

Электромагнитный метод автоматического причаливания и стыковки космических аппаратов



К. К. Ким,
д.т.н., профессор,
зав. кафедрой «Теорети-
ческие основы электро-
техники» Петербургского
государственного универ-
ситета путей сообщения
Императора Александра I
(ПГУПС)



Е. А. Благовещенская,
д.ф.-м.н., профессор,
зав. кафедрой «Высшая
математика» ПГУПС



В. Г. Дегтярев,
д.т.н., профессор кафедры
«Математика и модели-
рование» ПГУПС

Для автоматической операции причаливания космических аппаратов можно использовать силу взаимодействия двух сверхпроводниковых соленоидов, из которых хотя бы один работает в режиме замкнутого сверхпроводящего контура.

Известны системы причаливания и стыковки, где управляющие силы создаются специальными электромагнитами. Их недостатком является увеличение силы притяжения электромагнитом при уменьшении расстояния между сближающимися космическими аппаратами (КА), что приводит к необходимости создания управляющих систем. Для этого нужна новая система причаливания. После первого механического контакта КА начинается операция стыковки. Окончание стыковки — жесткое сцепление космических аппаратов.

Используемые в настоящее время стыковочные узлы требуют жесткого выполнения требования по выравниванию стыковочных осей КА. В связи с этим возникла необходимость разработать новую систему стыковки.

Операция причаливания

Корпуса сближающихся космических аппаратов 1, 2 несут на себе системы поиска и наведения 3, двигатели 4 (рис. 1). В отсеках стыковочных узлов 5 установлены кольцевые сверхпроводящие соленоиды (СС) 6, 7, которые снабжены сверхпроводящими ключами (СК) 8 и расположены в криостатах 8.

Перед началом причаливания аппаратов 1, 2 в сверхпроводящих соленоидах 6, 7 заводятся токи. Затем СС переводятся в режим замкнутого сверхпроводящего контура, таким образом они начинают работать в режиме постоянства потокосцепления — в режиме «замороженного» магнитного потока (ЗП). Допускается, когда в режиме ЗП работает только один СС, ток в другом СС поддерживается постоянным принудительно.

Значения токов I_1, I_2 в СС перед началом стыковки заданы наперед. Они определены в ходе наземных испытаний.

На орбите операция причаливания и стыковки КА 1, 2 продолжается следующим образом. С помощью систем наведения и связи 3 и двигателей 4 происходит сближение КА до расстояния, на котором начинает сказываться взаимное влияние магнитных полей СС. Сближение КА (токи I_1, I_2 направлены согласно) происходит только за счет силового взаимодействия СС.

От значений токов I_1, I_2 , которыми запитываются СС, зависит расстояние (x_0) между СС в конце операции причаливания. По ходу уменьшения расстояния между КА (x) ($x > x_0$) значения токов I_1, I_2 уменьшаются (условие постоянства потокосцепления) и в положении, когда $x = x_0$, сила притяжения между СС примет нулевое значение. Если КА еще сближаются по инерции ($x < x_0$), в одном из СС, работающем в режиме ЗП, возбуждается ток противоположного направления по сравнению со случаем $x > x_0$. Между СС начинает действовать сила отталкивания, которая растет с уменьшением x . То есть КА стремятся занять положение, при котором $x = x_0$. По окончании операции причаливания начинается операция стыковки КА.

Аналогичная картина имеет место и при боковом смещении СС.

Проведены расчетные исследования, когда кольцеобразные сверхпроводящие соленоиды заменялись на эквивалентные квадратные. Размеры эквивалентных СС выбирались исходя из условия равенства площадей поперечных сечений кругового и квадратного СС.

Кольцеобразные сверхпроводящие соленоиды экспериментальной системы имели следующие параметры: неподвижный СС с прямоугольным сечением обмотки 46×72 мм², внутренним диаметром 200 мм и внешним диаметром

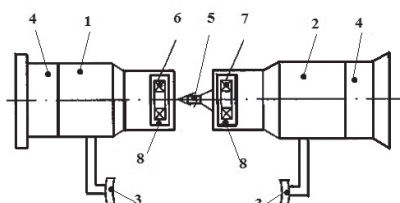


Рис. 1

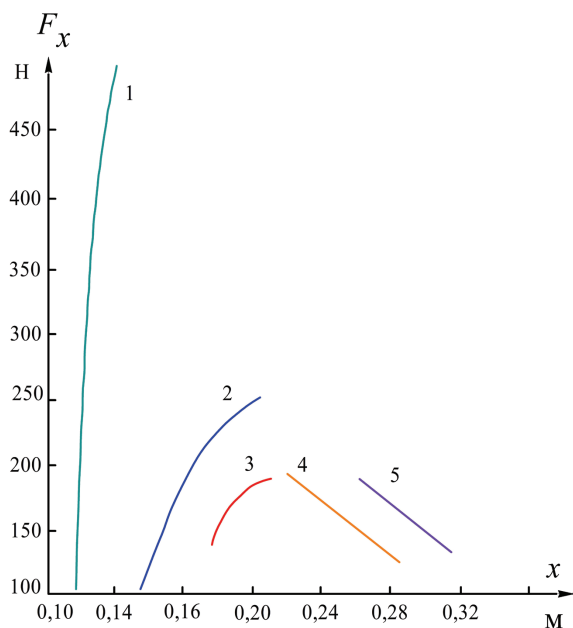


Рис. 2

290 мм имел 290 витков; подвижный СС с прямоугольным сечением обмотки 58×21 мм, внутренним диаметром 135 мм и внешним диаметром 250 мм имел 628 витков.

На рис. 2 представлены зависимости продольной силы F_x от x для $x_0 = 0,12 - 0,28$ м (при $y = 0$ и $I_0 = 500$ А), x_0 — расстояние между плоскостями средних витков СС.

Из графиков видно, что причаливание при $x_0 = 0,20$ м происходит нормально.

На рис. 3 показаны зависимости боковой стабилизирующей силы F_y (сплошные линии), действующей на подвижный СС при его боковом смещении. Расстояние $x = x_0$, при котором завершается причаливание, указано для каждой зависимости. Начальное значение тока I_{10} неподвижного СС равнялось 500 А, а начальное значение тока подвижного СС, находящегося в соосном положении с неподвижным СС, в каждом из пяти случаев рассчитывалось из условия $P = 176,6$ Н:

- 1 — $I_{20} = 3,78$ А;
- 2 — $I_{20} = 6,80$ А;
- 3 — $I_{20} = 11,6$ А;
- 4 — $I_{20} = 18,9$ А;
- 5 — $I_{20} = 29,6$ А.

Кривая 1 соответствует $x_0 = 0,12$ м, кривая 2 — $x_0 = 0,16$ м, кривая 3 — $x_0 = 0,20$ м, кривая 4 — $x_0 = 0,24$ м, кривая 5 — $x_0 = 0,28$ м.

При боковом смещении подвижного СС в соответствии с условиями постоян-

ства потокоцепления меняются токи I_1, I_2 . В данном случае изменение тока I_1 составляет менее 0,01 % от начального значения. Изменение тока I_2 при изменении y в диапазоне 0–30 мм составляет:

- 1 — $I_{20} = 3,78 - 5,70$ А;
- 2 — $I_{20} = 6,80 - 7,76$ А;
- 3 — $I_{20} = 11,6 - 12,10$ А;
- 4 — $I_{20} = 18,9 - 19,20$ А;
- 5 — $I_{20} = 29,6 - 29,80$ А.

Боковое смещение подвижного СС приводит к изменению продольной силы F_x . На рис. 3 прерывистыми линиями показаны графики силы F_x в зависимости от бокового смещения y . Обозначения и исходные данные те же, что и для зависимостей F_y от y . Штрихпунктирной линией показано значение $F_x = P$. Четвертый и пятый графики близки друг другу, поэтому график 5 на рис. 3 не показан.

Для проведения экспериментальных исследований была создана установка, на которой имитация причаливания производилась следующим образом. Один СС 1 закреплялся неподвижно на каркасе установки, а другой СС 2 подвешивался под СС 1 с помощью механических связей. Масса СС 2 равнялась 18 кг. Для передачи возмущений на СС 2 к его нижней и боковым поверхностям прикреплялись гибкие тяги с динамометрами.

В СС 1 и СС 2 заводились токи такой величины, чтобы между соленоидами возникала сила притяжения, равная весу СС 2. Затем механические связи

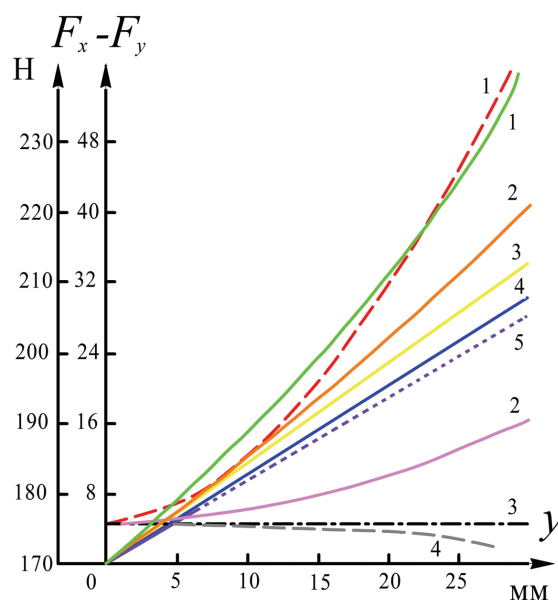


Рис. 3

ослаблялись, и СС 2 левитировал в воздухе. Измерялось расстояние x_1 между СС 1 и СС 2. После этого посредством тяг на СС 2 передавалось механическое усилие (Fb_1) до тех пор, пока левитация СС 2 не нарушалась. Рассчитывалась полная сила $F_1 = P + Fb_1$. Потом выполнялись аналогичные операции, но при другом расстоянии x_2 между СС 1 и СС 2, полная сила в этом случае определялась как $F_2 = P + Fb_2$, и т. д.

По результатам измерений строилась продольная силовая характеристика причаливания (рис. 4).

Кривые 1 и 2 характеризуют вариант причаливания, когда СС 1 находится в режиме принудительной запитки (величина тока в нем поддерживается постоянной принудительно), в режиме ЗП работает только СС 2. Кривая 3 характеризует второй вариант причаливания,

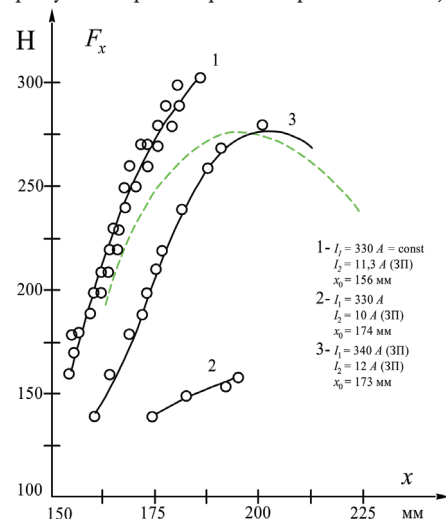


Рис. 4

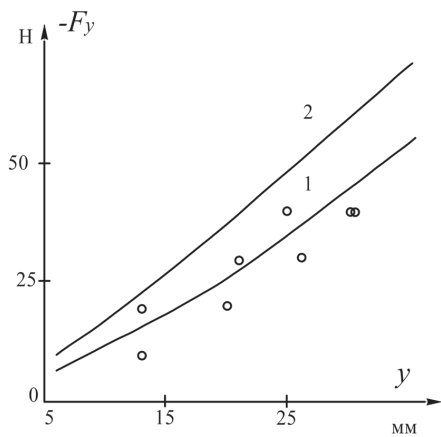


Рис. 5

когда оба соленоида функционируют в режиме ЗП.

Расчетная кривая, соответствующая экспериментальной кривой 3, показана прерывистой линией. Расхождение не превышает 25 % от веса СС 2, что можно объяснить неточным определением продольной координаты x .

Боковая стабилизация процесса причаливания происходит аналогичным образом. На рис. 5 представлены результаты эксперимента (кривая 1) и расчета (кривая 2) при боковом смещении СС 2. Максимальное расхождение опытных и расчетных данных составило 10 % от веса СС 2.

Таким образом, рассматриваемая система причаливания может функционировать в автоматическом режиме.

Использование сверхпроводящих соленоидов привносит с собой определенные особенности и накладывает некоторые ограничения на условия выполнения операции причаливания, так как каждому сверхпроводнику, из которого выполняется обмотка СС, свойственна допустимая скорость изменения в нем тока, при которой последний еще находится в сверхпроводящем состоянии, другими словами, скорость сближения КА не должна превышать установленного значения.

Изменение тока приводит к энергетическим потерям в сверхпроводнике — происходит разогрев СС, поэтому вопрос определения допустимых скоростей изменения тока в СС связан с решением задачи теплового состояния СС в этом режиме.

Решение тепловой задачи с учетом всех особенностей работы СС в аналитическом виде невозможно, поэтому целесообразно принять определенные допущения и предположения: 1) непрерывное распределение тепловыделений

заменяется распределением точечных источников; 2) функция внутреннего источника тепла определена на основе расчета потерь в СС для заданного изменения поля в сечении СС во времени; 3) слоистая структура СС заменяется на однородную анизотропную среду; 4) трехмерная задача сводится к двумерной (x, y) , так как теплопроводность слоистой обмотки в направлении оси провода на два порядка превышает теплопроводность в поперечных направлениях; 5) граничные условия, определяющие характер теплового взаимодействия между поверхностью СС и внешней средой, могут быть заданы любыми (I, II и III рода) на каждой поверхности СС независимо от условий на других поверхностях СС; 6) так как в исследуемом температурном диапазоне коэффициент теплопроводности λ^0 изменяется незначительно, принято $\lambda^0(T) = \text{const}$, где T — температура внутри элементарного объема СС; 6) температурная зависимость удельной теплоемкости описывается с помощью выражения $C = C_0 T^5$, где C_0 — удельная теплоемкость при 4,2 К.

В результате решения двумерного нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных разностей выполнен расчет теплового режима СС в широком диапазоне скорости изменения тока и определено ее допустимое значение, при котором происходит переход СС из сверхпроводящего состояния в нормальное.

Данные по распределению магнитной индукции в сечениях СС получены в результате решения задачи о магнитном поле соленоида конечных размеров методом интегрирования магнитных полей элементарных токов по объему, используя закон Био — Савара.

Выполнен расчет магнитного поля СС со следующими размерами и параметрами: размеры СС по среднему витку $2,0 \times 0,6$ м; размеры сечения обмотки 62×62 мм²; количество витков 415; намагничивающая сила 710 кА; номинальный ток 1,8 кА; обмоточный провод — шинка $2 \times 3,5$ мм² СПНТ-3630-0,35. Результаты расчетов показали, что магнитная индукция принимает максимальное значение в сечении, которое расположено в короткой стороне прямоугольного СС, поэтому расчет температурного поля производился для этого сечения.

Граничные условия на гранях СС давались с учетом теплообмена поверх-

ности СС с окружающим его жидким гелием. При этом учитывалось наличие слоя изоляции и металлического каркаса между поверхностью соленоида и гелием. Обмотка была намотана на алюминиевый каркас с различной толщиной стенок по осям симметрии. Одна из сторон обмотки находилась в непосредственном контакте с жидким гелием. Теплопроводность обмотки и каркаса, соответственно, равны $\lambda_x^0 = 0,4$ Вт К/м; $\lambda_y^0 = 0,4$ Вт К/м; $\lambda_z^0 = 0,15$ Вт К/м. Коэффициент теплоотдачи с поверхности СС определен экспериментально и равен 8000 Вт К/м².

Начальным условием для всех рассматриваемых режимов работы СС является равномерное распределение температуры по сечению обмотки, соответствующее температуре жидкого гелия (4,2 К). В каждом узле сетки разбиения сечения температура в начале расчета режима работы СС задавалась равной 4,2 К.

Система $nx \times ny$ нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка решалась с помощью стандартной подпрограммы решения систем дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты.

При решении данной задачи $\Delta t_{\text{нач}}$ было взято равным 0,01 с, а $nx = ny = 10$.

Расчет режима нарастания тока в СС от 0 до 1700 А проводился в предположении линейного закона изменения тока. Толщина стенок каркаса СС, изготовленного из алюминия или нержавеющей стали, была принята для верхней и нижней стенок 2 см, для внутренней стенки каркаса — 6 см. Толщина слоя внешней изоляции равнялась 2 мм (рис. 6). Расчет теплового поля проводился для наиболее «горячего» сечения А. Результаты этого расчета показали, что максимальная скорость увеличе-

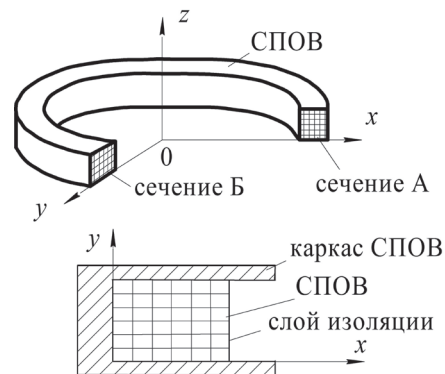


Рис. 6

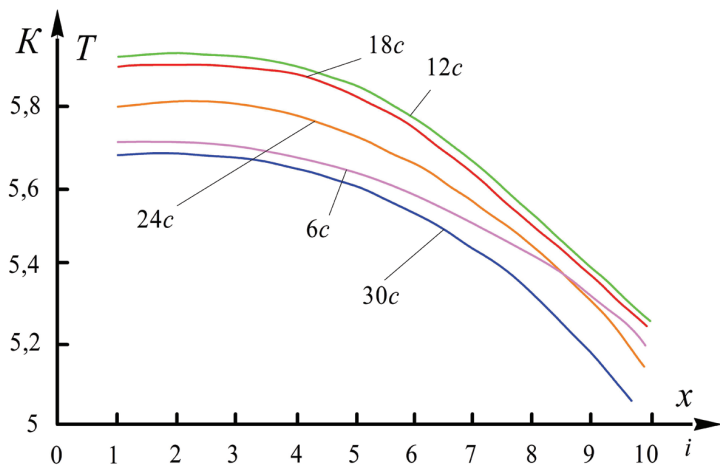


Рис. 7

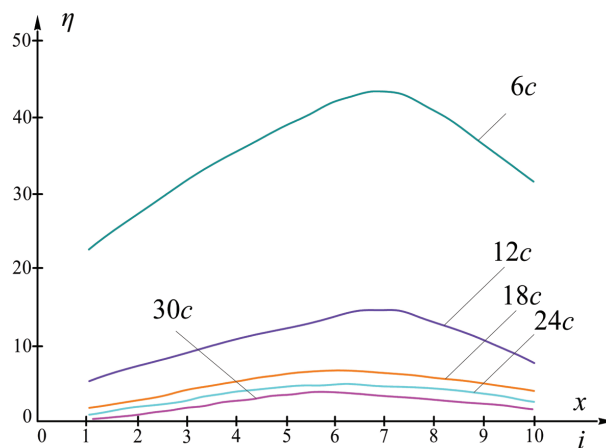


Рис. 8

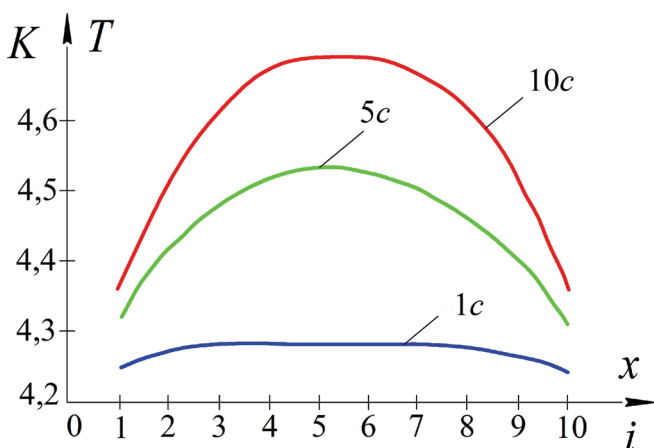


Рис. 9

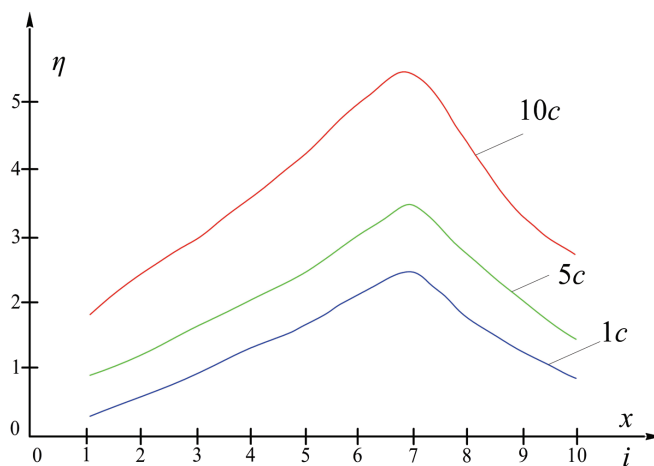


Рис. 10

ния тока, при котором сохраняется сверхпроводящее состояние СС, составляет 57 А/с. На рис. 7 показано изменение температуры в наиболее «горячем» слое обмотки ($j = 5$ или $j = 6$) во времени. На рис. 8 показано изменение в этом слое запаса по току во времени. Запас по току $\eta^0 = \frac{I_c - I}{I}$, где I_c — критический ток в (i, j) элементе сверхпроводника, I — текущее значение тока в СС.

В элементе сечения $i = 7$ и $j = 5$ наблюдается минимальное значение магнитной индукции в слое, и в этом элементе — максимальный запас по току во время всего процесса заведения тока. Анализ рис. 8 показывает, что минимальный запас по току — в конце заведения тока в СС.

В случае возрастания требуемого значения транспортного тока в СС критическая скорость увеличения тока уменьшается. Например, для увеличения транспортного тока до 2200 А скорость увеличения не должна превышать 44 А/с.

Рассчитывался также режим уменьшения тока в СС по экспоненциальному закону: $I = I_n e^{-t/\tau}$, где I_n — номинальный

ток в СПС, t — текущее время; τ — постоянная времени. Было определено, что для сечения А (см рис. 6) при $I_n = 1700$ А максимальная начальная скорость, при которой СС еще находится в сверхпроводящем состоянии, составляет 110 А/с, что соответствует постоянной времени $\tau_1 = 21$ с.

На рис. 9 показано изменение температуры во времени в наиболее «горячем» слое обмотки ($j = 5$ или $j = 6$) в процессе уменьшения тока.

Минимальный запас по току наблюдается в начале уменьшения тока в СС (рис. 10). Это вызвано тем, что в начале этого процесса изменения тока в СС и величина транспортного тока в СС имеют максимальные значения и скорость. Из кривых на рис. 10 видно, что запас по току в процессе уменьшения тока существен. Дополнительный расчет показал, что в СС можно уменьшать ток величиной 2200 А без разрушения сверхпроводимости с постоянной времени $\tau_1 = 21$ с.

Можно заметить из сравнения рассмотренных выше режимов изменения тока в СС, что режим увеличения тока для СС более тяжелый, так как в этом

режиме критическая плотность тока падает из-за роста температуры и величины магнитной индукции в объеме СС, а плотность транспортного тока возрастает. Для режима уменьшения тока условия более легкие: с ростом температуры одновременно происходит уменьшение плотности транспортного тока, что допускает больший перегрев СС.

В заключение рассмотрим аварийный режим, когда в результате потери сверхпроводимости СС ток в нем уменьшается практически мгновенно.

Решение данной задачи сводится к расчету распределения выводимой энергии между отдельными элементами системы. Такими элементами

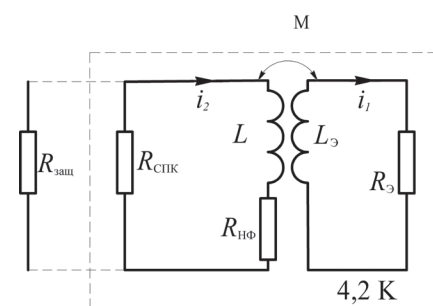


Рис. 11

являются непосредственно СС, алюминиевый экран (предполагалось, что использование алюминиевого экрана позволит уменьшить действие внешних переменных магнитных полей на СС) и сверхпроводящий ключ (СПК), обеспечивающий режим «замороженного» потока. Выделение энергии СС на этих элементах приводит к соответствующему испарению жидкого гелия в криостате, поэтому желательно, чтобы переходный процесс вывода энергии был организован так, чтобы запасенная в СС энергия выделялась максимально вне криостата, например, на наружном защитном резисторе.

Поскольку основные технические данные СС (намагничивающая сила, тип провода, геометрические размеры, конструкция экрана) определяются процессом причаливания КА, то они считаются заданными, и расчет системы защиты сводится к исследованию зависимости распределения потерь в отдельных элементах от значения сопротивления внешнего защитного резистора и к выбору такого значения этого сопротивления, при которой выводимая на защитный резистор энергия максимальна. При этом необходимо учитывать определенные ограничения на допустимую величину энергии, выделяемой на отдельных элементах криомодуля, величину допустимого перенапряжения на тоководах (не более 500 В), условия запитки СС, работу силовой коммутирующей аппаратуры и т. д.

Эквивалентная электрическая схема защиты и вывода энергии из СС показана на рис. 11, где обозначено: $R_{НФ}$ — сопротивление нормальной фазы СС; $R_{СПК}$ — сопротивление СПК; $R_{защ}$ — сопротивление защитного резистора; R_3, L_3 — сопротивление и индуктивность электропроводящего экрана; L — собственная индуктивность СС, i_j — ток, протекающий по сопротивлению R_j .

Аналитическое решение может быть получено только для ограниченного класса временных законов изменения сопротивления, поэтому были приняты следующие допущения:

- 1) сопротивление СПК изменяется мгновенно от 0 до $R_{СПК}$, что подтверждается экспериментальными исследованиями;
- 2) сопротивление $R_{НФ}$ есть предельная величина сопротивления СС при полном переходе его обмотки по всей длине в нормальное состояние при температуре медной матрицы 4,2 К.

Таким образом, система уравнений с переменными коэффициентами сводится к системам дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, решение которых было получено с помощью классического метода расчета переходных процессов.

На рис. 12 и 13 представлены результаты расчета выводимой энергии СС. Данные графики строились для СС со следующими размерами и параметрами: 1) номинальная намагничивающая сила 320 кА; 2) диаметр по среднему витку $d_{cp} = 185$ мм; 3) размеры сечения обмотки $S = 60 \times 60$ мм²; 4) тип провода — шинка СПНТ 2×3,5; 5) номинальный транспортный ток 1 кА; 6) количество витков $w = 320$; 7) эквивалентный диаметр экрана $d_3 = 240$ мм; 8) сечение экрана $S_3 = 1350$ мм²; 9) коэффициент заполнения композиции сверхпроводником $\lambda_1 = 0,35$;

$$10) R_{НФ} = \rho_M \frac{w \cdot \pi \cdot d_{cp}}{(1 - \lambda_1) S} = 8,13 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$11) R_3 = \rho_3 \frac{\pi \cdot d_3}{S_3} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}; 12) \text{ собственная индуктивность СС } - L = 1,65 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}; 13) \text{ запасенная энергия } 8,26 \text{ кДж}; 14) \text{ коэффициент связи } k = 0,94; 15) \text{ индуктивность экрана } L_3 = 1,55 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}; 16) \text{ взаимная индуктивность } M = 4,75 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

Как видно из рис. 12 и 13, для данного СС оптимальная величина $R_{защ}$, при которой выводимая из криомодуля энергия максимальна ($Q_{R_{защ}} = 3,6$ кДж из 8 кДж запасенной энергии) и составляет 0,025 Ом. Остальная энергия перераспределяется в основном между экраном и сопротивлением нормальной фазы СС ($Q_{НФ}$), причем при данном значении $R_{защ}$ больше энергии будет выделяться в экране (Q_3).

Поскольку возможен вариант изготовления СПК с параллельной укладкой ниобий-титановой фольги (для повышения токонесущей способности) и, соответственно, с меньшим сопротивлением $R_{СПК}$, все расчеты выполнялись для двух значений $R_{СПК}$: 0,4 Ом (штриховые линии) и 1,0 Ом (сплошные линии).

Оценивая величину энергии данного соленоида, можно заключить, что вероятность выхода СС из строя из-за ее перегрева и разрушения при данном уровне запасенной энергии практически отсутствует, даже если вся запасенная энергия будет выделяться на сопротивлении нормальной фазы

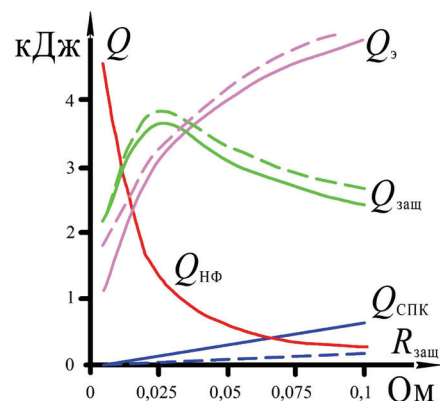


Рис. 12

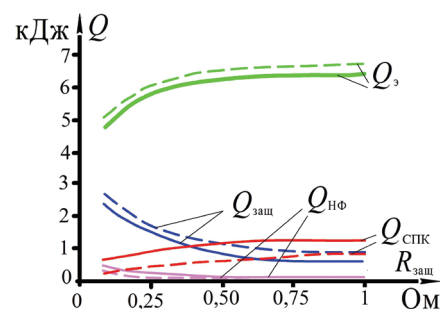


Рис. 13

СС. Использование более мощных СС при значениях защитного резистора, не равных оптимальному, приведет к тому, что основная часть запасенной в СС энергии выделится на экране (до 80 %) в виде тепла, т. е. внутри гелиевой полости криомодуля. Такие тепловыделения, происходящие за очень короткий промежуток времени, недопустимы, так как могут привести к резкому повышению давления за счет быстрого испарения жидкого гелия вплоть до деформации и разрыва гелиевой полости криомодуля.

Можно сделать вывод о целесообразности расположения электропроводящих экранов в азотной полости криостата.

Операция стыковки

На конце одного КА расположен стреловидный штырь 3 (рис. 14). Приемный конус 4 другого КА заканчивается стаканом 5, который заполнен легкоплавким металлом 6 (например, галлием или ртутью). Внутренняя оболочка стакана выполнена из термостойкого теплоизолирующего материала. Внешняя оболочка 7, изготовленная из ферромагнитного материала, имеет пазы, в которые уложена трехфазная винтовая обмотка 8 (фаза обмотки представляет собой цилиндрическую спираль с шагом, равным двойному полюсному делению τ_x), соединенная с источником

питания. На дне стакана установлен электронагреватель 9, соединенный с источником питания.

Когда заканчивается операция причаливания КА, конец стреловидного штыря одного КА находится в приемном конусе другого КА в непосредственной близости от открытого торца стыковочного стакана. В это время металл находится в твердом состоянии, так как его температура равна примерно $-70...-80$ °С, включается нагреватель и запитывается трехфазная винтовая обмотка. В металле под действием магнитного поля обмотки индуцируются токи, взаимодействие которых с магнитным полем обмотки выражается в появлении силы, действующей на металл. Эта сила имеет три компоненты: 1) радиальную, которая направлена к продольной оси стакана и не оказывает на жидкий металл никакого действия; 2) тангенциальную, которая аналогична силе, действующей на ротор асинхронной машины; 3) продольную, которая препятствует выходу металла из стакана и притягивает стыкуемые КА. Продольная компонента силы затухает по мере удаления от поверхности индуктора, но — это следует подчеркнуть — в центре стакана, в отличие от линейного жидкометаллического насоса, не равна нулю. Следует отметить, что индуцированные токи также дополнительно нагревают металл, а тангенциальная компонента силы перемешивает металл, что уменьшает время его перехода в жидкое состояние.

Под действием нагрева металл переходит в жидкое состояние (для галлия 29,78 °С, для ртути $-38,84$ °С). После этого стреловидный штырь проникает в жидкий металл стакана, нагреватель и трехфазная винтовая обмотка отключаются и металл переходит в твердое состояние, тем самым обеспечивается жесткое сцепление КА. Сверхпроводящие соленоиды обеспечивают удержание стыкуемых КА при отвердевании жидкого металла.

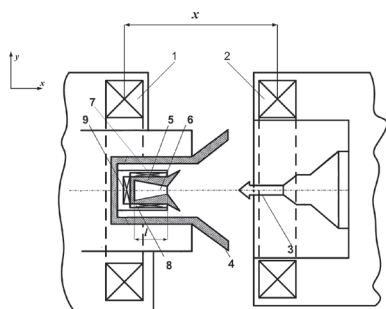


Рис. 14

$$(H \times m^3) / f_x (d/A_m^2) \times 10^7$$

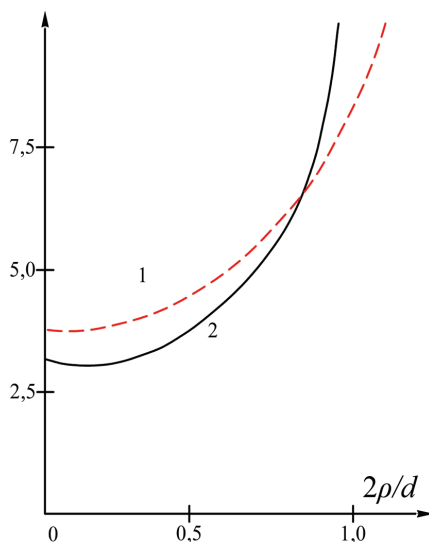


Рис. 15

После отвердевания металла при необходимости возможна дополнительная фиксация КА с помощью других устройств.

Результаты расчетов распределения плотности продольной компоненты электромагнитной силы по поперечному сечению стакана для случаев $\sigma \omega s d^2 = 1,27 \times 10^{-7}$ См \times м²/с (кривая 1) и $\sigma \omega s d^2 = 2,23 \times 10^{-7}$ См \times м²/с (кривая 2) представлены на рис. 15. Здесь σ — проводимость металла, ω — круговая частота тока статора, s — средняя величина результирующего скольжения, d — внутренний размер стакана с металлом.

Анализ данных характеристик показал, что продольная компонента силы возникает по всей площади поперечного сечения жидкого металла и успешно препятствует выходу жидкого металла из стакана в условиях невесомости.

Заключение

Проведенные испытания подтвердили физический эффект устойчивого причаливания с помощью сверхпроводящих соленоидов, когда оба или один из них работает в режиме ЗП.

Рассмотренный эффект также можно использовать для бесконтактного удержания зондов, движущихся по круговым орбитам относительно основного космического корабля

Скорость сближения КА, при которой начинается операция причаливания, ограничивается допустимыми скоростями изменения токов в сверхпроводящих соленоидах.

По сравнению с режимом уменьшения тока в СС режим увеличения тока

более тяжелый, так как в нем критическая плотность тока падает из-за роста температуры и величины магнитной индукции в объеме СС, а плотность транспортного тока возрастает.

Защитный внешний резистор СС имеет оптимальное значение, а электропроводящие экраны целесообразно устанавливать в азотной полости криостатов.

Исследования показали возможность использования легкоплавких металлов в качестве веществ, механически фиксирующих стыковочные узлы космических кораблей.

Полученные силовые характеристики можно использовать при проектировании и расчете устройств, предназначенных для предотвращения выхода жидкого металла рассматриваемых стыковочных узлов в условиях невесомости. ■

Литература

1. Kim K. K. A new electric drive for gyroscope devices // Известия вузов. Авиационная техника. 2003. Ис. 3. P. 43–48.
2. Kim K. K. Use of electrodynamic accelerators for aviation and space purposes // Известия вузов. Авиационная техника. 2003. Ис. 1. P. 27–31.
3. Kim K. K., Kolesov S. L. Some aspects of the magnetohydrodynamic theory of the operation of a sliding current-collector system with contact lubrications // Электричество. 2002. Ис. 10. P. 44–50.
4. Kim K. K. A new class of electric machines for operation under conditions of zero gravity // Cosmic Res. 2003. Vol. 41, Is. 3. P. 310–314.
5. Kim K. K. The stability of a synchronous machine with zero-flux stator winding to small radial disturbances // Electrical Technol. Rus. 1999. Ис. 4. P. 66–77.
6. Kim K. K. One method of spacecraft docking // Cosmic Res. 2000. Vol. 38, Is. 2. P. 209–212.
7. Kim K. K., Barbarovich V. Yu., Asmus V. I. An autonomous instrument for measuring small electrical capacitances with a linear characteristic // Measurement Techniques. 2003. Vol. 46, Is. 7. P. 673–677.
8. Kim K. K. Use superconducting suspension in transport systems // Digests of the Intermag Conf. 2000, IEEE Int. Magnetics Conf.-2000 IEEE INTERMAG; Toronto, Ont, Can, 9–13 Apr. 2000.
9. Kim K. K. Properties of a synchronous machine with electrodynamic rotor suspension // Power eng. NY. 1985. Vol. 23, Is. 5. P. 99–107.