

ОТЗЫВ

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

В диссертационной работе Сивак Сергей Андреевич поставил цель разработать вычислительную схему, основанную на векторном методе граничных элементов, позволяющую учитывать вихревые токи в подобластях с различной геометрией и параметрами среды. Для достижения поставленной цели автору потребовалось разработать вычислительную схему на базе формулы Стрэттона-Чу на основе векторного метода граничных элементов, позволяющую совместное использование со скалярным методом граничных элементов. Реализовать полученную вычислительную схему в программном комплексе Quasar. Произвести сравнение эффективности полученной вычислительной схемы с реализованными ранее в программном комплексе Quasar схемами.

В диссертационной работе на защиту выносятся:

1. Разработанная вычислительная схема на базе формулы Стрэттона-Чу на основе векторного метода граничных элементов, позволяющая совместное использование со скалярным методом граничных элементов. Работоспособность данной схемы продемонстрирована при решении модельной задачи, а также при анализе влияния вихревых токов на магнитное поле в дипольном магните сложной формы.
2. Новый подход к численному интегрированию сингулярных функций, возникающих при вычислении локальных матриц для векторного метода граничных элементов.
3. Новый алгоритм вращения коэффициентов мультипольного ряда в быстром мультипольном методе.
4. Метод учёта симметрии для вычислительной схемы на базе формулы Стрэттона-Чу на основе векторного метода граничных элементов, позволяющей совместное использование со скалярным методом граничных элементов.
5. Программная реализация перечисленных выше вычислительных схем, алгоритмов и методов, встроенная в программный комплекс Quasar.

Актуальность темы

При численном решении задач электромагнетизма для дипольных магнитов сложной формы в ряде случаев возникает необходимость учёта влияния вихревых токов и скин-эффекта на поле магнитной индукции. Это в свою очередь приводит к потребности сгущать расчётную сетку к границам расчётной

области. В результате расчёты необходимой точности могут проводиться только при наличии значительного объёма оперативной памяти, зачастую недоступного для рабочих станций. Использование векторных граничных элементов (ВМГЭ) при учёте вихревых токов требует построения сетки только на границе расчётной области. Таким образом, объём расчётной области не участвует в дискретизации, что позволяет уменьшить число неизвестных и существенно сократить необходимый для расчётов объём оперативной памяти.

Реализация векторного метода граничных элементов сопряжена с применением сложных математических алгоритмов и необходимостью вычисления несобственных интегралов. В диссертационной работе Сивака Сергея Андреевича подробно разобраны способы вычисления несобственных интегралов и представлен пример решения реальной задачи учёта вихревых токов для магнита сложной формы.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, 6-ти глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. В конце глав присутствуют выводы по ним. **Автореферат** в достаточной мере отражает основные идеи и результаты диссертационной работы. Основные результаты диссертации **опубликованы** в 9 работах, 3 из которых в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатских диссертаций, а также 3 публикации, индексируемые в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Scopus. Авторские права на разработанные алгоритмы подтверждаются свидетельством о регистрации программы для ЭВМ. Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях.

Общий объём основной части диссертации составляет 129 страниц и включает 48 рисунков, 30 таблиц и список использованных источников из 60 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, кратко описаны методологии и методы исследований, перечислены положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и информация о структуре работы и личном вкладе автора диссертации.

В Главе 1 содержится описание модели, учитывающей вихревые токи при гармоническом источнике электромагнитного поля. Вводится определение граничного оператора Гамильтона. Приводится описание векторного метода граничных элементов с использованием оператора Стеклова-Пуанкаре. Излагается способ комбинирования векторного метода граничных элементов с векторным методом конечных элементов.

Глава 2 посвящена вычислению локальных матриц. Приводится формула интегрирования по частям для векторно-значных функций, определённых на

границе некоторой трёхмерной области. Произведён анализ особенностей интегрируемых функций. Для упрощения взятия интегралов произведено сведение всех несобственных интегралов к интегралам от потенциалов простого и двойного слоёв.

Глава 3 посвящена повышению эффективности скалярного и векторного методов граничных элементов. Кратко изложены общие принципы быстрого мультипольного метода, приводится алгоритм оптимизации построения коэффициентов частичной суммы мультипольного ряда при переносе центра мультипольного разложения. Описывается схема комбинирования векторного и скалярного методов граничных элементов с использованием векторного и скалярного операторов Стеклова-Пуанкаре. Излагается подход к учёту симметрии относительно плоскости для векторного и скалярного методов граничных элементов.

Глава 4 посвящена встраиванию новых программных модулей в существующий программный комплекс Quasar.

Глава 5 посвящена верификации разработанных алгоритмов и тестированию программного кода. Верификация проводилась путём сравнения с решениями задач, которые ранее были предложены другими авторами, сравнения численного решения с известным аналитическим решением, сравнения с ранее использованными методами при решении модельных задач.

В Главе 6 приводится решение задачи моделирования вихревых токов в дипольном магните сложной формы. При решении данной задачи используется решение гармонических задач, возникающих при разложении функции тока в ряд Фурье.

В Заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Научная новизна

Автором на базе формулы Стрэттона-Чу разработана вычислительная схема на основе векторного метода граничных элементов, позволяющая совместное использование со скалярным методом граничных элементов, с векторным и скалярным методами конечных элементов.

Предложен авторский алгоритм вращения коэффициентов мультипольного ряда для скалярного метода граничных элементов при решении уравнения Гельмгольца на основе быстрого мультипольного метода.

Предложен новый подход к интегрированию сингулярных функций, возникающих при вычислении локальных матриц в векторном методе граничных элементов.

Автором разработан метод учёта симметрии для вычислительной схемы на базе формулы Стрэттона-Чу и векторного метода граничных элементов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов подтверждается решением модельных задач и сравнением полученных результатов с опубликованными результатами других авторов. Кроме того, на основе модельной задачи проводится сравнение расчётов на базе комбинации векторного и скалярного методов граничных элементов с расчётами на базе уже реализованных в комплексе Quasar расчётных схем.

Теоретическая значимость полученных результатов

Научная значимость результатов заключается в разработанных новых численных схемах на основе векторного метода граничных элементов и его комбинации со скалярным методом граничных элементов.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость результатов заключается в доработке программного комплекса Quasar, после которой стало возможным проведение эффективного моделирования затухания вихревых токов в дипольном магните сложной формы. До внедрения новой вычислительной схемы проведение таких исследований с помощью одной рабочей станции было затруднительно.

Общие замечания по диссертационной работе

По диссертационной работе в целом имеются следующие замечания:

1. В диссертации автор достаточно неаккуратно соблюдает правила пунктуации и склонения, в частности:
 - 1.1. Титульный лист, в «доктор технических наук, профессор, Рояк Михаил Эммануилович» запятая после слова «профессор» лишняя.
 - 1.2. Страница 6, строка 10 снизу, в «...метода в программных комплексах Quasar...» использовано неверное окончание, следовало использовать «программный».
 - 1.3. Страница 7, перенос на новую строку в аббревиатуре ВМГЭ, перенос в аббревиатурах производиться не должен.
 - 1.4. Страница 9, строка 5 сверху, в «...Приводится описание ВМГЭ с использованием оператора Стеклова-Пуанкаре, который в свою очередь является...» следует обособлять запятыми «в свою очередь».
 - 1.5. Страница 16, строка 15 сверху, перед словом «что» должна быть запятая.
 - 1.6. Страница 17, строка 12 сверху, в «...тогда согласно [23; 25; 26] решение...» необходимо обособить запятыми «согласно [23; 25; 26]».
 - 1.7. Страница 28, строка 6 сверху, в «...и направленный во вне относительно...» слово «вовне» нужно писать слитно.

- 1.8. Страница 19, строка 13 сверху, в «...не меняет знак как и функция...» перед словом «как» должна быть запятая.
- 1.9. Страница 30, строка 5 сверху, перед словом «поскольку» следует поставить запятую.

И ещё несколько десятков подобных ошибок. Отдельно стоит упомянуть ошибку в названии раздела 3.3, в «...в скалярном и векторном метода граничных элементов...» нужно было использовать «методах».

2. Присутствуют огрехи в формулах и их описании, например:
 - 2.1. Страница 13, формула (1.16), по смыслу, должна быть на абзац ниже и стоять перед формулой (1.17).
 - 2.2. Страница 13, используется обозначение омега большое с чертой, которое нигде далее не применяется и не объясняется. Остаётся неясным, чем омега без черты отличается от омеги с чертой.
 - 2.3. Страница 43, формула (3.38), используется обозначение R с верхним индексом $-m$, далее по тексту индекс m без минуса.
 - 2.4. Страница 44, формула (3.41), приведение координат для z записано неправильно.
 - 2.5. Страница 54, предположительно для обозначения нормали использовано обозначение n с крышечкой, тогда как в остальных местах используется n с чертой.
 - 2.6. Страница 82, «...Коэффициент C_0 в выражении (5.19) равен $3.02251e-09$...», но в формуле (5.19) такой коэффициент отсутствует.
3. В работе присутствуют ошибки в терминологии. Например, страница 83, «...По бокам цилиндрической области...», следует писать «...На боковой поверхности цилиндрической области...». Также, страница 35, «...взятая вдоль касательного направления...», следует писать «...вдоль направления касательной...».
4. В работе присутствуют опечатки, которые искажают смысл, например:
 - 4.1. Страница 22, «...Уравнения (1.66), (1.67) и (1.68) позволяют комбинировать уравнения МКЭ и МГЭ...», что вряд ли, так как эти уравнения получены для ВМКЭ и ВМГЭ.
 - 4.2. На страницах 82 и 83 в тексте говорится о МКЭ и МГЭ, хотя формулы и графики приведены для ВМКЭ и ВМГЭ.
 - 4.3. Страница 84, таблица 5.13. В колонках обозначен МКЭ, тогда как на рисунках - ВМКЭ.
 - 4.4. Страница 86, перед таблицей 5.14, «...В таблицах 5.14 и 5.15 указано время решения задач с применением МБМ...». Скорее всего, имеется в виду БММ.
 - 4.5. Страница 93, «...Данный факт служит обоснованием применения ВМКЭ...», скорее всего, имелось в виду ВМГЭ.
 - 4.6. Страница 103, строка 2 сверху, «...для комбинированного ВМГЭ-скалярного МКЭ подхода...», но на рисунке 6.10, на который ссылаются, приводятся данные для ВМГЭ и скалярного МГЭ.
5. В работе присутствуют ошибки при оформлении рисунков, например:

- 5.1. Страница 51, рисунок 3.1, ось OZ для этапа 1 обозначена точкой, это не правильно.
- 5.2. Страница 65, рисунок 4.4, название класса в описании рисунка не соответствует изображённому на диаграмме.
- 5.3. Страница 93, рисунок 5.22, в подписи рисунка говорится об уровнях подробности x8 и x16, на самом рисунке приводятся только данные для x8.
6. Автор достаточно неаккуратно работает с источниками литературы. Например:
 - 6.1. Страница 5, «...Метод граничных элементов (МГЭ) используется на практике достаточно давно. Первое его упоминание восходит к работам [1—3]...», работа [3] от 2019 года, странно видеть её в одном ряду с работами от 1963 года.
 - 6.2. Страница 5, «...На сегодняшний день предпочтение отдаётся методам, основанным на постановке в форме Галёркина. Одними из первых работ, описывающих метод в данной постановке, можно считать [6—8]...», работа [7] от 2014 года, тогда как аналогичные работы [6, 8] от 1981 и 1996 годов. Вряд ли работы [7, 8] были одними из первых.
7. Страница 12, формула 1.10. Размерность магнитной постоянной в системе СИ — H/A^2 , также размерность может быть представлена в виде $V \cdot c \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$, но никак не $V \cdot c \cdot A^{-1}$.
8. На стр. 74 автор пишет «Интегрирование модифицированного потенциала двойного слоя было выполнено напрямую в [24]. При использовании прямого численного интегрирования модифицированного потенциала двойного слоя, посчитанного в соответствии с формулами, указанными в [24], отличия от представленных результатов на графике 5.3 не были обнаружены.». Не совсем ясно, почему так получилось. Учитывая, что существенные отличия все же наблюдались для модельной задачи с расчётной областью в виде куба, можно предположить, что существенным фактором является гладкость геометрии расчётной области, однако, автор явно это нигде не указывает.
9. В диссертации плохо раскрыты вопросы эффективности внедряемых подходов. При рассмотрении эффективности подходов необходимо одновременно учитывать скорость решения, расход оперативной памяти и ограничения рабочей станции, на которой производятся вычисления. Иначе, может получиться, что расход памяти сокращается за счёт кратного роста времени выполнения. Такое решение бывает иногда полезным, когда достигнуты ограничения по памяти доступной на рабочих станциях. Может сокращаться время выполнения за счёт кратного увеличения расхода памяти. Такое решение бывает полезным, когда ограничения по памяти незначительны. В других случаях удаётся заметно сократить потребление памяти и время вычислений. Такие исследования можно и нужно делать, особенно учитывая, что в комплексе Quasar уже должен быть функционал, необходимый для сравнения. Отсутствие

полных данных мешает тому, чтобы внедряемые подходы были оценены по достоинству. Следует более в ясном виде рассмотреть следующие вопросы:

- 9.1. Влияние применения БММ на расход памяти и времени. Желательно провести сравнения на расчётах с БММ и без БММ либо объяснить, почему такое невозможно.
- 9.2. Влияние оптимизации алгоритма вращения на расход памяти и времени. Желательно провести сравнения на расчётах с оптимизированным алгоритмом вращения и с алгоритмом вращения без оптимизации либо объяснить, почему такое невозможно.
- 9.3. Влияние интегрирования по частям на скорость выполнения вычислений, либо явно указать на то, что применение прямого интегрирования даёт ошибочный результат.
- 9.4. Влияние применения комбинации ВМГЭ и МГЭ одновременно на расход памяти и скорость выполнения по сравнению с уже реализованными в Quasar методами, либо явно указать на то, что исследования с необходимой точностью можно производить только с помощью комбинации ВМГЭ и МГЭ.

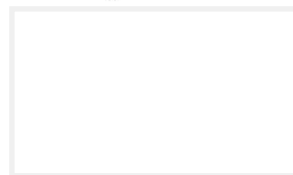
Данные недостатки не снижают качество проведённых исследований и не влияют на положительную оценку главных теоретических и практических результатов диссертации.

Заключение

Диссертация Сивака Сергея Андреевича является оригинальной завершённой научно-квалификационной работой, результаты которой можно квалифицировать как заметный вклад в области численного моделирования задач электромагнетизма. Диссертационная работа по своим задачам, цели, содержанию, методикам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 05.13.18. Считаю, что диссертация Сивака С. А. по своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и их научно-практической значимости удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертациям в соответствии с п.п. 9, 10 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842) в части, касающейся учёной степени кандидата наук, а сам её автор Сивак Сергей Андреевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, научный со-
трудник лаборатории интенсификации
процессов теплообмена федерального гос-
ударственного бюджетного
учреждения науки «Институт теплофизики
им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделе-
ния РАН»

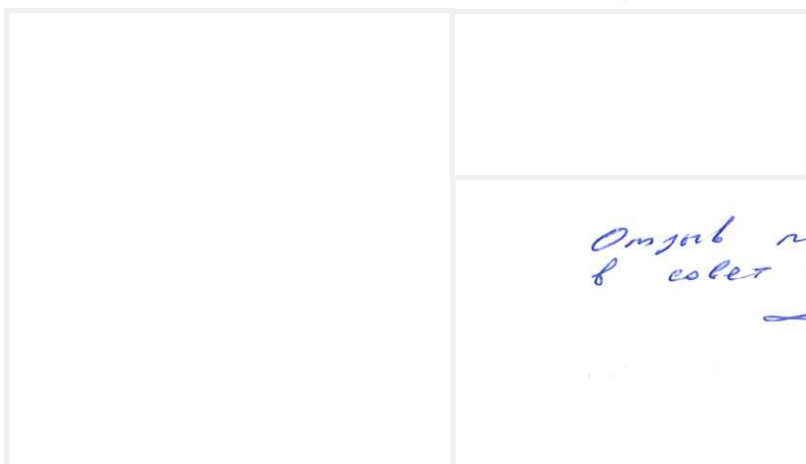
Митин Константин Алек-
сандрович




Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д.1
тел. +7 (383) 316-53-32, e-mail: mitin@ngs.ru

Я, Митин Константин Александрович, даю согласие на включение своих персональ-
ных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их даль-
нейшую обработку.

Подпись К.А. Митина удостоверяю:



10 июня 2022 г.

*Отзыв поступил
в совет 14.06.2022*


*с отзывом ознакомлен
16.06.2022 Силу*