

УДК 621.3.078

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ СМЕЩЕНИИ ЦЕНТРА МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСИ ВРАЩЕНИЯ И ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

*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 снижения потребления электрической энергии электромагнитными подшипниками. Для достижения поставленной цели предложено сместить центр магнитной системы подшипников, осуществляющих компенсацию веса ротора, относительно оси вращения. Величина смещения принята равной половине величины зазора в страховочных подшипниках рассматриваемого агрегата. Приведена математическая модель радиального электромагнитного подшипника, его расчетная схема с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения, структурная схема трехконтурной системы управления и формулы для расчета параметров регуляторов. Определены настройки регуляторов для конкретного типа электромагнитных подшипников. Разработана расчетная модель, позволяющая исследовать работу электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения и вариации напряжения питания. Приведены результаты моделирования в программной среде Matlab Simulink процесса всплытия ротора со страховочных подшипников и левитации ротора в смещенном состоянии при различных величинах питающего напряжения. Показано, что снижение напряжения на 16,7 % обеспечивает устойчивую работу электромагнитного подвеса ротора во всех возможных режимах. Следовательно, смещение центра магнитной системы позволяет снизить потребляемую электромагнитными подшипниками мощность на 30 %.*

**Ключевые слова:** *электромагнитный подшипник, напряжение питания, потребляемая мощность, энергетическая эффективность.*

### Введение

В настоящее время электромагнитные подшипники достаточно широко используются на практике. Их применение охватывает ключевые сферы промышленности, такие как транспорт, энергетика, топливно-энергетический комплекс, станкостроение, авиация, космическая отрасль и др. Например, применение электромагнитных подшипников (активных магнитных подшипников) является перспективным направлением в области энергетического машиностроения. Действительно, замена в газоперекачивающих агрегатах и мощных электродвигателях гидростатических подшипников скольжения на электромагнитные по-

---

\* Александр Владимирович Стариков, доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и промышленной автоматики.

Владислав Дмитриевич Костюков, аспирант кафедры электропривода и промышленной автоматики.

зволяет исключить маслосистему, снизить механические потери на трение и повысить ресурс работы оборудования [1–11]. При этом происходит снижение потребления электрической энергии, необходимой для функционирования маслосистемы подшипников скольжения. Кроме того, применение электромагнитных подшипников актуально в высокоскоростных электрошпинделях, поскольку наряду с увеличением межремонтного периода позволяет обеспечить высокую жесткость опор [12, 13].

Однако электромагнитные подшипники сами по себе потребляют электрическую энергию, которая идет на поддержание ротора в требуемом положении и нагрев обмоток электромагнитов. Наряду с высокой стоимостью и сложностью конструкции данный аспект также относят к перечню недостатков электромагнитных подшипников. В настоящее время вопросы энергосбережения являются весьма актуальными и учитываются при проектировании и разработке любого электротехнического устройства. В связи с этим целью работы является снижение потребления электроэнергии активными магнитными подшипниками.

### Решение поставленной задачи

Для достижения поставленной цели предлагается сместить центр магнитной системы электромагнитных подшипников, компенсирующих вес ротора, относительно оси вращения. Это позволит при одном и том же токе электромагнита за счет уменьшения воздушного зазора увеличить силу притяжения электромагнита, направленную против силы веса.

Рассмотрим случай, когда ротор какого-либо агрегата, оснащенного электромагнитными подшипниками, расположен горизонтально. Тогда компенсацию веса ротора будут производить радиальные электромагнитные подшипники. Расчетная схема одного радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения приведена на рис. 1. Управление токами  $I_1$  и  $I_3$  электромагнитов ЭМ1 и ЭМ3, расположенных по оси  $x$ , производится независимо от регулирования токами  $I_2$  и  $I_4$  электромагнитов ЭМ2 и ЭМ4, действующих по оси  $y$ .

Если использовать дифференциальный закон управления электромагнитами каждой оси, при котором увеличение тока одного электромагнита приводит к пропорциональному уменьшению тока противоположного электромагнита, то перемещение ротора, например, по оси  $y$  описывается следующей системой уравнений [14]:

$$\left. \begin{aligned} U(k_{ШИМ} N_y + 0,5) &= L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2 I_2 + k_{E2} \frac{dy}{dt} + L_{24} \frac{dI_4}{dt}; \\ U(0,5 - k_{ШИМ} N_y) &= L_4 \frac{dI_4}{dt} + R_4 I_4 - k_{E4} \frac{dy}{dt} + L_{42} \frac{dI_2}{dt}; \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= k_{ЭМ} \left( \frac{I_2}{I_2 + I_4} - 0,5 \right) + k_F y - G_y \pm F_{э}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U$ ,  $k_{ШИМ}$  и  $N_y$  – опорное напряжение, коэффициент передачи и величина сигнала на входе широтно-импульсного модулятора (ШИМ);  $L_2$ ,  $R_2$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки второго электромагнита ЭМ2;  $L_4$ ,

$R_4$  – индуктивность и активное сопротивление обмотки третьего электромагнита ЭМ4;  $L_{24}$  и  $L_{42}$  – коэффициенты взаимной индукции между электромагнитами;  $k_{E2}$  и  $k_{E4}$  – коэффициенты, связывающие наводимые в соответствующих обмотках электродвижущие силы со скоростью перемещения ротора;  $m$  – масса ротора, приходящаяся на один радиальный электромагнитный подшипник;  $k_F$  – коэффициент положительной обратной связи по перемещению;  $k_{ЭМ}$  – коэффициент, связывающий силу, действующую на ротор, с токами  $I_2$  и  $I_4$  во втором и четвертом электромагнитах;  $G_y$  – часть веса ротора, приходящаяся на ось  $y$  радиального электромагнитного подшипника;  $F_{gy}$  – составляющая внешней возмущающей силы по оси  $y$ .

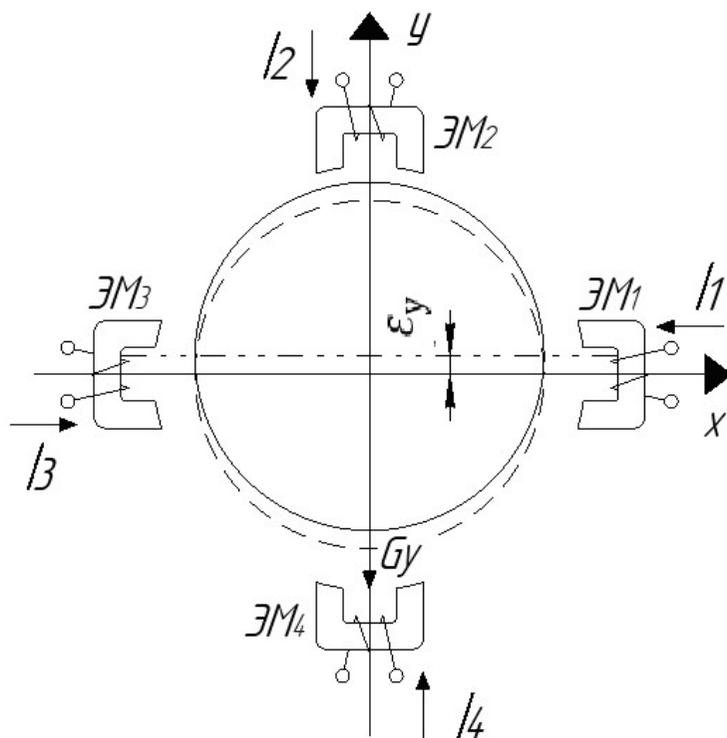


Рис. 1. Расчетная схема радиального электромагнитного подшипника с учетом смещения центра магнитной системы относительно оси вращения

Системе уравнений (1) соответствует следующая передаточная функция радиального электромагнитного подшипника как объекта управления [15]:

$$W_{ov}(p) = \frac{\frac{k_{ШИМ}k_{ЭМ}U(I_{20}R_2 + I_{40}R_4)}{k_F R_2 R_4 (I_{20} + I_{40})^2} \left[ \frac{I_{20}(R_2 T_2 + L_{42}) + I_{40}(R_4 T_4 + L_{24})}{I_{20}R_2 + I_{40}R_4} p + 1 \right]}{\frac{m}{k_F} \left( T_2 T_4 - \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} \right) p^4 + \frac{m(T_2 + T_4)}{k_F} p^3 + \left[ \frac{m}{k_F} + \frac{k_{ЭМ}}{k_F R_2 R_4} \times \right.} \quad (2)$$

$$\times \frac{I_{20}(k_{E4} R_2 T_2 + k_{E2} L_{42}) + I_{40}(k_{E2} R_4 T_4 + k_{E2} L_{24}) + \frac{L_{24} L_{42}}{R_2 R_4} - T_2 T_4}{(I_{20} + I_{40})^2} \left. \right] p^2 +$$

$$+ \left[ \frac{k_{ЭМ}}{k_F R_2 R_4} \frac{I_{20} k_{E4} R_2 + I_{40} k_{E2} R_4}{(I_{20} + I_{40})^2} - (T_2 + T_4) \right] p - 1,$$

где  $I_{20}$  и  $I_{40}$  – начальные значения токов в рабочей точке;  $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$  и  $T_4 = \frac{L_4}{R_4}$  – постоянные времени обмоток электромагнитов, вызванные собственными индуктивностями  $L_2$  и  $L_4$ .

Основные особенности электромагнитных подшипников как объектов управления заключаются в нестационарности и принципиальной неустойчивости [15]. Нестационарность проявляется в том, что такие параметры электромагнитного подшипника, как  $L_2$ ,  $L_4$ ,  $k_F$ ,  $k_{ЭМ}$ ,  $k_{E2}$  и  $k_{E4}$ , изменяются в функции смещения ротора относительно центра магнитной системы. Неустойчивость связана с наличием положительной обратной связи по перемещению.

При исследовании влияния смещения центра магнитной системы электромагнитных подшипников относительно оси вращения на работу предположим, что управление электромагнитным подшипником по каждой оси осуществляет трехконтурная система управления (рис. 2) [16, 17].

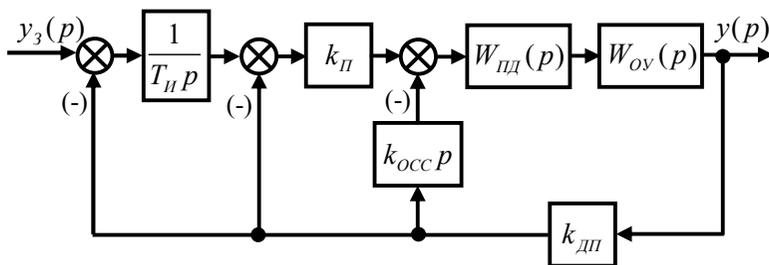


Рис. 2. Структурная схема непрерывного прототипа трехконтурной системы управления электромагнитным подшипником

Она содержит во внутреннем контуре пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией

$$W_{ПД}(p) = k_{ПД}(T_{ПД} p + 1),$$

где  $k_{ПД}$  – коэффициент передачи;  $T_{ПД}$  – постоянная времени регулятора, который обеспечивает компенсацию основной инерционности объекта.

Во втором и третьем контурах применены соответственно пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи  $k_{П}$  и интегральный регулятор,

имеющий постоянную времени  $T_{II}$ . Эти регуляторы предназначены для придания электромагнитному подшипнику требуемых динамических и статических свойств.

Параметры регуляторов системы управления электромагнитным подшипником рассчитываются для центрального положения ротора относительно магнитной системы подшипника по следующим аналитическим выражениям [17, 18]:

$$\left. \begin{aligned} T_{ПД} &= 3T_{\mathcal{E}}; \\ k_{ПД} &= k_{II}; \\ k_{ОСС} &= 2\xi \sqrt{\frac{m}{3k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}} - \frac{2m}{9k_{ПД}k_{ШИМ}k_{ЭМ}k_{ДП}T_{\mathcal{E}}}}; \\ T_{II} &= \frac{2,19(-b + \sqrt{b^2 - 4ac})}{a}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $T_{\mathcal{E}} = \frac{L_2 - L_{24}}{R_2}$ ;  $\xi$  – задаваемый параметр демпфирования колебаний;

$$\begin{aligned} a &= (k_2 - k_F)(m + k_1 T_{ПД}) \left( \frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{ПД} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - m(k_2 - k_F)^2 T_{\mathcal{E}}; \\ b &= k_2 T_{ПД} (m + k_1 T_{ПД}) \left( \frac{k_{ЭМ} k_E}{U} + k_1 + k_2 T_{ПД} - k_F T_{\mathcal{E}} \right) - 2mk_2(k_2 - k_F) T_{ПД} T_{\mathcal{E}} - k_2(m + k_1 T_{ПД})^2; \\ c &= -mT_{\mathcal{E}} k_2^2 T_{ПД}^2; \quad k_1 = k_{ПД} k_{ШИМ} k_{ЭМ} k_{ОСС} k_{ДП}; \quad k_2 = k_{II} k_{ПД} k_{ШИМ} k_{ЭМ} k_{ДП}. \end{aligned}$$

Для оценки влияния смещения центра магнитной системы относительно оси вращения на качество работы и энергопотребление радиального электромагнитного подшипника воспользуемся методом компьютерного моделирования в программе Matlab Simulink. При этом возьмем за основу характеристики электромагнитов, разработанных для электромагнитного подвеса ротора опытного образца турбоагнетателя 6ТК-Э дизеля локомотива [19, 20].

В рассматриваемом агрегате масса ротора, приходящаяся на один электромагнитный подшипник, составляет  $m = 18$  кг, а опорное напряжение широтно-импульсного преобразователя –  $U = 60$  В. При центральном положении ротора электромагниты характеризуются следующими параметрами:  $L_2 = L_4 = 2,54$  Гн;  $R_2 = R_4 = 96,6$  Ом;  $L_{24} = L_{42} = 0,0033$  Гн;  $k_E = k_{E2} = k_{E4} = 1544$  Вс/м;  $k_{ЭМ} = 1272$  Н;  $k_F = 1424000$  Н/м.

Принимая в качестве коэффициента передачи широтно-импульсного модулятора  $k_{ШИМ} = 0,0001221$ , что соответствует 12-разрядному ШИМ, при  $\xi = 0,216$  по формулам (3) найдем требуемые настройки регуляторов системы управления электромагнитным подшипником:  $T_{ПД} = 0,079$  с;  $k_{ПД} = k_{II} = 2$ ;  $k_{ОСС} = 0,0008$  с;  $T_{II} = 0,008$  с.

Теперь проверим работоспособность радиального электромагнитного подшипника при смещении центра магнитной системы от оси  $y$  вращения ротора на величину  $\varepsilon_y = 0,000125$  м. При этом учтем, что параметры электромагнитов

изменяться и станут равными:  $L_2 = 3,05$  Гн;  $L_4 = 2,15$  Гн;  $k_{E2} = 2174$  Вc/м;  $k_{E4} = 913$  Вc/м;  $k_{ЭМ} = 1361$  Н;  $k_F = 1360000$  Н/м.

Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником (ЭМП) при периоде дискретизации  $T = 0,0002$  с приведена на рис. 3. Она содержит объект управления (рис. 4), учитывающий приведенные выше параметры, а также ограничения силы электромагнитов на уровне 732 Н и перемещений в диапазоне  $\pm 0,00025$  м.

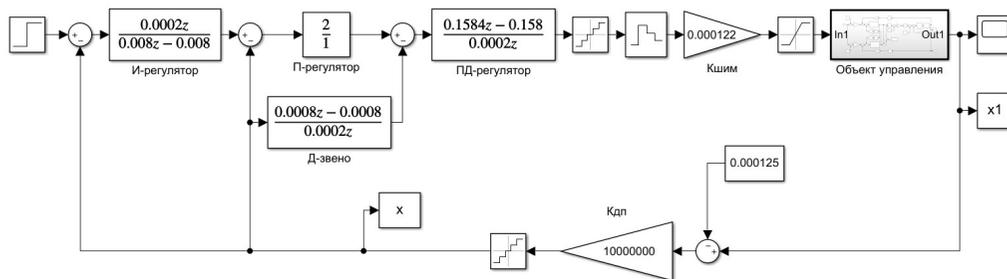


Рис. 3. Расчетная модель цифровой системы управления электромагнитным подшипником

Расчетная модель позволяет построить график перемещения ротора из нулевого относительно центра магнитной системы положения в координату  $y = 0,000125$  м (рис. 5). Он показывает, что при выбранных настройках регуляторов система управления электромагнитным подшипником работает устойчиво и при смещении центра магнитной системы относительно оси вращения ротора.

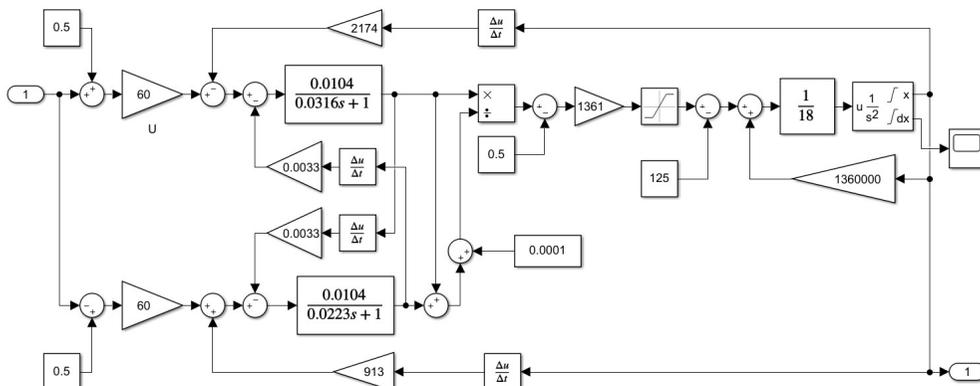


Рис. 4. Расчетная модель электромагнитного подшипника как объекта управления при напряжении питания  $U = 60$  В и смещении оси вращения на  $\epsilon_y = 0,000125$  м относительно центра магнитной системы

Попытаемся теперь уменьшить опорное напряжение ШИМ до  $U = 50$  В. Компьютерное моделирование показывает, что при уменьшении напряжения питания обмоток электромагнитов получается переходный процесс, аналогичный графику, приведенному на рис. 5. Так же ведет себя радиальный электромагнитный подшипник и при опорном напряжении ШИМ, равным 40 и 30 В.

Однако при включении системы управления электромагнитным подвесом изначально ротор находится на страховочных подшипниках.

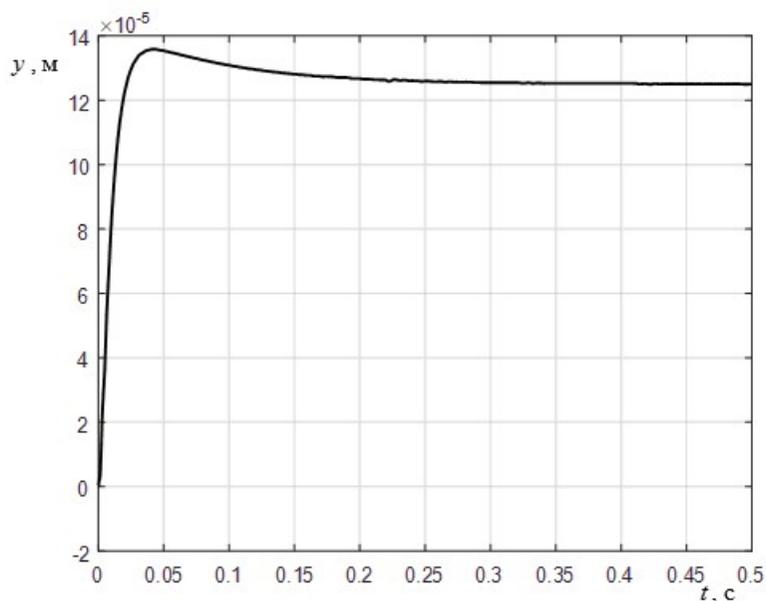


Рис. 5. Переходный процесс перемещения ротора из нулевого относительно центра магнитной системы положения в координату  $y = 0,000125$  м при  $U = 60$  В

Если считать, что зазор в страховочных подшипниках рассматриваемого агрегата составляет  $0,00025$  м, то в момент включения электромагнитного подвеса ротор находится в координате  $y = -0,000125$  м относительно центра магнитной системы. При этом параметры электромагнитов при  $U = 50$  В имеют следующие значения [19, 20]:  $L_2 = 1,83$  Гн;  $L_4 = 3,2$  Гн;  $k_{E2} = 760$  Вс/м;  $k_{E4} = 1026$  Вс/м;  $k_{ЭМ} = 443$  Н;  $k_F = 511100$  Н/м.

Моделирование показывает, что с такими параметрами и при  $U = 50$  В ротор турбоагнетателя уверенно всплывает со страховочных подшипников (рис. 6).

При дальнейшем снижении питающего напряжения стабильность функционирования снижается. Так, при напряжении  $U = 40$  В ротор турбоагнетателя не может подняться со страховочных подшипников, а при  $U = 45$  В всплытие ротора существенно затягивается.

Тем не менее проведенное исследование показывает, что при смещении центра магнитной системы на  $\varepsilon_y = 0,000125$  м относительно оси вращения ротора нагнетателя напряжение питания электромагнитов можно снизить до 50 В. Это приведет к повышению энергетической эффективности электромагнитного подшипника за счет снижения потребляемой мощности пропорционально квадрату отношения напряжений, то есть на 30 %. Кроме того, снижение напряжения питания обеспечивает уменьшение температуры нагрева обмоток электромагнитов, что упрощает требования к их охлаждению.

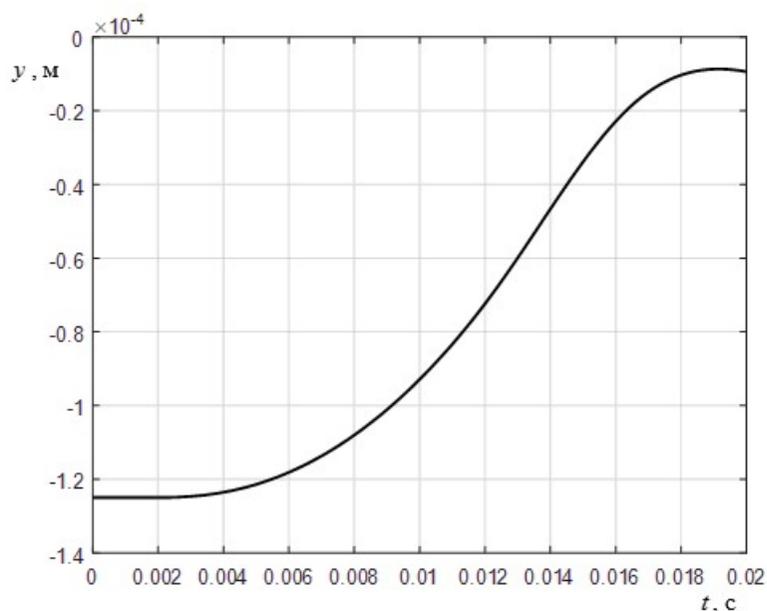


Рис. 6. Процесс всплытия ротора со страховочных подшипников при  $U = 50$  В

### Выводы

1. Смещение центра магнитной системы электромагнитных подшипников, компенсирующих вес ротора, относительно оси вращения является эффективным методом снижения напряжения питания обмоток электромагнитов.
2. Снижение напряжения питания электромагнитов приводит к повышению энергетической эффективности электромагнитных подшипников и уменьшению температуры нагрева обмоток.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов Д.Н., Верецагин В.П. Структура системы управления электромагнитными подшипниками // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2010. Т. 114. С. 9–14.
2. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 113. С. 3–12.
3. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика поверочного расчета электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2010. Т. 117. С. 3–12.
4. Верецагин В.П., Клабуков В.А. Математическая модель магнитного подшипника // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 112. С. 17–22.
5. Сарычев А.П. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 110. С. 3–10.
6. Сарычев А.П. Особенности и опыт создания электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2009. Т. 112. С. 3–10.
7. Сарычев А.П., Абдурагимов А.С., Носков А.В. Опыт применения магнитных подшипников в компрессорах ГПА // Труды 15-го Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб., 2010. С. 122–128.

8. *Сарычев А.П., Вейнберг Д.М.* Опыт разработки электромагнитных подшипников для газовых компрессоров // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. М., 2001. Т. 100. С. 275 – 282.
9. *Сарычев А.П., Верецагин В.П.* Электромагнитные подшипники для Газпрома // Электротехника. М., 1996. № 5. С. 29–31.
10. *Журавлёв Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с.
11. *Никаноров В.В., Таганов Р.С., Сальников С.В., Москалев А.В., Витковский Д.В., Веремеев В.Е., Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Цифровая система управления электромагнитными подшипниками центробежных компрессоров // Газовая промышленность. 2014. № 10. С. 57–62.
12. *Никитина Л.Г.* Исследование электромагнитных опор для высокоскоростных шпиндельных узлов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2011. № 3. С. 65–68.
13. *Востоков В.С., Горбунов В.С., Кодочигов Н.Г., Лебедева С.В., Ходыкин А.В.* Обоснование устойчивости полного электромагнитного подвеса // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. С. 28–32.
14. *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.
15. *Стариков А.В.* Методология синтеза многосвязной системы электромагнитных подшипников с повышенными жесткостными характеристиками энергетических объектов: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 354 с.
16. Патент России № 2395150. Система управления электромагнитным подвесом ротора / *А.В. Стариков, С.А. Стариков* (Россия) // Оpubл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
17. *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.
18. *Стариков А.В.* Синтез финитного регулятора для системы управления электромагнитным подшипником // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2012. № 3 (35). С. 240–243.
19. *Макаричев Ю.А.* Методы анализа и синтеза активных электромагнитных подшипников: дис. ... докт. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2013. 350 с.
20. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Статический изгибающий момент осевого электромагнитного подшипника при одностороннем смещении ротора в радиальной опоре // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 4 (32). С. 134–139.

*Статья поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.*

# ANALYSIS OF THE OPERATION OF ELECTROMAGNETIC BEARINGS IN THE DIFFERENCE OF THE CENTER OF THE MAGNETIC SYSTEM RELATIVE TO THE AXIS OF ROTATION AND VARIATIONS OF THE SUPPLY VOLTAGE

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

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

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

**Abstract.** *The article sets the task of reducing the consumption of electrical energy by electromagnetic bearings. To achieve this goal, it is proposed to shift the center of the magnetic system of bearings that compensate for the weight of the rotor relative to the axis of rotation. The displacement value is assumed to be equal to half the clearance value in the safety bearings of the unit under consideration. A mathematical model of a radial electromagnetic bearing, its design scheme, taking into account the displacement of the center of the magnetic system relative to the axis of rotation, a block diagram of a three-loop control system and formulas for calculating the parameters of regulators are presented. Regulator settings for a specific type of electromagnetic bearings are determined. A calculation model has been developed that makes it possible to study the operation of an electromagnetic bearing when the center of the magnetic system is displaced relative to the axis of rotation and the supply voltage is varied. The results of simulation in the Matlab Simulink software environment of the process of rotor ascent from safety bearings and rotor levitation in a displaced state at different values of the supply voltage are given. It is shown that the voltage reduction by 16.7% ensures stable operation of the electromagnetic suspension of the rotor in all possible modes. Therefore, shifting the center of the magnetic system can reduce the power consumption of electromagnetic bearings by 30%.*

**Keywords:** *electromagnetic bearing, supply voltage, power consumption, energy efficiency.*

## REFERENCES

1. Bogdanov D.N., Vereshchagin V.P. The structure of the control system for electromagnetic bearings [Struktura sistemy upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2010. Vol. 114. Pp. 9–14. (In Russian).
2. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Methodology for designing electromagnetic bearings [Metodika proektirovaniya elektromagnitnyh podshipnikov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2009. Vol. 113. Pp. 3–12. (In Russian).
3. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Methods of verification calculation of electromagnetic bearings [Metodika poverochnogo raschyota elektromagnitnyh podshipnikov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2010. Vol. 117. Pp. 3–12. (In Russian).
4. Vereshchagin V.P., Klabukov V.A. Mathematical model of magnetic bearing [Математическая модель магнитного подшипника] // Questions of electromechanics. Proceedings of NPP VNIIEМ. M., 2009. Vol. 112. Pp. 17–22. (In Russian).
5. Sarychev A.P. Development of electromagnetic bearings for a series of compressors for gas pumping units [Razrabotka elektromagnitnyh podshipnikov dlya serii kompressorov

---

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

- gazoperekachivayushchih agregatov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2009. Vol. 110. Pp. 3–10. (In Russian).
6. *Sarychev A.P.* Features and experience of creating electromagnetic bearings for a series of compressors for gas-pumping units [Osobennosti i opyt sozdaniya elektromagnitnyh podshipnikov dlya serii kompressorov gazoperekachivayushchih agregatov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2009. Vol. 112. P. 3–10. (In Russian).
  7. *Sarychev A.P., Abduragimov A.S., Noskov A.V.* Experience of using magnetic bearings in GPU compressors [Opyt primeneniya magnitnyh podshipnikov v kompressorah GPA] // Proceedings of the 15th International Symposium "Consumers-Manufacturers of Compressors and Compressor Equipment". SPb., 2010. Pp. 122–128. (In Russian).
  8. *Sarychev A.P., Weinberg D.M.* Experience in the development of electromagnetic bearings for gas compressors [Opyt razrabotki elektromagnitnyh podshipnikov dlya gazovyh kompressorov] // Voprosy elektromekhaniki. Proceedings of NPP VNIEM. M., 2001. Vol. 100. P. 275–282. (In Russian).
  9. *Sarychev A.P., Vereshchagin V.P.* Electromagnetic bearings for Gazprom [Elektromagnitnye podshipniki dlya Gazproma] // Elektrotehnika. M., 1996. No. 5. Pp. 29–31. (In Russian).
  10. *Zhuravlev Yu.N.* Active magnetic bearings: theory, calculation, application [Aktivnye magnitnye podshipniki: teoriya, raschyot, primenenie]. St. Petersburg: Politehnika, 2003. 206 p. (In Russian).
  11. *Nikanorov V.V., Taganov R.S., Salnikov S.V., Moskalev A.V., Vitkovsky D.V., Veremeev V.E., Makarichev Yu.A., Starikov A.V.* Digital control system for electromagnetic bearings of centrifugal compressors [Cifrovaya sistema upravleniya elektromagnitnymi podshipnikami centrobeznyh kompressorov] // Gas industry. 2014. No. 10. Pp. 57–62. (In Russian).
  12. *Nikitina L.G.* Investigation of electromagnetic supports for high-speed spindle units [Issledovanie elektromagnitnyh opor dlya vysokoskorostnyh shpindel'nyh uzlov] // Engineering and life safety. 2011. No. 3. Pp. 65–68. (In Russian).
  13. *Vostokov V.S., Gorbunov V.S., Kodochigov N.G., Lebedeva S.V., Khodykin A.V.* Justification of the stability of the full electromagnetic suspension [Obosnovanie ustojchivosti polnogo elektromagnitnogo podvesa] // Izvestiya RAN. Theory and control systems. 2007. Pp. 28–32. (In Russian).
  14. *Makarichev Yu. A., Starikov A. V., Starikov S. A.* Mathematical model of an electromagnetic bearing as a control object, taking into account the variability of its parameters [Matematicheskaya model' elektromagnitnogo podshipnika kak ob'ekta upravleniya s uchetom nepostoyanstva ego parametrov] // Izv. universities. Elektromekhanika. 2012. Pp. 31–34. (In Russian).
  15. *Starikov A.V.* Methodology for the synthesis of a multiply connected system of electromagnetic bearings with increased rigidity characteristics of power facilities [Metodologiya sinteza mnogosvyaznoj sistemy elektromagnitnyh podshipnikov s povyshennymi zhestkostnyimi harakteristikami energeticheskikh ob'ektov]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 354 pp. (In Russian).
  16. Patent of Russia No. 2395150. Control system for the electromagnetic suspension of the rotor [Sistema upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora] / *A.V. Starikov, S.A. Starikov* (Russia) // Publ. 20.07.2010, Bull. No. 20. (In Russian).
  17. *Starikov A.V., Starikov S.A.* Parametric synthesis of regulators of a multi-circuit control system for the electromagnetic suspension of the rotor [Parametricheskij sintez reguljatorov mnogokonturnoj sistemy upravleniya elektromagnitnym podvesom rotora] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 1 (29). Pp. 192–200. (In Russian).
  18. *Starikov A.V.* Synthesis of a Finite Regulator for an Electromagnetic Bearing Control System [Sintez finitovogoregulyatora dlya sistemy upravleniya elektromagnitnym podshipnikom] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical sciences. 2012. No. 3 (35). Pp. 240–243. (In Russian).
  19. *Makarichev Yu.A.* Methods of analysis and synthesis of active electromagnetic bearings [Metody analiza i sinteza aktivnyh elektromagnitnyh podshipnikov]: dis. ... doc. tech. Sciences. Samara: SamGTU, 2013. 350 pp. (In Russian).
  20. *Makarichev Yu.A., Starikov A.V.* Static bending moment of an axial electromagnetic bearing with one-sided displacement of the rotor in a radial bearing [Sticheskiy izgibayushchij moment oseвого elektromagnitnogo podshipnika pri odnostoronnem smeshchenii rotora v radial'noj opore] // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences. 2011. No. 4 (32). Pp. 134–139. (In Russian).