

*Д-р техн. наук Д.М. Вейнберг, д-р техн. наук В.П. Верещагин,
канд. техн. наук А.П. Сарычев*

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ДЛЯ ГАЗОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Более 40 лет в НПП ВНИИЭМ проводятся работы по научным исследованиям и промышленному освоению электромагнитных подшипников (МП). Первые работы были связаны с использованием МП в различных роторных машинах для КА, включая шаровой электродвигатель-маховик и силовой гироскоп для управления ориентацией орбитальных станций «Алмаз» и «Мир» [1, 2]. На основе этих работ в дальнейшем были созданы МП для высокоскоростных электрошпинделей, для турбодетандеров и других машин, где применение МП, несмотря на их относительно высокую стоимость по сравнению с традиционными подшипниками, оказывается целесообразным.

В течение последних 10-ти лет МП стали широко применять для замены масляных подшипников в крупных компрессорах природного газа на магистральных газопроводах. В сочетании с газодинамическими уплотнениями это позволяет избавиться от безвозвратных потерь масла и отказаться от сложного и громоздкого оборудования масляных подшипников, повысить к.п.д. компрессора за счет снижения трения в подшипниках, улучшить эксплуатационное обслуживание компрессора, поскольку в МП нет деталей, подверженных механическому износу. Перечисленные факторы и существующий положительный опыт разработки МП для других отраслей техники явились причиной повышенного интереса основных мировых производителей компрессоров природного газа к этому типу подшипников.

В процессе создания отмеченных выше типов устройств в НПП ВНИИЭМ сформировано самостоятельное научное направление по проектированию и исследованию роторных машин с МП. Некоторые из основных положений и аспектов этого направления неоднократно рассматривались в научных трудах [3]. Большинство научно-технических решений, включающих результаты теоретических и экспериментальных исследований, имеют общий характер и мо-

гут быть использованы при разработке МП агрегатов различного назначения, включая компрессоры природного газа.

Вместе с этим, существует ряд специфических теоретических и экспериментальных задач, которые связаны с конструктивными особенностями или условиями эксплуатации конкретных агрегатов. К числу таких задач относятся научно-технические проблемы, возникшие при создании МП для новых компрессоров газоперекачивающих агрегатов типа ГПА-16 и ГПА-12, изготовленных Казанским компрессорным заводом, и компрессора типа PCL-603, изготовленного итальянской фирмой Нуово Пиньоне. По сравнению с аналогичными компрессорами газоперекачивающих агрегатов ГПА-Ц-16, изготовленными на Сумском машиностроительном НПО и успешно работающими на компрессорных станциях ПО «Самаратрансгаз», эти новые компрессоры отличаются тем, что работают в режимах, при которых частота вращения может совпадать с частотой первой формы упругих колебаний ротора. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании МП и принимать ряд дополнительных мер по повышению демпфирующих свойств и снижению на этих критических частотах влияния упругих колебаний ротора на систему управления подшипниками компрессора.

Сравнительные характеристики упругих свойств роторов газоперекачивающих агрегатов приведены в таблице.

Характеристика	ГПА-Ц-16	ГПА-16	ГПА-12	PCL-603
Диапазон рабочих скоростей, об/мин	4100-4900	3700-5600	4500-6900	4500-7200
(Гц)	(68-82)	(62-93)	(75-114)	(75-120)
Частота упругих колебаний ротора, Гц				
1 форма	120	70	82	80
2 форма	180	171	208	160
3 форма	230	310	344	300

Обычно параметры системы управления подшипниками выбираются так, чтобы собственные частоты прямых и угловых колебаний ротора, соответствующие его движению в МП как твердого тела, активно демпфировались усилиями МП, составляющими не менее, чем 50% от основного центрирующего усилия. В связи с

этим в процессе разгона ротора до рабочей скорости вращения при прохождении резонансных точек, соответствующих этим собственным частотам, наблюдается не более, чем двукратное увеличение уровня колебаний ротора. Поскольку это временное увеличение колебаний ротора, то нет необходимости в еще большем усилении демпфирования для уменьшения их уровня, так как это сопряжено со снижением помехозащищенности системы управления или соответственно жесткости МП.

Сложнее осуществить демпфирование упругих колебаний ротора. Особенно при такой конструкции ротора, когда частота первой упругой формы находится в диапазоне рабочих скоростей вращения и происходит резкое увеличение амплитуды колебаний ротора на этой частоте. Для обеспечения активного демпфирования этих колебаний с помощью МП, прежде всего необходимо, чтобы радиальные МП не были расположены в узлах 1-й упругой формы и их воздействие на эту форму было достаточно эффективным. Кроме того, параметры системы управления следует выбирать так, чтобы и на этой критической частоте сохранялось 30-градусное опережение по фазе усилия, создаваемого МП, по отношению к отклонению ротора. В результате при существующей точности изготовления и балансировки ротора можно добиться, чтобы амплитуды колебания ротора в рабочем диапазоне частот вращения не превышали нормы, установленной для этого типа компрессоров, 70 мкм.

При обеспечении этих требований и соответствующей вариации параметров следует учитывать, что принимаемые в данном случае меры по снижению жесткости МП лимитированы динамическими нагрузками, действующими на ротор в эксплуатационных режимах. С другой стороны, связанное с улучшением демпфирования увеличение коэффициента усиления системы управления МП на этих частотах может привести к возбуждению ближайших более высоких тонов упругих форм колебаний ротора. Кроме того, могут существенно возрасти требования к точности механической обработки и балансировки ротора.

На основе анализа комплекса перечисленных научно-технических проблем и для расширения поиска компромиссных решений при создании МП новых компрессоров ГПА-16, ГПА-12 и РСЛ-603 в их конструкции, показанной на рис. 1, предусмотрена возможность наиболее эффективного демпфирования 1-й формы упругих колебаний за счет расположения радиальных МП по концам вала и размещения датчиков положения в различных точках по длине ротора. При такой компоновке для работы в системе управления МП можно использовать датчики с наиболее благоприятным

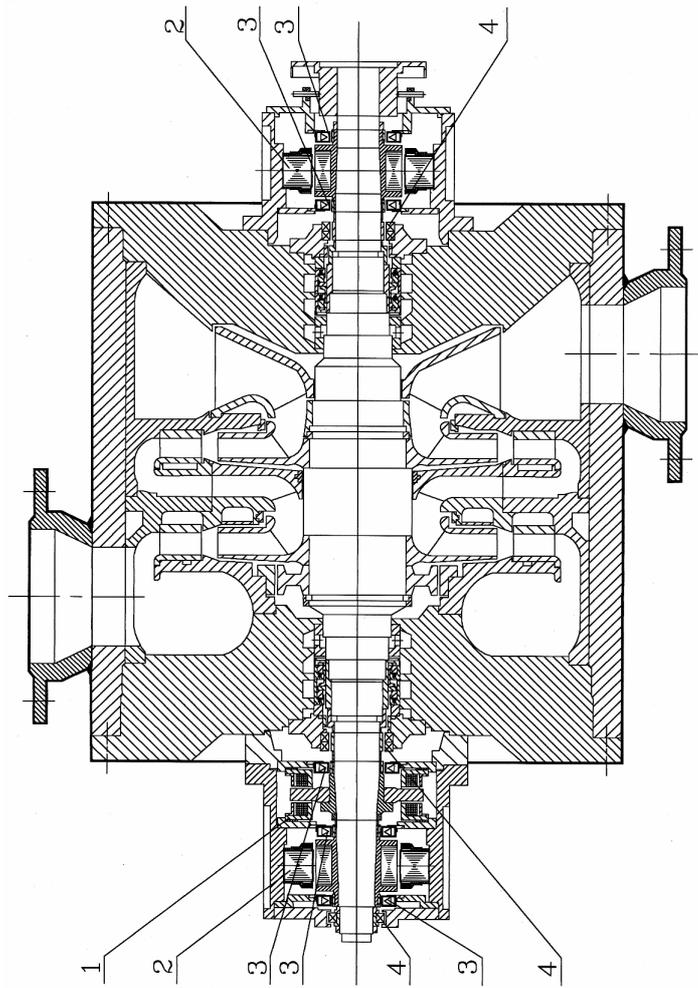


Рис. 1. Конструкция компрессора с МП:
 1 – осевой подшпик; 2 – радиальный подшпик; 3 – датчик
 положения ротора; 4 – страховочный подшпик

соотношением уровней колебаний ротора для различных упругих форм или путем суммирования показаний нескольких датчиков добиться существенного снижения влияния высших упругих форм.

Для пояснения на рис. 2 представлено изменение уровня упругих колебаний по длине ротора для первых трех форм и указаны места расположения датчиков перемещений S1-S5 и электромагнитов M1, M2. Из этого рисунка видно, что в данном случае коэффициент воздействия электромагнитов M1 и M2 на 1-ю форму достаточно высок. По уровню влияния этой формы упругих колебаний на систему управления минимум имеют датчики S3 и S4, расположенные ближе других к узлам колебаний. При необходимости увеличения демпфирующих воздействий возможно использование других датчиков, имеющих большие коэффициенты для этой формы, если не возникает иных ограничений в системе управления. Для снижения влияния 2-й формы упругих колебаний можно использовать суммарный сигнал датчиков S2+S3 и S4+S5, у которых коэффициенты этой формы имеют разные знаки и будут вычитаться.

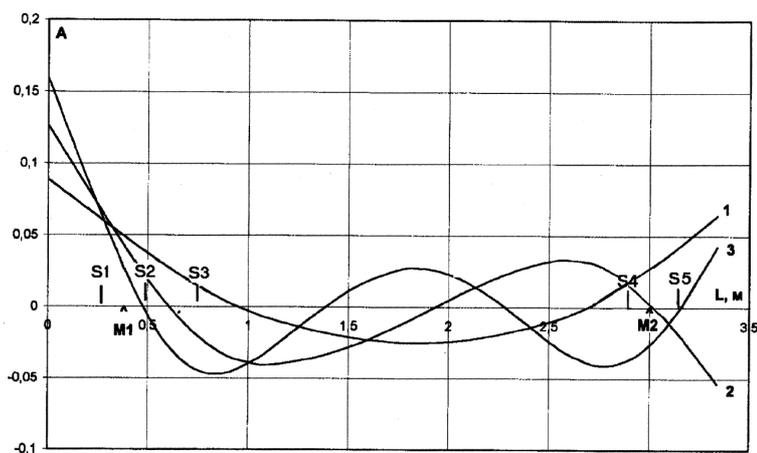


Рис. 2. Форма упругих колебаний

При внесении некоторых изменений в условия работы, например при соединении компрессора с приводом через муфты и промежуточный вал, картина распределения упругих колебаний ротора изменяется и может потребоваться подключение к системе управления МП других датчиков. Как показала практика стендовых испытаний компрессоров с МП, применение данного способа снижения влияния упругих колебаний ротора для обеспечения требований по уровню вибраций и надежного функционирования

ваний по уровню вибраций и надежного функционирования МП, несмотря на некоторую избыточность датчиков в компрессоре, является перспективным, особенно при создании экспериментальных компрессоров с МП.

Испытания новых компрессоров ГПА-16, ГПА-12 и PCL-603 с МП, проведенные на стендах Казанского компрессорного завода и фирмы Нуово Пиньоне, подтвердили возможность применения МП для обеспечения длительной и надежной работы компрессора в различных режимах, в т.ч. при скоростях вращения, совпадающих с частотой упругих колебаний ротора. Благодаря свойству активного демпфирования колебаний ротора в определенном частотном диапазоне, МП позволяют добиться существенного снижения уровня вибрации ротора на критических частотах. Как следует из амплитудно-частотной характеристики системы МП, представленной на рис.3, разработанные в НИИ ВНИИЭМ методы выбора параметров системы управления позволяют получить в рабочем диапазоне частот удовлетворительные динамические свойства. Уровень имеющегося подъема на критической частоте, соответствующей первому тону упругих колебаний ротора, при существующей технологии балансировки в процессе работы компрессора не вызывает резкого увеличения амплитуды колебаний на этой частоте.

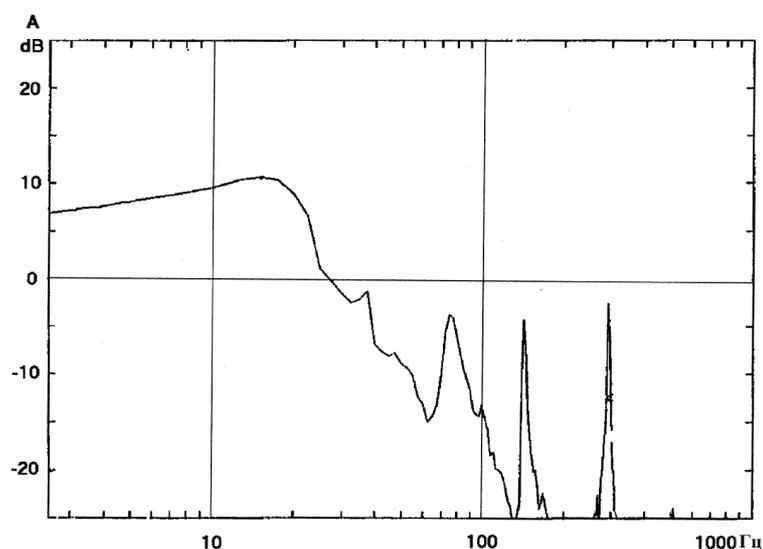


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика системы управления МП

Кроме того, в процессе стендовых испытаний возникает необходимость в проведении проверок компрессора автономно и при соединении с приводом. В этом случае из-за изменения упругих свойств ротора возникает проблема с обеспечением стабильной работы системы МП. Для решения этой проблемы и исключения вынужденной корректировки параметров системы управления оказывается удобнее воспользоваться дополнительными датчиками перемещения, расположенными в различных местах по длине ротора. В целом это упрощает процедуру испытаний компрессора и сокращает их продолжительность.

В настоящее время на компрессорной станции «Помарская» магистрального газопровода вводится в эксплуатацию ГПА-16 «Волга» с МП. Общий вид компрессора этого агрегата показан на рис.4.

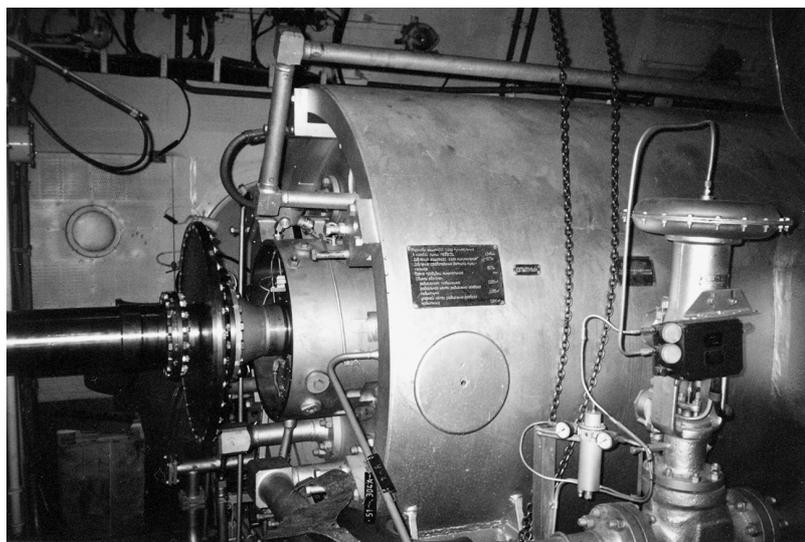


Рис. 4. Компрессор ГПА-16 с МП

В процессе создания МП для компрессоров этого типа выполнен достаточно большой объем совместных проектно-исследовательских работ по выбору оптимальных научно-технических решений как по конструкции компрессора с МП в целом, так и по обеспечению необходимых динамических свойств МП. Разработан комплекс взаимных технических требований, позволивший на межотраслевом уровне осуществить, с одной стороны, изготовление, испытания и поставку МП, а с другой стороны,

их установку и совместные испытания в собранном компрессоре. Некоторые наиболее интересные научно-технические аспекты управления МП с учетом упругих свойств ротора, рассмотренные в данной работе, могут быть использованы при создании МП различных машин с гибкими роторами.

Выводы

1. В результате решения комплекса научно-технических задач в НИИ ВНИИЭМ созданы МП для новых газовых компрессоров с гибкими роторами.

2. Применение МП, обладающих свойством активного демпфирования упругих колебаний ротора, позволяет снизить уровень вибрации и длительно работать на критических скоростях при совпадении частоты вращения с собственной частотой упругих колебаний ротора.

3. Для эффективного демпфирования упругих колебаний ротора 1-й изгибной формы МП предпочтительно размещать ближе к концам вала и использовать датчики перемещения, расположенные по длине ротора в различных местах по отношению к узлам соответствующих форм упругих колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силовой гироскоп с электромагнитными подшипниками для управления ориентацией орбитальных станций / Шереметьевский Н.Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Космические исследования. 1983. Т. XXI. Вып.1.

2. Электромеханические исполнительные органы с магнитными опорами для управления ориентацией космических станций / Стома С.А. и др. // Космический бюллетень. 1995. Т.2. № 1.

3. Труды ВНИИЭМ. М.: 1989. Т.89.