

На правах рукописи



Васильева Ольга Владимировна

**ЧИСЛЕННОЕ И АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ С КОАКСИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМОЙ НА
ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском Томском политехническом университете (НИ ТПУ) и Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)

Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор
Исаев Юсуп Ниязбекович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Катаев Михаил Юрьевич (ТУСУР)

доктор физико-математических наук,
профессор
Воскобойников Юрий Евгеньевич
(Новосибирский государственный
архитектурно-строительный
университет)

Ведущая организация: Институт космических и
информационных технологий СФУ
(г. Красноярск)

Защита состоится «22» декабря 2011 г. В 15.15 на заседании диссертационного совета Д212.268.02 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд.203

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу: 634045, г. Томск, ул. Вершинина, 74.

Автореферат разослан «21» ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Мещеряков Р.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

При моделировании сложных электротехнических устройств эффективным является метод сведения сложных электродинамических процессов, происходящих в электротехнических устройствах, к более простым, хорошо изученным процессам, происходящих в электротехнических схемах. То есть сложному электродинамическому процессу сопоставляется электротехническая схема замещения - модель, с последующим изучением переходных процессов электрической цепи. При этом модель отражает те стороны явлений, которые существенны в данном исследовании. Такой метод позволяет в ряде случаев заменить решения дифференциальных уравнений в частных производных системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Для их решения используются численные методы и методы исследования динамических систем в фазовой плоскости.

В работах известных авторов Калантарова П.Л., Цейтлина Л.А., Демирчяна К.С., Неймана Л.Р. были решены частные случаи расчета индуктивностей канонических форм, таких как кольцо, прямоугольник, шар. В перечисленных работах приводятся приближенные результаты расчета индуктивностей. Технология приведенных методов заключается в том, что авторы предлагают подсчитывать отдельно собственные индуктивности и взаимные индуктивности, затем их складывать, при этом неизбежно возникают эллиптические интегралы, которые требуют разложения в ряд, где берутся лишь несколько первых членов разложения ряда, в результате расчет получается приближенным. Постоянно требуется обращение к приведенным таблицам и кривым, что является неудобным. В данной диссертационной работе предлагается энергетический метод расчета индуктивностей, основа которого состоит в том, что подсчитывается магнитное поле с последующим расчетом энергии магнитного поля. Далее из соотношения, связывающего энергию магнитного поля и индуктивность, извлекается индуктивность. Результирующая индуктивность содержит в себе как собственные индуктивности элементов электродной системы, так и взаимные индуктивности между элементами системы.

В качестве моделируемых электротехнических устройств в работе рассматриваются коаксиальные гиперскоростные магнитоплазменные ускорители (КМПУ) и электромагнитный привод вакуумного выключателя (ЭПВВ). КМПУ, рассматриваемый в данной работе, отличается конструктивными особенностями от КМПУ рассматриваемых в работах других авторов в частности в работах Морозова А.И., Колесникова П.М. и др. Отличительной особенностью устройств является локализация индуктора. Оригинальность конструкции рассматриваемого в работе КМПУ впервые была предложена сотрудником ТПУ Сивковым А. А. Для усиления механической прочности устройства Сивков А.А. предложил расположить индуктор вокруг электрода ствола. Практическое использование данного ускорителя заключается в нанесении различных функциональных покрытий на рабочие

поверхности электродов с целью снижения переходного сопротивления, электроэрозионной стойкости и др., для получения ультрадисперсных порошков металлов и некоторых соединений. Поэтому разработка математической модели данного ускорителя является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка вычислительных алгоритмов и комплексов программ для исследования процессов, происходящих в коаксиальных электротехнических устройствах на основе схем замещения. Разработка методов визуализации электромагнитных полей на основе электротехнических устройств.

Для достижения данной цели поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- 1) Разработка вычислительных алгоритмов и комплексов программ для моделирования коаксиальных гиперскоростных магнитоплазменных ускорителей и электромагнитного привода вакуумного выключателя.
- 2) Создание комплекса программ, позволяющего исследовать электрические и магнитные поля, переменные индуктивности в динамике, индуктивности электродов сложной конфигурации.
- 3) Проведение вычислительного эксперимента для моделирования газодинамических параметров плазменного сгустка КМПУ.
- 4) Сведение задачи решения дифференциальных уравнений в частных производных Лапласа и Пуассона к переходным процессам, происходящих в электротехнических схемах замещения.

Методы исследования.

1. Численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и дифференциальных уравнений в частных производных – метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод аппроксимации и интерполяции функции.
2. Методы дифференциальной геометрии и теории автоматического регулирования.
3. Методы математической физики – уравнения Лапласа, Пуассона, Навье-Стокса.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем.

1. Впервые разработана математическая модель для исследования процессов, происходящих в КМПУ, на основе использования электротехнической схемы замещения. Разработан алгоритм расчета индуктивности сложной электродной системы.
2. Разработан алгоритм расчета термодинамических параметров ударной волны плазменного газа на основе конечно-разностной схемы Лакса-Уэндролфа, отличающийся от известного метода введением искусственной вязкости.
3. Впервые разработана математическая модель для исследования процессов, происходящих в ЭПВВ, на основе использования

электротехнической схемы замещения. Разработан алгоритм расчета динамики изменения переменной индуктивности.

4. Впервые получен оригинальный метод сведения решения дифференциальных уравнений в частных производных Лапласа и Пуассона к решению системы дифференциальных уравнений 1 - го порядка на основе электротехнических схем замещения.

Практическая значимость. Полученные пакеты программ применимы для анализа КМПУ, используемого в космической технике, для получения ультрадисперсных порошков металлов и нанесения различных функциональных покрытий. Алгоритмы, приведенные в работе, применимы для определения пространственного распределения векторного потенциала, индуктивности электродной системы сложной конфигурации, динамики изменения переменной индуктивности.

Разработанные вычислительные алгоритмы и комплекс программ могут быть использованы в научно-исследовательских работах по изучению протекания физических процессов, таких как: электродинамическое ускорение плазмы, изменение массы сгустка в процессе распространения, процесс переноса и трансформаций одного вида энергии в другой и т.д.

На основе разработанных алгоритмов могут быть сконструированы аналоговые и цифровые устройства, позволяющие исследовать электромагнитные поля электродной системы сложной конфигурации, в основе которых лежит расчет переходных процессов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается методическими расчетами, контролем точности вычислений, сравнением численных результатов с аналитическими решениями и с опубликованными расчетными и экспериментальными результатами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритмы и комплекс программ, разработанные в программно-интегрированных средах Microsoft visual studio – C#, MathCAD, с использованием библиотеки динамической компоновки DLL MATLAB для математического моделирования и оптимизации процессов, происходящих в КМПУ, на основе использования электротехнической схемы замещения, расчета индуктивности сложной электродной системы через энергию магнитостатического поля.
2. Алгоритм и программа моделирования газодинамических процессов и расчет термодинамических параметров ударной волны плазменного газа на основе модифицированного алгоритма Лакса-Уэндролфа с введением оптимальной искусственной вязкости.
3. Численно аналитическое моделирование и программа для исследования процессов, происходящих в ЭПВВ, на основе использования электротехнической схемы замещения с алгоритмом расчета динамики изменения индуктивности через энергию магнитостатического поля в разные интервалы времени.

4. Метод сведения решения дифференциальных уравнений в частных производных Лапласа и Пуассона к исследованию нелинейной динамической системы с последующим моделированием в схемотехнической среде MATLAB - Simulink.

Реализация работы.

Результаты диссертационной работы реализованы при выполнении госбюджетных НИР, проводившихся в рамках Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/886) и гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-08-01110), на кафедре ТОЭ НИ ТПУ (акт о внедрении); в лаборатории кафедры ЭСПП НИ ТПУ (акт о внедрении), в НИИ ПММ ТГУ при выполнении НИР «Исследование закономерностей электромеханического преобразования энергии и горения дисперсных систем и низкопористых сред» (акт о внедрении), в лаборатории распространения волн Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (акт о внедрении).

Личный вклад автора: обработка, анализ и интерпретация полученных данных.

Апробация работы.

Основные результаты работы были представлены на Международных научно-технических конференциях (г. Томск, 2007-2011 гг., г. Казань, 2009 г.), Всероссийских научно-практических конференциях (г. Анжера-Судженск, 2008-2011 гг., г. Омск, г. Рязань 2009 г.), 16th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings (г. Томск, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 работы, из них 8 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Основной текст диссертации изложен на 124 страницах, включая 67 рисунков и 7 таблиц, список цитируемой литературы состоит из 101 наименования, приложения на 4 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дана общая характеристика работы, изложены цели и задачи диссертационной работы, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава «Моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ)» посвящена построению и исследованию математической модели КМПУ, исследованию физических явлений в ускорителе методами вычислительного эксперимента и разработке комплекса программа для расчета индуктивности сложной электродной системы, написанная на языке C# с использованием библиотеки динамической компоновки (DLL), скомпилированной в среде MATLAB и программно-интегрированной среде MathCAD. На рисунке 1 представлена упрощенная модель КМПУ. Сгусток представляется как недеформируемая проводящая перемычка, ускоряемая

силами магнитного давления собственных токов, протекающих в ускорителе через перемычку.

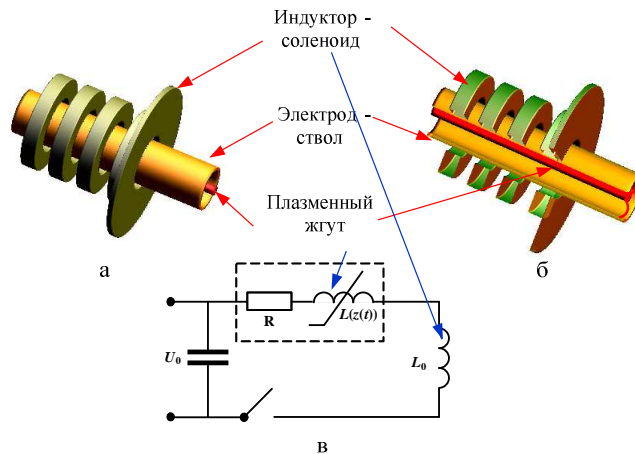


Рис. 1. Упрощенная модель КМПУ: а) модель проводящей части плазменного ускорителя; б) сечение плазменного ускорителя; в) электротехническая схема замещения КМПУ

Из-за отсутствия алгоритма расчета уравнения Пуассона и Лапласа в цилиндрической системе координат в DLL MATLAB появилась необходимость в пересчете результатов решения из декартовой системы координат в цилиндрическую систему на основе введения неоднородного распределения псевдомагнитной проницаемости. В чем заключается один из пунктов *новизны* предлагаемого алгоритма.

На рисунке 2 показан интерфейс программы, разработанной в среде Visual Studio. Предлагаемая программа написана на языке C#, позволяет рассчитывать переменную индуктивность катушки электромагнитного привода вакуумного выключателя (ЭПВВ), индуктивность индуктора и ударную волну коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ).

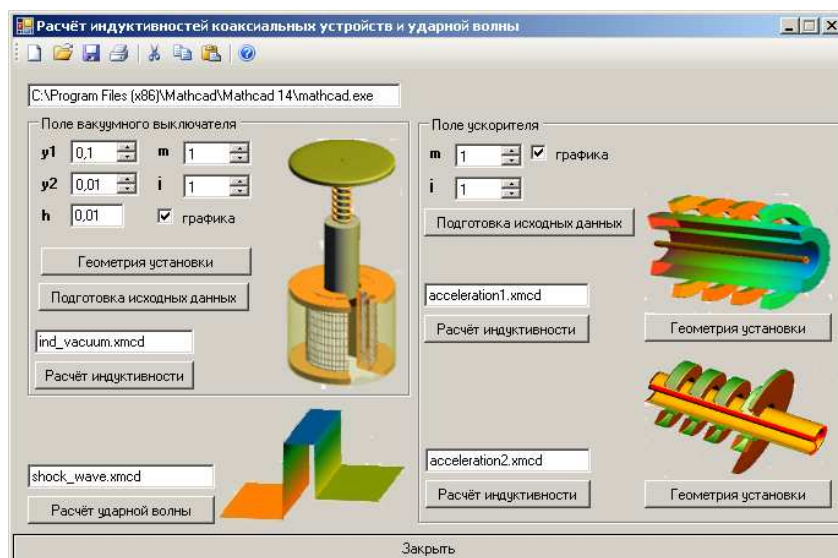


Рис.2. Интерфейс программы для расчета индуктивностей коаксиальных устройств и ударной волны

Для нахождения индуктивности катушки L воспользовались известным энергетическим определением:

$$L = 2W_m / I^2,$$

где I - ток в катушке, W_m - энергия магнитного поля.

В свою очередь, энергию магнитного поля определили:

$$W_m = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{A} j dV,$$

где \mathbf{A} - векторный потенциал поля, j - вектор плотности тока, V - объем, занятый токами.

Основное расчетное уравнение:

$$L = \frac{1}{I^2} \int_V \mathbf{A} j dV$$

В качестве апробации алгоритма была взята модель – цилиндрическая катушка с постоянной площадью $S = 100 \text{ мм}^2$ и внутренним радиусом $r_1 = 10 \text{ мм}$ (рис. 3). Варьировалась высота обмотки $h = r_2 - r_1$.

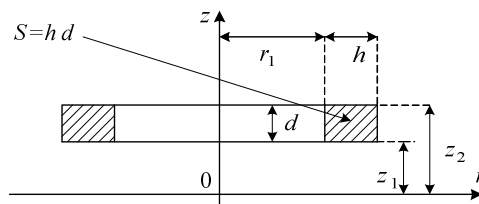


Рис. 3. Продольное сечение цилиндрической катушки

Следующий пункт *новизны* предлагаемого алгоритма заключается в энергетическом методе расчета индуктивностей, основа которого состоит в том, что подсчитывается магнитное поле с последующим расчетом энергии магнитного поля.

Для получения индуктивности катушки последняя формула свелась к выражению:

$$L = \frac{2\pi \cdot 10^9}{S^2} \cdot \int_{r_1}^{r_1+h} \rho' \cdot \left(\int_{z_1}^{z_1+d} \mathbf{A}(\rho', z') dz' \right) d\rho', \quad (1)$$

где S - площадь сечения; r_1 - внутренний радиус; h - высота обмотки; d - ширина обмотки; z_1 - нижний предел интегрирования по оси z ; $\mathbf{A}(\rho', z')$ - функция распределения векторного потенциала; ρ' - радиус элементарной кольцевой трубки тока; z' - переменная интегрирования вдоль оси z ; $d\rho' dz'$ - сечение элементарной кольцевой трубки тока.

При этом результирующая индуктивность содержит в себе как собственные, так и взаимные индуктивности системы.

При наличии четырех колец в индукторе в соответствии с рисунком 4 и формулой (1):

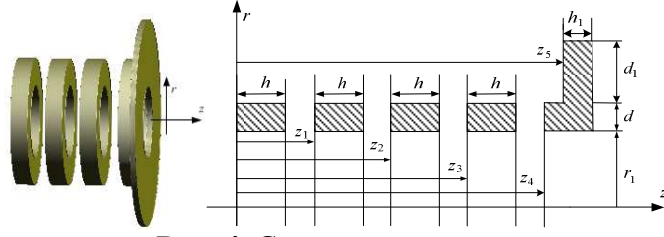


Рис. 4. Сечение индуктора

$$L_0 = \frac{2\pi}{S_1^2} \int_{\eta_1}^{\eta_1+d} \rho d\rho \left(\int_0^h dz A(z, \rho) + \int_{z_1}^{z_1+h} dz A(z, \rho) + \int_{z_2}^{z_2+h} dz A(z, \rho) \right) +$$

$$+ \frac{2\pi}{S_1^2} \int_{\eta_1}^{\eta_1+d} \rho d\rho \left(\int_{z_3}^{z_3+h} dz A(z, \rho) + \int_{z_4}^{z_5+h_1} dz A(z, \rho) \right) + \frac{2\pi}{S_2^2} \int_{\eta_1+d}^{\eta_1+d+d_1} \rho d\rho \int_{z_5}^{z_5+h_1} dz A(z, \rho)$$

В результате индуктивность индуктора равна $L_0 = 1,722 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Индуктивность коаксиальной системы жгут-электрод $L(z)$ записана в виде линейной функции координаты распространения:

$$L(z) = \frac{z\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = L'z.$$

Постоянный коэффициент L' при координате z называется погонной индуктивностью (индуктивность единицы длины). После подстановки необходимых величин получена величина погонной индуктивности:

$$L' = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = 2 \cdot 10^{-7} \ln(10) = 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}.$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка нами решена численно методом Рунге-Кутты с фиксированным шагом, для повышения точности расчета она предварительно была сведена к системе дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \frac{i^2}{2} \frac{\partial}{\partial z} L(z) \\ \frac{d}{dt} i = \frac{-i \frac{\partial L(z)}{\partial z} + U_c - iR + U_0}{L(z)} \\ \frac{d}{dt} U_c = -\frac{i}{C} \end{cases} \quad \text{в векторной форме} \rightarrow \frac{d\mathbf{X}}{dt} = D(t, \mathbf{X}).$$

здесь $\mathbf{X} = [x_1 = z(t), x_2 = v(t), x_3 = i(t), x_4 = u_c(t)]^T$ – вектор состояния содержит следующие компоненты: $z(t)$ – координату, $v(t)$ – скорость, $I(t)$ – ток, $u_c(t)$ –

напряжение на конденсаторе; m – масса, $L(z) = L_0 + L'z$ – индуктивность, R – сопротивление плазмы, $D(t, \mathbf{X})$ – расширенная матрица.

Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что динамика сложного плазменного явления заменяется электротехнической схемой замещения.

В качестве правильности работы алгоритма расчета проведена проверка баланса энергии рассматриваемой системы (рис. 5).

Огромное магнитное давление $P = 700 \cdot 10^3$ атм приводит к скоростям порядка 10 км/с. При электродинамическом ускорении часть энергии трансформируется в кинетическую энергию: $W_{кин}(t) = \frac{mv^2}{2}$.

Наличие реактивных элементов L, C обуславливает взаимное преобразование электрической энергии в магнитную энергию и наоборот:

$$W_C(t) = \frac{u_C^2(t)C}{2}, \quad W_L(t) = \frac{i^2(t)L}{2}.$$

В результате такого преобразования энергия рассеивается на преодолении сил трения и сопротивления, возбуждения ударных волн и т.д. Даже при незначительных омических сопротивлениях плазмы порядка $R = 10^{-3}$ Ом за счет

больших токов в тепло преобразуется энергия: $W_R(t) = \int_0^t i^2(t)R(t)dt$.

Теперь можно записать баланс энергии в виде растрат электростатической энергии заряженного конденсатора:

$$\frac{U_0^2 C}{2} = \frac{mv^2(t)}{2} + \int_0^t i^2(t)R(t)dt + \frac{u_C^2(t)C}{2} + \frac{i^2(t)L(z(t))}{2} \quad (2)$$

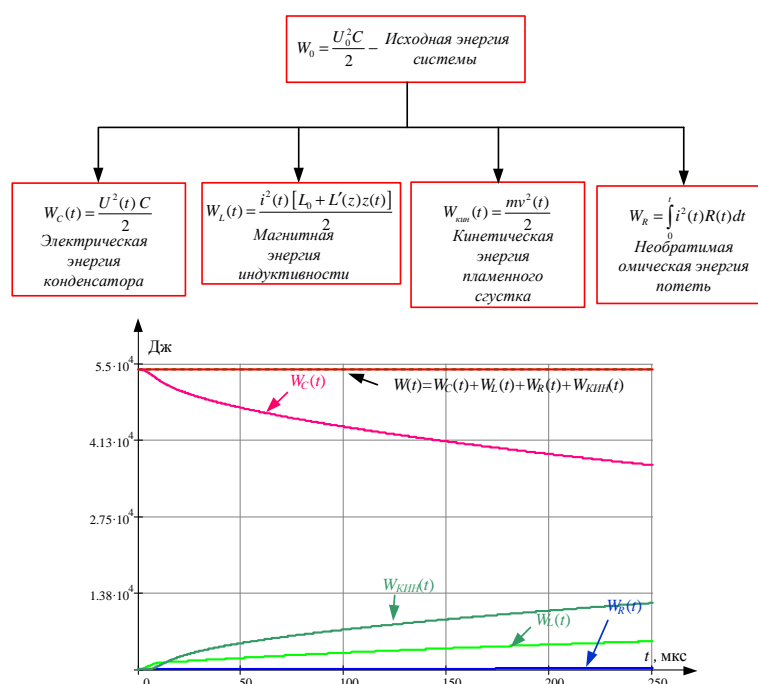


Рис. 5. Схема распределения энергии в плазменном ускорителе без учета эрозии

Расхождение с экспериментальными данными составило около 60 %, поэтому мы решили скорректировать нашу модель с учетом изменения массы.

Для этого экспериментальную зависимость скорости от координаты распространения плазмы представили в виде сплайновой зависимости $v(x)$.

Зависимость от координаты $v(x)$ преобразовали в зависимость от времени $v(t)$ с помощью соотношений ускорения и времени соответственно:

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = v(x) \frac{dv(x)}{dx} = \frac{1}{2} \frac{dv^2(x)}{dx} \quad \text{и} \quad dt(x) = \frac{v'(x)}{a(x)} dx \rightarrow t(x) = \int_0^x \frac{v'(x)}{a(x)} dx.$$

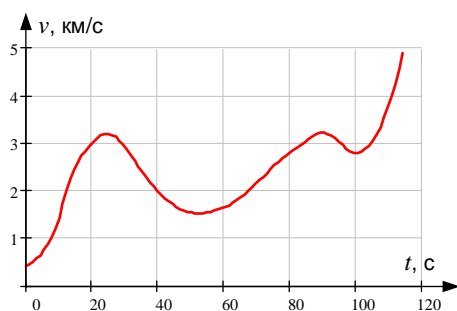


Рис. 6. Зависимость скорости от времени

Рассматривая зависимость скорости от времени, можно наблюдать колебательный характер изменения скорости, следовательно, для адекватности моделирования динамики распространения плазменного сгустка необходимо учитывать изменения массы сгустка. Колебательный характер скорости можно объяснить и рассматривая динамику распространения заряженных частиц в электромагнитном поле.

Масса пучка меняется по колебательному закону.

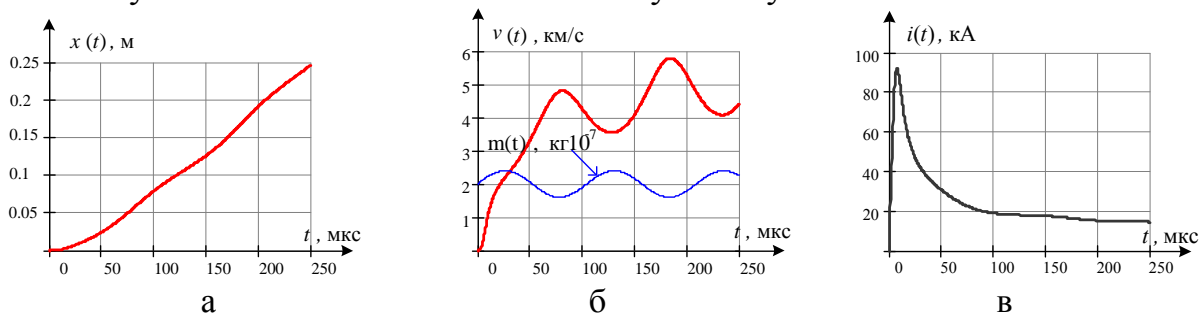


Рис.7. Результаты расчетов при значениях параметров цепи $C = 12 \cdot 10^{-3} \Phi$, $L_0 = 1,722 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$, $L' = 4,6 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$, $U_0 = 3 \text{ кВ}$: а) координата распространения; б) скорость сгустка, в) ток.

В балансе энергии (2) добавляется еще одно слагаемое эффективная потенциальная энергия, обусловленная изменением массы:

$$U_{\text{эф}}(t) = \frac{1}{2} \int_0^t v^2(t) \frac{dm(t)}{dt} dt.$$

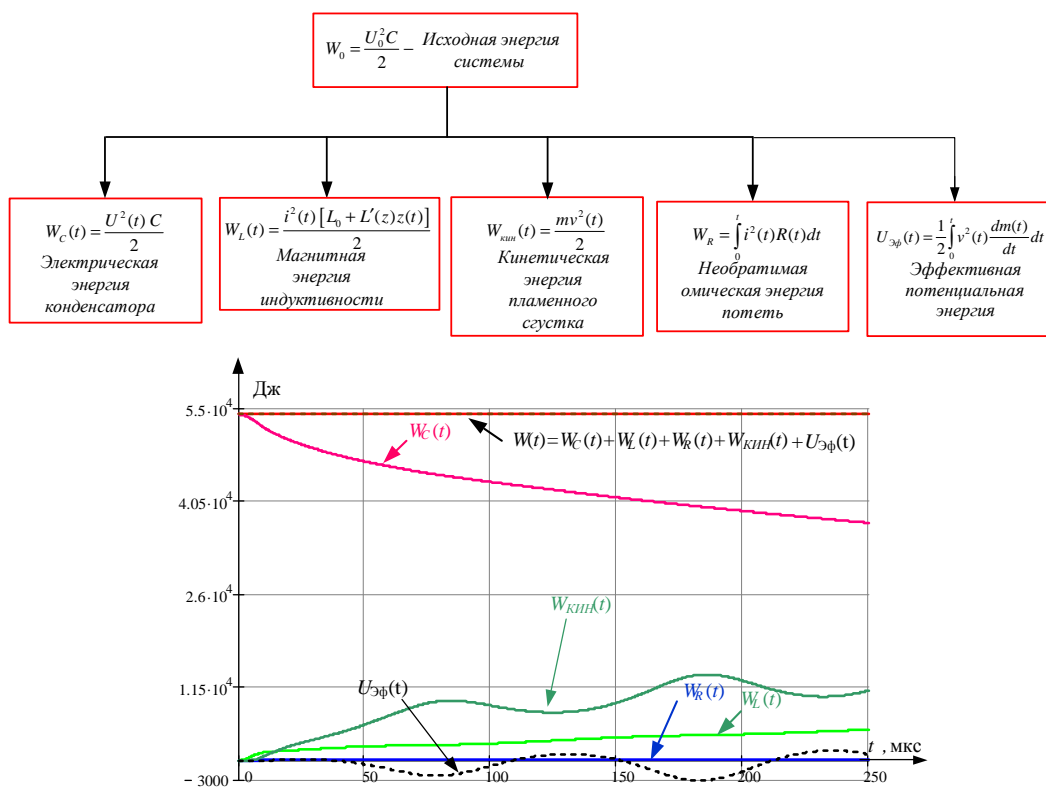


Рис. 8. Схема распределения энергии в плазменном ускорителе с учетом эрозии

Расхождения с экспериментальными данными составили около 20 %, что согласуется с экспериментаторами и говорит об адекватности разработанной модели.

Вторая глава «Моделирование термодинамических параметров коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ)» посвящена решению одномерного уравнения гидро-газодинамики для КМПУ, с помощью модифицированного алгоритма Лакса – Уэндровфа с оптимальным выбором параметра регуляризации - искусственной вязкости. На основе предложенного алгоритма в программно интегрируемой среде MathCAD разработан комплекс программ для решения одномерной задачи гидрогазодинамики.

При вылете плазменной субстанции (поршня) из ствола, перед ее головной частью образуется отсоединенная ударная волна. В работе произведена оценка термодинамических параметров за ударной волной. При моделировании движения газовой волны на твердую преграду, она была заменена другой эквивалентной моделью - движением двух одинаковых волн на встречу друг другу. Для решения одномерной нестационарной газодинамической задачи использовались уравнения сохранения массы, импульса и энергии, записанные в дивергентной форме:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(u\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho(\varepsilon + \rho u^2 / 2))}{\partial t} + \frac{\partial(u(\rho\varepsilon + \rho u^2 / 2 + p))}{\partial x} = 0 \end{cases},$$

здесь ρ - плотность газа, p - давление газа, u - скорость распространения газа, ε - внутренняя энергия газа, t, x - время и координата соответственно.

Для численного решения системы уравнений использовался алгоритм Лакса – Уэндролфа:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(u\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial(\rho(\varepsilon + \rho u^2 / 2))}{\partial t} + \frac{\partial(u(\rho\varepsilon + \rho u^2 / 2 + p))}{\partial x} = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \mathbf{s} = \begin{pmatrix} \rho \\ u\rho \\ \rho(\varepsilon + \rho u^2 / 2) \end{pmatrix} \\ \mathbf{f}(\mathbf{s}) = \begin{pmatrix} u\rho \\ \rho u^2 + p \\ u(\rho\varepsilon + \rho u^2 / 2 + p) \end{pmatrix} \end{cases} \rightarrow \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{s})}{\partial x} = 0$$

где \mathbf{s} - вектор консервативных переменных, $\mathbf{f}(\mathbf{s})$ - вектор потока.

Суть алгоритма в том, что дифференциальные уравнения в частных производных заменяются конечными разностями. Из-за наличия сильных ударных волн в конечных разностях проявляется неустойчивость, то есть влияние высокочастотных шумов. К данному алгоритму была добавлена оптимальная искусственная вязкость. Величина искусственной вязкости определялась из невязки-рассогласования. Точное известное решение задачи Сода сравнивалось с нашим алгоритмом, если рассогласования составляли не более 10%, что соответствует ошибке измерения экспериментальных данных, то коэффициент регуляризации (искусственная вязкость) считался оптимальным.

Новизна алгоритма заключается в выборе оптимальной искусственной вязкости, используя точное известное решение задачи Сода, где рассогласования составляю не более 10% с уровнем шума.

Ниже приводятся результаты работы алгоритма.

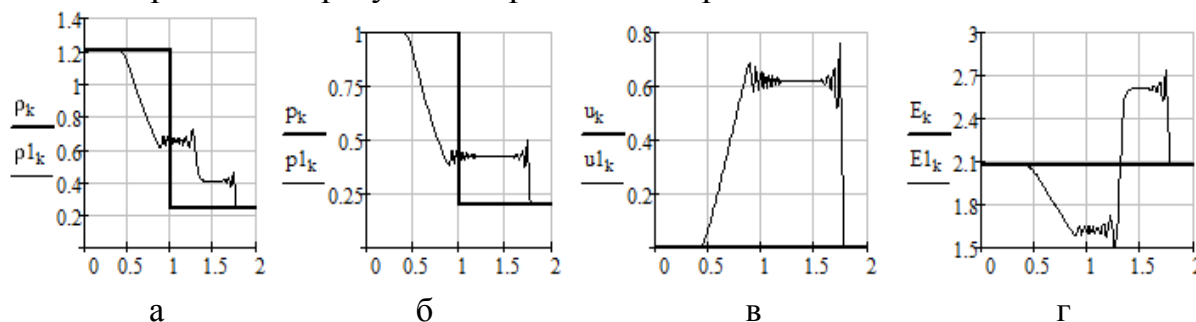


Рис. 9. Восстановленные термодинамические параметры ударной волны и волны разряжения с неоптимальной вязкостью $\mu = 0,5 \cdot 10^{-1}$: а) плотность; б) давление; в) скорость; г) энергия

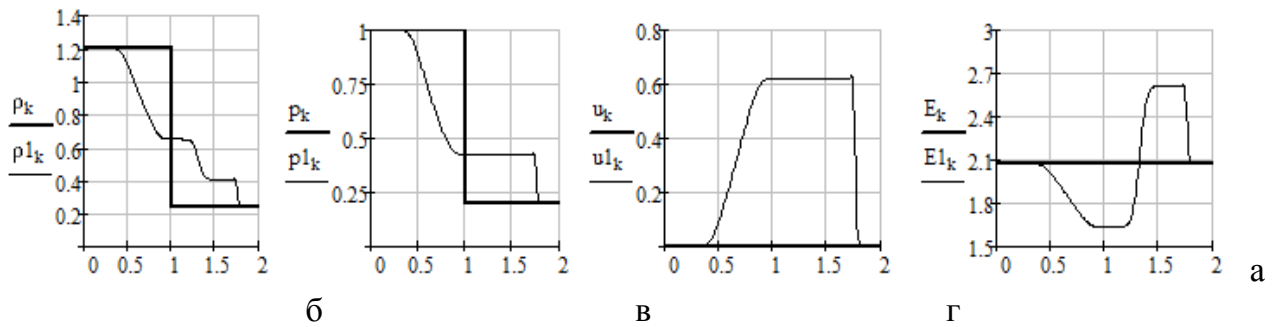


Рис. 10. Восстановленные термодинамические параметры ударной волны и волны разрежения с оптимальной вязкостью $\mu = 7 \cdot 10^{-1}$: а) плотность; б) давление; в) скорость; г) энергия

Проверка работы алгоритма была проведена на расчете критических параметров – давление торможения p_T , плотность торможения ρ_T и температура торможения T_T , при заданных начальных данных невозмущенного газа $p_0 = 1/\gamma$, $\rho_0 = 1$, $T_0 = 1$ (в относительных единицах), $\gamma = 5/3$ - показатель политропы и заданном числе Маха M_0 .

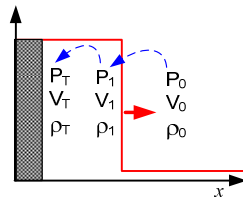


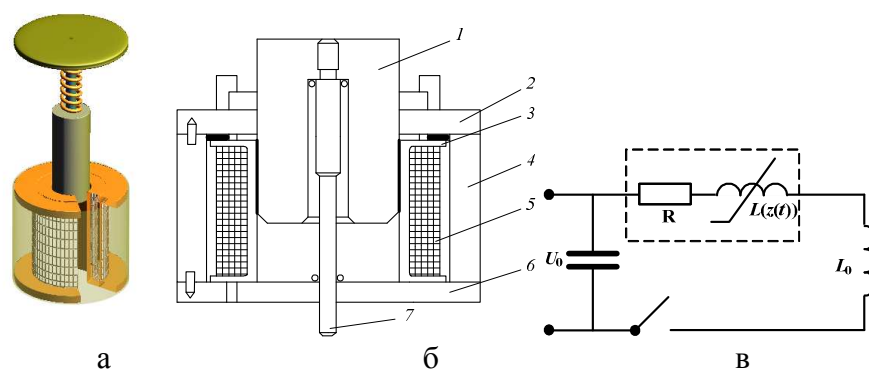
Рис. 11. Расчет критических параметров ударной волны

Был проведен анализ сравнения инженерного расчета, используя адиабаты Гюгонио-Ренкина (ударная волна) и Пуассона (волна разрежения), и расчета по программе.

При расчете термодинамических параметров невозмущенная среда считалась одноатомным газом.

Третья глава «Моделирование электромагнитного привода вакуумного выключателя (ЭПВВ)», посвящена построению и исследованию математической модели ЭПВВ и исследованию физических явлений в электромагнитном приводе методами вычислительного эксперимента. Исследование осуществлялось на примере модельного ВВ типа ВБСК-10-20/1000, соответствующего реально используемому на практике устройству.

На рисунке 12 представлена упрощенная модель ЭПВВ. Для описания процессов происходящих в ЭП представили его как электромеханическое устройство. ЭПВВ имеет коаксиальную систему, схожую электротехническую схему замещения и физические процессы с рассмотренным ранее устройством КМПУ.



1 – якорь (сталь), 2 – плита верхняя (сталь), 3 – каркас катушки (дерево), 4 – плита боковая, 5 – токовая обмотка из меди, 6 – плита нижняя, 7 – вал (дерево)

Рис.12. Упрощенная модель электромагнитного привода вакуумного выключателя: а) сечение электромагнитного привода; б) модель электромагнитного привода; в) электротехническая схема замещения привода

Новизна алгоритма заключается в расчете динамики изменения индуктивности, на основе которой оптимизируются параметры ЭПВВ.

Используется интерфейс программы (рис.2), позволяющей рассчитывать переменную индуктивность катушки электромагнитного привода вакуумного выключателя (ЭПВВ) (левое окно).

Используя формулу (1) и зная геометрические параметры ЭПВВ (рис. 12 б), получим динамику изменения расположения якоря по отношению к катушке, которую можно проследить на рисунке 13:

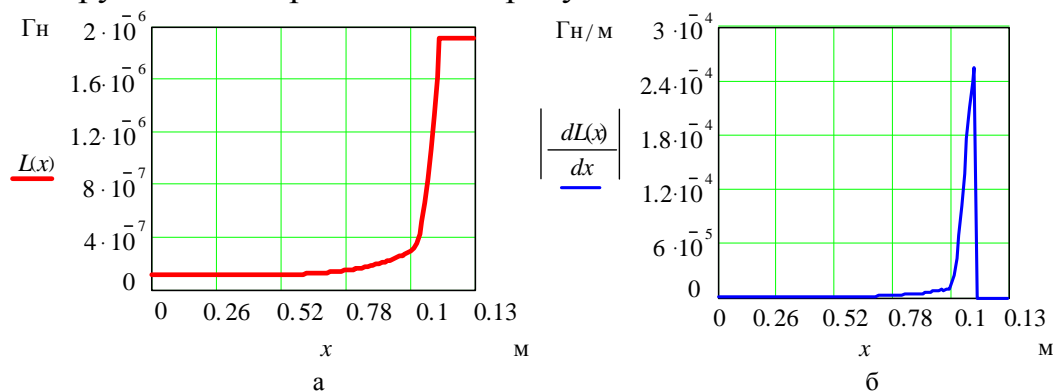


Рис.13. Динамика изменения расположения якоря по отношению к катушке: а) зависимость индуктивности $L(x)$ от положения якоря x ; б) погонная индуктивность $|dL(x)/dx|$

В результате была определена начальная индуктивность катушки $L_0 = 1,156 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Используя аналогию между геометрическими конфигурациями разработанной модели электромеханической системы КМПУ и ЭПВВ, где

$g = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ - ускорение свободного падения, $k = 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{кг} \cdot \text{м}}$ - коэффициент

жесткости пружины, получаем результаты расчетов, которые приведены ниже.

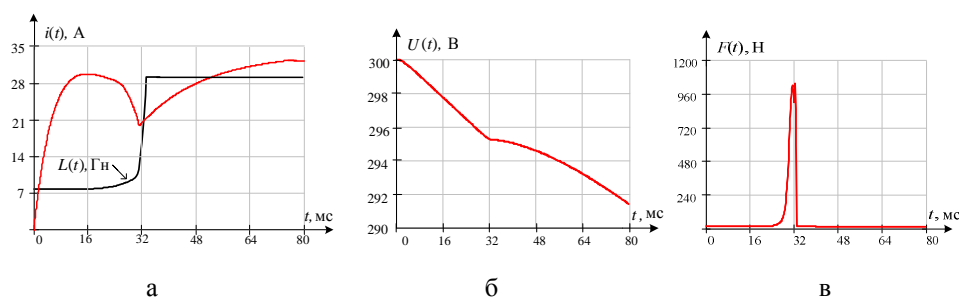


Рис.14. Результаты расчетов при значениях параметров цепи: $C = 7700 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$, $L_0 = 1,156 \text{ Гн}$, $L' = L(t) \text{ Гн}$, $U_0 = 300 \text{ В}$, $m_0 = 1.5 \text{ кг}$: а) ток; б) напряжение конденсатора в) сила

Первый максимум у тока (см. рис.14 а) – до включения выключателя, говорит о том, какой ток необходим, чтобы выключатель надежно включился (после него наблюдается снижение тока до локального минимума в момент касания якорем стопа и фиксации выключателя на защелке включения). Его можно назвать необходимым током включения. Второй максимум – после включения, показывает, как много энергии осталось в конденсаторе после включения выключателя.

В качестве правильности работы алгоритма расчета проведена проверка баланса энергии рассматриваемой системы согласно (2).

Четвертая глава «Аналоговое моделирование картин электромагнитных полей электротехнических устройств» посвящена сведению задач решения дифференциальных уравнений в частных производных к хорошо разработанным методам исследования динамических систем, которые позволяют сопоставить уравнению в частных производных динамическую систему с последующим ее моделированием с помощью электротехнических устройств, аналого-цифровых комплексов. А также рассматривается моделирование картин электромагнитных полей на основе переходных процессов без наличия ложных скачков при построении линий равного тока (рис. 15 а, рис. 16 а). Моделирование проводилось в схемотехнической программе MATLAB – Simulink.

Для наглядности на рисунке 15 приведена очевидная геометрическая интерпретация метода.

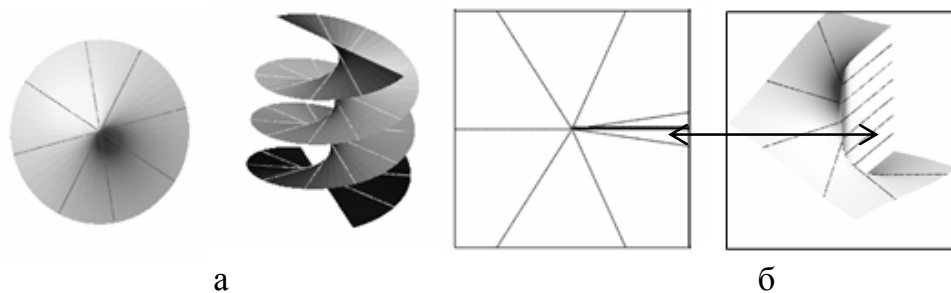


Рис.15. Геометрическая интерпретация распределения линий тока линейного заряда: а) для динамической системы; б) для уравнений в частных производных

Решение уравнения Пуассона для электростатического поля:

$$\phi(x, y) = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + i \cdot \xi}}\right),$$

где $\phi(x, y)$ - электрический потенциал, $q = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл - величина заряда, ε - диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ - электрическая постоянная, $\xi = 10^{-6}$ - регуляризирующий коэффициент.

В главе рассмотрен пример расчета поля трех линейных зарядов.

Заданы декартовы координаты трех зарядов: $x = (3 \ 1 \ -1)^T$; $y = (4 \ -1 \ 3)^T$.

Проекция вектора напряженности электростатического поля на оси x и y соответственно равны: $E_x(x, y) = \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x}$; $E_y(x, y) = \frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y}$.

Новизна алгоритма заключается в сведении дифференциальных уравнений в частных производных Лапласа и Пуассона к динамической системе – системе нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка на основе электротехнических схем замещения. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка осуществляется в схемотехнической среде MATLAB-Simulink.

Для плоского электростатического поля в параметрической форме имеем систему уравнений для линий равного потенциала:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -E_y(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = E_x(x, y) \end{cases}.$$

Для линий равного тока в параметрической форме:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = E_x(x, y) \\ \frac{dy}{dt} = E_y(x, y) \end{cases}.$$

Уравнение динамической системы в параметрической форме для линий равного потенциала и линий равного тока соответственно:

$$\mathbf{rotE} = 0 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E_y(x, y) \\ E_x(x, y) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{divE} = \tau \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x(x, y) \\ E_y(x, y) \end{pmatrix}.$$

В плоском случае динамическая система приобретает вид:

$$\mathbf{rotE} = 0 \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{dq_1}{dt} \\ \frac{dq_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E_2(q_1, q_2)H_1 \\ E_1(q_1, q_2)H_2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{divE} = \tau \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{dq_1}{dt} \\ \frac{dq_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1(q_1, q_2)H_2 \\ E_2(q_1, q_2)H_1 \end{pmatrix}$$

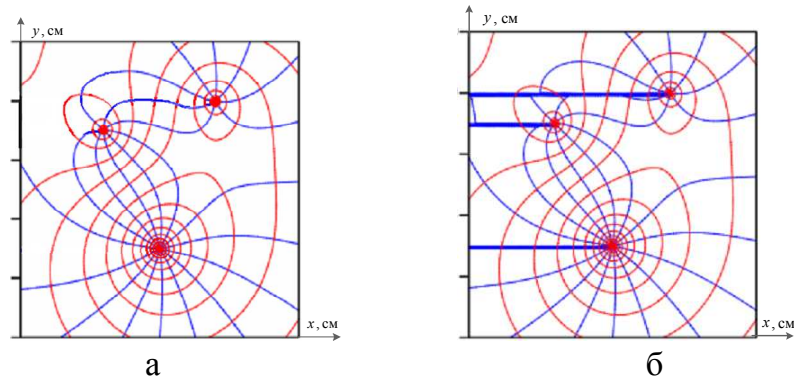


Рис.16. Фазовый портрет: а) с помощью динамической системы на фазовой плоскости; б) с помощью уравнений в частных производных

На рисунке 17 представлена реализация комплекса программ, позволяющего получить картину электромагнитных статических полей (рис. 17 д).

Пользователю предлагается выбор параметров блока входных данных, необходимых для реализации комплекса программ, для упрощения и понимания пользования данной программой.

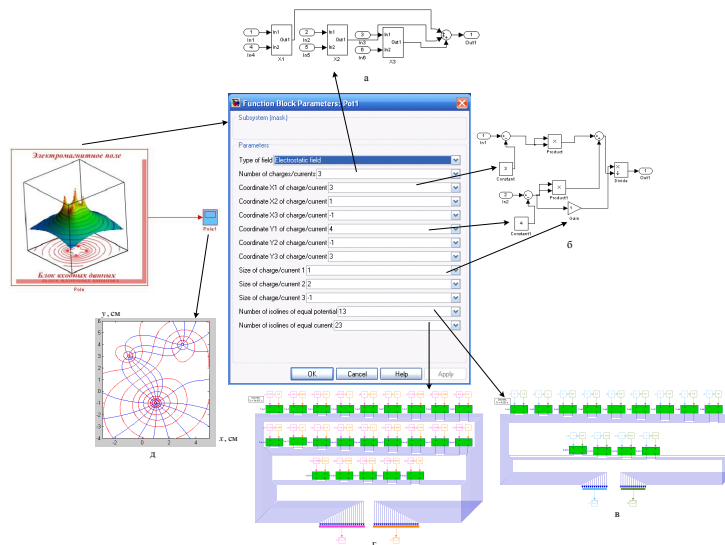


Рис.17. Всплывающее окно блока входных данных: а) количество зарядов; б) координаты и величина заряда; в) количество изолиний равного потенциала; г) количество изолиний равного тока; и картина поля в фазовой плоскости (д)

В заключении приводятся основные результаты проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена математическая модель процессов, происходящих в КМПУ и алгоритм расчета электрических и кинематических параметров на основе использования электротехнической схемы замещения.
2. Предложена модель потенциального барьера, позволяющая учитывать упругое отражение частиц о стенки плазматрона.

3. Разработан алгоритм и комплекс программ для расчета индуктивности сложной электродной системы на основе расчета энергии магнитостатического поля и использования языка C# и DLL MATLAB.
4. Показано отрицательное влияние величины индуктивности индуктора КМПУ на скорость плазменного сгустка – при увеличении индуктивности увеличивается продольная составляющая магнитного поля, следовательно, также увеличивается поперечная составляющая скорости заряженных частиц в плазменном сгустке.
5. Показано положительное влияние величины индуктивности индуктора КМПУ – при увеличении индуктивности последовательного электрического контура происходит стабилизация тока или увеличивается его сглаженность, стабилизируется неустойчивость плазмы, при этом усиливается трение частиц заряженных частиц об электрод-ствол, следовательно, увеличивается эрозия металла.
6. Показана минимально допустимая величина индуктивности индуктора КМПУ, ниже которой проявляются высокочастотные составляющие тока.
7. Разработан алгоритм моделирования газодинамических параметров процессов и оценка термодинамических параметров ударной волны плазменного газа, основанный на разностной схеме Лакса-Уэндролфа с введением искусственной вязкости, подавляющей неустойчивые высокочастотные колебания в решении.
8. Предложена математическая модель процессов, происходящих в ЭПВВ и алгоритм расчета электрических и кинематических параметров на основе использования электротехнической схемы замещения.
9. Разработан алгоритм и комплекс программ для расчета динамики изменения индуктивности ЭПВВ на основе расчета магнитостатического поля в разные интервалы времени.
10. Предложен алгоритм, позволяющий заменить решения дифференциальных уравнений в частных производных системой обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих нестационарные процессы.
11. Предложена структурная модель динамической системы для отрисовки картин электростатического и магнитостатического полей. Звеньями структурной схемы являются электротехнические схемы замещения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По материалам диссертационного исследования в соавторстве опубликовано 33 научные работы, в том числе 8 в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК. В опубликованных научных работах достаточно полно отражены основные научные результаты.

СТАТЬИ В ЖУРНАЛАХ, РЕКОМЕНДОВАННЫХ ВАК

1. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В., Русол Д.А. Метод расчета распределения зарядов сплошных пластин и пластин с отверстием в форме круга и форме сферических сегментов при наличии внешнего

- электростатического поля // Известия Томского политехнического университета, 2008. - т. 312, - № 4. - С. 70-75.
2. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В., Русол Д.А. Расчет распределения зарядов пластин при наличии внешнего несимметричного поля // Известия Томского политехнического университета, 2008. - т. 312, - № 4. - С. 75-80.
 3. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В. Расчет емкостей и зарядов плоских пластин и пластин в виде сферического сегмента // Проблемы энергетики. Казань, июль – август 2008. - №7-8/1. - С. 99-108.
 4. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В. Расчет распределения зарядов пластин при наличии внешнего поля // Проблемы энергетики. Казань, июль – август 2008. - №7-8/1. - С. 109-117.
 5. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Колчанова В.А. Евдокимов А.А. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Проблемы энергетики. Казань, март – апрель 2010. - №3-4/1. - С. 3-13.
 6. Исаев Ю.Н., Колчанова В.А., Васильева О.В. Расчет электростатического поля озонатора // Электричество, 2009. - т. - № 12. – С. 83-87.
 7. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Купцов А.М. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Известия Томского политехнического университета, 2010. - т. 317, - № 4. - С. 33-41.
 8. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Колчанова В.А. Моделирование и оценка термодинамических параметров плазменного поршня на фронте ударной волны с помощью компьютерных технологий // Дистанционное и виртуальное обучение. Москва, февраль 2011. - №2. – с. 38-54.

ДОКЛАДЫ НА КОНФЕРЕНЦИЯХ И СИМПОЗИУМАХ

1. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Дедуктивная электротехника – энергетический подход // Сборник трудов II Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», 17 – 19 октября 2007 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 213-216.
2. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В. Представление распределения зарядов на поверхности проводника в собственный базис электродной системы // Сборник трудов II Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», 17 – 19 октября 2007 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 211-212.
3. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В. Расчет распределения зарядов и емкостей плоских пластин и пластин в виде сферического сегмента на основе полиномиального разложения // Сборник трудов II Международной научно-технической конференции

- «Электромеханические преобразователи энергии», 17 – 19 октября 2007 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 207-210.
4. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Аналоговое моделирование с использованием методов дифференциальной геометрии // Сборник трудов XII Всероссийской научно-практической конференции «Научное творчество молодежи», - Вып. Ч.1 - Анжеро-Судженск, 18-19 апреля 2008. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. - С. 11-14.
 5. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Аналоговое моделирование с помощью динамических систем // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2008», - Томск, 5-8 мая 2008. - Томск: В-Спектр, 2008. - т. 4. - С. 34-36.
 6. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Синтез электрических цепей на основе энергетического подхода // Сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», - Томск, 24-28 марта 2008. - Томск: ТПУ, 2008. - т. 1. - С. 17-18.
 7. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Оптимальные методы расчетов в электротехнике на основе энергетических критериев // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность», 9-11 декабря 2008г., – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 24-27.
 8. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Колчанова В.А., Васильева О.В. Алгоритм восстановления распределения зарядов по поверхности проводника и расчет емкостей электродов неканонической формы // Сборник трудов XIV Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность», 9-11 декабря 2008г., – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 45-48.
 9. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Синтез аналоговых схем для моделирования электромагнитных полей // Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ - 2008)» - Анжеро-Судженск, 14-15 ноября 2008. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2008. - С. 99-102.
 10. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Преимущества метода дифференциальной геометрии и синтеза аналоговых схем для моделирования электромагнитных полей // Тинчуринские чтения: Материалы докладов IV Международной молодежной научной конференции - Казань, 22-24 апреля 2009. - Казань: КГЭУ, 2009. – С. 276-278.
 11. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Применение энергетического подхода для исследования синтеза электрических цепей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: Материалы II Всероссийской молодежной научно-технической конференции - Омск, 21-22 апреля 2009. - Омск: ОмГТУ, 2009. – С. 20-23.

12. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Исследование переходных процессов для аналогового моделирования электромагнитных полей // Современные техника и технологии: Труды XV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых – Томск, 4 мая – 8 мая 2009 г. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 24-26.
13. Васильева О.В., Исаев Ю.Н., Колчанова В.А. Расчет распределения тока по поперечному сечению рельсотрона // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции - Томск, 13-16 октября 2009. - Томск: ТПУ, 2009. – С. 363-367.
14. Васильева О.В., Исаев Ю.Н., Колчанова В.А. Расчет индуктивности на основе расчета электромагнитного поля // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции - Томск, 13-16 октября 2009. - Томск: ТПУ, 2009. – С. 381-384.
15. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Расчет индуктивности методом интегральных уравнений с применением информационных технологий // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: Материалы XIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов - Рязань, 19-20 ноября 2009. - Рязань: РГРТУ, 2009. - С. 357-358.
16. Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Колчанова В.А. Расчет индуктивности методом интегральных уравнений // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ - 2009): Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием - Анжеро-Судженск, 12-13 ноября 2009. - Томск: ТГУ, 2009. - С. 41-45.
17. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Расчет индуктивности модели коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Научное творчество молодежи: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции - Анжеро-Судженск, 15-16 апреля 2010. - Томск: Издательство Томского университета, 2010. - С. 201-203.
18. Исаев Ю.Н., Васильева О.В., Кулешова Е.О. Разработка математической модели электромагнитного привода вакуумного выключателя // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 12-16 апреля 2010. - Томск: ТПУ, 2010. - С. 25-26.
19. Сивков А.А., Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Разработка математической модели коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 12-16 апреля 2010. - Томск: ТПУ, 2010. - С. 27-28.

20. Sivkov A.A., Isaev Yu.N., Vasileva O.V., Kolchanova V.A., Evdokimov A.A. Mathematical Modeling of Coaxial Magneto Plasma Accelerator // 16th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings - Tomsk. - September 19-24, 2010. - Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS. - 2010. - P. 69-71.
21. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Моделирование электромеханической части коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2010): Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием - Анжеро-Судженск, 19-20 ноября 2010. - Томск: Издательство Томского университета, 2010. - С. 84-88.
22. Васильева О.В., Колчанова В.А. Расчет баланса энергии коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Научно-исследовательские проблемы в области энергетики и энергосбережения: Материалы всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи - Уфа, 2-3 ноября 2010. - Уфа: УГАТУ, 2010. - С. 120-122.
23. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях – Новосибирск, 3-5 декабря 2010. – Новосибирск: НГТУ, 2010. Часть 1 – С. 54-56.
24. Исаев Ю.Н., Васильева О.В. Оценка термодинамических параметров за ударной волной в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе // Научное творчество молодежи: Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции - Анжеро-Судженск, 28-29 апреля 2011. Ч.1. - Томск: Издательство Томского университета, 2011. – С.54-57.
25. Васильева О.В., Исаев Ю.Н. Динамика заряженных частиц в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых - Томск, 18-22 апреля 2011. - Томск: ТПУ, 2011. – С.27-31.

