

Математическое моделирование электромагнитного поля в неограниченной области

М.П. Галанин^{1,2}, Д.Л. Сорокин¹

1 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4
2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Аннотация. Создана программная реализация алгоритма расчёта электромагнитного поля в электродинамических ускорителях рельсового типа. Исследовано влияние граничных условий на процесс ускорения макротела в канале.

Ключевые слова: электродинамический ускоритель, рельсотрон, электромагнитное поле, уравнения Максвелла, неограниченная область

Mathematical Modeling of Electromagnetic Field in Unlimited Area

M.P. Galanin^{1,2}, D.L. Sorokin¹

1 Keldysh Institute of Applied Mathematics (KIAM), Moscow, Russia
2 Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia

Abstract. Software implementation of the algorithm for calculating the electromagnetic field in electrodynamic accelerators of rail type has been created. The influence of boundary conditions on the process of macrobody acceleration in the channel is studied.

Keywords: electrodynamic accelerator, railgun, electromagnetic field, Maxwell's equations, unlimited area

Электродинамические ускорители рельсового типа позволяют достичь скоростей метания макротел, превышающих скорости вылета снарядов из ускорителей других типов (например, пороховых) [1]. Для совершенствования конструкции рельсовых ускорителей необходимо проводить математическое моделирование электромагнитного и теплового полей.

Характерное время протекания электродинамических процессов в ускорителях рельсового типа много больше времени прохождения светом характерного пространственного масштаба задачи. Проводимость материалов, по которым течет электрический ток, достаточно высока, так что в них

выполнены условия применимости магнитогидродинамического (в данном случае — квазистационарного) приближения уравнений Максвелла [2]. Еще одной особенностью постановки задачи является то, что главный интерес представляют процессы, протекающие в проводящих частях устройства [3].

Построенная в [2] математическая модель характеризуется тем, что в проводящей подобласти протекание тока описывается уравнением параболического типа, а в диэлектрической подобласти — эллиптического.

В связи с тем, что характерный поперечный размер ускорителя намного больше его длины, целесообразно ограничить расчётную область в направлении вылета тела. В этом случае возникнет необходимость задания на торцах получившейся расчётной области специальных граничных условий. В [4] предложено задавать распределение тангенциальной компоненты вектора напряжённости магнитного поля, соответствующего распределению поля вокруг бесконечно протяжённых проводников.

На боковой границе в [2] предложено использовать модель идеального кожуха, т.е. задавать равенство нулю тангенциальной компоненты вектора напряжённости электрического поля. Однако стоит заметить, что в построенных электродинамических ускорителях кожуха чаще всего нет.

Результаты математического моделирования показывают, что при приближении идеального кожуха к рельсам занижается оценка ускоряющей силы и, как следствие, скорости вылета тела из канала ускорителя. Для повышения точности вычислительных экспериментов необходимо задавать граничные условия, соответствующие неограниченной области.

Согласно закону Био-Савара-Лапласа модуль вектора напряжённости электрического поля, создаваемого ускорителем, уменьшается обратно пропорционально расстоянию от него. Таким образом можно найти положение идеального кожуха, при котором он не будет оказывать влияние на результат моделирования, т.е. расчёты будут корректными. Однако при уменьшении шага с целью повышения точности потребуется расширять расчётную область.

В работе [5] предложен метод решения эллиптических уравнений в неограниченной области на основе применения третьей формулы Грина.

Как упоминалось выше, для описания электромагнитного поля в диэлектрической подобласти используется уравнение эллиптического типа с однородной правой частью. Таким образом, применение третьей формулы Грина для диэлектрической подобласти может уменьшить размер расчётной области и позволит отказаться от использования модели идеального кожуха. Представлены результаты реализации подобного алгоритма для решения задачи в неограниченной области.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 18-01-00252.

Литература

1. Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Уразов С.С., Халимуллин Ю.А. Математическое моделирование эрозии металлических контактов в рельсотронном ускорителе // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2003. № 79. 28 с.
2. Галанин М.П., Попов Ю.П. Квазистационарные электромагнитные поля в неоднородных средах: Математическое моделирование. М.: Наука. Физматлит, 1995. 320 с.
3. Галанин М.П., Сорокин Д.Л. Расчёт квазистационарных электромагнитных полей в областях, содержащих несвязные проводящие подобласти // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2017. № 19. 24 с.
4. Уразов С.С. Математическое моделирование многомерных квазистационарных электромагнитных полей в канале электродинамического ускорителя // Дис. канд. ф.-м. наук. Москва, 2007.
5. Галанин М. П., Низкая Т.В. Разработка и применение численного метода решения линейных эллиптических уравнений в неограниченной области // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2005. № 2, 29 с.

References

1. Galanin M.P., Lototskii A.P., Urazov S.S., Khalimullin Iu.A. Matematicheskoe modelirovanie erozii metallicheskih kontaktov v relsotronnom uskoritele // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2003. № 79. 28 s.
2. Galanin M.P., Popov Iu.P. Kvazistatsionarnye elektromagnitnye polia v neodnorodnykh sredakh: Matematicheskoe modelirovanie. M.: Nauka. Fizmatlit, 1995. 320 s.
3. Galanin M.P., Sorokin D.L. Raschet kvazistatsionarnykh elektromagnitnykh polei v oblastiakh, sodержashchikh nesviaznye provodiashchie podoblasti // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2017. № 19. 24 s.
4. Urazov S.S. Matematicheskoe modelirovanie mnogomernykh kvazistatsionarnykh elektromagnitnykh polei v kanale elektrodinamicheskogo uskoritelia // Dis. kand. f.-m. nauk. Moskva, 2007.
5. Galanin M. P., Nizkaia T.V. Razrabotka i primenenie chislennogo metoda resheniia lineinykh ellipticheskikh uravnenii v neogranichennoi oblasti // Preprinty IPM im. M.V. Keldysha, 2005. № 2, 29 s.