

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE  
Elektrisko mašīnu un aparātu katedra

**A. Zviedris, A. Podgornovs**

**Divdimensionālu magnetostatisko lauku  
matemātiskā modelēšana ar galīgo  
elementu metodi**

Programma *QuickField*

Lietošanas instrukcija studentiem

Rīga 2007

Programmas *QuickField* lietošanas instrukcija paredzēta kā mācību palīgglīdzeklis magnetostatisko lauku aprēķināšanai (matemātiskai modelēšanai) elektromagnētiskās ierīcēs (elektromašīnās, transformatoros, elektromagnētiskos komutācijas aparātos u.tml.).

# Ievads

## I.1. Vispārīgās ziņas par *QuickField*

*QuickField* ir daudzfunkcionāls programmu komplekss, kas paredzēts plakānparalēlu un aksiālsimetrisku magnētisko lauku aprēķiniem (matemātiskai modelēšanai) ar galīgo elementu metodi.

*QuickField* ļauj risināt uzdevumus, kas saistīti ar procesu pētīšanu, kurus izraisa magnetostatiskais (līdzstrāvas vai pastāvīgu magnētu) lauks lineārā un nelineārā vidē.

Izmantojot programmu kompleksu *QuickField*, iespējams veikt šādas darbības:

- aprakstīt pētāmā objekta ģeometriskos modeļus (topoloģiju), kā arī uzdot vides īpašības, lauka avotus un robežnosacījumus;
- atrisināt uzdevumu ar augstu precizitāti;
- iegūt lauka vizuālo ainu;
- aprēķināt dažādus lauka raksturlielumus, kā arī dažādus pētāmā objekta parametrus;
- saglabāt un izdrukāt aprēķina rezultātus to turpmākai izmantošanai.

Programmu komplekss piemērots lietošanai *Pentium* tipa personāldatoros operētājsistēmu *Microsoft Windows 98*, *Microsoft Windows NT*, *Microsoft Windows 2000* vai *Microsoft Windows XP* vidē.

## I.2. Rokasgrāmatas struktūra

Šajā rokasgrāmatā ir 7 nodaļas.

1. nodaļa "***QuickField* struktūras un risināmo uzdevumu īss apraksts**" sniedz informāciju par programmu kompleksa strukturālām īpatnībām, iespējām, kā arī ietver risināmo uzdevumu īsu aprakstu.

2. nodaļā "**Uzdevuma apraksts**" doti norādījumi par uzdevuma tipa aprakstīšanu un galveno parametru ievadi.

3. nodaļā "**Uzdevuma topoloģiskā modeļa konstrēšana un aprakstīšana**" aprakstīta ģeometriskā modeļa izveidošana galīgo elementu režģa konstruēšanai, kā arī vides īpašību un robežnosacījumu uzdošana.

4. nodaļa "**Fizikālo parametru vērtību ievade**" iepazīstina ar programmā izmantojamo failu sistēmu, kuri satur fizikālo lielumu skaitliskās vērtības un šo failu piesaisti topoloģiskajam modelim.

5. nodaļā "**Uzdevuma risināšana**" aprakstītas darbības, kas jāveic uzdevuma risināšanas gaitā, kā arī darbības, kas jāveic, lai noteiktā veidā iegūtu aprēķina rezultātus.

6. nodaļā "**Rezultātu apstrāde un analīze**" aprakstītas dažādas aprēķina rezultātu attēlošanas iespējas un aprēķina rezultātu izvade.

7. nodaļa "**Lauka teorijas pamatelementi *QuickField* programmatūrā**" iepazīstina ar lauka teorijas matemātiskajām sakarībām, uz kurām balstīta *QuickField* programmatūrā izmantotā galīgo elementu metode.

# 1. *QuickField* struktūra un risināmo uzdevumu īss apraksts

## 1.1. *QuickField* vadības pamatelementi

Izmantojot *QuickField*, tiek veiktas darbības ar dažāda veida dokumentiem: uzdevumiem, topoloģiskajiem un ģeometriskajiem modeļiem, materiālu īpašību bibliotēkām u. c. Katru no dokumentiem atver atsevišķā logā, kas ir *QuickField* galvenā loga sastāvdaļa. Iespējams vienlaikus atvērt jebkura skaita logu. Pārejot no viena loga uz citu, notiek pārslēgšanās no viena dokumenta uz citu dokumentu. Jebkurā brīdī tikai viens logs ir aktīvs un tā saturu var rediģēt, izmantojot izvēlņu joslu, kas atrodas loga augšējā daļā un kura var saturēt dažādus elementus atkarībā no dokumenta tipa. Var izmantot kontekstatkarīgo izvēlni, kuru izsauc, noklikšķinot peles labo pogu, ja peles kursors atrodas attiecīgā dokumenta logā.

*QuickField* izmanto šādus dokumentus:

- *Uzdevuma apraksts*;
- *Topoloģiskais modelis*;
- *Fizikālo parametru apraksts*.

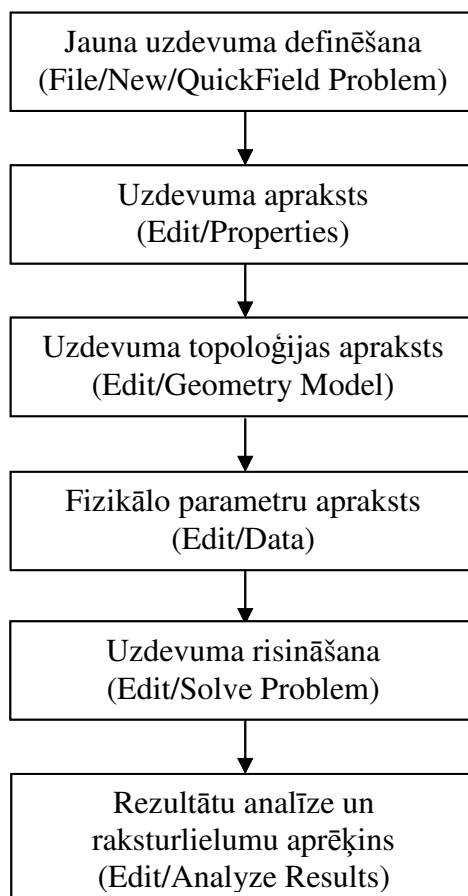
Dokuments *Uzdevuma apraksts (QuickField Problem)* piesaistīts katram konkrētam uzdevumam. Šajā dokumentā ir norādīti tādi vispārīgi raksturojumi kā uzdevuma tips (magnetostatiskais lauks), lauka raksturs (plakanparalēls, aksiālsimetrisks), kā arī norādīti citu dokumentu nosaukumi (faili), kas saistīti ar doto uzdevumu un veido šī uzdevuma datu bāzi (sk. 2. nod.).

Dokuments *Topoloģiskais modelis (Geometric Model)* satur pilnu informāciju par topoloģiskā modeļa parametriem (topoloģiskā modeļa elementu formu un raksturīgiem izmēriem) un galīgo elementu režģi. Dažāda tipa uzdevumiem var tikt izmantots viens un tas pats topoloģiskais modelis.

Dokumenta *Fizikālie parametri (Property Description)* saturs ir atkarīgs no uzdevuma tipa (magnetostatiskais lauks) un satur informāciju par topoloģiskā modeļa elementiem atbilstošām vides īpašībām, lauka avotiem un robežnosacījumiem. Šo dokumentu var izmantot kā vides īpašību raksturojošo lielumu katalogu dažāda tipa uzdevumiem. Lai atrisinātu uzdevumu, šim uzdevumam dokumentā *Uzdevuma apraksts* nepieciešams piesaistīt divus dokumentus – *Topoloģiskais modelis* un *Fizikālie parametri* (sk. 4. nod.).

*QuickField* darbības seansa laikā katrs dokuments saglabājas kā atsevišķs fails. Jebkura seansa laikā var veidot jaunus dokumentus vai atvērt jau esošos (sk. 5. un 6. nod.).

Izmantojot *QuickField* mobilo arhitektūru, iespējams ļoti ātri atrisināt uzdevumu. Darbību secība uzdevuma risināšanai parādīta 1. att. blokshēmā.



1. att.

## 1.2. Darbības ar logiem


*QuickField* ir lietojumprogramma, kas ļauj vienlaikus strādāt ar atsevišķiem dokumentiem. Darbības ar noteikta tipa dokumentiem ir iztīrītas turpmākajās nodaļās, tādēļ šeit aplūkosim tikai vispārīgus jautājumus, kas attiecas uz jaunu dokumentu radīšanu, esošo dokumentu atvēršanu, kā arī ar šo dokumentu sasaistīšanu.

Jaunu *QuickField* dokumentu var izveidot ar vienu no šādiem paņēmieniem:

- palaižot programmu *QuickField* no *Window* galvenā loga ar komandu **Start/Programms/QuickField/File/New...** un pēc tam dialoga logā *New* izvēloties izveidojamā dokumenta tipu, piem., *QuickField Problem*, *Geometric Model*, *Magnetostatics Data File* u. tml.;
- noklikšķinot peles labo pogu uz ekrāna pamatvirsmas (ekrāna apgabala, kas nav aizņemts ne ar kādu lietojumprogrammu), pēc tam kontekstatkarīgajā izvēlnē ar komandu **New** atverot sarakstu un tajā izvēloties attiecīgo dokumenta tipu;
- atverot pārlūkprogrammas *Windows Explorer* logu, aizzīmējot tajā mapi, kurā paredzēts izveidot jauno dokumentu, un pēc tam ar komandu **File/New** atverot sarakstu un tajā izvēloties attiecīgo dokumenta tipu.

Lai atvērtu jau esošo *QuickField* dokumentu, nepieciešams veikt kādu no šādām darbībām:

- izdarot peles dubultklikšķi pārlūkprogrammas *Windows Explorer* logā uz attiecīgā faila nosaukuma tajā mapē, kurā šis fails saglabāts;
- ja programma *QuickField* jau palaista, izpildot komandu **File/Open**, vai izmantojot attiecīgo rīkjoslās piktogrammu.

Dokumentu aizver ar komandu **File/Close** vai vadības pogu  loga augšējā labajā stūrī.

### 1.3. Risināmie magnetostatiskā lauka uzdevumi

Magnētiskā lauka aprēķini nepieciešami dažādu elektrotehnisko ierīču (elektrisko mašīnu, transformatoru, elektrisko aparātu, reaktoru u. c.) projektēšanā un pētīšanā. Parasti magnētiskā lauka aprēķina uzdevumos interesē tādi lielumi kā magnētiskā indukcija, magnētiskā lauka intensitāte, plūsmas saķēdējums, elektromagnētiskie spēki, induktivitātes u. tml.

Programmu kompleksu *QuickField* var izmantot lineāru un nelineāru magnetostatikas uzdevumu risināšanai plakanparalēliem un aksiālsimetriskiem laukiem, aprakstot šos laukus ar otrās kārtas parciālo atvasinājumu diferenciālvienādojumiem attiecībā pret vektoriālo magnētisko potenciālu.

Uzdevuma risināšanā paredzētas šādas iespējas.

Uzdot vides īpašības (Material properties) gaisam, anizotropiem feromagnētiskiem materiāliem ar nemainīgu magnētisko caurlaidību, izotropiskiem feromagnētiskiem materiāliem ar nelineārām magnetizēšanas līknēm  $B = f(H)$ , pastāvīgiem magnētiem, strāvvadošiem apgabaliem. Feromagnētisko materiālu magnetizēšanas līknes  $B = f(H)$  var ievadīt un rediģēt, izmantojot speciālu redaktoru (sk. 4.4.2).

Uzdot lauka avotus (Loading sources): koncentrētas vai izkliedētas strāvas vai strāvas blīvumus, homogēnu ārējo lauku un lauka avotus kā pastāvīgos magnētus.

Uzdot robežnosacījumus (Boundary conditions): pirmā veida (Dirihlē) robežnosacījumus, kad uz apgabala robežām ir noteiktas vektoriālā potenciāla skaitliskās vērtības, un otrā veida (Neimaņa) robežnosacījumus, kad uz apgabala robežām ir noteiktas vektoriālā potenciāla atvasinājuma vērtības normāles virzienā (jeb magnētiskās indukcijas tangenciālā komponente).

Iegūt aprēķina rezultātus (Postprocessing results): vektoriālā magnētiskā potenciāla, magnētiskās indukcijas, magnētiskā lauka intensitātes skaitliskās vērtības aprēķina apgabala jebkurā punktā, kā arī noteikt elektromagnētiskos spēkus, šo spēku momentu, magnētiskā lauka enerģiju, plūsmas saķēdējumu, induktivitāti un mijinduktivitāti.

## 2. Uzdevuma apraksts

### 2.1. Uzdevuma datu bāzes struktūra

Programmas *QuickField* datu kopums (uzdevuma datu bāze), kas ir atšķirīgs katram konkrētam uzdevumam, sastāv no vairākām daļām. Centrālo vietu šajā datu bāzē ieņem uzdevuma apraksts, kas tiek saglabāts atmiņā kā fails ar paplašinājumu **.pbm**. Uzdevuma apraksts ietver vispārīga rakstura informāciju par uzdevumu, kurā norādīts uzdevuma tips, lauka raksturs, aprēķina precizitāte, kā arī norādīti pērējo failu nosaukumi, kas veido dotā uzdevuma datu bāzi. Šie faili ir: topoloģiskā modeļa apraksta fails ar paplašinājumu **.mod** un faili, kas satur informāciju par uzdevuma fizikālajiem parametriem, ar paplašinājuma **.dms**.

Uzdevuma aprakstā var būt atsauce uz vienu vai diviem fizikālo parametru failiem, kuriem ir vienāds formāts, bet dažāda funkcionālā nozīme. Parasti pirmais no tiem satur datus, kas attiecas tikai uz vienu konkrēto uzdevumu, bet otru var izmantot kā vides īpašību raksturlielumu un robežnosacījumu bibliotēku, kura izmantojama veselai uzdevumu klasei. Šāds datu bāzes izvietojums vairākos failos ļauj izmantot kopīgu topoloģiskā modeļa failu vai fizikālo parametru failu vairākiem līdzīgiem uzdevumiem.

Uzdevuma risināšanas laikā *QuickField* automātiski izveido failu, kurā tiek ierakstīti aprēķina rezultāti. Šis fails, kura paplašinājums ir **.res**, bet vārds sakrīt ar uzdevuma apraksta faila vārdu, tiek saglabāts tajā pašā mapē, kurā atrodas uzdevuma apraksta fails.

### 2.2. Uzdevuma vadība

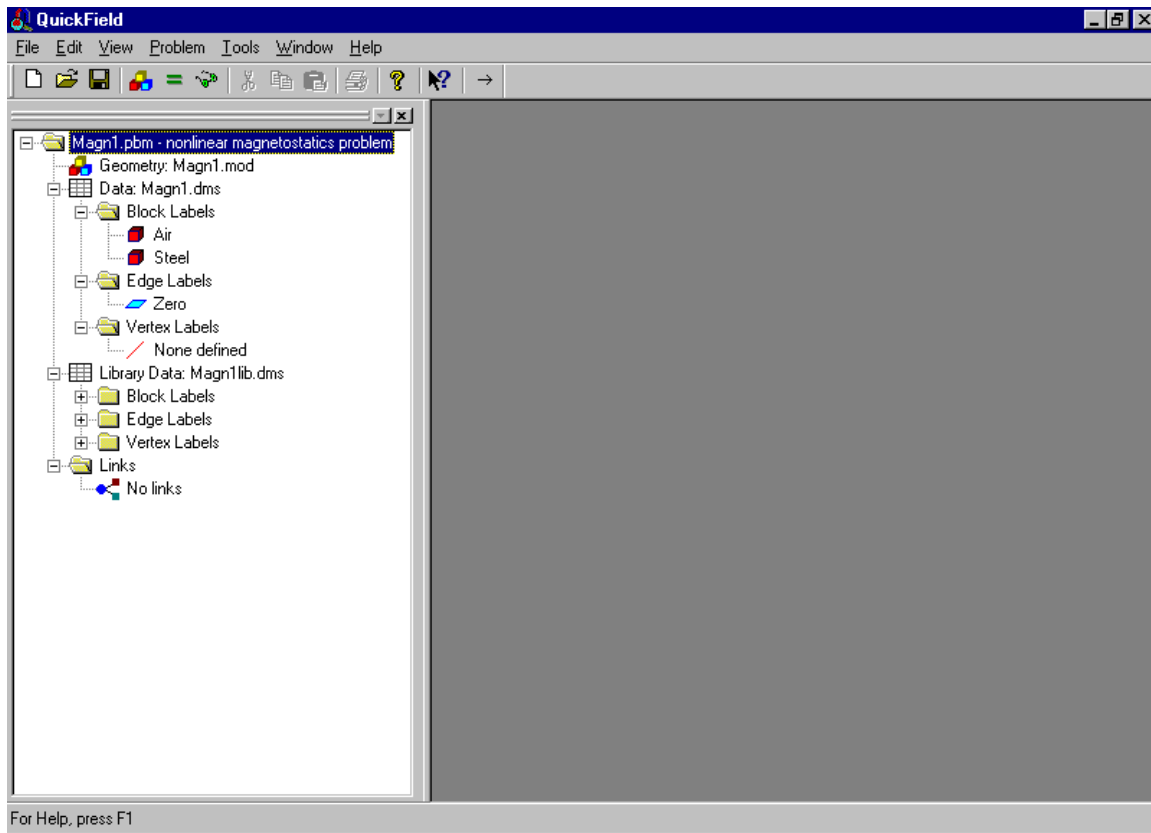
Lai izveidotu jauna uzdevuma aprakstu, jāizpilda komanda **File/New** un logā *New* no piedāvātā saraksta jāizvēlas dokumenta tips *QuickField Problem*, pēc tam jānorāda jaunā uzdevuma faila vārds un ceļš, kā arī uzdevumu raksturojošie parametri (uzdevuma tips, lauka raksturs, risināšanas precizitāte, garuma mērvienības u. tml.).

Jauna uzdevuma aprakstu var veidot arī, izmantojot jau kāda atvērta *QuickField* uzdevuma apraksta kopiju.

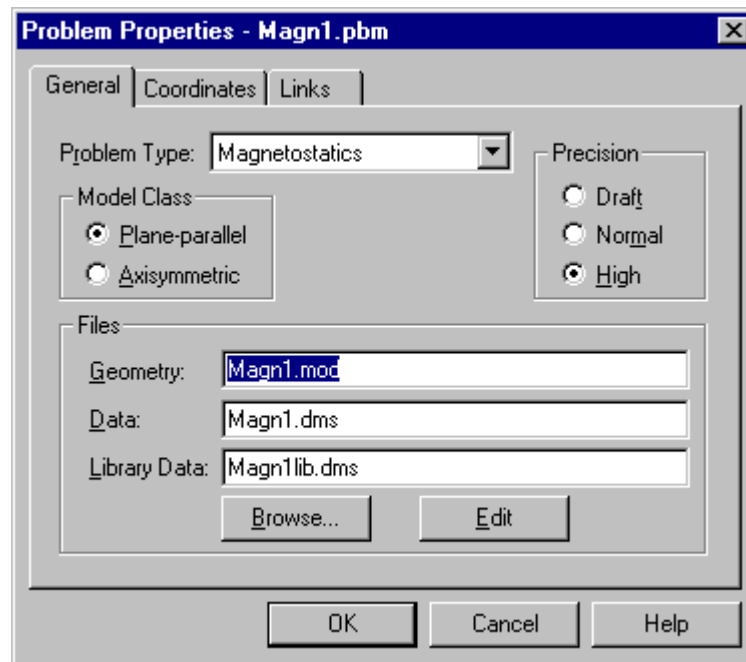
Lai atvērtu jau esošu dokumentu, jāizpilda komanda **File/Open**. Tad atvērtais dokuments parādās uzdevuma apraksta logā, kas atrodas pa kreisi no *QuickField* galvenā loga. Uzdevuma apraksta logā iespējams norādīt visus uzdevuma fizikālos parametrus (vides īpašības, lauka avotus un robežnosacījumus). Uzdevuma pārlūkprogramma (2. att.) hierarhiskas struktūras (koka) veidā parāda arī failu vārdus, uz kuriem dotajā uzdevuma aprakstā ir atsauce, bet koka zari *Data* un *Library data* satur topoloģiskā modeļa blokiem, šķautnēm un virsotnēm piešķirto identifikatoru sarakstu.

Lai mainītu uzdevuma parametrus vai failu vārdus jau atvērtajā logā (2. att.), šī loga sarakstā jāaizzīmē attiecīgā pozīcija un jāizpilda komanda **Problem/Problem Properties...**, un pēc tam logā *Problem Properties* jānorāda attiecīgie parametri.

Lai rediģētu dokumentu, uz kuru ir atsauce uzdevuma apraksta logā, piemēram, *Topoloģiskais modelis (Geometry)*, *Datu avots (Data)*, jāizdara peles dubultklikšķis uz koka zara attiecīgā elementa.



2. att.



3. att.



Lai atrisinātu uzdevumu, jāizpilda komanda **Problem/Solve Problem**, bet lai aplūkotu risināšanas rezultātu – komanda **Problem/Analyse Results**.

### 2.2.1. Uzdevuma parametru ievade

Loga *Problem Properties* (3. att.) attiecīgos ievades lauciņos no piedāvātajiem sarakstiem jānorāda šādi uzdevuma parametri:

- **uzdevuma tips (Problem Type)** – magnetostatiskais lauks;
- **modelējamā lauka raksturs (Model Class)** – plakanparalēls vai aksiālsimetriskis;
- **risināšanas precizitāte (Precision)** – augstākas precizitātes sasniegšanai nepieciešams lielāks risināšanas laiks;
- **faili (Files)** – jāievada failu vārdi, kuros aprakstīts topoloģiskais modelis un fizikālie parametri, turklāt ar slēdzi **Browse...** var izvēlēties failu no jebkuras mapes;
- **redīgēšana (Edit)** – ļauj atvērt jebkuru failu, lai veiktu tā redīgēšanu.

### 2.2.3. Garuma mērvienību izvēle

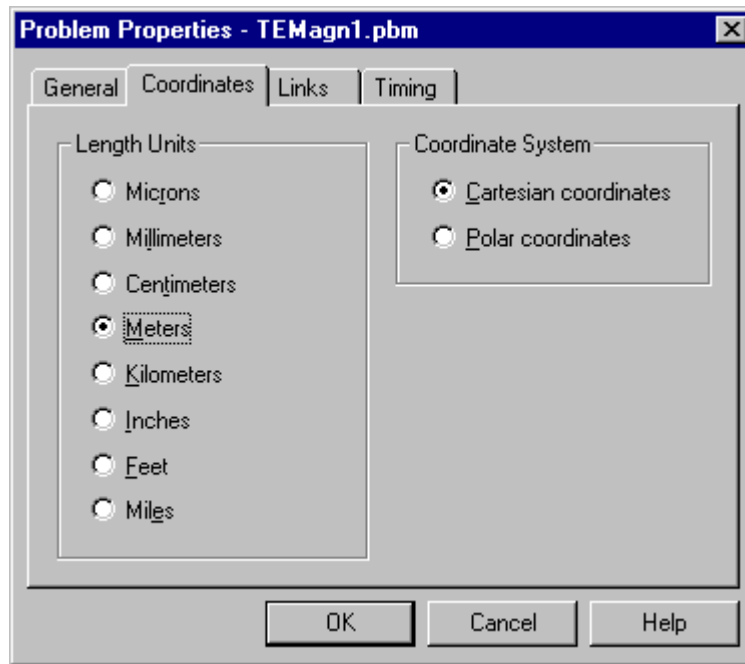
Topoloģiskā modeļa izveidošanā un aprakstīšanā iespējams izmantot dažādas mērvienības – milimetrus, centimetrus, metrus u. c. Lai iestatītu mērvienību, jāizpilda komanda **Problem/Properties** un logā *Problem Properties* ar peles klikšķi jāpārslēdzas uz pakārtoto izvēlni **Coordinates** (4. att.), kurā no piedāvātā saraksta var izvēlēties vēlamo mērvienību.

Izvēlētā mērvienība ir piesaistīta konkrētam uzdevumam un tas ļauj dažādiem uzdevumiem izmantot dažādas mērvienības. Parasti mērvienības izvēlas pirms topoloģiskā modeļa konstruēšanas, bet pēc tam tās var mainīt, un tas nekādā veidā neietekmē modeļa faktiskos izmērus. Tā, piemēram, ja ir kvadrātiskas formas topoloģiskais modelis ar malas garumu 1 m, tad, pārejot uz centimetriem, iegūst kvadrātu ar malas garumu 100 cm.

Garumu mērvienību izvēle neietekmē citu fizikālo lielumu mērvienības, kuras vienmēr saglabājas kā SI pamatmērvienības. Tā, piemēram, strāvas blīvums vienmēr ir noteikts ar mērvienību  $A/m^2$ , bet nekad ar  $A/mm^2$ .

### 2.2.4. Taisnleņķa un polārās koordinātas

Topoloģiskais modelis var tikt aprakstīts, kā arī vides īpašības un robežnosacījumi uzdoti Dekarta taisnleņķa vai polāro koordinātu sistēmā. Lai izvēlētos koordinātu sistēmu, jāizpilda komanda **Problem/Properties** un logā *Problem Properties* ar peles klikšķi jāpārslēdzas uz pakārtoto izvēlni **Coordinates** (4. att.), kurā no piedāvātā saraksta var izvēlēties Dekarta taisnleņķa koordinātas (Cartesian coordinates) vai polārās koordinātas (Polar coordinates). Koordinātu sistēmas izvēli var izdarīt arī topoloģiskā modeļa redīgēšanas vai rezultātu apstrādes laikā. Izvēli var veikt arī katram modeļa elementam atsevišķi fizikālo parametru ievades laikā.



4. att.

### 3. Uzdevuma topoloģiskā modeļa izveidošana un aprakstīšana

#### 3.1. Pamatjēdzieni un terminoloģija

Topoloģiskais modelis (Geometric Model) ir viens no *QuickField* dokumentiem, kas satur visu informāciju par pētāmā objekta topoloģijas elementiem (virsoņiem, šķautnēm, blokiem), nosaka to savstarpējo saistību, kā arī atsevišķo elementu saistību ar vides īpašībām, lauka avotiem un robežnosacījumiem.

*QuickField* izmantotā topoloģiskā modeļa elementi ir *virsoņi*, *šķautnes* un *bloki*.

Virsoņi (Vertex) ir plaknes punkts, kura koordinātas uzdod lietotājs, vai arī programma tās aprēķina automātiski kā divu šķautņu krustpunkta koordinātas. Katrai virsoņi var uzdot *diskretizācijas soli* un piešķirt *identifikatoru*. Diskretizācijas solis aptuveni nosaka attālumu starp galīgo elementu režģa blakus mezgliem virsoņi tuvumā. Identifikators jāpiešķir attiecīgās virsoņi atpazīšanai, ja šajā virsoņi, piemēram, uzdod punktvēda lauka avotu.

Šķautne (Edge) ir taisnes nogrieznis vai riņķa līnijas loks, kas savieno divas virsoņi un nekrustojas ar citām topoloģiskā modeļa šķautnēm. Ja jaunveidotā šķautne iet caur jau esošu virsoņi, tad izveidojas divas šķautnes, kas savienotas šajā virsoņi. Ja jaunveidotā šķautne krustojas ar jau esošajām šķautnēm, tad visi krustpunkti kļūst par virsoņi, bet krustojošās šķautnes tiek sadalītas vairākās atsevišķās šķautnēs. Lai identificētu šķautni, piemēram, lai uzdotu robežnosacījumus, tai jāpiešķir identifikators.

Bloks (Block) ir nepārtraukts aprēķina apgabala apakšapgabals, kura robežu veido šķautnes vai atsevišķos gadījumos izolētas virsoņi. Lai aprakstītu bloku vides īpašības,

tiem jāpiešķir identifikatori, kuri izmantojami arī tad, ja attiecīgajā blokā jāuzdod izkļiedēti lauka avoti. Blokos bez identifikatoriem lauka aprēķins netiek veikts pat tad, ja šajā blokā ir ģenerēts galīgo elementu režģis. Galīgo elementu režģis katrā atsevišķā blokā tiek konstruēts automātiski vai arī ievērojot uzdoto atsevišķo virsotņu diskretizācijas soli.

Identifikators (Label) ir simbolu virkne, kas var sastāvēt no 1 līdz 16 simboliem, un kas ir nepieciešams, lai topoloģiskā modeļa elementiem (virsotnēm, šķautnēm, blokiem) piesaistītu noteiktus fizikālos parametrus. Par identifikatoriem var izmantot jebkurus simbolus, ieskaitot latīņu, latviešu, krievu u. c. valodu alfabēta burtus, ciparus, pieturzīmes, speciālos simbolus (\$, %, @, #), bet nedrīkst izmantot simbolus "\*" un "?". Lielie burti un mazie burti tiek interpretēti kā dažādi simboli.

Diskretizācijas solis (Mesh spacing value) aptuveni nosaka galīgo elementu izmērus virsotnes tuvumā. To uzdod garuma mērvienībās un piesaista noteiktai virsotnei. Diskretizācijas solis ļauj regulēt galīgo elementu režģa blīvumu un tādējādi arī risinājuma precizitāti atsevišķās aprēķina apgabala zonās.

## 3.2. Galīgo elementu režģa ģenerēšana

### 3.2.1. Vispārīgi norādījumi

Lai ģenerētu galīgo elementu režģi, vispirms jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jākonstruē un jāapraksta aprēķina apgabala topoloģiskais modelis;
- 2) jāuzdod vides īpašības.

Aprakstot topoloģisko modeli, tiek uzdotas virsotnes un šķautnes, kas aptver blokus ar dažādiem fizikāliem parametriem (vides īpašībām, lauka avotiem). Var uzdot jaunas virsotnes un šķautnes, pārvietot, kopēt un aizvākt jebkuru topoloģiskā modeļa elementu. Lai veiktu minētās darbības vienlaikus ar vairākiem elementiem, var izmantot aizzīmēšanu (Selection). Vides īpašības, lauka avotus un robežnosacījumus uzdod, piešķirot šiem elementiem identifikatorus.

Galīgo elementu režģi var konstruēt divējādi:

- izmantojot automātisko režīmu, kurā atkarībā no topoloģiskā modeļa elementu izmēriem tiek noteikta vienmērīga pāreja no smalkāka režģa uz retāku režģi (šajā gadījumā lietotājam nav jāievada nekāda papildinformācija);
- uzdodot režģa blīvumu (šajā gadījumā lietotājam jāuzdod diskretizācijas solis atsevišķās virsotnēs).

### 3.2.2. Jaunas šķautnes veidošana

Lai izveidotu jaunu šķautni, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) ar komandu **Edit/Edit Geometry Model/Edit/Insert Mode** jāizvēlas iestarpināšanas režīms;
- 2) izmantojot sarakstu modeļa rīkjoslā *New Edge Angle*, jāizvēlas jaunveidojamās šķautnes veids (taisnes nogrieznis vai riņķa līnijas loks) un loka centra leņķis (var izmantot sarakstā dotās leņķu vērtības vai ievadīt jebkuru citu vērtību);

- 3) turot nospiestu peles pogu, kursori jāpārvieto no šķautnes sākumpunkta līdz beigu punktam, turklāt jebkuru esošo virsotni var izmantot par jaunveidojamās šķautnes beigu punktu, vai arī vienlaicīgi ar šķautnes veidošanu izveidot jaunu virsotni.

Šķautņu veidošanas beigās jāizslēdz iestarpināšanas režīms (Insert Mode), jo pretējā gadījumā var izveidoties nevajadzīgi topoloģiskā modeļa elementi.

### 3.2.3. Jaunas virsotnes veidošana

Lai izveidotu jaunu virsotni, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) ar komandu **Edit/Edit Geometry Model/Edit/Insert Mode** jāizvēlas iestarpināšanas režīms;
- 2) jāpārlicinās, vai piesaistes koordinātu tīkls ir piemērots jaunveidojamās virsotnes koordinātu ievadīšanai (sk. komandu **Edit/Grid Settings...** un pēc šīs komandas izpildes atvērto logu *Grid Settings*);
- 3) jāpārvieto peles kursori tajā punktā, kur jābūt jaunajai virsotnei un jāizdara peles dubultklikšķis vai jānospiež taustiņš **Enter**.

Virsotņu veidošanas beigās jāizslēdz iestarpināšanas režīms (Insert Mode), jo pretējā gadījumā var izveidoties nevajadzīgi topoloģiskā modeļa elementi.

### 3.2.4. Elementu aizzīmēšana

Lai aizzīmētu kādu no topoloģiskā modeļa elementiem (virsotni, šķautni, bloku), jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jāpārlicinās, vai ir izslēgts iestarpināšanas režīms (Insert Mode) (sk. 3.2.2);
- 2) jānoklikšķina peles poga uz aizzīmējamiem elementiem un, turot nospiestu taustiņu **Shift** vai **Ctrl**, jāpārvieto peles kursori ar nospiestu pogu tā, lai aizzīmējamie elementi atrastos taisnstūrveida lodziņā (šajā gadījumā aizzīmēti tiks tikai tie elementi, kuri pilnībā novietoti lodziņā).

Var izmantot arī komandu **Edit/Select All** (visu elementu aizzīmēšanai) vai **Edit/Unselect All** (visu elementu aizzīmēšanas atcelšanai), turklāt vienlaikus var aizzīmēt dažāda tipa elementus (virsotnes, šķautnes, blokus).

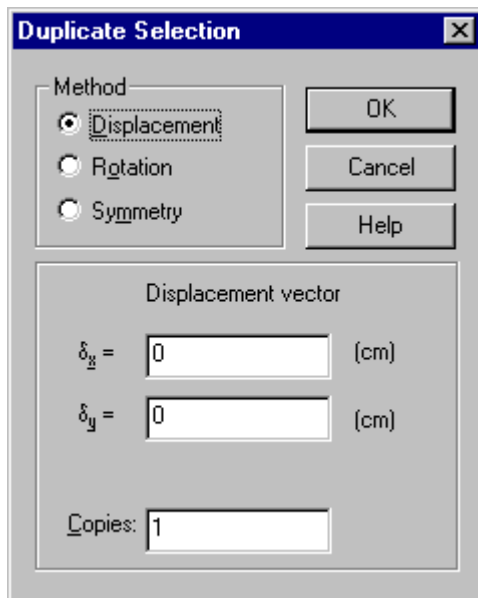
### 3.2.5. Elementu kopēšana un pārvietošana

Lai konstruētu vairākus vienādus topoloģiskā modeļa elementus, tos var izveidot, kopējot vai pārvietojot jau esošos elementus vai veselu šo elementu grupu. Kopēšanai (vai pārvietošanai) nepieciešams veikt šādas secīgas darbības:

- 1) aizzīmēt jebkuru skaitu kopējamo (vai pārvietojamo) elementu;
- 2) izpildīt komandu **Edit/Duplicate Selection...**;
- 3) dialoga logā *Duplicate Selection* (5. att.) izvēlēties transformācijas veidu – nobīdi (Displacement), pagriešanu (Rotation) vai simetrisku pārneši (Symmetry) un norādīt transformācijas parametrus, t. i., transformācijas vektora komponentes (tad jāunie

elementi parādīsies uz ekrāna, lai, nospiežot slēdzi **OK**, varētu apstiprināt ievadītos parametrus);

- lai apstiprinātu kopēšanu, jānospiež slēdzis **Yes** (tad jaunie elementi tiks iekļauti topoloģiskajā modelī un pēdējais no tiem būs aizzīmēts).



5. att.

Kopēšanas operācijā tiek saglabāti visi kopējamā elementa atribūti, ieskaitot identifikatorus un diskretizācijas soļus, bet netiek kopēts galīgo elementu režģis (ja tas iepriekš jau bijis ģenerēts).

Veicot kopēšanu, jāievēro, ka nepareiza transformācijas parametru ievade var izveidot jaunus elementus nepareizā vietā. Tie var uzklāties jau iepriekš izveidotajiem elementiem, tādējādi veidojot nevēlamas virsotnes šķautņu šķērsojumu vietās. Šādu elementu aizvākšana var būt ļoti sarežģīts process.

Aizzīmētos elementus var ne tikai kopēt, bet arī pārvietot uz jaunu vietu, ievērojot to, ka apgabala topoloģija nedrīkst mainīties, t. i., nedrīkst veidoties jauni krustpunkti un saskares punkti.

Lai pārvietotu aizzīmētos topoloģiskā modeļa elementus, jāizpilda komanda **Edit/Move Selection...** un dialoga logā *Move Selection*, līdzīgi kā logā *Duplicate Selection* (sk. 5. att.), jāievada transformācijas parametri.

Topoloģiskā modeļa elementu kopēšanu un pārvietošanu var veikt, izmantojot šādas transformācijas:

- nobīde (Displacement) – aizzīmētais elements (vai elementu grupa), dialoga logā uzdodot nobīdes vektora komponentes, tiek paralēli pārnesti, turklāt var izveidot vairākas kopijas, kur katra nākošā kopija iegūta kā iepriekšējās kopijas nobīdes rezultāts (nepieciešamo kopiju skaitu var norādīt dialoga logā);
- pagriešana (Rotation) – aizzīmētais elements (vai elementu grupa), dialoga logā uzdodot pagriešanas centra koordinātas un pagriešanas leņķi, tiek pagriezti par norādīto leņķi attiecībā pret norādīto punktu, turklāt var izveidot vairākas kopijas, kur

katra nākošā kopija iegūta kā iepriekšējas kopijas pagriešanas rezultāts (nepieciešamo kopiju skaitu var norādīt dialoga logā);

- simetriska pārnese (Symmetry) – aizzīmētais elements (vai elementu grupa) tiek attēlots simetriski attiecībā pret jebkuru līniju (simetrijas līniju), kas uzdota ar kādu tās punktu un leņķi starp šo simetrijas līniju un horizontālo asi, turklāt leņķa pozitīvā vērtība atbilst pulksteņa rādītāja kustības pretējam virzienam (simetrisko pārnese var izmantot tikai kopēšanas operācijās);
- mērogošana (Scaling) – aizzīmētais elements (vai elementu grupa), dialoga logā uzdodot mērogošanas koeficientu, tiek proporcionāli palielināts vai samazināts, veidojot līdzīgu figūru (šādu transformāciju var izmantot tikai pārvietošanas operācijās).

### 3.2.6. Elementu aizvākšana

Lai aizvāktu kādu no topoloģiskā modeļa elementiem (virgotni, šķautni, bloku), jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jāaizzīmē aizvācamais elements;
- 2) jāizpilda komanda **Edit/Delete Selection**.

Ja aizzīmētas tikai topoloģiskā modeļa virgotnes un aizvācamā virgotne ir divu šķautņu kopējais punkts, tad pēc virgotnes aizvākšanas šīs divas šķautnes (ja viena šķautne ir otras turpinājums) savienojas un pārveidojas par vienu līniju. Ja aizzīmētā virgotne ir trīs vai vairāku šķautņu kopējais punkts (vai arī divu šķautņu kopējais punkts, kurā šīs šķautnes veido leņķi), tad programma prasa apstiprinājumu par visu to šķautņu aizvākšanu, kas saistītas ar šo virgotni.

### 3.2.7. Piesaistes attāluma izšķirtspējas parametrs

Lai izvairītos no grūti kontrolējamām neprecizitātēm topoloģiskā modeļa atsevišķu elementu konstruēšanā, jaunas virgotnes vai jaunas šķautnes nevar izveidot ļoti tuvu jau esošajām virgotnēm vai šķautnēm. Tādēļ, papildinot topoloģisko modeli ar jauniem elementiem, jāuzdod parametrs  $\varepsilon$ , ko sauc par *piesaistes attāluma izšķirtspējas parametru*, kā arī jāievēro šādi nosacījumi:

- jaunu virgotni var konstruēt tikai tādā attālumā no esošās virgotnes, kurā šis attālums nav mazāks par  $2\varepsilon$ ;
- topoloģisko modeli nevar papildināt ar jaunu šķautni, ja tā savieno tās pašas virgotnes, kuras savieno jau esošā šķautne, un ja maksimālais attālums starp šīm šķautnēm nepārsniedz  $\varepsilon$ ;
- ja attālums starp jaunveidojamo virgotni un jau esošo šķautni nepārsniedz  $\varepsilon$ , tad šī virgotne novietojas uz esošās šķautnes, kura automātiski tiek sadalīta divās atsevišķās šķautnēs.

Lai, konstruējot topoloģiskā modeļa maza izmēra elementus, nodrošinātu piesaistes attāluma izšķirtspējas vizuālu kontroli, jāpalielina ekrānattēla mērogs, turklāt jāievēro, ka parametrs  $\varepsilon$  ir 0,5% no attēla redzamās daļas. Šis apstāklis jāņem vērā, piemēram,

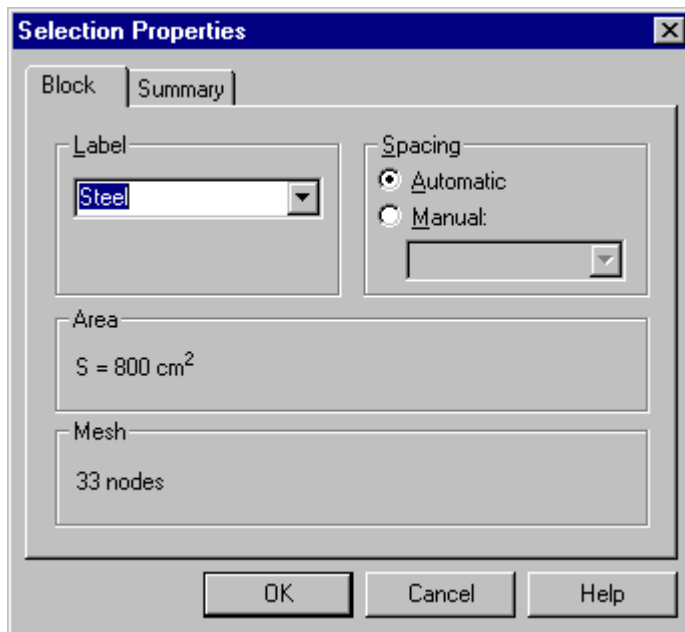
konstruējot topoloģiskā modeļa elementus elektriskās mašīnas gaisa spraugai pieguļošajos apgabalos.

### 3.3. Identifikatoru piešķiršana topoloģiskā modeļa elementiem

Vides īpašības, robežnosacījumus un lauka avotus topoloģiskā modeļa elementiem piesaista, izmantojot šiem elementiem piešķirtos identifikatorus (Label).

Lai piešķirtu indetifikatoru, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jāaizzīmē topoloģiskā modeļa elements, kuram nepieciešams piešķirt identifikatoru;
- 2) jāizpilda komanda **Edit/Properties** (šajā gadījumā parādās dialoga logs *Selection Properties* (6. att.));
- 3) identifikatoru sarakstā *Label*, jāizvēlas kāds no esošajiem vai jāievada jauns identifikators.



6. att.

### 3.4. Aprēķina apgabala diskretizācija

Pēc aprēķina apgabala topoloģiskā modeļa konstruēšanas var sākt galīgo elementu režģa ģenerēšanu. Iespējams ģenerēt vienmērīgu un ļoti smalku režģi visā aprēķina apgabalā. Tomēr ne vienmēr šāda pieeja ir lietderīga (parasti tas attiecas uz nehomogēnu apgabalu, kurā ietilpst apakšapgabali ar ievērojami atšķirīgām vides īpašībām), tāpēc programmā *QuickField* ir paredzēta iespēja ģenerēt nevienmērīgu režģi, t. i., tādu režģi, kurā notiek vienmērīga pāreja no mazāka izmēra uz lielāka izmēra trīsstūra elementiem.

Var atzīmēt, ka režģa blīvums ietekmē risināšanas precizitāti atsevišķos apakšapgabalos. Tāpēc nepieciešams, lai galīgo elementu režģis būtu smalkāks tajās

zonās, kur paredzama lauka straujāka maiņa (lielāks gradients), kā arī tajās vietās, kur nepieciešama lielāka precizitāte.

Lauka aprēķināšanai samērā vienkāršas konfigurācijas apgabalos, kā arī tuvinātos aprēķinos lietderīgi izmantot programmā *QuickField* paredzēto automātisko režģa ģenerēšanas režīmu. Lai izmantotu šādu režīmu, jāizpilda komanda **Edit/Build Mesh** un pēc tam no piedāvātā saraksta jāizvēlas vēlamais variants. Šādā režīmā bez papildinformācijas ievades par režģa blīvumu tiek iegūts vispārīgām prasībām atbilstošs galīgo elementu režģis. Uzdodot diskretizācijas soli topoloģiskā modeļa virsotnēs, iespējams panākt vēlamu režģa blīvumu jebkurā aprēķina apgabala zonā.

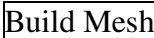
Diskretizācijas solis aptuveni nosaka attālumu starp ģenerētā režģa mezgliem topoloģiskā modeļa attiecīgās virsotnes tuvumā un tādējādi arī galīgo elementu izmērus šīs virsotnes apkārtnē. Nav nepieciešams uzdot diskretizācijas soli visās topoloģiskā modeļa vrsotnēs. Piemēram, lai iegūtu vienmērīgu režģi visā aprēķina apgabalā, diskretizācijas soli var uzdot tikai vienā virsotnē. Šī soļa vērtība automātiski tiek attiecināta uz visām virsotnēm. Ja vēlams iegūt nevienmērīgu režģi, diskretizācijas solis jāuzdod tajās virsotnēs, kuru tuvumā nepieciešams vissmalkākais un visretākais režģis. Šajā gadījumā diskretizācijas solis pārējās virsotnēs tiek izvēlēts automātiski, t. i., tā vērtība katrai virsotnei tiek noteikta ar interpolāciju, tādējādi nodrošinot vienmērīgu pāreju no smalkāka uz retāku režģi. Ja aizzīmētas vairākas virsotnes, šajās virsotnēs vienlaikus iespējams uzdot vienādus diskretizācijas soļus.

Pēc diskretizācijas soļu uzdošanas var veikt galīgo elementu režģa ģenerēšanu, turklāt var izvēlēties dažādus ģenerēšanas režīmus – vienā blokā, aizzīmētos blokos vai visos blokos.

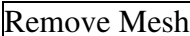
Atsevišķos, gadījumos (piemēram, ja analizējot aprēķina rezultātus tiek konstatēts, ka kādā aprēķina apgabala daļā nepieciešama lielāka precizitāte) iespējams mainīt jau ģenerētā režģa blīvumu. Šādos gadījumos jāievēro, ka blokos, kuri tieši saistīti ar virsotnēm, kurās tiek mainīts diskretizācijas solis, sākotnēji ģenerētais režģis automātiski tiek nodzēsts.

Lai uzdotu galīgo elementu režģa blīvumu, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jāaizzīmē virsotnes, šķautnes vai bloki, kuru apkārtnē paredzēts uzdot vienādu diskretizācijas soli;
- 2) jāizpilda komanda **Edit/Properties** un pēc tam dialoga loga *Selection Properties* ievades lauciņā *Spacing* jāievada diskretizācijas soļa vērtība vai jāizvēlas šī vērtība no piedāvātā saraksta. Ja diskretizācijas soli uzdod aizzīmējot šķautnes un blokus, tad šī soļa vērtība tiek attiecināta uz visām virsotnēm, kuras saistītas ar aizzīmētajām šķautnēm, vai visām šķautnēm, kuras veido aizzīmētos blokus.

Lai ģenerētu galīgo elementu režģi, jāizpilda komanda **Edit/Build Mesh** un no pakārtotajā izvēlnē piedāvātā saraksta jāizvēlas atbilstošais variants. Šo pašu operāciju var veikt arī, noklikšķinot peles pogu uz rīkjoslas piktogrammas 



Lai aizvāktu galīgo elementu režģi, jāizpilda komanda **Edit/Remove Mesh** un no pakārtotajā izvēlnē piedāvātā saraksta jāizvēlas atbilstošais variants. Šo pašu operāciju var veikt arī, noklikšķinot peles pogu uz rīkjoslas piktogrammas 





Ja ieslēgts režīms *View Spacing*, visi tieši uzdotie diskretizācijas soļi topoloģiskajā modelī tiek attēloti ar atbilstoša rādiusa aplocēm, kuru centri sakrīt ar attiecīgām virsotnēm. Režģa generēšanas procesu vizuāli var novērot, ja ieslēgts režīms *View Mesh*.

### 3.5. Atcelšanas un atcelšanas atsaukuma komandas

Konstruējot topoloģisko modeli, programmā *QuickField* paredzēta iespēja atcelt iepriekš veiktās darbības vai atsaukt pēdējo atcelto darbību.

Lai atceltu pēdējo veikto darbību, jāizpilda komanda **Edit/Undo <pēdējās veiktās darbības nosaukums>**. Lai atsauktu pēdējās operācijas atcelšanu, jāaktivizē topoloģiskā modeļa logs un jāizpilda komanda **Edit/Redo <pēdējās atceltās darbības nosaukums>**. Iepriekš minētās operācijas var veikt arī, ja nospiež taustiņu kombināciju **Ctrl+Z** (atcelšana) un **Ctrl+Y** (atcelšanas atsaukums).

Veicot topoloģiskā modeļa rediģēšanu, iespējams atcelt šādas darbības:

- šķautnes pievienošana (Add Edge);
- virsotnes pievienošana (Add Vertices);
- galīgo elementu režģa ģenerēšana (Build Mesh);
- aizzīmētā elementa kopēšana (Duplicate Selection);
- aizzīmētā elementa aizvākšana (Delete Selection);
- aizzīmētā elementa pārvietošana (Move Selection);
- elementa aizzīmēšana (Selection);
- visa modeļa elementu aizzīmēšana (Select All);
- koordinātas (Coordinates);
- garuma mērvienības (Length Units);
- topoloģiskā modeļa parametri (Properties);
- visu aizzīmēto elementu aizzīmēšanas atcelšana (Unselect All).

### 3.6. Topoloģiskā modeļa ekrānattēla parametru iestatīšana

#### 3.6.1. Vispārīgi norādījumi

*QuickField* ļauj izvēlēties vairākas iespējas, kas nodrošina topoloģiskā modeļa uzskatāmību, kā arī tā piemērotību konkrētu darbību veikšanai dotajā modeļa izmantošanas stadijā.

Šādas iespējas ir:

- attēla mērogošana (Scaling the picture (zoom)), kas ļauj attēlu palielināt vai samazināt, ja jāveic darbības ar topoloģiskā modeļa relatīvi maza vai relatīvi liela izmēra elementiem;
- vizualizācijas atribūtu maiņa (Visibility of model details), kas nodrošina attēla piemērotību dažādās modeļa veidošanas stadijās;
- fona tīkla (Background grid) izmantošana, kas atvieglo un ļauj paātrināt topoloģiskā modeļa atsevišķu elementu (virsotņu un šķautņu) veidošanu.

### 3.6.2. Attēla mērogošana

Lai palielinātu attēlu, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) topoloģiskā modeļa loga rīkjoslā jānoklikšķina peles poga uz piktogrammas **Zoom In**



- 2) turot nospiestu peles pogu, jāpārvieta peles kursors tā, lai attēla apgabals, kuru vēlams izvērst pa visu modeļa logu, novietotos izveidotā taisnstūrī.

Lai samazinātu attēlu, topoloģiskā modeļa loga rīkjoslā jānoklikšķina peles poga uz piktogrammas **Zoom Out**



vai **Zoom Fit**



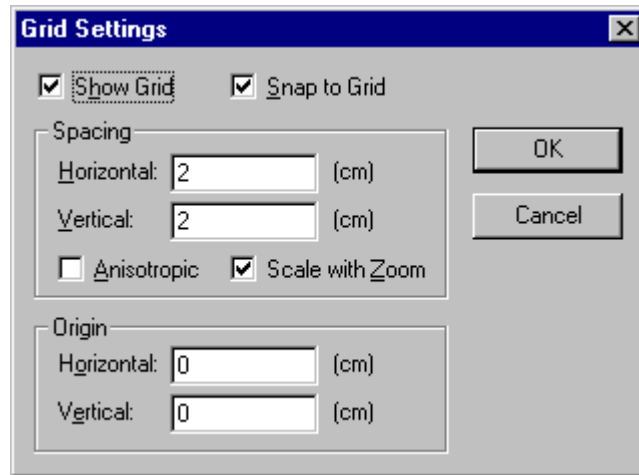
### 3.6.3. Vizualizācijas atribūtu maiņa

Lai mainītu topoloģiskā modeļa attēlojuma veidu tā logā, ar komandu **View** var izmantot četrus vizualizācijas režīmus: galīgo elementu režģis (Mesh), apgabala dekompozīcija (Domain), šķautņu diskretizācija (Breaking) un diskretizācijas solis (Spacing). Ja visi šie režīmi ir izslēgti, ekrānattēlā ir redzamas tikai topoloģiskā modeļa virsotnes un šķautnes, un šādu režīmu lietderīgi izmantot aprēķina apgabala topoloģijas aprakstīšanai un identifikatoru piešķiršanai atsevišķiem modeļa elementiem. Ja ieslēgts režīms Spacing, visi tiešā veidā uzdotie diskretizācijas soļi attēlojas kā atbilstoša rādiusa riņķa līnijas. Režīma Mesh izvēle ļauj aplūkot galīgo elementu režģi kopumā vai tikai tajos blokos, kuros tas ir ģenerēts.

### 3.6.4. Koordinātu tīkls

Koordinātu tīkla izmantošana atvieglo topoloģiskā modeļa konstruēšanu un ļauj kontrolēt tā pareizību. Lai mainītu koordinātu tīkla parametrus, jāizpilda komanda **Edit/Grid Settings...**. Logā *Grid Settings* (7. att.) var ieslēgt vai izslēgt koordinātu tīkla attēlošanas režīmu.

Ievades lauciņos *Spacing* var uzdot koordinātu tīkla soļus horizontālā un vertikālā virzienā un tādējādi mainīt koordinātu tīkla blīvumu. Lai iestatītu atšķirīgus soļus horizontālā un vertikālā virzienā, jāieslēdz režīms *Anisotropic*. Ja ieslēgts režīms *Scale with Zoom*, tad, mainot attēla mērogu, vienlaikus mainās arī koordinātu tīkla solis.



7.att.

### 3.7. Attēla izdrukāšana

Topoloģiskā modeļa vai galīgo elementu režģa ekrānattēlu jebkurā tā veidošanas stadijā var izdrukāt, saglabājot izvēlēto mērogu, kā arī visus attēla elementus un atribūtus.

Lai izdrukātu attēlu, jāizpilda komanda **File/Print** un pēc tam, ja nepieciešams, jāuzdod izdrukas parametri (attēla orientācija, lapas izmēri u.tml.). Lai pirms izdrukāšanas aplūkotu attēlu kopumā un to, kā tas izskatīsies izdrukātā veidā, jāizpilda komanda **File/Print Preview**.

### 3.8. Attēla kopēšana

Topoloģiskā modeļa vai galīgo elementu režģa ekrānattēlu var nokopēt, lai pēc tam to ievietotu citā dokumentā. Lai nokopētu attēlu jāizpilda komanda **Edit/Copy Picture**. Pēc tam, pārejot uz dokumentu, kurā jāievieto šis attēls, jāizpilda komanda **Edit/Paste**.

## 4. Fizikālo parametru vērtību ievade

### 4.1. Vispārīgi norādījumi

Lai risinātu uzdevumu, jāapraksta vides īpašības, jāuzdod lauka avoti un robežnosacījumi. Šie uzdevuma dati glabājas fizikālo parametru apraksta failā (sk. 2.2.1). Fizikālo parametru piesaiste topoloģiskajam modelim tiek veikta, piešķirot modeļa elementiem identifikatorus modeļa veidošanas stadijā. Identifikatoru piešķiršana topoloģiskā modeļa blokiem, šķautnēm un virsotnēm sīkāk tika iztirzāta 3.3. apakšnodaļā.

Fizikālo parametru apraksts sastāv no trīs identifikatoru grupām:

- 1) bloku identifikatori vides īpašību un izkļiedēto lauka avotu uzdošanai;
- 2) šķautņu identifikatori robežnosacījumu uzdošanai;
- 3) virsotņu identifikatori punktveida lauka avotu uzdošanai.

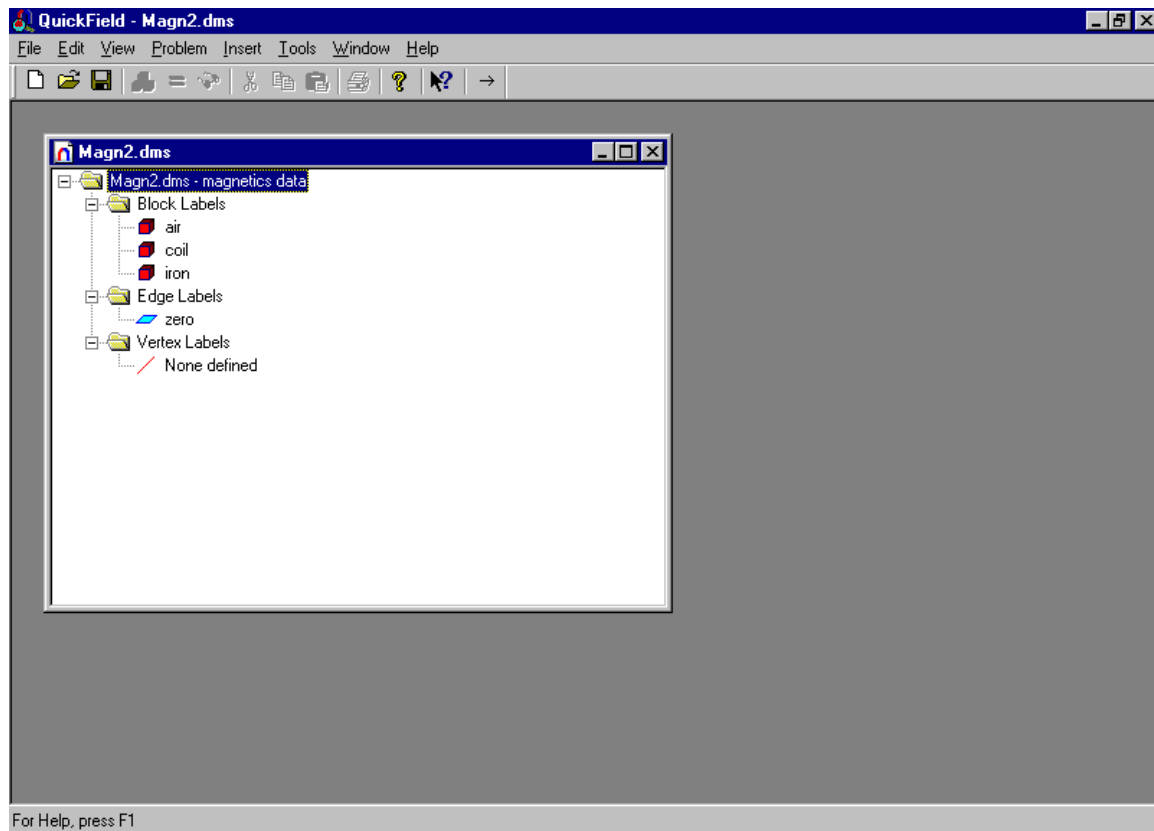
Magnetostatiskā lauka fizikālo parametru apraksta fails tiek atvērts atsevišķā *QuickField* logā un saglabāts kā atsevišķs fails ar paplašinājumu **.dms**.

Lai radītu jauna uzdevuma fizikālo parametru dokumentu, jāizpilda komanda **File/New** un logā *New* no piedāvātā saraksta jāizvēlas dokumenta veids. Pēc tam logā *Create Problem* jānorāda faila vārds, logā *Edit New Problem Parameter* uzdevuma tips (magnetostatiskais lauks) un lauka raksturs (plakanparalēls vai aksiālsimetriskis), logā *Choose Coordinates* – mērvienības.






Lai atvērtu jau esošu dokumentu, jāizpilda komanda **File/Open**.

## 4.2. Vides īpašību un robežnosacījumu ievade

Pēc tam, kad atvērts fizikālo parametru dokuments (fails ar paplašinājumu **.dms**) parlūkprogramma attēlo šī dokumenta struktūru (8. att.). Parlūkprogrammas koks satur identifikatorus, kas piešķirti blokiem, šķautnēm un virsotnēm un kas apzīmēti ar 1. tabulā parādītiem grafiskiem simboliem (piktogrammām).



8. att.

Simbols	Simbola nozīme
	Topoloģiskā modeļa bloka identifikators, ar kuru raksturo vides īpašības
	Topoloģiskā modeļa šķautnes identifikators, ar kuru raksturo robežnosacījumus
	Topoloģiskā modeļa virsotnes identifikators, ar kuru raksturo lauka avotus vai robežnosacījumus
	Topoloģiskā modeļa elementa (bloka, šķautnes, virsotnes) identifikators, kuram vēl nav uzdoti fizikāli parametri
	Topoloģiskā modeļa elementa šķautnes vai virsotnes identifikators, ja šim elementam robežnosacījumi uzdoti ar noklusējumu vai lauka avots ir ar nulles vērtību

### 4.3. Jauna identifikatora definēšana

Lai radītu jaunu kāda topoloģiskā modeļa elementa identifikatoru, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) uzdevuma pārlūkprogrammas kokā jāaizzīmē attiecīgais elements (*Block Labels*, *Edge Labels* vai *Vertex Labels*) un jānospiež taustiņš **Insert**;
- 2) ievades lauciņā *NewLabel*, kas parādās aizzīmētajā zarā, jāievada identifikatora vārds un jānospiež taustiņš **Enter**.

### 4.4. Identifikatora parametru ievade

#### 4.4.1. Pamatdarbības

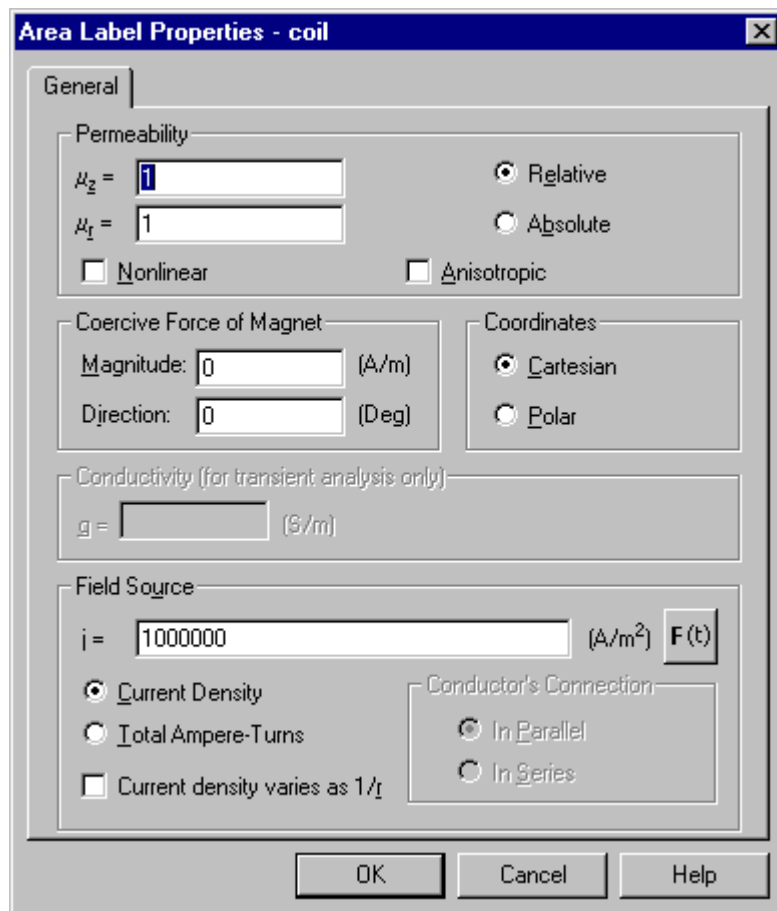
Lai ievadītu identifikatora parametrus, jāizpilda kāda no šādām darbībām:

- ar peles dubultklikšķi jāizvēlas tas identifikators, kura parametrus nepieciešams ievadīt;
- identifikatoru sarakstā jāaizzīmē tas identifikators, kura parametrus nepieciešams ievadīt un jāizpilda komanda **Edit/Properties**.

Tad atveras dialoga logs *Area Label Properties* (bloka identifikatoram), *Edge Label Properties* (šķautnes identifikatoram) vai *Node Label Properties* (virsotnes identifikatoram). Identifikatoru parametru ievadi veic, nospiežot taustiņu **OK**. Ja nospiež taustiņu **Cancel**, identifikatora parametru ievades logs tiek aizvērts, nesaglabājot tajā izdarītās izmaiņas.

Dialoga logs *Area Label Properties* piemērs bloka identifikatora *coil* parametru ievadīšanai magnetostatiskā lauka aprēķinam parādīts 9. attēlā. Minētā identifikatora parametri šajā gadījumā ir:

- magnētiskās caurlaidības (Permeability) divas komponentes –  $\mu_x$  un  $\mu_y$  (plakanparalēlam laukam) vai  $\mu_z$  un  $\mu_r$  (aksiālsimetriskam laukam);
- lauka avots (Field Source) – strāvas saķēdējums (ampērvijumu skaits) vai strāvas blīvums;
- pastāvīgā magnēta koercitīvais spēks (Coercive Force of Magnet).



9. att.

Nelineārā vidē magnētiskās caurlaidības vietā jāuzdod materiāla magnetizēšanas līkne  $B = f(H)$ . Lai šajā gadījumā pārietu uz magnetizēšanas līknes redaktoru, jāieslēdz režīms *Nonlinear*. Ja magnetizēšanas līkne ir uzdots jau agrāk, logā parādīsies slēdzis Edit B-H Curve, kuru nospiežot notiek pāreja uz līknes  $B = f(H)$  redaktora logu *Curve Edit*.

Pirms jauna identifikatora parametru ievadīšanas magnētiskās caurlaidības komponentu ievades lauciņos skaitlisko vērtību vietā ir vārds *None*.

Lai, risinot lauka aprēķina uzdevumu anizotropā vidē, uzdotu magnētiskās caurlaidības divas komponentes, jāieslēdz režīms *Anisotropic*. Šajā gadījumā rezultāts būs atkarīgs no izvēlētas koordinātu sistēmas – taisnleņķa (Cartesian) vai polārās (Polar).

Lauka avots tiek uzdots kā strāvas blīvums vai kā strāvas saķēdējums (ampērvijumi). Ja uzdots strāvas saķēdējums, tad pēc lietotāja izvēles katru no blokiem, kuriem ir piešķirts dotais identifikators, var uzskatīt vai nu kā vienu vadītāju, vai vairāku

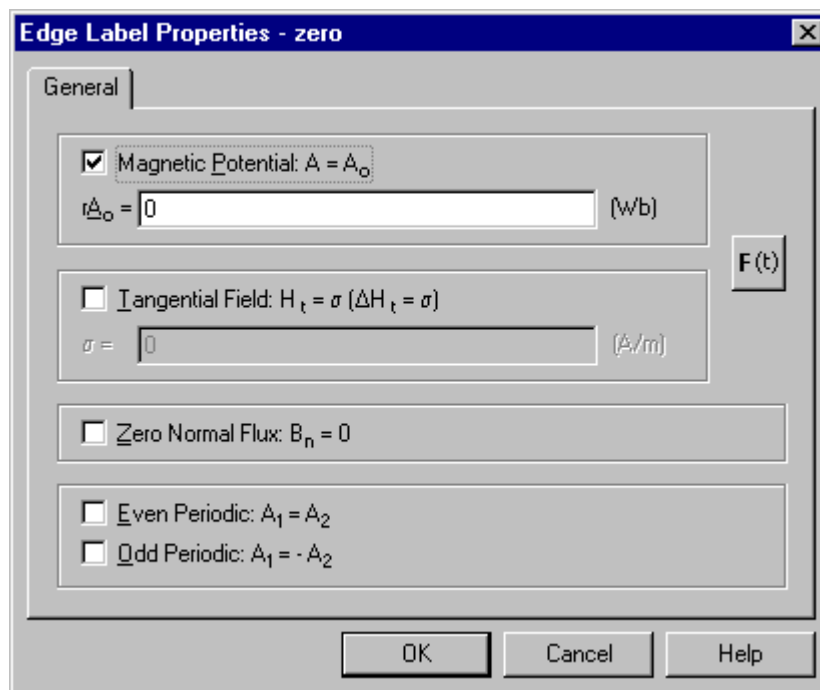
virknē savienotu vadītāju kopumu. Pēdējā gadījumā visos vadītājos ir vienāda strāva, bet strāvas blīvums tajos ir apgriezti proporcionāls šķērsriezuma laukumam.

Ja strāvas saķēdējums tiek uzdots aksiālsimetriska lauka uzdevumos, iespējams papildus norādīt, ka strāvas blīvuma sadalījums spolē ir apgriezti proporcionāls attālumam no rotācijas ass. Šādu pieeju ir lietderīgi izmantot, piemēram, modelējot magnētisko lauku spolēs, kuru tinums izveidots no relatīvi liela šķērsriezuma vadītāja tā, ka katra vijuma ārējais diametrs ir ievērojami lielāks pār iekšējo diametru.

Uzdotais strāvas blīvums var būt kā telpisko koordinātu funkcija. Lai strāvas blīvumu uzdotu kā telpisko koordinātu  $x, y$  (vai  $z, r$ ) funkciju, ievades lauciņā *Field Source* skaitliskās vērtības vietā jāieraksta attiecīgā formula (par formulu rediģēšanu sīkāk sk. 4.4.4.).

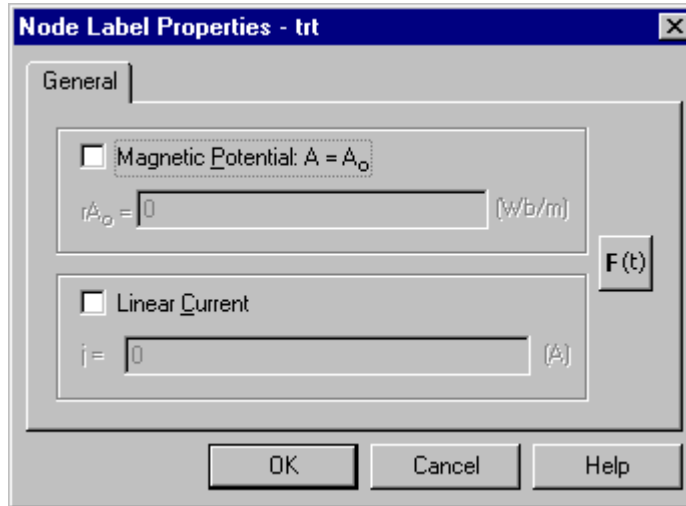
Topoloģiskā modeļa šķautnes identifikatora parametri var būt pirmā un otrā veida robežnosacījumi. Lai ievadītu to skaitliskās vērtības, jāizpilda komanda **Edit/Properties** un dialoga logā *Edge Label Properties* (10. att.) jāizvēlas robežnosacījumu veids.

Pirmā veida jeb Dirihlē robežnosacījumi (uz robežas zināma vektorālā potenciāla skaitliskā vērtība  $A$ ) un otrā veida jeb Neimaņa robežnosacījumi (uz robežas zināma magnētiskā lauka intensitātes tangenciālā komponente  $H_\tau$ ) var būt telpisko koordinātu funkcija. Lai uzdotu robežnosacījumus, loga *Edge Label Properties* ievades lauciņos *Magnetic Potential* un *Tangential Field* attiecīgi jāieraksta  $A = A_0$  vai  $H_\tau = \sigma$  skaitliskās vērtības, vai formulas, ar kurām izteikta šo lielumu funkcionālā atkarība no telpiskajām koordinātām  $x, y$  (vai  $z, r$ ) (par formulu rediģēšanu sīkāk sk. 4.4.4.).



10. att.

Magnetostatiskā lauka uzdevumos var būt zināms vektoriālais potenciāls topoloģiskā modeļa virsotnēs vai arī strāva kā punktveida lauka avots šajās virsotnēs. Lai ievadītu šos lielumus, jāizpilda komanda **Edit/Properties** un logā *Node Label Properties* (11. att.) jāizvēlas viens no ievades lauciņiem – *Magnetic Potential* vai *Linear Current* un jāieraksta šo lielumu skaitliskās vērtības vai formulas šo lielumu funkcionālo sakarību noteikšanai (par formulu rediģēšanu sīkāk sk. 4.4.4.).



11.att.

#### 4.4.2. Periodiskuma un simetrijas robežnosacījumi

Robežnosacījumu īpašs veids ir periodiskuma un simetrijas robežnosacījumi, kuru uzdošana ļauj samazināt aprēķina apgabala izmērus. Tas, savukārt, atvieglo ievaddatu sagatavošanu, uzdevuma risināšanas procesu un rezultātu apstrādi, jo datorā ievadāmās informācijas apjoms, kā arī rezultātu apstrādei nepieciešamais izvadāmās informācijas apjoms ir tieši atkarīgs no aprēķina apgabala izmēriem. Šajā nozīmē ļoti raksturīgs ir magnētiskā lauka aprēķins elektriskajās mašīnās, kur magnētiskā lauka aina atkārtojas ar periodu  $2\tau$ , kur  $\tau$  – pola iedaļa.

Periodiskuma robežnosacījumus uzdod uz topoloģiskā modeļa divām pretējām robežām un šādi robežnosacījumi nozīmē, ka meklējamā lieluma  $F$  (piemēram, vektoriālā potenciāla) vērtības uz šīm divām robežām ir vienādas ( $F_1 = F_2$  – pāra periodiskums) vai vienādas pēc to skaitliskajām vērtībām, bet ar pretēju zīmi ( $F_1 = -F_2$  – nepāra periodiskums). Periodiskuma robežnosacījumi ir pirmā veida (Dirihlē) vai otrā veida (Neimaņa) robežnosacījumu vispārīgāks veids. Tas nozīmē, ka ar periodiskuma robežnosacījumiem netiek uzdots, ka uz aplūkojamās robežas lauka normālā komponente vai lauka tangenciālā komponente ir vienāda ar nulli. Uz pretējām robežām var būt abas šīs komponentes, bet tās ir vai nu vienādas, vai vienādas pēc skaitliskās vērtības, bet ar pretēju zīmi.

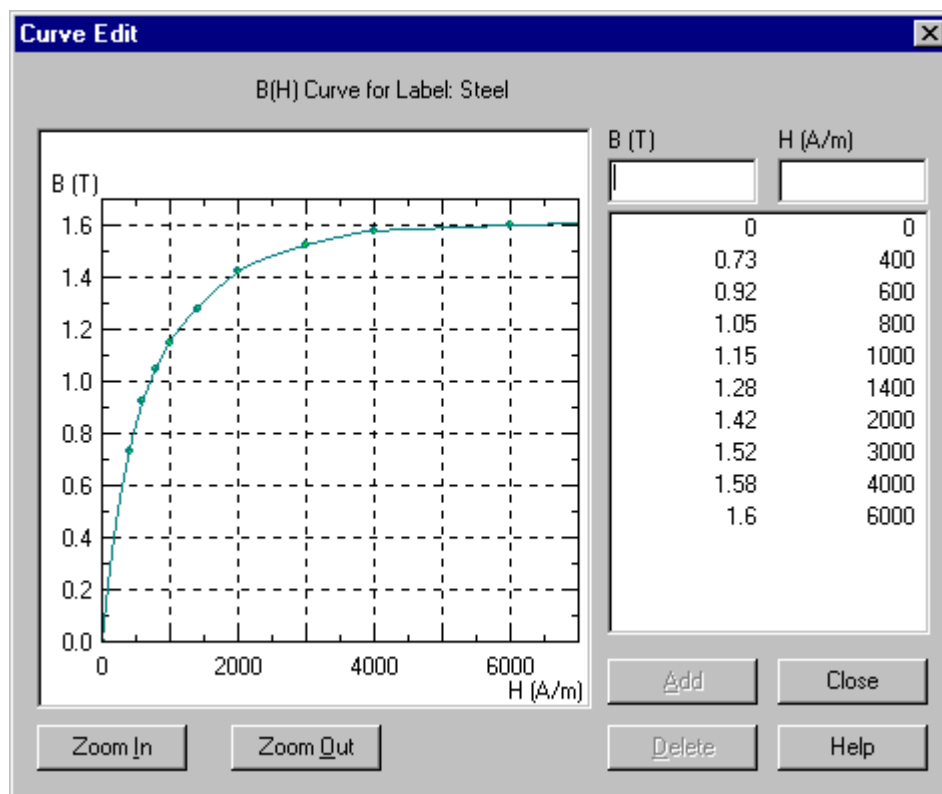


Atšķirībā no citām galīgo elementu metodes lietojumprogrammām, piemēram, [12], *QuickField* nav noteikti ierobežojumi, ka galīgo elementu režģa blīvumam uz simetriskām robežām ir jābūt vienādam.

Lai uzdotu periodiskuma robežnosacījumus, dialoga logā *Edge Label Properties* (sk., piemēram, 11. att. un 16. att.) jāizvēlas režīms *Even Periodic* vai *Odd Periodic*.

#### 4.4.3. Funkciju grafiku rediģēšana

Uzdevuma fizikālie parametri, kurus apraksta funkcionālas sakarības, tiek uzdoti tabulas veidā, kuru divās kolonnās doti savstarpēji atkarīgi fizikālie lielumi, piemēram, magnētiskā indukcija  $B$  un magnētiskā lauka intensitāte  $H$  ( $B = f(H)$ ). Šādu tabulas veidā uzdotu funkcionālo sakarību rediģēšanai *QuickField* paredz arī vienlaicīgu funkcijas grafisku attēlojumu, turklāt funkcijas grafiks tiek konstruēts, izmantojot interpolāciju ar trešās pakāpes polinomiem jeb splineiem. Tieši šādi interpolācijas polinomi uzdevuma risināšanas gaitā tiek izmantoti nepieciešamo funkcionālo sakarību ievadīšanai programmas modulī, kas veic uzdevuma risināšanu.



18. att.

18. attēlā parādīts funkcionālās sakarības  $B = f(H)$  rediģēšanas logs *Curve Edit*, kurā šī funkcionālā sakarība dota gan tabulārā, gan grafiskā veidā. Šo logu atver, nospiežot attiecīgā identifikatora logā *Area Label Properties* slēdzi Edit B-H Curve....

Lai tabulu papildinātu ar jaunu punktu, ievades lauciņos (aplūkojamā piemērā  $B$  un  $H$ ) jāieraksta atbilstošo lielumu skaitliskās vērtības un jānospiež slēdzis **Add**. Ja jaunā punkta argumenta vērtība atbilst kādam jau agrāk uzdotam funkcionālās sakarības punktam, tad šis esošais punkts tiks nomainīts ar jaunajām vērtībām. Lai aizvāktu kādu punktu, tas tabulā vai grafikā jāaizzīmē un pēc tam jānospiež tastatūras taustiņš **Delete** vai dialoga loga slēdzis **Delete**.

Lai mainītu funkcijas grafika ekrānattēla mērogu, var izmantot slēdzi **Zoom In** (palielināt mērogu) vai **Zoom Out** (samazināt mērogu), vai ar peli grafikā aizzīmēt tainstūrveida apgabalu, kuru vēlams attēlot palielinātā mērogā.

Beidzot grafika rediģēšanu, jānospiež slēdzis **Close**.

#### 4.4.4. Formulas fizikālo parametru ievadīšanai

##### 4.4.4.1. Vispārīgi norādījumi

Lai uzdotu un ievadītu lauka avotu un robežnosacījumu raksturojošo fizikālo lielumu skaitliskās vērtības, *QuickField* ļauj izmantot formulas. Ja dialoga logā blakus attiecīgā lieluma ievades lauciņam ir slēdzis **F(t)**, šajā lauciņā var ievadīt gan attiecīgā lieluma skaitlisko vērtību, gan formulu.

Ar formulu attiecīgo fizikālo parametru uzdod tad, ja tas ir telpisko koordinātu funkcija.

Formula *QuickField* programmā ir matemātiska izteiksme, kas var saturēt skaitļus, aritmētiskās operācijas, iekavas, konstantes, standartfunkcijas un mainīgos. Šo formulu sintakse ir ļoti vienkārša un pamatvilcienos neatšķiras no praksē biežāk lietojamo algoritmisko valodu sintakses.

Ja fizikālo parametru skaitlisko vērtību vietā tiek ievadīta formula, *QuickField* pārbauda šīs formulas sintaksi un paziņo par sintaktiskām kļūdām, ja tādas ir konstatētas. Ja sintaktisku kļūdu formulā nav, pēc uzdotās formulas tiek izskaitļota fizikālā parametra skaitliskā vērtība, kas atbilst dotā argumenta (telpisko koordinātu un/vai laika) vērtībai. *QuickField* uzrāda arī kļūdas, kuru cēlonis ir nekorektas skaitļošanas operācijas, piemēram, ja argumenta vērtība neiekļaujas funkcijas definīcijas apgabalā.

##### 4.4.4.2. Formulu lietošana uzdevuma fizikālo parametru skaitlisko vērtību uzdošanai

Identifikatoru fizikālie parametri, kuru skaitliskās vērtības var uzdot ar formulām kā telpisko koordinātu funkcijas, magnetostatiskā lauka gadījumā ir: bloka identifikatoram strāvas blīvums; šķautnes identifikatoram vektoriālais magnētiskais potenciāls vai lineārais strāvas blīvums; virsotnes identifikatoram vektoriālais magnētiskais potenciāls vai lineārais strāvas blīvums.

#### 4.4.4.3. Formulu sintakse

*QuickField* formula ir matemātiska izteiksme, kura var saturēt:

- skaitliskas konstantes, kas var būt veseli skaitļi (piemēram, 523, 12), reāli skaitļi ar fiksētu komatu (piemēram, 122.82, 32., 0.132, .134), reāli skaitļi ar peldošu komatu (piemēram, 1.1e12, 5.39e+8, 0.18E-12, .2E+2);
- aritmētisko operāciju simboliskos apzīmējumus, kas var būt saskaitīšana "+" (piemēram, 2+3, 5.1+4.2), atņemšana "-" (piemēram, 3-5, 4.1-0.3), reizināšana "\*" (piemēram, 1.23\*0.12, 0.08\*5.1E-2), dalīšana "/" (piemēram, 1.1E5/0.01, 4.5/5), kāpināšana "^" (piemēram, 3.14^2, 0.62^0.55);
- standartfunkcijas, kas var būt **abs** (absolūtā vērtība), **sign** (zīme), **max** (maksimums), **min** (minimums), **sin** (sinuss), **cos** (kosinuss), **tan** (tangenss), **asin** (arksinuss), **acos** (arkkosinuss), **atan** (arktangenšs), **atan2** (divu argumentu arktangenšs), **exp** (eksponente), **log** (naturālais logaritms), **sqrt** (kvadrātsakne);
- matemātiskās konstantes, kas var būt **pi** (skaitlis  $\pi = 3,14159\dots$ ), **e** (naturālā logaritma bāze  $e = 2,71828\dots$ );
- mainīgos, kas var būt  $t$  (laiks),  $x$  un  $y$  (telpiskās koordinātas);
- apaļās iekavas.

Piezīmes.

1. Ar reāliem skaitļiem izteiktas skaitliskās konstantes un mainīgie jāraksta, to veselo daļu un daļveida daļu atdalot ar punktu ".".
2. Ar peldošo komatu izteiktas skaitliskās konstantes skaitļa kārtas apzīmēšanai var izmantot simbolu "e" vai "E".
3. Standartfunkciju apzīmēšanai var izmantot gan lielos, gan mazos burtus.
4. Aritmētisko operāciju izpildei noteikta vispārpieņemtā prioritārā secība, t.i.,
  - kāpināšana "^";
  - reizināšana "\*" un dalīšana "/";
  - saskaitīšana "+" un atņemšana "-".

Šo secību var mainīt, lietojot apaļās iekavas.

5. Standartfunkciju argumenti jāieslēdz iekavās, piemēram,  $\sin(t)$ ,  $\sqrt{x^2+y^2}$ .

#### 4.4.4.4. Standartfunkcijas

*QuickField* lietojamo standartfunkciju saraksts dots 2. tabulā.

2. tabula

Apzīmējums	Formula	Piezīmes
<b>abs</b>	$\text{abs}(x) =  x  = \begin{cases} x, & \text{ja } x \geq 0 \\ -x, & \text{ja } x < 0 \end{cases}$	Argumenta absolūtā vērtība.
<b>sign</b>	$\text{sign}(x) = \frac{x}{ x } = \begin{cases} 1, & \text{ja } x > 0 \\ 0, & \text{ja } x = 0 \\ -1, & \text{ja } x < 0 \end{cases}$	Argumenta zīme.
<b>max</b>	$\max(x_1, x_2, \dots, x_n)$	Maksimālā vērtība no visiem argumentiem ( $n \geq 2$ ).
<b>min</b>	$\min(x_1, x_2, \dots, x_n)$	Minimālā vērtība no visiem argumentiem ( $n \geq 2$ ).
<b>sin</b>	$\sin(x)$	Argumenta sinuss. Arguments jāuzdod grādos.
<b>cos</b>	$\cos(x)$	Argumenta kosinuss. Arguments jāuzdod grādos.
<b>tan</b>	$\tan(x)$	Argumenta tangenss. Arguments jāuzdod grādos, turklāt $x \neq 90^\circ + k \cdot 180^\circ$ , kur $k$ – vesels skaitlis. Ja $x = 90^\circ + k \cdot 180^\circ$ , $\tan(x) = \infty$ , t. i., funkcijas aprēķināšanas operācija ir nekorekta un programmas izpildes gaitā parādās paziņojums par kļūdu.
<b>asin</b>	$\text{asin}(x) = \arcsin(x)$	Argumenta arksinuss ( $-1 \leq x \leq 1$ ). Funkcijas aprēķina rezultāts izteikts grādos diapazonā no $0^\circ$ līdz $360^\circ$ .
<b>acos</b>	$\text{acos}(x) = \arccos(x)$	Argumenta arkkosinuss ( $-1 \leq x \leq 1$ ). Funkcijas aprēķina rezultāts izteikts grādos diapazonā no $0^\circ$ līdz $360^\circ$ .
<b>atan</b>	$\text{atan}(x) = \text{arctg}(x)$	Argumenta arktangenss. Funkcijas aprēķina rezultāts izteikts grādos diapazonā no $0$ līdz $180^\circ$ .

<b>atan2</b>	$\text{atan2}(x_1, x_2) = \arctg\left(\frac{x_1}{x_2}\right)$	Divu argumentu attiecības arktangenss. Funkcijas aprēķina rezultāts izteikts grādos. Ja $x_1 \neq 0$ , bet $x_2 = 0$ , funkcijas aprēķināšanas operācija ir nekorekta un programmas izpildes gaitā parādās paziņojums par kļūdu. Ja $x_1 = 0$ un $x_2 = 0$ , aprēķina rezultāts ir 0.
<b>exp</b>	$\exp(x) = e^x$	Argumenta eksponentfunkcijas vērtība.
<b>log</b>	$\log(x) = \ln(x)$	Argumenta naturālais logaritms ( $x > 0$ ). Ja $x \leq 0$ , funkcijas aprēķināšanas operācija ir nekorekta un programmas izpildes gaitā parādās paziņojums par kļūdu.
<b>sqrt</b>	$\text{sqrt}(x) = \sqrt{x}$	Kvadrātsakne no argumenta $x > 0$ . Ja $x < 0$ , funkcijas aprēķināšanas operācija ir nekorekta un programmas izpildes gaitā parādās paziņojums par kļūdu.

#### 4.4.4.5. Formulu piemēri

3. tabulā un doti piemēri, kas var būt noderīgi dažādu funkcionālo sakarību aprakstīšanai.

3. tabula

Formula	Formulas pieraksts atbilstoši <i>QuickField</i> sintakses prasībām
$100t$	100*t
$t(1-t)(2-t)$	t*(1-t)*(2-t)
$2t^2 + t + 3$	2*t^2+t
$e^{-t^2/2}$	exp(-t^2/2)
$\ln t$	log(t)
$\sin t + \cos t$	sin(t)+cos(t)
$200 \sin t(18000t + 240)$	200*sin(18000*t+240)
$2^t$	2^t
$\arcsin \sqrt{2}$	asin(sqrt(2))
$\text{tg} \frac{t}{4 \cdot 10^{-8}}$	tan(t/4e-8)
$ 2\pi t $	abs(2*pi*t)
$\sin t$ , ja $\sin t > \cos t$ $\cos t$ , ja $\sin t \leq \cos t$	max(sin(t),cos(t))

## 4.5. Identifikatoru kopēšana, pārdēvēšana un aizvākšana

Identifikatoru var kopēt viena fizikālo parametru dokumenta robežās, kā arī no viena dokumenta uz citu tāda paša tipa dokumentu.

Lai kopētu identifikatoru, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) identifikatoru sarakstā *Block Labels*, *Edge Labels* vai *Vertex Labels* jānoklikšķina peles labā poga uz kopējamā identifikatora nosaukuma un jāizpilda komanda **Copy**;
- 2) noklikšķinot peles pogu, jāpāriet uz logu, kurā jāievieto attiecīgā identifikatora kopija un, identifikatoru sarakstā nosklikšķinot peles labo pogu, jāizpilda komanda **Edit/Paste**.

Lai aizvāktu identifikatoru, jānoklikšķina peles labā poga un kontekstatkarīgā izvēlnē jāizpilda komanda **Delete**.

Lai pārvietotu identifikatoru, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) jānoklikšķina peles labā poga un kontekstatkarīgā izvēlnē jāizpilda komanda **Cut**;
- 2) noklikšķinot peles pogu, jāpāriet uz logu, kurā jāievieto attiecīgais identifikators un jāizpilda komanda **Edit/Paste**.

## 5. Uzdevuma risināšana

Pirms uzdevuma risināšanas jābūt izpildītiem šādiem nosacījumiem:

- dokumentā *Uzdevuma apraksts* jānorāda uzdevuma tips (magnetostatiskais lauks), lauka raksturs (plakanparalēls, aksiālsimetrisks), risināšanas precizitāte;
- dokumentā *Topoloģiskais modelis* jābūt topoloģiskajam modelim ar ģenerēto galīgo elementu režģi un identifikatoriem;
- dokumentā *Fizikālie parametri* topoloģiskā modeļa identifikatoriem jābūt uzdotiem uzdevuma fizikāliem parametriem.

Lai atrisinātu uzdevumu, *QuickField* logā jāizpilda komanda **Problem/Solve Problem**. Šo darbību var izlaist, izpildot uzreiz komandu **Problem/Analyse Results**. Ja uzdevums vēl nav risināts vai kādā ar šo uzdevumu saistītiem dokumentiem ir izdarītas izmaiņas, pēc komandas **Analyse Results** programma tiek palaista automātiski.

Nelineāru uzdevumu risināšanai *QuickField* izmanto Ņūtona metodi.

## 6. Rezultātu apstrāde un analīze

### 6.1. Vispārīgi norādījumi

Lai varētu aplūkot uzdevuma risināšanas rezultātus un veikt to analīzi, jāizpilda komanda **Problem/Analyse Results**.

*QuickField* ļauj attēlot aprēķina rezultātus vairākos veidos:

- lauka ainās veidā (lauka ainās vizualizācija);
- kā lauka diferenciālo raksturlielumu skaitliskās vērtības lokālos apgabalos;
- kā lauka integrālo raksturlielumu vērtības;

- ilustrāciju un diagrammu veidā;
- tabulu veidā;
- grafiku veidā.

Jebkurš attēls, tabula, grafiks vai cita rakstura informācija, kas iegūta uzdevuma risināšanas gaitā, var tikt ievietots glabātuvē (Clipboard), lai pēc tam to varētu ievietot citā dokumentā, piemēram, *Word* dokumentā.

## 6.2. Lauka ainas vizualizācija un ekrānattēla formēšana

### 6.2.1. Attēlojamie lielumi

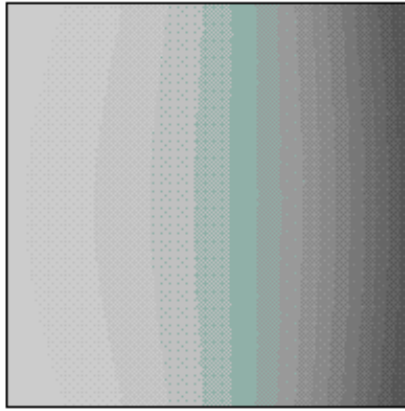
Magnetostatiskā lauka aprēķina uzdevumos lauka vizualizācijā var tikt attēloti šādi magnētiskā lauka raksturlielumi:

- vektoriālais magnētiskais potenciāls  $A$  (plakanparalēlam laukam) vai plūsmas funkcija  $\Phi = 2\pi rA$  (aksiālsimetriskam laukam);
- magnētiskās indukcijas vektors  $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ ;
- magnētiskā lauka intensitātes vektors  $\vec{H} = \mu^{-1}\vec{B}$ ;
- magnētiskā caurlaidība (anizotropā vidē tās lielākā komponente);
- magnētiskā lauka enerģijas blīvums  $w = (\vec{B} \cdot \vec{H})/2$  (lineāros uzdevumos) vai  $w = \int \vec{H} \cdot d\vec{B}$  (nelineāros uzdevumos).

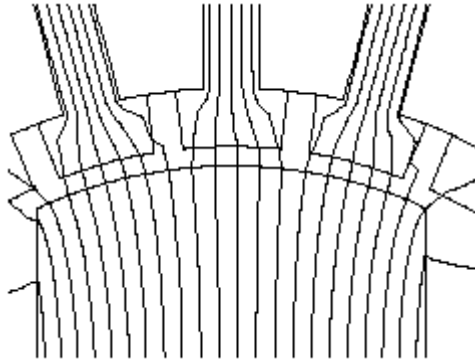
### 6.2.2. Lauka ainas vizualizācijas veidi

Lauka ainas vizualizāciju var veikt vairākos veidos:

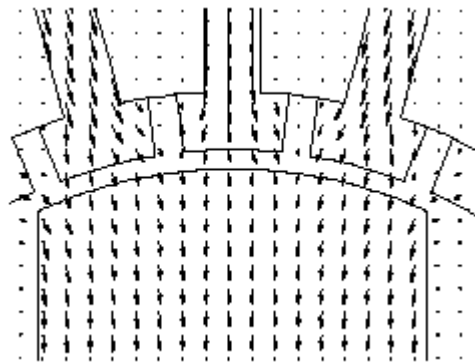
- ar dažādu toņu krāsainām joslām (19. att.), kur joslu krāsu gradācija parāda atbilstību starp krāsu toņiem un attēlojamā fizikālā lieluma skaitliskajām vērtībām, bet joslu robežas atbilst magnētiskā lauka ekvipotenciālēm;
- ar magnētiskā lauka ekvipotenciālēm (20. att.);
- ar vektoriem (21. att), kuru garumi un virzieni attēlo vektoriālos lielumus noteiktos punktos un kuri novilkti no regulāra taisnstūra koordinātu tīkla līniju krustpunktiem (šī tīkla blīvumu iespējams mainīt).



19. att.



20. att.

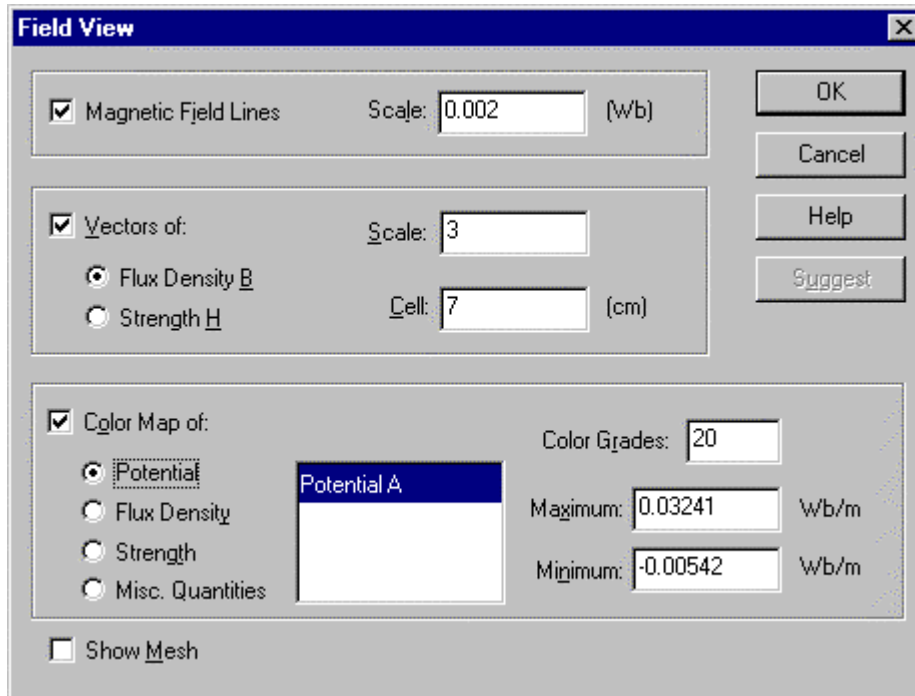


21. att.



### 6.2.3. Lauka vizualizācijas parametru iestatīšana

Pēc uzdevuma atrisināšanas ekrāna logā parādās lauka aina, kas pēc noklusējuma ir attēlota ar izolīnijām. Lai šo lauka ainu mainītu, jāizpilda komanda **View/Field Picture...**. Tad ekrānā parādās logs *Field View*, kas magnetostiskā lauka aprēķina uzdevumam parādīts 22. attēlā. Lai iegūtu vēlamu lauka vizualizācijas veidu, jāatzīmē izvēles lodziņi *Magnetic Field Lines*, *Vectors of* vai *Color Map of*. Vienlaikus var izvēlēties jebkuru šo vizualizācijas veidu kombināciju. Ja nav atzīmēts neviens no vizualizācijas veidiem, ekrānā parādās tikai topoloģiskais modelis.



22. att.

Logā *Field View* var uzdot dažādus vizualizācijas parametrus: attēlojamo fizikālo lielumus maiņas diapazonus, krāsu skaitu, krāsu gradāciju u. tml.

### 6.2.4. Lauka ainas attēla mērogošana

Lauka ainas ekrānattēla mērogošanu veic līdzīgi topoloģiskā modeļa attēla mērogošanai (sk. 3.6.2.).

Lai palielinātu attēlu, jāveic šādas secīgas darbības:

- 1) topoloģiskā modeļa loga rīkjoslā jānoklikšķina peles poga uz piktogrammas **Zoom In**



- 2) turot nospiestu peles pogu, peles kursorš jāpārvieto tā, lai attēla apgabals, kuru vēlams izvērst pa visu modeļa logu, novietotos izveidotā taisnstūrī.

Lai samazinātu attēlu, topoloģiskā modeļa loga rīkjoslā jānoklikšķina peles poga uz  
piktogrammas **Zoom Out**

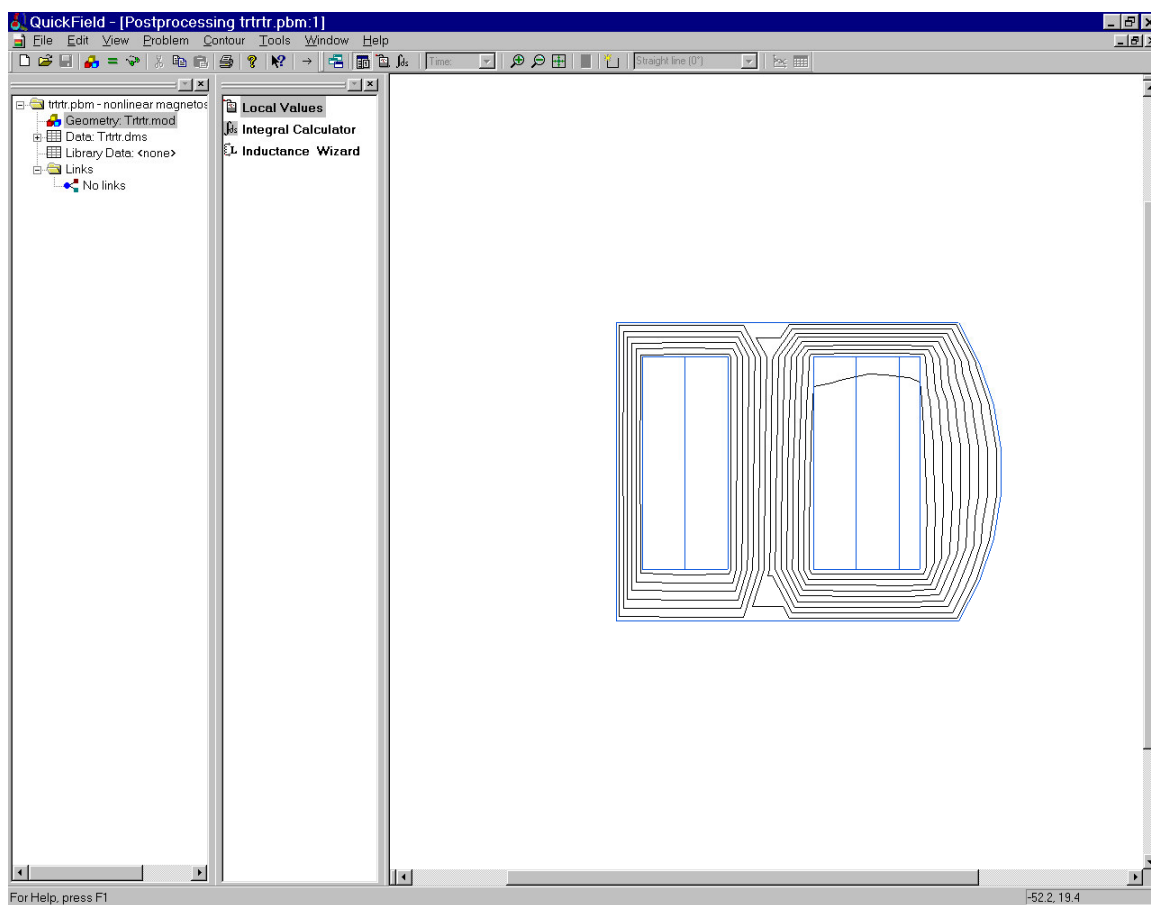


vai **Zoom Fit**



### 6.3. Kalkulatora logs

Kalkulatora logs parasti piesaistīts lauka ainai un novietots pa kreisi no tās  
(24. att.).



23. att.

Lai atvērtu kalkulatora logu, jāizpilda komanda **View/Calculator Window** vai rīkjoslas panelī jānospiež piktogramma **Calculator Window**



Kalkulatora logu var atvērt arī, ja izpilda kādu no komandām **View/Local Values**, **View/Integral Calculators**, **View/Inductance Wizard**.

Kalkulatora logs strukturāli ir veidots kā koks, kuru saknes elementi atbilst noteiktu lielumu skaitliskajām vērtībām:

- *Local Values* parāda lauka dažādu raksturlielumu skaitliskās vērtības norādītos aprēķina apgabala punktos;
- *Integral Calculators* dod raksturlielumus, kuri aprēķināmi, integrējot pa uzdoto līniju, virsmu vai tilpumu;
- *Inductance Wizard* palaiž programmu (pēcprocesoru), kas ļauj aprēķināt vada vai spoles pašinduktivitāti vai mijinduktivitāti.

Lai veiktu jebkuru no minētajiem aprēķiniem, jāizdara peles dubultklikšķis uz attiecīgās darbības nosaukuma logā *Calculator Window*.

Sākotnēji kalkulatora logs uz ekrāna novietots pa kreisi no lauka ainas loga. Lai mainītu kalkulatora loga platumu, jāpārbīda uz labo vai kreiso pusi vertikālā līnija, kas kalkulatora logu norobežo no pārējā ekrānā redzamā attēla.

## 6.4. Lauka raksturlielumi lokālos apgabalos

Lai noteiktu lauka raksturlielumu vērtības atsevišķos aprēķina apgabala punktos, jāizpilda komanda **View/Local Values**. Pēc tam, novietojot peles kursoru uz *Click the point to display filed value*, ar peles labās pogas klikšķi atver sarakstu, kurā izvēlas komandu **Edit Point...**. Pēc tam iezīmētajā ievades lauciņā ieraksta punkta koordinātas  $x$  un  $y$ , tās atdalot ar kolu (:), un izdara peles klikšķi vai nospiež taustiņu **Enter**. Logā *Local Values* (25. att.) tad parādās dotā punkta visu fizikālo raksturlielumu vērtības.

Lai šo lielumu vērtības noteiktu citā punktā, jāaizzīmē jebkura no uzdotajām koordinātu  $x$  vai  $y$  vērtībām, kas redzamas logā. Pēc tam jāizdara peles klikšķis un ievades lauciņā jāieraksta jaunā punkta koordinātas.

Punktu koordinātas, kuros jānosaka lauka raksturlielumu skaitliskās vērtības, var uzdot arī, pārvietojot peles kursoru uz lauka ainas logu (tas parvēršas par krustiņu (+)) un attiecīgi izvēlētajā punktā jāizdara peles klikšķis.

Loga *Local Values* vai šī loga fragmentu var ievietot glabātuvē (Clipboard), lai pēc tam ievietotu citā dokumentā, piemēram, *Word* dokumentā. Lai veiktu šādu darbību, logā *Local Value* atbilstošā lieluma rindiņa ir jāaizzīmē (ja jākopē vairākas rindiņas, tās aizzīmē, izmantojot taustiņu **Shift**).

## 6.5. Raksturlielumu aprēķināšanas pēcprocesori

### 6.5.1. Vispārīgi norādījumi

Programmatūras *QuickField* paketē iekļauti pēcprocesori – programmas, kas no lauka aprēķina rezultātiem ātri un vienkārši ļauj noteikt pētāmo objektu atsevišķus raksturlielumus un parametrus. Magnetostatiskā lauka aprēķina uzdevumos šāds pēcprocesors ir induktivitātes aprēķināšanas pēcprocesors (Inductance Wizard) vadu un spoļu induktivitātes un mijinduktivitātes noteikšanai.

Lai palaistu pēcprocesoru, jāizpilda komanda **View/Inductance Wizard**. Ja atvērts logs *Calculator Window*, šo pašu darbību var veikt, izdarot peles dubultklikšķi uz attiecīgā pēcprocesora nosaukuma *Inductance Wizard*.

### 6.5.2. Induktivitātes aprēķināšanas pēcprocesors (Inductance Wizard)

Ja aprēķina apgabalā ietilpst vairāki kontūri (spoles vai tinumi), kuros plūst dažādas strāvas, plūsmas saķēdējumu ar jebkuru  $k$ -to kontūru var aprēķināt pēc formulas

$$\Psi_k = L_{kk}i_k + \sum_n M_{nk}i_n, \quad (6-1)$$

kur  $L_{kk}$  – kontūra induktivitāte;  $M_{nk}$  – kontūru  $n$  un  $k$  mijinduktivitāte;  $i_k$  – kontura strāva.

No otras puses, magnētiskajā laukā uzkrāto enerģiju var izteikt ar kontūru strāvām un induktivitātēm:

$$W = \frac{1}{2} \left( \sum_k L_{kk}i_k^2 + \sum_{n \neq k} M_{nk}i_n i_k \right). \quad (6-2)$$

Lai izmantotu pēcprocesoru *Inductance Wizard*, uzdevumā jāparedz, lai visi lauka avoti (izkļiedītie avoti, punktveida avoti), izņemot vienu, būtu atslēgti, t. i., vienādi ar nulli, kā arī aprēķina apgabals nedrīkst saturēt pastāvīgos magnētus. Šajā gadījumā plūsmas saķēdējuma un enerģijas aprēķina formulas (6-1) un (6-2) ievērojami vienkāršojas un kontūra  $k$  induktivitātes var noteikt pēc formulām

$$L_k = \frac{\Psi_k}{i_k}, \quad (6-3)$$

$$M_{nk} = \frac{\Psi_k}{i_n}, \quad (6-4)$$

$$L_k = \frac{W}{i_k^2}. \quad (6-5)$$

Tādējādi, izmantojot plūsmas saķēdējumu, var noteikt gan induktivitāti, gan mijinduktivitāti, bet, izmantojot enerģiju, – tikai induktivitāti.

Izpildot komandu **View/Inductance Wizard**, atveras logs *Inductance Calculation Wizard* (24. att.), kurā, ieslēdzot režīmu *Flux linkage calculation* (vai *Stored energy calculation*), var izvēlēties vienu no minētajām induktivitātes aprēķina metodēm. Pēc tam, nospiežot slēdzi **Next**, atveras jauns logs ar virsrakstu *Flux Linkage Calculation* (25. att.). Šajā logā var norādīt, kādi topoloģiskā modeļa bloku identifikatori (Block Labels) attiecas uz aplūkojamo vadu vai spoli. (Aplūkotajā piemērā izmantots ekrānētas divvadu līnijas magnētiskā lauka aprēķins ar lauka ainu, kas parādīta 28. attēlā).



24. att.

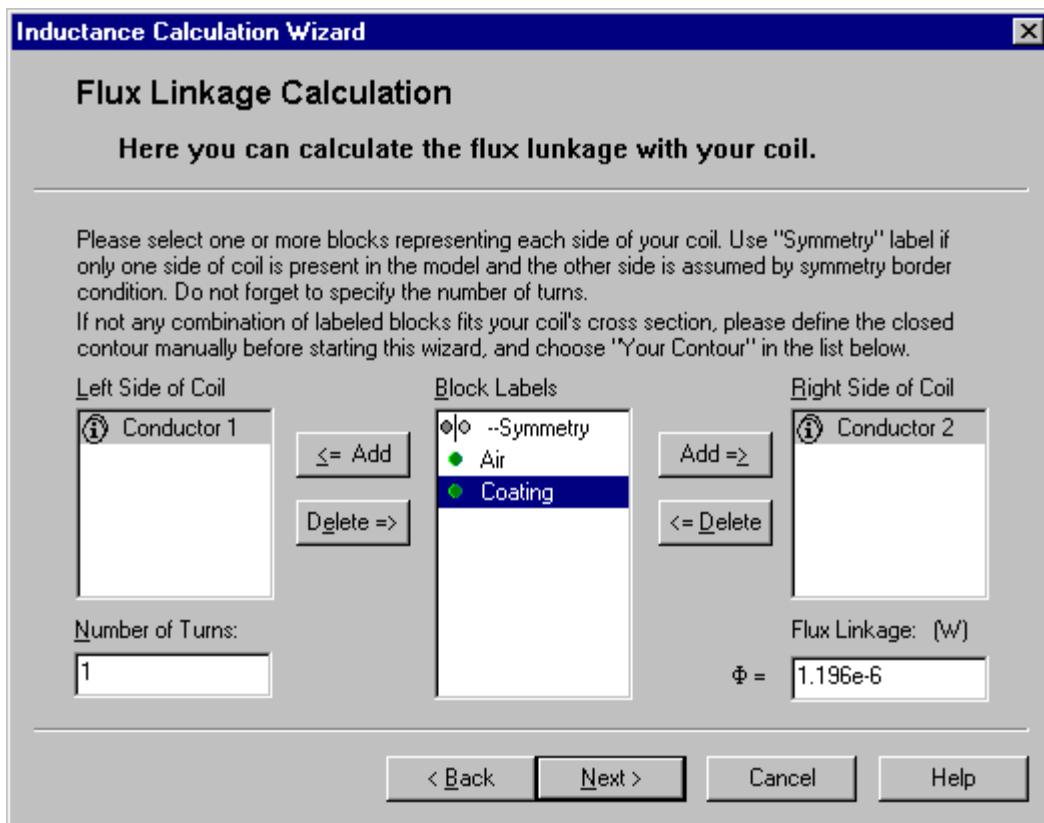
Vispārīgā gadījumā vads vai spole topoloģiskajā modelī attēlots ar diviem blokiem – vadu (vai spoles malu) ar tiešā virziena strāvu un vadu ar pretējā virziena strāvu. Ja topoloģiskais modelis satur tikai vienu vadu, tad tiek pieņemts, ka otrs vads ir novietots simetriski, vai arī tas atrodas pietiekami lielā attālumā un tādēļ magnētiskā lauka ainu aprēķina apgabalā neietekmē.

Lai definētu vadu (vai spoles malu), loga *Flux Linkage Calculation* (25. att.) sarakstā *Block Labels* jāaizzīmē atbilstošā identifikatora rindiņa un ar peli jāpārvelk uz vienu no sarakstiem (*Left Side of Coil* vai *Right Side of Coil*), kas atrodas loga abās pusēs. Šo pašu darbību var veikt, izmantojot slēdžus **<=Add** un **Delete=>**. Ja topoloģiskais

modelis satur tikai vienu vadu, tad uz vienu vai otru sarakstu jāpārvelk tikai šim blokam atbilstošā identifikatora rindiņa. Ievades lauciņā *Number of Turns* jāieraksta spoles vijumu skaits.

Veicot jebkuru no minētajām darbībām, lodziņā *Flux Linkage* automātiski izmainās plūsmas saķēdējuma vērtība, kuru plakanparalēlam laukam aprēķina pēc formulas

$$\Psi = w \left( \frac{\int_{S_K} A_K ds}{\int_{S_K} ds} - \frac{\int_{S_L} A_L ds}{\int_{S_L} ds} \right). \quad (6-6)$$

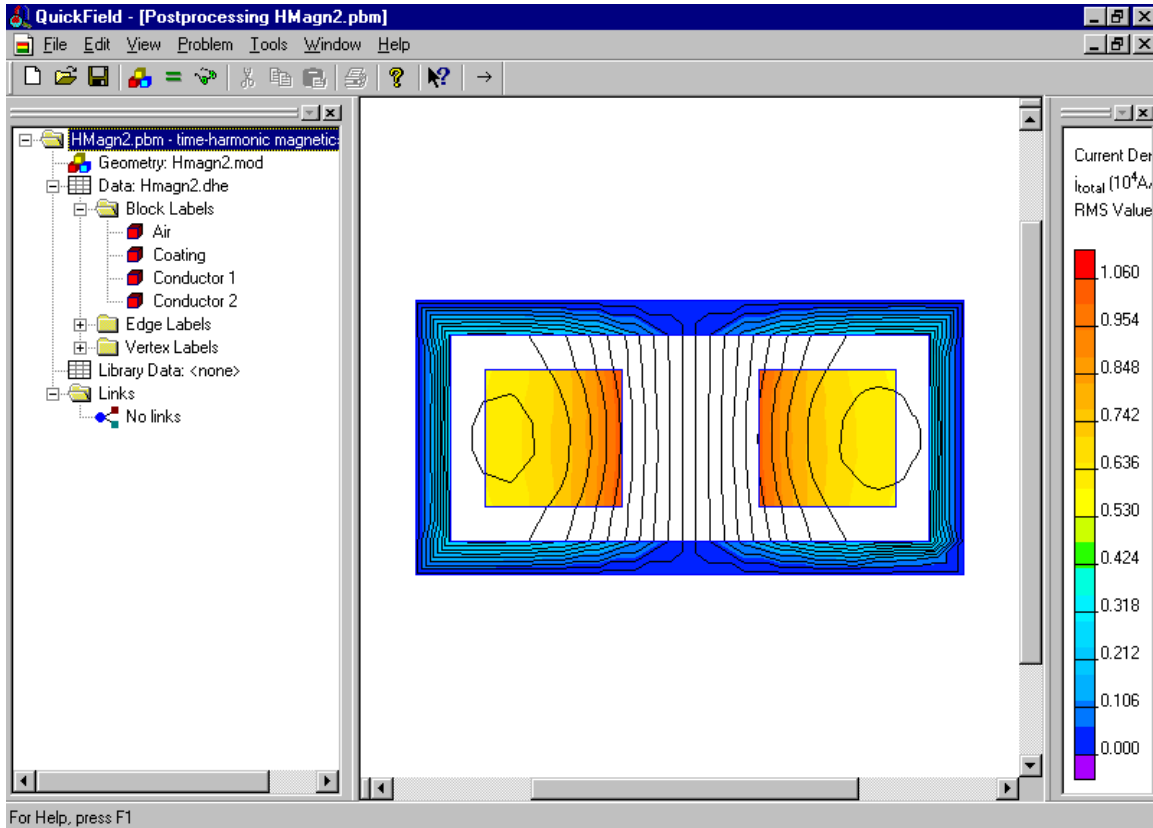


25. att.

un aksiālsimetriskam laukam – pēc formulas

$$\Psi = 2\pi w \left( \frac{\int_{S_K} A_K r ds}{\int_{S_K} ds} - \frac{\int_{S_L} A_L r ds}{\int_{S_L} ds} \right), \quad (6-7)$$

kur  $A$  – vektoriālais magnētiskais potenciāls;  $K$  un  $L$  – spoles kreisās un labās malas apzīmējums;  $r$  – aplūkojamā punkta attālums līdz rotācijas asij.



26. att.

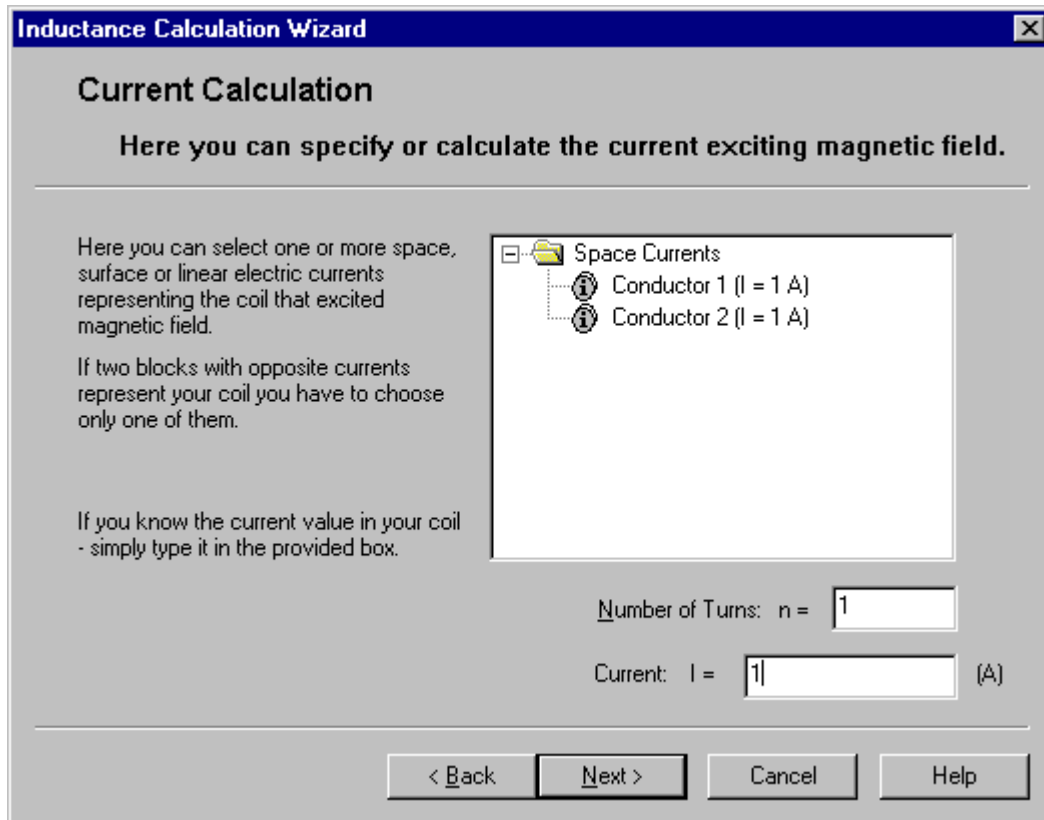
Tā kā katru spoli veido divas malas, tad plakanparalēla lauka gadījumā šajās malās ir vienādas strāvu skaitliskās vērtības, bet pretēji virzieni. Aprēķinot šādas spoles magnētisko lauku, aprēķina apgabala topoloģiskajā modelī jāiekļauj abas spoles malas. Tomēr, ja spole ir simetriska un rada simetrisku magnētisko lauku (26. att., pietiek, ja topoloģiskajā modelī iekļauj tikai vienu no spoles malām, bet otru malu modelē, izmantojot robežnosacījumu  $A = 0$  uz antisimetrijas ass (šī ass vienlaikus ir arī spoles ģeometriskās simetrijas ass). Šajā gadījumā  $S_K = S_L = S$ ,  $A_K = -A_L = A$  un izteiksme (6-6) attiecīgi vienkāršojas

$$\Psi = 2w \frac{\int A ds}{S} . \quad (6-8)$$

Plakanparalēlam laukam plūsmas saķēdējums tiek aprēķināts uz garuma vienību aksiālā ( $z$  ass) virzienā.

Pēc plūsmas saķēdējuma aprēķināšanas jānospiež slēdzis **Next**. Tad atveras logs *Inductance Calculation Wizard* ar virsrakstu *Current Calculation* (27. att.), kur sarakstā

*Space Currents* jāaizzīmē attiecīgā identifikatora rindiņā, ievades lauciņos *Number of Turns* un *Current* jāieraksta atbilstošās vērtības un pēc tam jānospiež slēdzis **Next**. Tad atveras logs *Inductance Calculation Wizard* ar virsrakstu *Completing the Inductance Wizard* (28. att.), kurā redzamas plūsmas saķēdējuma un induktivitātes aprēķinātās vērtības.



27. att.





28. att.

## 6.6. Integrēšanas kontūru rediģēšana

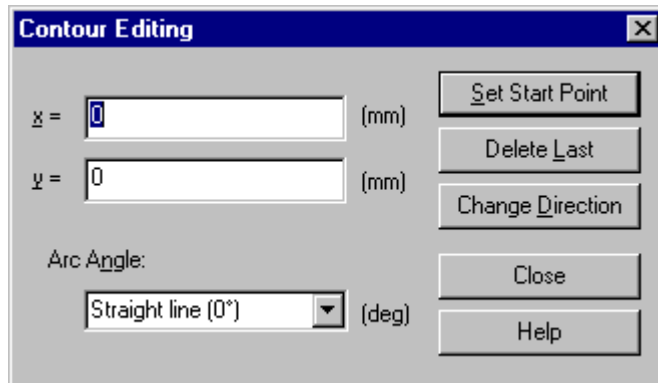
Lai noteiktu dažādus lauka raksturlielumus, *QuickField* paredz iespējas aprēķināt līnijintegrāļus, virsmas integrāļus un tilpumintegrāļus. Jebkurā no šādiem aprēķiniem jāuzdod integrēšanas kontūrs (turpmāk saīsināti – kontūrs). Kontūrus kā ģeometriskus objektus izmanto arī grafiku konstruēšanā, kas aprēķina rezultātus ļauj uzskatāmāk attēlot un analizēt.

Par kontūru sauc orientētu lauztu līniju, kas sastāv no taisnes nogriežņiem un/vai riņķa līnijas lokiem, ieskaitot arī topoloģiskā modeļa šķautnes. Kontūri var būt noslēgti vai vaļēji. Kontūrs lauka ainās logā tiek attēlots ar orientētiem taisnes nogriežņiem vai riņķa līnijas lokiem, vai, ja kontūrs ir noslēgts un orientēts pozitīvā virzienā (kontūra aplešanas virziens ir pretējs pulksteņa rādītāja kustības virzienam), – ar iekrāsotu daudzstūrains apgabalu. *QuickField* paredz iespēju izveidot un rediģēt kontūru lauka ainās logā.

Kontūra rediģēšanā tiek izmantotas šādas darbības.

Līnijas pievienošana kontūram. Kontūram var pievienot taisnes nogriezni vai riņķa līnijas loku. Loku uzdod ar tam atbilstošu centra leņķi un diviem galapunktiem. Kontūrs var sākties ar jebkuru līniju, bet jau esošam kontūram var pievienot līniju, kuras sākuma punkts sakrīt ar iepriekšējās līnijas beigu punktu. Līniju nevar pievienot noslēgtam kontūram. Pievienot kontūram līniju var ar diviem paņēmieniem:

- izpildot komandu **Contour/Pick Elements(Line/Edge/Block)** un, pārvietojot peles kursoru ("+"), novilkta noteikta garuma un noteikta virziena līniju;
- izpildot komandu **Contour/Add Lines...** un logā *Contour Editing* (29. att.) ievadīt pievienojamās līnijas beigu punkta koordinātas, bet lokveida līnijām ievades lauciņā *Arc Angle* – arī loka centra leņķi.



29. att.

Šķautnes pievienošana kontūram. Kontūrs var sākties ar jebkuru topoloģiskā modeļa šķautni, bet jau daļēji izveidotam, bet nenoslēgtam kontūram šķautni var pievienot, ja tās sākuma punkts sakrīt ar kontūra beigu punktu. Lai kontūram pievienotu topoloģiskā modeļa šķautni, jāizpilda komanda **Contour/Pick Elements(Line/Edge/Block)** un pēc tam, kursoru novietojot uz pievienojamo šķautni, jāizdara peles klikšķis.

Bloka pievienošana. Ja kontūru veido aprēķina apgabala kaut kāda daļa (tajā skaitā topoloģiskā modeļa bloks vai vairāki bloki), šim kontūram var pievienot jebkuru bloku, kas robežojas ar šo kontūru, kā arī aizvākt kādu no šajā apgabalā ietilpstošajiem blokiem. Lai veiktu šo darbību, jāizpilda komanda **Contour/Pick Elements(Block)** un pēc tam, novietojot peles kursoru ("+" ) uz pievienojamā (vai aizvācamā bloka), jāizdara peles klikšķis.

Kontūra noslēgšana. Šo darbību veic ar komandu **Contour/Close**, pēc kuras izpildes kontūra sākuma punkts un beigu punkts tiek savienots ar taisnes nogriezni vai riņķa līnijas loku.

Kontūra aplejas virziena maiņa. Lai veiktu šo darbību, jāizpilda komanda **Contour/Change Direction**.

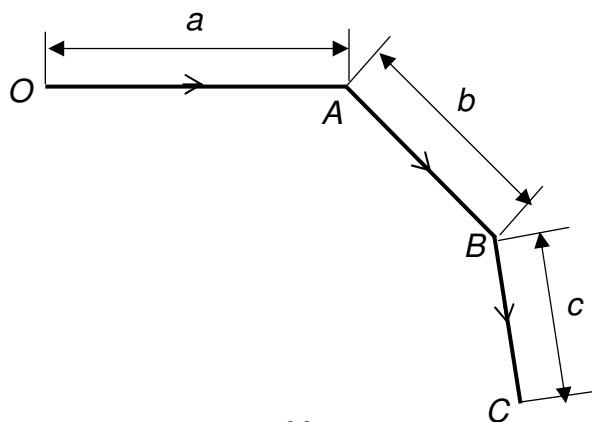
Kontūra aizvākšana. Šīs darbības veikšanai jāizpilda komanda **Contour/Clear**, ar kuru izveidotais kontūrs pilnībā tiek nodzēsts.

Kontūra pēdējo elementu dzēšana. Šo darbību veic, izpildot komandu **Contour/Delete Last Edge** vai **Contour/Delete Last Block**. Šajā gadījumā tiek dzēsts pēdējais kontūram pievienotais elements – šķautne vai bloks.

Atsevišķās kontūra veidošanas un rediģēšanas stadijās dažas no iepriekš minētajām darbībām var būt nepieļaujamas.

## 6.7. Grafiku konstruēšana

Grafiki tiek attēloti kā vispārināta argumenta  $L$  funkcijas, kur  $L$  raksturo punkta stāvokli uz izvēlēta kontūra, turklāt  $L=0$  sakrīt ar kontūra sākuma punktu un  $L$  pozitīvais virziens – ar kontūra apejas virzienu. Tā, piemēram, 30. attēlā parādīts kontūrs, ko veido lauza līnija  $OABC$  un kas sastāv no taisnes nogriežņiem ar garumiem  $a$ ,  $b$  un  $c$ . (Šajā attēlā ar bultiņām attēlots kontūra apejas virziens). Attēlojot kāda fizikālā lieluma maiņas grafiku aplūkojamā kontūra dažādos punktos, uz abscisu ass koordinātai  $L$  atbilst fiksēti punkti, kuros  $L$  vērtība attiecīgi ir:  $L=0$  (punktā  $O$ );  $L=a$  (punktā  $A$ );  $L=a+b$  (punktā  $B$ );  $L=a+b+c$  (punktā  $C$ ) un funkcijas vērtības šajos punktos attiecīgi  $F(0)$ ,  $F(a)$ ,  $F(a+b)$ ,  $F(a+b+c)$ .



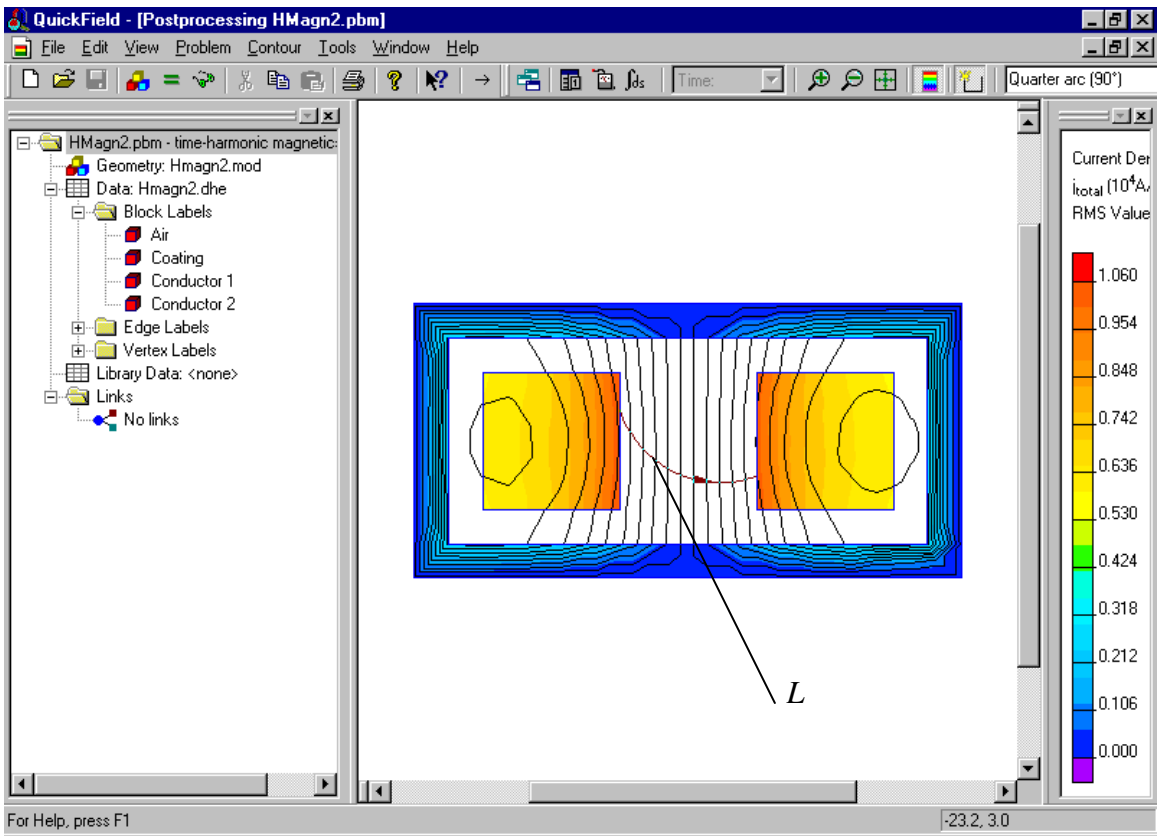
30 att.

Lai konstruētu funkcijas grafiku  $F = f(L)$ , lauka ainās logā vispirms jāizveido kontūrs (vai jāredīgē jau esošais). 31. attēlā parādīts kontūrs  $L$ , ko šajā gadījumā veido viena līnija – riņķa līnijas loks.

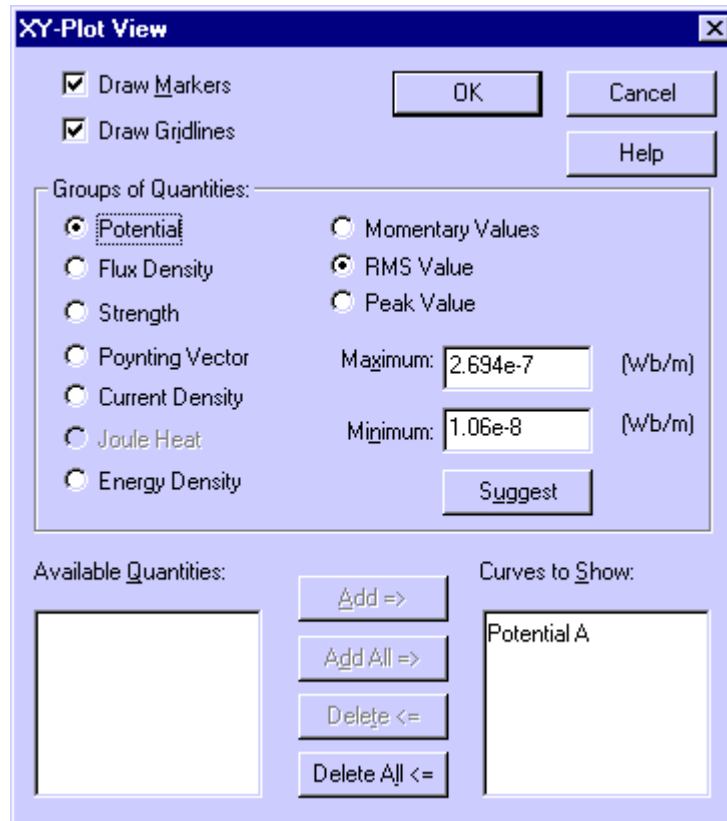
Lai atvērtu grafika logu, jāizpilda komanda **View/XY-Plot** un pēc tam komanda – **View/XY-Plot Curves...**. Tad atveras logs *XY-Plot View* (32. att.), kurā var izvēlēties attēlojamās lielumus, kā arī dažādus attēlojamā grafika atribūtus.

Grafikā vienlaikus var attēlot vairākus fizikālos lielumus, ja tiem ir vienādas mērvienības. Atbilstoši tam šie lielumi ir iedalīti grupās. Pilns grafikā attēlojamo lielumu saraksts ietver tos pašus lielumus, kurus var attēlot lauka ainā (sk. 6.2.1.), kā arī vektoru normālās un tangenciālās komponentes.

Pēc tam, kad izvēlēta attēlojamo lielumu grupa (*Groups of Quantities*) (sk. 32. att.), sarakstā *Curves to Show* parādās visi lielumi, kuri tiks attēloti grafikā, bet sarakstā *Available Quantities* – lielumi, kuri nav izvēlēti, bet kurus grafikā var attēlot. Izmantojot slēdžus **Add All=>** vai **Delete All<=**, attēlojamās lielumus var pārnest no viena saraksta uz otru. Ievades lauciņos *Maximum* un *Minimum* var uzdot uz ordinātu ass attēlojamo fizikālo lielumu diapazonu.



31. att.



32. att.

## 6.8. Integrāļu aprēķināšana

Veicot līnijintegrāļu, virsmas integrāļu un tilpumintegrāļu izkaiļošanu, *QuickField* ļauj noteikt dažādus pētāmā objekta raksturlielumus.

Plakanparalēla lauka gadījumā integrēšanas kontūrs nosaka bezgalīga garuma ( $z$  ass virzienā) cilindrisku virsmu vai šādas virsmas ietvertu tilpumu. Tādējādi plakanparalēla lauka uzdevumos virsmas un tilpuma integrāļa skaitliskā vērtība tiek aprēķināta uz garuma vienību. Aksiālsimetriska lauka gadījumā kontūrs nosaka toroidālu virsmu vai šādas virsmas ietvertu tilpumu.

Par kontūra apejas pozitīvo virzienu ir pieņemts virziens, kas pretējs pulksteņa rādītāja kustības virzienam. Kontūra apejas virziens tiek ievērots šādi:

- aprēķinot tilpumintegrāli, integrēšanas apgabals atrodas pa kreisi no kontūra, t. i., kontūra iekšējās normāles virzienā;
- aprēķinot virsmas integrāli, integrēšanas apgabals atrodas pa labi no kontūra, t. i., kontūra ārējās normāles virzienā;
- ja integrējamā funkcija kontūra abās pusēs ir ar pretēju zīmi, aprēķinos tiek izmantota funkcijas vērtība pa labi no kontūra.

Lai aprēķinātu lauka integrāļos raksturlielumus, jāizpilda komanda **View/Calculator Window/Integral Calculator** vai **View/Integral Values.../Integral Calculator**.

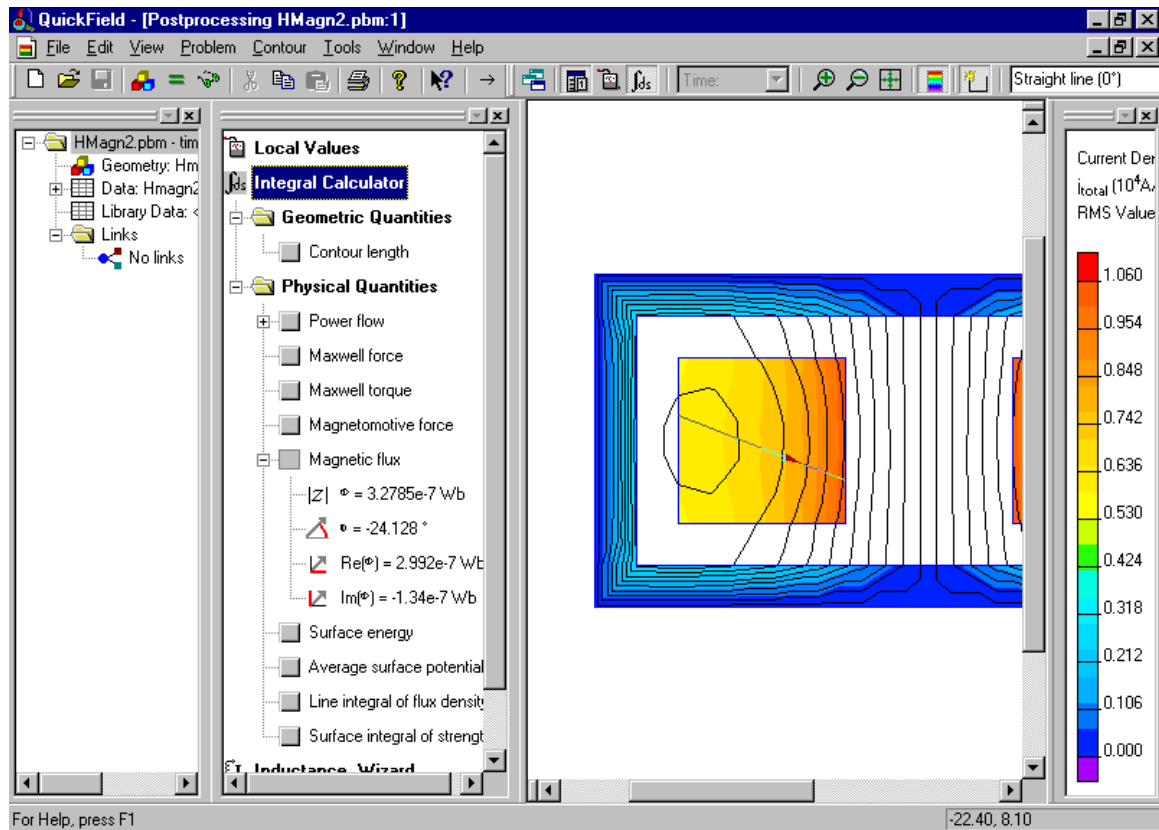
Ja integrēšanas kontūrs jau izveidots, kalkulatora logā koka veidā parādās fizikālo lielumu saraksts, kuru skaitliskās vērtības dotajam kontūram iespējams aprēķināt

(33. att.). Šis saraksts ir atkarīgs no uzdevuma tipa. Ja integrēšanas kontūrs vēl nav izveidots, jāzudara peles dubultklikšķis uz *Integral Calculator* un tad pēc uzaicinājuma *! Please define contour to calculate* jāveic darbības, kas aprakstītas iepriekš (sk. 6.6). Lai aprēķinātu kāda lieluma skaitlisko vērtību, jānospiež kāds no slēdžiem, kas atrodas pa kreisi no attiecīgā fizikālā lieluma nosaukuma kalkulatora logā (sk., piemēram, 33. att.).

Veicot kontūra jebkuru rediģēšanu, agrāk izskaitļotās fizikālo lielumu vērtības tiek pārrēķinātas atbilstoši rediģētā kontūra parametriem. Noteikta tipa integrāļu aprēķināšanai ir nepieciešams noslēgts kontūrs, kura apejas virziens sakrīt ar pulksteņa rādītāja kustības virzienu, jo pretējā gadījumā šādiem integrāļiem nav fizikālas jēgas.

Aizzīmējot kalkulatora logā (33. att.) aprēķināto lielumu un izpildot kontekstatkarīgā izvēlnē komandu **Copy to Clipboard**, šī lieluma skaitlisko vērtību var nokopēt, lai pēc tam ievietotu citā teksta dokumentā.

Integrālo lielumu aprēķināšanas rezultātu precizitāte būs augstāka, jo iespējami tālāk integrēšanas kontūrs atradīsies no zonām ar lielāku lauka sadalījuma nevienmērīgumu (lielāku lauka gradientu), piemēram, apgabali tādu robežu tuvumā, kas atdala vides ar ievērojami atšķirīgām fizikālām īpašībām, kā arī zonās, kurās ir lauka avoti. Turpretim, aprēķinot, piemēram, plūsmas saķēdējumu, integrēšanas kontūram precīzi ir jāsakrīt ar attiecīgā apgabala robežu, kurā atrodas vads vai spoles mala.



33. att.

Magnetostatiskā lauka gadījumā *QuickField* ļauj aprēķināt šādus integrālos lauka raksturlielumus.

- 1) Rezultējošo magnetostatiskos spēku, kas darbojas uz ķermeni dotajā tilpuma elementā:

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \int_S (\vec{H} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n} \cdot (\vec{H} \cdot \vec{B})) ds, \quad (6-12)$$

kur integrēšana notiek pa virsmu  $S$ , kas aptver doto tilpuma elementu;  $\vec{n}$  – virsmas  $S$  ārējā normāle dotajā punktā.

- 2) Rezultējošo magnetostatisko spēku momentu, kas darbojas uz ķermeni dotajā tilpuma elementā:

$$M = \frac{1}{2} \int_S ((\vec{r} \times \vec{H}) \cdot (\vec{n} \cdot \vec{B}) + (\vec{r} \times \vec{B}) \cdot (\vec{n} \cdot \vec{H}) - (\vec{r} \times \vec{n}) \cdot (\vec{H} \cdot \vec{B})) dS, \quad (6-13)$$

kur  $\vec{r}$  – integrēšanas punkta rādiusvektors.

Plakanparalēla lauka gadījumā momenta vektora virziens sakrīt ar  $z$  ass virzienu, bet aksiālsimetriska lauka gadījumā momenta vērtība ir vienāda ar nulli. Moments pēc formulas (6-13) tiek noteikts attiecībā pret koordinātu sākumu, bet momentu attiecībā pret jebkuru punktu var aprēķināt, ja šai vērtībai pieskaita vektoriālo reizinājumu  $F \times \vec{r}_0$ , kur  $\vec{F}$  – rezultējošais spēks;  $\vec{r}_0$  – spēka darbības taisnes jebkura punkta rādiusvektors attiecībā pret rotācijas centru vai rotācijas asi.

- 3) Magnētiskā lauka enerģiju lineāra uzdevuma gadījumā

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\vec{H} \cdot \vec{B}) dV \quad (6-14)$$

un nelineāra uzdevuma gadījumā

$$W = \int_V \left( \int_0^B H(B) dB \right) dV. \quad (6-15)$$

- 4) Plūsmas saķēdējums ar vienu vijumu plakanparalēla lauka gadījumā

$$\Psi = \frac{\int AdS}{S} \quad (6-16)$$

un aksiālsimetriska lauka gadījumā

$$\Psi = \frac{2\pi \int rAdS}{S}. \quad (6-17)$$

## 6.9. Rezultātu izvade tabulās

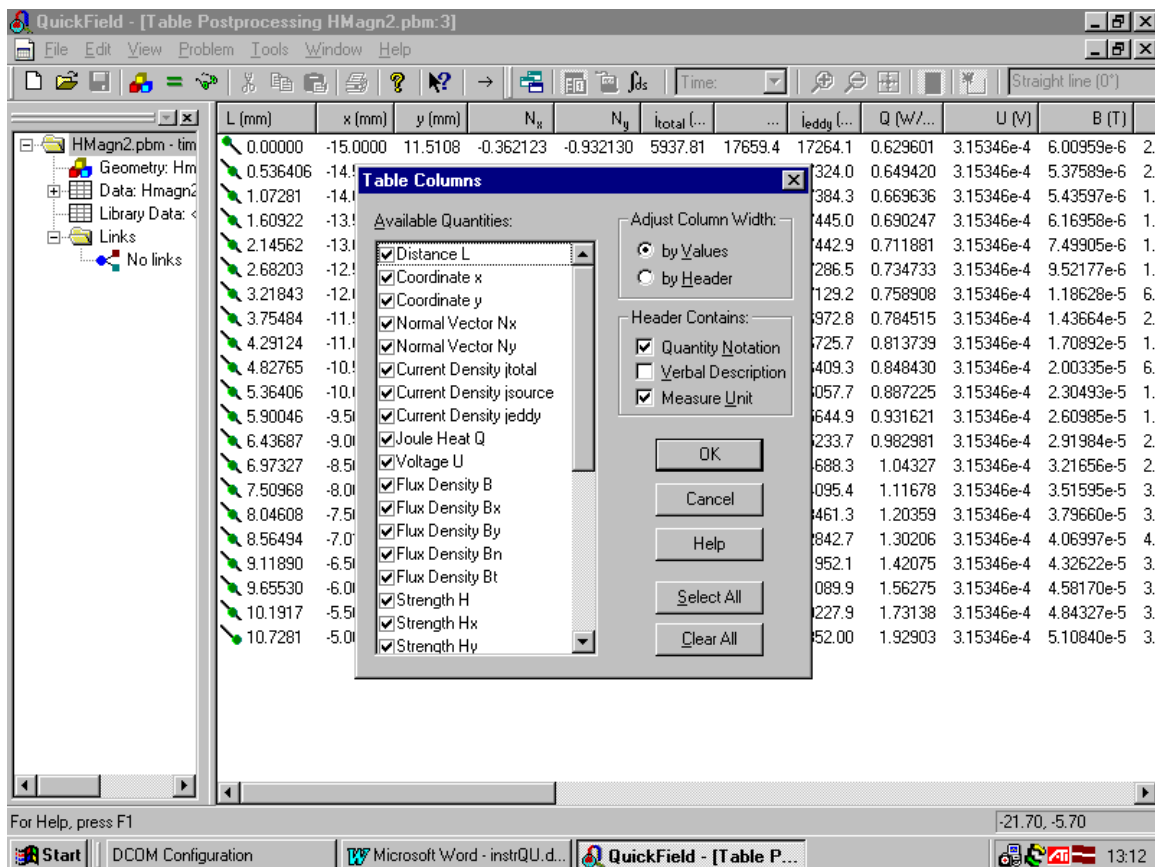
### 6.9.1. Vispārīgi norādījumi

*QuickField* ļauj izvadīt aizzīmētos kontūra punktus aprēķinātos lauka raksturlielumus tabulas veidā uz ekrāna.

Lai iegūtu rezultātu tabulu, jāuzdod kontūrs (sk. 6.6), kura atsevišķos punktos paredzēts fiksēt attiecīgā lieluma vērtības. Pēc tam jāizpilda komanda **View/Table**.

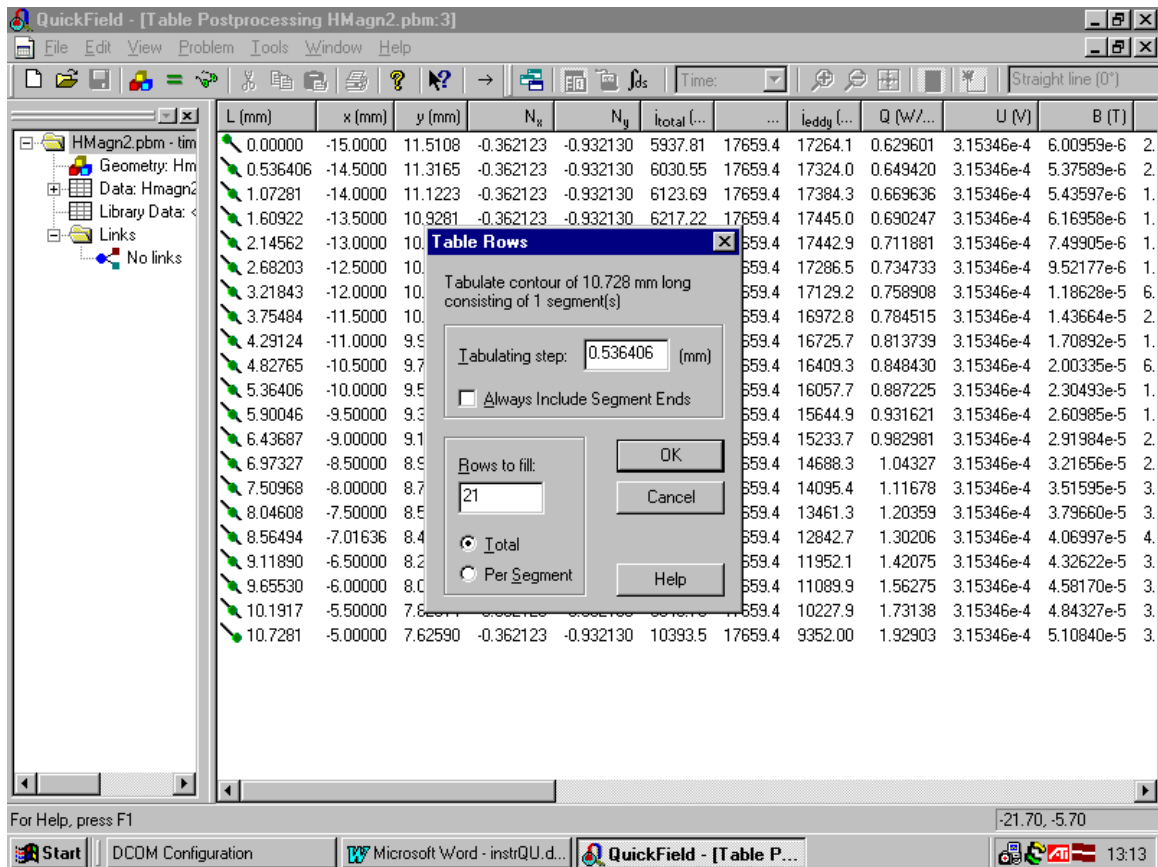
Parādoties loga labajā pusē tabulai (37. att.), var veikt šādas darbības:

- ar komandu **View/Columns...** atvērt logu *Table Columns...* un tajā izvēlēties fizikālos lielumus, kurus vēlams ierakstīt tabulas attiecīgajās kolonnās;
- ar komandu **View/Rows...** atverot logu *Table Rows* (38. att.), mainīt punktu sadalījumu tabulā;
- ar komandu **Edit/Insert...** ievietot tabulā jaunu rindiņu, ievades lauciņā norādot tai atbilstošā punkta attālumu no koordinātu sākuma;
- kopēt glabātuvē tabulās aizzīmētās rindiņas, lai pēc tam ievietotu citā dokumentā.



37. att.





38. att.

## 6.9.2. Tabulu kolonnas

Tabulā attēlojamās lielumus var izvēlēties logā *Table Columns* (sk. 37. att.), sarakstā *Available Quantities* atzīmējot attiecīgos lodziņus. Šajā logā var izvēlēties kolonnas platumu (*Adjust Column Width*) un tabulas kolonnu virsrakstu formu.

## 6.9.3. Tabulu rindiņas

Lai mainītu rindiņu skaitu tabulā, jāatver logs *Table Rows* un tajā jāuzdod vai nu tabulācijas solis (*Tabulating step*), vai rindiņu skaits (*Rows to fill*). Norādot vienu no šiem parametriem, otrs izmainās automātiski. Ieslēdzot režīmu *Always Include Segment Ends*, tabulā neatkarīgi no uzdotā soļa parādās fizikālo lielumu vērtības kontūra katras līnijas galapunktos. Rindiņu skaitu var uzdot visam kontūram kopumā (slēdzis *Total*) vai atsevišķai kontūra līnijai (slēdzis *Per segment*). Rindiņu skaitu tabulā var mainīt arī, izpildot komandu **Edit/Delete** vai **Edit/Insert**.

## 6.11. Lauka ainas un grafiku ekrānattēla atribūtu maiņa

Ekrānattēla atribūti lauka ainā nosaka sasaisti starp fizikālo lielumu skaitliskajām vērtībām un krāsām, ar kādām attēloti šo vērtību dažādi līmeņi, bet grafikos – sasaisti starp raksturlīknēm un tajās attēlotajiem fizikālajiem lielumiem, kā arī telpas un laika koordinātām. Lai parādītu un/vai mainītu šos atribūtus, jāizpilda komanda **View/Legend**.

## 6.12. Aprēķina rezultātu izdrukāšana

Lauka ainu, grafiku vai tabulu var izdrukāt tādā izskatā, kādā tas ir redzams uz ekrāna, turklāt saglabājot mērogu un attēloto lielumu diapazonus.

Lai izdrukātu attēlu, jāizpilda komanda **File/Print** un pēc tam, ja vajadzīgs, jānorāda izdrukas parametri (attēla orientācija, lapas izmēri u. tml.). Lai pirms izdrukāšanas aplūkotu attēlu kopumā, un to, kā tas būs izvietots uz lapas, jāizpilda komanda **File/Print Preview...**

## 6.13. Aprēķina rezultātu kopēšana

Lauka ainu, grafiku vai tabulu var nokopēt, lai pēc tam to ievietotu citā, piemēram, *Word* dokumentā. Lai to veiktu, jāizpilda komanda **Edit/Copy**, jānospiež taustiņu kombinācija **Ctrl** + **C**, vai jāizmanto rīkjoslās piktogramma **Copy**. Pēc tam, pārejot uz dokumentu, kurā paredzēts ievietot attēlu, jāizpilda komanda **Edit/Paste**, jānospiež taustiņu kombinācija **Ctrl** + **V**, vai jāizmanto rīkjoslās piktogramma **Paste**.

# 7. Magnetostatiskā lauka teorijas pamatelementi *QuickField* programmatūrā

## 7.1. Vispārīgi norādījumi

Šajā nodaļā iztirzāti lauka teorijas pamatelementi, uz kuru bāzes *QuickField* programmatūrā realizēta galīgo elementu metode: vienādojumi, matemātiskās sakarības, dažāda veida robežnosacījumi un to uzdošana u. c.

*QuickField* paredzēta divdimensioionālu matemātiskās fizikas robežproblēmu risināšanai, kuras var aprakstīt ar eliptiskiem parciālo atvasinājumu diferenciālvienādojumiem attiecībā pret vektoriālu funkciju. Izmantojot programmatūru *QuickField*, iespējams risināt plakana, plakanparalēla un aksiālsimetriska lauka vienādojumus.

Plakanparalēla lauka aprēķina uzdevumos tiek izmantota Dekarta taisnleņķa koordinātu sistēma  $xyz$ , turklāt tiek pieņemts, ka aprēķina apgabala ģeometrija (topoloģija), vides īpašības un parametri, kas raksturo lauka avotus, nemainās  $z$  ass

virzienā. Topoloģiskā modeļa aprakstīšanu, robežnosacījumu uzdošanu, kā arī rezultātu apstrādi veic  $xy$  koordinātu plaknē, ko sauc par *aprēķina modeļa plakni*.

Aksiālsimetriska lauka aprēķina uzdevumos tiek izmantota cilindriskā koordinātu sistēma  $r, \theta$ , pieņemot, ka vides īpašības un lauka avoti nav atkarīgi no leņķiskās koordinātas  $\theta$ . Topoloģiskā modeļa aprakstīšanu, robežnosacījumu uzdošanu, kā arī rezultātu apstrādi veic *aprēķina modeļa plaknē*, kas šajā gadījumā ir plakne  $zr$  ( $r \geq 0$ ).

Aprēķina apgabala topoloģija ir noteikta kā apakšapgabalu kopums, ko aprēķina modeļa plaknē vispārīgā gadījumā veido līklīniju daudzstūris. Katrs apakšapgabals var sastāvēt no viena vai vairākiem blokiem. Šeit ar terminu *bloks* (sk. arī 3.1.) tiek apzīmēts apakšapgabals, ko ietver līklīniju daudzstūris, ar terminu *šķautne* – taisnes nogrieznis vai riņķa līnijas loks, kas veido bloka robežu, ar terminu *virsošne* – kāds no šķautnes galapunktiem. Topoloģiskā modeļa šķautnes, kas aprēķina apgabalu atdala no apkārtējās vides, ir ārējās robežas, bet visas pārējās šķautnes – iekšējās robežas.

## 7.2. Magnetostatiskā lauka pamatvienādojumi

*QuickField* ļauj risināt lineārus un nelineārus magnētiskā lauka uzdevumus. Lauka avoti var būt strāvas, kā arī pastāvīgie magnēti. Šādos uzdevumos magnētisko lauku apraksta ar Puasona vienādojumu, kurā meklējamais lielums ir vektorālais magnētiskais potenciāls  $\vec{A}$  ( $\vec{B} = \text{rot}\vec{A}$ , kur  $\vec{B}$  – magnētiskās indukcijas vektors). Divdimensionālu magnētisko lauka aprēķina uzdevumos magnētiskā indukcijas vektors  $\vec{B}$  vienmēr atrodas *aprēķina modeļa plaknē* ( $xy$  vai  $zr$ ), bet strāvas blīvuma vektors  $\vec{j}$  un vektorālais potenciāls  $\vec{A}$  ir perpedikulārs šai plaknei. Turklāt plakanparalēla lauka uzdevumos ir tikai strāvas blīvuma komponente  $j_z$  un vektorālā magnētiskā potenciāla komponente  $A_z$ . (Turpmāk vienkāršības dēļ šīs komponentes apzīmēsim bez indeksiem, t. i., attiecīgi ar  $j$  un  $A$ ).

Plakanparalēla lauka gadījumā tiek risināts vienādojums

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_x} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (7-1)$$

un aksiālsimetriska lauka gadījumā – vienādojums

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r\mu_z} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right), \quad (7-2)$$

kur magnētiskās caurlaidības komponentes  $\mu_x$  un  $\mu_y$  (vai  $\mu_z$  un  $\mu_r$ ), koercitīvā spēka komponentes  $H_{cx}$  un  $H_{cy}$  (vai  $H_{cz}$  un  $H_{cr}$ ), kā arī strāvas blīvums  $j$  ir nemainīgi lielumi topoloģiskā modeļa katra bloka robežās.

Nelineāros magnetostatikas uzdevumos tiek pieņemts, ka vide ir izotropā ( $\mu_x = \mu_y$  vai  $\mu_z$  un  $\mu_r$ ) un vides īpašības tiek uzdotas ar funkcionālu sakarību  $B = f(H)$ .

### 7.3. Lauka avoti

Lauka avotus raksturojošo lielumu skaitliskās vērtības var tikt uzdotas atsevišķos aprēķina apgabala apakšapgabalos, uz ārējām vai iekšējām robežām un atsevišķos punktos. Magnetostatikas uzdevumos var būt koncentrēti lauka avoti (punktveida avoti), izkļiedēti lauka avoti un avoti, kurus var raksturot ar lineāro strāvas blīvumu, kā arī pastāvīgie magnēti, kurus var raksturot ar koercitīvo spēku.

Ar punktveida avotu aprēķina apgabala noteiktā punktā (plaknē  $xy$  vai  $zr$ ) uzdod strāvu, kas plūst šai plaknei perpendikulārā virzienā, t. i.,  $z$  (vai  $\theta$ ) ass virzienā. Plakanparalēla lauka gadījumā tā ir strāva, kas plūst bezgalīgi maza šķērsriezuma taisnā vadītājā, bet aksiālsimetriska lauka gadījumā – strāva, kas plūst bezgalīgi maza šķērsriezuma koncentriskā (attiecībā pret rotācijas asi) vadītājā.

Ar lineāro strāvas blīvumu uzdots lauka avots ir virsmas strāvas blīvums, kas ekvivalents nehomogēniem otrā veida robežnosacījumiem.

Izkļiedētu lauka avotu uzdod ar strāvas blīvumu, ko apakšapgabalā, kurā atrodas spoles mala, aprēķina pēc formulas

$$j = \frac{wI}{S}, \quad (7-3)$$

kur  $w$  – spoles vijumu skaits;  $I$  – strāva spolē;  $S$  – spoles malas šķērsriezuma laukums.

Atsevišķi apakšapgabali, kuros uzdots viens un tas pats strāvas saķēdējums jeb ampērvijumu skaits ( $wI$ ), tiek uzskatīti kā virknē savienoti elementi. Šajā gadījumā strāvas blīvums, kas uzdots katrā no topoloģiskā modeļa blokiem, tiek noteikts kā kopējā strāvas saķēdējuma dalījums ar attiecīgā bloka šķērsriezuma laukumu.

Aksiālsimetriska lauka uzdevumos, ja blokā uzdots nevis strāvas blīvums, bet strāvas saķēdējums, iespējams norādīt, ka strāvas blīvuma sadalījums ir apgriezti proporcionāls attālumam no rotācijas ass, t. i., proporcionāls  $1/r$ . Šāda pieeja ļauj korektāk modelēt magnētisko lauku spolēs, kuras izveidotas no relatīvi liela šķērsriezuma monolīta vadītāja.

### 7.4. Robežnosacījumi

Uz aprēķina apgabala robežām iespējams uzdot pirmā veida (Dirihlē) un otrā veida (Neimaņa) robežnosacījumus.

Pirmā veida robežnosacījumus uzdod, ja uz aprēķina apgabala robežām (topoloģiskā modeļa šķautnēm, kas veido robežas, vai virsotnēs, kas atrodas uz robežām) ir zināma vektoriālā potenciāla skaitliskās vērtības  $A_0$ . Ar šīm vērtībām tiek noteikta magnētiskās indukcijas normālā komponente uz robežas. Pirmā veida robežnosacījumus  $A_0 = 0$ , piemēram, uzdod uz robežām, kas sakrīt ar magnētiskām antisimetrijas asīm, vai uz robežām, aiz kurām ar pietiekamu precizitāti var pieņemt, ka magnētiskais lauks praktiski nepastāv, t. i., ka magnētiskās indukcijas vērtība nepārsniedz aprēķinos pieļaujamo kļūdu.

Programmā *QuickField* pirmā veida robežnosacījumus var uzdot kā koordinātu  $x, y$  (plakanparalēls lauks) vai  $z, r$  funkciju (aksiālsimetriskis) lauks:

$$A_0 = a + bx + cy; \quad (7-4)$$

$$rA_0 = a + b zr + \frac{cr^2}{2}. \quad (7-5)$$

Koeficienti  $a, b$  un  $c$  uz katras šķautnes ir nemainīgi lielumi, bet, pārejot no vienas šķautnes uz citu šķautni, tie var mainīties. Šāda pieeja ļauj modelēt homogēnu ārējo lauku, uzdodot magnētiskās indukcijas normālo komponenti uz jebkuras šķautnes, kas veido šo robežu.

Ja šķautne ar  $x$  asi (plakanparalēla lauka gadījumā) vai  $z$  asi (aksiālsimetriska lauka gadījumā) veido leņķi  $\alpha$ , tad magnētiskās indukcijas normālo komponenti uz šīs šķautnes aprēķina kā

$$B_n = c \sin \alpha + b \cos \alpha. \quad (7-6)$$

Koeficientiem  $a$  izteiksmēs (7-4) un (7-5) jābūt izvēlētiem tā, lai šķautņu saskares punktos funkcija  $A_0 = f(x, y)$  būtu nepārtraukta. Korektai uzdevuma nostādnei nepieciešams, lai pirmā veida robežnosacījumi būtu uzdoti vismaz vienā aprēķina apgabala robežas punktā. Uz robežas, kas sakrīt ar rotācijas asi, aksiālsimetriska lauka aprēķina uzdevumos vienmēr ar noklusējumu tiek uzdoti pirmā veida robežnosacījumi  $A_0 = 0$ .

Otrā veida robežnosacījumus uzdod, ja uz robežas ir zināma magnētiskā lauka intensitātes tangenciālā komponente  $H_\tau$ , turklāt uz ārējām robežām

$$H_\tau = \sigma, \quad (7-7)$$

kur  $\sigma$  – lineārais strāvas blīvums.

Ja  $\sigma = 0$ , otrā veida robežnosacījumus sauc par homogēniem robežnosacījumiem. Homogēnus otrā veida robežnosacījumus ( $H_\tau = \sigma = 0$ ), jeb  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$  uzdod uz kādas no aprēķina apgabala ārējām robežām, ja šī robeža ir magnētiskās simetrijas ass. Ja uz kādas no aprēķina apgabala ārējām robežām tiešā veidā nav uzdoti nekādi robežnosacījumi, ar noklusējumu tiek pieņemts, ka uz šīm robežām ir homogēni otrā veida robežnosacījumi, t. i.,  $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ .

## 7.5. Pastāvīgie magnēti

Pastāvīgo magnētu kā lauka avotu var raksturot ar koercitīvo spēku, ko uzdod ar ekvivalentām virsmas strāvām (lineāriem strāvas blīvumiem) magnēta abās pusēs. Lineārais strāvas blīvums ir vienāds ar magnētiskā lauka intensitātes tangenciālās komponentes lēcieni uz magnēta ārējām robežām, t. i., ar pastāvīgā magnēta koercitīvo spēku  $H_c$ . Tā, piemēram, taisnstūra formas pastāvīgo magnētu, kura koercitīvā spēka

vektors  $\overline{H}_c$  ir vērsts  $x$  ass virzienā, var aizstāt ar pretēja virziena virsmas strāvām, kas vienmērīgi sadalītas pa magnēta augšējo un apakšējo virsmu, turklāt ekvivalentās strāvas lineārais blīvums uz augšējās virsmas ir  $+H_c$ , bet uz apakšējās virsmas  $-H_c$ . Tādējādi, pastāvīgo magnētu kā lauka avotu var modelēt, uzdodot vai nu tā koercitīvo spēku, vai nehomogēnus otrā veida robežnosacījumus uz tā robežām, t. i.,

$$H_r^+ - H_r^- = \sigma. \quad (7-8)$$

Īpašs gadījums ir tad, ja nepieciešamas ievērot pastāvīgā magnēta nelineāro raksturlīkni. Tad pastāvīgā magnēta magnētisko caurlaidību tuvināti var noteikt pēc formulas

$$\mu = \frac{B}{H + H_c}, \quad (7-9)$$

kur  $B$  un  $H$  vērtības atbilst nemagnetizēta materiāla galvenajai magnetizēšanas līknei.

## 7.6. Magnetostatiskā lauka raksturlielumi

Magnetostatiskā lauka aprēķina uzdevumos lauku apraksta ar vektoriālo magnētisko potenciālu  $A$  (plakanparalēlam laukam) vai plūsmas funkciju  $rA$  (aksiālsimetriskam laukam), turklāt vispārīgā gadījumā vektoriālais potenciāls  $\vec{A}$  ir definēts ar sakarību

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}, \quad (7-10)$$

kur  $\vec{B}$  – magnētiskās indukcijas vektors.

Saskaņā ar (7-10) magnētiskā indukcijas vektora komponentes plakanparalēla lauka gadījumā

$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}, \quad (7-11)$$

$$B_y = -\frac{\partial A}{\partial x} \quad (7-12)$$

un aksiālsimetriaska lauka gadījumā

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA)}{\partial y}, \quad (7-13)$$

$$B_r = -\frac{\partial A}{\partial z}. \quad (7-14)$$

Magnētiskā lauka intensitātes vektors

$$\vec{H} = \mu^{-1} \vec{B}. \quad (7-15)$$

Rezultējošais magnetostatiskais spēks, kas darbojas uz ķermeni dotajā tilpuma elementā :

$$\bar{F} = \frac{1}{2} \int_S (\bar{H} \cdot (\bar{n} \cdot \bar{B}) + \bar{B} \cdot (\bar{n} \cdot \bar{H}) - \bar{n} \cdot (\bar{H} \cdot \bar{B})) dS, \quad (7-16)$$

kur integrēšana notiek pa virsmu  $S$ , kas aptver doto tilpuma elementu;  $\bar{n}$  – virsmas  $S$  ārējā normāle dotajā virsmas punktā.

Rezultējošais magnetostatisko spēku moments, kas darbojas uz ķermeni dotajā tilpuma elementā:

$$M = \frac{1}{2} \int_S ((\bar{r} \times \bar{H}) \cdot (\bar{n} \cdot \bar{B}) + (\bar{r} \times \bar{B}) \cdot (\bar{n} \cdot \bar{H}) - (\bar{r} \times \bar{n}) \cdot (\bar{H} \cdot \bar{B})) dS, \quad (7-17)$$

kur  $\bar{r}$  – integrēšanas punkta rādiusvektors.

Plakanparalēla lauka gadījumā momenta vektora virziens sakrīt ar  $z$  ass virzienu, bet aksiālsimetriska lauka gadījumā momenta vērtība ir vienāda ar nulli. Moments pēc formulas (7-17) tiek noteikts attiecībā pret koordinātu sākumu, bet momentu attiecībā pret jebkuru punktu var aprēķināt, ja šai vērtībai pieskaita vektoriālo reizinājumu  $F \times \bar{r}_0$ , kur  $\bar{F}$  – rezultējošais spēks;  $\bar{r}_0$  – spēka darbības taisnes jebkura punkta rādiusvektors attiecībā pret rotācijas centru vai rotācijas asi.

Magnētiskā lauka enerģija lineāra uzdevuma gadījumā

$$W = \frac{1}{2} \int_V (\bar{H} \cdot \bar{B}) dV \quad (7-18)$$

un nelineāra uzdevuma gadījumā

$$W = \int_V \left( \int_0^B H(B) dB \right) dV. \quad (7-19)$$

Plūsmas saķēdējums ar vienu vijumu plakanparalēla lauka gadījumā

$$\Psi = \frac{\int_S A dS}{S} \quad (7-20)$$

un aksiālsimetriska lauka gadījumā

$$\Psi = \frac{2\pi \int_S r A dS}{S}. \quad (7-21)$$

Formulās (7-20) un (7-21) integrēšanu veic pa laukumu, ko aizņem spoles mala.

Plakanparalēla lauka gadījumā visi integrāļi tiek aprēķināti uz garuma vienību aksiālā ( $z$  ass) virzienā. Integrēšanas apgabalu aprēķina modeļa plaknē uzdod ar kontūru (noslēgtu vai nenaslēgtu), ko veido taisnes nogriežņi un/vai riņķa līnijas loki.

Spoles inductivitāte

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (7-22)$$

kur  $\Psi$  – plūsmas saķēdējums ar spoli (sk. izteiksmes (7-20) un (7-21)), ko rada šajā spolē plūstošā strāva  $I$ .

Divu inductīvi saistītu spoļu mijinductivitāte

$$M_{12} = \frac{\Psi_2}{I_1}, \quad (7-23)$$

kur  $\Psi_2$  – plūsmas saķēdējums ar spoli 2, ko rada spoles 1 strāva  $I_1$ .

Plakanparalēla lauka gadījumā inductivitāte un mijinductivitāte tiek aprēķināta uz garuma vienību aksiālā ( $z$  ass) virzienā.



## Literatūra

1. A. Zviedris. Elektrisko mašīnu elektromagnētiskie aprēķini. R.:RTU, 2001.
2. QuickField. Finite Element Analysis System. Version 5.1. User's Guide. Denmark: Tera Analysis, 2003.
3. ELCUT. Моделирование двухмерных полей методом конечных элементов. Версия 5.1. Руководство пользователя. Санкт-Петербург, TOP, 2003.
4. A.Zviedris. Divdimensionālu fizikālo lauku matemātiskā modelēšana ar galīgo elementu metodi. Internet [www.eef.rtu.lv](http://www.eef.rtu.lv)\Mācību materiāli.

## Saturs

<b>Ievads</b> .....	3
I.1. Vispārīgas ziņas par <i>QuickField</i> .....	3
I. 2. Rokasgrāmatas struktūra .....	3
<b>1. <i>QuickField</i> struktūra un risināmo uzdevumu īss apraksts</b> .....	4
1.1. <i>QuickField</i> vadības pamatelementi .....	4
1.2. Darbības ar logiem .....	5
1.3. Risināmie magnetostatiskā lauka uzdevumi .....	6
<b>2. Uzdevuma apraksts</b> .....	7
2.1. Uzdevuma datu bāzes struktūra .....	7
2.2. Uzdevuma vadība .....	7
2.2.1. Uzdevuma parametru ievade .....	9
2.2.3. Garuma mērvienību izvēle .....	9
2.2.4. Taisnleņķa un polārās koordinātas .....	9
<b>3. Uzdevuma topoloģiskā modeļa konstruēšana un aprakstīšana</b> .....	10
3.1. Pamatjēdzieni un terminoloģija .....	10
3.2. Galīgo elementu režģa ģenerēšana .....	11
3.2.1. Vispārīgi norādījumi .....	11
3.2.2. Jaunas šķautnes veidošana .....	11
3.2.3. Jaunas virsotnes veidošana .....	12
3.2.4. Elementu aizzīmēšana .....	12
3.2.5. Elementu kopēšana un pārvietošana .....	14
3.2.6. Elementu aizvākšana .....	14
3.2.7. Piesaites attāluma izšķirtspējas parametrs .....	14
3.3. Identifikatoru piešķiršana topoloģiskā modeļa elementiem .....	15
3.4. Aprēķina apgabala diskretizācija .....	15
3.5. Atsaukuma un atsaukuma atcelšanas komandas .....	17
3.6. Topoloģiskā modeļa ekrānattēla parametru iestatīšana .....	17
3.6.1. Vispārīgi norādījumi .....	17
3.6.2. Attēla mērogošana .....	18
3.6.3. Vizualizācijas atribūtu maiņa .....	18
3.6.4. Koordinātu tīkls .....	18
3.7. Attēla izdrukāšana .....	19
3.8. Attēla kopēšana .....	19
<b>4. Fizikālo parametru vērtību ievade</b> .....	19
4.1. Vispārīgi norādījumi .....	19
4.2. Vides īpašību un robežnosacījumu ievade .....	20
4.3. Jauna identifikatora definēšana .....	21
4.4. Identifikatora parametru ievade .....	21
4.4.1. Pamatdarbības .....	21
4.4.5. Periodiskuma un simetrijas robežnosacījumi .....	24
4.4.6. Funkciju grafiku rediģēšana .....	25
4.4.7. Formulas fizikālo parametru ievadīšanai .....	26

4.4.7.1. Vispārīgi norādījumi. . . . .	26
4.4.7.2. Formulu lietošana fizikālo parametru skaitlisko vērtību uzdošanai . . . . .	26
4.4.7.3. Formulu sintakse. . . . .	27
4.4.7.4. Standartfunkcijas. . . . .	28
4.4.7.5. Formulu piemēri . . . . .	29
4.5. Identifikatoru kopēšana, pārdēvēšana un aizvākšana . . . . .	30
<b>5. Uzdevuma risināšana . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>6. Rezultātu apstrāde un analīze . . . . .</b>	<b>30</b>
6.1. Vispārīgi norādījumi. . . . .	30
6.2. Lauka ainas vizualizācija un ekrānattēla formēšana. . . . .	31
6.2.1. Attēlojamie lielumi. . . . .	31
6.2.2. Lauka ainas vizualizācijas veidi . . . . .	31
6.2.3. Lauka vizualizācijas parametru iestatīšana. . . . .	33
6.2.4. Lauka ainas attēla mērogošana. . . . .	33
6.3. Kalkulatora logs . . . . .	34
6.4. Lauka raksturlielumi lokālos apgabalos . . . . .	35
6.5. Raksturlielumu aprēķināšanas pēcprocesori. . . . .	36
6.5.1. Vispārīgi norādījumi. . . . .	36
6.5.2. Induktivitātes aprēķināšanas pēcprocesors (Inductance Wizard). . . . .	36
6.6. Integrēšanas kontūru rediģēšana. . . . .	41
6.7. Grafiku konstruēšana . . . . .	43
6.8. Integrāļu aprēķināšana . . . . .	45
6.9. Rezultātu izvade tabulās . . . . .	48
6.9.1. Vispārīgi norādījumi. . . . .	48
6.9.2. Tabulu kolonnas . . . . .	49
6.9.3. Tabulu rindiņas . . . . .	49
6.11. Lauka ainas ekrānattēla un grafiku ekrānattēla atribūtu maiņa. . . . .	50
6.12. Aprēķina rezultātu izdrukāšana. . . . .	50
6.13. Aprēķina rezultātu kopēšana. . . . .	50
<b>7. Magnetostatiskā lauka teorijas pamatelementi <i>QuickField</i> programatūrā . . . . .</b>	<b>50</b>
7.1. Vispārīgi norādījumi. . . . .	50
7.2. Magnetostatiskā lauka pamatvienādojumi . . . . .	51
7.3. Lauka avoti . . . . .	52
7.4. Robežnosacījumi . . . . .	52
7.5. Pastāvīgie magnēti. . . . .	53
<b>Literatūra. . . . .</b>	<b>56</b>
<b>Saturs . . . . .</b>	<b>56</b>