

УДК 621.313

КОМБИНИРОВАННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС**Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, Я.А. Ратцев, Е.А. Полянский**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. *Повышение энергоэффективности и снижение массогабаритных показателей активных магнитных подшипников – актуальная задача, решение которой позволит повысить конкурентоспособность магнитного подвеса. Использование энергии постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов является перспективным направлением совершенствования магнитных подшипников. В статье изложены некоторые вопросы интеграции высококоэрцитивных постоянных магнитов в магнитную систему радиального электромагнитного подвеса. Рассмотрена упрощенная математическая модель и предложен подход к расчету габаритных размеров полюсов с закладными магнитами и управляющих полюсов. По приведенной методике рассчитана геометрия комбинированного магнитного подвеса. Методом численного моделирования уточнено магнитное состояние исследуемых машин, получены тяговые характеристики традиционного и комбинированного магнитного подшипника. Установлено, что в заданных габаритах возможно размещение постоянных магнитов, необходимых для компенсации основной возмущающей силы – веса ротора, что позволяет снизить токи обмоток электромагнитов и повысить энергоэффективность подвеса за счет снижения потерь в меди. Это в итоге позволит уменьшить стоимость системы управления подвесом и емкость резервных аккумуляторных батарей. Использование постоянных магнитов существенно влияет на эксплуатационные качества подвеса и смещает рабочую точку на тяговой характеристике подшипника, компенсирующего вес ротора, в область средних значений. В тепловом отношении все катушки электромагнитов оказываются нагруженными более равномерно. Рассмотренные особенности гибридного магнитного подвеса положительно влияют на динамические характеристики системы управления.*

Ключевые слова: *активный электромагнитный подшипник, магнитный подвес, энергоэффективность, постоянные магниты, тяговая характеристика, магнитное поле.*

Актуальность вопроса

Активный электромагнитный подшипник (АЭМП) благодаря своим преимуществам находит применение в ряде наукоемких областей промышленности [1, 2]. Наиболее перспективно применение АЭМП в качестве опор высокоскоростных вращающихся машин или машин, работающих в условиях глубокого вакуума. Магнитный подвес находит свое применение в трубопроводном транспорте в качестве опор нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Заме-

Макаричев Юрий Александрович (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Электро-механика и автомобильное оборудование».

Иванников Юрий Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Электро-механика и автомобильное оборудование».

Ратцев Ярослав Алексеевич, магистрант.

Полянский Евгений Анатольевич, аспирант.

на гидродинамических масляных подшипниках нагнетателя магнитным подвесом обуславливается существенным экономическим эффектом [3]. В результате парк ГПА на объектах ПАО «Газпром» с АЭМП в качестве опор в последнее время стабильно расширяется [4]. Отметим, что технология АЭМП обладает экологической чистотой [2, 5], что становится существенным преимуществом и согласуется с вектором технологического развития, направленным на снижение антропогенного воздействия на окружающую среду.

Основными факторами, сдерживающими распространение АЭМП, являются большие массогабаритные показатели по сравнению с традиционными подшипниками и необходимость в стороннем источнике электрической энергии [2, 3, 5]. Одним из направлений совершенствования АЭМП является повышение его энергоэффективности за счет снижения основных потерь, в результате чего может быть достигнуто снижение удельного энергопотребления и в итоге – улучшение массогабаритных параметров. Исследования энергетических процессов магнитного подвеса показывают, что основные потери АЭМП приходятся на потери в стали ротора при вращении его в магнитном поле электромагнитов, потери в меди и аэродинамические потери [6]. Снижение потерь в катушках возможно за счет использования энергии постоянных магнитов (ПМ). Рассмотрим традиционную компоновку радиального АЭМП.

Комплект АЭМП состоит, как правило, из двух радиальных, одного осевого электромагнитного подшипника и системы управления магнитным подвесом (СУМП). Радиальные подшипники ограничивают перемещения ротора в радиальном направлении, а осевой – в аксиальном. Конструкции радиальных АЭМП различаются по числу полюсов (зубцов) магнитной системы статора. В опорах нагнетателей отечественных производителей применяются в основном конструкции электромагнитных подшипников с магнитной системой с сосредоточенными катушками с числом зубцов статора, равным $Z = 8$ (рис. 1), а также с числом зубцов $Z = 12$ и $Z = 16$ [7].

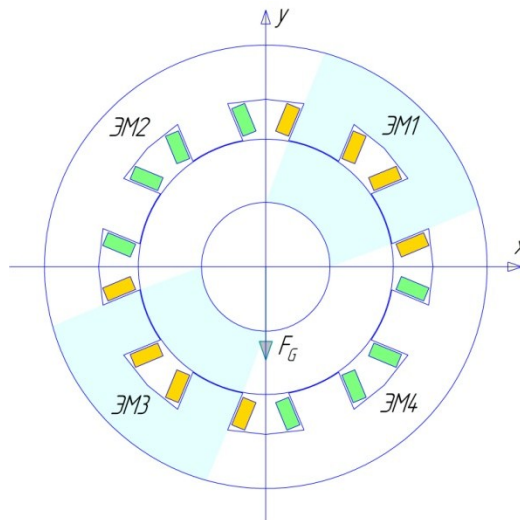


Рис. 1. Радиальный активный электромагнитный подшипник

На рис. 1 F_G – вес ротора, основная возмущающая сила, действующая на ротор АЭМП; ЭМ1, ЭМ2, ЭМ3 и ЭМ4 – независимые электромагниты, управляемые посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) системы управления магнитным подвесом. Обычно оси электромагнитов смещены в пространстве та-

ким образом, чтобы распределить вес ротора между двумя соседними электромагнитами (ЭМ1 и ЭМ2). Электромагниты, лежащие на одной оси (например ЭМ1 и ЭМ3), объединяются в один канал управления.

Существует несколько законов управления электромагнитами радиального АЭМП. Наибольшее распространение получили СУМП, основанные на алгоритме с токами смещения и дифференциальном законе управления. В [5] рассматривается дифференциальный закон управления, который был принят за основу при моделировании электромагнитных процессов радиального АЭМП. Суть процесса регулирования напряжения на катушках электромагнитов одного канала заключается в следующем: скважность сигнала ШИМ на обмотке ЭМ1 (k_1) связана со скважностью ЭМ3 (k_3) соотношением

$$k_1 = 1 - k_3. \quad (1)$$

Аналогично и для другой пары электромагнитов. Величина токов одного канала управления:

$$\begin{cases} I_1 = I_{\max} \cdot k; \\ I_3 = I_{\max} \cdot (1 - k), \end{cases} \quad (2)$$

где k принимает значения от 0 до 1;

I_{\max} – максимальная величина токов электромагнитов.

При увеличении скважности k усилие, создаваемое ЭМ1, увеличивается, а ЭМ3, соответственно, уменьшается, поэтому с изменением k суммарное усилие, создаваемое парой магнитов, изменяется линейно. Токи катушек ЭМ2 и ЭМ4 изменяются по аналогичному закону.

Использование энергии постоянных магнитов (ПМ) для возбуждения основного магнитного потока в электрических машинах является перспективным направлением повышения их энергоэффективности и надежности [8]. Конструкции и расчет традиционных электродвигателей и генераторов с возбуждением от ПМ хорошо известны [8, 9, 10]. Широкое распространение магнитных сплавов на основе редкоземельных металлов, обладающих высокой удельной магнитной энергией, позволило расширить области применения ПМ в электрических машинах.

Перспективной альтернативой рассмотренной конструкции магнитного подвеса являются гибридные АЭМП, в которых постоянная составляющая нагрузки компенсируется энергией постоянных магнитов. Конструкции таких комбинированных электромагнитных подвесов известны давно [10, 11], тем не менее данное направление совершенствования АЭМП продолжает развиваться [12, 13, 14].

Очевидны потенциальные преимущества от использования энергии постоянных магнитов для полной компенсации веса ротора: достаточно значительное снижение потребляемой от СУМП мощности; удешевление СУМП за счет снижения величины коммутируемого тока; снижение емкости резервных аккумуляторных батарей и (или) продление времени автономной работы при той же емкости.

Целью данной статьи является сравнение характеристик традиционного и гибридного (с компенсированием веса ротора энергией ПМ) АЭМП, оценка влияния ПМ на тяговые характеристики магнитного подвеса.

Интеграция постоянных магнитов в радиальный АЭМП

В [12] подробно рассмотрена конструкция магнитного подвеса с подпиткой от ПМ. Однако данная конструкция существенно отличается от АЭМП, используемых на компрессорных станциях РФ, что существенно влияет на параметры системы управления. Для минимизации вносимых изменений в существующую СУМП в настоящей статье рассматривается интеграция постоянных магнитов в магнитную систему радиального АЭМП производства корпорации ФГУП «НПО ВНИИЭМ».

За основу принят радиальный АЭМП с номинальной тяговой силой $F_{nom} = 13,6$ кН, эксплуатируемый на рабочих установках ГПА. Основным направлением исследования являлась интеграция постоянных магнитов в конструкцию АЭМП в прежних габаритах. Исходными данными для реализации конструкции АЭМП с постоянными магнитами были: номинальная подъемная сила, коэффициент перегрузочной способности ($k_{o.c}$), диаметр расточки статора (D_c), осевая длина (L_a), число пар полюсов (p), номинальная величина воздушного зазора (δ_{nom}) и величина воздушного зазора в страховочных подшипниках ($\delta_{a.b}$).

При проектировании перегрузочная способность АЭМП, как правило, принимается равной [15] $k_{o.c} = 1,5$. Целесообразно проектировать комбинированный магнитный подвес таким образом, чтобы вес ротора компенсировался энергией постоянных магнитов, а запас по тяговой силе обеспечивался управляемыми полюсами. В результате полюса управления в максимальном режиме должны развивать силу, равную

$$F_c = (k_{o.c} - 1) \cdot F_{nom} \quad (3)$$

Магнитный подвес должен обеспечивать запас по тяговому усилию для отклонения ротора от положения равновесия во всем рабочем диапазоне. Максимальная допустимая амплитуда колебаний оси ротора не должна выходить за границу зон В/С вибрационного состояния машины в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 14839-2-2011. Следовательно, максимальный рабочий зазор

$$\delta_{max} = \delta_{nom} + 0,4 \cdot \delta_{a.b} \quad (4)$$

В воздушном зазоре АЭМП сосредоточена практически вся энергия магнитного поля машины. Поэтому имеет смысл вести расчет магнитного подвеса относительно длины воздушного зазора под полюсом по расточке статора.

В исходной модели пара полюсов занимает угол, равный (рад)

$$\Delta\varphi_p = \frac{2\pi}{p}$$

При этом часть этого угла, занятая зубцом, характеризуется коэффициентом полюсного перекрытия

$$\alpha = \frac{b_n}{\tau}$$

где b_n – ширина полюса;
 τ – полюсное деление.

Для явнополюсных конструкций (см. рис. 1) величина полюсного перекрытия варьируется в достаточно узком диапазоне $\alpha \in (0,5; 0,6)$ [15]. Таким образом, только половина зазора по расточке статора участвует в создании тяговой силы, оставшаяся часть занята катушками либо свободна от активных материалов.

Длина дуги воздушного зазора, занимаемая управляющими полюсами, может быть предварительно рассчитана на основании требуемой ширины полюсов, катушек и технологических зазоров. Основные геометрические размеры П-образной и Ш-образной конструкций представлены на рис. 2.

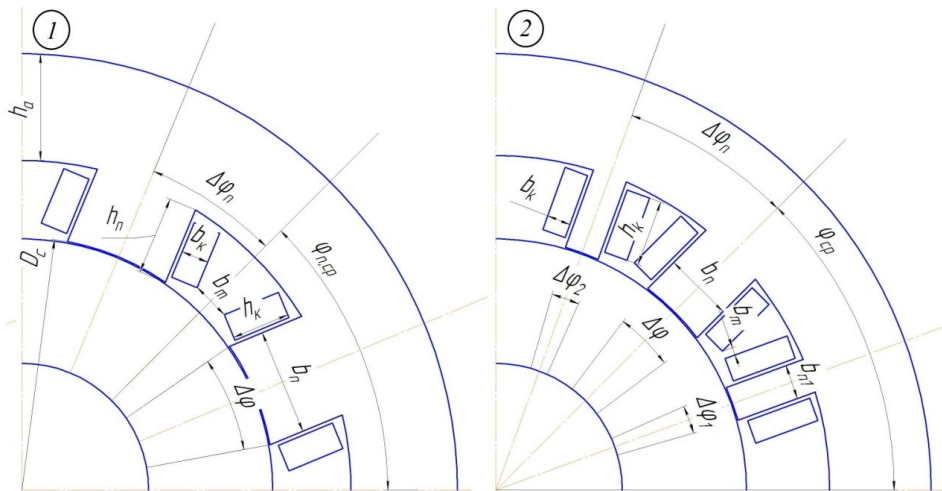


Рис. 2. Размеры геометрической модели П-образного (1) и Ш-образного (2) электромагнитов АЭМП

Электромагнитное усилие, развиваемое плоскопараллельным магнитным полем, определяется по закону Максвелла. Тяговая сила полюса после некоторых преобразований может быть записана относительно угла по расточке статора:

$$F_n = \frac{B_\delta^2 \cdot L_a \cdot D_c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot \mu_0}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi$ – угол полюсной дуги (см. рис. 2);
 μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;
 B_δ – магнитная индукция в зазоре.

Проекции электромагнитного усилия (5) на ортогональные оси:

$$\begin{cases} F_{n,x} = F_n \cdot \cos(\varphi), \\ F_{n,y} = F_n \cdot \sin(\varphi). \end{cases}$$

Как правило, электромагниты АЭМП располагаются в пространстве, как показано на рис. 1. Тогда проекция тяговой силы, создаваемой П-образным электромагнитом на ось y (см. рис. 2 (1)):

$$F_{n,y} = F_n \cdot \sin(\varphi_{cp} + \Delta\varphi_n) + F_n \cdot \sin(\varphi_{cp} - \Delta\varphi_n) \quad (6)$$

Тогда требуемый угол для создания тяговой силы F_{2n} из (5) и (6) для П-образного магнита

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_\beta^2}{D_c \cdot L_a \cdot B_\delta^2 \cdot \sin(\varphi_{cp}) \cdot \cos(\Delta\varphi_n)}, \quad (7)$$

где k_β – коэффициент индукции – отношение магнитной индукции в зубце к индукции в зазоре;

φ_{cp} – угол оси симметрии электромагнита (см. рис. 2), обычно 45° ;

$\Delta\varphi_n$ – угол, который занимает половина полюса электромагнита:

$$\Delta\varphi_n = \frac{\Delta\phi_m}{2} + \Delta\phi_k + \frac{\Delta\phi}{2} \approx \frac{\arcsin\left(\frac{b_m}{D_c}\right)}{2} + \arcsin\left(\frac{b_k}{D_c}\right) + \frac{\pi \cdot \alpha}{p};$$

b_m – расстояние между катушками в самом узком месте;

b_k – ширина катушки.

Для рассматриваемой конструкции с $p = 4$ аргумент косинуса в уравнении (7) – величина относительно небольшая, так что $\cos(\Delta\varphi_n) \approx 0,95$.

С увеличением числа полюсов или уменьшением ширины полюса $\cos(\Delta\varphi_n) \rightarrow 1$.

Наибольшее распространение получают конструкции с $p = 4; 6; 8$ [7]. Поэтому косинус в левой части уравнения (7) с достаточной степенью точности может быть заменен на коэффициент, равный $k_{\cos} = 0,95$, и уравнение (7) преобразуется:

$$\Delta\varphi = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_\beta^2}{k_{\cos} \cdot D_c \cdot L_a \cdot B_\delta^2 \cdot \sin(\varphi_{cp})}. \quad (8)$$

Тогда угол, который занимает электромагнит радиального АЭМП (пара полюсов):

$$\Delta\varphi_{e.m} \approx 4 \cdot \left(\arcsin\left(\frac{b_m}{D_c}\right) + \arcsin\left(\frac{b_k}{D_c}\right) + \Delta\varphi \right).$$

Ширина катушки, если известна ее высота или высота полюса:

$$b_k = \frac{S_k}{h_k}, \quad (9)$$

где площадь поперечного сечения катушки

$$S_k = \frac{Iw}{j \cdot k_3}, \quad (10)$$

где j – плотность тока в проводнике;

k_3 – коэффициент заполнения сечения катушки медью;

Iw – намагничивающая сила (НС) полюса (полное число ампервитков катушки):

$$Iw = \frac{B_\delta \cdot \delta_{p,\max} \cdot k_\mu}{\mu_0}, \quad (11)$$

где k_μ – коэффициент насыщения магнитной цепи.

Выполнив аналогичные расчеты, получим требуемую ширину полюса для Ш-образного электромагнита:

$$\begin{cases} \Delta\phi_1 = \frac{2 \cdot F_{2n} \cdot \mu_0 \cdot k_{\beta}^2}{D_c \cdot L_a \cdot B_{\delta}^2 \cdot \sin(\phi_{cp}) \cdot (1 + \cos(\Delta\phi_n))}; \\ \Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 = 2 \cdot \Delta\phi_1. \end{cases} \quad (12)$$

Магнитный поток Ш-образного электромагнита, протекающий по среднему зубцу, разветвляется на две составляющие, замыкаясь через крайние зубцы. Второе уравнение в (12) обеспечивает идентичность магнитных состояний зубцов электромагнита.

Таким образом, для обеспечения полюсами управления тяговой силы по (3) в заданных габаритах один (из четырех) электромагнит займет угол $\Delta\varphi_{em} = 36^\circ$, оставляя 54° на полюса с возбуждением потока от постоянных магнитов на сегмент в четверть окружности по расточке статора.

За счет уменьшения ширины полюса при прежних обмоточных данных уменьшается сопротивление катушки и, следовательно, значение необходимого питающего напряжения. Для сохранения номинального напряжения обмоточные данные были пересчитаны. В основе расчета использовались зависимости (9)–(11). В условиях ранее принятых допущений о неизменности габаритных размеров сохранялась прежняя высота катушки.

Важной частью реализации магнитного подвеса с постоянными магнитами является геометрическое расположение ПМ. Постоянные магниты в объеме статора должны располагаться таким образом, чтобы по возможности увеличить заполнение активными материалами объема статора АЭМП. В данной работе рассматривалась простейшая конструкция АЭМП с ПМ (рис. 3).

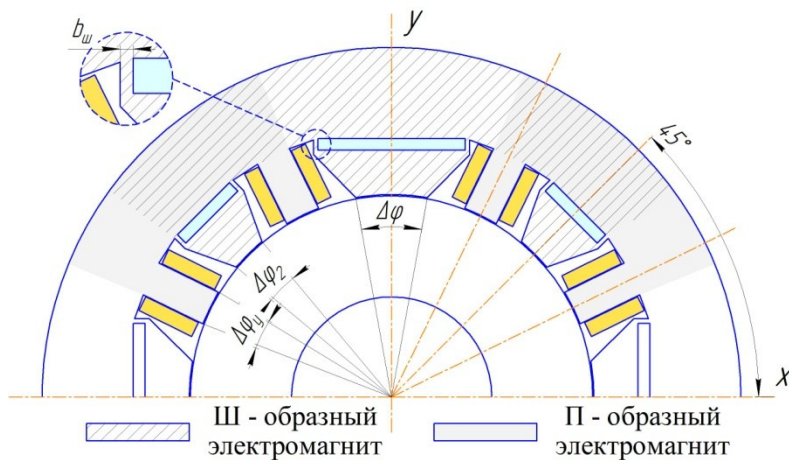


Рис. 3. Радиальный АЭМП с постоянными магнитами

Статическая составляющая нагрузки радиального АЭМП на рис. 3 компенсируется энергией постоянных магнитов, интегрированных в магнитопровод статора в форме Ш-образного магнита. Требуемая ширина полюсов была определена по (12), после чего с учетом (3) по (7) была определена ширина полюсов управления. Магнитная индукция в зазоре под полюсами ПМ принималась равной ($T_{л}$)

$$B_{PM} = 1,6,$$

что соответствует границе насыщения для стали 2421. Индукция в зазоре под полюсами управления (T_n)

$$B_c = 1,4$$

выбрана ниже, так как в процессе управления даже в самых тяжелых условиях сталь не должна входить в насыщение из-за вероятности потери управляемости магнитным подвесом.

Расположение постоянных магнитов в рассматриваемой конструкции предполагает наличие мостиков насыщения шириной b_{bs} , назначение которых – передача механической нагрузки от полюса станине. Подобные технические решения широко используются в конструкции, например, синхронных машин с постоянными магнитами. Известны [9, 16] так называемые *IPM (Interior Permanent Magnet)* конструкции ротора, или конструкции с закладными магнитами. Преимущество такой конструкции состоит в технологичности производства магнитопровода и установки ПМ. Для уменьшения коэффициента рассеяния ПМ ширина b_{bs} должна быть минимально возможной. С другой стороны, величина b_{bs} должна быть достаточной для выполнения условий прочности и технологических ограничений. От величины b_{bs} зависит безопасность подвеса, поэтому необходим точный механический расчет и большой запас по механической прочности мостиков насыщения. При численном моделировании было принято $b_{bs} = 3$ мм.

В качестве постоянных магнитов были выбраны высококоэрцитивные материалы на основе *Nd-Fe-B*. Остаточная индукция (B_r) большинства этих ПМ ниже принятой ранее магнитной индукции в зазоре под полюсом. Для эффективного использования материалов ПМ выгодно проектировать магнитные цепи так, чтобы рабочая точка на кривой размагничивания ПМ соответствовала максимуму энергии. Кроме того, необходимо учитывать снижение полезного потока за счет его рассеяния в мостиках насыщения (b_{bs}). Требуемая индукция в зазоре может быть обеспечена за счет придания полюсу трапецевидной формы, обращенной меньшим основанием к зазору (см. рис. 3) [13].

Для уточнения тяговых характеристик проведено численное моделирование в двумерной постановке с использованием специализированного программного обеспечения. Созданы геометрические модели радиального АЭМП (см. рис. 1 и рис. 3).

Основой математического моделирования электромагнитных полей является система уравнений Максвелла. Формулировка задачи стационарного магнитного поля относительного векторного магнитного потенциала в двумерной постановке имеет вид [17]

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \operatorname{rot} \mathbf{A}_z(x, y) \right) = \mathbf{J}_z(x, y) + \operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \mathbf{B}_r \right), \quad (13)$$

где \mathbf{A}_z – векторный магнитный потенциал;

μ – тензор магнитной проницаемости;

\mathbf{J}_z – плотность тока возбуждения;

\mathbf{B}_r – вектор индукции остаточной намагниченности.

При моделировании расчетная область разбивалась на блоки, соответствующие магнитопроводам статора и ротора, катушкам электромагнитов и воздушно-му пространству. Векторный магнитный потенциал на границе расчетной области был принят равным нулю $A_b = 0$ (первое граничное условие). В качестве источников магнитного поля задавался полный ток катушек, рассчитанный по (2).

Магнитные свойства сердечников статора и ротора численной модели соответствуют свойствам листовой электротехнической стали марки 2412 и 2421 соответственно. Модель включает блоки постоянных магнитов на основе материалов *NdFeB* марки *N48*, для которых была задана кривая размагничивания, соответствующая рабочей температуре магнитов (принята равной $T_{\text{раб}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$). Остаточная индукция ПМ *N48* $B_r = 1,36 \text{ Тл}$, коэрцитивная сила по индукции $H_c = 836 \text{ кА/м}$. Результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5.

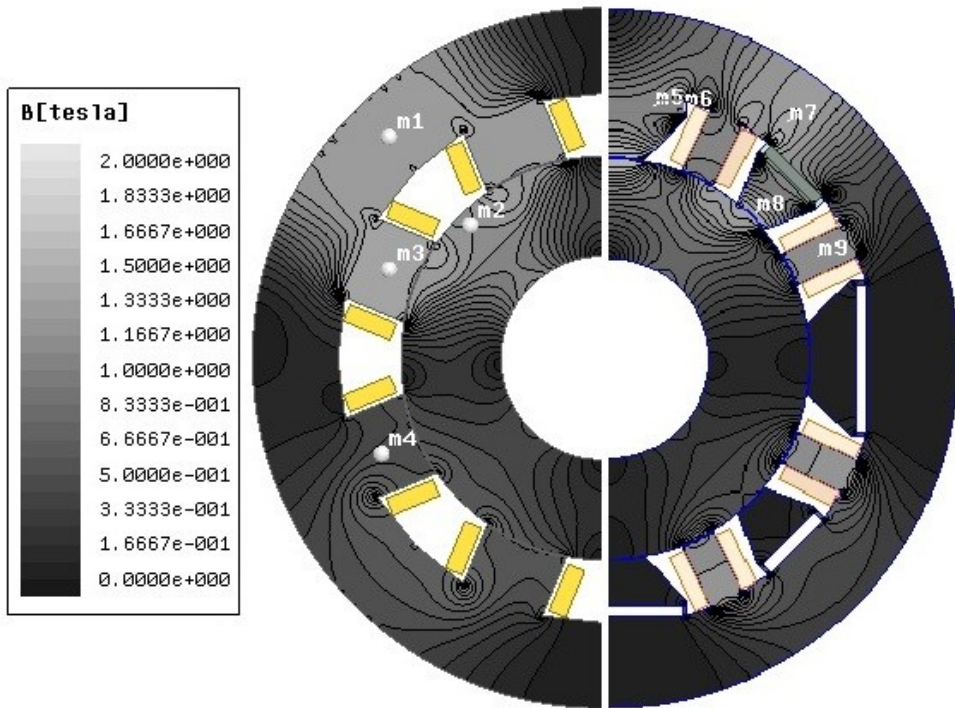


Рис. 4. Картина магнитного поля радиального АЭМП

Магнитная индукция в некоторых частях радиального АЭМП

Метка	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9
Магнитная индукция, Тл	1,36	1,25	1,47	0,54	1,1	2,1	1,43	1,42	1,1

Картина магнитного поля соответствует случаю, когда радиальный АЭМП развивает номинальную тяговую силу. На рис. 4 и в таблице представлена магнитная индукция в ключевых точках машины. Для сравнения представлены две конструкции радиального АЭМП: исходная и конструкция с закладными магнитами. Магнитное состояние подшипника, рассчитанного по методике, представленной выше, соответствует ожиданию. Магнитная индукция в теле магнита $B_m = 1,1 \text{ Тл}$, в зазоре под полюсами ПМ $B_p = 1,6 \text{ Тл}$, индукция в зубцах управляющих полюсов $B_{c,l} = 1,1 \text{ Тл}$ в «верхних» полюсах и $B_{c,u} = 1,26 \text{ Тл}$ в «нижних» соответствует линейному участку кривой намагничивания стали 2412. Наиболее «узким» местом конструкции с ПМ в отношении магнитного состояния оказалось ярмо на участке между полюсами ПМ: $B_{bp} = 1,48 \text{ Тл}$, что соответствует ко-

лену на кривой намагничивания, что связано со спецификой рассматриваемой конструкции: магнитные потоки управляющих полюсов и полюсов ПМ в этом месте складываются. Индукция в технологических мостиках превышает $B_{bs} > 2$ Тл, что соответствует глубокому насыщению используемой стали. Коэффициент рассеяния ПМ большого и малых полюсов соответственно при рассчитанных габаритах определялся отношением потока в среднем сечении магнита к потоку в зазоре:

$$\begin{cases} k_{\sigma} = \frac{\Phi_m}{\Phi_{\delta}} = 1,37; \\ k_{\sigma 1} = k_{\sigma 2} = 1,66. \end{cases}$$

Так как модель строилась по упрощенной методике, то величина b_{bs} принималась одинаковой для всех полюсов, поэтому за счет меньшей ширины малых полюсов коэффициент рассеяния значительно выше. Величина коэффициентов рассеяния достаточно близка к аналогичным коэффициентам для ротора синхронных машин *IPM*. Отметим, что постановка задачи не учитывает торцевые потоки рассеяния.

На рис. 5 представлено семейство тяговых характеристик в исходной конструкции и в конструкции с ПМ.

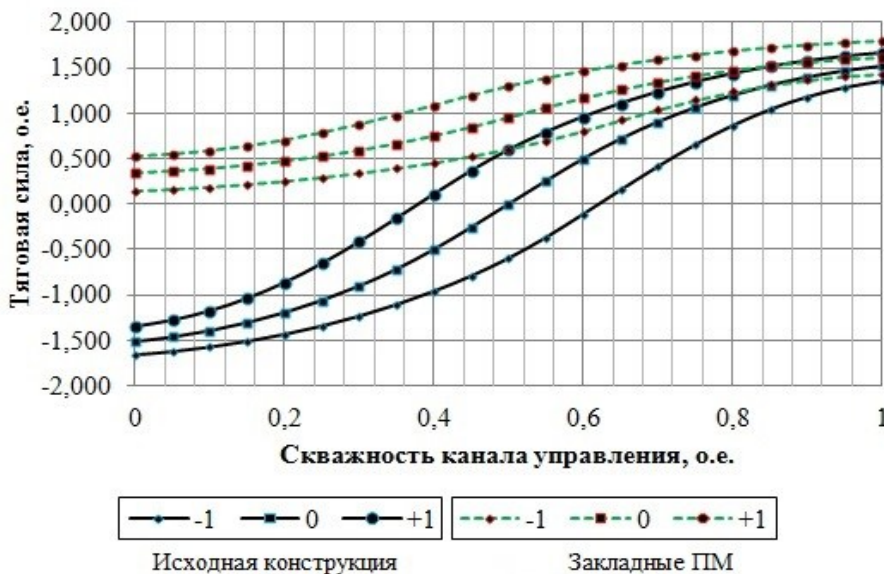


Рис. 5. Тяговые характеристики радиального АЭМП (моделирование)

Тяговые характеристики получены при разном отклонении ротора по оси u (см. рис. 1 и рис. 3): 0 – центральное положение; ± 1 – максимально возможное рабочее отклонение ротора по (4). Так как исходная конструкция является симметричной, то и изменение тяговой силы происходит во всем диапазоне $\pm k_n F_{nom}$ как по оси u , так и по оси x . Отметим, что за счет постоянной составляющей возмущающей силы рабочий диапазон смещен относительно точки симметрии ($k = 0,5$) в область $k_{nom} \approx 0,74$, а рабочий диапазон $k \in (0,5; 1)$, в результате чего часть характеристики при $k < 0,5$ оказывается не задействованной во всем диапа-

зоне работы. По оси x нет постоянной возмущающей силы, из-за чего максимальная тяговая сила электромагнитов оказывается избыточной.

За счет компенсации веса ротора энергией постоянных магнитов тяговая характеристика расположена в диапазоне $\pm(k_n - 1)F_{nom}$ по осям x и y . Рабочая точка совпадает с точкой симметрии зависимости ($k = 0,5$) и располагается на линейной части характеристики. В конструкции с ПМ регулирование тяговой силы возможно во всем диапазоне $k \in (0,1)$, за счет чего в случае дискретной СУМП может быть повышена точность регулирования при прочих равных условиях.

Основные результаты и выводы

В настоящем исследовании был рассмотрен комплекс мероприятий по интеграции постоянных магнитов в магнитную систему радиального АЭМП. В результате установлено, что в габаритах эксплуатируемого магнитного подвеса возможно размещение постоянных магнитов, необходимых для компенсации статической нагрузки АЭМП. Специфика независимых полюсов исходной конструкции предполагает замыкание потока между двумя полюсами одного электромагнита. Поэтому секторы ярма, расположенные между электромагнитами, не нагружены магнитным потоком, что дает возможность использовать это пространство для размещения ПМ.

С учетом специфики работы магнитного подшипника с использованием ПМ доказана возможность уменьшения тяговой силы управляемых полюсов до величины, определенной в (3), без потери рабочих свойств подвеса.

Тяговые характеристики АЭМП, определенные в результате численного моделирования, демонстрируют переход рабочей точки скважности управляющего сигнала в область $k = 0,5$ (при заданном законе управления). За счет этого может быть снижено энергопотребление радиального АЭМП. При этом все управляющие полюса находятся в близких электромагнитных и тепловых условиях, что положительно влияет на стабильность подвеса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Schweitzer G.* Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 535 pp.
2. *Журавлев Ю.Н.* Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
3. *Сарычев А.П.* Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2009. – Т. 110. – С. 3–10.
4. *Макриденко Л.А.* Состояние и перспективы развития электромагнитных подшипников в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2011. – С. 3–12.
5. *Макаричев Ю.А., Стариков А.В.* Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
6. *Макаричев Ю.А., Иванников Ю.Н.* Энергетические процессы активного электромагнитного подвеса // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 3(60). – С. 112–119.
7. *Верещагин В.П., Рогоза А.В.* Сравнение различных типов электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2011. – Т. 122. – С. 11–16.
8. *Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н.* Электрические машины с постоянными магнитами. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 480 с.

9. Zubkov Yu.V., Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Comparison of surface-mounted permanent magnet and interior-mounted permanent magnet starters for gas turbine engines electrical start // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950010
10. Исмагилов Ф.Р. Электрические системы с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Машиностроение, 2014. – 267 с.
11. Метлин В. Б. Магнитные и магнитогидродинамические опоры. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.: ил.
12. Filatov A., Hawkins P., McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems // Actuators 2016, 5, 26. DOI: 10.3390/act5040026.
13. Wajnert D., Tomczuk B. Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing // Open physics formerly Central European Journal of Physics. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0010>.
14. Патент России № 2540215 С1. Гибридный магнитный подшипник с осевым управлением / А.А. Герасин, Г.А. Чуянов, Ф.Р. Исмагилов [и др.] // Оpubл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
15. Верецагин В.П., Рогоза А.В., Савинова Т.Н. Методика проектирования электромагнитных подшипников // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна, 2009. – Т. 113. – С. 3–12.
16. Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Иванников Ю.Н. Анализ характеристик электромеханического стартера газотурбинной установки // Электротехника. – 2019. – № 7. – С. 24–32.
17. Кулон Ж.-Л., Сабоннадьер Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР: Пер. с франц. – М.: Мир, 1989. – 12 л.: ил.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2020 г.

HYBRID MAGNETIC BEARING

Yu.A. Makarichev, Yu.N. Ivannikov

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

Abstract. Increase of energy efficiency and decrease of weight-size parameters is an important problem for improvement of magnetic bearings. Using of permanent magnets on base of rare earth metals is promising direction for improvement of consumer properties of magnetic bearings. In a paper some questions of integrate of permanent magnets in a radial magnetic bearing for rotor weight offsetting was considered. Simple mathematical model that link carrying capacity with pole dimensions was consider. The dimensions poles of a hybrid magnetic bearing in identical external size was calculation by using proposed policy. Hereafter magnetic field was researched by means of numerical simulation for traditional and hybrid magnetic bearings and traction performance depending on control current was founded for various location of rotor. Analytical calculation and numerical simulation demonstrate that traction force creating by permanent magnets offset of rotor weight in full but traction force creating by electromagnets full provide operating traction force. Installations of permanent magnets render possible decrease of magneto motive force of control poles, size of a coil and finally, increase of energy efficiency of a magnetic

Yuri A. Makarichev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Yuri N. Ivannikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Yaroslav A. Ratzev, Graduate Student.

Yevgeny A. Polyansky, Postgraduate student.

bearing. Using of permanent magnets essentially action on traction performance of a magnetic bearing. Operating point was displaced in mean region of traction performance curve. In results all coil of electromagnets happened in equal terms on temperature. Considered properties of a hybrid magnetic bearing may have to influence on a dynamic performance of a control system positive.

Keywords: active magnetic bearing, magnetic bearing, energy efficiency, permanent magnet, traction performance, magnetic field.

REFERENCES

1. Schweitzer G. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 535 pp.
2. Zhuravlev Yu.N. Active Magnetic Bearing: theory, calculation, application. SPb.: Politekhnika, 2003. – 206 s. (In Russian)
3. Sarychev A.P. Developing of Magnetic Bearing for Series of Gas-Compressor Unit // Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM. M.: Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, t. 110, 2009. – S. 3–10. (In Russian)
4. Makridenko L.A. Current state and development trends of electromagnetic bearing from FGUP “NPP VNIEM”. Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, 2011. – P. 3–12. (In Russian)
5. Makarichev Yu.A., Starikov A.V. Theoretical science of calculation and development of radial electromagnetic bearing. Moscow: Energoatomizdat, 2009. – 150 p. (In Russian)
6. Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Energy processes in an active magnetic bearing. Electric power. Transmission and distribution. 2020. № 3(60). P. 112–119.
7. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V. Comparison of different designs of magnetic bearing. Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, p. 122, 2011. – P. 11–16 (In Russian)
8. Balagurov V.A., Galteev F.F., Lartionov A.N. Electric machines with permanent magnets. M.–L.: Energiya, 1964. – 480 p. (In Russian)
9. Zubkov Yu.V., Makarichev Yu.A., Ivannikov Yu.N. Comparison of surface-mounted permanent magnet and interior-mounted permanent magnet starters for gas turbine engines electrical start // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2019. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950010
10. Ismagilov F.R. Electric system with high-coercitivity permanent magnets. M.: Mashinostroenie, 2014. – 267 p. (In Russian)
11. Metlin V.B. Magnetic and magnetohydrodynamics bearings. M.: Energiya, 1968. – 192 p. (In Russian)
12. Filatov A., Hawkins P., McMullen P. Homopolar Permanent-Magnet-Biased Actuators and Their Application in Rotational Active Magnetic Bearing Systems // Actuators 2016, 5, 26 DOI:10.3390/act5040026
13. Wajnert D., Tomczuk B. Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing // Open physics formerly Central European Journal of Physics. – 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/phys-2018-0010>
14. Russian patent № 2540215 S1. Hybrid magnetic bearing with axial control / A.A. Gerasin, G.A. Chuyanov, F.R. Ismagilov [al et.] // Opubl. 10.02.2015. Byul. № 4. (In Russian)
15. Vereshchagin V.P., Rogoza A.V., Savinova T.N. Design technique of magnetic bearing Joint Company ‘Research and Production Corporation ‘Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes’ named after A. G. Iosifian’, p. 113, 2009. – p. 3–12. (In Russian)
16. Makarichev Yu.A., Zubkov Yu.V., Ivannikov Yu.N. Characteristic analysis of electromechanic starter motor of gas-turbine unit. Elektrotehnika, 2019, № 7. – P. 24–32. (In Russian)
17. Coulomb J.L., Sabonnadiere J.C. finite-element method and CAD system. – M.: Mir, 1989. – 12 q.