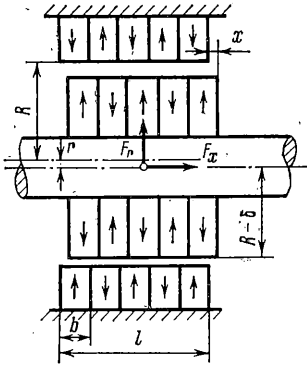


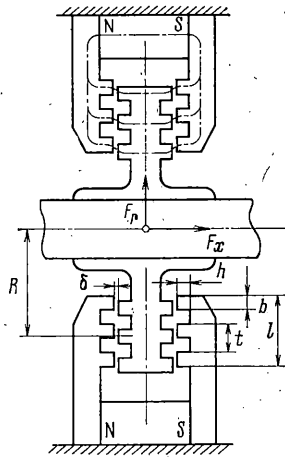
УДК 531.55:521.4

СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА В ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНАХ
УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВВЕЙНБЕРГ Д. М., ВЕРЕЩАГИН В. П., ДАНИЛОВ-НИТУСОВ Н. Н.,
ШЕРЕМЕТЬЕВСКИЙ Н. Н.

Перспективность применения магнитных подшипников в гироскопах и маховиках систем ориентации космических аппаратов обсуждалась в [1-5]. В публикуемой работе рассмотрены основные типы магнитных подвесов, которые могут быть применены в этих исполнительных органах. Приведены основные соотношения для расчета усилий подвесов на постоянных магнитах индукторного и электромагнитного типов. Отмечаются преимущества и недостатки каждого типа подвеса. Наибольшей грузоподъемностью обладает электромагнитный подвес, и поэтому его применение в силовых устройствах управления ориентацией является предпочтительным. Представлены образцы устройств с магнитным подвесом роторов: шаровой



Фиг. 1



Фиг. 2

электродвигатель-маховик для системы ориентации орбитальной станции «Салют» и экспериментальный образец гиросузда силового гироскопа.

1. Магнитные подвесы условно разделяются на пассивные и активные. Пассивные обладают естественной устойчивостью, а в активных она достигается за счет регулирования тока. Обычно в пассивных магнитных подвесах используются силы взаимодействия постоянных магнитов. Однако создать устойчивый подвес ротора только на постоянных магнитах, как следует из [6], невозможно. Поэтому пассивный подвес всегда сочетается с активным.

Одним из вариантов практического использования сил отталкивания постоянных магнитов является радиальный подшипник [7], состоящий из двух concentрических пакетов намагниченных встречно магнитных колец; вращающихся и неподвижных. Для повышения радиальной жесткости полярность колец по длине подшипника чередуется, как показано стрелками на фиг. 1. При отклонении ротора из центрального положения в радиальном направлении на него действует восстанавливающая сила

$$F_r = - \frac{\pi^2 R l}{4 \mu_0} J^2 r \exp \left(- \frac{\pi \delta}{b} \right) \cos \pi x$$

где J — намагниченность колец в рабочей точке, x , r — смещения ротора в долях толщины кольца b .

В осевом направлении такой подшипник находится в неустойчивом равновесии и обладает отрицательной жесткостью, так как при отклонении из центрального по-

ложения осевая смещающая сила растет

$$F_x = \frac{\pi R l}{2\mu_0} J^2 \exp\left(-\frac{\pi \delta}{b}\right) \sin \pi x$$

При помощи расчетных зависимостей можно оценить основные характеристики подшипника и определить некоторые оптимальные соотношения. В частности, для обеспечения максимальной радиальной силы толщина кольца b должна быть примерно втрое больше зазора δ . При этом осевая отрицательная жесткость вдвое превышает радиальную.

В настоящее время самарий-кобальтовые магниты позволяют получать удельную подъемную силу до $1 \cdot 10^5$ Н/м². Следует ожидать, что работы по совершенствованию технологии получения крупногабаритных редкоземельных магнитов могут дать повышение удельной подъемной силы до $3 \cdot 10^5$ Н/м².

Существенные трудности создания подвеса на постоянных магнитах связаны с обеспечением демпфирования радиальных колебаний и осевой устойчивости ротора. Для их преодоления приходится создавать электродинамические системы эффективного демпфирования и быстродействующие осевые центрирующие системы, в результате чего пассивный подвес по сложности оказывается сопоставимым с активным управляемым подвесом.

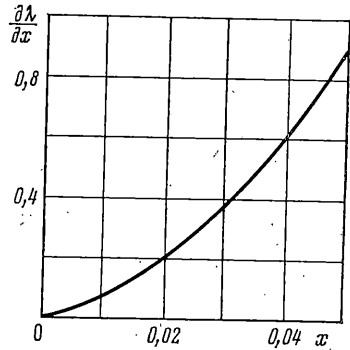
Для создания пассивных подвесов можно использовать также центрирующие силы, возникающие между зубчатыми поверхностями ферромагнитных тел, как, например, в индукторных машинах.

Для оценки сил, действующих в радиальном подшипнике индукторного типа (фиг. 2), можно пользоваться основными положениями теории индукторных электрических машин [8] и получать следующие приближенные выражения для радиальной F_r и осевой F_x сил:

$$F_r \approx 7\pi R l B^2 \left(\frac{b}{t}\right)^2 \frac{\lambda_1}{\lambda_0^2} \sin 2\pi r$$

$$F_x \approx 8\pi R l B^2 \left(\frac{b}{t}\right)^2 \frac{1}{\lambda_0^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x}$$

$$\lambda = \lambda_0(x) + \lambda_1(x) \cos \pi r$$



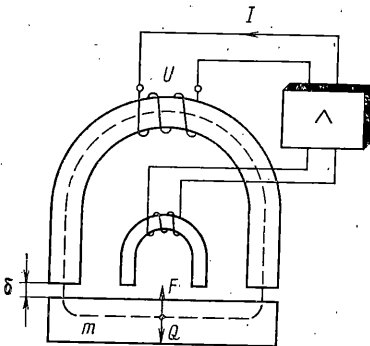
Фиг. 3

где B — индукция насыщения материала зубцов; x, r — осевое и радиальное смещение, отнесенные к величине зубцового шага t .

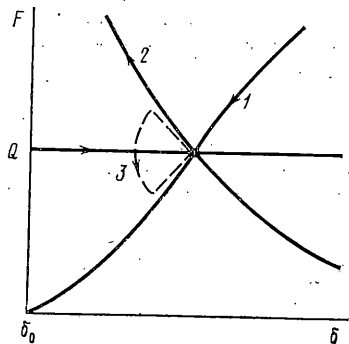
При оптимальной геометрии зубцов $\delta/t=0,05$; $b/t=0,4$; $h/t=0,4$ в центральном положении ротора ($x=0$) магнитные проводимости составляют $\lambda_0=1 \cdot 10^{-5}$ Гн/м; $\lambda_1=0,35 \cdot 10^{-5}$ Гн/м.

Зависимость $\partial \lambda / \partial x$ (в 10^{-5} Гн/м) для случая $r=0$ приведена на фиг. 3.

Удельное центрирующее усилие в индукторных подшипниках сравнительно невелико: примерно $3 \cdot 10^4$ Н/м² для обычных электротехнических сталей и может быть



Фиг. 4

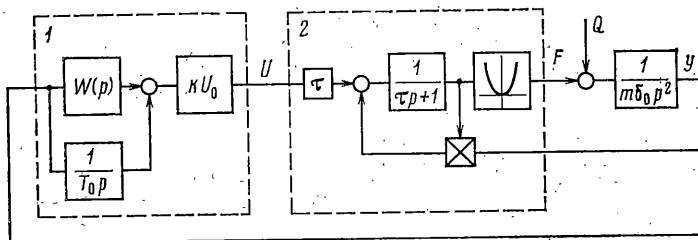


Фиг. 5

повышено до $6 \cdot 10^4$ Н/м² при применении прецизионных магнитомягких сплавов с индукцией насыщения 2,0 Тл.

2. В активных электромагнитных подвесах используются силы притяжения, действующие на ферромагнитный ротор в поле неподвижного электромагнита (Фиг. 4). Внешняя сила Q уравнивается силой притяжения электромагнита F , величина которой регулируется за счет изменения тока I в обмотке по сигналу датчика зазора δ . При линейной зависимости тока от смещения ротора сила электромагнита F возрастает по регулировочной характеристике, как показано на Фиг. 5 (кривая 1). В точке, где она уравнивается внешней силой Q , ротор находится в состоянии равновесия.

Поскольку сила электромагнита при неизменном токе обратно пропорциональна квадрату зазора, ротор имеет тенденцию к движению по естественной тяговой ха-



Фиг. 6

рактеристике магнита (кривая 2). Система регулирования препятствует этому движению и ротор, «перемещаясь» по кривой 3, возвращается в точку равновесия.

В состав электромагнитного подвеса входят две взаимосвязанные части: магнитная система и аппарат управления. Основным параметром, характеризующим аппарат управления, является установленная мощность $P = U_0 I_0$, где U_0 и I_0 — напряжение сети питания и максимальный ток в обмотке электромагнита.

Электромагнит как исполнительный орган системы подвеса характеризуется двумя параметрами: максимальным усилием, которое он может создавать при номинальном зазоре δ_0 и максимальном токе, $F_0 = w^2 \mu_0 S I_0^2 / 8 \delta_0^2$, где w и S — число витков и площадь электромагнита, а также быстродействием, связанным с основными параметрами соотношением $\tau = 2 F_0 \delta_0 / P$.

Движение ротора в поле электромагнита упрощенно описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = -F + Q, \quad F = \frac{2}{\mu_0 S} \Phi^2$$

$$\tau \frac{d\Phi}{dt} + \frac{\delta}{\delta_0} \Phi = \frac{\tau}{w} U$$

где m , Φ , U — масса ротора, магнитный поток и напряжение питания электромагнита.

Структурная схема управления электромагнитным подвесом представлена на Фиг. 6. Для обеспечения высокой статической жесткости подвеса в регуляторе напряжения 1, питающем электромагнит 2, параллельно основной цепи с передаточной функцией $W(p)$ вводится интегрирующее звено $1/(T_0 p)$, т. е.

$$U = k U_0 [1/(T_0 p) + W(p)] y, \quad y = \delta / \delta_0 - 1$$

где k , p , y — коэффициент пропорциональности, оператор дифференцирования и смещение ротора, отнесенное к номинальному зазору.

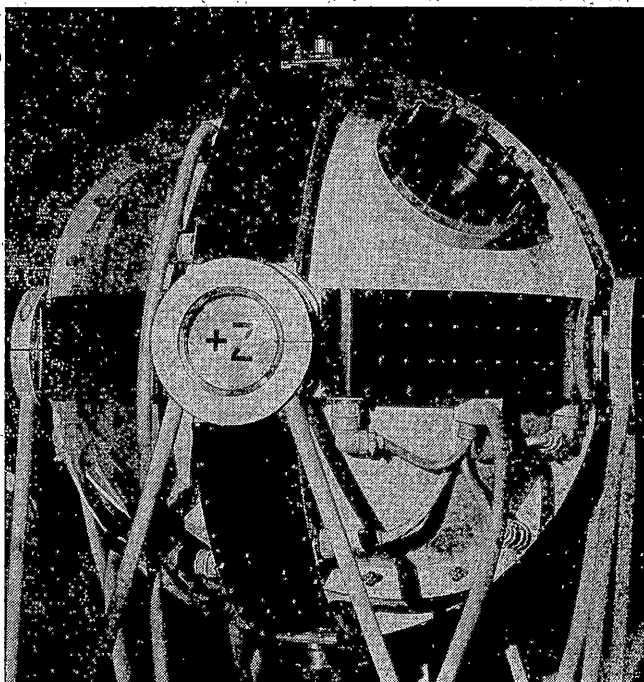
При таком управлении уравнение колебаний вблизи точки равновесия принимает вид

$$[(\tau p + 1)p^2 - 2|q|v^2 + 2\sqrt{|q|}v^2 k W(p)] y = 0$$

$$v^2 = F_0 / m \delta_0, \quad q = Q / F_0$$

где v , q — базовая частота и внешнее возмущение, отнесенное к максимальной силе электромагнита.

Из этого уравнения видны основные особенности электромагнитного подвеса как системы управления. «Естественная» неустойчивость ротора в поле электромагнита характеризуется слагаемым $-2|q|v^2 y$. Параметры системы зависят от внешнего



Фиг. 7

возмущения q вследствие квадратичной зависимости силы электромагнита от потока. Электромагнит как исполнительный орган системы характеризуется относительно большим запаздыванием ($\nu\tau \gg 1$). В связи с этим в основную цепь регулятора напряжения питания электромагнита помимо сигнала скорости изменения зазора необходимо вводить корректирующее звено для компенсации запаздывания электромагнита.

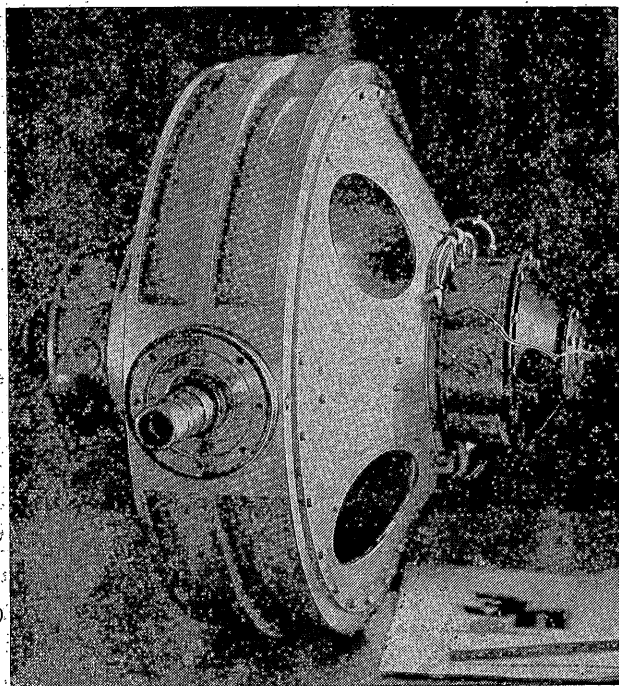
Для электромагнитного подвеса характерна высокая концентрация энергии поля, что позволяет получать удельные усилия до $6 \cdot 10^8$ Н/м² при использовании обычных электротехнических сталей с индукцией насыщения 1,2 Тл и до $15 \cdot 10^8$ Н/м² при использовании прецизионных магнитомягких сплавов с индукцией насыщения 2,0 Тл.

Основными проблемами создания электромагнитного подвеса на сегодняшний день являются разработка высокоиспользованных магнитных систем и создание быстродействующей надежной электронной аппаратуры управления.

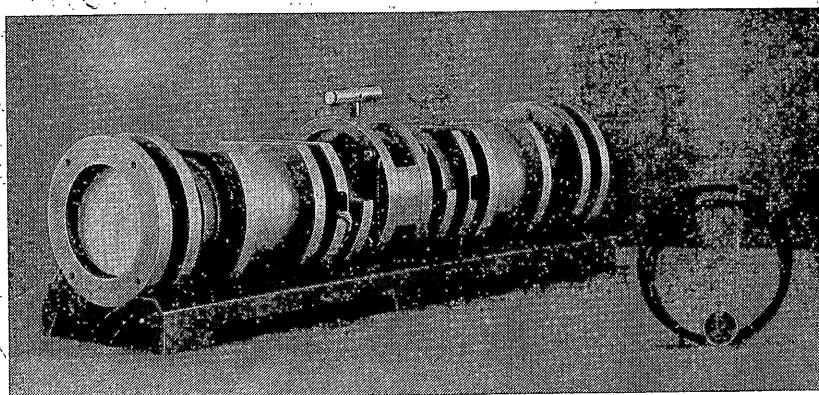
В ряде случаев выгодно применение активно управляемого магнитоэлектрического подвеса. Силы в нем создаются за счет взаимодействия тока статорных обмоток с полем постоянных магнитов ротора. Токи в катушках регулируются по сигналам датчиков положения. Линейная зависимость сил от токов облегчает построение системы управления. Статор такого подвеса не имеет магнитопровода, благодаря чему полностью исключаются потери на трение из-за гистерезиса и вихревых токов. Поэтому магнитоэлектрический подвес целесообразно применять при повышенных скоростях вращения. Однако удельные усилия, создаваемые в этом типе подвеса, ниже, чем в электромагнитном, и составляют при плотности тока в катушках $5 \cdot 10^8$ А/м² около $3 \cdot 10^4$ Н/м². В кратковременных режимах, допускающих повышение плотности тока до $1 \cdot 10^8$ А/м², удельные усилия могут достигать тех же значений, что в электромагнитном подвесе.

Основные проблемы создания магнитоэлектрического подвеса такие же, как для электромагнитного, но аппаратура управления должна быть рассчитана на большую мощность, и поэтому этот тип подвеса целесообразнее применять при малых статических нагрузках.

Рассмотренные типы подвесов, разумеется, не претендуют на полный охват всего многообразия магнитных подвесов. В частности, известный резонансный подвес [9] создает усилия, как и рассмотренный электромагнитный, с той разницей, что ток регулируется не усилителем мощности по сигналам датчика положения, а непосредственно за счет изменения индуктивного сопротивления обмотки.



Фиг. 8



Фиг. 9

3. По-видимому, для исполнительных органов управления ориентацией целесообразно использовать активно управляемый электромагнитный подвес, обладающий наибольшей грузоподъемностью. Применение этого типа подвеса позволило для системы ориентации орбитальной станции «Салют» создать оригинальный шаровой электродвигатель-маховик (фиг. 7); обладающий рядом достоинств по сравнению с обычными трехмаховичными системами.

Дальнейшим развитием работ в этом направлении является создание электромагнитного подшипника для высокоскоростных силовых гироскопов. Экспериментальный образец гиросузда с массой ротора 40 кг, кинетическим моментом 1000 Нмс при скорости 10 000 об/мин показан на фиг. 8.

Магнитный подшипник силового гироскопа в отличие от подвеса шарового ротора есть сильно нагруженное устройство, поскольку через него передается весь управляющий момент, необходимый для ориентации станции. Так, например, усилия на подшипники указанного образца в 3–4 раза выше веса ротора. Обеспечение высокой динамической жесткости подшипника осложняется возрастающей с ростом

нагрузки неустойчивостью равновесного положения ротора и нелинейностью в магнитных системах. В силу малых зазоров между ротором и статором система управления должна обладать относительно высоким быстродействием.

С точки зрения оптимального использования магнитной системы для центрирования вала в радиальном направлении целесообразно применять общий магнитопровод. Это позволяет уменьшить габариты и массу подшипника, но приводит к необходимости учета взаимосвязи магнитных потоков в смежных каналах управления.

Работы по управляемому электромагнитному подвесу не снижают актуальности исследований подклюпающего своей простотой пассивного магнитного подшипника из высококоэрцитивных самарий-кобальтовых магнитов. Общий вид установки для испытаний таких подшипников представлен на фиг. 9. На этой фотографии показаны также самарий-кобальтовые кольца большого диаметра, технология изготовления которых представляет самостоятельный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Б. Н., Шереметьевский Н. Н., Данилов-Нугусов Н. Н., Вейнберг Д. М. Электромеханическая система для ориентации и стабилизации автономных модулей и легких орбитальных станций.— В кн.: Системы управления. М.: Наука, 1978, с. 89—94.
2. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 598 с.
3. Леонтьев В. Электромеханическая система стабилизации.— Авиация и космонавтика, 1977, № 4, с. 35.
4. Henrikson C., Liman J., Studer Ph. Magnetically suspended momentum wheels for spacecraft stabilization.— AIAA Paper, 1974, № 74—128, v. 128, p. 1—8.
5. Brunet M. A new technology for three-axis stabilized satellites: Active magnetic bearings. 27th Internat. Astronaut. Congr. Anaheim, Calif., 1976. Paper № 76—191, p. 1—4.
6. Braunbeck W. Freischwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld.— Z. Phys., 1939, B. 112, H. 11/12. S. 753—763.
7. Backers F. T. A magnetic journal bearing.— Philips Techn. Rev., 1960/1961, v. 22, № 7, p. 232—238.
8. Альпер Н. Я., Терзян А. А. Индукторные генераторы. М.: Энергия, 1970. 190 с.
9. Металин В. Б. Магнитные и магнитогидродинамические опоры. М.: Энергия, 1968. 190 с.

Москва

Поступила в редакцию
3.IX.1979

УДК 534.13

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВАЛА

ЖБАНОВ Ю. К.

В работе [1] исследовано движение жесткого вала, вращающегося в упругих подшипниках, и сделан вывод о неустойчивости той формы движения, при которой центр масс вала лежит на оси вращения¹. Ниже показано, что этот вывод ошибочен.

1. Движение симметричного вала, вращающегося в упругих подшипниках (фиг. 1, а), без учета угловых движений оси вращения описывается системой уравнений

$$m\ddot{\xi} = F_{\xi}, \quad m\ddot{\eta} = F_{\eta}, \quad J\dot{\Omega} = M \quad (1.1)$$

где ξ, η — координаты центра масс вала в невращающейся системе координат, оси которой перпендикулярны оси вращения (фиг. 1, б).

Принимается, что центрирующие силы F_{ξ}, F_{η} , создаваемые подшипниками, не зависят от поворота вала. При отсутствии диссипации в подшипниках указанные силы имеют потенциальную функцию $P_0(\xi, \eta)$, в минимуме которой удобно поместить начало системы координат $\xi\eta$. Равновесное положение центра масс

$$\xi = 0, \quad \eta = 0 \quad (1.2)$$

¹ Работа представлена в Докл. АН СССР акад. Л. И. Седовым. (Прим. ред.)