

УДК 519.63

Исследование эффективности захвата металлических компонентов космического мусора катушкой с электрическим током

Юферева Д.Д.¹, Яковлев А.Б.¹

Санкт-Петербургский государственный университет¹

Аннотация: В работе исследуется вопрос об эффективности предложенной ранее системы уборки космического мусора на основе катушки с электрическим током. Для этого рассматривается задача о движении кольца в неоднородном магнитном поле, создаваемого катушкой с постоянным током в вакууме при их соосном расположении.

Ключевые слова: космический мусор, электромагнитная индукция, сила Ампера, катушка с током.

1. Введение

Использование космического пространства в научных, военных и разнообразных гражданских целях в последние десятилетия становится все более активным. Однако, в результате космической деятельности за время, прошедшее с запуска первого спутника, на околоземных орбитах скопились сотни тысяч объектов искусственного происхождения: нефункционирующих космических аппаратов, ступеней ракет, разгонных блоков, кусков обшивки, частиц, краски, топлива, которые называются космическим мусором (КМ). Поэтому очистка околоземного космического пространства от космического мусора становится все более актуальной задачей. Большие объекты космического мусора, уже находящиеся на орбите, являются потенциальными источниками более мелкого, но не менее опасного космического мусора. Их удаление с орбиты позволит снизить риск неконтролируемого роста космического мусора. Для решения этой задачи необходимо разработать безопасные и эффективные способы сближения с космическим мусором, его захвата и орбитальной транспортировки. В работах [1-4] дан обзор основных способов увода элементов крупномасштабного космического мусора с околоземных орбит. Проблемы моделирования динамики мелкомасштабной компоненты КМ подробно изложены, например, в [5].

Оригинальный метод захвата космического мусора и его транспортировки на орбиты захоронения предложен в [6]. Предлагается использовать большую катушку с электрическим током на космическом корабле-уборщике, которая создает в металлических компонентах КМ силу, способствующую их захвату. В настоящей работе проведен анализ эффективности подобной системы в упрощенной постановке: вместо плоской катушки рассмотрена катушка в виде тора с плотно упакованными проводниками, а в качестве элемента КМ – металлическое кольцо (проволочный виток). Также на первом этапе предполагается, что рассмотрение взаимного перемещения катушки с током и кольца происходит в инерциальной системе отсчета катушки при соосном их расположении.

Так как в рассматриваемой задаче катушка представляется в виде тонкого коль-

ца с плотной намоткой и толщина намотки пренебрежимо мала по сравнению с ее радиусом, она заменяется одиночным кольцом с током, равным сумме токов всех ее витков. Поэтому для дальнейших расчетов рассматривается задача о взаимодействии двух соосных проводящих колец (рис. 1).

Первое кольцо (радиуса R) неподвижно и при пропускании через него постоянного тока I служит источником неоднородного магнитного поля. Второе кольцо (радиуса r) расположено на одной оси с большим и может свободно перемещаться вдоль нее. Ось x проходит через центры обоих колец перпендикулярно их плоскостям. В начальный момент времени малое кольцо удалено на расстояние x_0 от большого и начинает двигаться в его сторону с начальной скоростью v_0 . Движение малого кольца в неоднородном магнитном поле приводит к изменению пронизывающего его магнитного потока, в малом кольце возникает ЭДС индукции, которое приводит к возникновению индукционного тока, который порождает силу Ампера, тормозящую кольцо.

2. Цель

Цель данной работы – исследовать эффективность предложенной системы захвата металлической компоненты космического мусора в упрощенной постановке. В частности, определить диапазоны начальных относительных скоростей, при каких возможен захват.

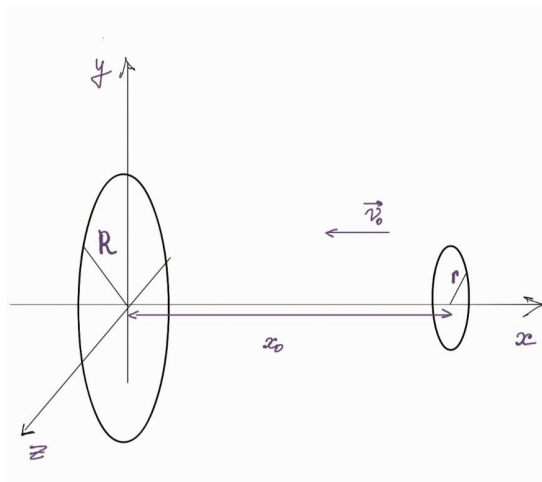


Рис. 1. Расположение двух колец.

3. Используемые методы

Для вычисления ЭДС индукции использовались два численных метода, описанных в [7, 8]. Первый метод основан на расчёте скорости изменения магнитного потока через площадь малого кольца за промежутки времени Δt .

Второй метод использует представление ЭДС как работу сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль замкнутого контура. Сравнение результатов, полученных обоими методами при одинаковых начальных условиях, показало их практически полное совпадение, что подтверждает корректность вычислений. Второй метод требует значительно меньшего времени для реализации, поэтому он был выбран в качестве основного для построения траекторий движения малого

кольца.

Для вычисления динамики движения кольца был использован второй закон Ньютона, по которому ускорение в каждый момент времени определяется действующей на кольцо силой. В данной задаче этой силой является сила Ампера.

При помощи ЭДС рассчитывался индукционный ток, возникающий в кольце. Далее по найденному току вычислялась сила Ампера, действующая на данное кольцо.

Также рассматривался приближенный метод расчета силы взаимодействия, когда малое кольцо с индуцированным током заменялось точечным магнитным диполем. Когда малое кольцо находится далеко от большого, его размерами можно пренебречь и рассматривать его как точечный магнитный диполь с моментом $\mathbf{p}_m$. В этом случае сила, действующая на элементарный контур, вычисляется как сила, действующая на диполь в неоднородном поле. Однако по мере приближения малого кольца к большому такое приближение теряет точность. Показано, что на расстояниях, значительно превышающих радиус большого кольца, траектории движения малого кольца фактически совпадают с полученными при точном расчете.

4. Результаты расчётов

Расчёты проводились при фиксированных параметрах: удельное сопротивление материала кольца ρ_c , значение которого приведено в работе [9], его плотность ρ , площадь поперечного сечения проводника малого кольца S_2 , число витков большого кольца N , начальное положение малого кольца относительно большого x_0 . Изменялись ток I одного витка большого кольца, отношение радиусов колец $\rho = r/R$, начальная скорость малого кольца v_0 .

Для каждого набора параметров строилась зависимость координаты остановки малого кольца x от его начальной скорости v_0 . На рис. 2-5 приведены полученные в результате расчетов зависимости $x(v_0)$ для $\rho = 1/15$ (рис. 2-3) и $\rho = 1/12$ (рис. 4-5) при различных значениях тока в одном витке большого кольца I .

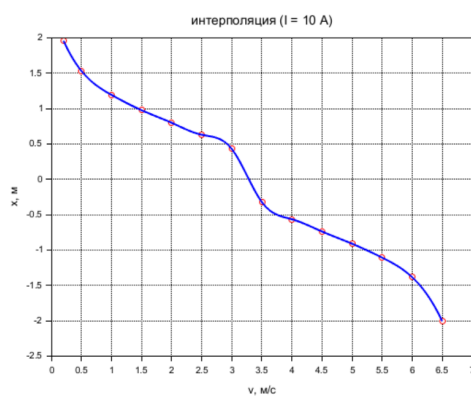


Рис. 2. $\rho = 1/15$, $I = 10$ А в одном витке.

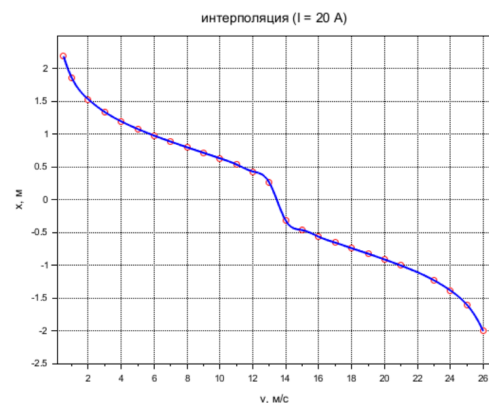


Рис. 3. $\rho = 1/15$, $I = 20$ А в одном витке.

5. Заключение

В ходе численного моделирования установлены диапазоны начальных скоростей, в пределах которых захват малого кольца возможен:

— для $\rho = 1/20$: $v_0 \in (0; 0,9]$ м/с ($I = 5$ А), $(0; 3,6]$ м/с ($I = 10$ А), $(0; 14,5]$ м/с

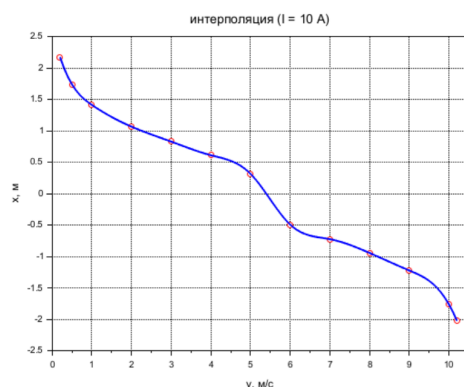


Рис. 4. $\rho = 1/12$, $I = 10$ А в одном витке.

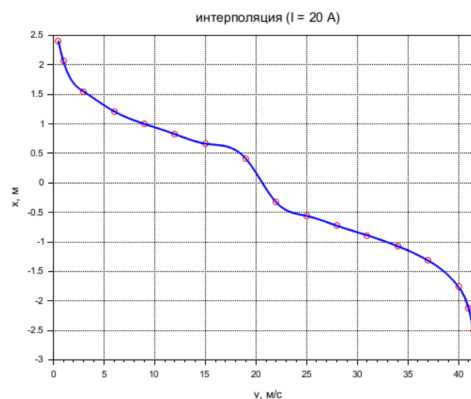


Рис. 5. $\rho = 1/12$, $I = 20$ А в одном витке.

($I = 20$ А);

— для $\rho = 1/15$: $v_0 \in (0; 1,6]$ м/с ($I = 5$ А), $(0; 6,5]$ м/с ($I = 10$ А), $(0; 26]$ м/с ($I = 20$ А), $(0; 59]$ м/с ($I = 30$ А);

— для $\rho = 1/12$: $v_0 \in (0; 2,5]$ м/с ($I = 5$ А), $(0; 10,2]$ м/с ($I = 10$ А), $(0; 41,5]$ м/с ($I = 20$ А).

Анализ зависимостей $x(v_0)$ показал, что с увеличением тока I или с увеличением отношения радиусов ρ диапазон начальных скоростей малого кольца, при которых возможна остановка в окрестности большого, расширяется. Это объясняется тем, что при увеличении тока, он создаёт более сильное магнитное поле, а при увеличении ρ малое кольцо начинает пронизывать больший магнитный поток. В обоих случаях это приводит к возрастанию ЭДС, а вследствие этого и индукционного тока, что ведет к возрастанию силы Ампера, которая стремится остановить малое кольцо.

Также следует отметить, что даже при большом количестве витков катушки и наиболее благоприятном случае соосности колец диапазон скоростей, для которых возможен захват, является достаточно узким.

Список литературы

1. Пикалов Р.С., Юдинцев В.В. Обзор и выбор средств увода крупногабаритного космического мусора // Труды МАИ. Вып. № 100.
2. Shan M., Guo J., Gill E. Review and comparison of active space debris capturing and removal methods // Progress in Aerospace Sciences. 2015. Vol. 80. P. 18-32.
3. Зайцева О.Н., Лукьянчиков А.В., Пичхадзе К.М. Аспекты технической реализации автоматического космического комплекса для захвата и свода с орбиты объектов, прекративших активное существование // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. Т. 5, № 16. С. 12-18.
4. Палий А.С. Методы и средства увода космических аппаратов с рабочих орбит (состояние проблемы) // Техническая механика. 2012. № 1. С. 94-102.
5. Яковлев А.Б. Математическое моделирование неравновесных процессов на кафедре физической механики СПбГУ. Ч. 3. Моделирование динамики микрочастиц естественного и искусственного происхождения в космической плазме // Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия. 2025. Т. 12 (70), Вып. 3. С. 491-515.

6. Patel I.K., Tikhonov A.A. Dynamics and control of an electrodynamic tug: Transfer to the graveyard orbit // Acta Astronautica. 2021. Vol. 183. P. 310-318.
7. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. 9-е изд. 2014.
8. Джанколи Д. Физика: В 2-х т. Т. 2. Москва: Мир, 1989.
9. Десай П.Д., Джеймс Х.М., Хо С.Я. Electrical Resistivity of Aluminum and Manganese // Journal of Physical and Chemical Reference Data. 1984.

MSC 78A25

Study on the efficiency of capturing metallic components of space debris using a current-carrying coil

D.D. Yufereva¹, A.B. Yakovlev¹
St. Petersburg State University¹

Abstract: This work investigates the efficiency of a previously proposed space debris removal system based on a current-carrying coil. The study considers the problem of the motion of a ring in a nonuniform magnetic field generated by a direct-current coil in vacuum, assuming their coaxial arrangement.

Keywords: space debris, electromagnetic induction, Ampere force, current-carrying coil.