

УДК 621.3.078

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СМЕЩЕНИЯ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДШИПНИКА

А.В. Стариков, В.Д. Костюков*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Аннотация. Поставлена задача определения величины смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой при равных токах в противоположных электромагнитах сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. Для достижения поставленной задачи рассмотрены уравнения движения ротора в поле электромагнитов. Показано, что необходимая величина смещения центра магнитной системы определяется из алгебраического уравнения четвертого порядка. Применено аналитическое решение Декарта – Эйлера этого уравнения. Найдены аналитические выражения, позволяющие определить рациональную величину смещения центра магнитной системы относительно оси вращения по известным параметрам электромагнитного подшипника. Проведено исследование устойчивости трехконтурной системы управления электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения. Доказано, что смещение центра магнитной системы на расчетную величину не влияет на устойчивость системы управления электромагнитным подшипником при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, центр магнитной системы, система управления, устойчивость.

Введение

Электромагнитные подшипники предназначены для бесконтактного подвеса ротора в поле электромагнитов. При этом, как и любой подшипник, такой тип опор предназначен для поддержания ротора в заданном положении с требуемой жёсткостью. Как правило, для подвеса ротора необходимы два радиальных и один осевой электромагнитный подшипник. Эти подшипники воспринимают и передают нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции, в том числе и силу тяжести ротора.

Уравнение движения ротора в поле электромагнитов каждого канала управления подшипника определяется дифференциальным уравнением [1]



© Автор(ы), 2023

* Александр Владимирович Стариков, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Владислав Дмитриевич Костюков, аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{эм2} \left[\frac{I_2^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_4^2}{(\delta + y)^2} \right] - G_y, \quad (1)$$

где y – перемещение ротора относительно центра магнитной системы по оси подшипника; $k_{эм2}$ – конструктивный коэффициент электромагнитного подшипника; I_2 и I_4 – токи в обмотках противоположных электромагнитов; δ – зазор между статором и ротором при расположении ротора в центре магнитной системы; G_y – сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника; t – время.

Уравнение (1) показывает, что величина силы, действующей на ротор, зависит как от соотношения токов в противоположных электромагнитах, так и от смещения ротора от центра магнитной системы каждой оси подшипника. Это позволяет предложить способ компенсации веса ротора за счет смещения центра магнитной системы относительно оси вращения [2, 3]. При этом актуальной задачей является определение рациональной величины смещения, при которой при равных токах в противоположных электромагнитах сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. Это позволит снизить токовую нагрузку на электромагнит, препятствующий действию силы веса, и расширить возможности управления в рамках ограничения токов.

Решение задачи

Уравнение (1) в статическом режиме при $\frac{d^2 y}{dt^2} = 0$ и равенстве токов в противоположных магнитах $I_2 = I_4 = \frac{U}{2R}$ запишется следующим образом:

$$k_{эм2} \left[\frac{U^2}{4R^2 (\delta - y)^2} - \frac{U^2}{4R^2 (\delta + y)^2} \right] - mg = 0, \quad (2)$$

где U – опорное напряжение питания электромагнитов; R – активное сопротивление каждой из обмоток; m – масса ротора, приходящаяся на одну ось; g – ускорение свободного падения.

Решение уравнения (2) позволит найти рациональную величину смещения центра магнитной системы, при которой сила веса, приходящаяся на одну ось подшипника, будет полностью скомпенсирована. При этом будут наблюдаться равные токи в противоположных электромагнитах, управляемых по дифференциальному закону [4].

Уравнение (2) преобразуем к виду

$$\frac{k_{эм2} U^2}{4R^2 mg} \left[\frac{(\delta + y)^2 - (\delta - y)^2}{(\delta - y)^2 (\delta + y)^2} \right] = 1. \quad (3)$$

Произведя в (3) несложные алгебраические преобразования, в итоге получим уравнение, связывающее смещение y центра магнитной системы с параметрами электромагнитов и частью массы ротора, приходящейся на одну ось:

$$y^4 + d_1 y^2 + d_2 y + d_3 = 0, \quad (4)$$

где $d_1 = -2\delta^2$; $d_2 = -\frac{k_{\text{эм2}} U^2 \delta}{R^2 m g}$; $d_3 = \delta^4$.

Выражение (4) представляет собой неполное уравнение четвертого порядка, корни которого в соответствии с решением Декарта – Эйлера можно найти следующим образом [5]:

$$y_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{v_1} \pm \sqrt{v_2} \pm \sqrt{v_3}. \quad (5)$$

Здесь v_1 , v_2 и v_3 – корни кубического уравнения

$$v^3 + av^2 + bv + c = 0, \quad (6)$$

где $a = \frac{d_1}{2}$; $b = \frac{d_1^2 - 4d_3}{16}$; $c = -\frac{d_2^2}{64}$.

Корни уравнения (6) можно найти с помощью решения Кардано [6]:

$$v_1 = A + B - \frac{a}{3}; \quad v_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} \pm j \frac{\sqrt{3}}{2} (A - B), \quad (7)$$

где

$$A = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c \right) + \sqrt{Q}}; \quad B = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c \right) - \sqrt{Q}};$$

$$Q = \frac{1}{27} \left(b - \frac{a^3}{3} \right)^3 + \frac{1}{4} \left(\frac{2a^3}{9} - \frac{ab}{3} + c \right)^2.$$

Подставив в A , B и Q значения a , b и c , выраженные через коэффициенты d_1 , d_2 и d_3 , получим:

$$A = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{\text{эм2}}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} + \sqrt{\frac{k_{\text{эм2}}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{\text{эм2}}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}}; \quad (8)$$

$$B = \sqrt[3]{\frac{\delta^6}{27} + \frac{k_{\text{эм2}}^2 U^4 \delta^2}{128 R^4 m^2 g^2} - \sqrt{\frac{k_{\text{эм2}}^4 U^8 \delta^4}{16384 R^8 m^4 g^4} + \frac{k_{\text{эм2}}^2 U^4 \delta^8}{1728 R^4 m^2 g^2}}}. \quad (9)$$

С учетом того, что $a = -\delta^2$, формулы (5), (7) – (9) позволяют найти рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения:

$$y = \sqrt{v_1} - \sqrt{v_2} - \sqrt{v_3}. \quad (10)$$

Формула (10) получена из анализа корней (5) и физического смысла решаемой задачи.

Из (7) следует, что корни $v_{2,3}$ являются комплексно-сопряженными:

$$v_{2,3} = \alpha - \frac{a}{3} \pm j\beta,$$

где $\alpha = -\left(\frac{A+B}{2} + \frac{a}{3}\right)$; $\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} (A - B)$.

Для вычисления в (10) $\sqrt{v_2}$ и $\sqrt{v_3}$ без специализированного программного обеспечения можно воспользоваться формулами

$$\sqrt{v_2} = \alpha_1 + j\beta_1; \quad \sqrt{v_3} = \alpha_1 - j\beta_1,$$

$$\text{где } \alpha_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{2} + \sqrt{\frac{\alpha^2 + \beta^2}{4}}}; \beta_1 = \frac{\beta}{2\alpha_1}.$$

Более простой подход к определению рациональной величины смещения центра магнитной системы заключается в использовании другого математического описания процесса движения ротора в поле электромагнитов. При дифференциальном законе управления токами в противоположных электромагнитах справедливо следующее уравнение [4, 7–9]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = k_{\text{эм}} \left(\frac{I_2}{I_2 + I_4} - 0,5 \right) + k_F y - G_y, \quad (11)$$

где $k_{\text{эм}}$ – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами I_2 и I_4 ; k_F – коэффициент положительной обратной связи по перемещению.

В статике при $I_2 = I_4$ из (11) вытекает простая зависимость рациональной величины смещения центра магнитной системы от силы веса, приходящейся на одну ось электромагнитного подшипника:

$$y = \frac{G_y}{k_F} = \frac{mg}{k_F}. \quad (12)$$

Решение (12) является более простым, но оно не учитывает того факта, что величина k_F изменяет свою величину в зависимости от перемещения. Кроме того, следует учитывать, что точные значения коэффициентов $k_{\text{эм}}$ и k_F могут быть получены только методом моделирования магнитных полей электромагнитного подшипника в специализированных программах.

Пример расчета

Для примера рассчитаем рациональную величину смещения центра магнитной системы радиальных электромагнитных подшипников, разработанных для подвеса ротора опытного образца турбоагрегата 6ТК-Э дизеля локомотива [10]. В рассматриваемом агрегате масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет $m = 18$ кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя равно $U = 60$ В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами: $R = R_2 = R_4 = 96,6$ Ом, $k_{\text{эм}} = 1272$ Н, $k_F = 1424000$ Н/м, зазор между статором и ротором $\delta = 0,5$ мм. Расчет по формуле (12) показывает, что рациональная величина смещения центра магнитной системы должна быть равна

$$y = \frac{18 \cdot 9,81}{1424000} = 124 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \quad (13)$$

то есть 124 мкм.

Для расчета рациональной величины смещения по формулам (7) – (10) необходимо знать коэффициент $k_{\text{эм}2}$. Его можно определить из результатов моделирования электромагнитного подшипника при вариации соотношений токов в противоположных электромагнитах [10]:

$$k_{\text{эм}2} = \frac{F_{\text{эм}} \delta^2}{I_{20}^2 - I_{40}^2}, \quad (14)$$

где $F_{эм}$ – сила, действующая на ротор, находящийся в центре магнитной системы, при начальных значениях токов в противоположных обмотках I_{20} и I_{40} .

Величина $k_{эм2}$ может быть также определена из результатов натурных экспериментов на реальной действующей установке. Например, если известно, что при задании в рассматриваемом радиальном электромагнитном подшипнике токов $I_{20} = 0,373$ А, $I_{40} = 0,248$ А сила, действующая на ротор, равна $F_{эм} = 127,2$ Н [10], то коэффициент $k_{эм2}$ в соответствии с формулой (14) будет равен

$$k_{эм2} = \frac{127,2 \cdot (5 \cdot 10^{-6})^2}{(0,373)^2 - (0,248)^2} = 4,121 \cdot 10^{-4} \text{ Нм}^2/\text{А}^2. \quad (15)$$

Используя значение $k_{эм2}$, полученное в (15), воспользуемся формулами (7) – (10) для расчета рациональной величины смещения центра магнитной системы рассматриваемого радиального электромагнитного подшипника. При этом получаются следующие значения величин, необходимых для определения рационального смещения: $Q = 4,3406 \cdot 10^{-42}$, $A = 1,6193 \cdot 10^{-7}$, $B = 4,2887 \cdot 10^{-8}$, $a = -2,5 \cdot 10^{-7}$. С учетом этого корни кубического уравнения (6) будут равны:

$$v_1 = 2,8815 \cdot 10^{-7}, \quad v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7},$$

$$v_2 = -1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}.$$

Следовательно, рациональная величина центра магнитной системы радиального электромагнитного подшипника для турбоагнетателя 6ТК-Э в соответствии с формулой (10) составляет

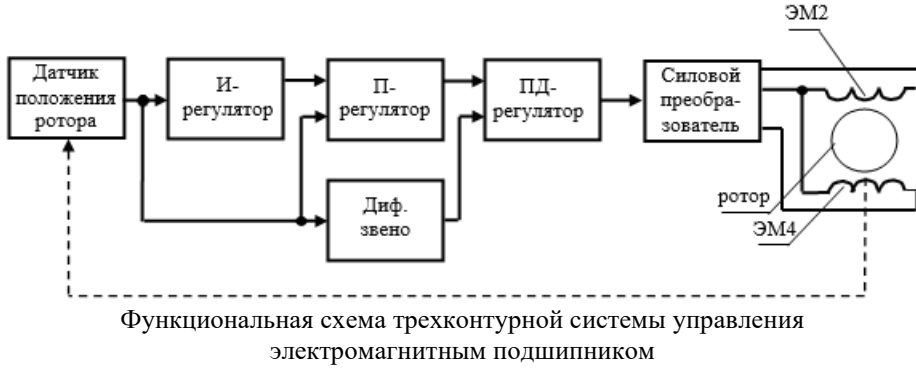
$$y = \sqrt{2,8815 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} + j1,0309 \cdot 10^{-7}} - \sqrt{-1,9073 \cdot 10^{-8} - j1,0309 \cdot 10^{-7}} = 122,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (16)$$

Сравнение результатов (13) и (16) показывает, что они очень близки, поскольку расхождение не превышает 1,2 %. Причем следует отметить, что это полностью совпадает с электромагнитным расчетом радиальных подшипников турбоагнетателя 6ТК-Э [10].

Однако приведенный пример подразумевает, что ось y расположена вертикально. В то же время в радиальных электромагнитных подшипниках принято поворачивать систему координат на 45 угловых градусов для того, чтобы распределять силу веса на два электромагнита. Это приводит к снижению массы и, следовательно, силы веса, приходящейся на одну ось, в $\sqrt{2}$ раз. Тогда для рассматриваемого варианта электромагнитного подвеса ротора турбоагнетателя в расчетах необходимо принять $m = 12,728$ кг. С учетом этого рациональная величина смещения магнитной системы по оси y в соответствии с формулами (7) – (10) должна быть равна 92 мкм. Расчет по формуле (12) дает результат $y = 88$ мкм, то есть расхождение увеличилось до 4,3 %. Это связано, по мнению авторов, с пренебрежением нестационарностью коэффициента k_F , величина которого, в свою очередь, зависит от смещения ротора от центра магнитной системы.

Смещение центра магнитной системы относительно оси вращения ротора позволяет, как показано в [2], снизить величину опорного напряжения питания

обмоток электромагнитов. Это приводит к снижению потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками и обеспечению более благоприятного теплового режима работы обмоток. В то же время смещение центра магнитной системы не влияет на устойчивость работы трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником (см. рисунок) [11].



Действительно, при выборе 12-разрядного широтно-импульсного модулятора с коэффициентом передачи $k_{ШИМ} = 0,0001221$ и датчика положения с $k_{\text{он}} = 10000000$ дискрет/м настройки регуляторов системы управления электромагнитным подшипником, определенные для центрального положения ротора, будут следующими: постоянная времени пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора $T_{\text{но}} = 0,079$ с, коэффициенты передачи пропорционального (П) и ПД регуляторов $k_{\text{но}} = k_n = 2$, постоянные времени дифференцирующего звена и интегрального (И) регулятора соответственно $k_{\text{осс}} = 0,0008$ с, $T_u = 0,008$ с [12, 13]. При смещении центра магнитной системы относительно оси вращения индуктивности обмоток электромагнитов принимают значения $L_2 = 2,92$ Гн, $L_4 = 2,25$ Гн, $L_{24} = L_{42} = 0,003$ Гн. При этом коэффициенты, характеризующие наводимые ЭДС в обмотках, равны $k_{E2} = 1623$ Вс/м, $k_{E4} = 1465$ Вс/м. В то же время коэффициенты, определяющие силу, действующую на ротор, имеют следующие значения: $k_{\text{эм}} = 1144$ Н, $k_F = 1407100$ Н/м. Передаточная функция замкнутой трехконтурной системы управления электромагнитного подшипника имеет вид [4]:

$$W_3(p) = \frac{b_{01}p^2 + b_{11}p + 1}{k_{\text{он}}(a_{01}p^5 + a_{11}p^4 + a_{21}p^3 + a_{31}p^2 + a_{41}p + 1)},$$

где $b_{01} = b_0 T_{\text{но}}$; $b_{11} = b_0 + T_{\text{но}}$; $a_{01} = \frac{a_0 T_u}{k_2}$; $a_{11} = \frac{(a_1 + k_1 b_0 T_{\text{но}}) T_u}{k_2}$;

$$a_{21} = \frac{[a_2 + k_1(b_0 + T_{\text{но}}) + k_2 b_0 T_{\text{но}}] T_u}{k_2}; a_{31} = \frac{[a_3 + k_1 + k_2(b_0 + T_{\text{но}})] T_u}{k_2} + b_0 T_{\text{но}};$$

$$a_{41} = \frac{(k_2 - 1) T_u}{k_2} + b_0 + T_{\text{но}}; k_{\text{ОУ}} = \frac{k_{\text{ШИМ}} k_{\text{эм}} U (I_{20} R_2 + I_{40} R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2};$$

$$\begin{aligned}
b_0 &= \frac{I_{20}(R_2 T_2 + L_{42}) + I_{40}(R_4 T_4 + L_{24})}{I_{20} R_2 + I_{40} R_4}; \quad a_0 = \frac{m}{k_F} \left(T_2 T_4 - \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} \right); \quad a_1 = \frac{m(T_2 + T_4)}{k_F}; \\
a_2 &= \frac{m}{k_F} + \frac{k_{ЭМ} \left[I_{20}(k_{E4} R_2 T_2 + k_{E2} L_{42}) + I_{40}(k_{E2} R_4 T_4 + k_{E4} L_{24}) \right]}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} + \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} - T_2 T_4; \\
a_3 &= \frac{k_{ЭМ} (I_{20} k_{E4} R_2 + I_{40} k_{E2} R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} - (T_2 + T_4); \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2}; \quad T_4 = \frac{L_4}{R_4}; \quad k_1 = k_{no} k_{oy} k_{occ} k_{on}; \\
k_2 &= k_n k_{no} k_{oy} k_{on}.
\end{aligned}$$

Следовательно, устойчивость трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником определяется характеристическим уравнением

$$a_{01} p^5 + a_{11} p^4 + a_{21} p^3 + a_{31} p^2 + a_{41} p + 1 = 0. \quad (17)$$

При $I_{20} = I_{40} = 0,311$ А уравнение (17) имеет следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned}
a_{01} &= 1,2849 \cdot 10^{-11} \text{ с}^5, \quad a_{11} = 7,7495 \cdot 10^{-9} \text{ с}^4, \\
a_{21} &= 1,841 \cdot 10^{-5} \text{ с}^3, \quad a_{31} = 2,9002 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2, \\
a_{41} &= 0,1118 \text{ с}.
\end{aligned}$$

Решение (17) показывает, что корни характеристического уравнения равны

$$\begin{aligned}
p_{1,2} &= -219,279 \pm j1142,872, \quad p_3 = -111,908, \\
p_4 &= -39,713, \quad p_5 = -12,931.
\end{aligned}$$

Поскольку все корни имеют отрицательные вещественные части, трехконтурная система управления электромагнитным подшипником остается устойчивой при выбранных параметрах регуляторов и смещении центра магнитной системы относительно оси вращения на рациональную величину [14, 15].

Выводы

1. Найденные аналитические выражения позволяют определить рациональную величину смещения центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения, при которой происходит компенсация силы веса ротора при равных токах в противоположных магнитах.

2. Смещение центра магнитной системы электромагнитного подшипника относительно оси вращения ротора на расчетную величину не влияет на устойчивость системы управления при настройках регуляторов, выбранных для центрального положения ротора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журавлёв Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчёт, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
2. Стариков А.В., Костюков В.Д. Анализ работы электромагнитных подшипников при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 1. С. 103–123.
3. Стариков А.В., Рокало Д.Ю., Костюков В.Д. Анализ устойчивости системы управления электромагнитным подшипником с учетом вариации его параметров // Вопросы электротехнологии. 2023. № 2 (39). С. 66–73.
4. Стариков А.В. Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 354 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 835 с.
6. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1965. 608 с.
7. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Математическая модель радиального электромагнитного подшипника как объекта управления // Электротехнические системы и комплексы. Межвузовский сборник науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 1998.
8. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Стариков С.А. Математическая модель электромагнитного подшипника как объекта управления с учетом непостоянства его параметров // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». 2012. № 4. С. 31–34.
9. Макаричев Ю.А., Стариков А.В., Беляева И.С. Математическая модель осевого электромагнитного подшипника с учетом вихревых токов // Известия высших учебных заведений «Электромеханика». 2014. № 5. С. 52–56.
10. Макаричев Ю.А. Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 350 с.
11. Патент России № 2395150. Система управления электромагнитным подвесом ротора / А.В. Стариков, С.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
12. Стариков А.В., Стариков С.А. Параметрический синтез регуляторов многоконтурной системы управления электромагнитным подвесом ротора // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 1 (29). С. 192–200.
13. Стариков А.В., Лисин С.Л. Структурно-параметрический синтез систем управления неустойчивыми объектами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2013. № 4 (40). С. 53–58.
14. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
15. Воронов А.А., Воронова А.А., Бабаков Н.А. и др. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления. М.: Высш. шк, 1986. 367 с.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.

DETERMINATION OF THE RATIONAL SHIFT VALUE THE CENTER OF THE MAGNETIC SYSTEM ELECTROMAGNETIC BEARING

*A.V. Starikov, V.D. Kostukov**

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: star58@mail.ru, kostyukovvlad@yandex.ru

Abstract. *The article sets the task of determining the rational value of the displacement of the center of the magnetic system of an electromagnetic bearing relative to the axis of rotation, at which, with equal currents in opposite electromagnets, the weight force falling on one axis of the bearing will be completely compensated. To achieve the set, the equations of motion of the rotor in the field of electromagnets are considered. It is shown that the rational value of the displacement of the center of the magnetic system is determined from a fourth-order algebraic equation. The analytical solution of Descartes-Euler of this equation is applied. Analytical expressions are found that allow to determine the rational value of the displacement of the center of the magnetic system relative to the axis of rotation according to the known parameters of the electromagnetic bearing. A study was made of the stability of a three-circuit control system of an electromagnetic bearing when the center of the magnetic system is shifted by a rational value relative to the axis of rotation. It is proved that the displacement of the center of the magnetic system by the calculated value does not affect the stability of the control system of the electromagnetic bearing with the settings of the regulators selected for the central position of the rotor.*

Keywords: *electromagnetic bearing, magnetic system center, control system, stability.*

REFERENCES

1. Zhuravlev Yu.N. Aktivnye magnitnye podshipniki: teoriya, raschyot, primeneniye [Active magnetic bearings: theory, calculation, application]. St. Petersburg: Politehnika, 2003. 206 p. (In Russian).
2. Starikov A.V., Kostyukov V.D. Analiz raboty elektromagnitnyh podshipnikov pri smeshchenii centra magnitnoj sistemy otnositel'no osi vrashcheniya i variacii napryazheniya pitaniya [Analysis of the operation of electromagnetic bearings when the center of the magnetic system is displaced relative to the axis of rotation and variations in supply voltage] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2023. Vol. 31, No. 1. Pp. 103–123. (In Russian).
3. Starikov A.V., Rokalo D.Yu., Kostyukov V.D. Analiz ustojchivosti sistemy upravleniya elektromagnitnym podshipnikom s uchytom variacii ego parametrov [Analysis of the stability of the control system of an electromagnetic bearing, taking into account the variation of its parameters] // Questions of Electrotechnology. 2023. No. 2 (39). Pp. 66–73. (In Russian).
4. Starikov A.V. Metodologiya sinteza mnogosvyaznoj sistemy elektromagnitnyh podshipnikov s povyshennymi zhestkostnymi harakteristikami energeticheskikh ob'ektov [Methodology for the synthesis of a multiply connected system of electromagnetic bearings with increased rigidity characteristics of power facilities]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 354 p. (In Russian).
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of mathematics for scientists and engineers]. M.: Nauka, 1984. 835 p. (In Russian).



© The Author(s), 2023

* Alexander V Starikov (Dr. (Techn.)), Professor.
Vladislav D. Kostukov, Postgraduate Student.

6. *Bronstein I.N., Semendyaev K.A.* Spravochnik po matematike [Handbook of mathematics]. M.: Nauka, 1965. 608 p. (In Russian).
7. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Starikov S.A.* Matematicheskaya model' radial'nogo elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya [Mathematical model of a radial electromagnetic bearing as a control object] // Electrotechnical systems and complexes: Interuniversity collection of scientific works. Magnitogorsk: MSTU, 1998. (In Russian).
8. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Starikov S.A.* Matematicheskaya model' elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya s uchetom nepostoyanstva ego parametrov [Mathematical model of an electromagnetic bearing as a control object, taking into account the variability of its parameters] // Izvestia of higher educational institutions "Electromechanics". 2012. No. 4. Pp. 31–34. (In Russian).
9. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V., Belyaeva I.S.* Matematicheskaya model' oseвого elektromagnitnogo podshipnika s uchetom vihrevykh tokov [Mathematical model of an axial electromagnetic bearing taking into account eddy currents] // Izvestiya of higher educational institutions "Electromechanics". 2014. No. 5. Pp. 52–56. (In Russian).
10. *Makarichev Yu.A.* Matematicheskaya model' oseвого elektromagnitnogo podshipnika s uchetom vihrevykh tokov [Methods of analysis and synthesis of active electromagnetic bearings]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 350 p. (In Russian).
11. Russian patent No. 2395150. Sistema upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora [Control system for the electromagnetic suspension of the rotor] / *A.V. Starikov, S.A. Starikov* (Russia) // Publ. 20.07.2010, Bull. No. 20. (In Russian).
12. *Starikov A.V., Starikov S.A.* Parametricheskij sintez regulyatorov mnogokonturnoj sistemy upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora [Parametric synthesis of regulators of a multi-circuit control system for the electromagnetic suspension of the rotor] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 1 (29). Pp. 192–200. (In Russian).
13. *Starikov A.V., Lisin S.L.* Strukturno-parametricheskij sintez sistem upravleniya neustojchivymi ob'ektami [Structural-parametric synthesis of control systems for unstable objects] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2013. No. 4 (40). Pp. 53–58. (In Russian).
14. *Besekersky V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [Theory of automatic control systems]. M.: Nauka, 1975. 768 p. (In Russian).
15. *Voronov A.A., Voronova A.A., Babakov N.A. etc.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: Ucheb. dlya vuzov po spec. «Avtomatika i telemekhanika» [Theory of automatic control: Proc. for universities on special "Automation and telemechanics"]. Part 1. Theory of linear systems of automatic control. M.: Higher. Shk., 1986. 367 p. (In Russian).

Original article submitted 25.09.2023