

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Н.И. Платонов, Д.Д. Криворучко

platonov.ni@phystech.edu

Устройства, основанные на движении заряженных частиц в скрещенных электромагнитных полях, имеют широкое применение в космической отрасли. Например, датчики для измерения потока заряженных частиц на космических аппаратах (КА), Фильтр Винна позволяющий промерить не только поток, но и зарядовый или массовый состав, а также получить функцию распределения энергии ионов по скоростям (ФРИС) набегающего потока. Для того чтобы сконструировать устройства, основанные на движении заряженных частиц в скрещенных электромагнитных полях, удовлетворяющие требованиям, или модифицировать уже имеющиеся, предлагается использовать методы численного моделирования. Результаты расчетов позволяют увидеть, как будет работать прибор в тех или иных условиях до стадии создания физической модели.

В работе сделан первый шаг по разработке численного кода и конструкции космических датчиков, определяющих параметры потоков заряженных частиц на КА. Апробация и отработка производились на зонде под названием фильтр Вина. Уделено внимание побочному результату, а именно усилителю тока на пА работающего в вакууме в пределах от -40 до +40 градусов по Цельсию. Данные исследования могут быть полезны при разработке новых КА и ДУ.

На данном этапе развития космической технологий остро стоит вопрос разработки и запуска нано-, микро- и мини- космических аппаратов (КА) в сегмент которых входят SubSat. Наиболее перспективным видятся задачи на низких орбитах 250-300 км включающие в себя сложные маневры (разведение группы спутников по орбите и изменение их наклона). Реализация описанных задач упирается в отсутствие нужных технологий в частности в отсутствии в России двигательных установок на нано, микро, мини КА. Для данных задач наиболее перспективными являются следующие тяговые модули: абляционные импульсные плазменные двигатели, электроспреи, импульсные двигатели, ионные двигатели, двигатель на сжатых газах, термokatалитические двигатели, Green Gas двигатель и т.д. Значительная часть из перечисленных двигателей создают поток ионов - струю. Параметры струи отображают такие важные параметры, как эффективность двигателя и расходимость струи и т.д. Зная такие параметры струи как ФРИС и процент многозарядных частиц (его важность для двигателя представлена в литературе [1]) можно в режиме реального времени проводить оптимизацию ускорителя, а также помогаю при оптимизации конструкции КД в целом. Что в свою очередь приводит к удешевлению и ускорению разработок новых КД.

Для нахождения функции распределения энергии ионов по скоростям в струе электрических ракетных двигателей (ЭРД) используется фильтр Вина [2].

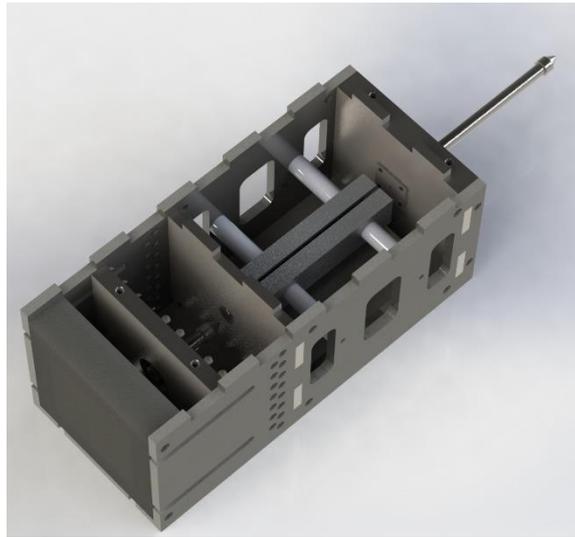


Рисунок 1 – Внешний вид Фильтра Вина

Фильтр Вина основан на дрейфе заряженных частиц в зоне скрещенных полей: меняя электрическое поле, меняется характер движения частиц в этой области. Когда заряженная частица проходит через зону скрещенных полей, возникает перпендикулярная ей сила Лоренца, которая изменяет направление движения частицы. В этом случае частица начинает перемещаться к стенкам устройства под наклоном, зависящим от ее электрического заряда, таким образом происходит разделение частиц по зарядам. На Рис. 2 показано, что он состоит из трех секций: входного коллиматора, зоны скрещенных полей и выходного коллиматора, в конце которого расположен коллектор с детектором электронов. Данный прибор представлен на Рис.1.

Чтобы попасть на коллектор, заряженные частицы, проходящие через входной коллиматор, должны проходить в зону скрещенных полей и достигать выходного коллиматора без отклонения. Принцип работы зонда можно найти в литературе [3].

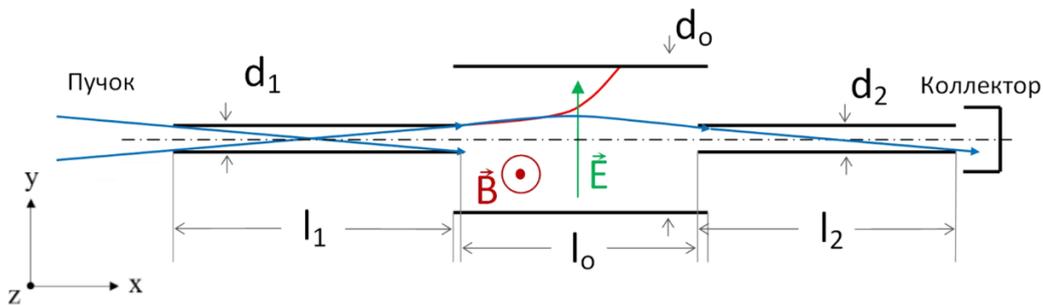


Рисунок 2 – Схема устройства Фильтра Вина

Когда заряженная частица попадает в зону скрещенных полей, на нее начинает действовать сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}),$$

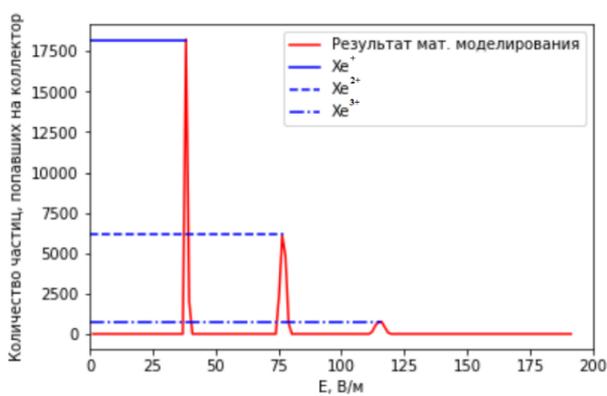
где q – заряд частицы, v – скорость частицы, E и B электрическое и магнитное поля соответственно.

Скорость частиц в таком случае может быть рассчитана на основе формулы силы Лоренца с учетом того, что заряженные частицы достигают выходного коллиматора без отклонения:

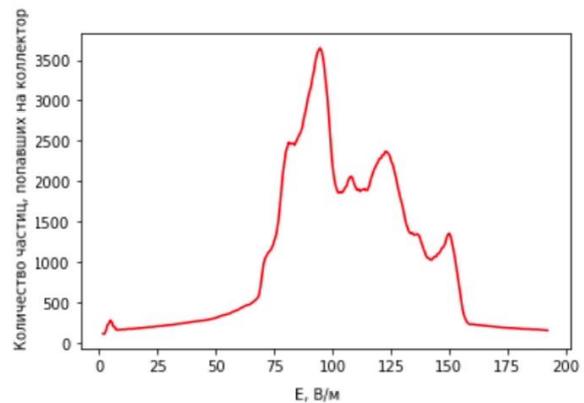
$$v_x = \frac{E_y}{B_z}. \quad (1)$$

Характеристики струи плазменного двигателя, например, функция распределения энергии ионов по скоростям и процент многозарядности струи могут быть измерены с помощью фильтра Вина, расположенного за плазменным двигателем.

Одной из задач которую решает представленное ПО является расчет геометрических параметров Фильтра Вина (обозначены как $d_0, d_1, d_2, l_0, l_1, l_2$ на Рис.2). В рамках работы был создан код, опирающийся на методы Монте-Карло, Бориса и Бородачева (для просчета скоростей), который рассчитывает движение частиц в Фильтре Вина и детектирует количество частиц, попавших на коллектор. Так как электрическое поле E в зоне скрещенных полей изменяемо (оно создается разностью потенциалов), мы можем построить график зависимости количества частиц, попавших на коллектор от E . Таким образом мы получим ФРИС. Пример результата работы такого кода представлен на Рис.3. Также этот код может быть использован при разработке приборов для исследования ионосферы Земли.



а) Пример различимой диагностики



б) Пример уширения аппаратной функции

Рисунок 3 – Пример работы программного обеспечения

На Рис.3(а) видно, как именно фильтр Вина способен диагностировать частицы с различными зарядами. Однако полученное уравнение (1) не содержит какого-либо коэффициента заряда частицы. В соответствии с различными зарядами Фильтр Вина может разделять функцию распределения энергии ионов по скоростям, поскольку частицы с разным зарядовым составом обладают разной скоростью, вызванной электрическим полем внутри двигателя. На Рис.3(а), основанном на математическом моделировании, при изменении напряжения меняется количество частиц, попавших на коллектор. При некоторых E возникают “пики”, которые соответствуют различным зарядам частиц. При помощи этих “пиков” можно определить зарядовый состав пучка.

Важность подбора геометрических параметров заключается в том, что при добавлении в математическую Максвелловского распределения по скоростям у частиц, происходит “уширение” аппаратной функции, вследствие чего некоторые “пики” могут быть просто неразличимы. Пример такого уширения можно посмотреть на Рис.3(б).

Данный программный модуль также может использоваться в рамках расчета датчиков для измерения потоков заряженных частиц на КА. Принцип работы детектора и расчетов такой же как у описанного выше устройства. Но устройство требует миниатюризации и доработок. Поэтому изначально принципы отработывались на Фильтре Вина изготавливаемого для наземных испытаний ДУ.



Рисунок 4 – Фотография физической модели Филтра Вина

Были рассчитаны оптимальные размеры Филтра Вина и создана его физическая модель, которая представлена на Рис. 4.

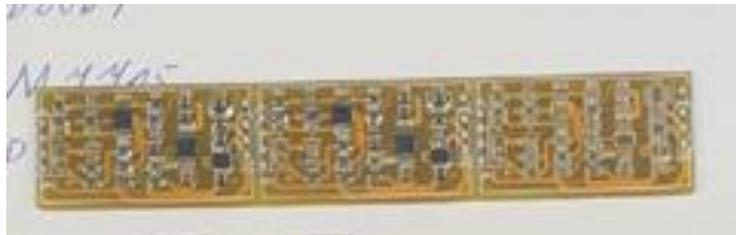


Рисунок 5 – Фотография усилителя

При проектировании Филтра Вина встал остро вопрос с измерением токов порядка нА в вакуумной камере. Для решения данной проблемы был разработан усилитель, который представлен на Рис. 5. Он работает по схеме стандартного транс импедансного усилителя, как на Рис. 6.

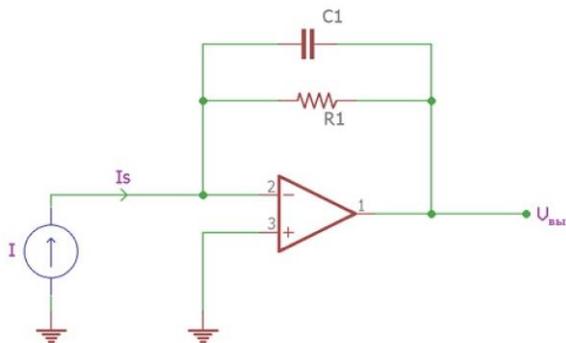


Рисунок 6 – Схема стандартного транс импедансного усилителя

Так как данный усилитель работает при условиях вакуума, температурах от -40 до +40 и имеет возможность сбрасывания своего заряда, то он может быть использован в других модулях, которые будут использоваться в космосе.

В работе рассмотрено численное моделирование потоков заряженных частиц в скрещенных электромагнитных полях при помощи методов Монте-Карло, Бориса и Бородачева. На базе этого были рассчитаны оптимальные параметры Филтра Вина и создана его физическая модель, в дальнейшем данный код можно использовать для просчет миниатюрных Филтров Вина для

дальнейшей установки на космические аппараты. Создан трансимедансный усилитель, который можно использовать на других космических модулях, работающих с малыми токами.

Список литературы:

1. Effect of multiply charged ions on the performance and beam characteristics in annular and cylindrical type Hall thruster plasmas / H. Kim, Y. Lim, W. Choe [et al.] // Applied Physics Letters, 105(14):144104, 2014.
2. Huang Wensheng, Shastry Rohit, Soulas George C., and Kamhawi Hani. Farfield Plume Measurement and Analysis on the NASA-300M and NASA-300MS. In 33rd International Electric Propulsion Conference, October 6 10 2013
3. Sang-Wook Kim. Experimental investigations of plasma parameters and species dependent ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a hall thruster. PhD thesis, Universit of Michigan, 2001