ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р ИСО 14839-4— 2014

Вибрация

ВИБРАЦИЯ МАШИН ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С АКТИВНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ

Часть 4. Техническое руководство

ISO 14839-4:2012
Mechanical vibration — Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings — Part 4: Technical guidelines
(IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД») на основе собственного аутентичного перевода стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 183 «Вибрация, удар и контроль технического состояния»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2014 г. № 1423-ст.

4 Настоящий стандарт является идентичным по отношению к международному стандарту ИСО 14839-4:2012 «Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 4. Техническое руководство» (ISO 14839-4:2012 «Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 4: Technical guidelines»).

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации и межгосударственные стандарты, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок – в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (gost.ru)

© Стандартинформ, 2015

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения ... 1
2 Нормативные ссылки ... 1
3 термины и определения ... 1
4 Архитектура систем АМП ... 2
5 Сравнение магнитных и механических подшипников ... 3
6 Контроль состояния машины с АМП ... 6
7 Факторы окружающей среды ... 8
8 Требования к системе ... 12
9 Страхующие подшипники ... 16
10 Профилактические работы ... 20
Приложение А (справочное) Определение размеров магнитных подшипников ... 22
Приложение В (справочное) Пример формы проверок проектных характеристик ... 25
Приложение С (справочное) Примеры приемочных испытаний ... 26
Приложение D (справочное) Пример испытаний на падение ротора ... 27
Приложение Е (справочное) Пример эксплуатационных ограничений АМП ... 29
Приложение F (справочное) Управление дисбалансом ... 33
Приложение ДА (справочное)
Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов
национальным стандартам Российской Федерации и действующим
в этом качестве межгосударственным стандартам ... 37
Библиография ... 38

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Вибрация
ВИБРАЦИЯ МАШИН ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С АКТИВНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОДШИПНИКАМИ
Часть 4. Техническое руководство

Mechanical vibration. Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings. Part 4. Technical guidelines

Дата введения — 2015—12—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общее руководство по применению активных магнитных подшипников (АМП) в составе машин вращательного действия, в котором

a) приведена типичная архитектура систем АМП с указанием типичных элементов системы и выполняемых ими функций;

b) показано сходство и различие между системами АМП и обычными механическими подшипниковыми опорами;

c) указаны внешние факторы, оказывающие значительное влияние на работу систем АМП;

d) указаны эксплуатационные ограничения, специфичные для систем АМП и определены методы оценки этих ограничений;

e) указаны способы управления этими ограничениями, особенно в части уменьшения дисбаланса ротора;

f) приведены конструкция и характеристики страховочного подшипника;

g) приведены используемые в системе АМП сигналы, в том числе применяемые в целях контроля состояния и диагностирования;

h) приведены рекомендации по режимам работы и обслуживания АМП, позволяющие добиться максимальной эксплуатационной надежности системы;

i) приведены типичные неисправности и способы их устранения;

j) приведены методы контроля и прогнозирования поведения систем АМП.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ИСО 1940-1 Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса ((ISO 1940-1 Mechanical vibration – Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state – Part 1: Specification and verification of balance tolerances)

ИСО 14839-1:2002 Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 1. Словарь» (ISO 14839-1:2002 Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 1: Vocabulary)

ИСО 14839-2:2004 Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 2. Оценка вибрационного состояния» (ISO 14839-2:2004 Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 2: Evaluation of vibration)

ИСО 14839-3:2006 Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 3. Определение запаса устойчивости» (ISO 14839-3:2006 Mechanical vibration – Vibration of rotating machinery equipped with active magnetic bearings – Part 3: Evaluation of stability margin)

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ИСО 14839-1.

4 Архитектура систем АМП

В качестве опорной конструкции в машинах вращательного действия вместо обычных подшипников качения или скольжения может применяться система АМП. АМП служит для поддержки (левитации) ротора посредством электромагнитных сил, чье значение и направление контролируется системой управления с обратной связью. Типичное исполнительное устройство радиального магнитного подшипника включает в себя электромагниты, расположенные вокруг ротора как показано на рисунке 1 (для схемы с двумя ортогональными осями управления).

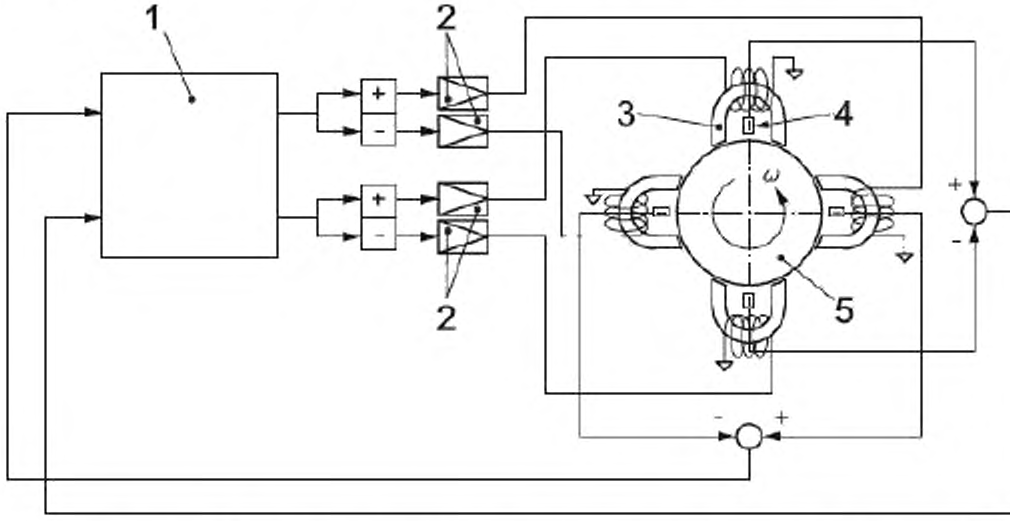
Основными элементами АМП являются:

a) датчики перемещения, позволяющие обнаружить отклонение положения вала от номинального;

b) процессор (контролер), формирующий сигнал управления на основе полученной информации об отклонении положения вала;

c) усилитель мощности, преобразующий маломощный сигнал на выходе контроллера в ток в катушках исполнительного устройства;

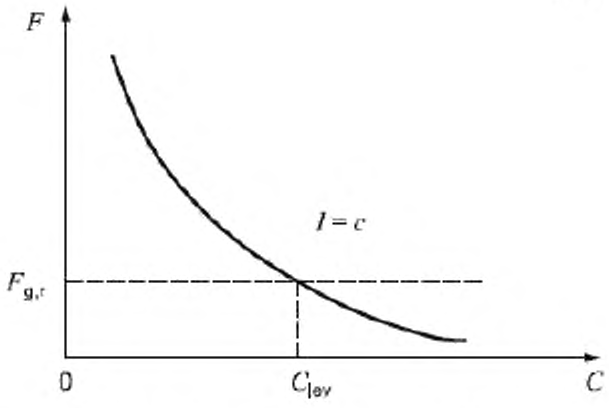
d) электромагнитное исполнительное устройство, позволяющее прикладывать электромагнитную силу к валу ротора для управления его положением.



1 – контроллер; 2 – усилитель мощности; 3 – катушка магнита; 4 – датчик перемещения; 5 – ротор, вращающийся с угловой скоростью ω

Рисунок 1 – Схематичное изображение системы АМП

Потери на сопротивление вращению ротора при использовании АМП невелики, поскольку вал ротора поддерживается магнитным полем при отсутствии механических контактов. Единственными источниками сопротивления вращению являются наведенные электромагнитным полем вихревые токи в теле ротора и сопротивление воздуха. Потери на сопротивление в АМП малы по сравнению с потерями на трение в механических подшипниках, в особенности по сравнению с потерями в подшипниках скольжения. С другой стороны, применение АМП требует специальных мер по управлению положением ротора. Магнитные силы, действующие на вал со стороны электромагнитов, являются силами притяжения и возрастают по мере приближения вала к исполнительному устройству (см. рисунок 2). Таким образом, системам АМП изначально присуща неустойчивость, поскольку небольшое отклонение от состояния равновесия имеет тенденцию к возрастанию. Отношение магнитной силы к вызываемому ею перемещению называется жесткостью, которая в системе АМП всегда отрицательна.



F – сила притяжения; $F_{g.r}$ – вес ротора; C – зазор; C_{lev} – точка левитации; $I = c$ – постоянный ток управления

Рисунок 2 – Соотношение между силой притяжения и зазором при постоянном токе в катушке магнита

АМП работает с применением постоянного потока смещения, производимого электромагнитом или постоянным магнитом. Поток смещения линеаризует соотношение между силой и током управления, что облегчает управление положением ротора. В прежние времена в магнитных подшипниках использовалась аналоговая схема управления с ПИД-регулятором с одним или несколькими входами и выходами. В настоящее время повсеместно используется цифровая схема управления, которая, с одной стороны, обеспечивает все функциональные возможности аналогового управления, но при этом легче в реализации и в калибровке.

Кроме того, в цифровом виде проще реализовать ряд функций управления, таких как робастное управление или контроль дисбаланса, а также контроль технического состояния и диагностирования системы АМП. Цифровое управление магнитным подшипником осуществляется в основном с помощью унифицированных (не зависящих от конкретного приложения) программ, исполняемых цифровым сигнальным процессором. Вместе с тем каждое конкретное приложение характеризуется своими параметрами, которые влияют на закон управления. Так магнитные подшипники обычно применяют в сочетании со страхующими подшипниками, принимающими на себя вес ротора при его останове в случае каких-либо повреждений оборудования или во время перегруза магнитного подшипника.

Зазор между страхующим подшипником и валом ротора обычно меньше или равен половине зазора между магнитным подшипником и валом. Магнитный подшипник, управляющий перемещением вала в радиальном направлении, называют радиальным магнитным подшипником. Общая схема такого магнитного подшипника вместе с датчиками перемещения и страхующими подшипниками показана на рисунке 3 (см. также приложение А).

Магнитные подшипники, управляющие перемещениями вала в осевом направлении, называют упорными магнитными подшипниками. Схема такого подшипника с датчиками перемещения и страхующими подшипниками приведена на рисунке 4 (см. также приложение А).

5 Сравнение магнитных и механических подшипников

5.1 Преимущества магнитных подшипников

5.1.1 Характерные особенности магнитных подшипников, отличающие их от механических подшипников, определяются принципом действия опоры, которая в случае магнитного подшипника осуществляет левитацию ротора и управление этой левитацией.

5.1.2 Следующие особенности системы АМП обусловлены применяемым в ней управлением с обратной связью:

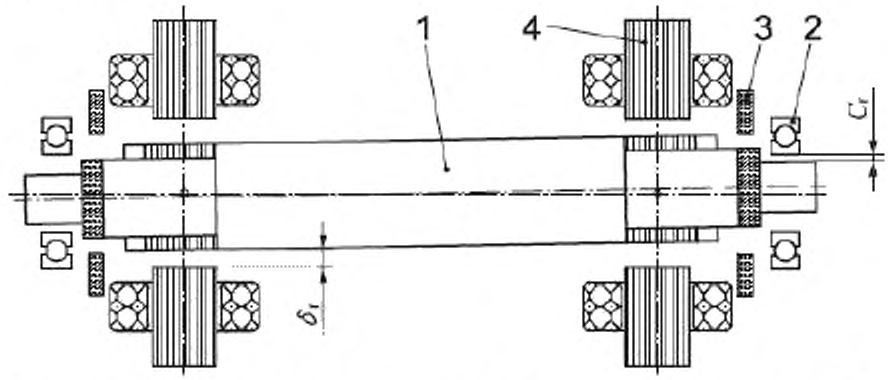
a) АМП обладают высокой статической жесткостью и низкой динамической жесткостью;

b) в системах АМП обычно применяют методы управления дисбалансом, которые позволяют:

1) минимизировать вызываемые дисбалансом нагрузки и передаваемую вибрацию,

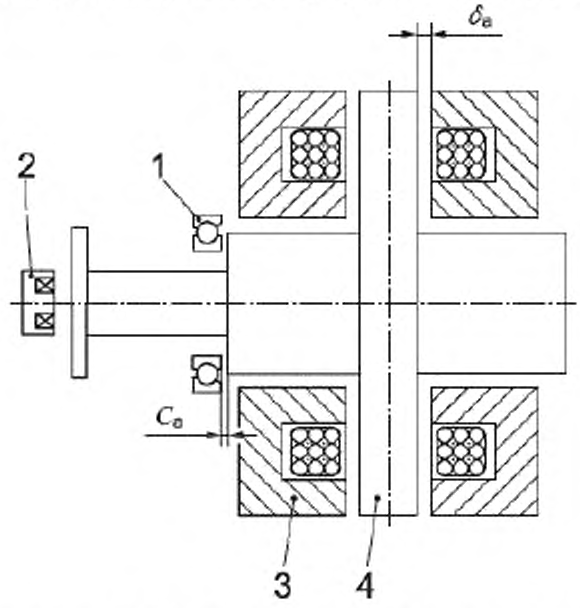
2) минимизировать гармонические перемещения ротора;

c) система управления АМП может быть использована для того, чтобы увеличить демпфирование при прохождении области критической скорости ротора;



1 – вал; 2 – радиальный страхующий подшипник; 3 – датчик перемещения; 4 – радиальный магнитный подшипник; C_r – радиальный зазор; δ_r – радиальный зазор в магнитном подшипнике; $C_r \approx 0{,}5\delta_r$

Рисунок 3 – Схема типичного радиального магнитного подшипника с датчиками перемещения и страхующими подшипниками (рисунок 6 из ИСО 14839-1)



1 – упорный страхующий подшипник; 2 – датчик осевых перемещений; 3 – упорный магнитный подшипник; 4 – упорный диск ротора; C_a – осевой зазор; δ_a – осевой зазор в магнитном подшипнике;

$$C_a \approx 0{,}5\delta_a$$

Рисунок 4 – Схема типичного упорного подшипника с датчиками осевого перемещения и упорными страхующими подшипниками

d) встроенные элементы системы управления АМП могут быть использованы в целях контроля состояния и диагностирования.

5.1.3 Ряд преимуществ АМП по сравнению с механическими подшипниками связан с отсутствием в АМП механического контакта, вследствие чего:

a) отсутствуют потери на трение (при наличии незначительных потерь за счет вихревых токов в магнитных материалах), что обеспечивает более высокую производительность машин с АМП;

b) достижима более высокая тангенциальная скорость ротора, обычно ограничиваемая только механическими напряжениями в его облицовке;

c) отсутствует износ частей машины (исполнительных устройств и преобразователей), что облегчает их техническое обслуживание.

5.1.4 Следующие преимущества вытекают из того, что АМП не требуют смазки:

a) отсутствуют проблемы загрязнения нефтепродуктами;

b) АМП могут быть использованы в разреженной воздушной среде (вакууме);

c) АМП могут быть использованы в криогенной среде;

d) не требуется вспомогательное оборудование, используемое в системах подачи смазки (гидравлические насосы, маслоохладители, масляные фильтры, трубопроводы гидравлической системы и др.);

e) обеспечивается большая компактность оборудования, поскольку устройства управления магнитными подшипниками занимают меньше места и проще в установке, чем элементы системы смазки;

f) существенно уменьшается объем технического обслуживания.

5.2 Недостатки магнитных подшипников

Помимо преимуществ, АМП обладают и некоторыми недостатками, в число которых входят следующие:

a) АМП требуют питания от электрической сети;

b) несущая способность АМП в основном зависит от насыщения магнитного материала исполнительного устройства;

c) ограничения, связанные с пределом насыщения применяемого магнитного материала, приводят к тому, что максимальная удельная нагрузка (т. е. нагрузка на единицу площади) для магнитных подшипников значительно меньше, чем для подшипников качения или скольжения;

d) цепь управления магнитным подшипником может быть довольно сложной, что потребует дополнительных затрат на подтверждение надежности ее работы;

e) при выходе системы управления из строя требуются дополнительные затраты для подтверждения надежности ее функционирования;

f) при использовании магнитных подшипников необходимо контролировать большое число мод колебаний вала, даже тех, критические скорости которых лежат далеко за пределами диапазона рабочих скоростей машины;

g) проектирование систем «магнитная опора – ротор» требует большого объема знаний как в области технологии машиностроения, так и в области электромеханики;

h) необходимо использовать дополнительные страховочные подшипники рядом с магнитными подшипниками, чтобы избежать непреднамеренного контакта ротора и статора в магнитном подшипнике при перегрузке магнитного подшипника, неисправности в системе управления магнитным подшипником или при прекращении подачи электроэнергии.

5.3 Сравнение магнитных подшипников, подшипников качения и скольжения

Сравнительные характеристики магнитных подшипников, подшипников качения и скольжения сведены в таблицу 1.

Моделирование динамического поведения вала в магнитных подшипниках много сложнее, чем для механических подшипников. Понятие динамических коэффициентов, используемое для механических подшипников, не может быть непосредственно применено для систем АМП вследствие специфики их описания, которое должно учитывать, например, пространственное разнесение исполнительного устройства и преобразователя, управление со многими входами и выходами, описание управления системами уравнений высокого порядка, электронные процессы в преобразователях. Поставщики и пользователи АМП должны прийти между собой к согласию в том, какие модели анализа динамики системы АМП будут использованы для подтверждения ее характеристик.

Таблица 1 – Сравнение подшипников качения, подшипников скольжения и магнитных подшипников

Параметр	Подшипники качения	Подшипники скольжения	Магнитные подшипники
Удельная нагрузка	Радиальные: от 1 до 3 МПа Упорные: от 0,2 до 2,0 МПа	Радиальные: от 2 до 5 МПа Упорные: менее 7 МПа	Радиальные: от 0,5 до 0,7 МПа Упорные: менее 0,8 МПа
Трение	Среднее	Высокое	Низкое
Тангенциальная скорость	От 90 до 150 м/с (зависит от смазки и тел качения)	Около 120 м/с	Радиальные: около 200 м/с Упорные: около 400 м/с
Жесткость опоры	Высокая	Средняя	Управляемая от низкой до средней (зависит от частоты)
Демпфирование	Низкое	Высокое	Высокое (управляемое) и зависит от частоты
Смазка	Требуется	Требуется	Не требуется
Срок службы	Короткий	Долгий	Долгий
Техническое обслуживание	Периодическая замена, периодическая смазка, обслуживание системы смазки	Замена масляных фильтров, замена масла	Периодическое обслуживание элементов системы управления
Диапазон температур	Широкий	Узкий	Широкий
Контроль состояния	Вспомогательной системой	Вспомогательной системой	Встроенный

6 Контроль состояния машины с АМП

6.1 Общие положения

В целях контроля состояния удобно использовать уже имеющиеся в системе управления АМП датчики перемещения. Поскольку левитация ротора является нормальным условием его работы в магнитных подшипниках, при отсутствии левитации система управления выдает запрет на вращение ротора.

Общепринятой практикой при эксплуатации машин с АМП является установление ограничений на их функционирование в виде уровней ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ. Достижение параметром вибрации уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ свидетельствует о произошедших в машине изменениях, требующих принятия мер по восстановлению ее технического состояния. В общем случае после поступления сигнала ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ машина может продолжать работать некоторое время до тех пор, пока не будут проведены соответствующие исследования, установлены причины изменения вибрационного состояния и приняты решения о восстановительных мероприятиях. Достижение уровня ОСТАНОВ свидетельствует о том, что при продолжении работы машины высока вероятность ее повреждения. При достижении этого уровня следует незамедлительно принять меры, позволяющие вернуть вибрацию до приемлемых уровней, или остановить машину.

6.2 Повышенная вибрация вала

В ИСО 14839-2 установлены типичные границы зон вибрационного состояния для значений перемещения вала.

Уровень ПЕРЕДУПРЕЖДЕНИЕ может в значительной степени варьироваться от машины к машине. Обычно его устанавливают относительно базовой линии, определенной на основе опыта эксплуатации машины и накопленных результатов измерений перемещения в заданных точках и направлениях. Рекомендуется устанавливать уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ выше базовой линии на 25 % значения верхней границы зоны В. Если уровень базовой линии низок, то уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ может лежать ниже зоны С.

Если базовая линия не установлена (например, для машин, только что введенных в эксплуатацию), то уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ рекомендуется определять на основе опыта эксплуатации ана-

логичных машин или по согласованию между заинтересованными сторонами. После накопления данных о работе машины и построения для нее базовой линии уровень ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ должен быть соответствующим образом скорректирован.

Уровень ОСТАНОВ обычно связывают с условием сохранения механической целости машины, поэтому он зависит от ее конструктивных особенностей, в том числе от проектных решений, обеспечивающих способность конструкции машины выдерживать воздействие развиваемых ею динамических сил. Как следствие, уровень ОСТАНОВ обычно одинаков для всех машин данной (или аналогичной) конструкции и, как правило, в отличие от уровня ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ с базовой линией не связан. Вследствие многообразия конструкций машин невозможно дать общие правила по установлению уровня ОСТАНОВ. Обычно этот уровень лежит в пределах зоны С или D.

6.3 Повышенное расширение ротора

Если при работе машины возможны ситуации, когда ротор вследствие чрезмерного теплового расширения будет задевать части статора, то определяют уровень ОСТАНОВ по сигналу с дополнительно устанавливаемого датчика перемещения, посредством которого измеряют удлинение ротора.

6.4 Повышенная нагрузка на подшипник (ток в катушке АМП)

Повышенную нагрузку на подшипник определяют по току в катушке управления АМП. Уровень ОСТАНОВ должен соответствовать току насыщения усилителя мощности.

6.5 Повышенная температура подшипника

Уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ устанавливают на основе технических характеристик проводов катушек управления.

Пример – Для провода с изоляцией класса F по нагревательной стойкости уровень ОСТАНОВ соответствует температуре приблизительно 155 °С.

6.6 Повышенная скорость вращения ротора

Уровень ОСТАНОВ по повышенной скорости вращения ротора устанавливают, исходя из конструкции ротора.

6.7 Повреждения в электросети

6.7.1 Общие положения

В случае обрыва или повреждения в сети питания АМП перестает работать, ротор выходит из состояния левитации и опускается на страхующий подшипник.

В качестве мер от перебоев в поступлении электрической энергии в систему управления магнитным подшипником используют методы, описанные в 6.7.2 – 6.7.3.

6.7.2 Применение источника бесперебойного электропитания

Данный метод предусматривает в случае повреждения в электрической сети автоматическое переключение системы управления АМП на источник бесперебойного питания.

6.7.3 Применение рекуператора

Данный метод может быть использован при наличии соединенного с ротором устройства рекуперации кинетической энергии. В момент обнаружения повреждения электрической сети система управления АМП переключает рекуператор в режим электрогенератора, поставляющего энергию для вращения ротора. Повреждение электрической сети определяют по падению напряжения питания.

6.8 Разряд источника питания

При повреждении в электросети обычным способом управления АМП является переключение на питание от автономной батареи. Прекращение вращения ротора по сигналу ОСТАНОВ осуществляется при достижении определенного уровня заряда батареи.

6.9 Повышенная температура контроллера

Охлаждение панели управления осуществляют за счет соединения ее с радиатором охлаждения, а также включения при повышении температуры до заданного значения вентилятора охлаждения. Уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ устанавливают с учетом результатов температурных испытаний контроллера.

6.10 Повреждение системы охлаждения

Ротор и статор АМП охлаждают обычно за счет потока газа (воздуха). Кроме того, температура статора может регулироваться системой жидкостного охлаждения. Уровни ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ и ОСТАНОВ устанавливают с учетом рабочих параметров системы охлаждения, таких как температура выходящего газа, давление газа или скорость потока.

7 Факторы окружающей среды

7.1 Общие положения

В настоящем разделе рассматриваются факторы окружающей среды, существенные с точки зрения условий работы магнитных подшипников. Поставщик и заказчик подшипников должны согласовать между собой допустимые диапазоны изменений этих факторов. Помимо факторов окружающей среды в настоящем разделе рассматриваются также силы, действующие на ротор во время работы машины (см. также раздел 8 и приложение F).

Воздействие факторов окружающей среды следует рассматривать по отдельности для разных этапов эксплуатации АМП (хранения, транспортировки, применения), поскольку во многих случаях влияние одних и тех же факторов на разных этапах эксплуатации будет разным.

Анализ влияния факторов окружающей среды выполняют для всех видов продукции, поэтому в настоящее время уже существует большое число стандартов, в которых данный аспект рассмотрен в отношении разных изделий и установлены соответствующие классификации. Положения настоящего стандарта согласованы с действующими классификациями, установленными другими стандартами, а исключения, обусловленные спецификой АМП, указаны в 7.2 (таблицы 2 – 8). Каждая таблица в 7.2 посвящена отдельной категории факторов окружающей среды и содержит:

– факторы, специфичные для данной категории;

– ссылки на стандарты с классификацией условий хранения, транспортировки и применения;

– ссылки на стандарты с методами испытаний для оценки условий хранения, транспортировки и применения;

– исключения, обусловленные спецификой рассматриваемого вида продукции (т. е. АМП).

Допустимая жесткость воздействия факторов окружающей среды или необходимая степень защиты во взрывоопасных средах может быть разной для разных частей магнитного подшипника. В этом случае необходимые средства защиты для каждой части АМП рассматривают по отдельности.

Требования к устройствам уплотнения вала и характеристики этих уплотнений должны быть согласованы между поставщиком и заказчиком подшипников. При установлении соглашения рекомендуется использовать термины, определения и сокращения по [2].

Для изоляции подшипников от воздействия технологического газа может быть использовано сухое газодинамическое или графитовое уплотнение. Такое решение рекомендуется применять в случаях, когда технологический газ может представлять опасность для подшипника и при этом есть возможность использовать для защиты подшипников буферный (уплотняющий) газ.

Все подшипниковые полости должны иметь дренажные отверстия для удаления конденсата (если только конструкция подшипника не рассчитана на работу во влажной среде или в условиях затопления).

Если во время работы подшипник находится под давлением технологического газа и отделен от него только лабиринтным уплотнением, то конструкция подшипника должна быть рассчитана на его применение в данное среде.

Если подшипник подвергается воздействию технологического газа (т. е. буферный газ и другие уплотнения не используются), то все элементы цепи электропитания следует располагать таким образом, чтобы электрические соединения не находились в областях возможного скопления жидкости (конденсата или загрязнителя).

7.2 Требования для разных категорий факторов окружающей среды

Требования для разных категорий факторов окружающей среды сведены в таблицы 2 – 8.

Таблица 2 – Климатические факторы

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Температура воздуха	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	[a] [b]
Влажность воздуха			–
Давление воздуха			–
Перемещение среды			–
Осадки			–
Радиация			–
Влага (кроме осадков)			–
Влажная очистка			–
Конденсат			–
Наледь и иней			–

[a] Электрическая изоляция проводов статора АМП должна удовлетворять требованиям класса F (155 °С) или H (180 °С) по [28]. Допускается эксплуатация при более высоких температурах в случае применения специальных средств изоляции (например, керамической), однако максимально допустимые значения температур при использовании таких средств в настоящее время не установлены.

[b] Необходимо дополнительно рассматривать нагрев подшипников при останове ротора.

Таблица 3 – Биологические факторы

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Флора	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	–
Фауна			–

Таблица 4 – Химические факторы

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Соль в морской воде	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	–
Солевой туман			–
Оксид серы			–
Продукты гниения (соединения водорода)			–
Оксиды азота			–
Озон			–
Аммиак			–
Хлор			–
Гидроокислы			–
Фтористый водород			–
Углеводороды			[a]

[a] Природный газ, содержащий сульфид водорода (H_2S) или значительное количество двуокиси углерода (CO_2), относят к категории кислых или кислотных газов, которые либо сами по себе, либо в соединении с водой проявляют кислотные свойства и могут быть весьма опасными для подшипников. Присутствие в рабочей среде такого газа требует защитить подшипники от его воздействия (например, с помощью герметичной оболочки). Материал и конструкция защитной оболочки должны позволят противостоять воздействию газа данного типа и, кроме того, могут потребовать ограничения максимального давления в полости подшипника. Природный газ, не содержащий сульфида водорода и двуокиси углерода в значительных количествах в значительных количествах, относят к нейтральным. Такой газ не опасен сам по себе, но подшипники, работающие в среде такого газа, должны иметь водонепроницаемую конструкцию с усиленной защитой катушек управления и электрических соединений, чтобы предотвратить их загрязнение.
Газ с высокой концентрацией сульфида водорода может быть токсичен и должен быть отведен в безопасную область. Перед операциями технического обслуживания систем должна быть продута чистым сухим газом для персональной защиты работников.

Таблица 5 – Абразивные загрязняющие вещества

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Песок	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	–
Пыль			–
Взвешенная пыль			–
Осажденная пыль			–
Ил			–
Сажа			–

Таблица 6 – Неабразивные загрязняющие вещества

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Масло двигателя	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	–
Трансмиссионное масло			–
Масло для гидравлической системы			–
Трансформаторное масло			–
Тормозная жидкость			–
Охлаждающая жидкость			–
Смазка			–
Топливо			–
Электролит для аккумуляторов			–

Таблица 7 – Механические факторы

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Вибрация	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	[a]
Свободное падение			–
Удар посторонним телом			–
Угловые колебания			–
Постоянный наклон			–
Постоянное ускорение			–
Статическая нагрузка			–
Опрокидывание			–

[a] Использование сокращенных терминов – в соответствии с [1].

Таблица 8 – Электрические и электромагнитные помехи

Фактор	Классификация	Испытания	Исключения
Магнитное поле	Хранение: [7] Транспортировка: [8] Стационарное применение с климатической защитой: [9] Стационарное применение без климатической защиты: [10] Применение на транспорте: [11] Применение в портативных устройствах: [9]	Хранение: [12] Транспортировка: МЭК [13] Стационарное применение с климатической защитой: [14] Стационарное применение без климатической защиты: [15] Применение на транспорте: [16] Применение в портативных устройствах: [14]	–
Электрическое поле			–
Гармонические искажения			–
Напряжение сигнала			–
Флуктуации напряжения и частоты питания			–
Наведенное напряжение			–
Импульсные помехи			–

Примечание – Содержащимися в таблицах примечаниями следует руководствоваться в случае отсутствия соответствующего стандарта. Если такой стандарт существует и специфика АМП не требует отступлений от этого стандарта (исключений), то примечания не применяют. Если стандарт существует, но требует адаптации к специфике АМП, то в примечании поясняется смысл такой адаптации.

7.3 Применение во взрывоопасных средах

Общие требования к оборудованию, применяемому во взрывоопасных средах, установлены в [17]. Классификация зон взрывоопасных газовых сред установлена в [23]. Классификация зон взрывоопасных пылевых сред установлена в [24]. Методы испытаний для определения температуры воспламенения установлены в [27].

В таблице 9 приведены ссылки на стандарты, устанавливающие требования к средствам защиты во взрывоопасных средах.

Таблица 9 – Типы защиты оборудования во взрывоопасных средах

Тип защиты	Применение	Испытания	Исключения
Взрывонепроницаемые оболочки (тип "d")	[18]	[27]	–
Герметизация компаундом (тип "m")	[26]	–	–
Повышенная защита (тип "e")	[22]	–	–
Оболочка под избыточным давлением (тип "p")	[19]	–	–
Искробезопасность (тип "i")	[25]	–	–
Защита от воспламенения	[27]	–	–
Кварцевое заполнение оболочки (тип "q")	[20]	–	–
Масляное заполнение оболочки (тип "o")	[21]	–	–

8 Требования к системе

8.1 Оценка нагрузки на подшипник

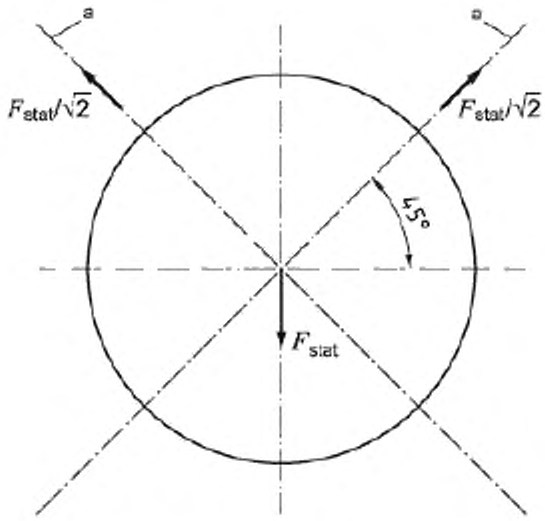
8.1.1 Статическая нагрузка на радиальный подшипник

Статическая нагрузка на радиальный подшипник вызвана:

- силой тяжести, действующей на ротор;
- гидравлическими силами;
- силами, обусловленными несоосностью соединений;
- неуравновешенными силами магнитного притяжения ротора;
- силами инерции, связанными с движениями фундамента.

В [3] приведен пример статических нагрузок, вызванных перепадом давления в жидкости в детандер-компрессоре. Условия допустимого нагружения в нем определены, исходя из предположения, что на лопастное колесо действует боковая нагрузка, эквивалентная 4 % общего момента гидравлической силы при нормальной работе оборудования.

Поскольку ось управления горизонтально ориентированного магнитного подшипника обычно расположена под углом $\pm 45°$ к направлению статической нагрузки F_{stat} (см. рисунок 5), статическая нагрузка, приходящаяся на каждую ось, будет равна $F_{stat}/\sqrt{2}$.



a – ось управления АМП

Рисунок 5 – Направление действия статической нагрузки относительно осей управления

8.1.2 Статическая нагрузка на упорный подшипник

Статическая нагрузка на упорный подшипник вызвана:

- гидравлическими силами в осевом направлении;
- силами реакции в сопряжении кинематических пар;
- силой тяжести (при вертикальном расположении ротора);
- силами на частоте вращения, обусловленными неправильной реакцией системы управления из-за несовпадения осей вращения ротора и датчика перемещения;
- силами инерции, связанными с движениями фундамента.

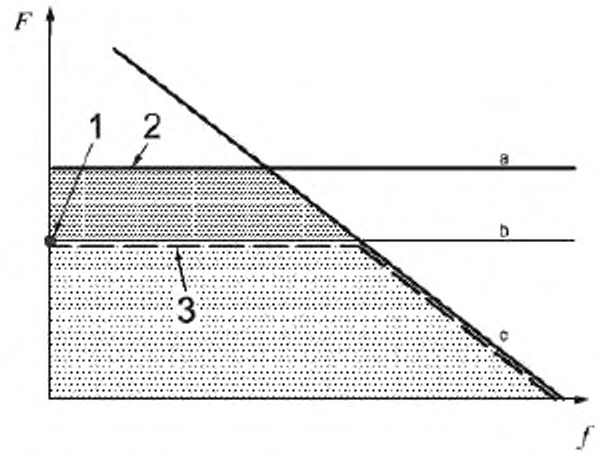
8.2 Ограничение скорости изменения тока

При повышении частоты несущая способность подшипника понижается из-за роста индуктивного сопротивления катушки управления. Соотношение между несущей способностью и частотой показано на рисунке 6. На высоких частотах производная по времени от силы тока в катушке $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ ограничена соотношением

$$\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} < \frac{V_{\max}}{L}, \qquad (1)$$

где $V_{\max}$ – максимальное напряжение на выходе усилителя мощности;

L – индуктивность катушки.



1 – максимальная статическая нагрузка; 2 – максимальная пиковая нагрузка (в переходном режиме); 3 – несущая способность в динамическом режиме; a – максимальный ток в АМП; b – ограничение по максимально допустимой температуре катушки; c – ограничение по напряжению;
F – сила, f – частота

Рисунок 6 – Несущая способность АМП (рисунок 11 из ИСО 14839-1)

Поскольку ток в катушке управления определяется измеренной скоростью вращения ротора, максимум $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ может быть достигнут, когда амплитуда и/или частота колебаний ротора высоки. Например, если отклик на критической частоте высокочастотной моды колебаний ротора велик, и $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ превышает предельное значение, то ток в катушке управления уменьшается с постоянной скоростью $(\mathrm{d}I/\mathrm{d}t)_{\max}$, при этом кривая изменения тока не соответствует той, которая необходима для корректного управления положением ротора.

Поэтому важно контролировать высокочастотный отклик ротора или режим работы усилителя мощности, чтобы не допустить достижения максимума $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$. Каждому значению $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ соответствует свое значение $\mathrm{d}F/\mathrm{d}t$, при этом производная $\mathrm{d}F/\mathrm{d}t$ определена смещением ротора в подшипнике. Типичная зависимость силы от частоты показана на рисунке 6. В низкочастотной области несущая способность подшипника определяется максимальной нагрузкой исполнительного устройства, а в высокочастотной области – максимальным значением $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$. Поскольку $\mathrm{d}F/\mathrm{d}t$ и $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$ связаны между собой соотношением

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t} = 4K\frac{I_0}{\delta_0^2}\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}, \qquad (2)$$

где F – сила притяжения;
K – коэффициент пропорциональности электромагнита;
I_0 – ток смещения;
δ_0 – номинальный радиальный зазор в подшипнике;
то с учетом формулы (1)

$$F \le 4K\frac{I_0}{\delta_0^2}\frac{V_{\max}}{\omega L}, \qquad (3)$$

где ω – угловая частота динамической нагрузки.
Для подшипника с постоянными магнитами справедлива формула

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t} = 4K_1 \frac{B_0}{\delta_0^2} \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}, \quad (4)$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности постоянного электромагнита;

B_0 – магнитный поток в зазоре подшипника.

Тогда несущая способность подшипника определяется по формуле

$$F \le 4K_1 \frac{B_0}{\delta_0^2} \frac{V_{\max}}{\omega L}. \quad (5)$$

Пример эксплуатационных ограничений, связанных с предельной скоростью изменения силы тока в катушке управления, приведен в приложении Е.

8.3 Уравновешенность ротора

Вследствие ряда особых свойств АМП влияние дисбаланса ротора на связанную с ним вибрацию иное, чем в системах с подшипниками качения или скольжения. В числе этих особых свойств следующие:

– минимальный радиальный зазор в АМП обычно много больше, чем в механических подшипниках. Этот зазор зависит от размеров системы АМП и машины, в которой она используется, и может достигать нескольких сотен микрометров;

– даже при наличии значительного дисбаланса ротора вибрация, передаваемая на фундамент, будет очень мала, если магнитный подшипник предусматривает управление с подавлением дисбаланса (см. приложение F);

– границы зон вибрационного состояния для магнитных подшипников установлены в ИСО 18439-2. В общем случае эти границы применимы также к вибрации, обусловленной дисбалансом ротора. Вибрацию, уровень которой не превышает 40 % минимального радиального зазора в подшипнике (зона вибрационного состояния А или В), считают приемлемой с точки зрения неограниченной долговременной работы машины;

– из ИСО 18439-2 следует, что границы зон вибрационного состояния не зависят от скорости вращения ротора, т. е. применимы в широком диапазоне скоростей. Это обстоятельство обусловлено в основном тем, что вращение ротора в магнитном подшипнике не сопровождается трением и не требует применения смазочных материалов.

Следствием вышеперечисленных свойств является то, что к качеству балансировки роторов, применяемых с магнитными подшипниками, обычно предъявляют менее строгие требования, как если бы ротор был установлен в подшипниках качения или скольжения. Кроме того, как правило, становится необязательной оценка качества балансировки ротора на высоких скоростях вращения. Поэтому классы точности балансировки, установленные ИСО 1940-1, будут слишком строгими для роторов в магнитных подшипниках, если их рабочие скорости ниже критических скоростей вращения.

При нарушениях в работе системы АМП (например, вследствие перегрузки или повреждения), когда ротор опускается на страхующие подшипники, хорошая уравновешенность ротора начинает играть важную роль, поскольку от нее зависит износ страхующих подшипников. Кроме того, малый дисбаланс ротора облегчает восстановление нормального режима работы за счет самих магнитных подшипников.

Также хорошее качество балансировки ротора становится важным, если в нормальном режиме работы вращение ротора происходит вблизи или выше его критической скорости.

Примеры контроля динамического поведения ротора в АМП приведены в приложении С.

8.4 Расположение подшипников и датчиков перемещения

Если ротор вращается на скорости выше критической или если управление по модам изгибных колебаний ротора является обязательным для обеспечения стабильной работы системы «ротор – подшипники», то необходимо провести анализ мод изгибных колебаний свободного ротора, чтобы убедиться в том, что подшипники и датчики перемещения не расположены в пучности моды.

8.5 Устранение неисправностей

Ряд условий работы машины может привести к появлению сигнала ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ (см. раздел 6). При устранении этих условий индикация ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ должна исчезать.

При еще более жестких условиях работы возможно появление сигнала ОСТАНОВ (см. раздел 6). Обычно появление таких условий влечет за собой быстрый останов машины и прекращение левитации ротора. Заказчику и поставщику следует провести совместный анализ данных и принять реше-

ние о необходимых корректирующих действиях, в числе которых могут быть: проверка функционирования машины, корректировка дисбаланса ротора, перенастройка контроллера системы управления и т.п. Если работа машины поддерживается источником бесперебойного питания, то может потребоваться проверка его заряда.

8.6 Обработка сигнала

8.6.1 Общие положения

В системе управления может быть реализована одна из двух возможных форм обработки сигнала: аналоговая или цифровая.

8.6.2 Аналоговые методы обработки

В случае применения аналоговых методов обработки совершаемые при этом преобразования часто называют фильтрацией. При этом контроллер будет представлять собой набор операционных усилителей. Для обеспечения необходимых частотных характеристик фильтров используют соответствующие емкости и сопротивления, которые требуют замены, как только появляется необходимость в перенастройке системы. Поэтому регулировка аналоговой системы управления занимает, как правило, достаточно большое время.

8.6.3 Цифровые методы обработки

Если используют цифровые методы обработки, то характеристики фильтров могут быть легко изменены программным способом. Поскольку обработка сигнала в системе управления АМП требует высокой скорости вычислений, для таких вычислений обычно используют цифровой сигнальный процессор. Применяемая частота выборки сигнала должна соответствовать возможностям сигнального процессора, а также устройств аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, скорости вращения ротора и т.д. Частоту выборки 10 кГц обычно считают достаточной для практического применения почти во всех системах управления АМП.

8.6.4 Задержка сигнала

При аналоговом способе обработки задержка сигнала контроллером отсутствует. В случае цифровой обработки необходимо принимать во внимание задержку сигнала при аналого-цифровом преобразовании, обработке сигнала и обратном цифро-аналоговом преобразовании, которую можно рассматривать как дополнительный сдвиг фаз в частотной характеристике контроллера.

8.7 Система контроля состояния

Контроль состояния проводят для получения данных о техническом состоянии машины во время ее долговременной работы. Число контролируемых параметров, а также выбор системы контроля зависит от вида машины и ее критических элементов, за состоянием которых следует наблюдать.

Системы контроля состояния могут быть реализованы в стационарном, полустационарном виде или с использованием переносных сборщиков данных.

Между заказчиком и поставщиком магнитных подшипников должно быть достигнуто соглашение о выборе применяемой системы измерений. При этом рекомендуется обращаться к классификации систем контроля состояния по ИСО 13373-1 (см. также 10.3).

9 Страхующие подшипники

9.1 Требования к страхующим подшипникам

Правильно сконструированная система «АМП – ротор» должна предусматривать поверхности, на которые опускается ротор под действием как радиальных, так и осевых нагрузок. Страхующие подшипники в системе «АМП – ротор» должны обеспечивать выполнение следующих функций:

a) поддержку ротора с сохранением его вращения без риска повреждения самого ротора или статора АМП при отключении питания контроллера АМП;

b) недопущение передачи быстропеременных повышенных нагрузок от ротора к статору АМП (что особенно важно с учетом меньшей несущей способности магнитных подшипников по сравнению с подшипниками качения или скольжения). Примером появления такой быстропеременной перегрузки может быть помпаж компрессора;

c) обеспечение заданного число безопасных остановов ротора, вращающегося на максимальной скорости или в условиях наихудшей с точки зрения безопасного останова нагрузки, при повреждениях в сети питания или в машине. Число таких остановов должно быть согласовано между поставщиком и заказчиком и зависит от условий применения системы АМП.

9.2 Конструкция страхующих подшипников

Страхующие подшипники предназначены для защиты системы от ограниченного числа падений ротора, но не для создания условий непрерывной опоры ротора. Применяемые страхующие подшипники могут быть следующих конструкций:

a) однорядные или двурядные радиальные шариковые подшипники для радиальной нагрузки;

b) двурядные сферические шариковые подшипники для радиальной и осевой нагрузок;

c) сплошные вкладыши (с масляной смазкой, сухой смазкой, с упрочненной или специально обработанной поверхностью);

d) лепестковые газодинамические подшипники;

e) подшипники скольжения специальной формы (конические, сегментные);

f) гибридные подшипники.

Если в качестве страхующего подшипника используют подшипник качения, то обычно выбирают высокоскоростной бессепараторный подшипник с керамическими шариками, однако в менее ответственных машинах возможно применение подшипников с сепараторами и стальными шариками.

Опора страхующих подшипников может быть жесткой или мягкой. Во многом это определяется динамикой ротора (работой на скоростях близких к критическим или выше критических, условиями нагружения, значениями дисбаланса, соосностью в сочленениях, интенсивностью торможения и др.).

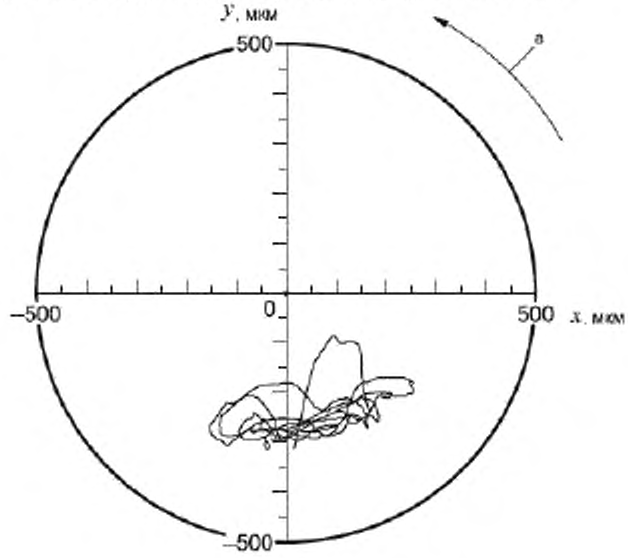
Центральная ось ротора при его вращении в подшипнике может совершать движения разных видов, включающих в себя:

– маятниковые колебания (когда динамические нагрузки меньше статических), см. рисунок 7;

– хаотические перемещения (когда динамические нагрузки больше статических), см. рисунок 8;

– прецессионное вращение (по направлению или против направления вращения ротора), см. рисунок 9.

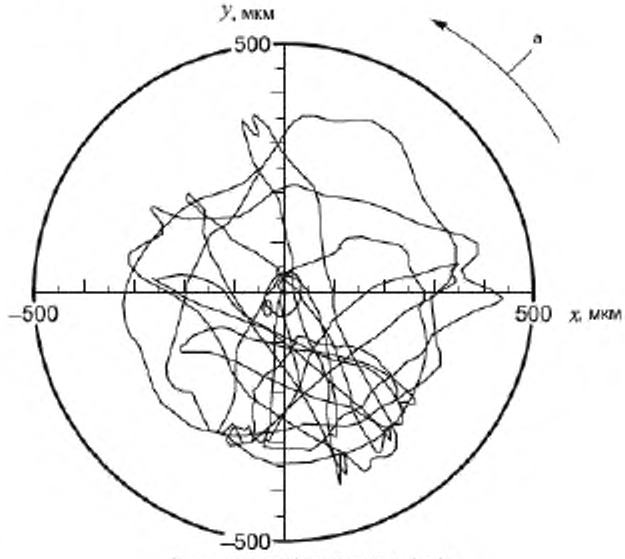
Если страхующие подшипники применяют для поддержания ротора при его транспортировке, то конструкция подшипников должна предусматривать такую функцию. Другим применяемым при транспортировке вариантом является фиксация ротора стопорным механизмом.



a – направление вращения

Примечание – Продолжительность измерений 0,2 с.

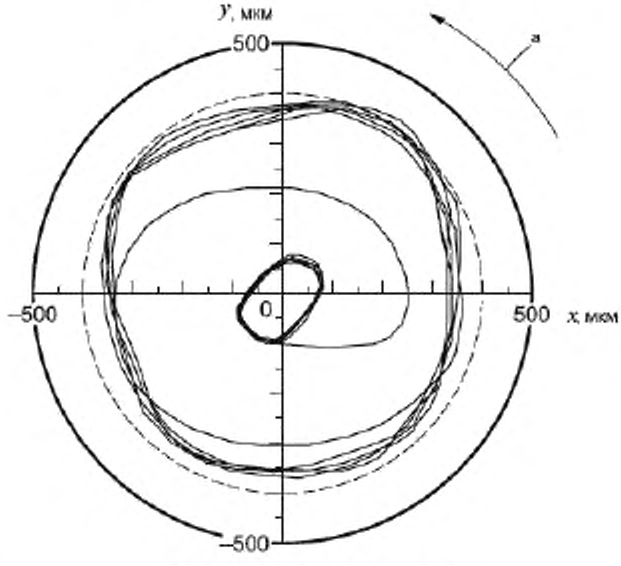
Рисунок 7 – Пример траектории движения конца хорошо уравновешенного ротора в подшипнике скольжения с жесткой опорой



а – направление вращения

Примечание – Продолжительность измерений 0,2 с.

Рисунок 8 – Пример траектории движения конца неуравновешенного ротора в подшипнике скольжения с жесткой опорой



а – направление вращения

Примечание – Продолжительность измерений 0,2 с.

Рисунок 9 – Пример траектории прецессионного движения вала, обусловленного потерей части массы ротора

9.3 Контроль состояния страхующих подшипников

Изготовитель устанавливает метод оценки степени жесткости воздействий на страхующий подшипник, которые могут случиться при его применении. Такие оценки позволяют определить ухудше-

ние качества подшипника при его эксплуатации и прогнозировать остаточный ресурс. Последствия контактов страхующего подшипника с ротором оценивают по жесткости падений ротора и продолжительности контактов.

9.4 Методы испытаний

9.4.1 Общие положения

Испытания страхующих подшипников (см. приложение D), в процессе которых происходит их контакт с ротором, проводят по согласованию между изготовителем магнитных подшипников и конечным пользователем оборудования.

9.4.2 Безопасность

Должны быть приняты меры по обеспечению безопасности персонала, проводящего испытания.

9.4.3 Временная диаграмма

Параметры испытаний должны быть определены поставщиком и заказчиком таким образом, чтобы отражать наиболее вероятные условия контакта ротора со страхующими подшипниками. Для машин с приводом от двигателя важной характеристикой является временная диаграмма опускания ротора на подшипники.

Если во время падения ротора на страхующий подшипник ток в обмотках двигателя продолжает течь, то повышение магнитной силы, связанное с изменением положения ротора, может привести к непредсказуемому поведению последнего.

9.4.4 Измерения

Ввиду переходного характера процессов, связанных с падением ротора на страхующие подшипники, запись вибрации ротора рекомендуется вести в непрерывном режиме. Процедуру падения ротора на подшипники повторяют несколько раз, чтобы убедиться, что характеристики жесткости и демпфирования системы остаются неизменными и обеспечивают повторяемость измерений. Динамический диапазон датчика перемещений должен быть достаточным для проведения измерений всей траектории движения центра вала. При этом следует принимать во внимание податливость статора и ротора, поскольку перемещение вала при падении ротора может оказаться бо́льшим, чем этого можно было ожидать, исходя из геометрических размеров подшипника.

9.4.5 Оценка результатов испытаний

После завершения испытаний страхующий подшипник разбирают и оценивают состояние элементов ротора и подшипника. Проверяют изменение окраски поверхностей, наличие признаков деформации и износа в месте контакта, а также возможный изгиб ротора и степень разрушения подшипника.

Общая последовательность действий при организации и проведении испытаний на падение ротора на страхующие подшипники выглядит следующим образом:

a) планирование испытаний, в ходе которого определяют:
1) число падений ротора на подшипники,
2) применяемую измерительную систему,
3) характеристики, проверяемые по завершении испытаний;
b) определение мер защиты от возможных опасностей, включая:
1) отрыв и разлет вращающихся частей ротора,
2) быстрый нагрев контактирующих поверхностей,
3) повышение вибрации и шума,
4) утечку газа или жидкости из-за повреждения уплотнений;
c) выполнение измерений, в процессе которых:
1) наблюдают поведение ротора с помощью датчиков перемещения системы управления АМП,
2) регистрируют траекторию движения центра вала ротора,
3) контролируют допустимость положения ротора;
d) подтверждение временной диаграммы опускания ротора на страхующие подшипники (последствия искусственного отключения питания магнитного подшипника), для чего
1) проверяют последовательность событий, связанных с поведением магнитного подшипника и системы управления двигателем или другими механизмами электрического управления, после отключения питания;
e) оценивание результатов испытаний, в ходе которого определяют:
1) повреждения страхующих подшипников;
2) наличие незапланированных областей контакта,
3) состояние уплотнений,
4) ослабления в соединениях;
f) замена поврежденных частей и повторная сборка, включая:
1) замену поврежденных страхующих подшипников,

2) прогнозирование (на основе оценки степени повреждения страхующих подшипников) числа неконтролируемых остановов ротора, после которого страхующие подшипники должны будут быть заменены.

10 Профилактические работы

10.1 Общие положения

По самому принципу своего действия магнитные подшипники требуют лишь небольшого технического обслуживания. В большинстве применений исполнительное устройство магнитного подшипника и датчик перемещения, находящиеся в закрытом корпусе подшипника, специального технического обслуживания и периодической проверки работоспособности не требуют. Обычно эти элементы подшипникового узла конструируют из такого расчета, чтобы срок их службы, как у электродвигателей или генераторов, превышал 30 лет. Однако такой элемент магнитного подшипника, как контроллер нуждается в периодической проверке (см. 10.2) и может потребовать замены. При необходимости контроллер, аналогично другим элементам магнитного подшипника, может быть сконструирован и изготовлен таким образом, чтобы не нуждаться в техническом обслуживании, но обычно это сопровождается существенным повышением его стоимости.

Поскольку магнитный подшипник в своем составе имеет систему управления, контроллер этой системы может быть использован также и в целях выявления неисправного состояния, а также определения вида неисправности (см. 10.3).

Условия применения магнитных подшипников могут быть самыми разнообразными – от благоприятных с известными нагрузками до неблагоприятных (воздействие агрессивных сред, большие и/или непредсказуемые нагрузки). Вследствие такого разнообразия в настоящем стандарте приведены только общие рекомендации в отношении выполняемых профилактических работ. В любом случае пользователю необходимо следовать инструкциям, установленным изготовителем. При формировании программ технического обслуживания и определении основных этапов этих программ можно воспользоваться рекомендациями ИСО 17359. В частности, в настоящем стандарте при определении объема программ контроля состояния и технического обслуживания в качестве важного шага предлагается проводить расчет экономического эффекта от внедрения таких программ, а также анализ надежности и критичности оборудования.

10.2 Периодические проверки и техническое обслуживание

Проверку состояния магнитных подшипников, сопровождающуюся остановкой работы машины, рекомендуется проводить с периодичностью раз в два-три года. Открытые части магнитного подшипника подвергают визуальному контролю. В соответствии с инструкцией изготовителя некоторые элементы контроллера (например, вентилятор, воздушный фильтр) при проведении периодической проверки заменяют.

Другие элементы контроллера могут потребовать замены в течение срока эксплуатации магнитного подшипника, особенно если подшипник эксплуатируют в сложных условиях. К таким элементам относятся конденсаторы и другие элементы системы питания, платы усилителя или импульсные регуляторы. В случае тяжелых условий эксплуатации в соответствии с инструкцией изготовителя они могут требовать замены каждые пять-десять лет.

Периодическому контролю в зависимости от особенностей применения подвергают также сигнальные кабели.

Если в качестве резервных источников питания используют батареи (аккумуляторы), то их заменяют каждые два года, если иное не установлено в инструкции изготовителя.

10.3 Рекомендации по контролю состояния

Вопрос выбора контролируемых параметров для оценки технического состояния машин с учетом таких факторов, как методы и средства измерений, периодичность контроля, частота выборки, точки измерений рассматривается в ИСО 17359. Если контроль осуществляют по параметрам вибрации, то в отношении рекомендаций по проведению измерений вибрации, применяемых типов датчиков, точек их установки и наблюдения динамики изменений контролируемых параметров руководствуются ИСО 13373-1. Для машин с магнитными опорами функции определения положения ротора в каждый момент времени, измерения тока в управляющей катушке и скорости вращения ротора всегда объединяют в единую систему. Часто эта система удовлетворяет всем требованиям к измерениям вибрации данной машины. Однако для других машин могут потребоваться дополнительные средства измерений, такие как устанавливаемые на невращающихся частях акселерометры или датчики скорости. В этом случае рекомендуется руководствоваться ИСО 13373-1. Для машин с магнитными опорами часто контролируемым параметром является низкочастотное изменение температуры.

Возможности встроенной системы контроля АМП, рассмотренные в разделах 6 и 8, способны удовлетворить полностью или частично требования по вибрационному контролю состояния машины.

Перемещения ротора, ток в управляющих подшипниках и температура в критичных точках измеряются с помощью этой системы непрерывно в реальном масштабе времени. Контроллер автоматически выявляет аномальные условия работы машины и в случае обнаружения таких условий сообщает о возникшей неисправности. Однако кроме этого для выявления проблем в работе машины с магнитными опорами или самого магнитного подшипника следует также регулярно наблюдать тренд контролируемых параметров и сопоставлять полученные данные с инструкцией изготовителя. Границы зон состояния вибрации ротора и требования по наблюдению динамики изменения контролируемых вибрационных параметров установлены в ИСО 14839-2:2004 (пункт 4.3).

Записи журнала событий, включая сопровождающиеся сигналом ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ, должны быть предметом регулярного анализа. Такой анализ позволяет выявить возможные проблемы в работе конкретной машины.

10.4 Журнал контроля

В ходе периодического контроля оценивают рабочее состояние системы АМП, ее целость, а также анализируют историю событий. Объекты и критерии контроля перечислены в таблице 10 (см. также приложение В).

Таблица 10 – Объекты и критерии периодического контроля

Система	Объект	Критерий
Элементы подшипниковой опоры	Кабели и соединения	Отсутствие повреждений и ослаблений
	Утечки (газа, жидкости)	Отсутствие факторов и связанных с ними повреждений
	Посторонний запах	
	Шум	
	Коррозия, ржавчина	
Устройства системы управления	Воздушные фильтры	В соответствии с указаниями изготовителя. Воздушные фильтры обычно заменяют каждые 6 месяцев, другие элементы – каждые два-три года.
	Вентиляторы охлаждения	
	Батарея часов реального времени	
	Резервный источник питания	
	Конденсаторы шины питания	В соответствии с указаниями изготовителя. Замена каждые пять-десять лет (для ответственных машин)
	Система питания	
	Плата усилителя мощности	
	Факторы внешней среды (температура, влажность, пыль и т.д.)	Визуальный контроль отступлений от условий, указанных изготовителем
Контроль состояния	Положение и вибрация вала	Наблюдение тренда и сопоставление с указаниями изготовителя
	Ток в катушке (нагрузка подшипника)	
	Напряжение шины питания	
	Температура шкафа управления	
	Температура подшипника	
	Журнал событий	Анализ журнала событий для выявления возможных проблем

Приложение А
(справочное)

Определение размеров магнитных подшипников

А.1 Общие положения

Приблизительные размеры магнитных подшипников можно оценить на основе их расчетной несущей способности. Информация о размерах подшипников может быть использована на стадии предварительного проектирования машин с магнитными опорами.

А.2 Радиальные магнитные подшипники

Типичные размеры радиальных магнитных подшипников приведены в таблице А.1. Максимальную несущую способность магнитного подшипника F_{max} можно оценить по формуле

$$F_{max} = F_0 L B_S^2, \qquad (A.1)$$

где L – индуктивность катушки управления;

B_S – плотность магнитного потока насыщения в магнитном материале (обычно значение этой величины находится в диапазоне от 1,3 до 1,5 Тл);

F_0 – масштабный коэффициент.

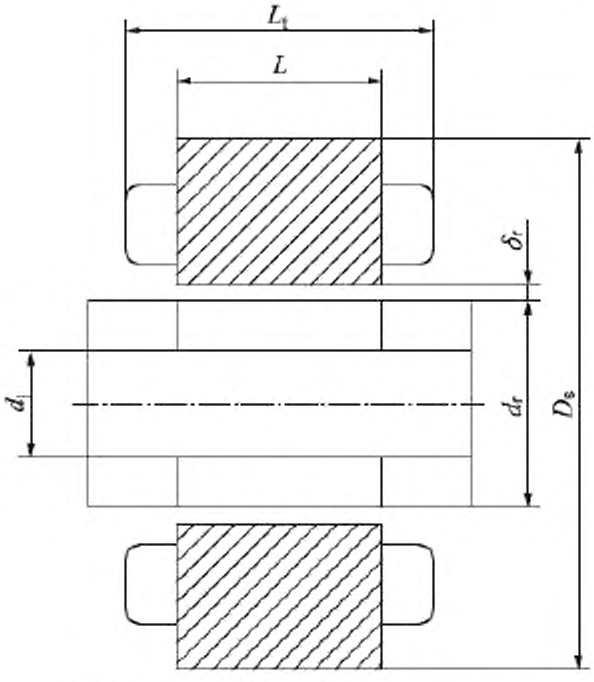
Чем выше насыщение в материале, тем более детальный анализ требуется. В таблице А.1 N_p обозначает число полюсов статора подшипника.

А.3 Упорные магнитные подшипники

Типичные размеры упорных магнитных подшипников приведены в таблице А.2 для значения плотности магнитного потока в воздушном зазоре подшипника, равного 1,0 Тл. F обозначает несущую способность подшипника.

Таблица А.1 – Типичные размеры радиальных магнитных подшипников

D_s, мм	d_r, мм	d_t, мм	δ_r, мм	$L_t - L$, мм	N_{max}, мин$^{-1}$	F_0, Н/мм/Тл^2	N_p
85	30	18	0,2	10,0	120000	2,9	8
98	40	24	0,3	11,0	90000	3,9	8
107	50	30	0,3	11,0	72000	4,9	8
116	60	36	0,3	12,0	60000	5,9	8
126	70	43	0,4	14,0	51000	6,9	8
138	80	49	0,4	16,0	45000	7,8	8
151	90	55	0,5	19,0	40000	8,8	8
164	100	74	0,6	21,0	36000	9,8	16
177	110	81	0,6	23,0	33000	10,8	16
191	120	89	0,8	25,5	30000	11,8	16
239	150	111	0,8	31,5	24000	14,7	16
318	200	148	0,9	42,0	18000	19,6	16
398	250	185	1,0	52,5	14400	24,5	16
478	300	221	1,2	63,0	12000	29,4	16
Примечание – Обозначения размеров – в соответствии с рисунком А.1.							

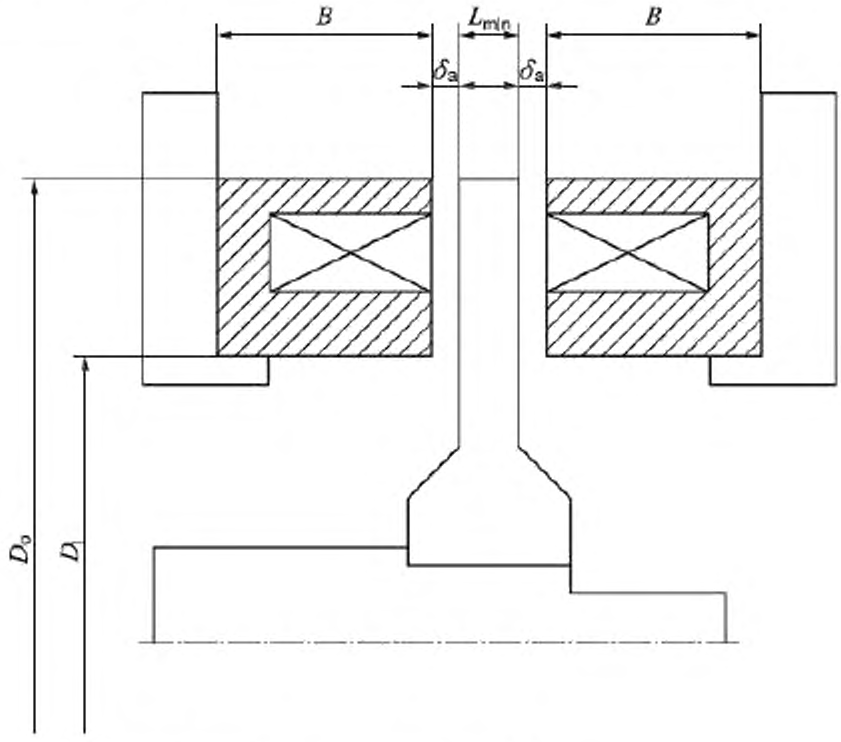


Примечание – Значения размеров приведены в таблице А.1.

Рисунок А.1 – Поперечное сечение радиального магнитного подшипника

Таблица А.2 – Типичные размеры упорных магнитных подшипников

D_0, мм	D_i, мм	d_a, мм	B, мм	L_{min}, мм	N_{max}, мин$^{-1}$	F, Н	N_p
46	24	0,3	17,0	4,0	115000	50	2
60	31	0,3	21,0	5,0	89000	200	2
85	44	0,3	25,0	7,0	61000	500	2
150	78	0,4	50,0	20,0	33000	4000	2
200	106	0,4	62,0	27,0	24000	8400	3
300	156	0,5	65,0	35,0	16000	15700	3
400	208	0,6	69,0	30,0	12000	24300	3
500	260	0,6	82,0	35,0	9500	38400	3
600	310	0,8	94,0	40,0	7500	56000	3
Примечание – Обозначения размеров – в соответствии с рисунком А.2.							



Примечание – Значения размеров приведены в таблице А.2.

Рисунок А.2 – Форма упорного магнитного подшипника

Приложение В
(справочное)

Пример формы проверок проектных характеристик

	Машина	
1	Тип	
2	Заказчик	
3	Конечный пользователь	
4	Новая/Модернизированная	
	Общие характеристики	
5	Диапазон рабочих скоростей	мин$^{-1}$
6	Номинальная скорость	мин$^{-1}$
7	Скорость ОСТАНОВА	мин$^{-1}$
8	Ориентация (горизонтальная/вертикальная/любая)	
9	Мощность на номинальной скорости	кВт
10	Масса ротора	кг
11	Длина ротора	мм
12	Класс качества балансировки	G
13	Технологическая жидкость	
	Среда работы машины	
14	Внутренняя среда (воздух/вакуум/жидкость)	°С; кПа
	Другое (состав/коррозийность/влажность/др.)	
	Хладагент (вода/воздух/другой/отсутствует)	
15	Внешняя среда (воздух/вакуум/жидкость)	°С; кПа
	Другое (состав/коррозийность/влажность/др.)	
	Хладагент (вода/воздух/другой/отсутствует)	
16	Среда в шкафе управления	°С; кПа
	Расстояние до машины	м
	Источники резервного питания	
	Время работы от источников резервного питания	мин
	Нагрузка	
17	Чертеж	
18	Статическая нагрузка (радиальная)	Н; мм (место вдоль оси вала)
19	Статическая нагрузка (осевая)	Н; мм (место вдоль оси вала)
20	Динамическая нагрузка (радиальная)	Н; мм (место вдоль оси вала)
	Частота	Гц
21	Динамическая нагрузка (осевая)	Н; мм (место вдоль оси вала)
	Частота	Гц
22	Запас по динамической нагрузке (радиальной)	Н
23	Запас по динамической нагрузке (осевой)	Н
	Страхующий подшипник	
24	Поставщик/Заказчик	
25	Тип (подшипник качения/другой)	
26	Опора подшипника (упругая/жесткая)	
	Датчик скорости	
27	Поставщик/Заказчик	
28	Тип (датчик Холла/оптический датчик/другой)	

Приложение С
(справочное)

Примеры приемочных испытаний

С.1 Пример 1 (испытания по оценке запаса устойчивости)

Пример испытаний по оценке запаса устойчивости ротора в АМП приведен в ИСО 18439-3 (приложение С).

С.2 Пример 2 (испытания на вибрацию)

Пример испытаний ротора АМП на вибрацию приведен в ИСО 18439-2 (приложение А).

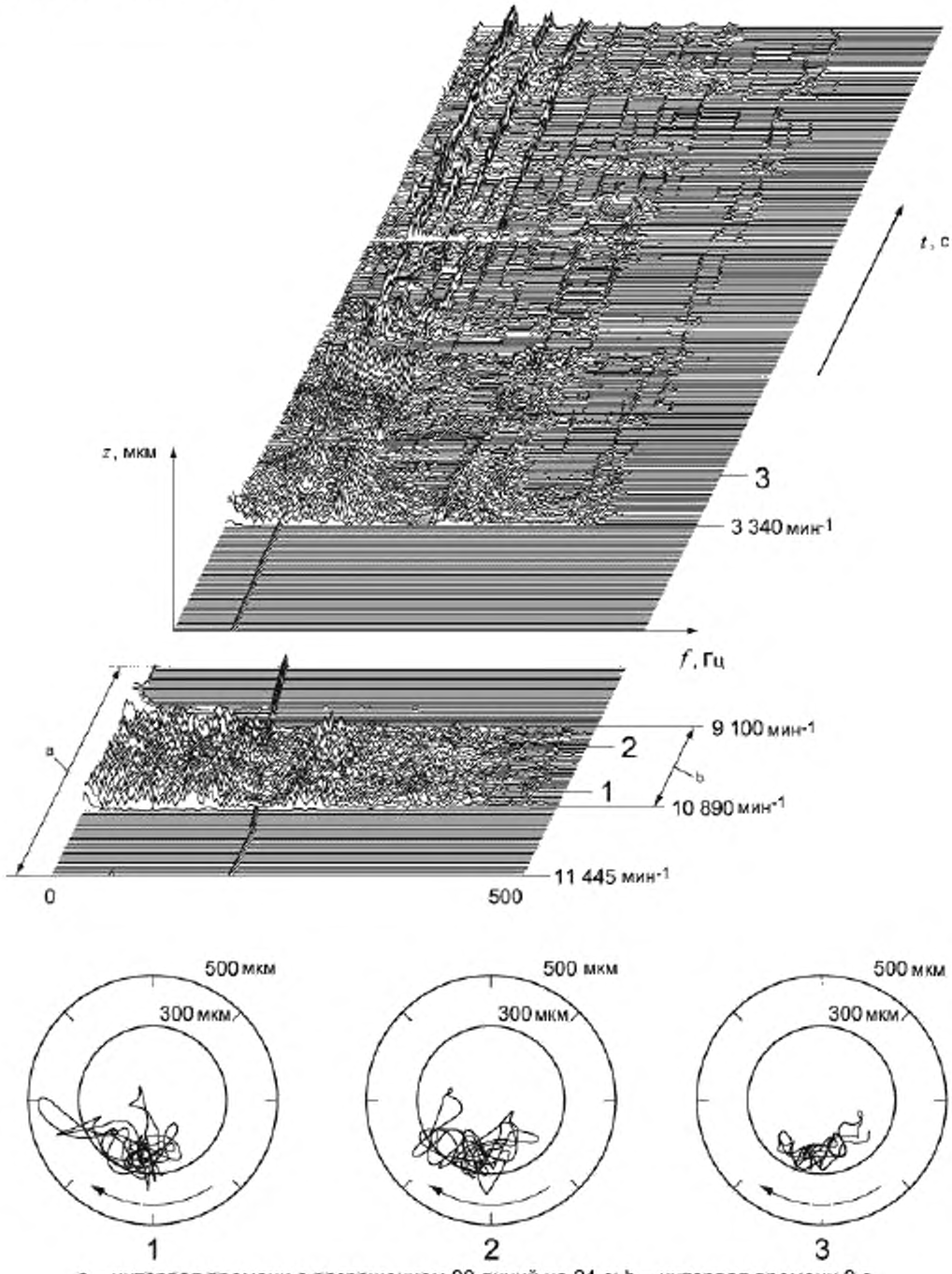
Приложение D
(справочное)

Пример испытаний на падение ротора

Поскольку в большинстве своем заводские испытания проводят для ненагруженного ротора, значение момента торможения ротора в таких испытаниях значительно меньше наблюдаемого в условиях применения машины. Поэтому замедление вращения ротора по сигналу ОСТАНОВ во время испытаний также происходит значительно медленнее. Как следствие, выделение тепла в страхующих подшипниках превышает то, что можно ожидать в условиях применения. Чтобы рост температуры страхующих подшипников во время испытаний и во время применения был приблизительно одинаков, целесообразно выбег ротора при испытаниях осуществлять в условиях частичного сохранения левитации. На рисунке D.1 приведен пример каскадного спектра, показывающего зависимость перемещения вала z, мкм, от частоты f, Гц, и времени t, с, с начала выбега, и траекторий (орбит) движения центра вала при выбеге ротора с прекращением левитации и с ее последующим восстановлением.

Как видно из верхней части рисунка D.1, на которой изображен каскадный спектр, торможение ротора началось со скорости 11445 мин$^{-1}$ с одновременным прекращением условий левитации. Спустя 9 с левитация была восстановлена и поддерживалась до достижения скорости вращения 3340 мин$^{-1}$. Потом условия левитации вновь отсутствовали до полной остановки ротора. Интервал времени, на котором условия левитации были восстановлены, был определен таким образом, чтобы согласовать максимальную температуру страхующих подшипников с наблюдаемой в условиях торможения при нормальном применении машины.

Орбиты движения ротора (нижняя часть рисунка D.1) показывают измеренные датчиком скорости перемещения ротора в радиальном направлении. Номера орбит соответствуют трем указанным на рисунке линиям каскадного спектра (трем скоростям вращения ротора). Радиус воздушного зазора в магнитном подшипнике – 500 мкм, в страхующем подшипнике – 220 мкм. Перемещения ротора за пределы 220 мкм объясняются тем, что страхующий подшипник установлен на гофрированной пружине, допускающей перемещения самого подшипника в пределах 300 мкм.



a – интервал времени с разрешением 90 линий на 24 с; b – интервал времени 9 с

Рисунок D.1 – Результаты испытаний на падение ротора

Результаты испытаний с обеспечением стабильной работы ротора при прекращении и возобновлении условий левитации подтверждают функциональные возможности страхующих подшипников и управляемость магнитным подшипником в жестких начальных условиях торможения.

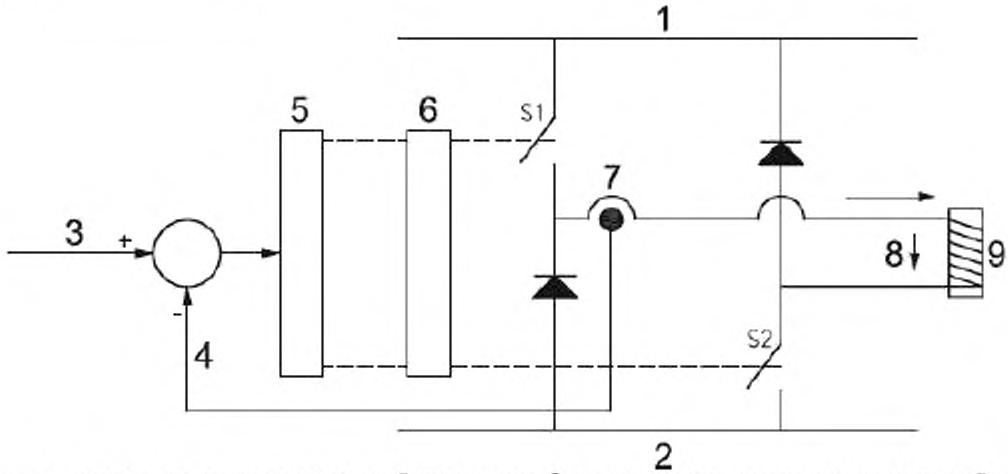
Приложение Е
(справочное)

Пример эксплуатационных ограничений АМП

Ток в катушки АМП поступает с усилителя мощности в соответствии с командой управления. Как правило, в системах управления АМП применяют усилители мощности коммутирующего типа с широтно-импульсной модуляцией. Оценку тока и напряжения в управляющих катушках выполняют в соответствии с ИСО 18439-2 (приложения А – С). Дополнительный пример рассматривается в настоящем приложении.

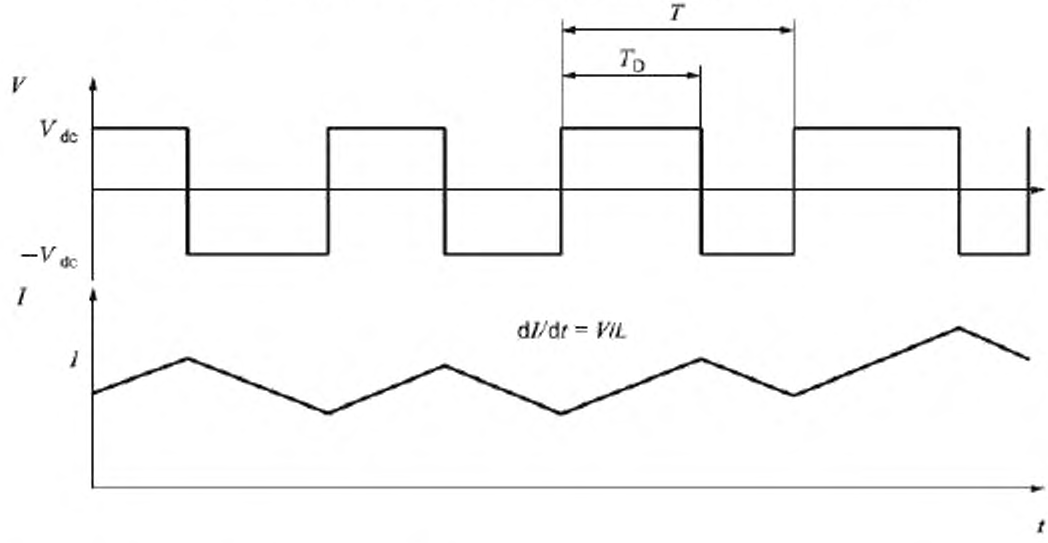
Схема управления с коммутирующим усилителем мощности показана на рисунке Е.1. В усилителе мощности команды управления преобразуются в импульсы разной длительности, управляющие коммутирующим ключом усилителя. Сигнал широтно-импульсной модуляции состоит из импульсов одинаковой высоты положительной и отрицательной полярности (отношение продолжительности импульса положительной полярности к периоду между двумя импульсами положительной полярности называют коэффициентом заполнения). Импульсу положительной полярности соответствует увеличение силы тока в управляющей катушке, а импульсу отрицательной полярности – уменьшение. На рисунке Е.2 показаны сигнал напряжения с широтно-импульсной модуляцией, поданный на управляющую катушку, и соответствующий этому сигналу ток в катушке. Поскольку на частоте коммутации сопротивление катушки имеет преимущественно индуктивный характер, приложение к катушке коммутируемого напряжения вызывает появление в ней треугольных импульсов тока. Крутизна роста (спада) силы тока определяется амплитудой напряжения и индуктивностью катушки. На рисунке Е.3 показано, как изменяется ток с изменением коэффициента заполнения. Если коэффициент заполнения равен 50 % (такой сигнал называют меандром), то средний (на периоде между двумя однополярными импульсами) ток в катушке остается постоянным. При уменьшении коэффициента заполнения средний ток в катушке уменьшается. На рисунке Е.4 показан сигнал управления с широтно-импульсной модуляцией, как если бы он был изображен на экране с функцией запоминания, позволяющей наблюдать за изменением коэффициента заполнения со временем. Когда изображение на запоминающем экране полностью «замазано» наложенными друг на друга импульсами, это означает, что коэффициент заполнения изменялся в полном диапазоне от 0 % до 100 % (на рисунке Е.4 показано изменение коэффициента заполнения в пределах 70 % полного диапазона). При коэффициенте заполнения 100 % или 0 % скорость изменения средней силы тока в катушке максимальна, и ей соответствует максимально допустимая динамическая нагрузка на подшипник. При выходе нагрузки за установленное ограничение изменения тока в катушке не будут успевать реагировать на изменения в сигнале управления, что может привести к нестабильности управления поведением ротора в АМП.

Дополнительным ограничением является максимальный ток на выходе усилителя мощности. Как показано на рисунке Е.5, в случае приложения к ротору чрезмерной нагрузки, при которой требуемый ток усилителя мощности превышает максимально возможный, в сигнале тока катушки появляются участки насыщения. Это означает, что магнитный подшипник не может поддерживать текущую нагрузку и ротор может войти в контакт со страхующим подшипником.



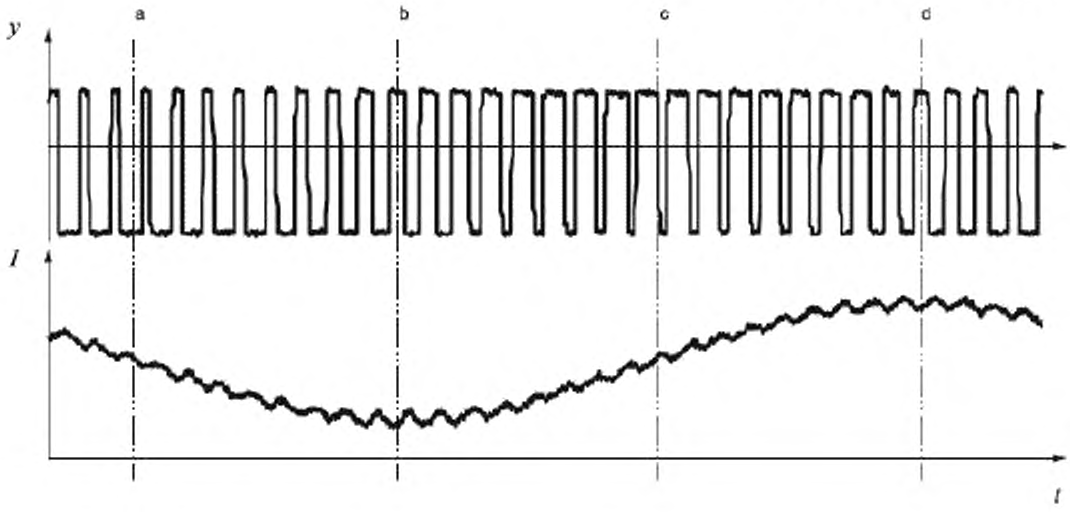
1 – шина постоянного тока положительной полярности; 2 – шина постоянного тока отрицательной полярности; 3 – задающий сигнал; 4 – сигнал положения ротора в АМП; 5 – логическое устройство управления; 6 – драйвер затвора; 7 – сигнал датчика перемещения; 8 – напряжение на катушке управления; 9 – электромагнит; S1, S2 – коммутирующие ключи

Рисунок Е.1 – Схема управления с коммутирующим усилителем мощности



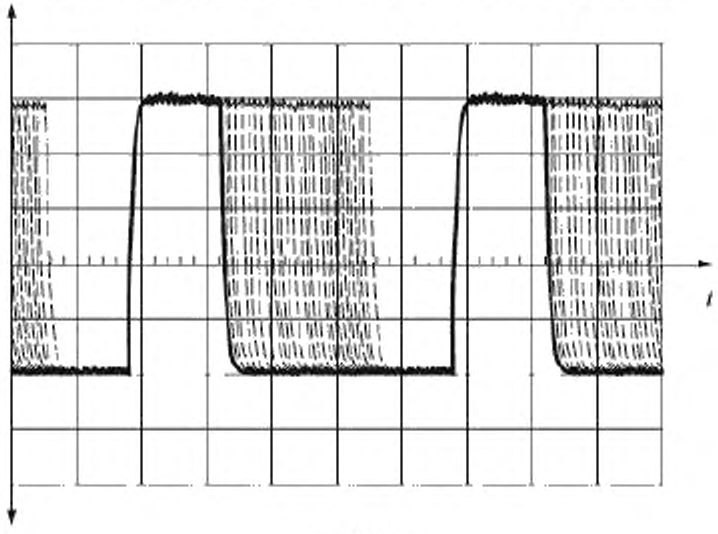
I – ток; t – время; V – напряжение; V_{dc} – амплитуда сигнала напряжения; T – период сигнала; T_D – длительность импульса (положительной полярности); L – индуктивность

Рисунок Е.2 – Сигнал напряжения с широтно-импульсной модуляцией и ток в катушке управления



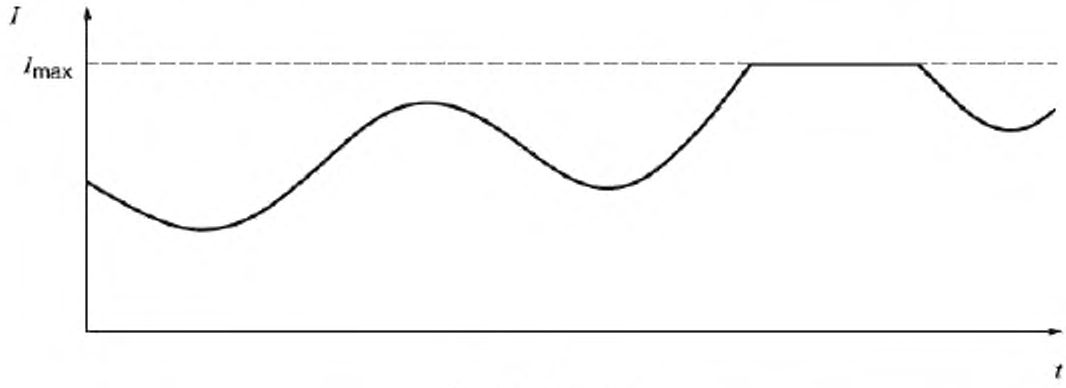
I – ток; y – сигнал управления с широтно-импульсной модуляцией; t – время; a – минимальное значение коэффициента заполнения; b – коэффициент заполнения 50 %; c – максимальное значение коэффициента заполнения; d – коэффициент заполнения 50 %

Рисунок Е.3 – Зависимость тока от коэффициента заполнения



t – время

Рисунок Е.4 – Сигнал управления с широтно-импульсной модуляцией на экране запоминающего осциллографа



I – ток; t – время

Рисунок Е.5 – Ограничения тока вследствие перегрузки магнитного подшипника

Приложение F
(справочное)

Управление дисбалансом

F.1 Стратегии управления дисбалансом ротора в АМП

Важной отличительной особенностью магнитных подшипников является принципиальная возможность активного подавления вибрации ротора, вызываемой его дисбалансом, отсутствующая при использовании подшипников качения или скольжения. Эта возможность на практике реализуется в одном из трех вариантов:

a) позволять ротору вращаться вокруг собственной оси инерции в пределах, ограниченных зазором ротора в подшипнике;

b) компенсировать неуравновешенные силы, действующие на ротор на частоте его вращения, с соответствующим снижением вибрации ротора в точках измерений;

c) использовать дополнительное демпфирование на частоте вращения ротора при ее прохождении через критическую частоту вращения.

Перечисленные стратегии управления дисбалансом приведены в таблице F.1 с указанием их наиболее важных технических особенностей и преимуществ.

Таблица F.1 – Стратегии управления дисбалансом АМП

Стратегия	Наименование метода по ИСО 14839-1	Свойства метода
Подавление реакции подшипника на частоте вращения ротора	Управление с подавлением дисбаланса	– ограничивает реакцию подшипника на частоте вращения; – уменьшает вибрацию корпуса подшипника; – снижает шум, излучаемый машиной; – снижает риск насыщения усилителя мощности; – снижает потребление электроэнергии подшипником; – не требует больших затрат на внедрение; – неприменим при необходимости прохождения ротором критических скоростей изгибных колебаний
Подавление вибрации ротора, обусловленной дисбалансом	Управление с компенсацией дисбаланса	– уменьшает вибрацию ротора за счет генерирования компенсирующей силы; – в областях критических скоростей изгибных колебаний ротора и при большом остаточном дисбалансе ротора предъявляет повышенные требования к диапазону усилителя мощности и генерируемым силам; – обеспечивает высокую точность положения ротора
Генерирование силы демпфирования	–	– ограничивает пики частотной характеристики ротора (важно при прохождении через критические скорости вращения ротора); – при большом остаточном дисбалансе ротора предъявляет повышенные требования к диапазону усилителя мощности и генерируемым силам

F.2 Применение стратегий управления дисбалансом

Общей чертой всех стратегий управления дисбалансом в АМП является формирование в цепи управления сигнала на частоте вращения ротора, а разница между ними заключается в том,

a) как компенсирующие сигналы генерируются;

b) в каком месте цепи управления эти сигналы вводятся;

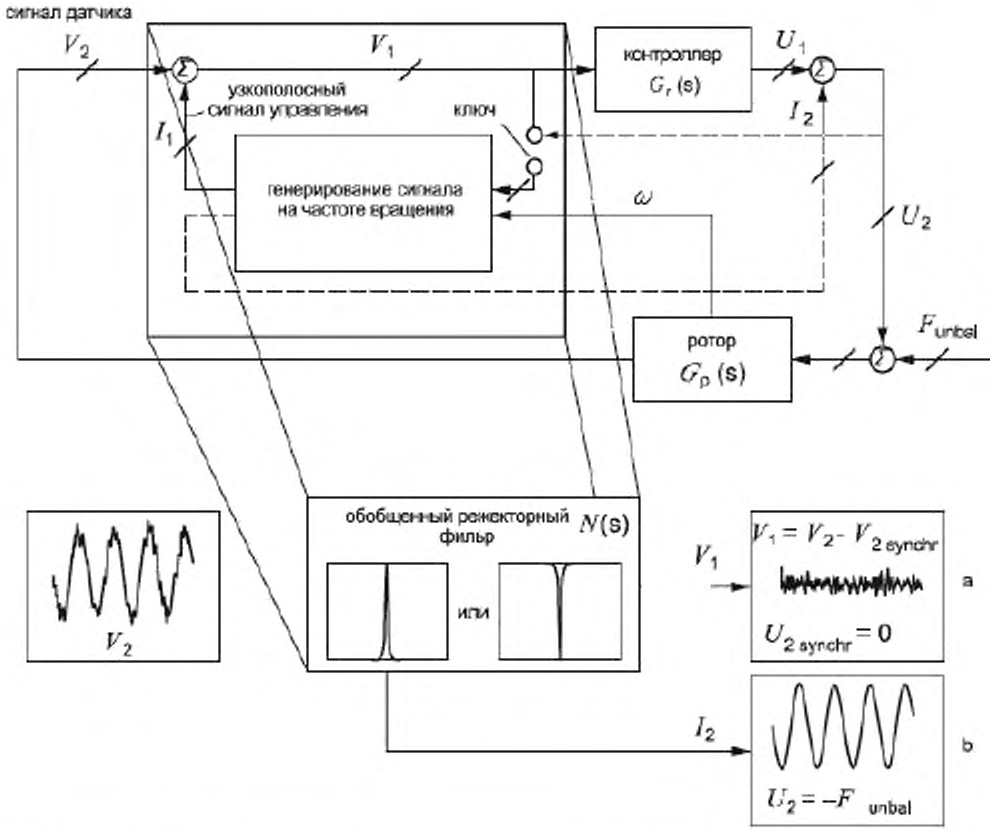
c) какая адаптивная процедура подстройки компенсирующего сигнала под неизвестный дисбаланс ротора используется.

На рисунке F.1 многоканальная схема управления дисбалансом представлена в обобщенном виде.

Все указанные в таблице F.1 методы (линейные или нелинейные, с постоянными или переменными параметрами) основаны на общем принципе включения в цепь управления «черного ящика» с неизвестными характеристиками, описывающими динамическое поведение ротора. С математической точки зрения все эти методы могут рассматриваться как реализация обобщенного режекторного

фильтра (см. рисунок F.1) с очень узкой частотной характеристикой, позволяющей из широкополосного сигнала перемещения или тока генерировать управляющий сигнал на частоте вращения ротора.

Как видно из рисунка F.1, точку ввода управляющего узкополосного сигнала можно без потери общности расположить либо на входе, либо на выходе контроллера. Для схемы управления с подавлением дисбаланса предпочтительнее, чтобы узкополосный сигнал управления поступал на вход контроллера I_1, а не на его выход I_2. Особенно это справедливо в случае цифрового управления, поскольку составляющая, синхронизованная с вращением ротора, вырезается из общего сигнала управления V, и если это сделать до входа в контроллер, то алгоритмы обработки сигнала контроллером будут реализованы с большей точностью.



/ – каналы входов и выходов системы управления; – — — — – альтернативный путь сигнала управления; $V_{2synchr}$ – составляющая V_2 на частоте вращения; $U_{2synchr}$ – составляющая U_2 на частоте вращения

[a] Сигнал в методе управления с подавлением дисбаланса.
[b] Сигнал в методе управления с компенсацией дисбаланса.

Рисунок F.1 – Схема многоканальной цепи управления АМП

В случае использования метода подавления дисбаланса на выходе обобщенного режекторного фильтра появляется компенсационный сигнал I_1 или I_2 такой, что общий сигнал управления U_2 не содержит составляющей на частоте вращения ротора. Это позволяет ротору вращаться вокруг своей оси инерции, но при этом силы, обусловленные дисбалансом ротора, не вызывают изменений тока в катушке управления и, тем самым, не вызывают появления сил реакции и вибрации корпуса подшипника (см. сноску [a] к рисунку F.1). Напротив, при использовании метода коррекции дисбаланса выходной сигнал обобщенного режекторного фильтра обеспечивает получение общего сигнала управления

U_2 и, соответственно, генерируемой в соответствии с этим сигналом магнитной силы, которая действует на ротор противоположно силе F_{unbal}, обусловленной дисбалансом. В результате снижается вибрация ротора, обусловленная дисбалансом (см. сноску [b] к рисунку F.1).

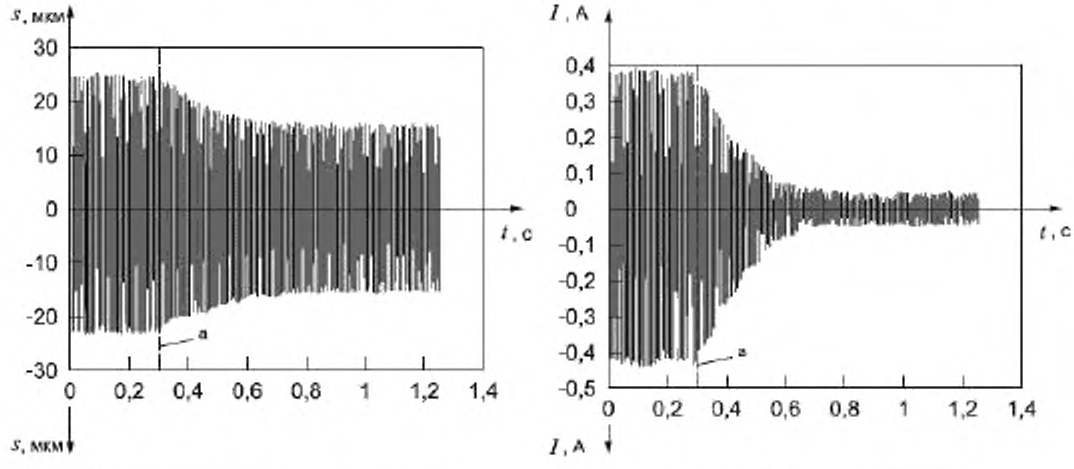
Обычно управление дисбалансом активизируется в момент достижения ротором определенной скорости вращения и после этого сохраняется при достижении ротором рабочей скорости. Скорость, при которой активизируется управление, может находиться ниже скоростей, связанных с резонансами по модам колебаний ротора как жесткого тела, что облегчит прохождение ротора через резонанс.

F.3 Пример управления дисбалансом

На рисунке F.2 показан типичный вид переходных процессов в сигнале перемещения и в токе ротора после активизации системы управления по методу подавления дисбаланса (в котором предпочтение отдается сведению до минимума не вибрации ротора, а реакции подшипниковой опоры).

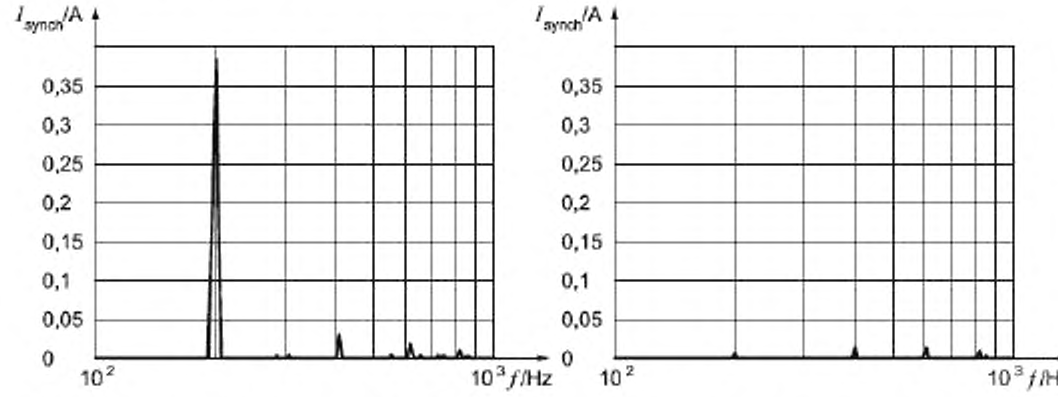
Как видно из рисунка 2 [c) и d)], составляющая тока в катушке на частоте вращения ротора после активации системы управления упала почти до нуля (оставшийся сигнал обусловлен шумом в цепях измерения и управления). Как следствие, действующие на подшипник и передающиеся в фундамент силы, обусловленные дисбалансом ротора, и излучаемый машиной шум также значительно снижаются по сравнению с тем, что было бы без применения системы управления дисбалансом.

Рисунок 2 [a) и b)] отражает типичную ситуацию, когда управление с подавлением дисбаланса не только уменьшает составляющую тока на частоте вращения, но одновременно и уменьшает перемещение ротора на этой частоте. В общем случае в зависимости от машины, ее скорости и системы управления при активизации управления дисбалансом снижаются либо перемещение ротора на частоте его вращения, либо ток в катушке управления на частоте вращения ротора, либо то и другое вместе.



a) радиальное перемещение ротора

b) ток в катушке управления



c) Фурье-спектр тока подшипника до активации управления дисбалансом

d) Фурье-спектр тока подшипника после активации управления дисбалансом

f – частота; I – ток подшипника; I_{synch} – ток подшипника на гармониках частоты вращения ротора; s – радиальное перемещение ротора; t – время; a – точка активации управления дисбалансом

Примечание – Частота вращения ротора – 200 Гц.

Рисунок F.2 – Результаты измерений при активации системы управления по методу подавления дисбаланса

F.4 Свойства и ограничения управления дисбалансом

F.4.1 Требования к устойчивости процесса управления

Амплитуда узкополосного сигнала управления с обобщенного режекторного фильтра должна подстраиваться под распределение дисбаланса вдоль оси ротора, которое к тому же, возможно, изменяется со временем. Этот процесс должен обладать устойчивостью. Условия устойчивости сильно зависят от конфигурации системы управления и скорости вращения ротора.

F.4.2 Прохождение критических скоростей изгибных колебаний ротора

Если при работе машины ротор должен проходить области критических скоростей изгибных колебаний, то используют метод управления с компенсацией дисбаланса или метод генерирования силы демпфирования. Метод управления с подавлением дисбаланса не используют.

F.4.3 Режим насыщения усилителя мощности

Применение метода управления с компенсацией дисбаланса для сведения к минимуму радиальной вибрации ротора на частоте вращения требует создания исполнительным устройством АМП значительных сил, что может привести к режиму насыщения усилителя мощности. В случае реализации метода управления с подавлением дисбаланса можно использовать усилитель с меньшей реактивной мощностью.

F.4.4 Управления дисбалансом на разных скоростях вращения

Управления с компенсацией дисбаланса и с подавлением дисбаланса применимы в широком диапазоне скоростей вращения ротора, начиная с нулевой скорости и до критических скоростей колебания ротора как твердого тела. Схему с генерированием демпфирующей силы используют обычно только в областях критических скоростей изгибных колебаний ротора.

F.4.5 Управление ротором, вращающимся по эллиптической орбите

Раздельное управление дисбалансом по разным парам полюсов статора позволяет уменьшить радиальные колебания ротора, вращающегося по эллиптической орбите.

F.4.6 Управление колебаниями ротора в осевом направлении

Система управления дисбалансом применима также для снижения осевых колебаний ротора, поскольку в этих колебаниях часто встречается составляющая на частоте вращения ротора.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных международных стандартов национальным стандартам Российской Федерации и действующим в этом качестве межгосударственным стандартам

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
ИСО 1940-1	IDT	ГОСТ ИСО 1940-1–2007 «Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса»
ИСО 14839-1:2002	IDT	ГОСТ Р ИСО 14839-1–2011 «Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 1. Термины и определения»
ИСО 14839-2:2004	IDT	ГОСТ Р ИСО 14839-2–2011 «Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 2. Оценка вибрационного состояния»
ИСО 14839-3:2006	IDT	ГОСТ Р ИСО 14839-3–2013 «Вибрация. Вибрация машин вращательного действия с активными магнитными подшипниками. Часть 3. Определение запаса устойчивости»

Примечание – В настоящей таблице использовано следующее условное обозначение степени соответствия стандартов:
IDT – идентичные стандарты.

Библиография

[1] ISO 2041, Mechanical vibration, shock and condition monitoring – Vocabulary
[2] ISO 10438-1, Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Lubrication, shaft-sealing and control-oil systems and auxiliaries – Part 1: General requirements[1)]
[3] ISO 10439 (all parts), Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Axial and centrifugal compressors and expander-compressors[2)]
[4] ISO 13372, Condition monitoring and diagnostics of machines – Vocabulary
[5] ISO 13373-1, Condition monitoring and diagnostics of machines – Vibration condition monitoring – Part 1: General procedures
[6] ISO 17359, Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines
[7] IEC 60721-3-1, Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 1: Storage
[8] IEC 60721-3-2, Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 2: Transportation
[9] IEC 60721-3-3, Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at weatherprotected locations
[10] IEC 60721-3-4, Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 4: Stationary use at non-weatherprotected locations
[11] IEC 60721-3-5, Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities — Section 5: Ground vehicle installations
[12] IEC 60721-4-1, Classification of environmental conditions – Part 4-1: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Storage
[13] IEC 60721-4-2, Classification of environmental conditions – Part 4-2: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Transportation
[14] IEC/TR 60721-4-3, Classification of environmental conditions – Part 4-3: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Stationary use at weatherprotected locations
[15] IEC/TR 60721-4-4, Classification of environmental conditions – Part 4-4: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Stationary use at non-weatherprotected locations
[16] IEC 60721-4-5, Classification of environmental conditions – Part 4-5: Guidance for the correlation and transformation of environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Ground vehicle installations
[17] IEC 60079-0, Explosive atmospheres – Part 0: Equipment – General requirements
[18] IEC 60079-1, Explosive atmospheres – Part 1: Equipment protection by flameproof encloures "d"
[19] IEC 60079-2, Explosive atmospheres – Part 2: Equipment protection by pressurized enclosure "p"
[20] IEC 60079-5, Explosive atmospheres – Part 5: Equipment protection by powder filling "q"
[21] IEC 60079-6, Explosive atmospheres – Part 6: Equipment protection by oil immersion "o"
[22] IEC 60079-7, Explosive atmospheres – Part 7: Equipment protection by increased safety "e"
[23] IEC 60079-10-1, Explosive atmospheres – Part 10-1: Classification of areas – Explosive gas atmospheres
[24] IEC 60079-10-2, Explosive atmospheres – Part 10-2: Classification of areas – Combustible dust atmospheres
[25] IEC 60079-11, Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "i"
[26] IEC 60079-18, Explosive atmospheres — Part 18: Equipment protection by encapsulation "m"
[27] IEC 60079-20-1, Explosive atmospheres – Part 20-1: Material characteristics for gas and vapour classification – Test methods and data
[28] IEC 60085, Electrical insulation – Thermal evaluation and designation

---

[1)] Соответствует стандарту API 614, Lubrication, shaft-sealing and oil-control systems and auxiliaries.
[2)] В результате пересмотра ISO 10439:2002 должен быть опубликован в четырех частях. Соответствует стандарту API 617, Axial and centrifugal compressors and expander-compressors for petroleum, chemical and gas industry services.

УДК 534.322.3.08:006.354 ОКС 17.160

Ключевые слова: активные магнитные подшипники, техническое руководство, влияющие факторы, страхующие подшипники, испытания, контроль

Подписано в печать 02.03.2015. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 5,12. Тираж 36 экз. Зак. 788.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»

123995 Москва, Гранатный пер., 4.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru