

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию Сивака Сергея Андреевича «Разработка алгоритмов численного решения задач электромагнетизма с использованием скалярных и векторных граничных элементов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

### **1. Актуальность темы**

Для выполнения требований точности изготовления элементов магнитной структуры ускорителей заряженных частиц необходимы высокоточные вычисления магнитного поля, вихревых токов в момент изменения энергии ускорителя и т.д. Поэтому разработка комплекса программ, позволяющих существенно повысить точность математического моделирования, в данный момент, несомненно, является актуальным.

### **2. Научная новизна работы**

Автором диссертационной работы разрабатываются алгоритмы совместного использования векторного и скалярного методов граничных и конечных элементов для повышения эффективности расчета электромагнитных полей с оценкой влияния вихревых токов, что существенно расширяет возможности расчетов реальных магнитных элементов. Предлагаемые в работе способы моделирования на основе векторного метода граничных элементов являются более точными при аппроксимации вихревых токов и не требуют построения пространственной сетки.

### **3. Степень обоснованности научных положений**

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, является достаточной. Достоверность результатов не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы изложены в печатных работах, включая статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Основные результаты были доложены автором на 5 конференциях, из которых две конференции являются всероссийскими, две – международными. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 публикации выпущенные в журналах, входящих в перечень ВАК. Работы выполнялись при финансовой поддержке РФФИ.

### **4. Практическая ценность**

Практическая ценность диссертации заключается в разработке эффективных вычислительных схем, позволяющих учитывать вихревые токи при проведении расчетов для трехмерных моделей магнитов сложной формы. Эффективность комплекса программ и его практическая ценность были успешно

продемонстрированы при расчете вихревых токов в реальных магнитах в ИЯФ СО РАН.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (60 наименований), и приложения. Общий объем диссертации 129 страниц, включая 48 рисунков.

**Во введении** дан достаточно полный обзор литературы, посвященной развитию методов граничных элементов, а также методов оптимизации расчетов, основанных на иерархических матрицах – в частности, быстрый мультипольный метод и метод кросс-аппроксимации. Отмечается целесообразность использования векторного метода граничных элементов для учета вихревых токов и скин эффекта.

**В главе 1** дается описание основ векторного метода граничных элементов и векторного метода конечных элементов. Там же рассматривается совместное использование этих методов для учета вихревых токов.

**В главе 2** приводится описание алгоритмов и методов построения локальных матриц векторного метода граничных элементов. Особое внимание уделяется теоретическому обоснованию выбранных подходов для решения задачи получения значений элементов локальных матриц.

**В главе 3** приводится описание методов повышения эффективности расчетов при использовании методов граничных элементов. На примере скалярного метода граничных элементов для решения уравнения Гельмгольца показывается, что при использовании предлагаемых автором методов вычислений коэффициентов в мультипольном разложении возможны заметные ускорения используемых процедур.

**В главе 4** автором описывается встраивание разработанных алгоритмов и методов в программный комплекс Quasar. Кратко излагается структура программного комплекса, описываются разработанные автором программные реализации предлагаемых алгоритмов.

**Глава 5** посвящена верификации разработанных алгоритмов и методов. Излагаются примеры расчетов для модельных задач с известным аналитическим решением, а также производится сравнение с методами, разработанными ранее другими авторами.

**Глава 6** посвящена проблеме учета вихревых токов в дипольном магните сложной формы с совместным использованием скалярных и векторных граничных и конечных элементов. Оценивается влияние вихревых токов при подъеме тока от 25% рабочей нагрузки до 100%. Для оценки точности расчетов проводится сравнение результатов на вложенных пространственных сетках. Кроме того, для снижения вычислительных затрат производится подбор числа частот в разложении функции тока в ряд Фурье и делаются попытки аппроксимации решения на высоких частотах путем экстраполяции результатов.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

В приложении А приводятся основные тождества теории поля

В приложении Б приводится документ о внедрении результатов диссертационной работы при успешном использовании разработанных алгоритмов и методов в рамках программного комплекса Quasar для расчетов вихревых токов, возникающих при включении магнитов в ИЯФ СО РАН.

Список литературы состоит из 60 ссылок на статьи, относящиеся к моделированию электромагнитных процессов.

Работа выполнена на высоком профессиональном уровне и представляет собой довольно полное исследование поставленной задачи. Результаты диссертации изложены в печатных работах (9 работ, в списке литературы 30, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60), в том числе 3 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК (30, 53, 60). А также 6 работ, опубликованных в других изданиях и сборниках трудов конференций (54, 55, 56, 57, 58, 59). Цель поставленной задачи – разработка вычислительной схемы, основанной на векторном методе граничных элементов и позволяющей учитывать вихревые токи в подобластях с различной геометрией и параметрами среды – выполнена и успешно проверена как на модельных задачах, так и на реальных магнитах (в частности, на большом дипольном магните, который изготавливается в ИЯФ СО РАН для детектора PANDA).

Автореферат соответствует диссертации.

Из замечаний к работе можно отметить:

1. Эффективность разработанного алгоритма вращения коэффициентов мультипольного ряда рассматривается для скалярного МГЭ на примере решения модельной задачи для уравнения акустики. Можно только догадываться, что в дальнейшем автор все же планирует реализовать этот алгоритм и для векторного МГЭ, и что исследование проводилось, видимо, с целью оценки необходимости этой, безусловно, достаточно трудоемкой работы, поскольку в самой диссертации об этом почему-то не сказано.
2. На рис. 6.3 на стр. 96 показана четверть магнита. В диссертации нигде не указано, какие из двух типов симметрии, рассматриваемых автором в Главе 3, были заданы на плоскостях симметрии.
3. В выводах по Главе 5 на стр. 93, видимо, присутствует опечатка, и речь все же идет об обосновании применения метода граничных, а не конечных элементов.
4. На странице 96 указано, что максимальная величина силы тока в магните 400 кА. Однако, судя по этому значению, приведен не ток на виток, а суммарный ток (умноженный на число витков), единица измерения которого, видимо, не амперы, а ампер-витки.

5. Несмотря на общую высокую грамотность изложения материала диссертации, в тексте встречаются и неизбежные опечатки, такие как: «при решении модельных задачах» на стр. 7, «вихривые токи» на стр. 9, также в тексте встречается большое количество лишних запятых. При широких возможностях, которые дают современные средства редактирования текста, этих досадных ошибок можно было бы и избежать. Также на стр.13 вместо слова «постановка», видимо, предполагалось использовать - «подстановка».
6. Следовало бы также более чётко сформулировать, что такое программный комплекс QUASAR и какое место он занимает среди большого количества других расчётных программ, так как в открытых источниках не удаётся найти ссылок на него. Это название фигурирует в основном в диссертационных работах сотрудников НГТУ. В качестве пожелания, хотелось бы, если не запатентовать это название в качестве интеллектуальной собственности, то хотя бы, опубликовать отдельную статью, на которую можно было бы ссылаться при дальнейшей разработке этого программного комплекса.

Однако, указанные замечания никак не снижают общую ценность работы, которая представляет собой законченное исследование. Работа выполнена на высоком уровне, удовлетворяет всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям. В диссертации решена задача, имеющая значение для более качественного и точного расчета магнитных элементов ускорителей. Автор несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент:  
Заведующий лабораторией 8-2  
ИЯФ СО РАН,  
Ведущий научный сотрудник,  
доктор технических наук

Шкаруба Виталий Аркадьевич

30.05.2022

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева,11, ИЯФ СО РАН  
Телефон: (383) 329-49  
E-mail: [shkaruba@mai](mailto:shkaruba@mai)

Подпись Шкарубы В.  
Учёный секретарь ИЯ  
К.ф.-м.н.  
М.П.

Резниченко А.В.

30.05.2022

Отзыв получен  
в совет 06.06.2022

с отзывом ознакомлен  
07.06.2022 Силь