykorzystane następujące programy:

- **gms**h – służy do budowy modelu geometrycznego i nałożenia siatki
- **ElmerGrid** – konwertuje siatkę do formatu używanego przez **ElmerSolver**, pozwala też na generowanie siatki na podstawie swojego pliku;
- **ElmerGUI** – pozwala na wygodne definiowanie analizy, uruchamianie rozwiązania i analizę wyników;
- **ElmerSolver** – właściwy program rozwiązujący równania różniczkowe metodą elementów skończonych;
- **ElmerPost** – pozwala na analizę wyników.

**Procedura budowy modelu** przebiega następująco:

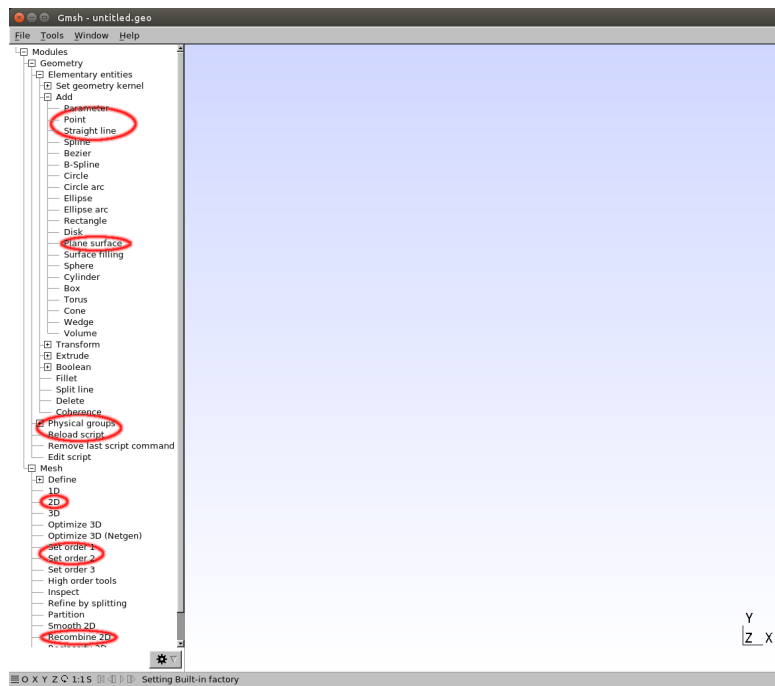
1. model geometryczny – slangowo *geometria*,
2. siatka elementów skończonych (trzeba zadbać kształty elementów i stopień funkcji kształtu),
3. konwersja siatki do formatu używanego przez dany program obliczeniowy.

#### 1.1.1. Kilka uwag o obsłudze programu gms

Jak twierdzi jego autor, program **gms**h jest generatorem trójwymiarowych siatek dla metody elementów skończonych z wbudowanymi udogodnieniami dla pre- i post-procesingu. Okno główne programu **gms**h przedstawiono na rysunku 2. Po lewej stronie znajduje się menu, w którym można wybierać poszczególne funkcje. Na rysunku widać dwa moduły: do tworzenia modelu geometrycznego oraz do generowania siatki elementów skończonych.

1. Model geometryczny jest budowany w kolejności: punkty, linie, powierzchnie, objętości. Kolejne elementy są definiowane za pomocą tych niższego poziomu.
2. Definiowanie grup fizycznych – najlepiej tyle ile jest obszarów analizy różniących się właściwościami oraz warunkami brzegowymi.
3. Generowanie i eksport siatki z odpowiednią gęstością.

Do definiowania **modelu geometrycznego** w programie **gms**h służy moduł Geometry. Należy najpierw zdefiniować punkty [Modules >> Geometry >> Elementary >> Entities >> Add >> Point]. Po zdefiniowaniu pierwszego punktu, można wybrać opcję [Geometry >> Edit >> File] i wykorzystać edytor tekstowy do dodania kolejnych punktów, pamiętając by



Rysunek 2. Okno główne ekranu programu gmsh z rozwiniętymi pozycjami menu

miały kolejne numery. Po zapisaniu edytowanego pliku tekstowego, należy wybrać opcję **Geometry** **Reload**. Jeżeli nie ma błędów, to pokażą się dodane punkty. Gdy wystąpią błędy gmsh dosyć dobitnie o tym poinformuje.

Następnie punkty należy połączyć liniami przy pomocy opcji **Geometry** **Elementary entities** **Add** **Straight line**. W górnej części ekranu jest informacja, czego program oczekuje: klika się pierwszy punkt, później drugi i powstaje linia.

Po zdefiniowaniu linii należy zdefiniować powierzchnie opcją **Geometry** **Elementary entities** **Add** **Plane surface**. Po wybraniu najpierw linii ograniczających z zewnątrz, wybiera się linie oznaczające ewentualne otwory. Po zaakceptowaniu klawiszem **e** powstaje powierzchnia, co zostaje oznaczone skrzyżowanymi kreskowymi liniami, przechodzącymi przez środek powierzchni.

Po zdefiniowaniu geometrii należy zaznaczyć tzw. grupy fizyczne, przy pomocy opcji **Geometry** **Physical groups** **Add**. Domyślnie wszystkie objętości, powierzchnie i linie, które mają być uwzględnione w analizie muszą być oznaczone jako grupy fizyczne. Czyli

- tworzymy grupę fizyczną z każdej linii i objętości, na którą ma być nałożony warunek brzegowy
- tworzymy grupę fizyczną z każdej powierzchni i objętości, na którą ma być nałożona siatka

Bez zdefiniowania grup fizycznych nie zostanie wyeksportowana siatka na odpowiednim elemencie – co spowoduje brak możliwości prowadzenia obliczeń.

**Siatkę** nakłada się w module **Mesh**. Po naciśnięciu przycisku **Mesh** **2D**, zagęszczenie siatki można uzyskać naciskając przycisk, **Mesh** **Refine by splitting**. Po uzyskaniu wymaganej gęstości siatki, można jeszcze raz nacisnąć **Mesh** **2D**, by dokonać prostej optymalizacji siatki.

Domyślnie gmsh tworzy siatkę złożoną z elementów trójkątnych. By dokonać przekształcenia jej w siatkę z elementami czworokątnymi, należy użyć opcji **Mesh** **Recombine 2D**.

Nakładając siatkę należy pamiętać, iż powinno się uzyskać gęstość przynajmniej sześciu (niektóre podręczniki zalecają 10) elementów na długość analizowanej fali akustycznej.

Po zapisaniu siatki opcją **Mesh** **Save** należy przejść do programu ElmerGUI

**Dobrym pomysłem jest skorzystanie z dokumentu Elmer Models Manual [3] ze strony Elmer-a – głównie rozdział pt. Helmholtz Solver [5]. Koniecznie trzeba przynajmniej pobieżnie zapoznać się z dokumentem ElmerGUI Manual [4].**

## 2. Model 1 – rozkład ciśnienia akustycznego w obecności ekranu

**Student nauczy się: budować model geometryczny, nakładać warunki brzegowe, generować siatkę za pomocą ElmerGrid i gms, uruchamiać obliczenia, wykorzystywać pakiet Matlab do wizualizacji wyników, przeprowadzać analizę dla różnych częstotliwości, animować wyniki obliczeń w programie ElmerPost**

Należy wyznaczyć rozkład ciśnienia akustycznego w obszarze w obecności ekranu akustycznego. Zbadać zachowanie fali dla różnych częstotliwości, porównać wyniki z przewidywaniami teoretycznymi. Zwrócić uwagę na widoczne efekty m.in. cień akustyczny czy ugięcie fali na krawędzi ekranu.

Założenia do modelu

- model liniowy (równanie Helmholtza)
- stan ustalony
- model płaski (dwuwymiarowy)
- elementy liniowe lub paraboliczne

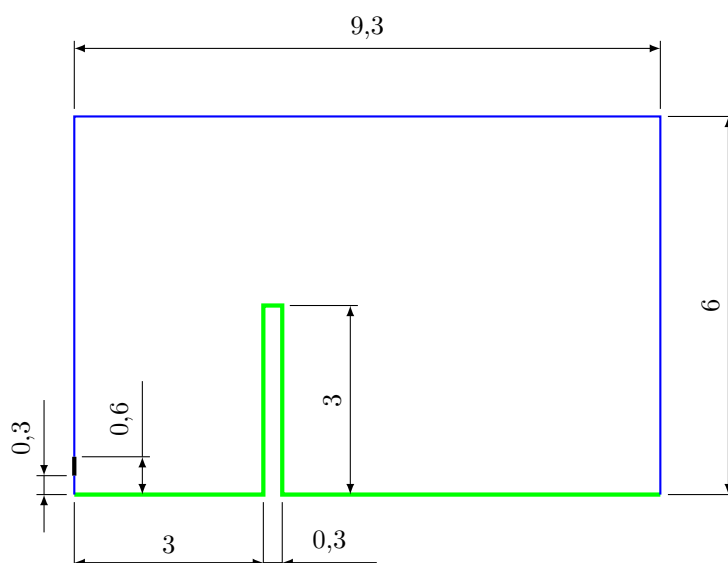
Gęstość siatki dostosować do maksymalnej analizowanej częstotliwości. Ogólnie przyjmowana reguła mówi, że dla elementów liniowych maksymalny rozmiar elementu wynosi  $\lambda/6$ .

Warunki brzegowe w postaci  $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$  określają obszar z nieodkształcalnymi ścianami. Warunki w postaci  $Z = -c$ , gdzie  $c$  jest prędkością rozchodzenia się fali, oznaczają całkowite wypromieniowanie fali płaskiej.

### 2.1. Obszar analizy

Analizowany obszar został przedstawiony na rysunku 3. Źródło stanowi pogrubiony fragment brzegu po lewej stronie modelu. Wartość amplitudy prędkości drgań źródła należy przyjąć tak, by poziom ciśnienia akustycznego przed ekranem wynosił około 80 dB.

Do analizy trzeba wygenerować siatkę. Zostaną opisane dwa sposoby uzyskania siatki obliczeniowej: za pomocą programu `gms` oraz za pomocą programu `ElmerGrid`.



Rysunek 3. Model ekranu; kolor zielony – ściany sztywne, kolor niebieski – warunek wypromieniowania, kolor czarny – źródło, wymiary w [m]

#### 2.1.1. `gms`

Geometrię tworzy się w programie `gms`. Definiuje się punkty, później linie proste, płaszczyzny. W przypadku błędu najwygodniej jest użyć przycisku `[Geometry] >> Edit`, dokonać modyfikacji w pliku tekstowym (dosyć łatwym do zrozumienia), zapisać i użyć przycisku `[Geometry] >> Reload`. Sposób postępowania jest następujący

- zdefiniować jeden punkt;
- w zewnętrznym edytorze należy dodać pozostałe punkty z odpowiednimi numerami i współrzędnymi, następnie użyć polecenia `[Geometry] >> Reload`;
- zbudować linie, zdefiniować powierzchnię,

- zdefiniować grupy fizyczne zawierające brzegi dotyczące: wymuszenia, wypromieniowania i całkowitego odbicia;
- zdefiniować grupę fizyczną zawierającą analizowaną powierzchnię;
- wygenerować siatkę i zapisać ją.

Po zakończeniu pracy z modelem geometrycznym uzyskany plik `.geo` powinien mieć strukturę podobną do poniższego wydruku

```
Point(1) = {0, 0, 0, 1.0};
Point(2) = {3, 0, 0, 1.0};
Point(3) = {3, 3, 0, 1.0};
Point(4) = {3.3, 3, 0, 1.0};
Point(5) = {3.3, 0, 0, 1.0};
Point(6) = {9.3, 0, 0, 1.0};
Point(7) = {9.3, 6, 0, 1.0};
Point(8) = {0, 6, 0, 1.0};
Point(9) = {0, 0.6, 0, 1.0};
Point(10) = {0, 0.3, 0, 1.0};

Line(1) = {1, 2};
Line(2) = {2, 3};
Line(3) = {3, 4};
Line(4) = {4, 5};
Line(5) = {5, 6};
Line(6) = {6, 7};
Line(7) = {7, 8};
Line(8) = {8, 9};
Line(9) = {9, 10};
Line(10) = {10, 1};

Line Loop(1) = {7, 8, 9, 10, 1, 2, 3, 4, 5, 6};
Plane Surface(1) = {1};
Physical Line("sommerf") = {8, 7, 6, 10};
Physical Line("twarde") = {1, 2, 3, 4, 5};
Physical Line("wymusz") = {9};
Physical Surface("powietrze") = {1};
```

Po zapisaniu siatki można ją wczytać bezpośrednio do programu `ElmerGUI` lub skonwertować do formatu używanego przez `ElmerSolver`. Konwersję siatki do formatu używanego przez `ElmerSolver` dokonuje się przy pomocy polecenia:

```
ElmerGrid 14 2 nazwa.msh -autoclean
```

Parametr `autoclean` wymusza uporządkowanie numerów warunków brzegowych i analizowanych obszarów.

### 2.1.2. ElmerGrid

Chociaż w pierwszej chwili to stwierdzenie może się wydawać kontrowersyjne, to: dla prostych przypadków siatkę znacznie wygodniej tworzy się za pomocą programu `ElmerGrid`. Szeroki opis możliwości tworzenia siatek oraz sposób tworzenia brzegów krzywoliniowych jest opisany w instrukcji [6].

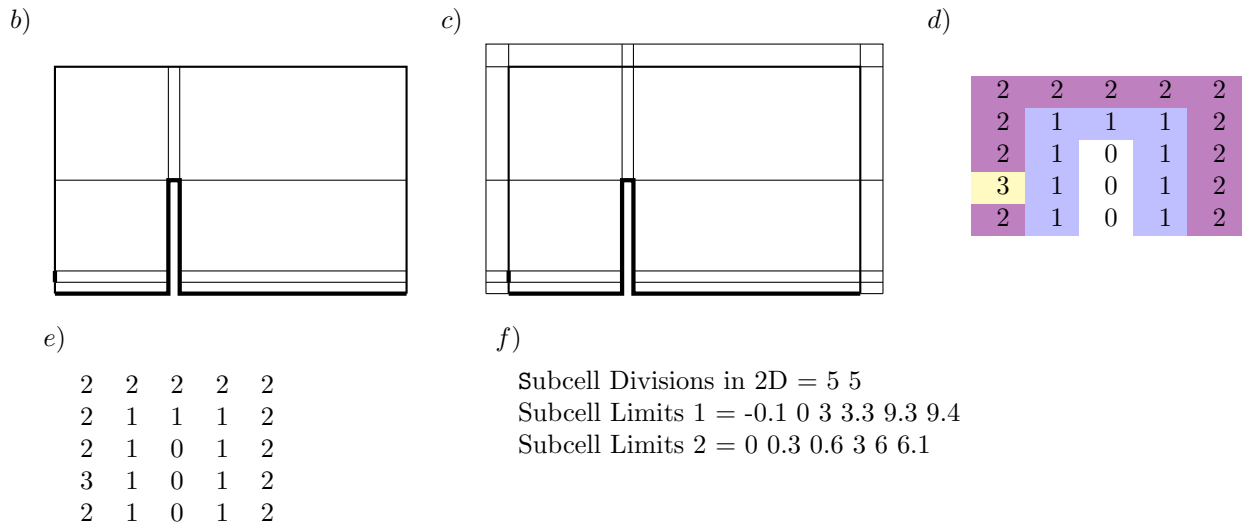
Aby stworzyć siatkę dla analizowanego przypadku należy:

- a) narysować problem,
- b) podzielić go na prostokątne bloki,
- c) jeżeli trzeba, dodać dodatkowe bloki materiału na zewnątrz istniejących brzegów,
- d) każdemu blokowi przydzielić numer materiału,
- e) zapisać strukturę bloków,
- f) określić granice poszczególnych bloków,
- g) określić warunki brzegowe.

Ponieważ warunki brzegowe definiuje się podając numery materiałów po **obu stronach** linii stanowiącej warunek brzegowy, konieczne staje się dodanie bloków po zewnętrznych stronach niektórych brzegów.

Poniżej przedstawiony jest plik wsadowy do programu `ElmerGrid`. Warto zwrócić uwagę na linie `Subcell Limits` oraz na tablicę z rozkładem materiałów.

```
***** ElmerGrid input file for structured grid generation *****
Version = 210903
```



Rysunek 4. Etapy tworzenia pliku wsadowego dla programu ElmerGrid

```
Coordinate System = Cartesian 2D
Subcell Divisions in 2D = 5 5
Subcell Limits 1 = -0.1 0 3 3.3 9.3 9.4
Subcell Limits 2 = 0 0.3 0.6 3 6 6.1
Material Structure in 2D
  2 2 2 2 2
  2 1 1 1 2
  2 1 0 1 2
  3 1 0 1 2
  2 1 0 1 2
End
Materials Interval = 1 1
Boundary Definitions
! type      out      int      double   of the boundaries
  1         2        1         1
  2         0        1         1
  3         3        1         1
End
Numbering = Horizontal
Element Degree = 1
Element Innernodes = False
Triangles = False
Plane Elements = 51000
```

Bardzo ważnym fragmentem powyższego pliku jest część dotycząca warunków brzegowych zaczynająca się od słów `Boundary Definitions`. Numer brzegu znajduje się w kolumnie oznaczonej `type`. Kolumny `out` oraz `int` podają odpowiednio numer materiału w bloku zewnętrznym i wewnętrznym w stosunku do danego brzegu. Analiza tego fragmentu pozwala zrozumieć konieczność dodania zewnętrznych bloków materiału na niektórych brzegach.

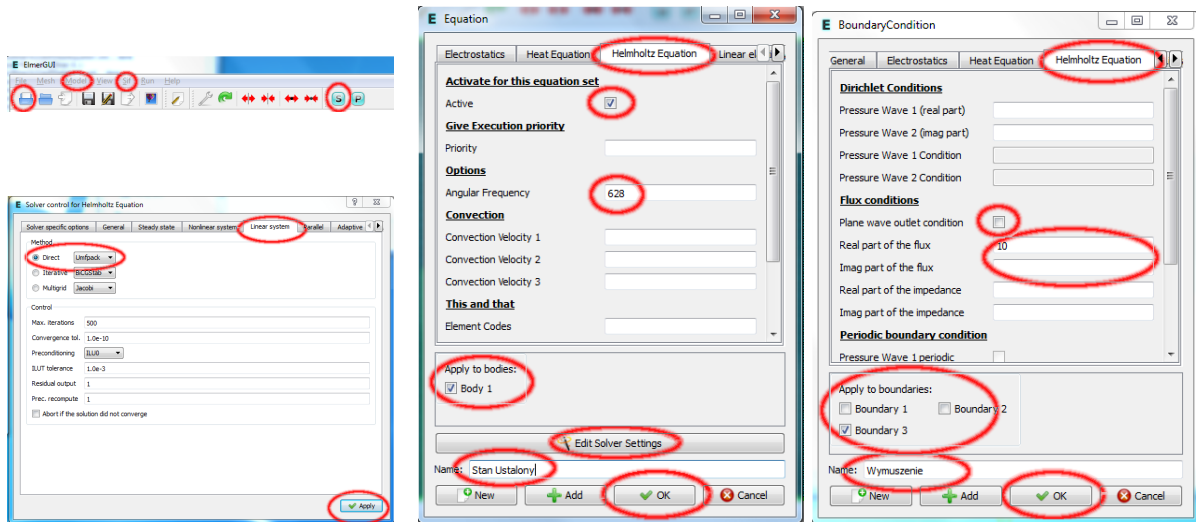
## 2.2. Określenie parametrów i rozwiązanie problemu

Rysunek 5 przedstawia widok menu programu ElmerGUI oraz dwa najistotniejsze okna.

Po uruchomieniu programu ElmerGUI używa się głównie menu `Model` z którego ważne są: `Model >> Equation`, `Model >> Material` oraz `Model >> Boundary Condition`.

Okno `Equation`, przedstawione na rysunku 5 pozwala zdefiniować częstość kołową dla analizowanego problemu oraz przypisać równanie odpowiedniemu obszarowi siatki. Wybierając ustawienia, konieczne jest pamiętanie, by korzystać z zakładki `Model >> Equation >> Helmholtz Equation`.

Dla małych modeli (mniej niż  $10^5$  węzłów) szybsze okazują się procedury bezpośredniego rozwiązywania układów równań liniowych: należy użyć opcji w `Model >> Equation >> Helmholtz Equation >> Edit Solver Settings >> Linear System`. Zaznaczyć `Direct` i obok wybrać `Umfpack`.



Rysunek 5. Menu programu ElmerGUI oraz wybrane okna

**Warunki brzegowe** definiowane są w odpowiednim oknie, w zakładce dla odpowiedniego równania. Wymuszenie podajemy w postaci warunku brzegowego prędkości akustycznej na przybliżonej wysokości opony. Koniecznie należy zidentyfikować numer brzegu, na którym dany warunek ma być nałożony. Na przykład na rysunku 5 przedstawiono nałożenie warunku na brzeg numer 3. Zamieszczony wyżej listing pliku wsadowego do ElmerGrid pokazuje, że na tym brzegu ma być wymuszenie (brzeg między materiałami numer 3 oraz 1).

Po zdefiniowaniu równania, materiału oraz warunków brzegowych można przystąpić do rozwiązania problemu. Najpierw należy **zapisać projekt** w odpowiednim, najlepiej nowym katalogu. A następnie użyć odpowiedniej opcji w menu **Run**.

### 2.2.1. Plik sterujący obliczeniami

Plik *sif solver input file* zawiera wszystkie informacje, które zostały ustawione w poszczególnych polach programu ElmerGUI. Poniżej zamieszczono przykładowy plik *sif* do analizowanego problemu.

```
$ f = 1000
$ function nazwavtk(czestotliwosc){_nazwavtk = sprintf("ekran_%f.",czestotliwosc)}
```

Header

```
CHECK KEYWORDS Warn
Mesh DB "." "ekran"
Include Path ""
Results Directory ".."
End
```

Simulation

```
Max Output Level = 4
Coordinate System = Cartesian
Coordinate Mapping(3) = 1 2 3
Simulation Type = Steady state
Steady State Max Iterations = 1
Output Intervals = 1
Timestepping Method = BDF
BDF Order = 1
Solver Input File = case.sif
Post File = case.ep
End
```

Constants

```
Gravity(4) = 0 -1 0 9.82
Stefan Boltzmann = 5.67e-08
Permittivity of Vacuum = 8.8542e-12
Boltzmann Constant = 1.3807e-23
```

```

Unit Charge = 1.602e-19
End

Body 1
  Target Bodies(1) = 1
  Name = "Body Property 1"
  Equation = 1
  Material = 1
End

Solver 1
  Equation = Helmholtz Equation
  Variable = -dofs 2 Pressure Wave
  Procedure = "HelmholtzSolve" "HelmholtzSolver"
  Exec Solver = Always
  Stabilize = True
  Bubbles = False
  Lumped Mass Matrix = False
  Optimize Bandwidth = True
  Steady State Convergence Tolerance = 1.0e-5
  Nonlinear System Convergence Tolerance = 1.0e-8
  Nonlinear System Max Iterations = 20
  Nonlinear System Newton After Iterations = 3
  Nonlinear System Newton After Tolerance = 1.0e-3
  Nonlinear System Relaxation Factor = 1
! Linear System Solver = Iterative
! Linear System Iterative Method = BiCGStab
  Linear System Solver = Direct
  Linear System Direct Method = Umfpack
  Linear System Max Iterations = 500
  Linear System Convergence Tolerance = 1.0e-8
  Linear System Preconditioning = ILU0
  Linear System ILUT Tolerance = 1.0e-3
  Linear System Abort Not Converged = False
  Linear System Residual Output = 1
  Linear System Precondition Recompute = 1
End

Solver 2
  Exec Solver = String "after timestep"
  exec interval = 1
  Equation = String "ResultOutput"
  Procedure = File "ResultOutputSolve" "ResultOutputSolver"
  Output File Name = file $ nazwavtk(f)
  Output Format = String "vtu"
  Vtk Format = Logical True
End

Equation 1
  Name = "helm"
  Frequency = $ f
  Active Solvers(1) = 1
End

Material 1
  Name = "Air (room temperature)"
  Heat Conductivity = 0.0257
  Heat Capacity = 1005.0
  Density = 1.205
  Viscosity = 1.983e-5
  Sound speed = 343.0

```



Heat expansion Coefficient = 3.43e-3

End

Boundary Condition 1

Target Boundaries(1) = 3

Name = "wymuszenie"

Wave flux 1 = 10

End

Boundary Condition 2

Target Boundaries(1) = 2

Name = "odbicie"

Wave flux 1 = 0

Wave flux 2 = 0

End

Boundary Condition 3

Target Boundaries(1) = 1

Name = "Sommerfeld"

Wave impedance 1 = -343.0

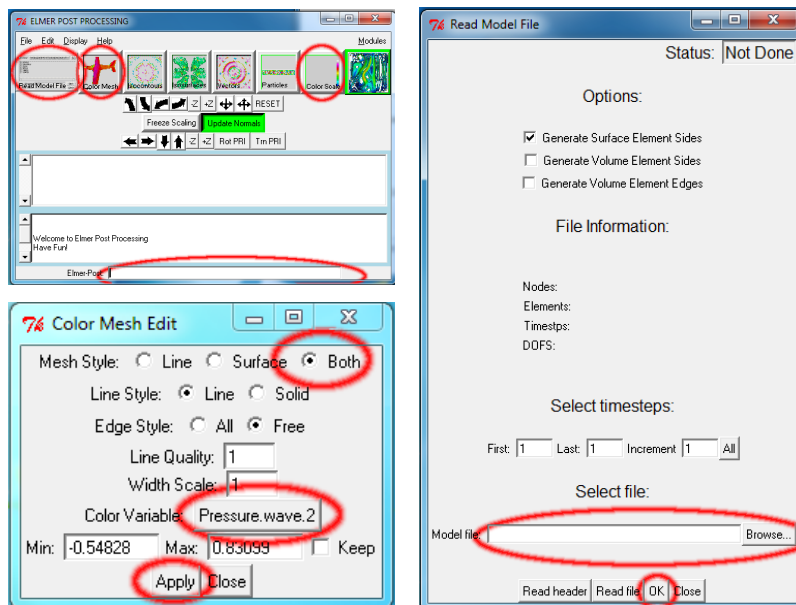
End

Warto zwrócić uwagę na zawartość poszczególnych sekcji dotyczących rozwiązywanych równań, wybranych solverów, czy warunków brzegowych.

**Ponieważ ten plik wykorzystuje elementy pakietu Elmer o których nie było do tej pory mowy, nie należy go wprost kopiować.**

### 2.3. Wyniki

Wyniki odczytać można z wykorzystaniem kilku programów. Najprościej jest użyć programu ElmerPost.



Rysunek 6. Menu programu ElmerPost oraz wybrane okna

Rysunek 6 przedstawia wybrane okna programu ElmerPost. Główne okno zawiera szereg przycisków, z których najistotniejsze są pierwsze dwa. Pierwszy otwiera okno do wczytywania wyników pokazane po prawej stronie rysunku 6, zaś drugi przycisk otwiera okno służące do wizualizacji wczytanych danych. To ostatnie okno pokazano po lewej stronie u dołu na rysunku 6.

Należy zwrócić uwagę na sposób wizualizacji siatki oraz na wybraną zmienną, która będzie widoczna – w tym przypadku `Pressure.wave.2`.

Aby uzyskać w programie ElmerPost rozkład amplitud należy uruchomić z menu `Edit >> Math` module window oraz wpisać

```
p=sqrt(Pressure.wave.1^2+Pressure.wave.2^2)
```

a następnie wybrać do wyświetlania zmienną p. Zamiast otwierać okno `Math module`, można w głównym oknie ElmerPost, w ostatniej linii wpisać

```
math p=sqrt(Pressure.wave.1^2+Pressure.wave.2^2)
```

Można też wykonać prostą animację wyników. W programie ElmerPost w ostatniej linii okna programu należy wpisać:

```
do i 1 50 { math phi=2*pi*$i/50;
math pres=Pressure.wave.1*cos(phi)-Pressure.wave.2*sin(phi); display};
```

## 2.4. Więcej częstotliwości

Czasem zachodzi konieczność przeanalizowania układu dla większej liczby częstotliwości. W tym celu można wykorzystać typ analizy `scanning`, który można ustawić w `Model >> Setup`. Działa podobnie jak analiza czasowa (`transient`) ale czas zmienia się co 1. Możliwe jest określenie w sekcji `Equation` pliku `sif` częstotliwości na przykład w następujący sposób

```
Frequency = Variable time
Real MATC "100*tx"
```

co pozwoli na przeprowadzenie analizy dla częstotliwości 100, 200, 300 Hz, ...

Gdy konieczne jest przeprowadzenie analizy dla wybranego arbitralnie zbioru częstotliwości, można zbudować tablicę częstotliwości (np. na początku pliku `sif`) `$ freq = 51 7 20 40 951` a następnie użyć definicji częstotliwości

```
Frequency = Variable time
Real MATC "freq(tx)"
```

Aby powyżej opisane wpisy działały, w sekcji `Simulation` muszą się znaleźć następujące wpisy

```
Simulation Type = scanning
Output Intervals (2) = 1 1
Timestep Intervals (2) = 1 70
Timestep Sizes (2) = 1.0 1.0
```

`Timestep Intervals` oznacza zakres zmian wartości zmiennej `tx`, `Timestep sizes` mówi o wielkości kroków czasowych.

## 2.5. Komentarz

Przedstawiony model pozwala na analizę rozkładu pola akustycznego w obecności ekranu, przy wymuszeniu kinematycznym. Przy zmianie częstotliwości, konieczne jest zmodyfikowanie wartości warunku brzegowego.

Po modyfikacji warunków brzegowych, konieczne jest wygenerowanie pliku `sif`, i zapisanie projektu przed uruchomieniem obliczeń.

## 3. Wizualizacja wyników w Matlab-ie

Poniżej podano kroki konieczne by dokonać takiej wizualizacji

- poznać strukturę pliku wynikowego `case.ep` – ważne są linie zaczynające się od znaku `#`, najpierw są współrzędne węzłów, później topologia (które węzły należą do którego elementu), a następnie wyniki w postaci części rzeczywistej i urojonej ciśnienia w poszczególnych węzłach;
- przypomnieć sobie sposób wczytywania plików tekstowych do Matlab-a
- zapoznać się z poleceniami `delaunay`, `trimesh` oraz ich modyfikacjami
- napisać m-plik do wizualizacji
- cieszyć się wynikami

## 4. Sztuczki i kruczki

**Wartość ciśnienia w punkcie** Aby zadać wartość ciśnienia w zadanym punkcie domeny obliczeniowej, można wykorzystać poniższy fragment pliku `sif`. Konieczna jest modyfikacja numeru warunku brzegowego i oczywiście współrzędnych.

```
Boundary Condition 7
  Name = "FixedNode"
  Target Coordinates(1,3) = 1.2 2.3 0.0
  Pressure wave 1 = Real 0.25
End
```

### Zmiana wartości w pliku z poziomu Matlab

```
fin = fopen('input.txt');
fout = fopen('output.txt');

while ~feof(fin)
    s = fgetl(fin);
    s = strrep(s, '118520', '118521');
    fprintf(fout, '%s', s);
    disp(s)
end

fclose(fin)
fclose(fout)
```

### Literatura

- [1] Czajka I., Gołaś A.: *Inżynierskie metody analizy numerycznej i planowanie eksperymentu*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2017
- [2] Gołaś A.: *Metody komputerowe w akustyce wnętrza i środowiska*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1995
- [3] Elmer Models Manual
- [4] ElmerGUI Manual
- [5] ElmerSovler Manual
- [6] ElmerGrid Manual
- [7] gmsh manual