

УДК 621.313.5/8

© Н. Д. Поляхов, А. Д. Стоцкая

ОБЗОР СПОСОБОВ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Рассматриваются способы практического применения активных магнитных подшипников (АМП) в различных отраслях промышленности. Обосновывается целесообразность использования АМП вместо традиционных подшипниковых узлов в таких отраслях, как авиация, энергетика, высокоскоростное машиностроение, медицинская техника, станкостроение, газотранспортный сектор. Приводится сравнение технических характеристик трех видов подшипниковых узлов — АМП, подшипники качения, подшипники скольжения.

Кл. сл.: активный магнитный подшипник, высокоскоростное машиностроение, станкостроение, медицинская техника, альтернативная энергетика, авиация

ВВЕДЕНИЕ

Активный магнитный подшипник (АМП) является сложным мехатронным устройством, позволяющим осуществить бесконтактный подвес ротора электрической машины относительно статора. Достижение устойчивого положения ротора осуществляется силами магнитного притяжения, действующими на ротор со стороны электромагнитов [1]. Система управления АМП формирует ток обмоток электромагнитов по сигналам датчиков перемещений ротора или по сигналам датчиков магнитного потока. Поэтому система магнитного подвеса ротора включает в себя как сами подшипники, встроенные в корпус машины, так и электронный блок управления, усилители мощности и датчики положения (потока).

Основными преимуществами АМП являются относительно высокая грузоподъемность, высокая механическая прочность, возможность осуществления устойчивой неконтактной подвески тела, возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах, возможность использования при высоких скоростях вращения, в вакууме, высоких и низких температурах, стерильных технологиях [2].

К недостаткам АМП можно отнести высокую стоимость конечного устройства и сложность проектирования и реализации системы управления.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ С АМП

В зарубежной литературе принята следующая классификация систем, где применимы АМП [3].

Вакуумные системы

Подшипники не подвергаются механическому контакту, а следовательно, и износу. Конструктивно АМП могут быть вынесены за пределы вакуумной камеры и магнитные силы в таком случае воздействуют на ротор через стенки. Отсутствие потерь на трение и низкое потребление энергии делают АМП перспективными для маховиковых устройств хранения энергии.

Станкостроение

Основным преимуществом АМП для применения в станкостроении является высокая точность и высокая скорость вращения при относительно высокой грузоподъемности. Основная область применения — фрезеровальные станки и станки точной обработки мелких деталей.

Медицинское оборудование

АМП в настоящее время применяются в качестве подшипниковых узлов насоса искусственного сердца, или точнее, в устройстве насоса для левого желудочка, предназначенного для поддержания требуемого уровня потока перекачиваемой крови, который необходим для обеспечения жизнедеятельности человека.

Высокоскоростное машиностроение

Основной областью применения АМП в настоящее время является высокоскоростное машиностроение — от небольших турбомолекулярных насосов до турбогенераторов и компрессоров мощностью десятки МВт. Преимуществом АМП для данной области является возможность управления вибрациями, демпфирования упругих колебаний, а также получение четко определенных

динамических характеристик. Другие важные особенности, которые были подтверждены практическими исследованиями, — возможность обеспечения контроля и диагностики, низкие затраты на техническое обслуживание, а также низкое потребление энергии. Благодаря высокопроизводительной силовой электронике для мощного высокоскоростного машиностроения применение АМП является перспективным и обоснованным. Также в настоящее время ведутся исследования возможности использования АМП в авиационных электрических машинах в качестве тяговых двигателей или генераторов электрической энергии для всех электрических самолетов.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АМП

Рассмотрим более подробно примеры использования АМП в качестве подшипниковых узлов в системах различного назначения (рис. 1):

1. Добыча полезных ископаемых и транспортировка газа

Наиболее широкое распространение активные магнитные подшипники получили в области добычи полезных ископаемых и транспортировки

газа — компрессоры, нагнетатели, электроприводные газоперекачивающие агрегаты и т. д., — что обусловлено несколькими причинами [4]:

- необходимостью поддержания постоянной скорости вращения для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы узлов газотранспортной магистрали;
- необходимостью установки агрегатов в удаленных от населенных пунктов точках, что приводит к невозможности проведения частых сервисных мероприятий;
- необходимостью осуществления дистанционного мониторинга системы.

В настоящее время большинство компаний-производителей активных магнитных подшипников и агрегатов, имеющих в составе АМП, ориентируются именно на данную отрасль промышленности. К наиболее крупным производителям относятся компании S2M (Франция, Сан-Марсель), Kingsbury (США, Филадельфия), Waukesha Bearings (Великобритания, Нортвуд), Dresser-Rand (США, Вирджиния).

Чаще всего при применении АМП в качестве подшипниковых узлов используется так называемая интегрированная схема проектирования двигателя / генератора (см. рис. 2). В этом случае

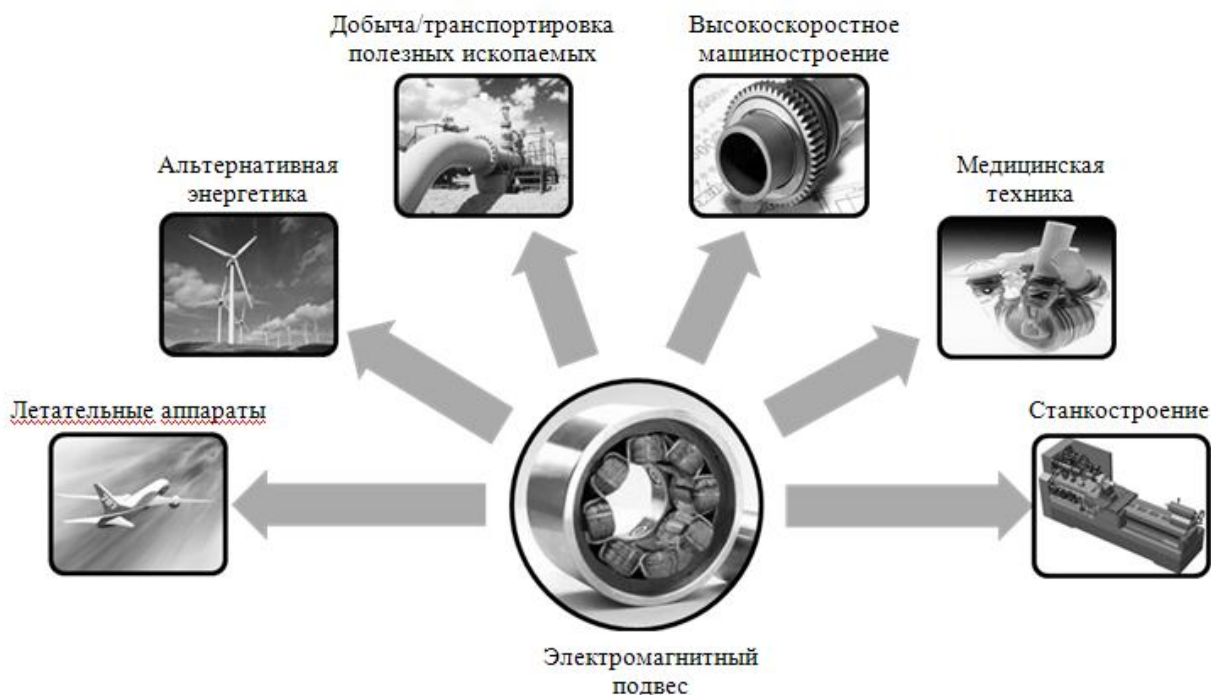


Рис. 1. Сферы применения АМП

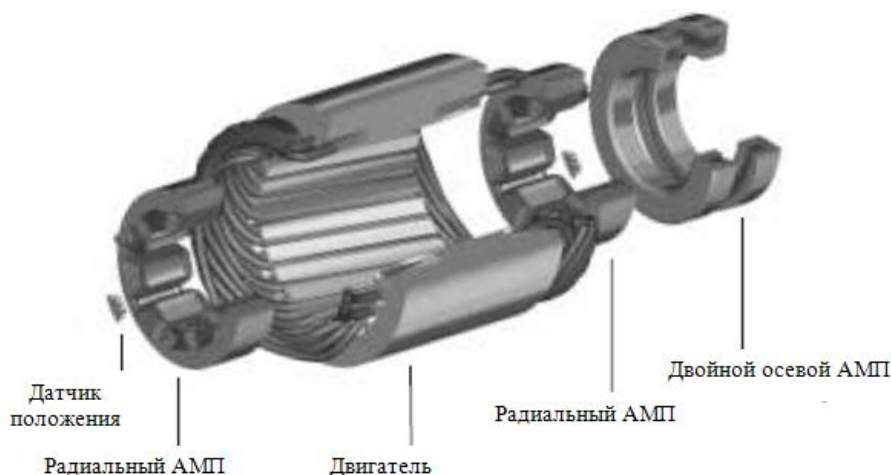


Рис. 2. Интегрированная схема двигателя/генератора (из [5])

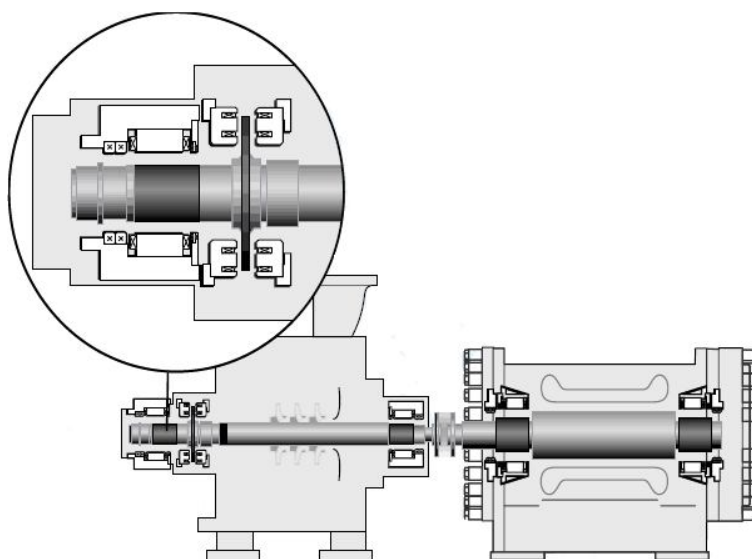


Рис. 3. Схема компрессора, напрямую связанного с электроприводом (из [5])

индуктивные датчики (или датчики потока) посылают сигналы положения ротора системе управления, которая модулирует ток обмотки каждого электромагнита, что приводит к изменению его магнитной силы, удерживающей ротор в заданном положении. АМП обеспечивают высокую надежность системы, контроль динамических характеристик, а также позволяют реализовать безредукторный механизм.

Так как применение АМП дает неоспоримые преимущества с точки зрения надежности по сравнению с традиционными подшипниками, то эти устройства также нашли широкое применение в области транспортировки газа. В качестве примера можно привести Трансканадскую газовую магистраль, где

99 % газоперекачивающих агрегатов оснащены активными магнитными подшипниками [5].

В области добычи полезных ископаемых (нефть, природный газ, этилен и т. д.) чаще всего используются компрессоры на активных магнитных подшипниках. На рис. 3 показана типичная система электрического компрессора, напрямую связанного с электроприводом. Ротор компрессора удерживается двумя радиальными АМП и одним двойным осевым АМП. В некоторых случаях для упрощения конструкции один из радиальных АМП может быть удален.

При проектировании компрессоров, оснащенных АМП, должны быть удовлетворены следующие требования [6].

– Допустимый уровень вибрации в каждом радиальном АМП не должен превышать более чем в два раза значение, установленное в стандарте API 617 [7] во всем диапазоне скоростей вращения. По сравнению с традиционными подшипниками АМП имеет меньшую жесткость, что означает, что при появлении дисбаланса уровень вибрации будет выше в системе с АМП. Поддержание значения вибрации в пределах, указанных в API 617, требует от системы управления поддержания высокого значения жесткости и одновременно быстрой динамики токов электромагнитов. Указанные факты приводят к риску насыщения усилителей мощности даже при небольших перемещениях ротора.

– Система управления АМП должна обеспечивать достаточное демпфирование для всех режимов работы компрессора все зависимости от условий работы. Выполнение данного требования приводит не только к демпфированию в широком диапазоне частот, но и к необходимости точного знания всех механизмов возбуждения, в том числе к учету последствий перекрестных связей.

– Должна быть предусмотрена возможность управления собственными колебаниями, возбуждаемыми во время работы компрессора, для предотвращения внештатных ситуаций.

При проектировании и настройке компрессорных систем должны быть проведены исследования следующих эффектов: гироскопического эффекта,

взаимодействия ротора с жидкостью, поведения нагрузки на валу во время вращения ротора. Также при моделировании системы должны быть учтены несовпадения датчиков и исполнительных устройств, отрицательная жесткость АМП, частота дискретизации цифрового контроллера, время задержки для цифровых контроллеров.

2. Высокоскоростное машиностроение (турбомашиностроение)

Применение АМП в области высокоскоростного машиностроения в настоящее время является основой многих исследовательских программ по всему миру, целью которых является усовершенствование характеристик известных решений с помощью внедрения технологии АМП.

В качестве примера таких программ можно привести программу США "Универсальный доступный передовой двигатель" (Versatile Affordable Advanced Engine, VAATE) [8]. Эта программа объединяет практически все крупные предприятия машиностроения США, некоторые рода войск и Национальный комитет по астронавтике и исследованию космического пространства (NASA). Цель программы — ежегодное технологическое усовершенствование в области эксплуатации и технического обслуживания, а также 1000 %-е увеличение эксплуатационных показателей к 2017 г.

Табл. 1. Технические характеристики подшипниковых узлов

Параметр	Шарикоподшипник	Подшипник скольжения	АМП
Максимальная рабочая температура	180–260 °C	650 °C	540 °C
Рабочая скорость вращения	$< 2 \cdot 10^6 \text{ DN}^*)$	$2 \cdot 10^6 \text{ DN}$	$2.25 \cdot 10^6 \text{ DN}$
Грузоподъемность	Нагрузка на квадратный дюйм (~ 300 фунтов). Зависит от износа, температуры, типа смазки	Пропорциональна скорости вращения. Нагрузка на квадратный дюйм ~ 100 фунтов	Для рабочей скорости и рабочей температуры нагрузка на квадратный дюйм ~ 116 фунтов на одну ось
Энергопотребление	6–8 кВт при 12000 об./мин, 7–11 кВт при 17000 об./мин	Нет данных	2.1 кВт при 540 °C вне зависимости от скорости вращения

*) DN — коэффициент, определяющийся произведением скорости (об./мин) и диаметром подшипника (м).

Исследования в рамках программы VAATE сосредоточены в трех основных областях: универсальность, применение современных технологий, долговечность.

В соответствии с целями программы применение АМП может быть обосновано для организации интегрированной системы мониторинга, применения нелинейных адаптивных законов управления, создания прочных и надежных механических конструкций.

Использование АМП в качестве подшипниковых узлов дает возможность уменьшить вес электрической машины, повысить износостойкость, обеспечить возможность работы на больших высотах, позволяет функционировать без системы подачи смазки и системы охлаждения, дает возможность размещения в горячем секторе двигателя, повысить отказоустойчивость, осуществлять управление дисбалансом вала, обеспечить динамическую жесткость и высокие демпфирующие свойства АМП.

При проектировании конструкции высокоскоростного двигателя или генератора важными параметрами при выборе подшипника являются максимальная рабочая температура, рабочая скорость вращения, грузоподъемность, энергопотребление. Результаты сравнения АМП [9–10], шарикоподшипников и подшипников скольжения по данным критериям представлены в табл. 1.

Шарикоподшипники наиболее широко применимы, т. к. они хорошо известны и обладают большей несущей способностью. К сожалению, шарикоподшипники достигли своего технологического предела как по температуре, так и по допустимой скорости и имеют относительно короткий срок службы при высоких нагрузках. Для того чтобы двигатели, работающие при высоких температурах, обладали бы длительным сроком службы, они в конечном итоге должны быть оснащены АМП или подшипниками скольжения. Однако следует учитывать, что АМП и подшипники скольжения имеют различные характеристики по грузоподъемности. АМП лучше подходят для высокоскоростных электрических машин, работающих при высоких нагрузках и относительно низких скоростях (до 200 000 об./мин).

3. Альтернативная энергетика

Применение активных магнитных подшипников в области альтернативной энергетики весьма перспективно. В настоящее время наиболее широкое применение они получили в автономных ветрогенераторах с прямым приводом [11].

Преимущество использования ветрогенератора с прямым приводом определяется уменьшением

количества оборотов (при низких скоростях), что, в свою очередь, снижает трение и износ. Таким образом, повышается надежность ветряных турбин. Надежность является еще более важной для шельфовых ветровых турбин, где стоимость обслуживания почти в 2 раза превышает стоимость обслуживания наземного ветрогенератора. Ветрогенератор с прямым приводом также имеет самый высокий выход энергии по сравнению с другими устройствами преобразования энергии ветра. Тем не менее расширения масштабов применения таких турбин не происходит. В основном это связано с весом ветрогенератора с прямым приводом.

Мощность от ветра, которая передается на вал ротора или прямого привода генератора ветровой турбины, определяется выражением

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} C_p (\lambda, \theta) \pi r_r^2 v_w^3,$$

где ρ_{air} — плотность воздуха, C_p — коэффициент производительности, r_r — радиус лопасти турбины и v_w — скорость ветра.

Если увеличивается радиус лопасти, то выходная мощность турбины также увеличивается. Тем не менее скорость вращения лопастей ограничена максимальной величиной. В основном это связано с ограничением шума ветряных турбин. Поэтому для увеличения радиуса лопасти скорость вращения ветрогенератора уменьшается. Следствием этого является то, что крутящий момент машины должен быть увеличен, чтобы обеспечить соответствующую выходную мощность. Увеличение крутящего момента приводит к повышению стоимости и увеличению веса.

Для увеличения мощности генератора и сохранения допустимой угловой скорости должны быть увеличены либо радиус машины, либо ее осевая длина. Так как мощность пропорциональна квадрату радиуса, то именно увеличение радиуса машины наиболее предпочтительно при проектировании генератора.

Тем не менее машина должна иметь небольшой зазор между ротором и статором для хорошего преобразования энергии. В литературе [12] рекомендуется соотношение воздушного зазора и диаметра машины — 1/1000. Обеспечение такого соотношения является довольно трудной задачей, особенно для машин с большим диаметром статора, ввиду большой силы притяжения, которое действует между статором и ротором. Решению данной проблемы посвящены различные работы, однако наиболее интересный подход — применение активных магнитных подшипников для обеспечения минимального воздушного зазора.

АМП не только снижают общий вес ветрогенератора с прямым приводом, но и дают дополнительные преимущества, а именно:

- высокая степень надежности, т. к. АМП обеспечивают бесконтактный подвес ротора;
- возможно активное управление вибрацией.

Однако есть и недостатки такой системы:

- необходимость демонтажа всей машины в случае неисправности;
- сложное устройство АМП.

Компенсация статической и динамической нагрузок

Общая статическая нагрузка в системе равна силе тяжести. При этом вес (лопасти, ступицы и ротор генератора) может достигать значения сотен кН. Статические нагрузки могут быть компенсированы с помощью либо дополнительных постоянных магнитов, либо с помощью несимметричного ротора.

Когда ротор находится в центре воздушного зазора, силы притяжения магнитов направлены в противоположные стороны и взаимно уничтожаются. Так, результирующая сила равна нулю. Однако, когда происходит смещение ротора, силы притяжения изменяются.

Так как производительность ветрогенератора не меняется, то для компенсации статической нагрузки достаточно применения дополнительных постоянных магнитов, а для борьбы с эффектами, вызванными эксцентриситетом и динамическими нагрузками, применяются активные магнитные подшипники.

Расположение активных магнитных подшипников

Расположение АМП показано на рис. 4. Для обеспечения полного магнитного подвеса ротора ветрогенератора необходимо контролировать в общей сложности 5 степеней свободы. Как показано на рис. 4, перемещения вдоль осей x и y управляются с помощью 1 пары АМП, включенных в дифференциальном режиме работы. Точно так же 4 пары АМП контролируют перемещения вдоль оси z , а также вращательный момент вокруг осей x и y . Такое размещение АМП подходит для машин с большим диаметром и малой длиной ротора.

Приводы расположены униполярно, т. е. поток направлен перпендикулярно направлению вращения. Такое расположение АМП позволяет уменьшить потери на гистерезис и вихревые токи.

Потери АМП

Общий ток в системе складывается из тока смещения и тока управления для получения потока смещения и управления потоком соответственно.

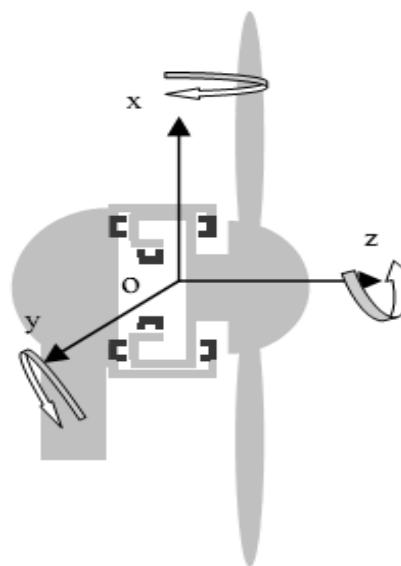


Рис. 4. Расположение АМП в конструкции ветрогенератора (из [11])

Ток смещения всегда присутствует в схеме, даже если система находится в состоянии равновесия, а ток управления будет зависеть от различных нагрузок на турбину. Таким образом, ток смещения дает постоянные потери, а потери на ток управления будут зависеть от нагрузки. Когда происходит возмущение, ток управления на одной обмотке АМП увеличивается, а на противоположной уменьшается. Поэтому, когда ток с одной стороны максимален, то с другой стороны равен нулю.

Сравнивая примеры применения традиционных подшипников и активных магнитных подшипников [13] при проектировании ветрогенераторов, можно сделать следующий вывод: потери АМП и традиционных подшипников одинаковы и составляют менее 0.5 % от номинальной мощности, но следует учитывать, что использование АМП существенно сокращает расходы на несущую конструкцию, а также обеспечивает управление перемещением ротора и управление вибрацией машины из-за внешних возмущений.

4. Медицинская техника

С точки зрения применения активных магнитных подшипников в медицинской технике наиболее значительным их преимуществом является отсутствие механического контакта и как следствие отсутствие смазочных материалов, что обеспечивает стерильность. Наиболее интересным примером использования АМП в медицинской технике является устройство искусственного сердца с центробежным насосом непрерывного типа на магнитном подвесе [14].

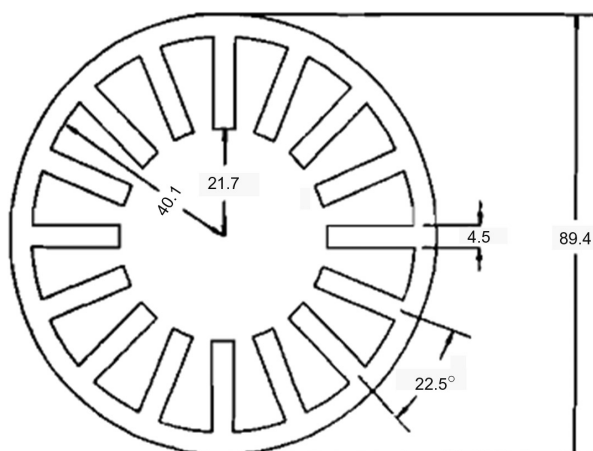


Рис. 5. Радиальный АМП центробежного насоса непрерывного типа (из [14])

Насос имплантируется в брюшную полость человека, а устройство питания и устройство управления располагаются на теле в специальной удерживающей системе. Насос непрерывно напрямую перекачивает кровь для поддержания работы левого и правого желудочков. Среднее время работы такого типа устройств составляет 5 лет, а надежность оценивается в 90 % [15].

Конструкция устройства

В конструкции устройства искусственного сердца с центробежным насосом непрерывного типа на магнитном подвесе используются четыре АМП — два упорных и два радиальных.

Упорные АМП расположены с двух сторон от рабочего колеса насоса. АМП поддерживают ротор насоса и предотвращают механический контакт. Система управления упорными АМП выполнена на базе ПИД-регулятора, а сигналы обратной связи (положение ротора) получаются от датчиков положения. Радиальные АМП представляют собой 16-полюсные подшипники, схема которых приведена на рис. 5. Система управления радиальным АМП аналогичная — ПИД-регулятор.

Состояние равновесия ротора достигается работой системы управления. Тем не менее, на ротор оказывают воздействие внешние возмущения: неравномерность потока, неустойчивость масс, мгновенные возмущения и т.д.

Для определения общего коэффициента усиления используется метод измерения в насосе токов катушки подшипников в различных направлениях по отношению к направлению силы тяжести. Этот коэффициент затем используется для оценки внешних сил, действующих на рабочее колесо.

Прототип устройства искусственного сердца с центробежным насосом непрерывного типа на магнитном подвесе был успешно протестирован в режимах левитации и вращения.

5. Летательные аппараты

В течение последних 15 лет в зарубежной практике активно начала развиваться технология замены традиционных подшипников газотурбинных авиационных двигателей на АМП. В 1998 г. в NASA были сформулированы задачи программы развития данной технологии [16], которые должны быть выполнены без ущерба для безопасности и стоимости перевозок (см. табл. 2).

Табл. 2. Задачи программы развития

№	Задача	Срок реализации	
		10 лет	20 лет
1	Сокращение объема выбросов газотурбинных авиационных двигателей	В 3 раза	В 5 раз
2	Снижение уровня шума газотурбинных авиационных двигателей	В 2 раза	В 4 раза
3	Повышение безопасности, эффективности, рентабельности системы воздушного транспорта	—	—
4	Обеспечение экологической безопасности	—	—

Проблема состоит в том, что газотурбинные двигатели более не в состоянии удовлетворять требованиям как по скорости, так и по температуре. Применение АМП позволяет расширить диапазон рабочих скоростей и температур двигателя и при этом не менять конструкцию двигателя. Использование АМП позволяет производить более легкие, тихие и эффективные двигатели, эксплуатационные затраты на которые будут значительно меньше.

В настоящее время в традиционных газотурбинных авиационных двигателях ротор удерживается шарикоподшипниками или амортизаторами, ограничивающими максимальную рабочую скорость двигателя до 25 000 об/мин и максимально допустимую температуру двигателя до 260 °С [17]. Кроме того, такая конфигурация двигателя требует сложной системы вторичного охлаждения и системы непрерывной подачи смазки, что значительно увеличивает вес, сложность и стоимость двигателя.

Применение АМП является обоснованным высокотехнологичным решением всех указанных проблем вследствие следующих причин.

1. АМП обеспечивает бесконтактный подвес ротора, и, следовательно, система подачи смазки не нужна.

2. Исключение системы подачи смазки приводит к снижению эксплуатационных расходов, т. к. двигатель становится менее сложным — нет необходимости хранить и распределять опасные смазочные вещества. Снижение стоимости за счет исключения данной системы приводит к значительной экономии средств: по оценкам экспертов NASA экономия составляет миллиарды долларов США в течение срока эксплуатации парка воздушных судов. Кроме того, двигатель, оснащенный АМП, имеет меньший показатель по объему выбросов вредных веществ и является более пожаробезопасным.

3. АМП имеют широкий диапазон рабочих температур, и, следовательно, в системе охлаждения нет необходимости.

4. АМП обеспечивает бесконтактный подвес ротора, что приводит к повышению срока эксплуатации двигателя.

5. В традиционных системах в обычных подшипниках с течением времени происходят деформации при работе на высоких скоростях, и через относительно небольшой промежуток времени может потребоваться замена всего узла.

АМП также обладают рядом преимуществ по сравнению с другими бесконтактными подшипниками.

1. АМП способны удерживать ротор в состоянии равновесия при нулевой скорости вращения.

2. Во время работы АМП не нуждаются в жидкости, что делает их пригодными для работы на больших высотах, в вакууме и в вязких средах.

3. Несущая способность АМП постоянна и не зависит от скорости вращения ротора.

Еще одним преимуществом АМП по сравнению с традиционными подшипниками с точки зрения применения в газотурбинных авиационных приводах является возможность реализации полного бесконтактного магнитного подвеса ротора. Это позволяет адаптировать работу двигателя к изменению ситуации (внезапное появление дисбаланса, жесткая посадка самолета, трение и т. д.). К тому же применение АМП дает возможность регулировать величину воздушного зазора, а также осуществлять мониторинг и диагностику дистанционно (с помощью специальных программных средств). Указанные достоинства позволяют сократить расходы на обслуживание газотурбинного авиационного привода в целом.

Результаты исследований инициативной группы специалистов NASA (1998–2004 г.) показывают, что внедрение АМП в конструкцию снижает общую массу двигателя на 5 % в сравнении с традиционными подшипниковыми узлами. Такое снижение веса в сочетании с высокой несущей способностью и снижением эксплуатационных расходов способствуют существенной экономии средств.

Рассмотрим более подробно элементы системы.

Конструкция газотурбинного авиационного привода, оснащенного АМП, представлена на рис. 6 и 7: один радиальный АМП, имеющий изолированную двенадцатиполусную гетерополярную структуру [18], расположен в центре масс ротора.

С обоих концов ротор удерживается упорными АМП (осевыми), которые включают "опоры" и "рукава". Данные подшипники осуществляют поддержание ротора вдоль продольной оси.

Для управления положением ротора необходимо знать точное значение величины воздушного зазора в текущий момент времени. Так как в среднем величина зазора составляет доли миллиметра, то требования к датчику положения достаточно высоки. При этом датчики должны работать в условиях экстремально высоких температур, иметь конструктивную защиту от воздействия агрессивных газов, жидкостей, загрязнителей окружающей среды, радиации, магнитных и электрических полей.

Система управления АМП

Система управления включает в себя контроллер реального времени высокой производительности и реализует в данном случае ПИД-закон управления. При этом интегральная составляющая

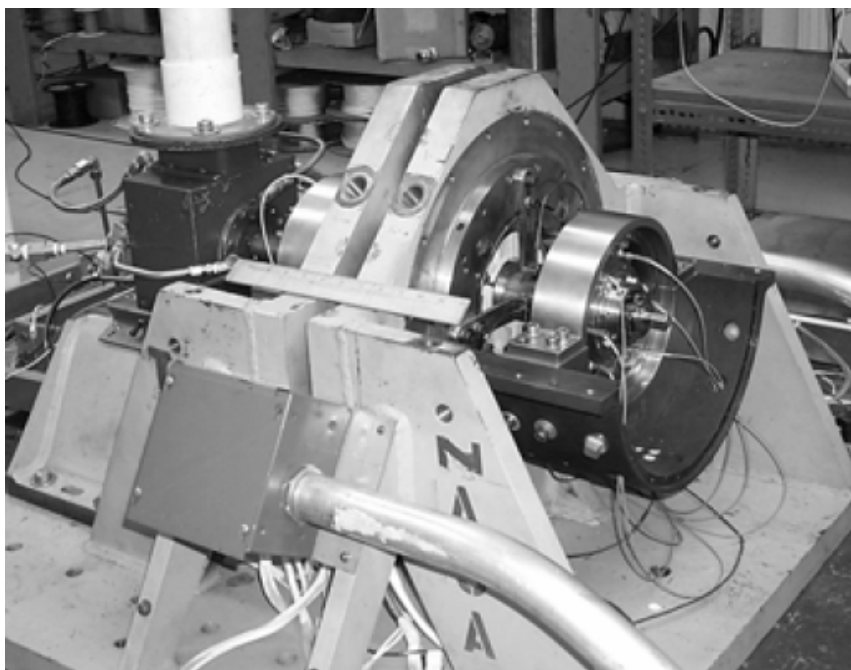


Рис. 6. Стенд испытаний газотурбинного авиационного двигателя с АМП (NASA, Glenn Research Center) (из [18])

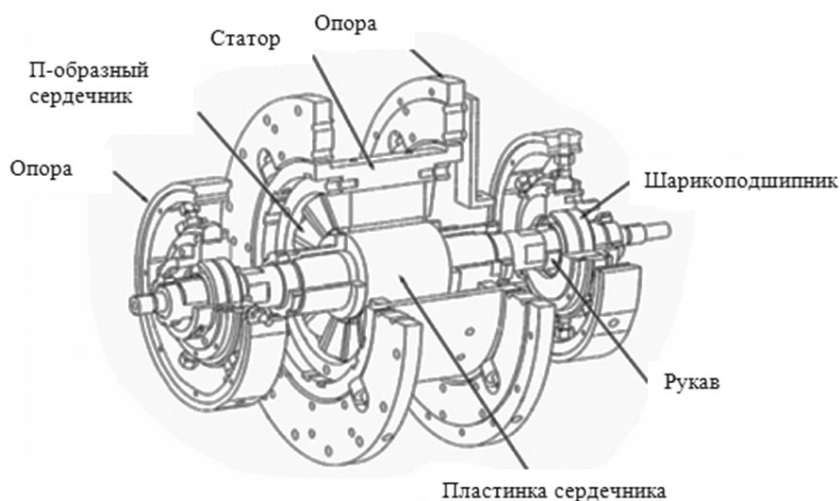


Рис. 7. Структура газотурбинного авиационного двигателя, оснащенного АМП (из [18])

регулятора в определенных режимах работы может быть отключена. Также имеется возможность изменения свойств демпфирования и жесткости АМП. Существует возможность устанавливать программно некоторые параметры, а именно центральное положение, амплитуду возбуждения, параметры компенсации дисбаланса.

Аналоговые сигналы датчика положения поступают в контроллер реального времени, где предварительно обрабатываются 16-битным АЦП.

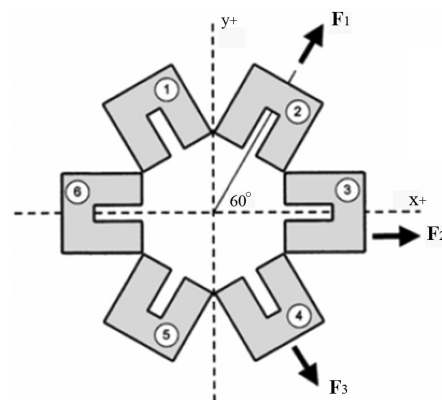


Рис. 8. Конфигурация АМП в газотурбинном авиационном двигателе (из [19])

Контроллер считывает положение ротора и создает соответствующий выходной сигнал для управления ШИМ. Этот сигнал обрабатывается 14-битным ЦАП и сглаживающим фильтром. Цикл расчета составляет 25 мс, что соответствует частоте квантования 40 кГц. Такое время семплирования является минимальным с учетом возможностей выбранного типа контроллера. Алгоритм управления синтезирован таким образом, чтобы управляющие силы противодействовали силам

дисбаланса. В случае сбоя работы системы обеспечивается предотвращение аварийно опасной ситуации за счет специальной конструкции АМП [19], представленной на рис. 8. В АМП реализованы три оси (три канала управления): одна горизонтальная ось и две оси, расположенные под углом 60° к вертикали. Такое расположение осей обеспечивает безаварийную работу системы в целом.

6. Станкостроение

В области станкостроения АМП также нашли довольно широкое применение. АМП входят в состав шлифовальных, токарных, фрезерных, сверлильных станков. В качестве примера можно привести микрофрезерные станки с магнитными опорами [20].

При проектировании миниатюрных устройств учитывается, что для достижения требуемых показателей эффективности станков необходимо обеспечить высокую точность вращения и малую массу ротора [21]. Исходя из этого применение АМП в качестве подшипниковых узлов микрофрезерных станков обосновано следующими причинами:

- 1) высокие скорости вращения вследствие отсутствия механического контакта;
- 2) высокая точность позиционирования;
- 3) возможность мониторинга положения шпинделя и величины магнитных сил;
- 4) возможность оценки силы резания по положению ротора и току АМП [22].

Табл. 3. Технические характеристики микрофрезерных станков с АМП

№	Параметр	Значение	Примечание
1	Скорость вращения ротора, об./мин	До 150 000	Рабочая скорость вращения шпинделя частично определяет качество резки. Чем выше скорость вращения, тем миниатюрнее может быть оснастка станка. В настоящее время микрофрезерные установки с АМП обеспечивают скорость $\approx 120\,000$ об./мин
2	Статическая ошибка по положению, м	$1.5 \cdot 10^{-6}$ при $\omega = 150\,000$ об./мин	Высокая скорость удаления материала может быть достигнута только на микрофрезерных станках. Максимальное отклонение может быть вызвано биением шпинделя или изгибом оснастки. Уменьшение значения ошибки может быть произведено путем балансировки ротора или оптимизацией геометрии оснастки
3	Ускорение, м/с ²	21	На этапе ускорения, т. е. при прохождении поворотов, постоянная составляющая силы растет. В этот момент шпиндель замедляется. Для обеспечения работы станка с постоянной скоростью вращения 150 000 об./мин необходимо обеспечить указанную величину ускорения
4	Неуравновешенность ротора	$f_{u1} = m \cdot e \cdot \omega^2$, m — масса ротора, e — расстояние между осью шпинделя и центром масс. $f_{u2} = k \cdot e$, k — положительная жесткость АМП	Когда скорость вращения ротора ниже критической, АМП обеспечивают вращение ротора вокруг геометрического центра. В этом случае неуравновешенность определяется по f_{u1}. Когда скорость вращения ротора выше критической, АМП обеспечивают вращение ротора вокруг оси инерции. В этом случае неуравновешенность определяется по f_{u2}.

Технические характеристики микрофрезерных станков с АМП приведены в табл. 3. В конструкции станка используется классическая конфигурация расположения АМП: два радиальных АМП и один осевой. Таким образом, ротор удерживается в полном магнитном подвесе и имеет 5 управляемых степеней свободы. Шестая степень свободы — движение вокруг своей оси — не управляется со стороны АМП.

Осевой АМП

Осевой АМП состоит из двух электромагнитов, расположенных с разных сторон диска (рис. 9). При определении требуемой величины магнитной силы принимаются следующие допущения:

- 1) отсутствие потока рассеяния;
- 2) однородное поле в зазоре;
- 3) проницаемость железа бесконечно велика.

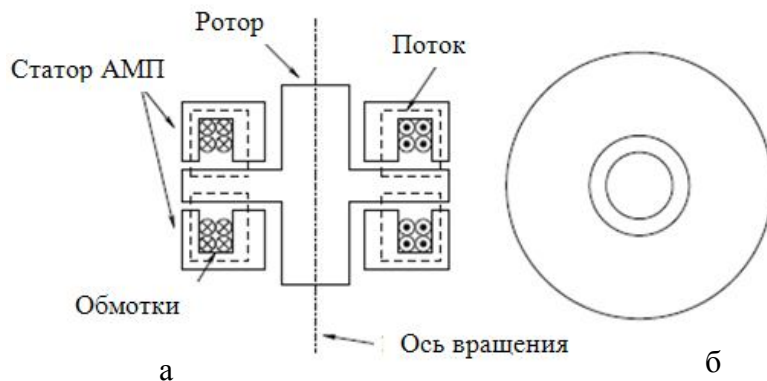


Рис. 9. Структура осевого АМП микрофрезерного станка (из [20]). а — фронтальный срез; б — вид в плане

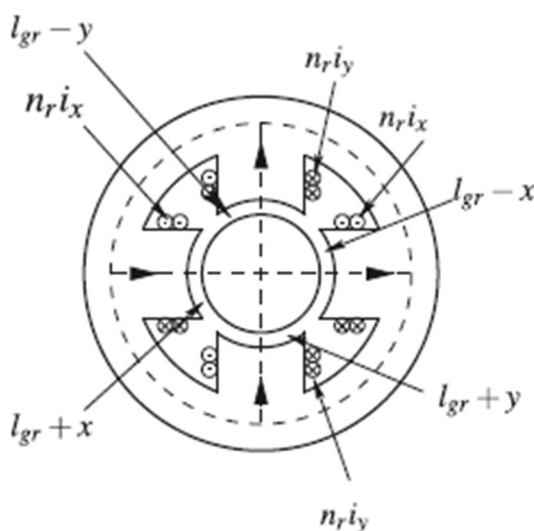


Рис. 10. Структура радиального АМП униполярного типа (из [20])

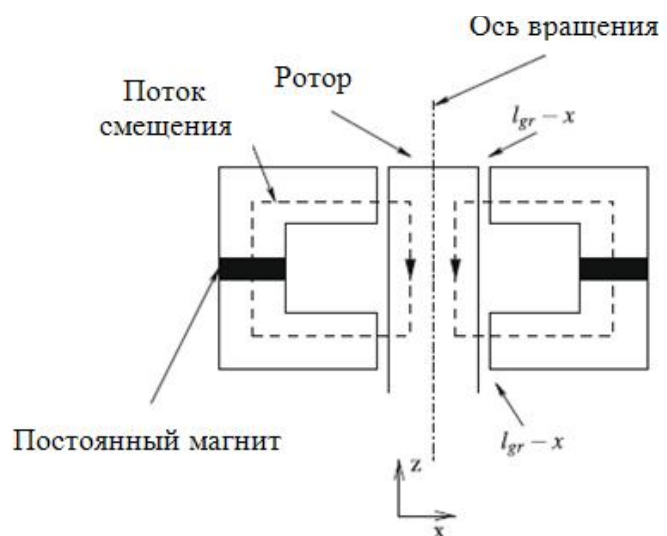


Рис. 11. Принцип работы радиального некомпланарного АМП (из [20])

Радиальные АМП (рис. 11) используют в своей работе поток смещения, который создается постоянными магнитами. Вследствие низкой магнитной проницаемости постоянных магнитов поток смещения отделен от потока управления. Использование постоянных магнитов в конструкции АМП приводит к снижению энергопотребления и тепловыделения.

Датчики положения

Конфигурация радиального АМП позволяет установить датчики положения на вертикальной оси между полюсами подшипника. Таким образом, расположение датчика (точки измерения) и исполнительного механизма (точки управления) будут совпадать.

Управление

Для обеспечения требуемого качества управления применяются два подхода.

1. Децентрализованное управление. Сигнал положения ротора является входным сигналом контроллера, а сигнал тока для того же АМП — выходным сигналом. ПД-регулятор (рис. 12) стабилизирует изначально неустойчивый объект, что дает возможность для идентификации и дальнейшей настройки системы.

2. Модальное управление с компенсацией отрицательной токовой жесткости.

рицательной токовой жесткости. Применение децентрализованного управления при работе с МИМО-объектами не во всех режимах работы дает требуемое качество управления. Для корректного управления режимами, когда на определенных скоростях вращения возбуждаются собственные колебания, необходима реализация модального управления. Для компенсации отрицательной токовой жесткости необходимо умножить сигнал положения ротора на величину отрицательной жесткости (рис. 13). Расположение датчика и АМП в одной точке значительно упрощает компенсацию и повышает ее эффективность. После введения указанной компенсации для системы может быть синтезирован ПИД-регулятор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данном обзоре примеры практического использования систем с активными магнитными подшипниками не ограничивают области их применения. С каждым годом появляются новые приложения данной технологии, использующие уникальные преимущества АМП в сравнении с другими подшипниковыми узлами. Представленные примеры показывают, что АМП применимы практически для любой отрасли и могут

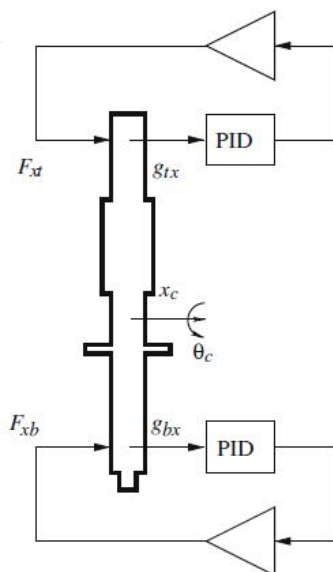


Рис. 12. Введение децентрализованного управления

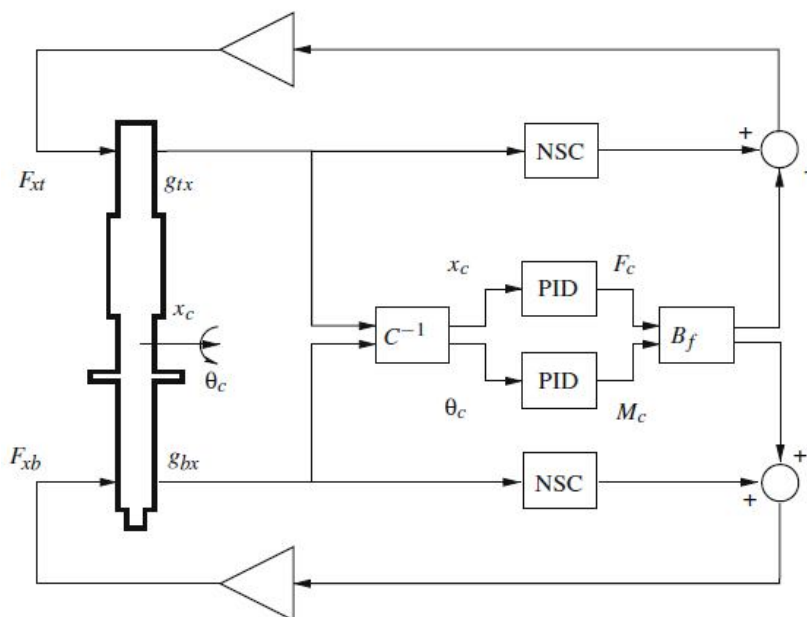


Рис. 13. Введение модального управления с компенсацией отрицательной токовой жесткости

со временем вытеснить традиционные решения в определенных областях. Во всем мире различными исследовательскими группами ведутся разработки современных систем АМП, направленные на усовершенствование как их конструкции и характеристик, так и систем автоматического управления, реализующих точное и надежное управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. С. 22–30.
2. Bleuler H. Magnetic levitation: a challenge for control design in mechatronics // Toshiba Chair for Intelligent Mechatronics. 2011. V. 44, N 12. P. 578–583.
3. Schweitzer G., Maslen E.H. Magnetic bearings. theory, design, and application to rotating machinery. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. P. 1–24.
4. Swann M.K., Watkins J., Bornstein K.R. Present limits of operation of product lubricated and magnetic bearings in pumps // Proceedings of the 14-th international Pump Users Symposium, 1996. P. 112–127.
5. Kingsbury magnetic bearings "Active Magnetic Bearings & High Speed Motors/Generators". URL: (<http://www.magnetic-bearings-s2m.com>).
6. Schmied J., Nijhuis A.B.M., Shultz R.R. Rotordynamic design considerations for the 23MW NAM-GLT compressor with magnetic bearings // IMechE Fluid Machinery Symposium. The Hague, 1999. P. 118–130.
7. API Standart 617 "Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services", 7th edition. July, 2002.
8. Clark D.J., Jansen M.J., Montague G.T. An overview of magnetic bearing technology for gas turbine engines. NASA/TM—2004-213177. URL: (http://archive.org/details/nasa_techdoc_20040110826).
9. Provenza A.J., Montague G.T., Jansen M.J., Palazzolo A.B., Jansen R.H. High temperature characterization of a radial magnetic bearing for turbomachinery // Proc. ASME/IGTI Turbo Expo. Atlanta, GA, June 16–19, 2003.
10. Zaretsky E.V., Bamberger E.N., Singer H. Operating characteristics of 120 mm bore ball bearings at 3x106 DN. NASA TN D-7837. 1974. URL: (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19750004258_1975004258.pdf).
11. Shrestha G., Polinder H., Bang D.J., Ferreira J.A. Direct drive wind turbine generator with magnetic bearing // Proceedings Offshore wind. 2007.
12. Polinder H., Morren J. Developments in wind turbine generator systems // Electrimacs. Hammamet, Tunisia, 2005. P. 67–78.
13. Polinder H., van der Pijl F.F.A., de Vilder G.J., Tavnier P. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines // IEEE Trans. Energy Conversion. 2006. V. 21. P. 725–733.
14. Alwre P.E., Maslen E.H., Kim H.C., Bearnson G.B., Olsen D.B. Design of a magnetic bearing-supported prototype centrifugal artificial heart pump // Tribology Transactions. 1996. V. 39, N 3. P. 663–669.
15. Akamatsu T., Yoshino Y., Tsukiya T. Studies of performance and operating condition of centrifugal blood pump with magnetically suspended impeller // Artificial Organs. 1994. V. 18, N 3. P. 244.
16. Jansen M., Montague G., Provenza A., Palazzolo A. High speed, high temperature, fault tolerant operation of a combination magnetic-hydrostatic bearing rotor support system for turbomachinery // NASA/TM. 2004. 212952. URL: (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20040050626_2004048920.pdf).
17. Hibbs R., Scharrer J., Pelfry P. Pressure tap effects on the dynamic characteristics of a cryogenic hydrostatic journal bearing // 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA-95-2965. 1995.
18. Na Uhn J., Palazzolo A.B. Optimized realization of fault-tolerant heteropolar magnetic bearings // J. of Vib. and Acoustics. 2000. V. 122, N 3. P. 209–221.
19. Montague G., Jansen M.J., Ebihara B., et al. Design and fabrication of a high temperature radial magnetic bearing for turbomachinery // NASA/TM. 2003. 21230. URL: (http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20030067710_2003075662).
20. Kimmann M.H., Langen H.H., Munnig Schmidt R.H. A miniature milling spindle with active magnetic bearings // Mechatronics. 2010. V. 20, N 2. P. 224–235.
21. Chae J., Park S.S., Freiheit T. Investigation of micro-cutting operations // Int. J. Machine Tools and Manuf. 2006. V. 46, N 3-4. P. 313–332.
22. Blom R.S., van den Hof P.M.J. Estimating cutting forces in micromilling by input estimation from closed-loop data // Proc. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6–11, 2008. P. 468–473.

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (СПбГЭТУ)

Контакты: Поляхов Николай Дмитриевич,
ndpol@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17.04.2012

THE METHODS REVIEW OF PRACTICAL APPLICATION FOR ACTIVE MAGNETIC BEARINGS

N. D. Polyakhov, A. D. Stotckaya

Saint Petersburg State Electrotechnical University (SPbGETU)

The methods of practical application for active magnetic bearings (AMP) in various industrial fields are under consideration. The advisability of AMP using instead of the conventional bearing units in such industry sections as aviation, power engineering, high-speed machinery, medical equipment, machine tool industry, gas transmission sector is justified. A comparison of technical characteristics of the three types of bearing units (AMP, rolling bearings, bushed bearings) is shown.

Keywords: active magnetic bearing, high-speed machinery, machine tool *industry*, medical equipment, alternative power engineering, aviation