

1. Введение

Для управления угловым движением небольших спутников обычно используется магнитная система ориентации. Размеры токовых катушек для такой системы управления ограничены не только геометрическими размерами самого спутника, но также его энергетикой. Катушки создают магнитное поле за счет тока, пропускаемого через их обмотку. Магнитное поле каждой катушки взаимодействует с магнитным полем Земли и создает, таким образом, управляющий механический момент. Для управления по всем трем осям катушки помещаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. В качестве примеров магнитной системы управления на токовых катушках приведем следующие спутники с кратким описанием параметров катушек.

1. AUSTRALIS - 1 [1] - спутник, разработанный Australian Space Research Institute, относится к классу микроспутников. Выведен на орбиту в 1996 году. Общая масса порядка 50 кг. Спутник имеет форму куба с ребром около 0.36 м. Катушки расположены на всех шести гранях спутника. Параметры для расчета катушек следующие: напряжение $V = 14$ В, удельное сопротивление провода $r = 0.2893$ Ом·м, напряжение поля на экваторе $B = 20\,000$ нТ. Расчетное значение создаваемого дипольного момента равно 4.35 Ам².

2. Спутник UoSat - 2 [2] выведен на орбиту в 1984 году. Активное управление осуществлялось с помощью токовых катушек. Размеры корпуса спутника $0.36 \times 0.36 \times 0.59$ м³, масса 61 кг. На спутнике было установлено шесть токовых катушек, четыре из них попарно расположены на противоположных боковых гранях. Каждая из них имела 100 витков провода 30 AWG, размер катушки - 0.54×0.34 м² и сопротивление 50 Ом, ток 0.14 А или 0.56 А в зависимости от способа коммутации. Оставшиеся две катушки имели по 200 витков, сопротивление по 200 Ом, размер 0.34×0.34 м². Ток через катушку - 0.18 А.

3. NokieSat [3] – разработка студентов из Virginia Tech. Имеет форму правильной шестиугольной призмы с большим диаметром (сечения) 0.5 м и высотой 0.3 м. Одна катушка в форме шестиугольника установлена на верхнем основании призмы. Количество витков намотки равняется 80, внутренний диаметр равен 0.145 м. На смежных сторонах перпендикулярно друг другу установлены еще 2 катушки по 133 витков каждая. Эти катушки имеют размеры 0.18×0.23 м². При приложенном напряжении в 3.3 В (мощность 0.75 Вт) каждая катушка вырабатывает дипольный момент до 0.9 Ам². Общий вес катушек составляет 0.57 кг.

4. DTUosat [4,5] – первый спутник из серии CubeSat, разработан в Technical University of Denmark. В соответствии с концепцией CubeSat спутник имеет размеры $0.1 \times 0.1 \times 0.1$ м³ и его масса не должна превышать 1 кг. Спутник был запущен в 2003 г. В качестве магнитной системы управления используются три катушки, расположенные на боковых сторонах каркаса. Диаметр каждой катушки равен 0.07 м. Количество

витков в каждой катушке равно 475. Вес одной катушки равен 0.012 кг. Максимальный дипольный момент, создаваемый одной катушкой, равен 0.035 Ам^2 .

5. CASSat [6] – также относится к спутникам CubeSat, спутник разрабатывается в Center of Excellence for Autonomous Systems в Сиднее. Диаметр и длина проволоки, использовавшейся для намотки катушек, 0.16 мм и 84 м соответственно. Количество витков - 261. Максимальный дипольный момент равен 0.0497 Ам^2 .

6. Шведский наноспутник HUGIN [7] имеет расчетную массу около 5 кг и общее энергопотребление 6 Вт. Для управления на спутнике используются три токовые катушки. Каждая катушка имеет 300 витков медного провода диаметром 0.3 мм. Геометрические размеры катушек - $0.2 \times 0.2 \text{ м}^2$. Такая система производит момент порядка 2.4 Ам^2 при токе 0.2 А.

С целью проверки работоспособности всех систем спутника, а также для достижения максимальной эффективности их работы на орбите необходимо проведение серии наземных экспериментов. Для отработки алгоритмов управления спутником с магнитной системой ориентации можно использовать стенд [8], содержащий имитатор геомагнитного поля. В лабораторных условиях создается магнитное поле, в которое помещается макет спутника, подвешенный вблизи центра масс. Для тестирования алгоритмов управления спутников предлагается система управления с помощью токовых катушек. Прежде чем помещать катушки на макет спутника, рассчитать параметры по массе и энергопотреблению и откалибровать, что необходимо для нормальной работы стенда. Первая задача, которая стоит перед нами, это выбор типа катушки. Катушки могут быть плоские или вытянутые в зависимости от соотношения между диаметром и длиной, с сердечником или без него. Выбрав тип катушки, можно рассчитывать остальные параметры, такие как количество витков, диаметр проволоки обмотки и так далее.

В работе предлагается общий теоретический материал по расчету токовых катушек, также приведены примеры расчетов реальных катушек, используемых на макете спутника. Основной целью работы является расчет параметров катушек - количество витков, потребляемая мощность, масса катушки, а также оптимизация данных величин под конкретно поставленные ограничения по массе и энергопотреблению.

2. Основные теоретические результаты

Введем следующие обозначения:

Заданные величины:

- m_m – дипольный момент катушки,
- ρ – удельное сопротивление материала обмотки,
- $\tilde{\rho}$ – плотность материала обмотки,
- μ – магнитная проницаемость материала,
- U – напряжение на обмотке.

Свободные параметры катушки:

- S_r – площадь сечения проволоки обмотки,
- S – площадь сечения катушки,
- l – сторона витка обмотки,
- N – количество витков обмотки,
- r – сопротивление одного витка,
- L – длина катушки.

Проведем расчеты для токовой катушки. Оценим создаваемый дипольный момент из следующих соображений [8]. Пусть в магнитном поле находится макет спутника, содержащий в себе жестко закрепленный постоянный магнит с дипольным моментом m_m . К магниту, а значит и ко всему макету, со стороны поля приложен механический момент M . Величина этого момента должна быть такой, чтобы обеспечить осцилляции макета с амплитудой A и периодом T вокруг вертикальной оси. Пусть момент инерции макета относительно этой оси равен J .

В случае гармонических колебаний максимальное угловое ускорение макета равно $\varepsilon = A \cdot \omega^2$, где $\omega = 2\pi/T$ – циклическая частота колебаний, T – период колебаний.

Для простоты расчетов предположим, что угол между вектором индукции поля и вектором дипольного момента магнита макета прямой. Тогда момент, действующий на макет, $M = m_m \cdot B$, где B – индукция поля. С другой стороны, $M = J \cdot \varepsilon$. Таким образом, получаем выражение для напряженности поля

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{4\pi^2 AJ}{\mu_0 m_m T^2}.$$

Откуда получаем выражение для дипольного момента

$$m_m = \frac{4\pi^2 AJ}{\mu_0 H T^2}.$$

Пусть $A = \pi$ рад, $J = mR^2/2 = 1.5 \cdot 10^{-2} [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$ – момент инерции однородного цилиндра массой 3 кг и радиусом 0.1 м относительно оси вращения, $T = 3$ мин, $H = 200$ А/м. Подставляя эти данные, получаем, что дипольный момент должен быть равен $m_m \approx 0.24 \text{ Ам}^2$. Заметим, что для

уменьшения характерного времени колебаний макета достаточно увеличить дипольный момент. Теперь найдем такой дипольный момент, что период осцилляций равен 5 мин. После подстановки нового значения времени значение дипольного момента получаем равным $m_m \approx 0.08 \text{ Ам}^2$. Таким образом, для того чтобы вращение макета спутника было заметно наблюдателю, достаточно взять значение дипольного момента порядка $0.2 - 0.3 \text{ Ам}^2$.

В задаче введены ограничения на энергетику катушек и их массу. Таким образом, если мы хотим установить три катушки на макет спутника, то для оптимального расчета катушек на макет необходимо решить задачу оптимизации (минимизации) значений потребляемой мощности и массы каждой катушки при заданном дипольном моменте и напряжении источника.

Варьируемыми параметрами при выбранном материале провода являются площадь проводящего сечения проволоки обмотки S_r , число витков N и площадь сечения катушки S .

Дипольный момент катушки вычисляется по формуле [9]

$$m_m = ISN, \quad (2.1)$$

где I – ток, S – площадь сечения катушки, N – число витков в обмотке. Ток в обмотке равен

$$I = \frac{U}{rN}, \quad (2.2)$$

где U – подаваемое напряжение, r – сопротивление одного витка. Далее известно [10], что

$$r = \rho \frac{\pi l}{S_r}, \quad (2.3)$$

где S_r - площадь сечения обмотки, l – характерный размер витка, тогда $S = \pi l^2/4$. Подставляя все полученные выражения в формулу (2.1), имеем $m_m = (U \cdot l \cdot S_r)/(4\rho)$ и получаем следующее выражение для площади сечения обмотки:

$$S_r = \frac{4\rho m_m}{Ul}. \quad (2.4)$$

Теперь рассмотрим потребляемую катушкой мощность $W = U^2/(rN)$. После подстановки в эту формулу выражения для сопротивления витка и площади сечения проволоки получим следующее выражение для потребляемой мощности:

$$W = \frac{U^2}{\pi\rho l} \cdot \frac{4\rho m_m}{Ul} \cdot \frac{1}{N}. \quad (2.5)$$

Из формулы (2.5) видим, что чем больше сечение катушки, тем меньше потребляемая мощность (при фиксированных магнитном моменте, напряжении, количестве витков в катушке). Выпишем отдельно итоговое

выражение для потребляемой мощности, которое мы будем использовать дальше

$$W = \frac{4m_m}{\pi l^2} \cdot \frac{U}{N}. \quad (2.6)$$

Если учесть, что количество витков в катушке в случае плотной намотки определяется площадью сечения проволоки и длиной катушки L , то тогда получаем $N = L/\sqrt{S_r}$, в этом случае выражение для мощности будет следующим:

$$W = \frac{4m_m}{\pi l^2} \cdot \frac{U\sqrt{S_r}}{L}. \quad (2.7)$$

Теперь рассчитаем массу катушки, как произведение плотности материала обмотки на объем проводника

$$m = \tilde{\rho} \cdot \pi l S_r \cdot N. \quad (2.8)$$

Итоговое выражение для массы катушки после подстановки выражения для площади сечения проволоки (2.4)

$$m = 4\pi\rho\tilde{m}_m \frac{N}{U}. \quad (2.9)$$

Так как нам необходимо минимизировать и мощность и массу, рассмотрим их произведение

$$mW = \frac{16m_m^2\rho\tilde{\rho}}{l^2}. \quad (2.10)$$

Из формулы (2.10) видим, что сечение катушки следует брать максимальным, а материал выбирать с минимальным произведением $\rho\tilde{\rho}$. То есть в качестве токовой катушки на спутник из соображений минимума массы и потребляемой мощности выгодно брать плоскую катушку [11].

Запишем формулу для напряжения источника тока

$$U = IrN = \rho \frac{\pi l}{S_r} IN. \quad (2.11)$$

Напряжение питания пропорционально количеству витков и диаметру катушки и обратно пропорционально площади обмотки. На рис.1 и рис.2 проиллюстрирована обратная зависимость напряжения от площади сечения обмотки для разных значений диаметра катушки для двух значений длины катушки ($L=0.1$ м и $L=0.25$ м).

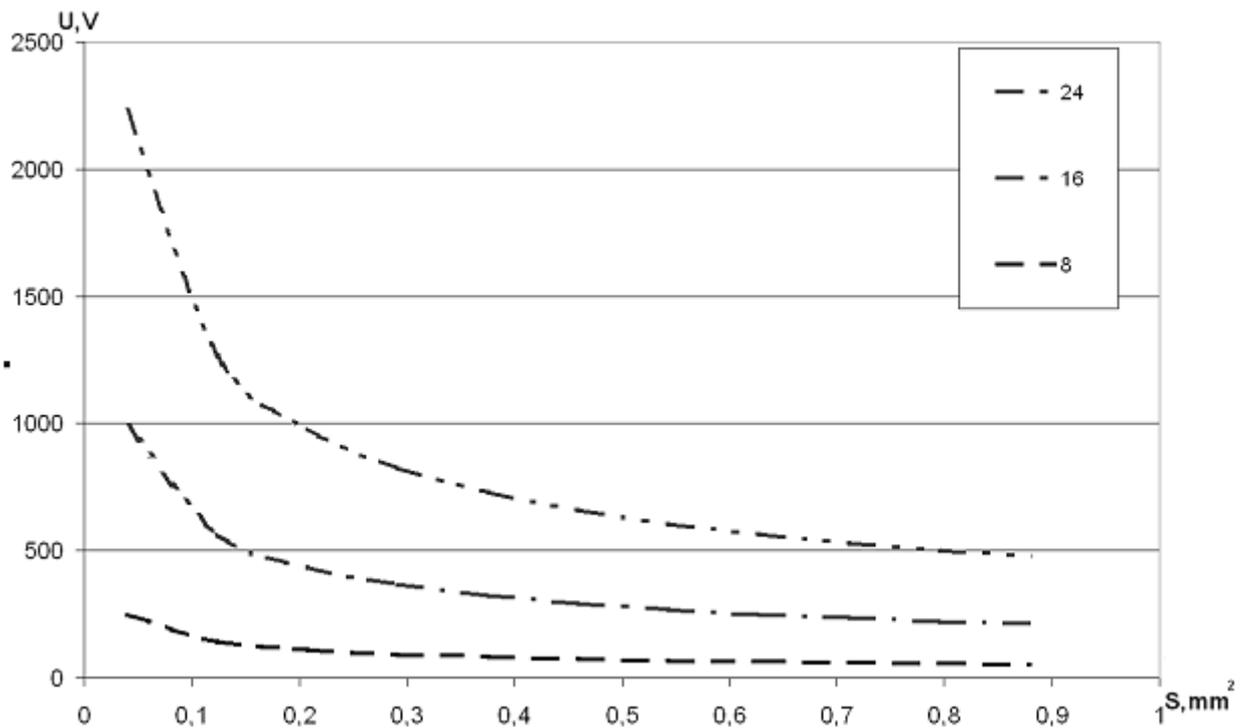


Рис.1. Напряжение источника в зависимости от площади обмотки при длине катушки $L=0.25$ м при различных значениях диаметра катушки (мм). Значения диаметра катушки указаны на врезке в порядке следования графиков

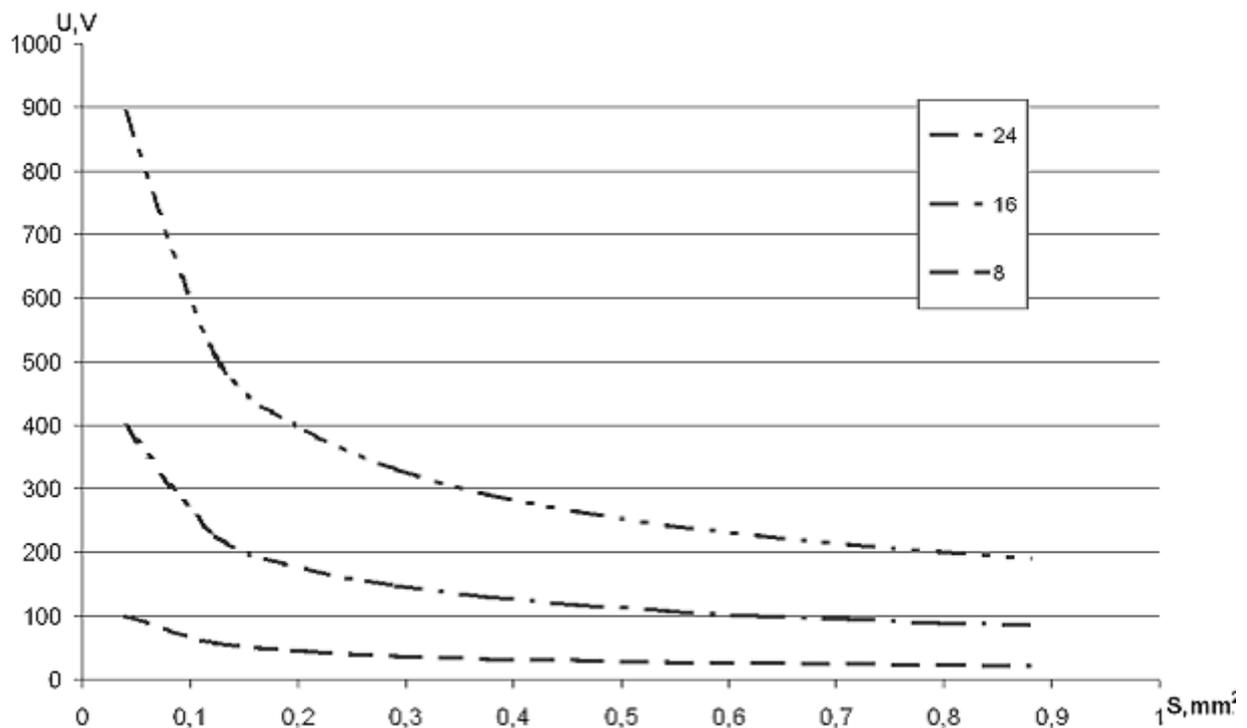


Рис.2. Напряжение источника в зависимости от площади обмотки при длине катушки $L=0.1$ м при различных значениях диаметра катушки (мм). Значения диаметра катушки указаны на врезке в порядке следования графиков

На рис.3 и рис.4 показана зависимость напряжения источника от диаметра катушки при различных длинах катушки для фиксированных значений площади сечения обмотки.

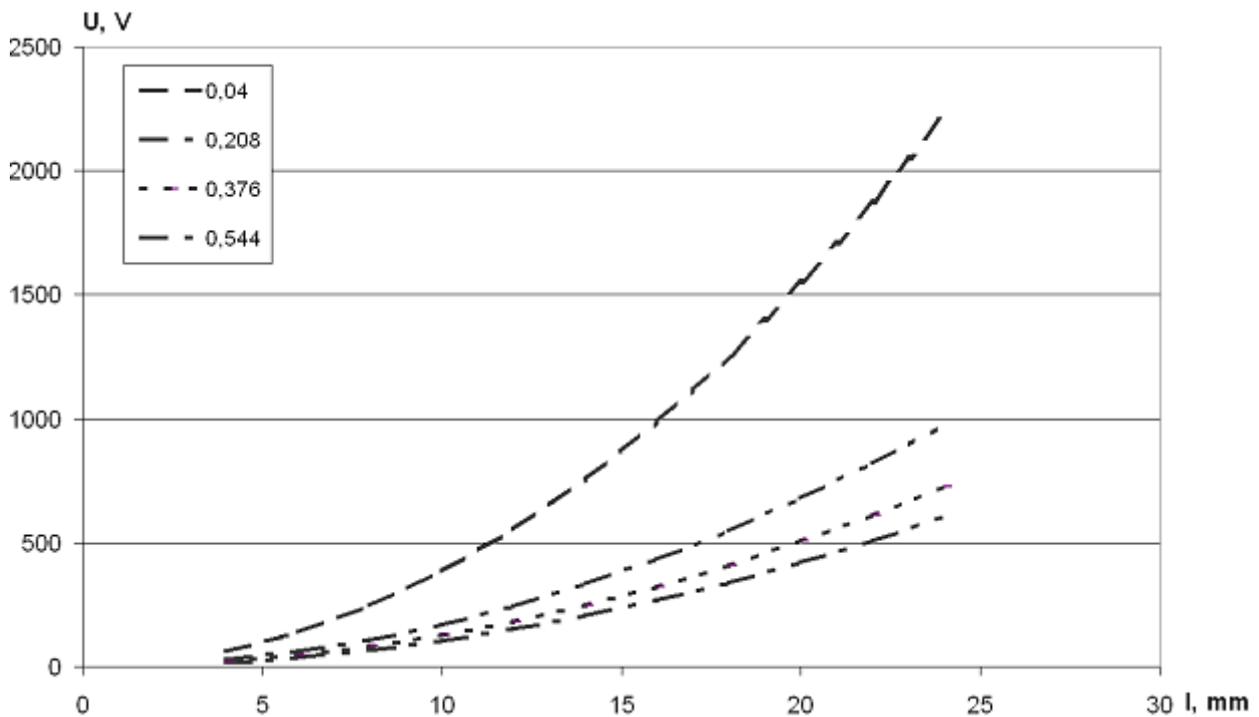


Рис.3. Зависимость напряжения источника от диаметра катушки при длине катушки $L=0.25$ м для различных значений сечений обмотки (в мм^2). Значения сечения обмотки – на врезке в порядке следования графиков

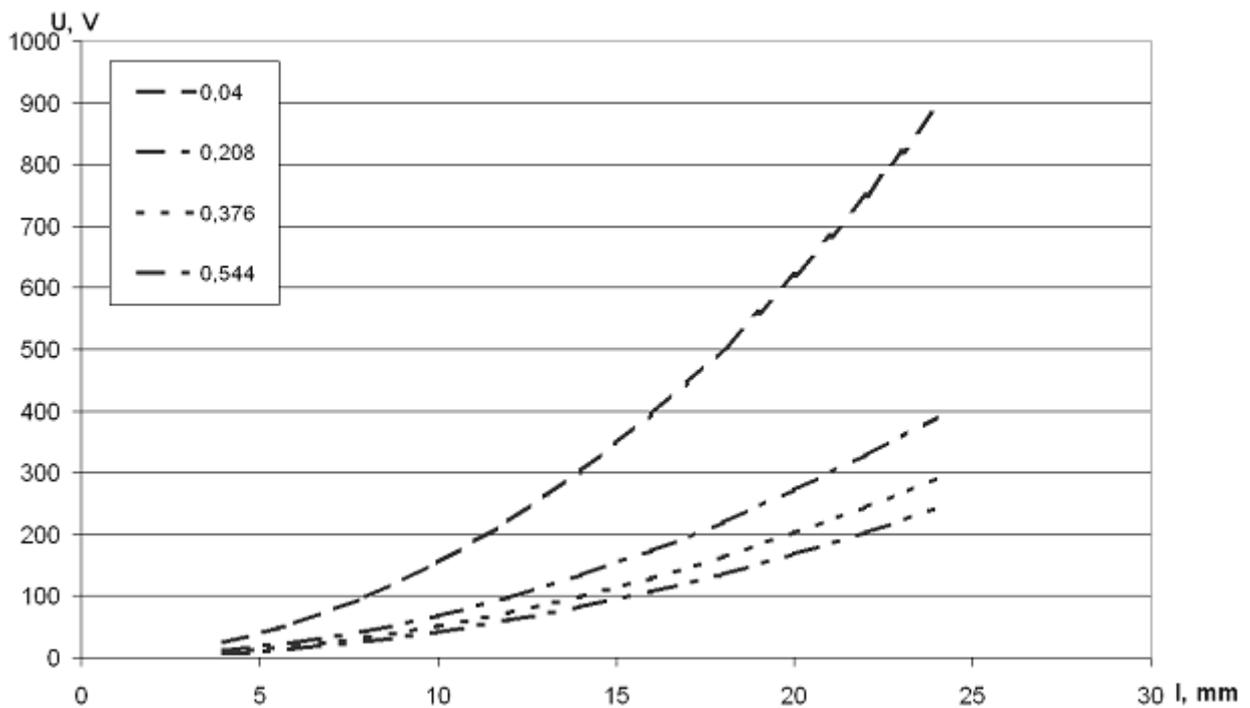


Рис.4. Зависимость напряжения источника от диаметра катушки при длине катушки $L=0.1$ м для различных значений сечений обмотки (в мм^2). Значения сечения обмотки – на врезке в порядке следования графиков

На рис.5 проиллюстрирована обратная зависимость количества витков катушки от площади сечения обмотки при фиксированных значениях длины катушки.

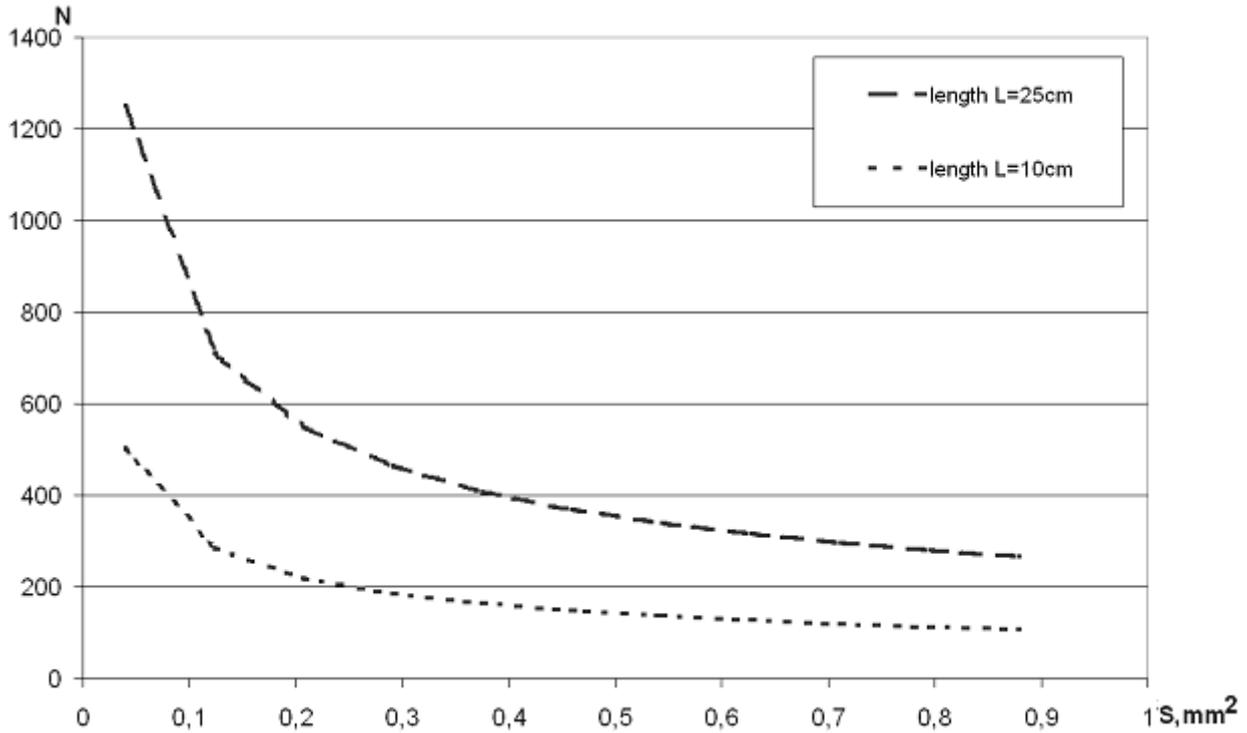


Рис.5. Зависимость количество витков катушки от площади сечения обмотки для двух значений длины катушки

Теперь запишем формулы для случая квадратного сечения катушек. В результате подстановки преобразованных соответствующим образом выражений для площади сечения и диаметра проволоки формулы для напряжения, массы и мощности запишутся следующим образом:

$$W = \frac{m_m}{l^2} \cdot \frac{U}{N},$$

$$m = 16\rho\tilde{m}_m \frac{N}{U},$$

$$mW = 16\rho\tilde{m}_m \frac{N}{U} \cdot \frac{m_m}{l^2} \frac{U}{N} = \frac{16m_m^2\rho\tilde{\rho}}{l^2},$$

$$U = IrN = \rho \frac{4l}{S_r} IN.$$

Видим, что полученные формулы незначительно отличаются (множителем $\pi/4$) от соответствующих формул (2.6, 2.9, 2.10, 2.11) для круглого сечения. Поэтому в случае использования квадратного каркаса не обязательно пересчитывать численные значения, если уже произведен расчет для круглого каркаса, достаточно учесть поправку на 20% на увеличение мощности в случае круглого каркаса и увеличение массы в случае квадратного. Произведение же величин массы и мощности остается постоянным.

Далее посмотрим, как повлияет наличие сердечника. В качестве материала сердечника рассмотрим пермаллой 79НМ. Будем считать, что его магнитная проницаемость равна 50000, так как табличная величина

проницаемости изменяется от 20000 до 70000 – 150000. Для простоты проведем все выкладки для случая квадратного каркаса.

Считаем, что дипольный момент от сердечника и самой катушки складывается

$$m_m = m_{\text{кат}} + m_{\text{серд}} = IN(S + S_{\text{серд}}(\mu - 1)).$$

После несложных преобразований получаем выражение для площади сечения обмотки

$$S_r = \frac{4Im_m\rho}{U(I^2 + S_{\text{серд}}(\mu - 1))}. \quad (2.12)$$

Масса катушки равна сумме масс обмотки и магнита

$$m = \frac{16NI^2m_m\rho\tilde{\rho}}{U(I^2 + S_{\text{серд}}(\mu - 1))} + \rho_{\text{перм}}N \cdot \sqrt{S_r} \cdot S_{\text{серд}}. \quad (2.13)$$

Потребляемая мощность равна

$$W = \frac{m_m U}{NI^2}. \quad (2.14)$$

Тогда произведение массы катушки на потребляемую мощность равно

$$mW = \frac{16m_m^2\rho\tilde{\rho}}{(I^2 + S_{\text{серд}}(\mu - 1))} + \frac{\rho_{\text{перм}} \cdot m_m \cdot U \cdot \sqrt{S_r} \cdot S_{\text{серд}}}{I^2}.$$

Подставим численные значения в формулу (2.12). Все расчеты будем проводить при заданном дипольном моменте в 1 Ам^2 . Выпишем основные заданные величины:

- площадь сечения сердечника, а значит и диаметр, равны соответственно $S_{\text{серд}} = 3.14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, $d_{\text{серд}} = 2 \text{ мм}$;
- магнитная проницаемость пермаллоя: $\mu = 50000$;
- плотность пермаллоя: $\rho_{\text{перм}} = 8.6 \cdot 10^3 [\text{кг/м}^3]$.

После подстановки значений получаем площадь сечения обмотки $S_r = 1.13 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$. Тогда диаметр сечения равен $d_r = 0.01 \text{ мм}$. Получили слишком малое значение диаметра проволоки для создания тонкой длинной катушки с заданными ограничениями. Уменьшение дипольного момента еще больше уменьшит значение диаметра.

Пусть весь дипольный момент дает сердечник (можно оценить соотношение между моментом, создаваемым магнитом, и моментом от обмотки катушки, и показать, что такое предположение непротиворечиво), проведем в этом случае исследования уравнений для площади обмотки. Значение сопротивления на одном витке в таком случае равно $r = 1.875 \text{ Ом}$, а после преобразования формулы для расчета сопротивления получаем, что соотношение общей длины проволоки к ее площади сечения равно $1/S_r = r/4\rho = 1.25 \cdot 10^7 [\text{м}^{-1}]$. Среди рассмотренных образцов проволоки не

удалось подобрать такие значения диаметра катушки и площади обмотки, чтобы выполнялось это соотношение.

Рассмотрим графики зависимости площади сечения материала обмотки от диаметра катушки (рис.6). Видим, что площадь сечения проволоки для приемлимых значений диаметра катушки слишком мала.

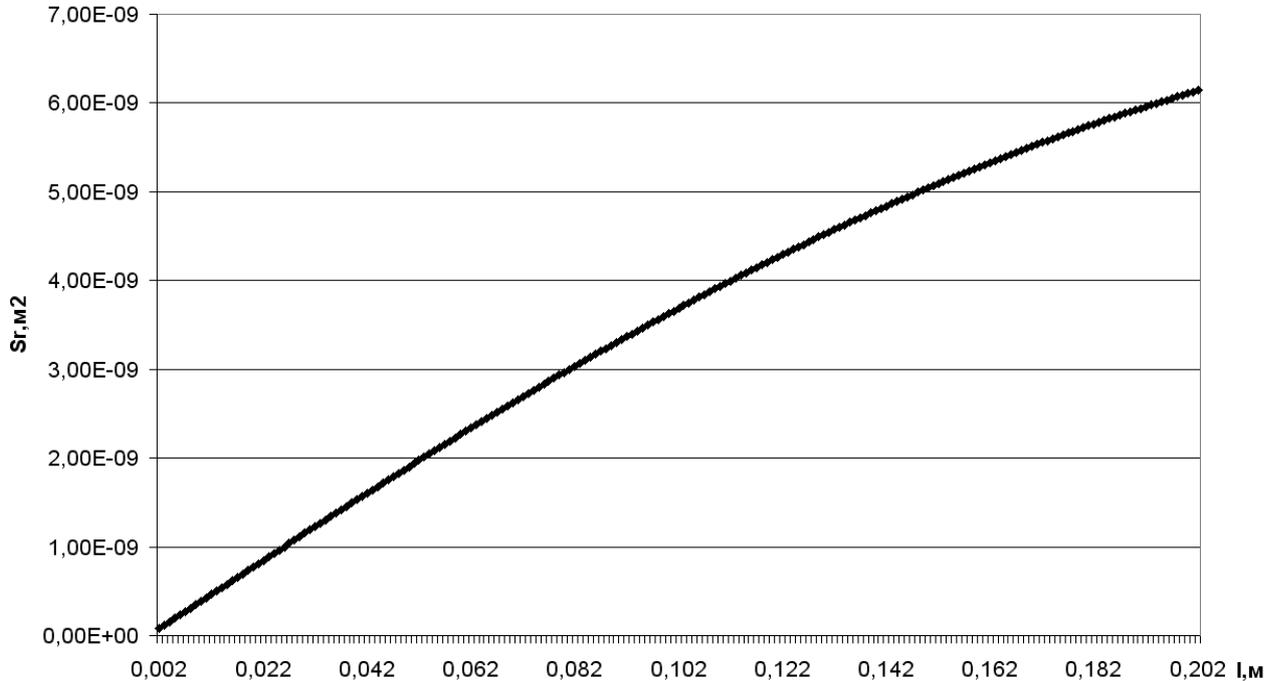


Рис.6. График зависимости площади сечения обмотки от характерного размера витка катушки

3. Расчет катушек для макета

В настоящем разделе проведем расчеты катушки непосредственно для макета спутника с учетом всех наложенных сверху ограничений.

Исходные данные:

- максимальное напряжение источника – 14.4 В,
- общая потребляемая мощность - менее 1 Вт,
- требуемый момент - порядка 0.2 Ам²,
- общая масса трех катушек - не более 0.25 – 0.3 кг,
- длина ребра макета спутника - 0.14 м.

Ограничения:

- $m_m = 0.29 \text{ Ам}^2$ - магнитный момент катушки,
- $W \leq 0.3 \text{ Вт}$ - джоулева мощность на одной катушке (то есть в сумме это составляет менее 1 Вт на трех катушках),
- $m \leq 0.09 \text{ кг}$ - масса одной катушки.

Ограничение на требуемый дипольный момент возникло в п.2 в результате введенного ограничения на характерное время осцилляций макета спутника.

Характеристики меди

$\tilde{\rho} = 8.9 \cdot 10^3$ [кг/м³] – плотность меди,

$\rho = 0.0175 \cdot 10^{-6}$ [ом · м] – удельное сопротивление меди.

Из формул (2.9) и (2.10) получаем

$$\rho \tilde{\rho} = 0.16 \cdot 10^{-3} \rightarrow \begin{cases} m = 5.8 \cdot 10^{-4} \frac{N}{U} \\ W = 20 \frac{U}{N} \\ S_r = \frac{4\rho m_m}{UI} = 1.5 \cdot 10^{-7} \frac{1}{U}. \end{cases} \quad (3.1)$$

Добавив начальные ограничения, получим следующие условия на массу и мощность:

$$\begin{cases} m = 5.8 \cdot 10^{-4} \frac{N}{U} \leq 0.06 \text{ кг} \\ W = 20 \frac{U}{N} \leq 0.3 \text{ Вт.} \end{cases}$$

Далее, преобразовав эти условия, получим следующие ограничения на количество витков катушки: $67 \leq N/U \leq 103$. Откуда при заданном значении максимального напряжения следуют неравенства $965 \leq N \leq 1490$. Получили совместное условие на количество витков. Выбор количества витков зависит от того, какую величину нам желательнее уменьшить - массу или энергопотребление.

Таким образом, мы приходим к следующим выводам:

- материалом катушки следует брать медь,
- диаметр витка $l = 0.135$ м (так как задано ограничение сверху),
- площадь сечения материала обмотки должна быть равна $S_r = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$,
- напряжение на катушке равно 14.4 В,
- количество витков берем равным 965,
- длина катушки (в случае однослойной намотки) $L \approx 0.1$ м.

Если же намотку делать не однослойную, то, соответственно, во сколько раз хотим уменьшить высоту катушки, таким и будет количество слоев намотки. Например, если хотим свести к $L = 10$ мм, то слоев должно быть 10, в каждом слое 98 - 100 витков (намотка плотная), и высота намотки, то есть увеличение диаметра катушки, в случае плотной намотки будет порядка 5 мм. Для учета изоляции достаточно прибавить еще по 5 мм.

- масса намотки катушки будет равна $m = S_r \cdot \pi \cdot l \cdot N \cdot \tilde{\rho} = 0.037$ кг.

Вычислим ток в катушке, используя формулу (2.1). Получаем $I \approx 0.02$ А.

Увеличивать площадь сечения обмотки для увеличения создаваемого момента не получится, так как при таком увеличении площади сечения

быстро растет масса катушек, - как квадрат дипольного момента, так как площадь сечения прямо пропорциональна дипольному моменту

$$m = \frac{16\rho\tilde{\rho}}{l^2w} m_m^2 .$$

Приведем листинг численных результатов, полученный с помощью программы «katushka2»¹:

Введи маг. момент катушки (Ам²): 0.29
Введи потребляемую мощность (вт): 0.3
Введи напряжение на концах катушки (в): 14.4
Введи диаметр катушки (м): 0.135

=====

М Е Д Ъ

Удельная масса меди 8.9·10³ [кг/м³], удельное сопротивление 1.75·10⁻⁸ [Ом·м]
Масса провода 0.038331 [кг]
Объем провода 4.3069 10⁻⁶ м³
Площадь поперечного сечения провода 0,010442 мм²
Диаметр провода 0,11531 мм
Длина провода 412,4444 м
Число витков 972,4825
Длина однослойной катушки из провода без изоляции 0,11213 м
Сопротивление провода 691,2 ом
Ток в катушке 0,020833 а
Плотность тока 1,9951 а/мм²

Видим достаточно хорошее согласование результатов программы с результатами, полученными нами. Относительные погрешности расчетов:

- массы провода 4%;
- площади поперечного сечения 4%;
- число витков 1%;
- длина однослойной катушки 12%;
- ток в катушке 4% .

Уменьшать количество витков за счет уменьшения дипольного момента нельзя, так как при этом уменьшится и площадь сечения обмотки. Посмотрим, как изменятся результаты, если бы диаметр проволоки был равен $d = 0.068$ мм, тогда площадь поперечного сечения будет равна $S_r = 0.0036$ мм². Во Введении было показано, что значение дипольного момента около 0.1 Ам² дает период колебаний меньше 10 минут. Площадь сечения проволоки: $S_r = 4\rho m_m / U_l$. Считая, что диаметр катушки $l = 0.135$ м, найдем момент, который можем получить на такой системе, - $m_m = 0.1$ Ам².

¹ Программа «katushka2» для расчета параметров токовых катушек. Автор Пеньков В.И.

Значение дипольного момента достаточно для того, чтобы период колебаний макета был порядка 5 минут.

Вычислим потребляемую такой системой мощность по формуле (2.6) - $W = 101/N$. Из требований ограничения по мощности найдем минимальное число витков в обмотке - так как $W \leq 0.3$ Вт, то, следовательно, $N \geq 337$. Длина катушки в случае однослойной намотки $L \approx 20$ мм. Если же тзготавливать не однослойную катушку, то, соответственно, во сколько раз требуется уменьшить высоту катушки, столько слоев необходимо намотать. Масса катушки будет равна $m = S_r \cdot \pi \cdot l \cdot N \cdot \rho = 0.0045$ кг. Вычислим ток в катушке - $I \approx 0.02$ А. Длина провода, необходимого на обмотку одной катушки, - 142 м. На три катушки, соответственно, требуется 426 м.

Численные результаты: листинг программы расчета параметров токовых катушек:

Введи маг. момент катушки (Am^2): 0.1

Введи потребляемую мощность (вт): 0.3

Введи напряжение на концах катушки (в) : 14.4

Введи диаметр катушки (м) : 0.135

=====

М Е Д Ь

Удельная масса меди $8.9 \cdot 10^3$ [кг/м³], удельное сопротивление $1.75 \cdot 10^{-8}$ [Ом·м]

Масса провода 0.0045578 [кг]

Объем провода $0.5121 \cdot 10^{-6}$ м³

Площадь поперечного сечения провода 0.0036008 мм²

Диаметр провода 0.06771 мм

Длина провода 142.2222 м

Число витков 335.3388

Длина однослойной катушки из провода без изоляции 0.022706 м

Сопротивление провода 691.2 ом

Ток в катушке 0.020833 а

Плотность тока 5.7857 а/мм²

Сравним результаты расчетов программы с нашими расчетами. Относительные погрешности расчета основных параметров катушек:

- масса проволоки 1%;
- площадь поперечного сечения проволоки <1%;
- длина проволоки <1%;
- число витков <1%;
- длина однослойной катушки 13%;
- ток в катушке 4%;

Видим относительно хорошее совпадение результатов, полученных с использованием приближенных формул, с результатами расчетов с использованием программы.

4. Результаты

В качестве материала для каркаса катушек используется эбонит (его плотность - $1150 - 1680 \text{ кг/м}^3$). Каркас выточен из пластины толщиной 8 мм, поэтому и высота катушки равна 8 мм, а ширина обмотки составляет 6 мм. Внутренний диаметр каркаса равен 0.125 м, отступы на «щечки» - 5 мм. Отход от планируемого значения 0.135 м возник из-за необходимости укладывать проволоку в ограниченный размер по высоте катушки. Общая масса такой конструкции каркаса и обмотки по расчетам будет достигать величины порядка 0.07 – 0.08 кг.

Диаметр проволоки, используемой для намотки катушек, равен 0.1 мм. Сопротивление всей катушки 1550 Ом. Тогда удельное сопротивление равно $1.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Используя формулы (2.4) и (2.6), получим значения количества витков и создаваемый дипольный момент. Дипольный момент от каждой катушки равен 0.21 Ам^2 , количество витков равно 823.

Расположение трех катушек на макете спутника и отдельная катушка показаны на рис.7 и рис.8 соответственно.



Рис.7. Макет спутника с установленными во взаимно перпендикулярных плоскостях тремя катушками



Рис.8. Катушка для макета спутника

Сравним расчетные электрические характеристики катушки с измеренными величинами после намотки катушки. Расчетное сопротивление катушки можно получить, зная общее сопротивление исходного мотка проволоки и его длину, воспользовавшись тем, что сопротивление проволоки прямо пропорционально ее длине. Начальная длина проволоки равна 715 м, ее сопротивление равно 1550 Ом. Расчетная длина намотки на одну катушку равна $L = \pi D * N_{\text{ВИТКОВ}}$, где D – диаметр катушки (в среднем 0.13 м), расчетное количество витков для достижения необходимого дипольного момента порядка 823. Тогда расчетная длина намотки примерно равна 336 м. Из соотношения пропорции получаем, что сопротивление одной намотанной катушки порядка $R = 336 \text{ м} \cdot 1550 \text{ Ом} / 715 \text{ м}$, что примерно равно 730 Ом. Измеренное значение сопротивления намотанной катушки примерно равно 750 Ом. То есть отклонение измеренного сопротивления от расчетного составляет около 3%. Измеренная масса катушки равна 0.084 кг, то есть суммарная масса трех катушек равна 0.252 кг, что достаточно хорошо согласуется с ограничениями на массу катушек.

5. Заключение

В работе приведены различные параметры магнитных катушек и установлены зависимости между ними. Показана возможность подбора параметров массы и мощности по возможности близких к их требуемым оптимальным значениям. Проведены расчеты катушек для макета спутника. Итог расчетов:

- Для намотки катушек выбрана проволока диаметром 0.1мм, катушка плоская, многослойная, количество слоев - 20 – 25.
- Внутренний диаметр катушки – 125 мм без учета многослойности, намотка слоев и учет изоляции дает еще около 3 – 7 мм. Тем самым, края каркаса выступают на 4 мм с каждой стороны.
- Высота катушки зависит от количества намотанных слоев, но не может превышать 10 мм за счет ограничений со стороны каркаса, и составляет 6 мм.
- Количество витков - не менее 823.
- Масса обмотки для каждой катушки будет в таком случае около 0.025 кг. Суммарная масса одной катушки - 0.084 кг.
- Мощность, потребляемая каждой катушкой, ограничена величиной 0.3 Вт при напряжении 14.4 В.
- Создаваемый катушкой дипольный момент - 0.21 Ам^2 .
- Длина проволоки для обмотки одной катушки - не более 340 м. На намотку всех трех катушек затрачено около 1100 м проволоки.
- Расчетное сопротивление каждой катушки - 730 Ом;
- Измеренное сопротивление катушек - около 750 Ом.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 03-01-00652) и Программы Президента РФ по поддержке Ведущих научных школ (проект НШ.2003.2003.1).

Отдельная благодарность Пенькову В.И. за предоставленную программу для вычисления параметров токовых катушек и полезные обсуждения.

Литература

1. www.asri.org.au/ASRI/research/satellite/australis/19acs.doc
2. Ovchinnikov M.Yu., Small Satellites in Russia and in the World: Current State, Journal for Space Communications, 1995, V.13, N 1, pp.45-50.
3. www.aoe.vt.edu/~cdhall/papers/aas01-311.pdf
4. microsat.sm.bmstu.ru/e-library/Algorithms/CommonDesign/dtu_torsten.pdf
5. <http://www.dtusat.dtu.dk>
6. www.acfr.usyd.edu.au/projects/development/aerospace/CASsat/AD&C/
7. www.particle.kth.se/~fmi/hugin/publ/HUGIN11.html
8. Овчинников М.Ю., Цветков Е.А., Проектирование имитатора геомагнитного поля в составе лабораторного стенда для отработки способов управления ориентацией микроспутников, Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН №55, Москва, 2005
9. Сивухин Д.В., Общий курс физики том 3 Электричество //М.: Физматлит МФТИ, 2002
10. Калашников С.Г., Электричество, "Наука", 1970
11. Коваленко А.П., Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами, М.: Машиностроение, 1975

Содержание

1. Введение.....	3
2. Основные теоретические результаты	5
3. Расчет катушек для макета.....	12
4. Результаты	16
5. Заключение	17
Благодарности	18
Литература	18
Содержание.....	18