

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша

М.П. Галанин, С.С. Уразов

**Численное моделирование качественных особенностей
распределений трехмерных полей
в неоднородных подобластях
электродинамического ускорителя**

Москва – 2004

Аннотация.

Методами вычислительного эксперимента исследованы качественные особенности распределений нестационарных трехмерных физических полей в канале электродинамического ускорителя типа рельсотрон. Рассмотрен вариант ускорителя, обладающий цилиндрической геометрией. Изучены особенности полей для трех вариантов геометрии ускоряемого якоря, включая случай неодносвязной проводящей части. Получена картина силового и температурного воздействия на различные участки ускоряемых макротел, обладающих физическими неоднородностями. Определены участки, подвергаемые наибольшему силовому воздействию, в которых возможно разрушение якоря. Проведено изучение влияния замыкания направляющих в передней части на распределение полей.

M.P. Galanin, S.S. Urazov

The numerical simulation for qualitative particularities of distributions of the three - dimensional fields in nonhomogeneous subregions of electromagnetic launcher.

Abstract

The qualitative particularities of distributions of the nonstationary three - dimensional physical fields in the channel of electromagnetic launcher of railgun type have been explored by means of numerical experiment method. It was considered the variant of launcher, having cylindrical geometry. The particularities of fields for three variants of geometry of accelerated armature, including the case of non - one – connected conducting part, have been studied. The picture of power and heat influence on the different areas of accelerated armatures, having the physical nonhomogeneities, has been received. The areas, subjected to the most power influence, in which the armature destruction is possible, have been determined. The study of influence of the short circuit at the rails front part on the field distributions have been conducted.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Введение и постановка задачи</i>	3
<i>§ 1. Математическая модель</i>	6
<i>§ 2. Результаты расчетов для первого варианта конфигурации.</i>	8
<i>§ 3. Результаты расчетов для второго варианта конфигурации.</i>	14
<i>§ 4. Результаты расчетов для третьего варианта конфигурации.</i>	17
<i>§ 5. Результаты расчетов для различных токов замыкания.</i>	20
<i>Заключение</i>	28
<i>Литература</i>	29

Введение и постановка задачи.

Целью работы является изучение качественных особенностей распределений пространственно трехмерных электромагнитных и силовых полей в ускорителе типа рельсотрон [1, 2] с проводящим якорем. Для этого выполнено математическое моделирование процесса электромагнитного разгона для трех вариантов геометрической конфигурации якоря.

Простейшая схема рельсотрона приведена на рис. 0.1.a (из [3]). Он состоит из внешней электрической цепи (не показана) и рельсов (в нашем случае двух), замыкаемых проводящим якорем. Рельсы также могут быть замкнутыми в передней части некоторым проводником, обладающим достаточно большим сопротивлением (по сравнению с сопротивлением якоря), образуя “muzzle - shunt” канал [3] (см. рис. 0.1.b).

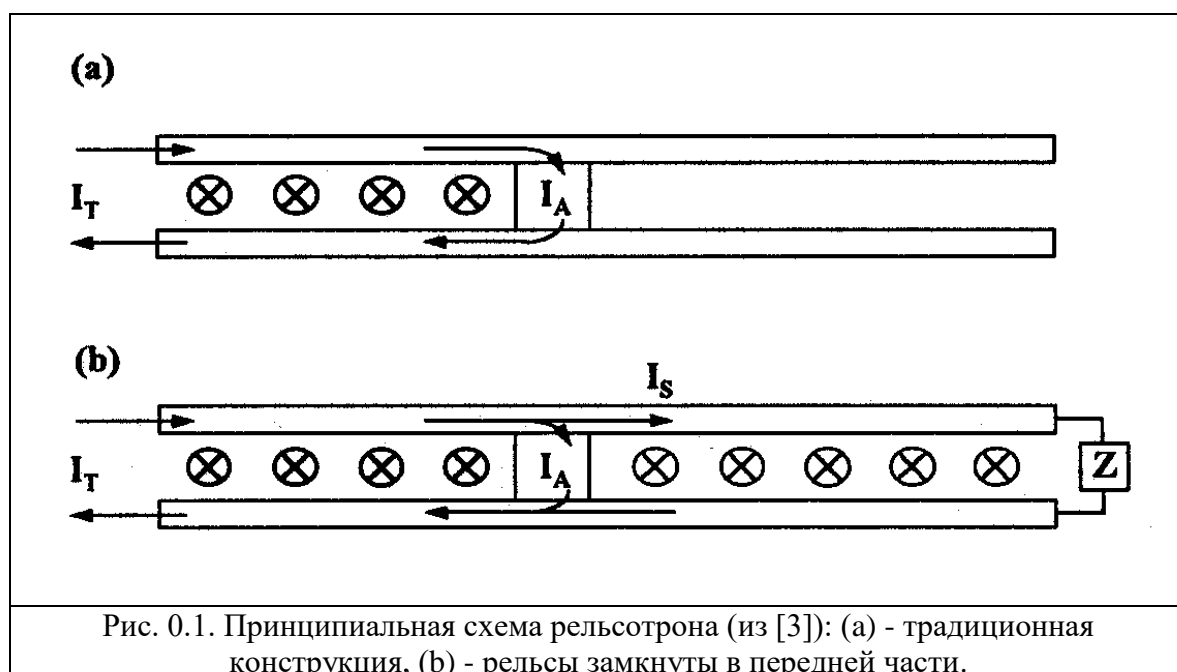
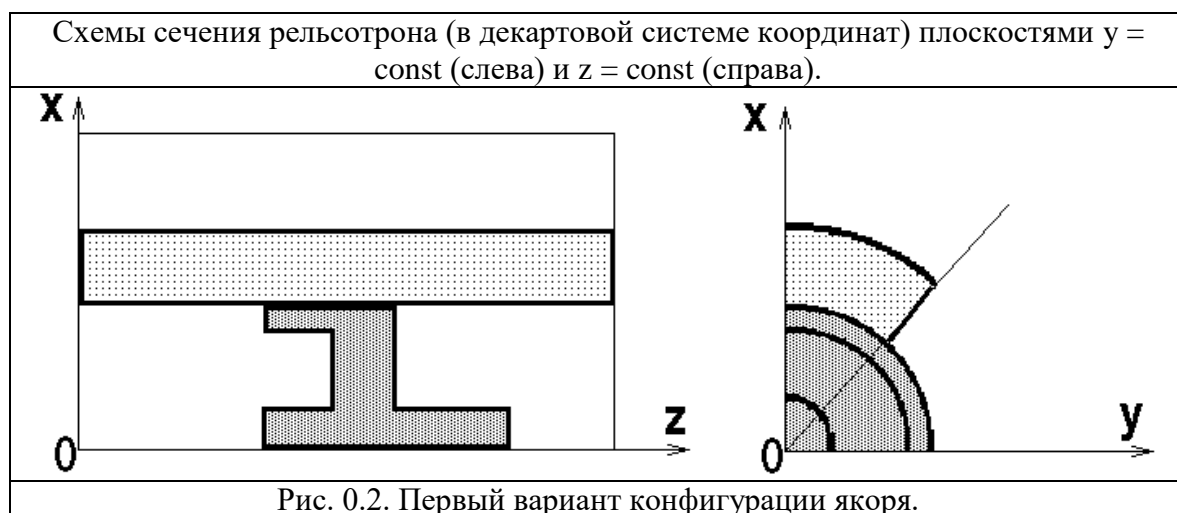


Рис. 0.1. Принципиальная схема рельсотрона (из [3]): (a) - традиционная конструкция, (b) - рельсы замкнуты в передней части.

В работах [4 - 17] приведены некоторые варианты якоря для ускорителя цилиндрической геометрии. В [6] рассмотрен якорь, состоящий из проводящей части и нагрузки, расположенной в передней части якоря. Варианты размещения нагрузки приведены также в [9 - 11]. В [7, 8] рассмотрен якорь, состоящий из проводящей части, соединенной с диэлектрической частью из поликарбоната.

В данной работе рассмотрены следующие варианты конфигурации якорей: 1. якорь (конструкция аналогична [7]), состоящий из алюминиевой части, соединенной с диэлектрической (рис. 0.2) при помощи винта (винт – цилиндр наименьшего радиуса в центре); 2. 3. якорь, состоящий из двух проводящих частей (алюминиевой и стальной нагрузки). В одном случае алюминиевая часть касается стальной (рис. 0.4), в другом они отделены друг от друга диэлектриком (рис. 0.3). Варианты 2, 3 являются упрощением конструкции [6], в котором учтены некоторые элементы якорей [9 - 11, 15]). Во всех случаях материал направляющих - медь.

Основной целью расчетов является вычисление трехмерных (в силу существенной трехмерности конструкций) по пространству и нестационарных по времени электромагнитных полей в канале ускорителей, включая их распределение в направляющих, якоря и окружающем пространстве, а также расчет распределений силы Лоренца, действующей на различные элементы конструкции, и температуры. Для первого варианта якоря (рис. 0.2) наибольший интерес представляет определение плотности силы Лоренца в различных частях якоря, что позволяет определить участки, в которых возможно разрушение якоря при ускорении. Для второго и третьего вариантов якоря (рис. 0.3 - 0.4) главным предметом исследования является изучение влияния короткого замыкания на процесс ускорения. Распределение температурных и силовых полей в ускорителе также представляет интерес.



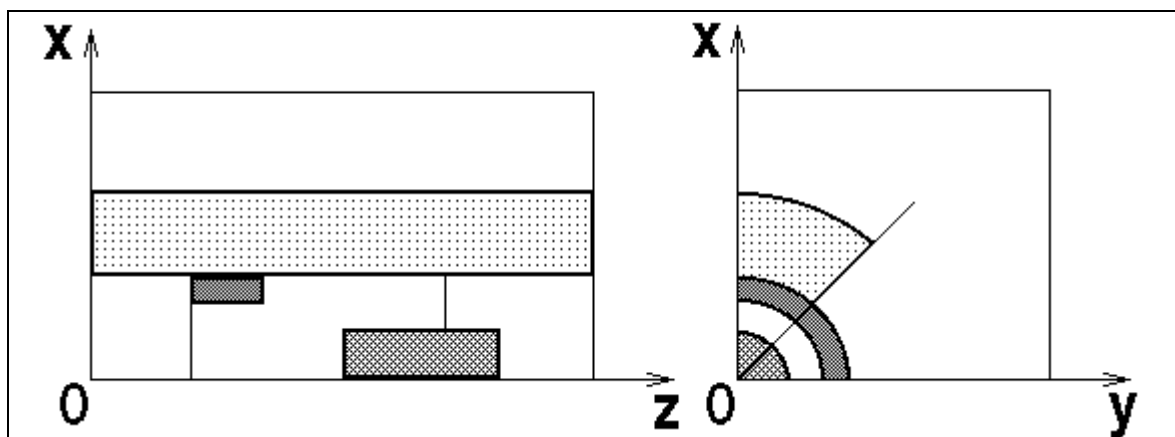


Рис. 0.3. Второй вариант конфигурации якоря.

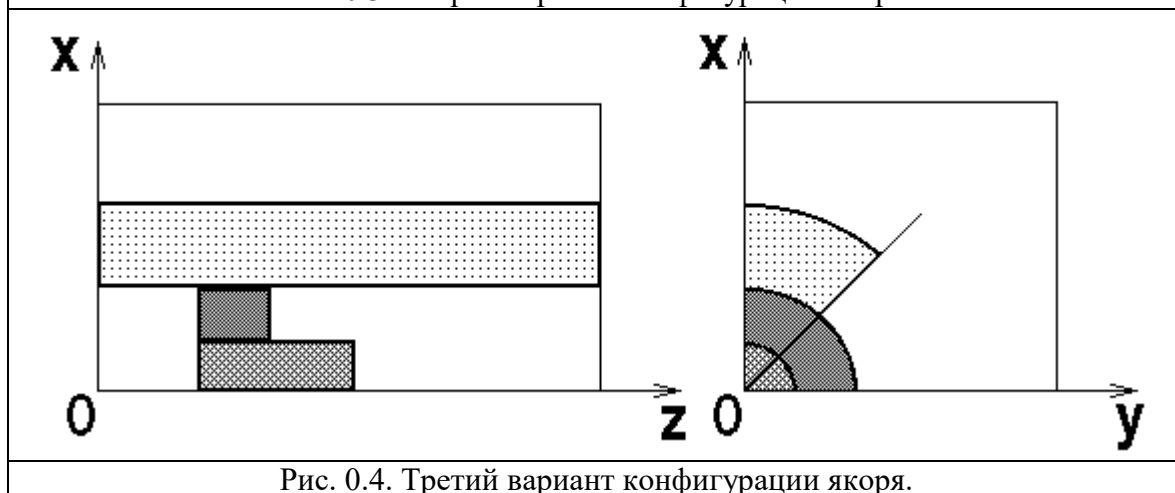


Рис. 0.4. Третий вариант конфигурации якоря.

Во всех случаях канал имеет цилиндрическое поперечное сечение. Цилиндрическую геометрию имеют и другие части – якоря и рельсы. Для наглядности расчетные области на рис. 0.2 - 0.4 изображены в декартовой системе координат. Ось Oz в ней совпадает с осью Oz цилиндрической системы координат, плоскость $y = 0$ - с плоскостью $\varphi = 0$. Разгон якорей происходит в положительном направлении оси Oz .

Для описания электродинамики ускорения и тепловых процессов используется замкнутая трехмерная нелинейная модель, объединяющая расчет распределения тока в якоря и локального тепловыделения с непосредственным расчетом ускоряющей силы [18, 19]. Постановка задачи в целом определяется необходимостью исследования ускорителей типа рельсотрон со сложной топологией якоря и канала. При этом построенные модели должны быть однородны по различным подобластям с резко различающейся электропроводностью: типа проводник или диэлектрик.

Для расчета электромагнитных полей в ускорителе используется заданная зависимость полного протекающего через ускоритель тока от времени (в случае замкнутых в передней части рельсов ток, протекающий через замыкающий проводник, также считается заданным). В расчете учитываются фазовые переходы и зависимость электро и теплофизических параметров от температуры.

Т.к. основной целью расчетов является изучение качественных особенностей распределений трехмерных полей, результаты приведены в безразмерном виде.

Авторы благодарят В.Л. Боброва за полезные обсуждения ряда вопросов, затронутых в работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 03 - 01 - 00461).

§ 1. Математическая модель.

Электромагнитные поля будем описывать квазистационарным (или МГД) приближением [18, 19] системы уравнений Максвелла. Для описания используем цилиндрические координаты r, φ, z .

При моделировании целесообразно ограничить рассматриваемую область некоторым соосным цилиндром и вести описание полей в пространственной области, жестко связанной со скользящим якорем. Длина этой области (вдоль Oz) составляет несколько калибров ускорителя в обе стороны от якоря. При таком подходе возникает проблема задания граничных условий на передней и задней границах исследуемой области. На боковых границах области этой проблемы нет, т.к. канал рельсотрона обычно заключен в проводящий силовой бандаж.

В силу пространственной симметрии задачу достаточно решать на угловом участке в $\pi/2$, т.е. в области $G = (r, \varphi, z) = (0, R) * (0, \pi/2) * (0, l_z)$ при $t > 0$. Здесь R - размер цилиндра, ограничивающего расчетную область по радиусу, l_z - длина расчетной области по координате z .

Ограничение пространственной области вдоль Oz вызвано резким различием длины реального ускорителя (по z) и его поперечных размеров. Единственной заданной извне электромагнитной величиной можно считать токи источника питания и замыкания. Поэтому естественно использовать модель, в которой на торцах расчетной области заданы тангенциальные компоненты магнитного поля, соответствующие бесконечно длинной (вдоль Oz) системе проводников, для каждого из которых задан полный ток. Это поле является решением соответствующей пространственно двумерной задачи. Решение трехмерной задачи получается путем использования алгоритма [18, 19] по заданным тангенциальным компонентам граничного магнитного поля.

Ниже используются обозначения, традиционные для работ по моделированию электромагнитных явлений, в т.ч. [18, 19].

Для определения тангенциальных компонент на торцах укороченной области требуется решить систему интегро - дифференциальных уравнений [19]. При решении трехмерной задачи в варианте без короткого замыкания (в передней части) на торце $z = 0$ задано тангенциальное магнитное поле H_τ , полученное решением соответствующей двумерной задачи, а на противоположном торце поле H_τ нулевое. Для варианта с коротким замыканием будем считать, что на обоих торцах расчетной области $z = 0$ и $z = l_z$ заданы тангенциальные компоненты магнитного поля H_τ , полученные решением двух вспомогательных задач. Таким образом, в случае незамкнутых рельсов решается одна задача для постановки граничных условий, а в случае замыкания на торцах необходимо решить две специальные задачи для интегро - дифференциальных уравнений. Подробности математической модели и вычислительного алгоритма представлены в работах [18, 19].

Модифицировав в развитие [20] программу формирования файла - описателя области, будем описывать геометрические объекты в цилиндрических координатах. В результате трехмерная область оказывается подразделена на параллелепипеды (цилиндры в декартовых

переменных) с гранями, параллельными координатным плоскостям. Параллелепипеды отличаются материалами, характеристиками сетки или условиями на своих границах. В каждом параллелепипеде определено количество ячеек разностной сетки. Такие характеристики, как плотность, электропроводность и другие параметры материала определяются однозначно номером, который сопоставлен данному параллелепипеду.

Полученные параметры пространственной области используются для дальнейшего расчета. По ним рассчитывается набор логических массивов [20], полностью определяющих область, ее границу и, тем самым, матрицу системы линейных алгебраических уравнений (т.е. разностную схему) для решаемой задачи. Для решения возникающей системы линейных алгебраических уравнений используется метод сопряженных градиентов совместно с неполным разложением Холецкого [21 - 23].

§ 2. Результаты расчетов для первого варианта конфигурации.

Для первого варианта якоря (рис. 0.2) расчетную область G разобьем на 5 подобластей по r (3 подобласти якоря, рельс и диэлектрик над рельсом), 2 подобласти по φ (рельс и диэлектрик за рельсом), 5 подобластей по z (диэлектрик за якорем, 3 подобласти якоря, диэлектрик перед якорем). Каждую подобласть разобьем на разностные ячейки, число которых определяется физическими соображениями. Число ячеек составило: по r – 28 ($6 + 8 + 6 + 4 + 4$), по φ - 12 ($6 + 6$), по z – 30 ($4 + 8 + 8 + 6 + 4$). В результате в пространственной области находится 35061 ребер сетки, 31776 граней, 10080 ячеек.

Расчет будет вестись для незамкнутых спереди рельсов.

На рис. 2.1 представлена зависимость максимальной температуры в расчетной области от времени. Эта зависимость отображает фазовые переходы, происходящие в области. Первый (нижний) горизонтальный участок графика (рис. 2.1) соответствует плавлению некоторых участков якоря. Второй (верхний) горизонтальный участок соответствует кипению части материала якоря.

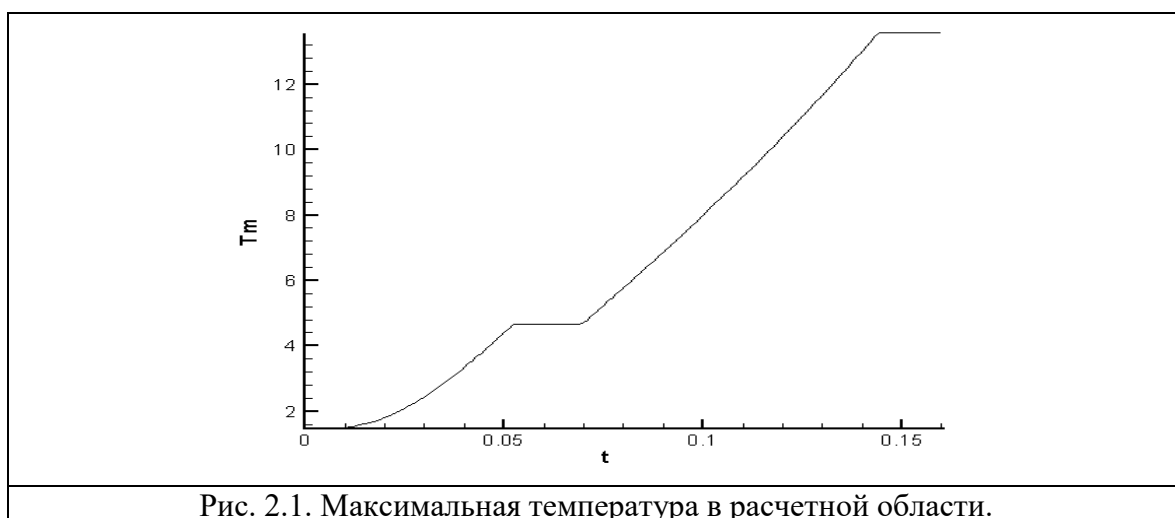


Рис. 2.1. Максимальная температура в расчетной области.

График изменения максимальной температуры, построенный по результатам расчетов для первого варианта якоря, является типичным и для других вариантов якоря.

Далее на рис. 2.2 – 2.5 представлены линии уровня распределений плотности тока в сечениях плоскостями $\varphi = \text{const}$. Рисунки приведены на момент времени $t = 0.131$. Для наглядности ограничимся отображением подобласти, занимаемой якорем.

На всех рисунках вертикально (снизу вверх) направлена ось Oz , горизонтально (слева направо) – ось Ox . Сечение области плоскостью $i\varphi = 2$ соответствует области, близкой центру рельса (по углу), сечение $i\varphi = 6$ соответствует краю рельса.

При численном моделировании для первого варианта якоря (рис. 0.2) проведены расчеты двух вариантов материалов. В первом случае проводящая часть якоря считалась однородной (соединительный элемент - цилиндр наименьшего радиуса на рис. 0.2 - считался алюминиевым). Во втором случае соединительный элемент считался стальным (неоднородная проводящая часть). Результаты расчетов электромагнитных, силовых и тепловых полей для обеих конфигураций практически совпадают. Поэтому далее приведены результаты расчетов только для неоднородного якоря.

Расчет проведен до момента $t = 0.132$. На подписях к рисункам показаны максимальные и минимальные значения величин в сечении. Данные характеристики позволяют численно сравнить компоненты.

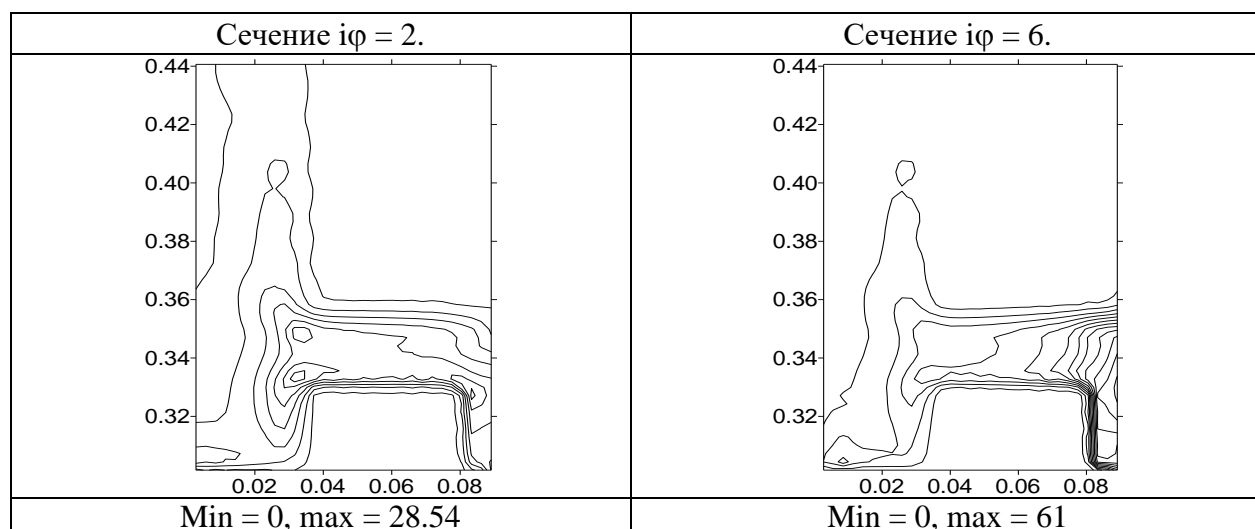


Рис. 2.2. Распределение $|j|$.

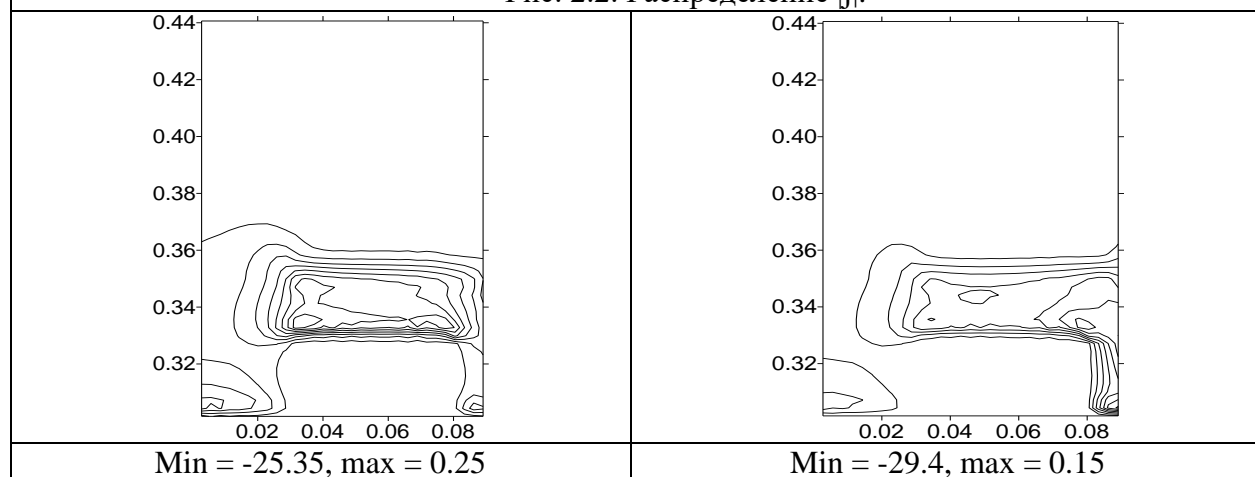


Рис. 2.3. Распределение j_r .

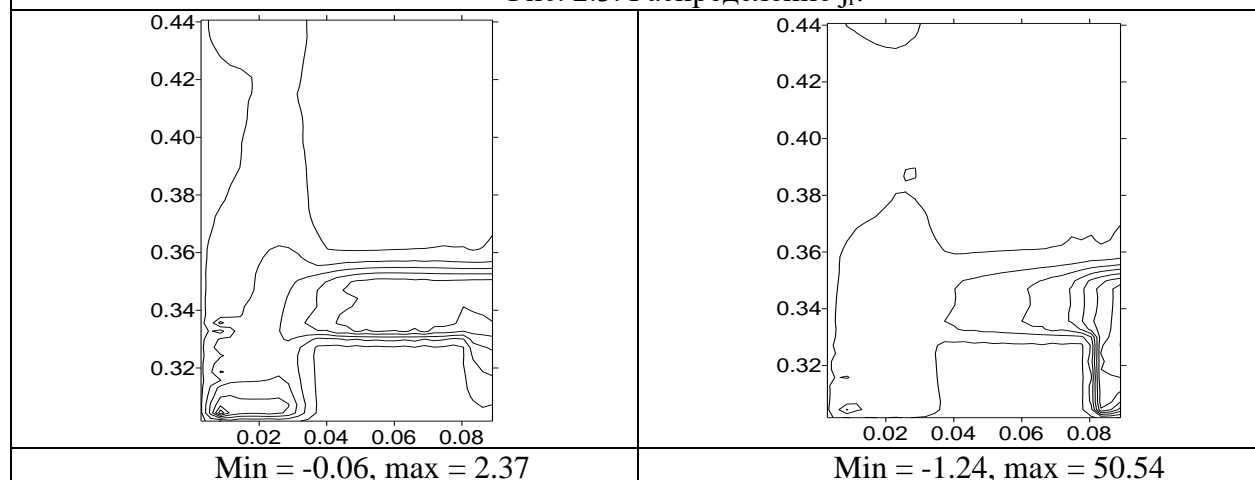


Рис. 2.4. Распределение j_φ .

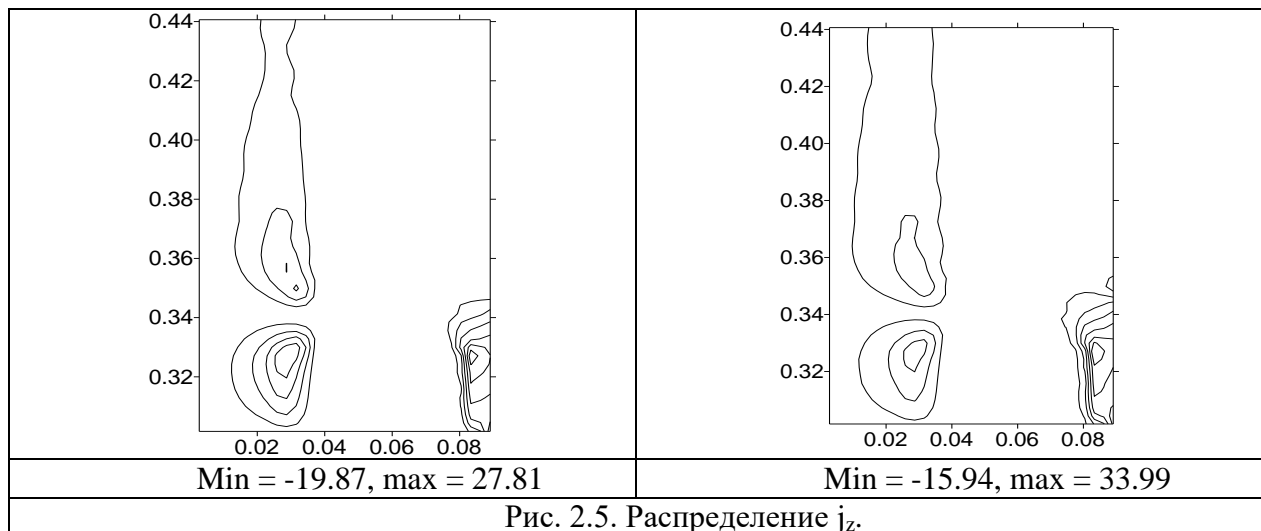


Рис. 2.2 показывает, что в сечениях, близких центру рельса (по углу), плотность тока достигает наибольшего по модулю значения в точке контакта задней (относительно оси Oz) поверхности алюминиевой части якоря со стальной. В сечениях, близких краю рельса (по углу), рассматриваемая величина достигает максимального по модулю значения в области контакта якоря с рельсом. Наибольший вклад в значение модуля плотности тока \mathbf{j} на внутренних (по радиусу) плоскостях алюминиевой части якоря дают r - и φ - компоненты плотности тока (рис. 2.3 - 2.4), а z - компонента дает заметный вклад только в экстремумы в стальной части и в области контакта якоря с рельсом (рис. 2.5).

Отметим, что наибольшего значения модуль вектора \mathbf{j} достигает на поверхности якоря с локальными максимумами в угловых точках. В сечениях по φ , близких краю рельса, все компоненты вектора \mathbf{j} достигают наибольшего значения в зоне контакта якоря с рельсом. Распределение компоненты j_z показывает разнонаправленное течение тока в передней и задней части элемента, соединяющего проводящую и диэлектрическую части якоря. Такое явление способствует возникновению сил, способных разрушить соединение.

Далее на рис. 2.6 – 2.10 приведены примеры распределений компонент вектора плотности силы Лоренца в области якоря в сечениях области плоскостями $\varphi = \text{const}$. На рис. 2.6 показаны линии уровня, а на рис. 2.7 – 2.10 – трехмерные картины.

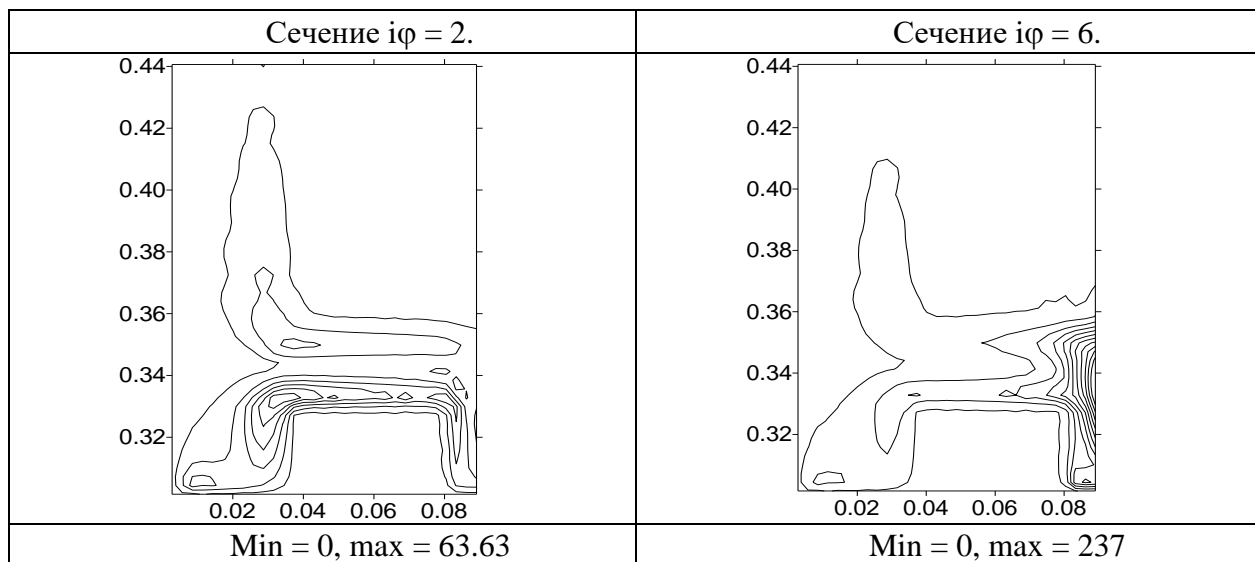


Рис. 2.6. Распределение $|f|$.

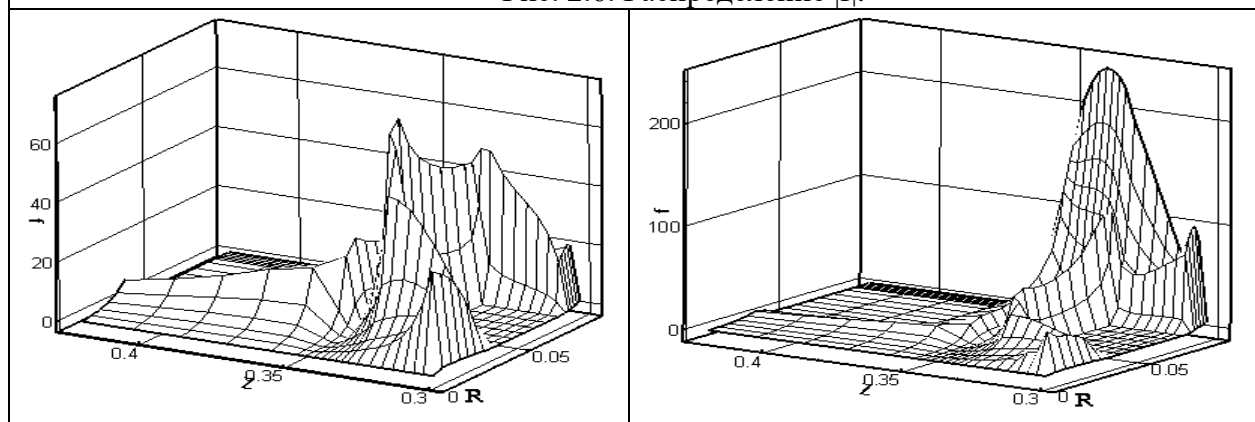


Рис. 2.7. Распределение $|f|$.

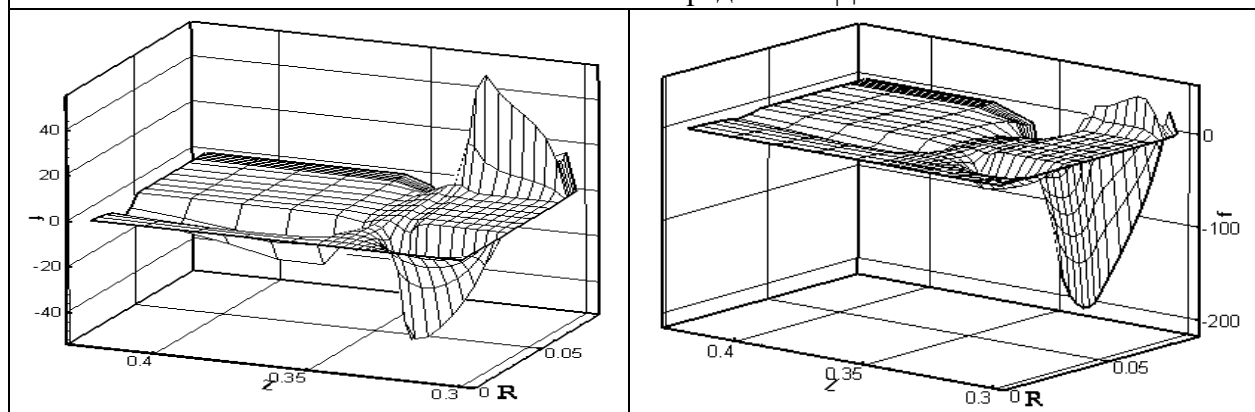


Рис. 2.8. Распределение f_r .

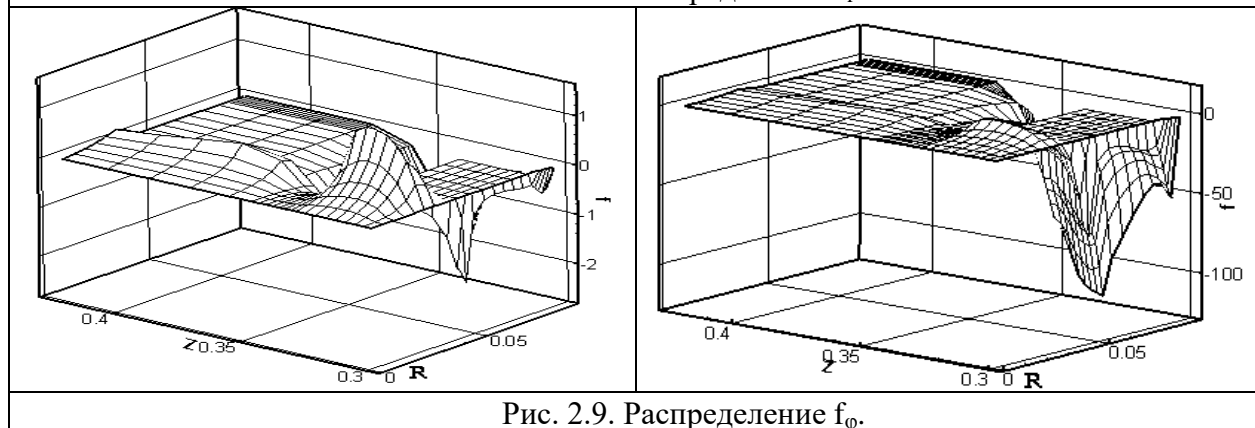


Рис. 2.9. Распределение f_φ .

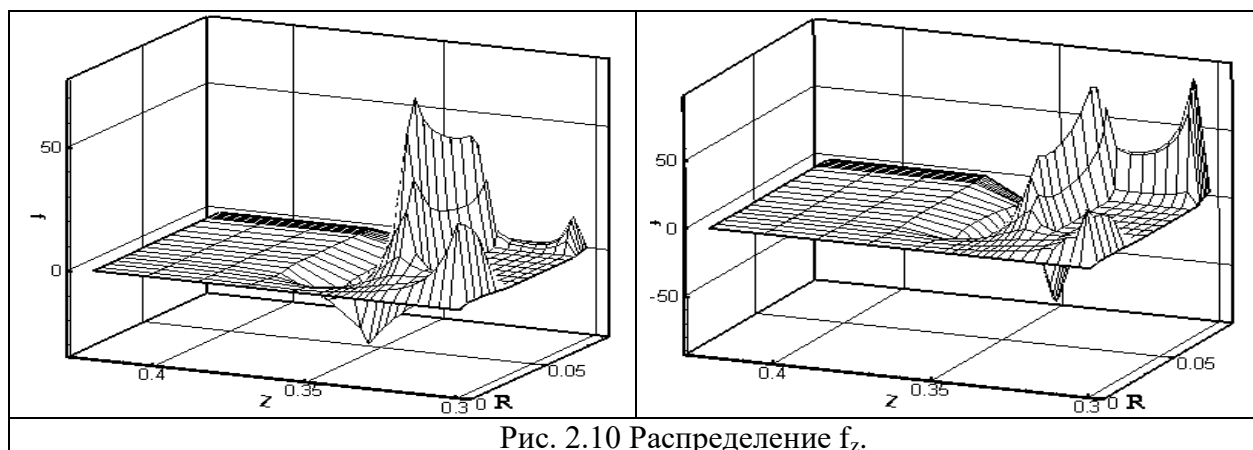
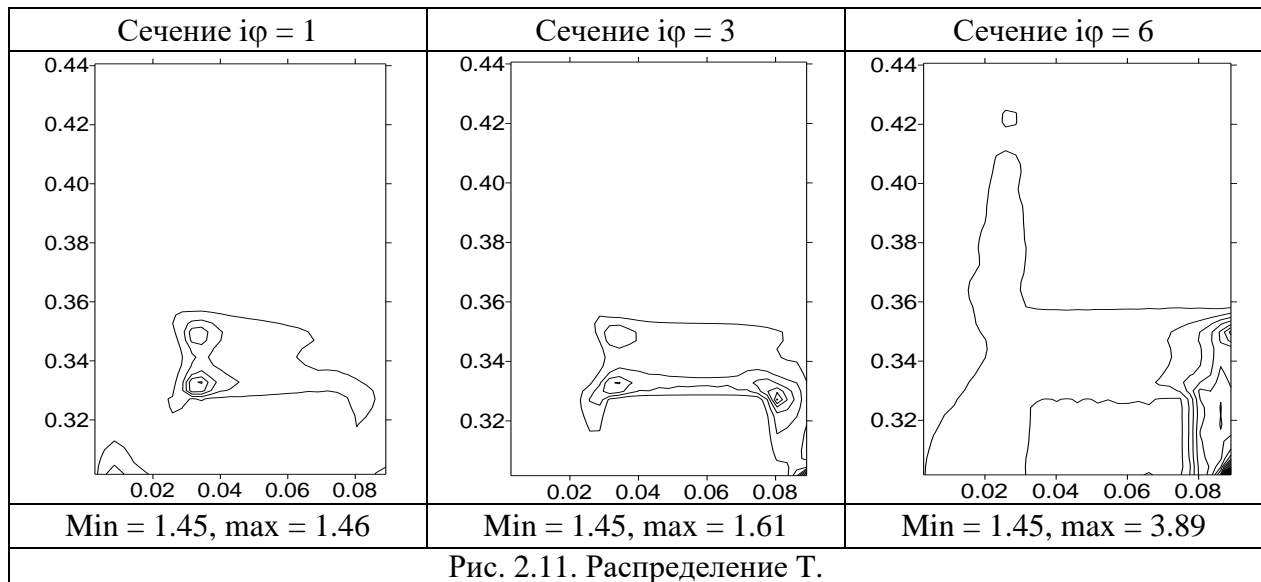


Рис. 2.10 Распределение f_z .

Рис. 2.6 - 2.7 демонстрируют, что в сечениях, близких по углу центру рельса, максимального по модулю значения вектор плотности силы Лоренца достигает на задней (по оси Oz) поверхности алюминиевой части якоря с максимумом в точке контакта со стальной частью. В сечениях, близких по углу краю рельса, наибольшее по модулю значение рассматриваемой величины достигается в области контакта якоря с рельсом. Максимальный вклад в значение модуля силы Лоренца на задних (относительно Oz) поверхностях алюминиевой и стальной частей якоря дает z - компонента (рис. 2.10). В экстремумы этой величины на боковой поверхности стальной части и в области контакта якоря с рельсом заметный вклад дают r и φ - компоненты (рис. 2.8 - 2.9). На рис. 2.10 также видно разнонаправленное действие z - компоненты силы на заднюю (относительно оси Oz) и переднюю плоскости алюминиевой части якоря.

Из представленных картин распределений физических величин видно, что в сечениях по φ , близких центральной части рельса, максимальное значение плотности силы достигается в центральной области якоря (на поверхности соединительного элемента), что и является основной возможной причиной разрушения якоря. Из графиков распределений компонент вектора силы Лоренца видна различная направленность силы в металлической части якоря и на поверхности соединительного элемента.

Ниже на рис. 2.11 приведены линии уровня температуры в сечениях области плоскостями $\varphi = \text{const}$.



В сечении рис. 2.11, близком центру рельса (по угловой координате), виден наибольший нагрев на внешней поверхности соединительного элемента и в угловой точке контакта соединительного элемента с алюминиевой частью якоря. В проводящей части якоря ближе к границе рельса (по углу) максимальная температура достигается в области контакта якоря и рельса.

Для неоднородной (по материалам) проводящей части якоря распределения температуры и компонент вектора силы практически не изменились по сравнению с однородной. Но очевидно, что приближение температуры элемента к температуре кипения приведет к существенным различиям результатов в силу заметной зависимости электропроводности от температуры.

§ 3. Результаты расчетов для второго варианта конфигурации.

Рассмотрим вариант якоря, состоящего из алюминиевой и стальной частей, соединенных диэлектриком (рис. 0.3). Две проводящие части якоря не контактируют друг с другом. Тем самым проводящая подобласть является неодносвязной. Для данного варианта имеет место замыкание рельсов в передней части некоторым проводником. Ниже проведено сравнение случаев наличия и отсутствия замыкания. Ток замыкания составляет около 3 процентов от полного тока, протекающего через якорь.

Для этого варианта область G разобьем (как и в предыдущем случае) на 5 подобластей по r (3 подобласти якоря, рельс и диэлектрик над рельсом), 2 подобласти по φ (рельс и диэлектрик за рельсом), 5 подобластей по z (диэлектрик за якорем, 3 подобласти якоря, диэлектрик перед якорем). Число ячеек сетки в области составило: по r – 24 (6 + 4 + 6 + 6 + 4), по φ - 16 (8 + 8), по z – 28 (6 + 8 + 4 + 6 + 6). В результате в пространственной области находится 36975 ребер сетки, 33760 граней, 10752 ячеек.

Расчет проводился до момента времени $t = 0.126$ в варианте нулевого тока замыкания (для случая с ненулевым током - до 0.132).

Зависимость изменения максимальной температуры от времени аналогична приведенной на рис. 2.1.

В сечениях области плоскостями $\varphi = \text{const}$ ниже приведены примеры распределений физических величин на момент окончания расчетов. На рисунках показана только часть расчетной области, занимаемая якорем. Сечение $i\varphi = 2$ соответствует области, близкой по углу центру рельса, сечение $i\varphi = 8$ соответствует краю рельса.

На картинах распределений температуры рис. 3.1 (незамкнутые рельсы, т.е. нулевой ток замыкания) видно, что в областях, близких по углу центру рельса, достигаются меньшие температуры, чем в областях, близких краю рельса. Это объясняется большей плотностью тока на внешней поверхности якоря. В плоскости контакта якоря с крайней угловой частью рельса происходит наибольший нагрев и, как видно на рис. 3.1 ($i\varphi = 8$), весь материал якоря в этом сечении нагрет до температуры плавления, что может привести к разрушению алюминиевого кольца.

Далее на рис. 3.2 – 3.4 приведены распределения плотности тока в рассматриваемых сечениях для случаев незамкнутых и замкнутых рельсов. Расчеты показали, что компоненты тока имеют отличие преимущественно в передней части якоря (см. рис. 3.4), причем j_z в случае замкнутых и незамкнутых рельсов на передней границе имеет противоположные знаки.

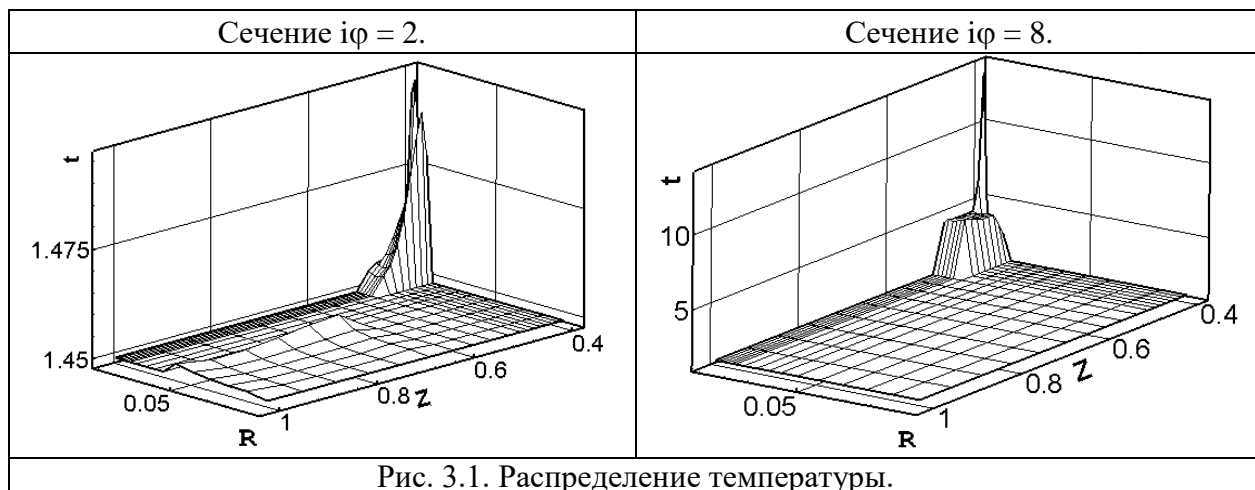


Рис. 3.1. Распределение температуры.

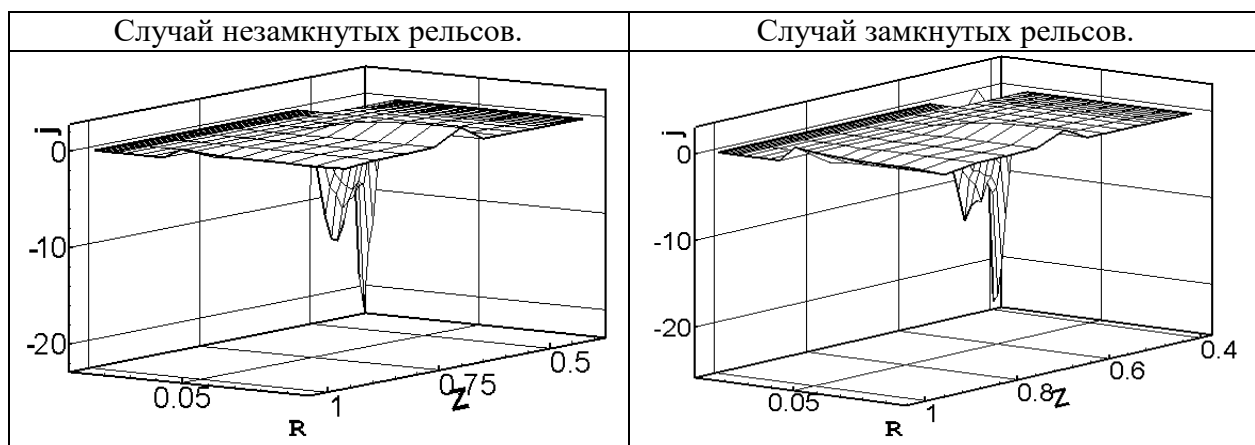


Рис. 3.2. Сечение $i\varphi = 8$. Распределение j_r .

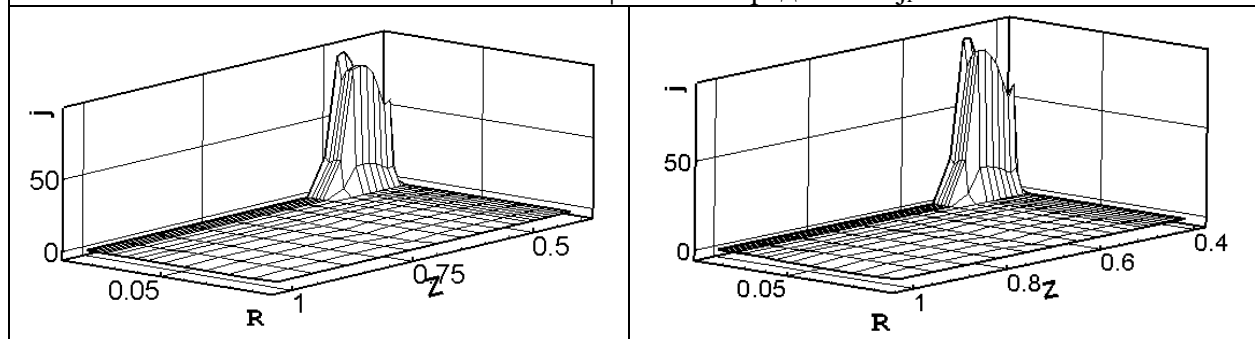


Рис. 3.3. Сечение $i\varphi = 8$. Распределение j_φ .

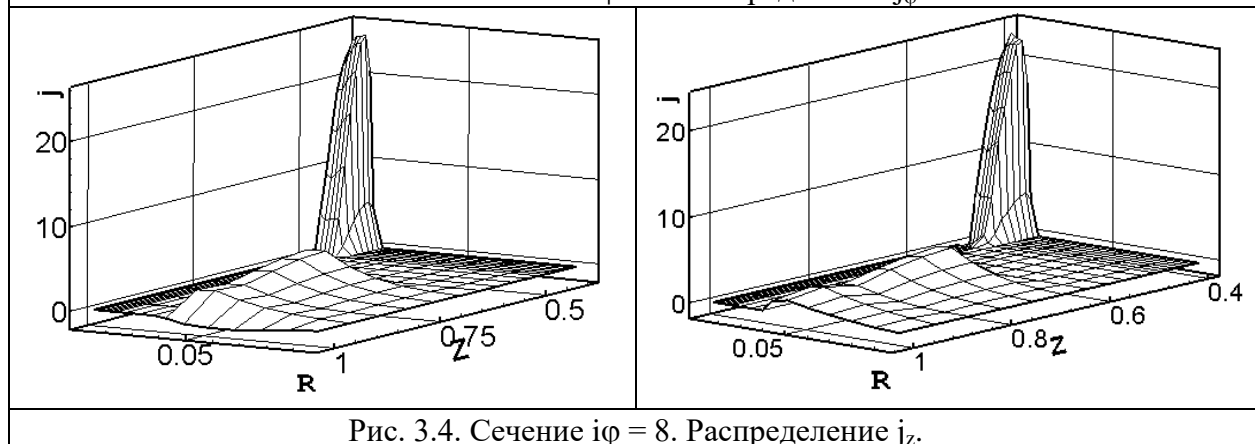


Рис. 3.4. Сечение $i\varphi = 8$. Распределение j_z .

Компоненты векторов плотности тока и силы, а также температуры в стальной части якоря имеют меньшие (по сравнению с алюминиевой частью) значения. На представленных картинах рис. 3.1 - 3.6 в сечении, близком центру рельса, видно небольшое повышение температуры и действие силы Лоренца в стальной части якоря, обусловленные компонентами индуцированного тока. На рис. 3.5 видно, что компоненты напряженности магнитного поля достигают экстремальных значений в задней части якоря. Значения экстремумов возрастают (по модулю) при приближении по радиусу к алюминиевому кольцу, а далее уменьшаются при приближении к рельсу.

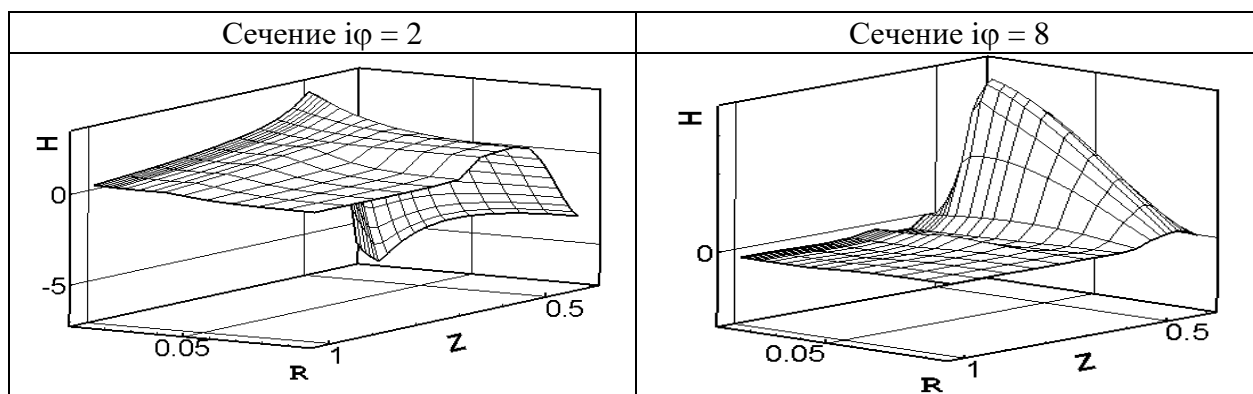


Рис. 3.5. Распределение H_φ (слева) и H_z (справа) (случай незамкнутых рельсов).

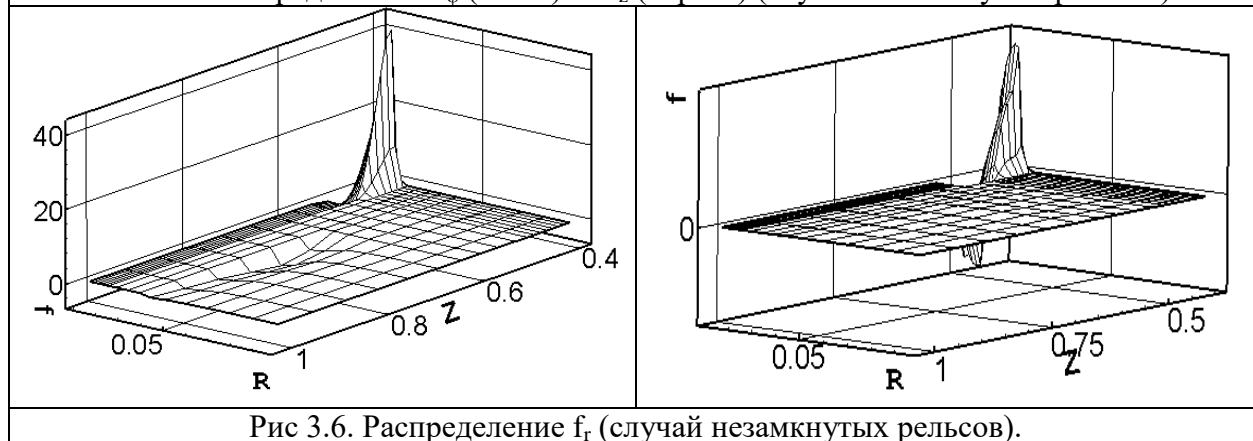


Рис. 3.6. Распределение f_r (случай незамкнутых рельсов).

§ 4. Результаты расчетов для третьего варианта конфигурации.

Рассмотрим другой вариант якоря, состоящего из алюминиевой подобласти и соединенной с ней стальной части (см. рис. 0.4). В отличие от предыдущего случая проводящая подобласть является односвязной. Область G разобьем на 4 подобласти по r (4 подобласти якоря, рельс и диэлектрик над рельсом), 2 подобласти по φ (рельс и диэлектрик за

рельсом), 4 подобласти по z (диэлектрик за якорем, 2 подобласти якоря, диэлектрик перед якорем).

Число ячеек сетки в области составило: по r – 26 (6 + 8 + 6 + 4), по φ – 16 (8 + 8), по z – 30 (6 + 8 + 8 + 6). В результате в пространственной области находится 35061 ребер сетки, 31776 граней, 10080 ячеек.

Расчет проводился до момента времени 0.132 (для случая с замкнутыми рельсами – до 0.143). В сечениях расчетной области плоскостями $\varphi = \text{const}$ приведем некоторые распределения физических величин на момент окончания счета.

Рис. 4.1 - 4.3 показывают, что r и φ компоненты вектора плотности тока \mathbf{j} достигают наибольших значений в задней (по оси Oz) части якоря (на задних поверхностях алюминиевой и стальной частей якоря), а z компонента имеет отличные от нуля значения в задней части алюминиевой составляющей якоря и только в передней части стальной. Расчеты показали, что компоненты плотности тока в данном случае не имеют значительных отличий при наличии или отсутствии замыкания.

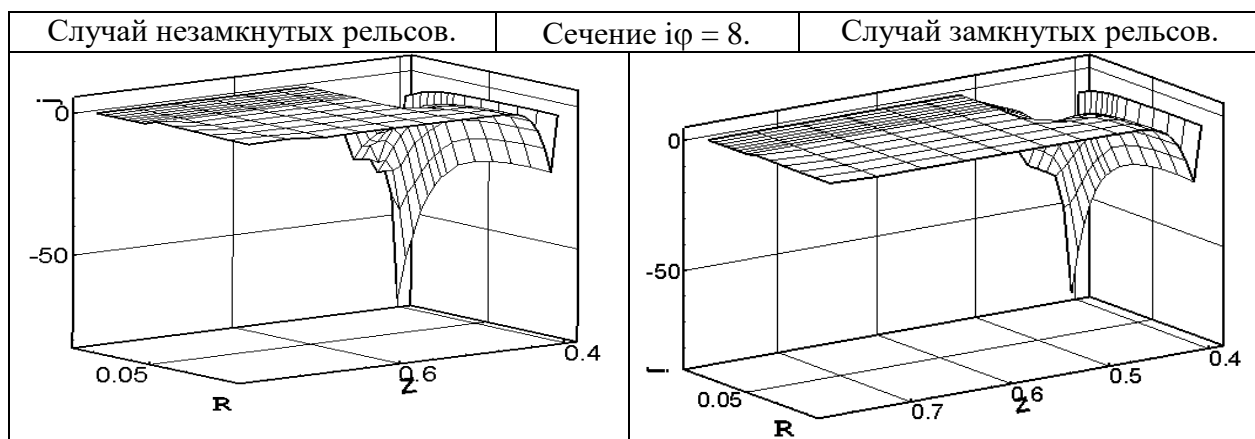


Рис. 4.1. Распределение j_r .

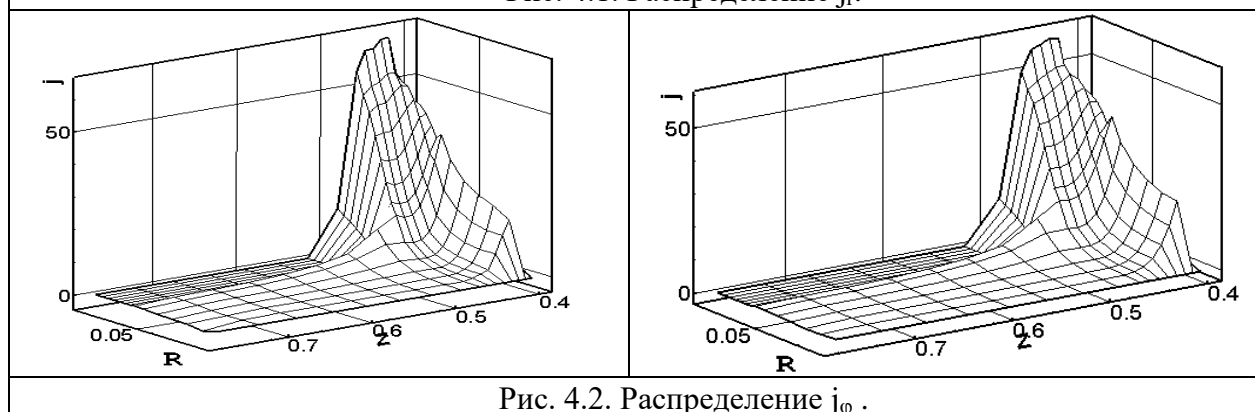


Рис. 4.2. Распределение j_φ .

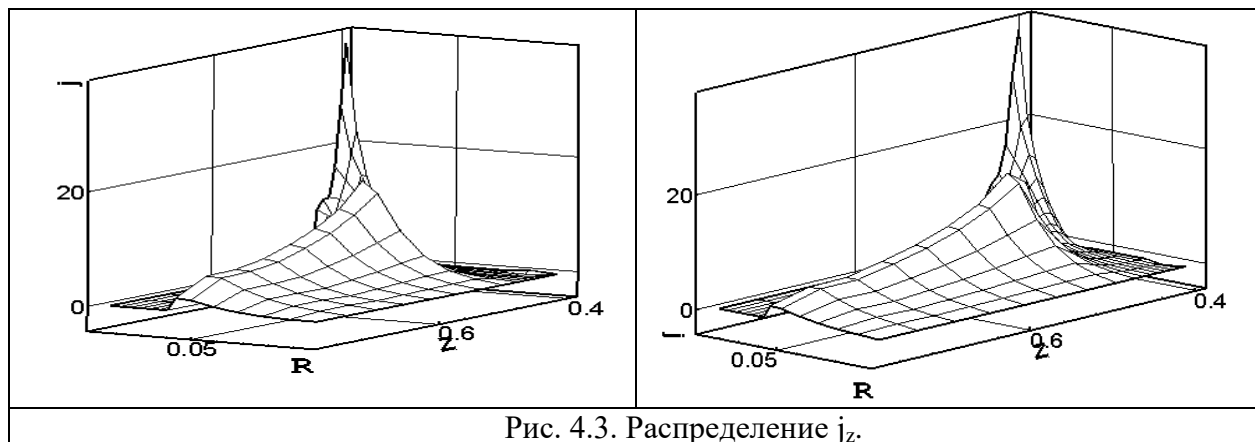


Рис. 4.3. Распределение j_z .

На рис 4.4 видно, что компонента H_z достигает наибольшего по модулю значения в центральной (по z) части области контакта якоря с рельсом, а компонента H_φ - в задней части якоря (аналогично рис. 3.5). Также видно, что H_φ возрастает в диэлектрической подобласти якоря при приближении к алюминиевой части. На рис 4.5 видно разнонаправленное действие силы Лоренца на различные части якоря в сечениях, близких по угловой координате центру рельса.

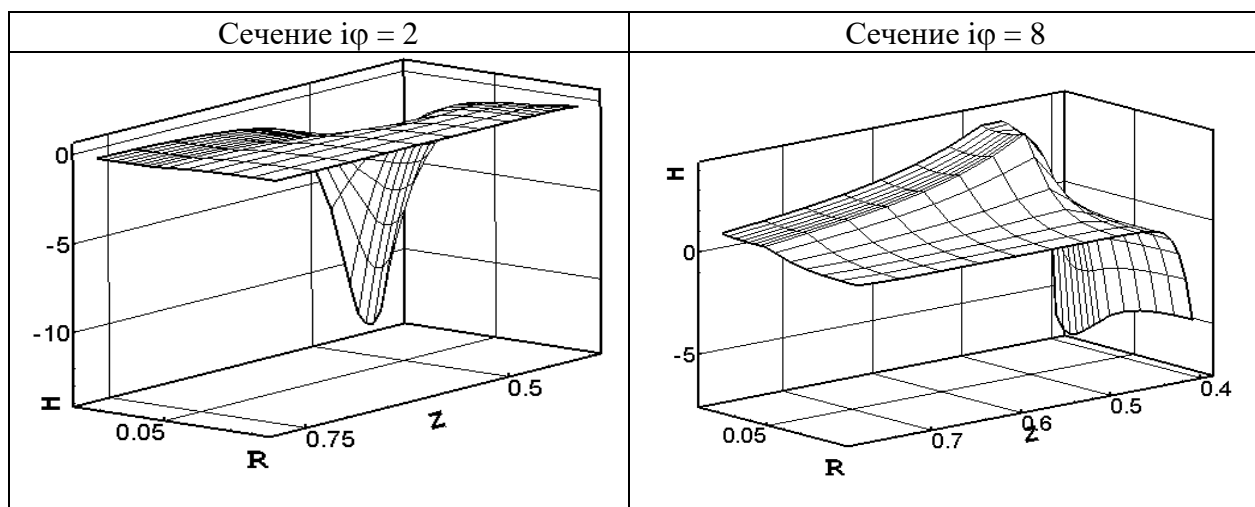


Рис. 4.4. Распределение H_z (слева) и H_φ (справа) (случай незамкнутых рельсов).

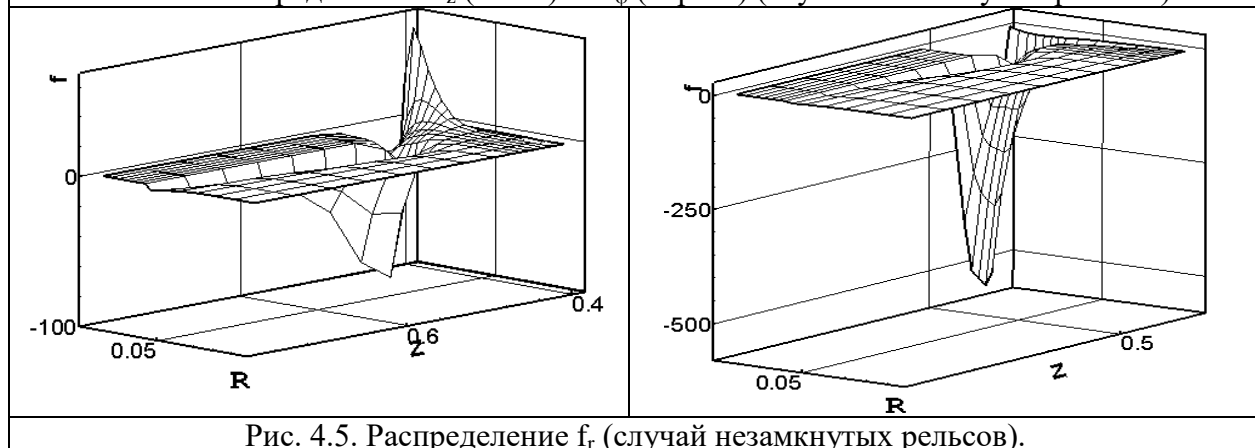


Рис. 4.5. Распределение f_r (случай незамкнутых рельсов).

§ 5. Результаты расчетов для различных токов замыкания.

Ниже представлены результаты цикла расчетов для различных значений тока, протекающего через замыкающий проводник (далее называется током замыкания). Он выполнен для более детального исследования влияния короткого замыкания рельсов в передней части на распределение полей. Расчеты проведены для двух последних вариантов якоря с током замыкания, увеличенным в 5 и 10 раз. Далее сравнены картины распределений компонент плотности тока и напряженности магнитного поля при различных значениях тока замыкания. Представленные выводы сделаны на основании большего числа численных результатов, чем приведено в графическом виде ниже.

А. Плотность тока для второго вариант якоря.

На рис. 5.1 - 5.4 показаны распределения \mathbf{j} в различных сечениях якоря плоскостью $\varphi = \text{const}$ для второго варианта якоря.

На картине распределения r - компоненты плотности тока в сечениях $\varphi = \text{const}$ видно, что j_r достигает наибольшего значения в алюминиевой части якоря. При приближении плоскости сечения от центра к краю рельса (по угловой координате) рассматриваемая величина увеличивается по модулю. В стальной части якоря ток не достигает больших значений, тем не менее на задней (относительно оси Oz) грани стальной части виден небольшой положительный экстремум (рис. 5.1). С увеличением тока замыкания такой экстремум появляется и на передней грани (рис. 5.2), причем при дальнейшем увеличении тока замыкания этот экстремум меняет знак (рис. 5.3).

В левой части рис. 5.1 - 5.3 приведены картины распределения r - компоненты плотности тока в сечении, близком краю рельса (по угловой координате), с различным значением тока замыкания. В сечениях, близких центру рельса, картина аналогична, но с меньшими по модулю амплитудными величинами компонент.

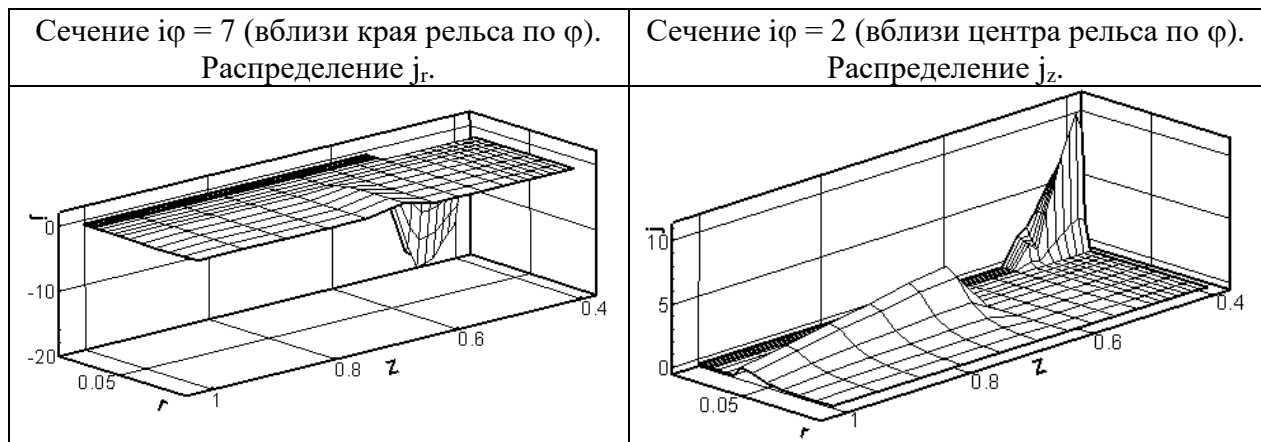


Рис. 5.1. Исходный ток замыкания.

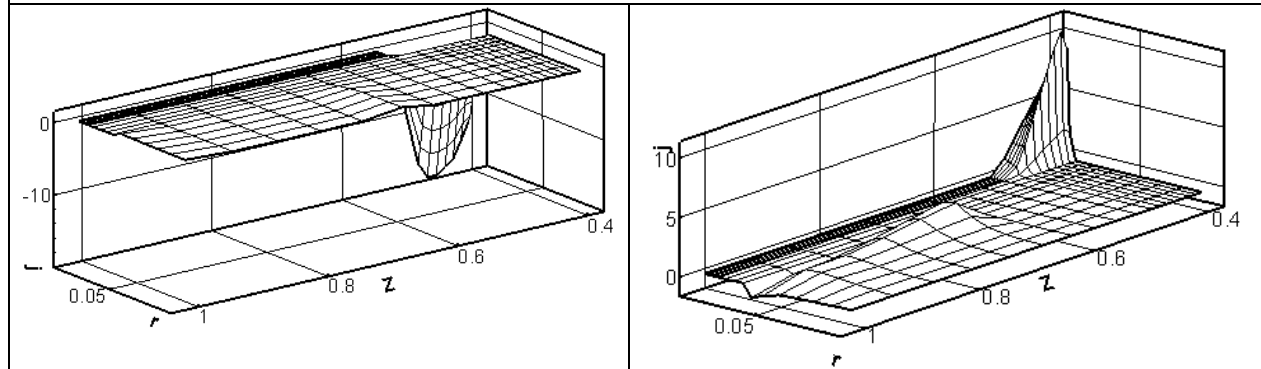


Рис. 5.2. Пятикратный ток замыкания. .

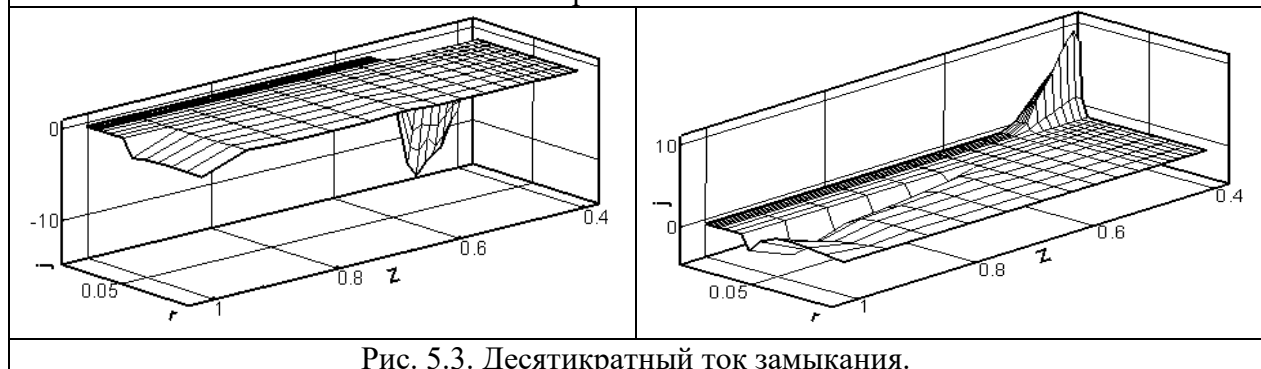


Рис. 5.3. Десятикратный ток замыкания.

Увеличение тока замыкания практически не изменяет картину распределения φ - компоненты плотности тока \mathbf{j} . Наибольшего значения j_φ достигает в области, занимаемой алюминиевой частью якоря, и увеличивается по модулю при приближении сечения по углу к краю рельса (рис. 5.4). В остальном распределение φ - компоненты аналогично распределению r - компоненты. Следует учесть, что φ - компонента \mathbf{j} достигает положительных экстремумов в областях, где r - компонента имеет отрицательное значение, а с увеличением тока замыкания экстремальное значение j_φ (как и j_r) несколько убывает по модулю.

Увеличение тока замыкания оказывает наибольшее влияние на картину распределения z - компоненты плотности тока. При исходном значении тока замыкания z - компонента \mathbf{j} возрастает в направлении от передней к задним (относительно оси Oz) областям алюминиевой и стальной частей якоря. При увеличении тока замыкания знак j_z в области, близкой к поверхности (по радиусу) стальной части якоря, изменяется, и положительный экстремум z - компоненты плотности тока в задней (по оси Oz) части переходит в отрицательный в передней.

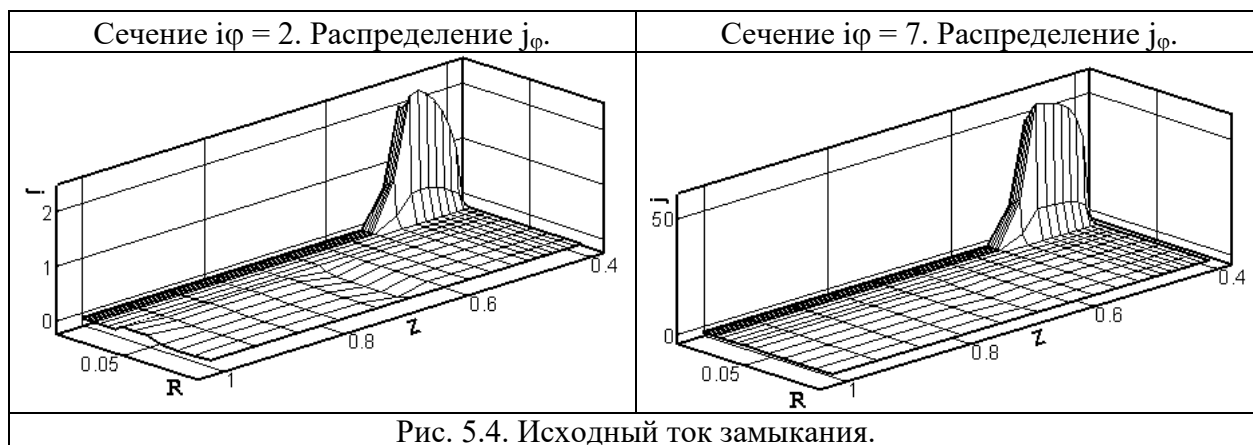


Рис. 5.4. Исходный ток замыкания.

В правой части рис. 5.1 - 5.3 приведены картины распределения z - компоненты плотности тока в сечении, близком центру рельса (по угловой координате), с различным значением тока замыкания. Несмотря на увеличение модуля (при приближении плоскости сечения к краю рельса) характер распределения z - компоненты плотности тока практически не зависит от изменения плоскости сечения по угловой координате.

Б. Плотность тока для третьего варианта якоря.

Далее представлены распределения плотности тока в сечениях плоскостями $\varphi = \text{const}$ для третьего варианта конфигурации якоря.

Из картин распределений r - компоненты плотности тока в сечениях $\varphi = \text{const}$ видно, что наибольшего значения рассматриваемая величина достигает на задней (по оси Oz) поверхности якоря и уменьшается при приближении от центра к краю рельса по радиусу. Плотность тока достигает экстремального значения также в области переднего (по Oz) края алюминиевого кольца. При приближении сечения по угловой

координате к краю рельса оба экстремума r - компоненты плотности тока в алюминиевой части якоря сливаются, экстремальное значение, достигаемое на задней поверхности якоря при наибольшем радиусе, увеличивается. С увеличением тока замыкания второй экстремум r - компоненты плотности тока на передней (по Oz) грани алюминиевого кольца уменьшается. При этом экстремум на задней (по Oz) грани алюминиевого кольца уменьшается по модулю в меньшей степени.

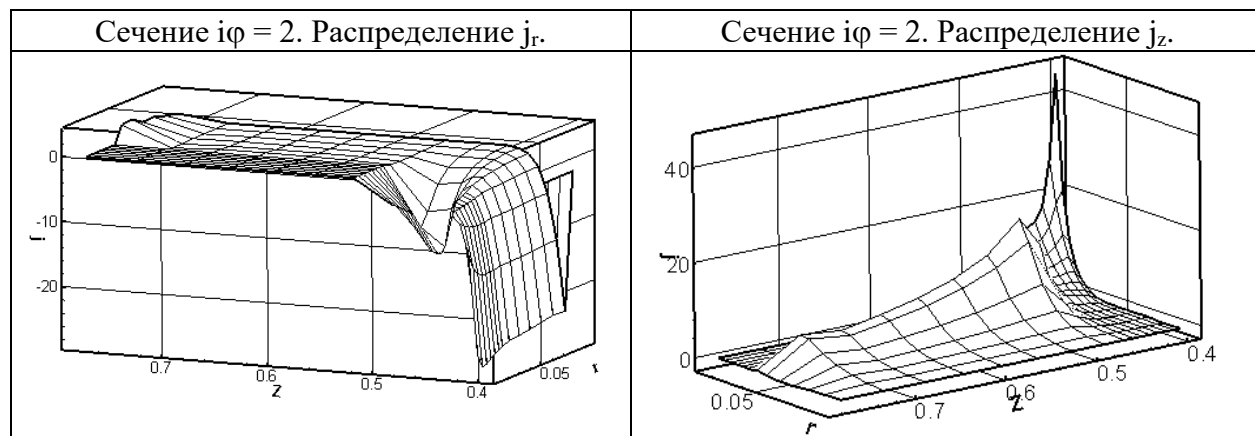


Рис. 5.5. Исходный ток замыкания.

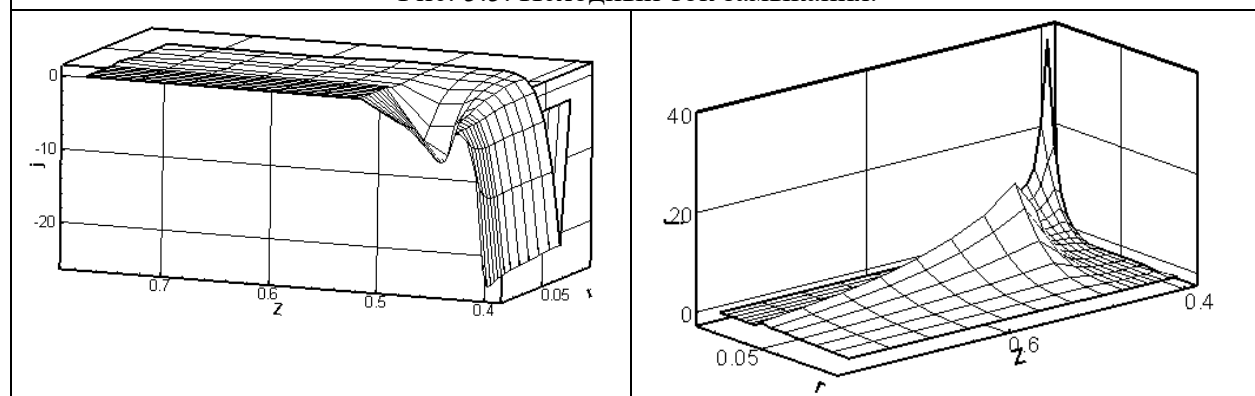


Рис. 5.6. Пятикратный ток замыкания.

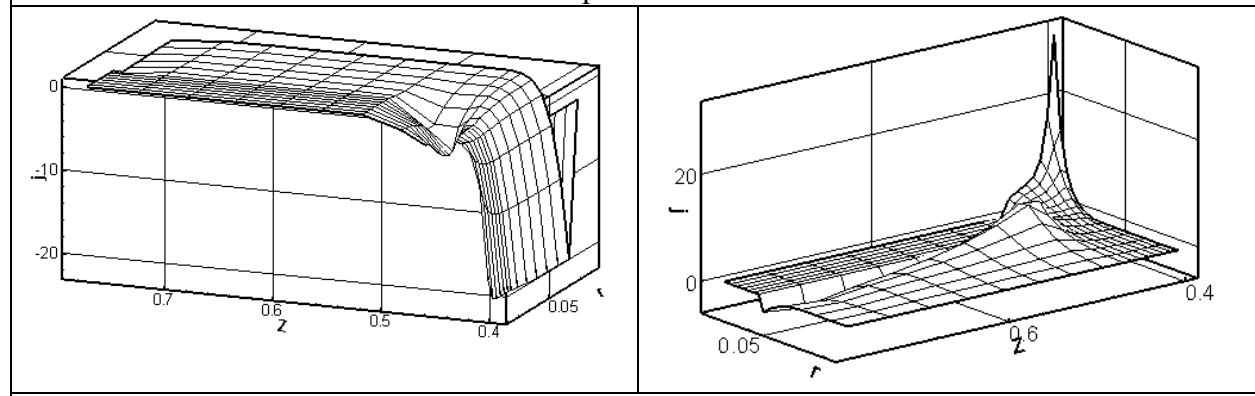
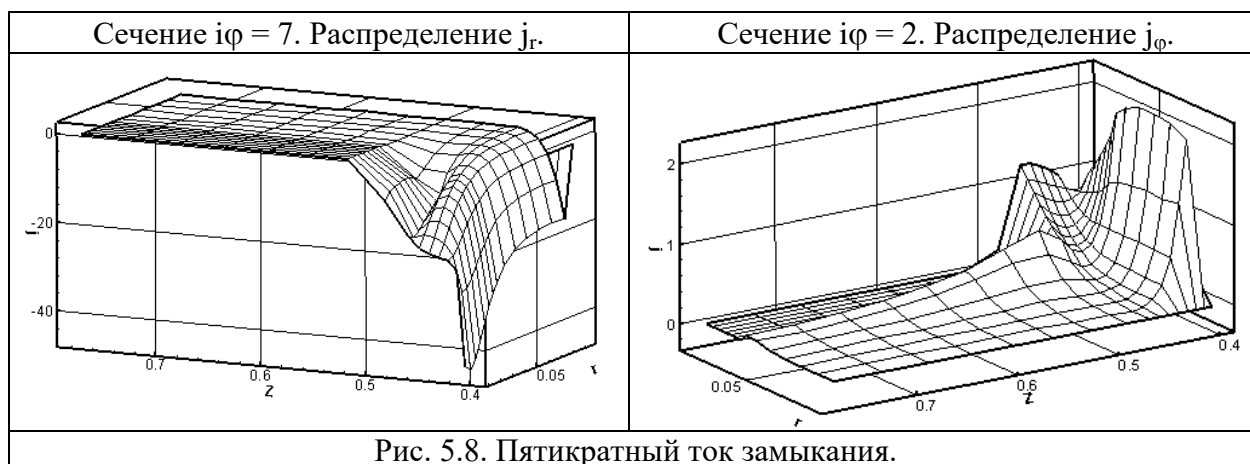


Рис. 5.7. Десятикратный ток замыкания.

Картины распределений r - компоненты плотности тока в сечении, близком центру рельса (по угловой координате), с различными значениями тока замыкания приведены на рис. 5.5 - 5.7.

На рис. 5.8 приведена картина распределения j_r в сечении, близком краю рельса (два экстремума в алюминиевой части якоря сливаются).

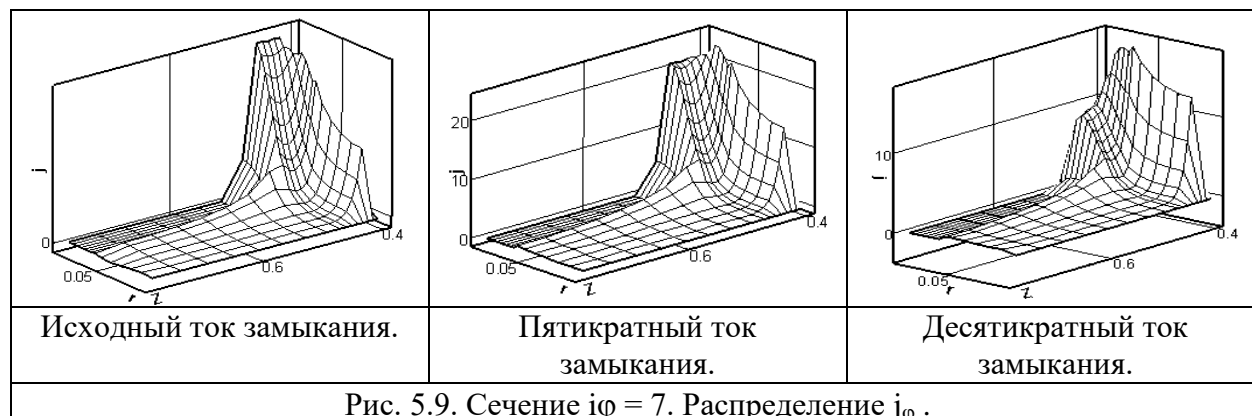
На картине распределения φ - компоненты плотности тока также видно, что рассматриваемая величина достигает экстремальных значений в тех же областях, что и r - компонента (левая часть рис. 5.8). В отличие от r - компоненты φ - компонента плотности тока возрастает в стальной части якоря в подобластях, близких поверхности (по радиусу) (правая часть рис. 5.8). Оба экстремума в алюминиевой части якоря увеличиваются по модулю при приближении сечения (по φ) к краю рельса и сливаются (аналогично распределению r - компоненты). Следует учесть, что φ - компонента плотности тока достигает положительных экстремумов в областях, где r - компонента имеет отрицательные экстремумы.



При увеличении тока замыкания второй экстремум φ - компоненты плотности тока (на передней по оси Oz грани алюминиевого кольца) уменьшается (рис. 5.9).

Увеличение тока замыкания оказывает влияние на картину распределения z - компоненты плотности тока, схожее со случаем второго варианта якоря. При небольшом значении тока замыкания z - компонента тока также возрастает в направлении от передней (по оси Oz) к задним

областям алюминиевой и стальной частей якоря. При этом в стальной части якоря, находящейся в алюминиевом кольце, z - компонента плотности тока принимает наименьшее значение. При увеличении тока замыкания направление \mathbf{j} в области, близкой поверхности стальной части (по радиусу) якоря, изменяется аналогичным образом, положительный экстремум z - компоненты \mathbf{j} за алюминиевым кольцом переходит в отрицательный в передней части якоря (правая часть рис. 5.5 - 5.7).



Характер распределения и значения z - компоненты плотности тока практически не меняются при изменении плоскости сечения по углу φ .

В. Напряженность магнитного поля для второго варианта.

Рассмотрим распределения компонент вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} в сечениях расчетной области плоскостью $\varphi = \text{const}$ для второго варианта якоря.

На рис. 5.10 приведено распределение r - компоненты H_r в сечении $\varphi = \text{const}$. Из него видно, что рассматриваемая величина достигает наибольшего по модулю значения в области пространства, находящейся за якорем, и возрастает по абсолютному значению при приближении к якорю. В области якоря H_r достигает положительного максимума, причем при приближении сечения по угловой координате к краю рельса оба максимума увеличиваются по модулю. В области диэлектрика над рельсом H_r принимает небольшое по модулю отрицательное значение в задней (по Oz) части расчетной области. С увеличением тока замыкания в области пространства перед якорем появляется второй экстремум H_r .

Картины распределения рассматриваемой величины в сечении, близком середине рельса (по угловой координате), с различным значением тока замыкания приведены на рис. 5.10. В сечениях, близких центру и краю рельса, картина аналогична описанной.

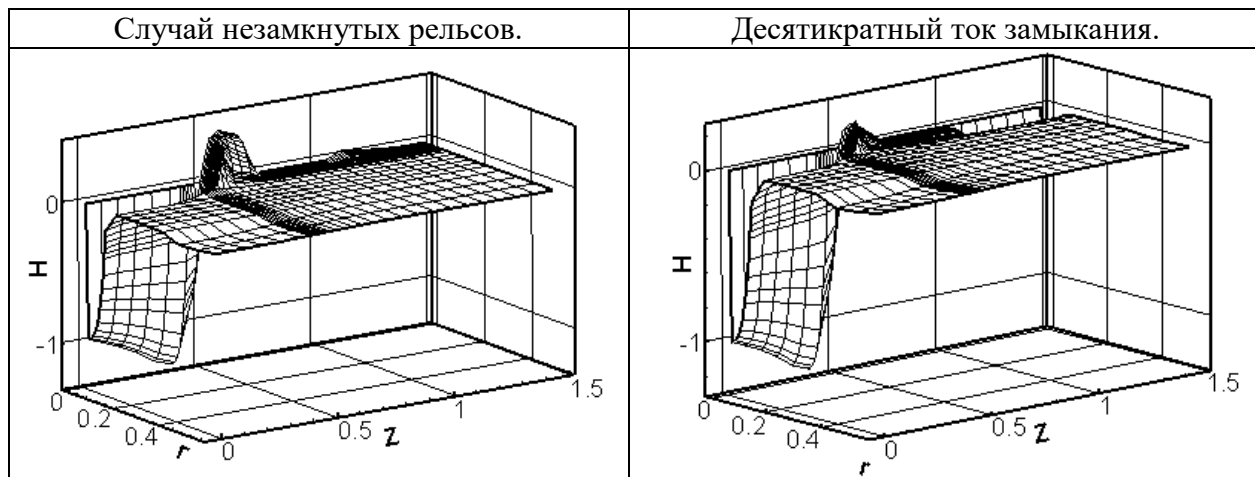


Рис. 5.10. Сечение $i\varphi = 5$. Распределение H_r .

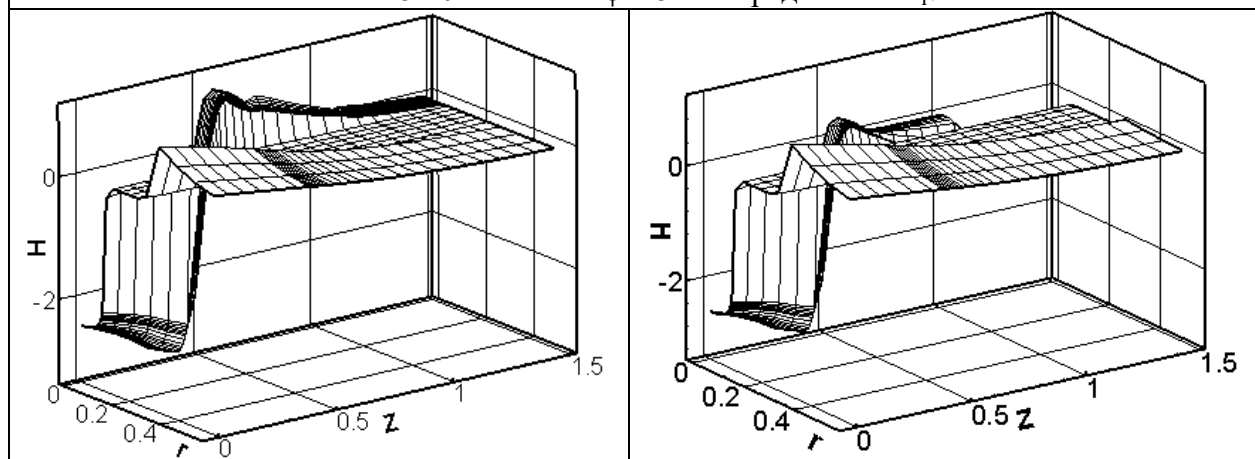


Рис. 5.11. Сечение $i\varphi = 5$. Распределение H_φ .

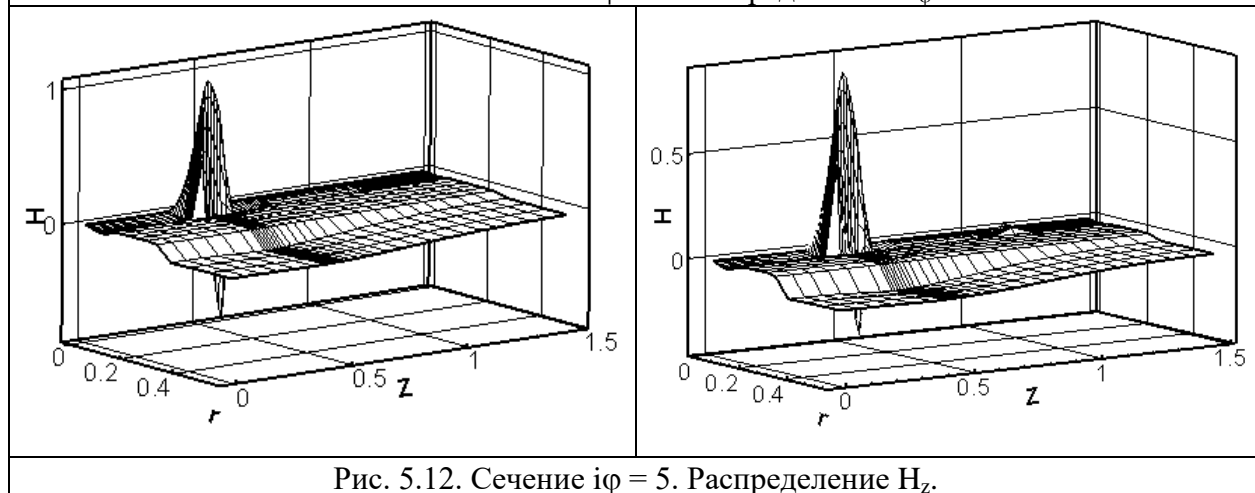


Рис. 5.12. Сечение $i\varphi = 5$. Распределение H_z .

Распределение φ - компоненты \mathbf{H} аналогично распределению H_r . При этом φ - компонента достигает положительных экстремумов в областях

над рельсом (позади ускоряемого тела) и не зависит от изменения сечения по углу (рис. 5.11).

Увеличение тока замыкания оказывает незначительное влияние на картину распределения z - компоненты \mathbf{H} . В области диэлектрика над рельсом H_z принимает небольшое по модулю отрицательное значение. В области якоря H_z имеет один положительный и один отрицательный экстремум (рис. 5.12). При приближении сечения по угловой координате к краю рельса отрицательный экстремум возрастает по модулю в наибольшей степени. При увеличении тока замыкания экстремальные значения H_z несколько уменьшаются.

Г. Напряженность магнитного поля для третьего варианта.

Изменение распределений компонент вектора \mathbf{H} (см. рис. 5.13 - 5.15) для третьего варианта якоря при варьировании тока замыкания происходит аналогично второму варианту. При этом z - компонента вектора \mathbf{H} имеет только отрицательный экстремум (рис. 5.15), модуль которого уменьшается при увеличении тока замыкания.

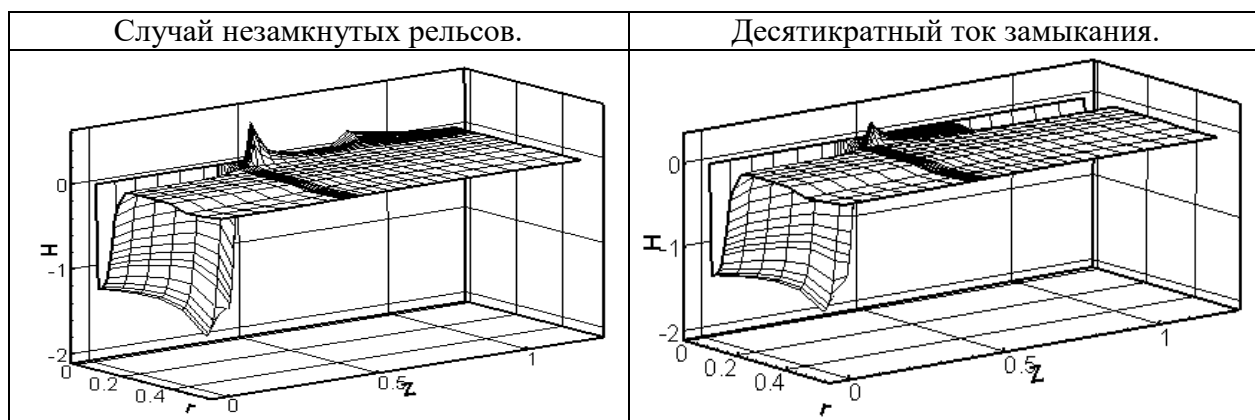


Рис. 5.13. Сечение $i\varphi = 5$. Распределение H_z .

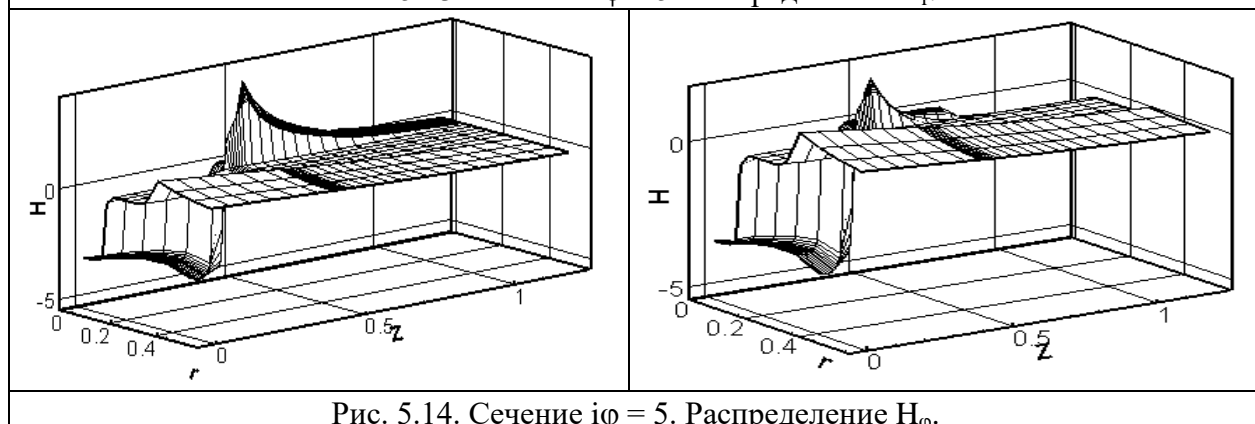
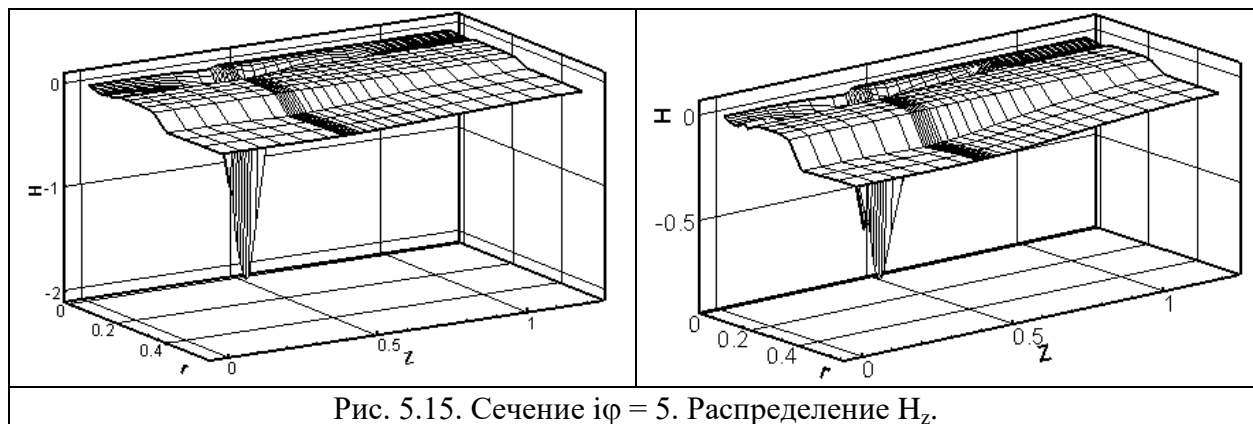


Рис. 5.14. Сечение $i\varphi = 5$. Распределение H_φ .



Из приведенных рисунков видно, что наличие замыкания приводит к появлению магнитного поля в области ускорителя, находящейся перед якорем, что совпадает с данными [3].

Заключение.

В работе получено численное решение нескольких задач, описывающих электромагнитное ускорение проводящих макротел. Рассмотрено три варианта конфигурации ускоряемого тела. Они отличаются наличием или отсутствием винтового крепления проводящей и диэлектрической частей, наличием или отсутствием нагрузки из проводящего материала. Исследованы варианты наличия или отсутствия короткого замыкания в дульной части канала ускорителя.

Для первого варианта якоря получена картина, отражающая качественные особенности пространственного распределения токов и сил Лоренца, действующих на различные элементы якоря. Показано, что наличие выступов и угловых точек приводит к появлению вихрей в распределении тока. Следствием является концентрация силы Лоренца на элементах винтового крепления. При этом сила имеет разные направления в близких точках. Результатом может быть разрыв крепления тела.

Разработанные алгоритмы позволили определить распределение трехмерных полей в ускорителе с замкнутыми накоротко рельсами. Из построенных распределений компонент вектора плотности тока видно различное влияние замыкания рельсов на процесс ускорения. При этом влияние такого замыкания на начальный процесс ускорения невелико,

поскольку рельсы замыкаются проводником с относительно большим сопротивлением.

Получены результаты численного моделирования ускорения якоря с односвязной и неодносвязной проводящей подобластью. Расчеты показали наличие электрического тока, индуцированного в неконтактирующем с другими проводниками проводящем элементе якоря. Приведена картина сквозного плавления алюминиевой части якоря под воздействием джоулева нагрева.

В работе качественно исследовано влияние изменения тока замыкания на компоненты магнитного поля и плотности тока в различных сечениях области. Показано, что наибольшее влияние изменение тока замыкания оказывает на качественную картину распределения z - компоненты тока. При увеличении тока замыкания изменяется направление z - компоненты вектора плотности тока в различных частях якоря. Изменение тока замыкания также способствует изменению модуля r - и φ - компонент плотности тока в проводящих подобластях якоря. Наличие замыкания приводит к появлению магнитного поля в области пространства, находящейся перед якорем.

Литература

1. Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле (Новосибирск, 10-13 апреля 1990 г.). // Под ред. М.Ф. Жукова, Новосибирск. Изд. Инст. Теплофизики СО АН СССР. 1990. 350 с.
2. Материалы II Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле (Новосибирск, 4-6 декабря 1991г.). // Под ред. В.Е. Накорякова. Новосибирск. Изд. Инст. Теплофизики СО РАН. 1992. 367 с.
3. K.A. Jamison, D.M. Littrell. Performance characteristics of a high velocity, 25mm railgun. // IEEE Transactions on Magnetics. 1995. V. 31, N. 1. P. 168 – 173.
4. J.H. Price, H.D. Yun. Design and Testing of Integrated Metal Armature Sabots for Launch of Armor Penetrating Projectiles from Electric Guns. // IEEE Transactions on Magnetics. 1995. V. 31, N. 1. P. 219 – 224.
5. R.J. Hayes, T.E. Hayden. Experimental Results from Solid Armature Tests at the Center for Electromechanics at The University of Texas at Austin. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29, N. 1. P. 819 – 824.
6. В.Б. Железный, А.Д. Лебедев, А.В. Плеханов. Воздействие на динамику ускорения якоря в РЭУ. // В [2]. С. 16 - 32.
7. А.В. Плеханов, А.В. Кудрявцев, В.Б. Железный, Д.В. Хандрыга. Исследование особенностей разгона макрочастиц в магнитоплазменном ускорителе. // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 1. С. 15 – 20.

8. J.A. Aug, C.H. Konrad, C.A. Hall et al. Hypervelocity projectile design and fabrication. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 722 – 727.
9. А.В. Плеханов, А.Н. Терещенко, Д.В. Хандрыга. Численное и экспериментальное исследование электромагнитного ускорения макротел с использованием металлического якоря. // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 1. С. 21 – 27.
10. D.V. Khandryga, A.V. Plekhanov, A.N. Tereschchenko. Numerical Simulation and Experimental Results of the Metal Armature Acceleration. // IEEE Transactions on Magnetics. 1995. V. 31. N. 1. P. 193 – 197.
11. S.H.Chu. Barrel Lateral Force Modelling of a Curved E.M. Railgun. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 1131 – 1136.
12. T.E. Hayden, R. Dethlefsen, J.H. Price. Effective Launch Package Integration for Electromagnetic Guns. // IEEE Transactions on Magnetics. 1995. V. 31. N. 1. P. 150 – 155.
13. J. Nett, L. Gernandt. Inductive Acceleration of Moving Projectiles and Synchronization between the Driving Field and the Projectile Motion. // IEEE Transactions on Magnetics. 1995. V. 31. N. 1. P. 499 – 503.
14. R. Dethlefsen, R. Ingermanson et al. Mid - Push Plasma Armatures for Long - Rod Electromechanic Gun Projectiles. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 792 – 797.
15. R. Crawford, J. Taylor, D. Keefer. Solid Ring Armature Experiments in a Transaugmented Railgun. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 138 – 143
16. J.J. Hahne, R.J. Hayes. Operating Experience with the 90 mm Railgun at CEM – Ut. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 407 – 412.
17. A. Challita, B.L. Maas, D.P. Bauer, M. Heyse. A multiple armature railgun launcher. // IEEE Transactions on Magnetics. 1993. V. 29. N. 1. P. 763 – 768.
18. М.П. Галанин, Ю.П. Попов. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах: Математическое моделирование. М. Наука. Физматлит. 1995. 320 с.
19. М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий, Ю.П. Попов, С.С. Храмовский. Численное моделирование пространственно трехмерных явлений при электромагнитном ускорении проводящих макротел. // Мат. моделирование. 1999. Т. 11. N 8. С. 3 - 22.
20. М.П. Галанин, С.С. Храмовский. Организация расчета трехмерных квазистационарных электромагнитных полей в областях со сложной геометрией проводников и диэлектриков. // Препр. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 1999. № 42. 18 с.
21. А. Джордж, Дж. Лю. Численное решение больших разреженных систем уравнений. М. Мир. 1984. 333 с.
22. D.S. Kershaw. The incomplete Cholesky - Conjugate Gradient Method for the iterative solution of system of a linear equations. // J. Comput. Phys. 1978. V. 26. P. 43 - 65.
23. В.В. Воеводин, Ю.А. Кузнецов. Матрицы и вычисления. М. Наука. 1984. 320 с.