УДК 629.78: 62-531.6

ОЦЕНКА НАЧАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ НАНОСПУТНИКА CUBESAT ПРИ ЕГО ОТДЕЛЕНИИ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ И СПОСОБ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

© 2017 В.М. Гречишников¹, В.А. Глущенков², Д.Г. Черников¹, Е.Е. Кострюков¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва ² Самарский научный центр Российской академии наук

Статья поступила в редакцию 14.08.2017

Применение импульсного магнитного поля для управляемого отделения наноспутников – новый способ, защищенный патентами. В печатных работах показана лишь его работоспособность, но не были рассмотрены параметры движения наноспутника после воздействия на него импульсным магнитным полем. Известно, что при отделении спутников с помощью применяемых сегодня пружинных адаптеров начальная угловая скорость может достигать 10 град/с. Для ее компенсации применяют, например, систему демпфирования на основе гистерезисных стержней. При начальной угловой скорости 0,5 град/с время демпфирования достигает 1,7 суток, в течение которых спутник не сможет выполнять свою миссию в полной мере. Приведены результаты моделирования процесса отделения наноспутника CubeSat типоразмера 10 с несмещенным центром тяжести с применением импульсного магнитного поля для расчетной начальной скорости спутника 1 м/с. Моделирование проведено в программном комплексе LS-DYNA. Полученное значение угловой скорости составляет 20,98 град/с. Рассмотрены составляющие вектора угловой скорости и сделано предположение, что угловая скорость обусловлена неравномерным давлением на проводящую пластину со стороны магнитного поля вдоль одной из осей связанной со спутником системы координат. Получены выражения для распределения нормальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля вдоль рассмотренной оси для произвольного расстояния от плоскости индуктора в отсутствие проводящей пластины. Построены относительные распределения нормальной и тангенциальной составляющих. Установлено, что распределения симметричны, однако ось симметрии не совпадает с началом системы координат, а сдвинута относительно нее на величину, равную четверти шага намотки спирали. Показано, что совмещение на одной прямой центра тяжести спутника и оси симметрии составляющих поля ведет к снижению начальной угловой скорости спутника. Результаты моделирования показывают, что начальная угловая скорость снизилась в 11,8 раз и составила 1,78 град/с. Также приведены угловые скорости для расчетных скоростей спутника 0,5, 1,5 и 2 м/с.

Ключевые слова: наноспутник CubeSat, импульсное магнитное поле, LS-DYNA, угловая скорость.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы предлагается новый способ отделения наноспутников (HC) стандарта CubeSat от носителя, использующий магнитноимпульсное нагружение. Данный способ защищен патентами [1,2], описан в работах [3-6]. Однако в них показана возможность реализации этой идеи, без рассмотрения движения спутника после его отделения.

Согласно международному стандарту на спутники CubeSat [7], генерация и передача каких-либо сигналов разрешена по истечении со-Гречииников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники. E-mail: gv@ssau.ru

Глущенков Владимир Александрович, кандидат технических наук, начальник отдела металлофизики и авиационных материалов. E-mail:vgl@ssau.ru.

Черников Дмитрий Генадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением. E-mail: 4ernikov82@mail.ru

Кострюков Евгений Евгеньевич, аспирант кафедры электротехники. E-mail: eugen.kostr@gmail.com рока пяти минут после отделения от носителя. Спустя это время спутник теоретически готов к выполнению своей миссии: проведению измерений, наблюдений, обработке информации. Для ряда задач требуется стабилизированный полет. В виду смещения центра тяжести (ЦТ) спутника, зазоров между гранями НС и направляющими в адаптере, а также различных коэффициентов трения между ними же начальная угловая скорость спутника может достигать 10 град/с [8-11] при отделении существующими пружинными адаптерами. Для стабилизации НС применяют, например, систему демпфирования угловой скорости на основе гистерезисных стержней [12]. Авторы указывают, что при начальной угловой скорости 0,5 град/с время демпфирования достигает 1,7 суток, в течение которого спутник не сможет выполнять свою миссию в полной мере.

Таким образом, снижение начальной угловой скорости НС является актуальной задачей. Целью данной работы является оценка начальной угловой скорости НС типоразмера 1U с несмещенным ЦТ при его отделении импульсным магнитным полем (ИМП) в зависимости от параметров магнитно-импульсного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Было проведено моделирование процесса отделения HC типоразмера 1U (100x100x100 мм, масса 1 кг) в программном пакете LS-DYNA [13]. ЦТ спутника совпадает с его геометрическим центром. Конечно-элементная модель представлена на рис. 1.

Проводящая пластина из Al сплава АДО жестко закреплена на грани спутника. Индуктор представляет собой плоскую спираль из медной шины сечением 2x2 мм и с шагом намотки 3 мм.Толщина пластины а=4 мм и удовлетворяет условию а $\geq 3\Delta$, где Δ – толщина скин-слоя [14], тогда считается, что магнитное поле не просачивается через заготовку и отсутствует эффект «магнитной подушки».Число витков выбрано таким образом, чтобы размеры индуктора не выходили за размеры пластины и равно 14. Начало координат спирали и геометрический центр спутника (пластины) лежат на одной прямой. По известной методике [14] были рассчитаны амплитуда тока через индуктор *I*_…=12,26 кА и коэффициент его затухания α=8404 1/с для скорости спутника 1 м/с; частота тока f=5 кГц, моделирование проводилось для первого полупериода тока (до 100 мкс):

$$i(t) = I_m \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(2\pi f t). \tag{1}$$

Ток через индуктор представлен на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Поступательная скорость HC вместе с пластиной составила 0,89 м/с. Результирующая угловая скорость при этом достигла 0,366 рад/с (20,98 град/с), что превышает аналогичный показатель для применяемых сегодня пружинных адаптеров. Рассмотрим отдельно составляющие угловой скорости (рис. 3):

Наибольший вклад вносит составляющая угловой скорости вдоль оси *Ox* связанной системы координат (рис. 1). На рис. 3. видно, что перемещение конечных элементов пластины в области положительных значений оси *Oy* больше, чем в области отрицательных значений (рис. 4). Это говорит о неравномерном нагружении пластины вдоль оси *Oy*, а значит и напряженности магнитного поля индуктора. Это приводит к вращению спутника вокруг оси *Ox*.

Было рассмотрено распределение напряженности магнитного поля индуктора в отсутствие проводящей пластины. Индуктор представлен спиралью Архимеда в полярной системе координат (ПСК):

$$r(\varphi) = r_0 + h \frac{\varphi}{2\pi'}$$
(2)

где r_0 – радиус первого витка; h – шаг спирали; $\varphi \in [0; 2\pi \cdot N), N$ – число витков.

Спираль Архимеда совпадает со средней линией индуктора из КЭМ. Шаг спирали Архимеда равен шагу намотки спирали из модели, но не учитываются сечение витка и распределение тока по сечению. Иными словами, весь ток течет через бесконечно малый элемент поперечного



Рис. 1. Конечно-элементная модель НС и индуктора в LS-DYNA: 1 – НС; 2 – проводящая пластина; 3 – индуктор







Рис. 4. Перемещение конечных элементов пластины для момента времени 55 мкс

сечения проводника. Декартова система координат связана с индуктором, как показано на рис. 5 (ось *Oz* направлена от наблюдателя).

Если рассматривать катушку в вакууме/ воздухе (без проводящей пластины), результирующее магнитное поле в любой точке представляет собой суперпозицию полей от каждого элемента спирали. Принцип суперпозиции



Рис. 5. Индуктор в ДСК

применим для линейных изотропных сред. В вакууме/воздухе выполняется соотношение $B = \mu_0 \mu H$ и отсутствует насыщение, отсюда следует линейность среды. Также, параметры среды не изменяются от направления распространения электромагнитной волны, значит среда изотропна. Следовательно, принцип суперпозиции применим [15].

В каждой точке плоскости *уОг* напряженность имеет как параллельную оси *Ог* составляющую (назовем ее **нормальной** к плоскости спирали), так и параллельную оси *Оу* (назовем ее **тангенциальной**). Выражения для обеих составляющих имеют вид:

$$\begin{cases} H_z = \frac{I}{2\pi} \cdot \sum_{m=1}^{2N} \frac{sign(y_m) \cdot (y_m - y_i)}{z^2 + (y_m - y_i)^2} \\ H_y = \frac{I}{2\pi} \cdot \sum_{m=1}^{2N} \frac{sign(y_m) \cdot z}{z^2 + (y_m - y_i)^2} \end{cases},$$
(3)

где y_m – координаты точек пересечения спирали (средней линии индуктора) и плоскости yOz; I – ток; (y_pz) – координаты точки, в которой требуется найти составляющие напряженности магнитного поля; $sign(y_m)$ – функция, учитывающая направление тока; $m \in [1; 2N]$.

Координаты точек пересечения можно найти по выражению (3) и далее проранжировать по возрастанию:

$$y_m = (-1)^{m-1} \cdot \left(r_0 + h \frac{2m-1}{4}\right).$$
 (4)

Таким образом, были получены относительные распределения составляющих напряженности поля для z=3 мм вдоль оси *Oy* (рис. 6).

На рис. 6 видно, что распределения симметричны, однако ось симметрии сдвинута относительно начала координат на h/4 = 0,75 мм.Тогда можно предположить, что совмещение на одной прямой ЦТ спутника, пластины и оси симметрии напряженности поля приведет к снижению начальной угловой скорости HC.

Повторив моделирование для тех же исходных данных, но со сдвигом индуктора на –0,75 мм вдоль оси *О*у, были получены следующие составляющие угловой скорости (рис. 7).

Результирующая угловая скорость составляет 0,031 рад/с (1,78 град/с). Сдвиг индуктора на величину – h/4 привел к значительному снижению начальной угловой скорости НС (в 11,8 раз).

Также было проведено моделирование для нескольких расчетных поступательных скоростей HC, результаты приведены в табл. 1.

выводы

Установлен факт влияния неравномерности давления магнитного поля на начальную скорость наноспутника.

Выравнивание давления путем сдвига индуктора на величину –h/4 вдоль оси *О*у привело к снижению начальной угловой скорости HC на порядок (в 11,8 раз).



Рис. 6. Относительные составляющие напряженности магнитного поля вдоль оси *Оу* на расстоянии 3 мм от индуктора



Рис. 7. Составляющие угловой скорости вдоль осей *Ох*, *Оу* и *Оz* при сдвиге индуктора: ось абсцисс – время в мс; ось ординат – угловая скорость в мрад/с

Таблица 1. Результаты моделирования для нескольких расчетных скоростей

<i>V_{расч}</i> , М/С	0,5	1	1,5	2,0
<i>V_{pe3}</i> , М/С	0,45	0,89	1,34	1,79
ω, рад/с (град/с)	0,016 (0,91)	0,031 (1,78)	0,047 (2,69)	0,062 (3,55)

В диапазоне скоростей до двух м/с угловая скорость не превышает аналогичного показателя для пружинных адаптеров.

В данной работе не было рассмотрено смещение ЦТ спутника. Однако, полученные результаты позволяют предположить, что аналогичным способом можно значительно снизить начальную угловую скорость даже спутника со смещенным ЦТ. При этом накладываются ограничения на размеры индуктора, т.к. пластина должна полностью закрывать индуктор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глущенков В.А., Юсупов Р.Ю., Белоконов И.В., Гимранов З.И.: Способ запуска наноспутников в качестве попутной полезной нагрузки и устройство для его осуществления: Пат. 2472679 (РФ). 2013.
- 2. Юсупов Р.Ю., Глущенков В.А., Белоконов И.В., Гимранов З.И.: Пат. 140953 (РФ). 2014.
- Гимранов З.И. Магнитно-импульсный привод для управляемого отделения наноспутника // Электронный журнал «Труды МАИ». 2013. №68. URL: https://www.mai.ru/upload/iblock/58c/58cbdc 3cb0e522efca863b4d0e651169.pdf (дата обращения 17.04.2017).
- Исполнительные устройства системы управления отделением наноспутников / Е.Е. Кострюков, В.М. Гречишников, В.А. Глущенков, Р.Ю. Юсупов.// Труды XIX Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. М.: Академия наук о Земле, 2015. С. 154.
- Кострюков Е.Е., Гречишников В.М. К вопросу о создании магнитно-импульсного устройства отделения наноспутников стандарта CubeSat// Сборник докладов девятой всероссийской конференции

молодых ученых и сспециалистов «Будущее машиностроения России», Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 5-8 октября 2016 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 604-606.

- Глущенков В.А., Юсупов Р.Ю. Управляемое отделение наноспутников с помощью импульсного магнитного поля // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 1. С. 3-9.
- California Polytechnic State University. CubeSat Design Specification Rev. 12. URL: https://www. google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web &cd=2&ved=0ahUKEwjVt9aTgqzTAhVJ2SwKHTv8 D9MQFgg6MAE&url=https%3A%2F%2Fwww.qb50. eu%2Findex.php%2Ftech-docs%2Fcategory%2F13extras%3Fdownload%3D44%3Acalpoly-cubesat-designspecification-rev-12&usg=AFQjCNFnLCGUstiDchx6ITa 0Dt8r10_vzg&sig2=6AD7azivspBLXePmn2IIrw&bvm=b v.152479541,d.bGs (дата обращения 17.04.2017).
- Astro- und Feinwerktechnik Adlershof GmbH.Pico-Satellite launcher brochure. URL: http://www. astrofein.com/2728/dwnld/Datenblatt_PSL-Family. pdf (дата обращения 17.04.2017).
- Транспортно-пусковой контейнер для наноспутников типоразмера 3U, 3U+ / Д.С Зарецкий., А.А. Кирсанов, Е.В. Космодемьянский, А.М. Романов, М.Е. Сивов, М.Г. Трусов, В.В. Юдинцев. URL: http:// www.slideshare.net/tm_ssau/3u-3u (дата обращения 17.04.2017).
- 10. *Planetary System Corp.* Caniaterized Satellite Dispencer. URL: http://www.planetarysystemscorp. com/web/wp-content/uploads/2016/08/2002337D-CSD-Data-Sheet.pdf (дата обращения 17.04.2017).
- 11. *Japan Aerospace Exploration Agency*. Jem Small Satellite Orbital Deployer. URL:http://iss.jaxa.jp/en/kiboexp/jssod/ (дата обращения 17.04.2017).
- 12. Система демпфирования углового движения наноспутника SamSat-QB50 / И.В. Белоконов, Д.С. Иванов, М.Ю. Овчинников, В.И. Пеньков. Преприн-

ты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2015. 28 с.

- Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical-Thermal-Electromagnetic Simulations / L'EplattenierP., Cook G., Ashcraft C., Burger M., Shapiro A., Daehn G., Seith M. // 9th International LS-DYNA Users conference, Dearborn, Michigan, June 2005.
- Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке материалов. Харьков: Вища школа, 1977. 168 с.
- Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие для радиотехн. вузов и факультетов. М.: Высш. школа, 1974. 536 с.

EVALUATION OF A CUBESAT INITIAL ANGLE VELOCITY DURING SEPARATION VIA PULSE-MAGNETIC FIELD AND METHOD OF ITS REDUCTION

© 2017 V.M. Grechishnikov¹, V.A. Glushchenkov², D.G. Chernikov¹, E.E. Kostriukov¹

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov ² Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

The use of pulse-magnetic field for separation of nanosatellites under control is a new patented method. In papers only operability of the method has been shown without considering motion variables of a satellite after acting with pulse-magnetic field. It is a common knowledge that separation with the use of conventional spring adapters leads to the increase of initial angle velocity up to 10 degrees/sec. In order to decrease it systems like damping system on the basis of hysteresis bars are used. Authors show that in case of initial angle velocity of 0.5 degrees/sec the damping time is equal to 1.7 day during which a CubeSat is not able to perform the mission fully. Computational simulation results of 1U CubeSat separation with undisplaced center of mass with the use of pulse-magnetic field are shown for achieved forward velocity of 1 m/s. Simulation had been performed in software package LS-DYNA. Obtained angle velocity was 20.98 degrees/sec. Components of the angle velocity vector had been studied the proposition had been made that magnetic pressure on a conductive plate along one of the axis was inhomogeneous. Equations for distribution of the magnetic field intensity along the axis on any distance above the inductor in absence of a conductive plate had been obtained. Relative distributions of normal and tangential components of the magnetic field are shown. It had been found that distributions are symmetrical but the line of symmetry is shifted by a quarter of the winding pitch along the axis relatively to the origin of coordinates. It had been proposed that alignment of a satellite center of mass and the line of magnetic field symmetry leads to the decrease of initial angle velocity. Simulation results show that it had been decreased in 11.8 times and became 1.78 degrees/sec. Angle velocities for forward speed of 0.5, 1.5, and 2 m/s are also presented.

Keywords: CubeSat nanosatellite, pulse-magnetic field, LS-DYNA, angle velocity.

Vladimir Grechishnikov, Doctor of Technics, Professor, Head of Electrical Engineering Department. E-mail: gv@ssau.ru Dmitrii Chernikov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Metal Forming Department.

E-mail: chernikov82@mail.ru

Vladimir Glushchenkov, Candidate of Technics, Head of the Metal-Physics Department. E-mail: vgl@ssau.ru Evgenii Kostriukov, Postgraduate Student of Electrical Engineering Department. E-mail: Eugen.kostr@gmail.com