

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Кондратьевой Натальи Сергеевны

«Разработка программного обеспечения для трёхмерного численного моделирования электромагнитных процессов с учётом вихревых токов в технических устройствах», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность темы. При создании источников синхротронного излучения 4-го поколения, о решении которых было недавно принято Правительством РФ, накладываются высокие требования на точность (порядка 10 мкм) изготовления элементов магнитной структуры (поворотных магнитов, квадрупольных и секступольных линз) для обеспечения стабильной работы ускорителя, устойчивого пучка электронов, соответствия реальной оптики ускорителя с расчётными параметрами. Для выполнения этих требований необходимы точные вычисления магнитного поля, включая мультипольные компоненты, остаточные поля с различной предысторией намагничённости, вихревые токи в момент изменения энергии ускорителя и т.д. Появление комплекса программ, которые могут рассчитать и предсказать поведение орбиты и характер изменения частот бетатронных колебаний пучка в различных ситуациях, в данный момент, несомненно, является актуальным.

Научная новизна работы. Доступных программ, которые могут учитывать предысторию намагничённости материалов при моделировании магнитных элементов для ускорителей, в настоящее время не существует, поэтому появление комплекса, представленного в диссертации, значительно расширяет возможности расчёта реальных магнитных элементов. Предлагаемый вычислительный комплекс, состоящий из алгоритмов на основе совместного использования конечных и граничных элементов, является более эффективным за счёт использования скалярного магнитного потенциала в непроводящих средах и векторного в проводящих.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, достоверность результатов не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы изложены в печатных работах, включая статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК. Основные результаты автором были доложены на 2-х российских и 6-ти международных конференциях, по материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 4 публикации в журналах, входящих в перечень ВАК. Работы выполнялись в рамках научных исследований при финансовой поддержке РФФИ (2 проекта), а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (2 проекта).

Практическая ценность диссертации заключается в разработке эффективных вычислительных схем и алгоритмов численного моделирования нестационарных электромагнитных полей с использованием

методов конечных и граничных элементов, позволяющие учитывать предысторию намагничивания. Эффективность комплекса программ и его практическая ценность были успешно продемонстрированы при расчёте вихревых токов и явлений гистерезиса в реальных магнитах в ИЯФ СО РАН.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (93 наименований) и приложения. Общий объем диссертации 80 страниц, включая 18 рисунков.

Во Введении дан достаточно полный обзор работ по численному моделированию в мире, основанных на методах граничных и конечных элементов. Отмечается, что в разработанном в CERN программном продукте ROXIE применяется совместный метод конечных и граничных элементов, однако используется постановка с векторным магнитным потенциалом, которая менее эффективная по сравнению с постановкой, предложенной в диссертации. Отмечается, что в диссертации предлагаются новые подходы для численного моделирования трёхмерных нестационарных электромагнитных процессов, позволяющие учесть вихревые токи и эффекты гистерезиса.

В Главе 1 обсуждается учёт вихревых токов в технических устройствах при совместном использовании векторного и скалярного магнитных потенциалов. Для реализации программного обеспечения, основанного на совместном использовании полного векторного потенциала и неполного скалярного магнитного потенциала, была разработана математическая модель, в которой были выделены проводящая подобласть, непроводящая подобласть, наложены условия сопряжения и введена вариационная постановка для данной задачи. Описанная формулировка задачи была реализована в программном комплексе Quasar. Результаты расчётов показали, что при определении задержки магнитного поля между полюсами, вызванной вихревыми токами при включении модельного магнитного диполя для случаев «идеального» магнита, цельного магнита и магнита с разрезом, разность магнитных полей не превышала 1%, что является достаточным для решения данной задачи.

Глава 2 посвящена постановке задачи с совместным использованием метода конечных элементов и метода граничных элементов. Была создана математическая модель этой постановки задачи, проведена дискретизация и реализована в программном комплексе Quasar при решении задачи, представленной в главе 1. Использование граничных элементов в непроводящей подобласти позволяет уменьшить число неизвестных по сравнению с векторными конечными элементами и воздушная среда, и токовые обмотки могут быть выключены из сетки.

В Главе 3 были проведены расчёты поля в элементах магнитных систем ускорителей с учётом гистерезиса. Была построена модель, основанная на разных описаниях эффекта гистерезиса, проведены сравнения расчёта и стандартных измерений при помощи трансформатора с кольцевым

сердечником из исследуемой стали. Полученные результаты показывают, что предложенная модель с параметрами, подобранными по симметричной петле гистерезиса, удовлетворительно аппроксимирует другие петли. Для проверки точности нового алгоритма, учитывающего остаточную намагниченность, были проведены магнитные измерения поля в зазоре типичного поворотного магнита при циклическом изменении тока в обмотке. Учёт эффектов гистерезиса при расчёте вихревых токов существенно повышает точности при численном моделировании электромагнитных процессов при изменении тока в магнитах ускорителя. Полученные результаты вычислительных экспериментов показали, что без учёта вихревых токов отличие результатов численного моделирования от результатов экспериментальных измерений достигает 15 Гс (~3%), а при использовании предложенного в диссертации подхода отличие не превышает 3 Гс (0.6%).

Глава 4 посвящена программному комплексу Quasar. Программный комплекс имеет графический интерфейс, в котором задаются входные данные проекта, который может содержать элементы: сетки, каталоги материалов, токовые обмотки, задачи. Представлены архитектура программного комплекса Quasar, а также разработанные части и библиотеки. Программный комплекс позволяет решать трёхмерные задачи электромагнетизма как стационарные, так и нестационарные и позволяет учитывать вихревые токи и остаточную намагниченность.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложении А – приведён документ о внедрении результатов диссертационной работы при успешном использовании программного комплекса Quasar для расчётов вихревых токов, возникающих при включении магнитов, а также для моделирования явлений гистерезиса в ИЯФ СО РАН.

Список литературы состоит из 93 ссылки на статьи, относящиеся к моделированию электромагнитных процессов.

Работа написана грамотным, понятным языком и представляет собой довольно полное исследование поставленной задачи и выполнена на высоком профессиональном уровне. Результаты диссертационной работы изложены в печатных работах (18, в списке литературы 32,33,35,36,53-66), в том числе 4 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК (33,35,53,54), 5 научных публикаций, индексируемых в Web of Science (34, 55-57,67), 6 научных публикаций в Scopus (34,55-58,67), а также 10 работ, опубликованных в других изданиях и в сборниках трудов конференций (32,36,59-66). Цель поставленной задачи – разработка эффективных вычислительных схем и алгоритмов численного моделирования нестационарных электромагнитных полей с учётом вихревых токов, явлений

гистерезиса и намагничения с предысторией – выполнена и успешно проверена на реальных магнитных элементах.

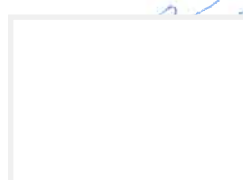
Автореферат соответствует диссертации. Личный вклад в получении результатов диссертационной работы является определяющим.

Из замечаний к работе можно отметить:

- Было бы значительно более убедительно и полезно продемонстрировать работу программного комплекса при расчётах поведения мультипольных коэффициентов поворотных магнитов и квадрупольных линз во время изменения магнитного поля и гистерезисных эффектов с учётом предыстории.
- Замечаний к тексту, кроме 2-3 опечаток и удвоения слов, нет.

Указанные замечания (а скорее пожелание) не снижает общую ценность диссертационной 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 расчёта магнитных элементов ускорителей особенно в свете последних решений правительства России о строительстве источников синхротронного излучения 4-го поколения. Диссертация удовлетворяет критерию пункта 9 Положения ВАК о присуждении учёных степеней. Её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент
Мезенцев Николай Александрович



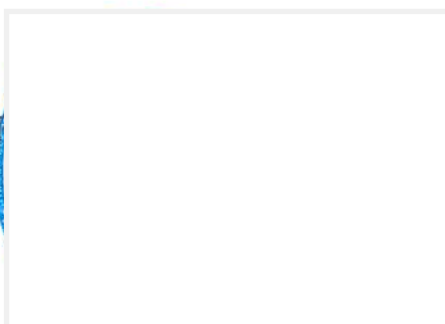
/Н.А.Мезенцев/

Доктор физико-математических наук, г.н.с.,
советник директора Института ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского Отделения
Российской Академии Наук

Новосибирск 630090
Пр-т Лаврентьева 11
т. 383 329 4155
mezentsev@inp.nsk.su

4.12.2019

Учёный секретарь ИЯФ СО



А.С.Аракчеев

*Отправлено
в совет 04.12.2019*

*с отработкой ознакомлена
04.12.2019*