

УДК 621.313

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ В ФГУП «НПП ВНИИЭМ»

Л.А. Макриденко, А.П. Сарычев,  
В.П. Верещагин, А.В. Рогоза  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены основные этапы развития электромагнитных подшипников, которые применяются в различных разработках ФГУП «НПП ВНИИЭМ» в области космической техники и для газовой промышленности. Проведен анализ главных научно-технических задач, характеризующих научный уровень и результаты выполненных разработок. Представлено сравнение некоторых технических характеристик электромагнитных подшипников, разработанных в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» для газоперекачивающих агрегатов, с образцами ряда зарубежных фирм. Приведенные данные свидетельствуют о соответствии разработок ФГУП «НПП ВНИИЭМ» в области электромагнитных подшипников современному мировому уровню. Перспективным является расширение объема производства электромагнитных подшипников для газовой промышленности и разработка новых образцов для крупных энергетических установок и космической техники.*

**Ключевые слова:** электромагнитные подшипники, задачи разработки, области применения, технические характеристики.

Около 50-ти лет охватывает история развития электромагнитных подшипников (ЭМП) в ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Возникло это новое направление в начале 60-х годов прошлого столетия в связи с поиском технического решения для подвеса ротора шарового электродвигателя-маховика, применение которого в электромеханических системах ориентации космических аппаратов являлось перспективным. В то время в мировой практике были известны работы Д. Бимса [1] по практическому применению одноосного электромагнитного подвеса – небольшого стального шарика массой несколько грамм для лабораторных целей. Однако в аппаратуре управления током электромагнита использовались электронные лампы, поэтому она была очень громоздкой и не могла быть использована в космической технике. Вместе с тем бурное развитие полупроводниковой элементной базы создавало предпосылки к разработке компактной и надежной аппаратуры для управления электромагнитным подвесом. В связи с этим было принято решение о проведении исследований по оценке практической возможности создания электромагнитного подвеса для шарового электродвигателя-маховика (ШДМ). В результате был разработан и испытан лабораторный образец ШДМ с электромагнитным подвесом ротора, предназначенный для оценки возможной замены трех одноосных маховиков электромеханической системы ориентации КА «Омега», являвшегося предшественником серии КА «Метеор». Положительные результаты испытаний этого образца ШДМ подтвердили воз-

можность и перспективность применения электромагнитного подвеса в ШДМ систем ориентации крупных КА. Это совпало с тенденцией в космической технике, направленной на повышение технической оснащенности КА и, соответственно, с увеличением габаритов и массы создаваемых КА. Для электромеханической системы ориентации крупного отечественного КА типа «Алмаз» в 1972 г. ВНИИЭМ разработал и изготовил уникальный и первый в мировой практике ШДМ с электромагнитным подвесом ротора массой 60 кг. Общий вид ШДМ представлен на рис. 1, а основные технические характеристики даны в табл. 1.

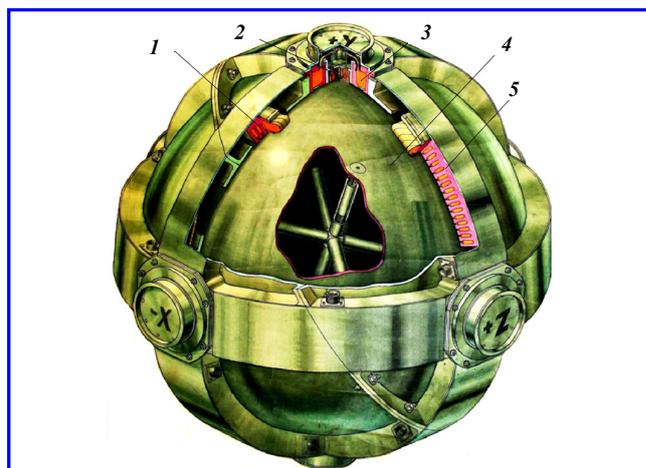


Рис. 1. Шаровой электродвигатель-маховик: 1 – тахометрическая обмотка; 2 – индуктивный датчик зазора; 3 – электромагнит; 4 – шаровой ротор-маховик; 5 – статорная обмотка

Таблица 1

Характеристика	Алмаз	МИР
Тип устройства	ШДМ	Гиродина
Кинетический момент, Н·м·с	200	1000
Управляющий момент, Н·м	3	200
Диаметр ротора, мм	600	400
Масса ротора, кг	60	40
Скорость вращения ротора, об/мин	600	10000
Потребляемая мощность, Вт	40	90
Масса (включая электронную систему управления), кг	230	165

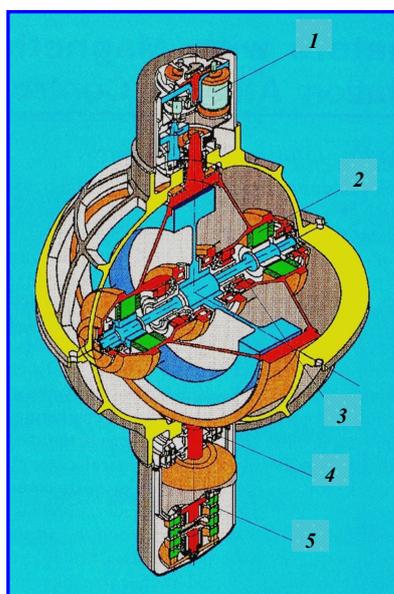


Рис. 2. Двухступенной гироскоп-гиродина: 1 – привод прецессии; 2 – электромагнитный подшипник; 3 – привод ротора; 4 – датчик угла; 5 – токосъёмник

Для создания совершенно нового типа электро-механического исполнительного органа систем ориентации крупных КА с электромагнитным подвесом шарового ротора потребовалось решить ряд важных научно-технических проблем электромеханики.

Было проведено исследование и моделирование электромеханических процессов, возникающих при управлении пространственным вращением шарового ротора. Некоторые результаты этих исследований, опубликованные в [2], могут представлять интерес при решении ряда специфических задач теории электрических машин.

Был создан первый в мировой практике промышленный образец электромагнитного подвеса для космических целей.

Только теперь по-настоящему можно оценить большое значение разработки ШДМ для развития нового научного направления во ВНИИЭМ, связанного с созданием электромагнитных подшипников для различных областей техники.

Комплекс научно-технических задач, решенных при создании ШДМ для крупных КА типа «Алмаз», был рассмотрен на ВЭЛК в 1977 г. [3], а действующий образец ШДМ демонстрировался на Международной выставке «Электро-77». Все это вызвало большой интерес и получило высокую оценку ведущих фирм и специалистов.

**Коллектив ВНИИЭМ занял лидирующее положение в мире в области разработки уникальных электромеханических исполнительных органов для управления ориентацией крупных КА и по освоению промышленного изготовления электромагнитного подвеса.**

В итоге основная роль ШДМ в общем процессе развития ЭМП заключается в том, что впервые было осуществлено промышленное изготовление этого типа бесконтактных опор и, несмотря на их относительную техническую сложность, доказана возможность перехода от теоретических и лабораторных исследований к промышленной реализации.

Кроме того основная научная деятельность ВНИИЭМ в конце 70-х годов XX в. в области магнитного подвеса была связана с поиском возможных вариантов исполнения магнитных подшипников. Исследования различных типов бесконтактных опор (на постоянных магнитах, индукторного типа и электромагнитных), проведенные во ВНИИЭМ, показали, что предпочтение следует отдать электромагнитным подшипникам. Некоторые результаты этих исследований опубликованы в Известиях Академии наук СССР [4].

В начале 80-х годов XX в. было принято решение о применении в двухступенных силовых гироскопах-гиродинах системы ориентации орбитальной станции «Мир» электромагнитных подшипников для быстровращающихся роторов. Общий вид гиродина показан на рис. 2, а основные технические характеристики приведены в табл. 1.

Создание ЭМП для гиродинов потребовало новых подходов к анализу происходящих электромеханических процессов и к синтезу ЭМП как отдельного устройства, так и в составе гиродина в целом. Поскольку ЭМП представляет собой замкнутую систему автоматического управления

(САУ), обеспечивающую центрирование ротора относительно статора (электромагнита), то следует рассмотреть отдельные её звенья.

Электромагниты, выполняющие роль исполнительных органов САУ ЭМП, являются нелинейными звеньями, связывающими ток управления в катушках электромагнитов с создаваемыми усилиями, воздействующими на ротор. Ротор, как объект управления САУ, представляет сложную механическую систему, обладающую не только гироскопическими свойствами, но и упругими колебаниями, частоты которых оказались близки к диапазону рабочих скоростей ротора, что потребовало дополнительных мер по обеспечению устойчивой работы САУ ЭМП.

Управление токами в катушках электромагнитов, обеспечение необходимого быстродействия, способы линеаризации тяговых характеристик электромагнитов, выбор параметров регулятора для обеспечения устойчивости и качества управления ЭМП – это основные научно-технические задачи, решения которых интегрированы в отдельном блоке аппаратуры управления ЭМП гиродина.

В целом комплект опор ротора гиродина, включающий два радиальных (РМП) и один осевой (ОМП) магнитные подшипники, представляет традиционную по составу систему магнитного подвеса (СМП), которая обычно применяется для наиболее распространенных двухопорных роторных машин. Многополюсная магнитная система РМП, выполненная в виде единого статора, позволяет управлять ротором по двум взаимно перпендикулярным поперечным осям с одной из сторон ротора. В осевом направлении обычно используются два цилиндрических электромагнита торцевого типа, аналогичные электромагнитам ШДМ, которые притягивают ферромагнитный диск, установленный на валу, каждый электромагнит в свою сторону. Кроме электромагнитов в состав электромеханической части СМП входят два блока датчиков перемещений ротора, по одному с каждой стороны ротора, которые являются измерительным органом САУ ЭМП. Представленное краткое описание системы ЭМП гиродина позволяет оценить комплекс научно-технических задач, с решением которых было связано создание первого в мировой практике промышленного образца силового гироскопа с ЭМП для космических целей. Около пятнадцати лет успешно эксплуатировалась система ориентации орбитального комплекса (ОК) «Мир», для которой было изготовлено более 30 гиродинов с

ЭМП. Анализ накопленного богатого экспериментального материала, который частично опубликован в [5], свидетельствует о высокой надежности ЭМП при длительной работе высокоскоростного ротора в условиях глубокого вакуума.

Оценивая общие итоги этапа развития ЭМП, связанного с созданием гиродинов для ОК «Мир», следует отметить, что в результате разработаны технические подходы к выбору структуры САУ ЭМП, типа и параметров отдельных звеньев, определены взаимно согласованные технические требования к отдельным узлам и их параметрам, позволившие провести промышленное изготовление и все виды испытаний ЭМП, включая автономные и комплексные проверки в составе гиродинов.

Особо необходимо обратить внимание на требование по обеспечению взаимозаменяемости аппаратуры управления ЭМП без дополнительных подстроек и без ухудшения эксплуатационных качеств и надежности. Такая технология создания ЭМП, реализованная во ВНИИЭМ, до сих пор является единственной в мире, хотя может быть использована для ограничения участия изготовителя ЭМП в пуско-наладочных работах и эксплуатации агрегатов с ЭМП.

Таким образом, **по результатам внедрения ЭМП в гиродины была создана во ВНИИЭМ теоретическая и практическая база, открывающая возможность для широкого внедрения ЭМП в различные отрасли техники.**

В конце 80-х годов XX в. параллельно с работами по ЭМП для гиродинов начинаются разработки ЭМП для электрических машин и механизмов с массой ротора до 1000 кг. В связи с переходом в новую область применения ЭМП потребовалось уточнить некоторые технические решения и требования, вытекающие из условий работы машин и характера действующих нагрузок. Существенно возросли масса ротора и величина нагрузки, действующей на ЭМП, что привело к увеличению их массы и габаритов. Возникла необходимость в адаптации существующих способов проектирования и расчетов магнитных систем РМП и ОМП к новым требованиям. Получили дальнейшее развитие анализ и синтез САУ ЭМП в части обеспечения устойчивости и улучшения качества управления. Потребовалось более чем в 10 раз увеличить мощность аппаратуры управления, что привело к созданию нового образца блока управления (СУМП), работающего от промышленной трехфазной сети и от резервного источника (аккумуляторной батареи) напряжением 110 В. Многие из научно-технических

задач этого этапа развития ЭМП, рассмотренные в [6], имели важное значение для формирования самостоятельного научного направления, связанного с исследованиями и разработкой ЭМП.

Среди различных образцов машин с ЭМП общепромышленного применения, созданных во ВНИИЭМ в этот период, особенно следует отметить компрессоры газоперекачивающих агрегатов (ГПА) для магистральных газопроводов, в которых применение ЭМП по экономическим соображениям и на основании мирового опыта оказалось очень перспективным.

В начале 90-х годов XX в. впервые в России на компрессорных станциях г. Сызрани и г. Тольятти были введены в эксплуатацию три ГПА мощностью 16 МВт производства СМНПО (г. Сумы) с ЭМП, изготовленными во ВНИИЭМ. Некоторые особенности применения ЭМП в этих агрегатах и результаты их опытной эксплуатации, достаточно подробно рассмотренные в [7], в значительной степени определили дальнейшее развитие ЭМП для этой отрасли техники.

Типовая компоновка узлов ЭМП в компрессоре ГПА, показанная на рис. 3, соответствует традиционному расположению узлов подшипников для

двухпорной машины по концам вала ротора. Причем со стороны привода располагается только опорный РМП, а со свободной стороны – опорно-упорный МП, состоящий из РМП и ОМП. С каждой из сторон РМП предусмотрена возможность размещения блоков датчиков радиальных перемещений ротора.

Выбор одного из них в качестве рабочего обычно решается по результатам испытаний головного образца компрессора. Блок осевых датчиков размещается рядом с ОМП. Роторные части каждого РМП и соответствующих радиальных датчиков расположены на общей втулке, которая устанавливается на конусную поверхность вала с натягом. Упорный диск ОМП расположен на втулке, которая аналогично установлена на вал. Статорные части РМП, ОМП и блоков датчиков размещены в своих корпусах, которые крепятся к корпусу компрессора с посадкой, обеспечивающей требуемую точность и возможность регулировки осевых зазоров. Для ограничения перемещений ротора компрессора при выключении или повреждении ЭМП используются страховочные подшипники, которые могут быть установлены в корпусе или на валу.

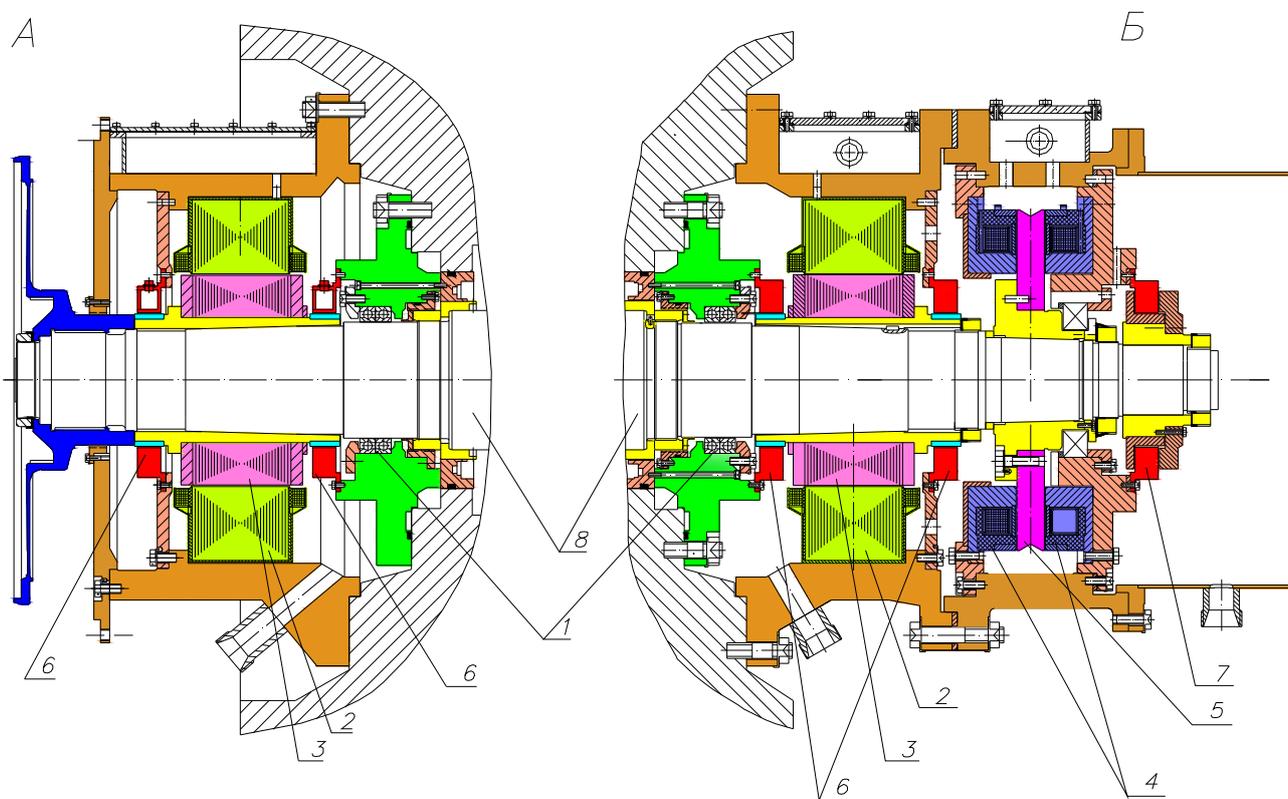


Рис. 3. Компоновка ЭМП в компрессоре ГПА: А – со стороны привода, Б – со свободной стороны; 1 – страховочные подшипники; 2 – статор РМП; 3 – ротор РМП; 4 – электромагниты ОМП; 5 – диск ОМП; 6 – блок радиальных датчиков; 7 – блок осевых датчиков; 8 – вал ротора



Рис. 4. Общий вид компрессора 321 ГЦ2 с ЭМП

Общий вид компрессора с ЭМП, показанный на рис. 4, позволяет оценить соотношение габаритных размеров ЭМП, которые видны со свободной стороны ротора в центральной части с торца корпуса, и компрессора в целом. Габаритные размеры у ЭМП несколько больше, чем у традиционных масляных опор, но несмотря на это их применение в ГПА оказывается предпочтительным.

По инициативе ОАО «Газпром» совместно с ФГУП «НПП ВНИИЭМ» в течение последних десяти лет изготовлено и поставлено заказчикам более 150 комплектов ЭМП для ГПА различной мощности. Многие ГПА с ЭМП успешно эксплуатируются на компрессорных станциях магистральных газопроводов ОАО «Газпром».

**На основе опыта, накопленного при решении комплекса научно-технических задач создания этих ЭМП, в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» сформировано самостоятельное научное направление и существует научная школа по проектированию и исследованию ЭМП для машин различной мощности.**

Рассмотрим некоторые из основных положений и аспектов решения ряда научно-технических задач, которые могут характеризовать состояние и уровень разработки ЭМП в ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

**Вопросы проектирования и расчета** электромеханических характеристик ЭМП имеют первостепенное значение как для выбора оптимальных размеров и параметров электромеханических частей ЭМП, так и для построения САУ ЭМП. Поскольку ЭМП являются относительно новыми устройствами электромеханики и в лите-

ратуре рассматриваются редко, то при их разработке приходится пользоваться, в первом приближении, традиционными соотношениями, применимыми для некоторых типов электрических машин. Однако при этом обеспечивается невысокая точность расчета (около 15 – 20 % из-за существенных отличий). Особенно следует отметить некоторые специфические особенности магнитных систем РМП и ОМП. В частности, многополюсные системы РМП и ОМП с явно выраженными полюсами и открытыми пазами для размещения катушек управления существенно отличаются по конфигурации и распределению магнитного поля от традиционных электрических машин. Кроме того, распределение результирующего тягового усилия между полюсами в магнитных системах ЭМП зависит от их взаимного расположения относительно оси воздействия нагрузки.

При проектировании РМП и ОМП задача выбора главных размеров магнитных систем решается на основе поиска компромисса между минимумом габаритных размеров ЭМП и допустимой величиной энергопотребления, необходимого для создания рабочего магнитного потока. Известные решения некоторых оптимизационных задач по ЭМП, рассмотренные в литературе [8], позволяют установить определенные ограниченные пределы возможных вариаций ряда размеров и параметров ЭМП, которые значительно упрощают процесс проектирования. Однако этих общих соотношений и рекомендаций недостаточно для решения задачи проектирования и расчета параметров ЭМП в целом. Поэтому возникает необходимость в разработке инженерных методик проектирования и расчета характеристик ЭМП. Используя существующие ограничения по удельной грузоподъемности, возникающие из-за насыщения материала магнитопровода, можно для заданного значения усилия установить требуемые значения рабочих площадей полюсов магнитопровода и соответствующие габаритные размеры ЭМП в целом. Этот принцип положен в основу алгоритма методики проектирования ЭМП, разработанной в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» [9]. В результате по этой методике могут быть определены несколько вариантов ЭМП для принятых соотношений размеров и параметров, из которых в последствии предстоит выбрать рабочий вариант ЭМП.

После предварительной конструктивной проработки ЭМП возникает необходимость в прове-

дении поверочных электромагнитных расчетов, позволяющих определить основные технические показатели и нагрузочные характеристики для сопоставления различных проектных вариантов.

Отмеченные выше особенности магнитных систем РМП и ОМП привели к разработке нового интегрированного подхода к определению результирующего тягового усилия на основе современного метода конечных суперэлементов. Каждый полюс магнитной системы, являющийся отдельным суперэлементом, в соответствии с изменяющимся расположением в магнитной системе относительно осей перемещения ротора, имеет изменяющиеся входные параметры и долевое участие в общем тяговом усилии. Кроме того, расчётная модель распределения поля в магнитопроводе максимально приближена к реальному, что позволило существенно повысить точность поверочных электромагнитных расчетов до 5 – 10 %. В результате в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» разработана инженерная методика поверочного электромагнитного расчёта РМП и ОМП, основные положения и соотношения которой отражены в [10] и использованы в разработанных компьютерных программах.

Представленные методики проектирования и поверочного электромагнитного расчёта ЭМП позволяют в полной мере решить комплекс научно-технических задач по выбору оптимального рабочего варианта ЭМП.

**Задачи динамического расчета** включают анализ колебаний ротора (различных частот и форм) и синтез структуры и параметров САУ ЭМП, обеспечивающих требуемое качество управления с таким объектом управления, которым является ротор. Большой интерес к комплексу этих задач у отечественных и зарубежных разработчиков ЭМП обусловлен тем, что очень часто первая упругая форма колебаний роторов ГПА оказывается близка или находится в диапазоне рабочих скоростей вращения. Это приводит к чрезмерному росту уровня колебаний ротора и требуется принять специальные меры по их снижению. Для решения этих задач в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» обычно используются комбинированные методы, режекторные фильтры и селекция датчиков перемещения ротора, применение которых в САУ ЭМП более подробно рассмотрено в [11].

В практике разработки ЭМП для ГПА задачи динамики ротора имеют важное значение, и исследования в этой области находятся в центре

внимания разработчиков ЭМП. Хотя публикации по вопросам применения конкретных мер для снижения уровня упругих колебаний роторов в САУ ЭМП в зарубежной литературе практически отсутствуют.

**Анализ развития аппаратуры управления ЭМП** показывает, что в настоящее время для ЭМП ГПА в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» все чаще применяется аппаратура с цифровым управлением (блоки КТМ), заменяющая блоки СУМП с аналоговым управлением. Особенно следует отметить, что появление микроконтроллеров (МК) на базе быстродействующих процессоров позволяет реализовать более сложные и точные алгоритмы управления ЭМП. В частности, это касается применения системы автоматической балансировки (ABS), позволяющей исключить влияние биения ротора на САУ при высоких скоростях вращения, а также использования режима оптимального демпфирования (ODC), снижающего колебания ротора при прохождении критических частот и возможность применения других режимов адаптивного управления САУ ЭМП. Кроме того, применение МК для управления широтно-импульсными регуляторами выходных усилителей, питающих обмотки ЭМП, повышает помехозащищенность и надежность их работы. Более подробно некоторые особенности цифровой аппаратуры управления ЭМП рассмотрены в [12].

**Задачи выбора структуры САУ ЭМП** являются основополагающими для обеспечения устойчивости и точности положения ротора. Поскольку электромагниты, воздействующие на ротор, представляют собой нелинейные звенья с большим запаздыванием, то выбор способа компенсации этих нелинейностей представляет главную задачу при выборе структуры САУ. Способ «прямой» компенсации, применяемый в разработках ФГУП «НПП ВНИИЭМ», отличается принципиально от комбинированного способа, который используется, например в разработках французской фирмы S2M. Разница заключается в том, что при комбинированном способе в качестве обратной связи при управлении используются сигналы тока в обмотках и рабочего магнитного потока электромагнита. Причём частотные диапазоны использования этих обратных связей разделены: обратная связь по току используется при низких частотах, а по потоку – при высоких частотах. Однако отсутствие компенсации зависимости тягового усилия от изменения зазора между статором и ротором при использовании об-

ратной связи по току приводит к снижению фактической жесткости ЭМП из-за возникновения «отрицательной» позиционной жесткости, существующей в электромагните. «Прямая» компенсация не имеет этого недостатка, поскольку в структурной схеме существует отдельная ветвь, по которой поступает дополнительный сигнал, устраняющий этот эффект электромагнита путем корректировки величины тока в обмотке. Подробнее о структуре системы управления ЭМП, применяемой в разработке ФГУП «НПП ВНИИЭМ», рассмотрено в [13].

**Математические и расчетные модели**, применяемые при решении основных научно-технических задач создания ЭМП, позволяют адекватно оценить происходящие электромагнитные процессы в ЭМП и обеспечивают высокую точность полученных расчетных соотношений. Это создает возможность широкого применения современных компьютерных средств и программ для проектирования, расчетов ЭМП и исследований свойств отдельных узлов и динамики САУ ЭМП в целом.

Особо следует отметить актуальность исследований, проводимых в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», по разработке математических моделей для электро-механических процессов создания тяговых усилий с ЭМП. Для РМП, имеющего шихтованный магнитопровод, можно в первом приближении пренебречь влиянием вихревых токов, протекающих в магнитопроводе, и получить математическую модель, рассмотренную в [14]. Для ОМП, имеющего массивный магнитопровод, при анализе необходимо учитывать влияние вихревых токов, возникающих в магнитопроводе.

Используя основные положения теории распространения переменных электромагнитных полей в ферромагнетиках, получены математическая модель и электрическая схема замещения ОМП, позволяющие с достаточной степенью точности анализировать происходящие процессы и создавать САУ ЭМП с оптимальными законами управления.

Рассмотренный комплекс научно-технических задач характеризует в общем научный потенциал ФГУП «НПП ВНИИЭМ», накопленный в итоге за многие годы деятельности в области создания ЭМП для различных электро-механических устройств.

Кроме того, для оценки общего технического уровня разрабатываемых ЭМП целесообразно провести сравнение некоторых технических характеристик образцов ЭМП, созданных в НПП

ВНИИЭМ, и выпущенных рядом зарубежных производителей. Частично такие данные по ЭМП для ГПА были приведены в [15], но со временем появились дополнительные сведения, которые могут представлять интерес. В табл. 2 обобщены данные для сравнения ЭМП ГПА различных производителей. Основными зарубежными фирмами, занимающимися разработкой ЭМП для крупных машин, в том числе ГПА, являются: французская компания S2M и англо-американская компания Waukesha Magnetic Bearings, Ltd. (WMB).

Подходы к решению главных научно-технических задач, возникающих при создании ЭМП для ГПА, этих зарубежных фирм во многом схожи с существующими в ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

Магнитные свойства материалов, используемых в РМП и ОМП, практически не отличаются, поэтому значения удельных максимальных нагрузок (грузоподъемности), приходящихся на единицу площади полюсов, отличаются незначительно. В магнитных системах ЭМП, применяемых S2M, увеличение удельной грузоподъемности на 12% достигается за счет использования более сложной трапецевидной конфигурации зубцов. Разница в удельной массе ЭМП, приходящейся на единицу максимальной нагрузки, обусловлена предпочтением разработчиков S2M и WMB в выборе основных типов многополюсных магнитных систем ЭМП, которые по сравнению с 8-полюсными системами, применяемыми в основном в разработках ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Однако многополюсные магнитные системы имеют более высокое удельное энергопотребление на возбуждение рабочего потока. В результате полученное снижение удельной массы примерно на 35% обходится почти двукратным увеличением удельного энергопотребления, что имеет место в разработках S2M по сравнению с разработками ФГУП «НПП ВНИИЭМ». Следует отметить, что в ЭМП, разрабатываемых WMB, уровень удельного энергопотребления обычно на 20% ниже, чем у ЭМП S2M, что достигается за счет использования более сложных многополюсных магнитных систем с разными размерами зубцов. Однако это усложняет технологию изготовления РМП. На основании проведенного сравнения можно констатировать, что ЭМП для ГПА, разработанные в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», имеют существенно ниже энергопотребление (примерно в 2 раза), чем у зарубежных образцов, но по габаритным размерам уступают им.

Таблица 2

Характеристика	WMB Великобритания	S2M Франция	ФГУП «НПП ВНИИЭМ» Россия	
Материал магнитопровода, тип, стандарт	M530-50AP №20 EN 10106	M330-35A №20 EN 10106	Ст. 2412 Ст. 2421 ГОСТ 21427.2	
Индукция насыщения $B_{50}$ , Тл	1,6	1,6	1,6	
Удельные потери на перемагничивание $p_{1/400}$ , Вт/кг	12,2	12,2	12,5	
Удельная грузоподъемность, Н/см <sup>2</sup>	80	90	80	
Коэффициент возможной перегрузки	2,0	1,5	1,8	
Удельная масса, кг/кН	12	10	15	
Удельное энергопотребление, Вт/кН	14	18	9	
Тип датчиков перемещения ротора (ДП)	Индуктивный	Индуктивный	Токовихревой	Токовихревой Индуктивный
Частота питания ДП, кГц	18 Синус	20 Синус	100 Синус	16 Плоская
Преобразование сигнала ДП	Аналоговое	Аналоговое	Аналоговое	Дискретное
Настройка датчика	Электрическая	Электрическая	Механическая и электрическая	
Аппаратура управления, тип	Цифровая	Цифровая	Аналоговая СУМП	Цифровая КТМ
Основной источник питания, VAC, 50 Гц	230 1 фаза	380 3 фазы	380 3 фазы	
Резервный источник питания, VDC	220 Внутренние АКБ	150 Внутренние АКБ	220 Внешние АКБ	
Максимальный ток, А	50	30	30 – 50	
Максимальное напряжение, В	600	300	220	
Тип фильтрации напряжения электромагнитов	Пассивный	Пассивный	Пассивный	Активный и пассивный
Энергопотребление, кВт	1,5	2,0	1,0	
Минимальная расчетная жесткость, Н/мкм	20	20	15	
Амплитуда колебаний ротора, мкм: – без вращения – номинальная скорость	– 30	– 30	1,0 35	
Размеры аппаратуры, м	2,0 × 1,5 × 0,5	1,8 × 1,4 × 0,6	1,8 × 0,6 × 0,6	
Масса аппаратуры, кг	500	500	250	

Для сравнения типов датчиков перемещения роторов и аппаратуры управления ЭМП в целом можно воспользоваться данными из ранее опубликованных работ [13, 15], которые свидетельствуют, что по уровню технических решений отечественные образцы аппаратуры ЭМП не уступают зарубежным. Основное различие заключается в использовании резервного источника питания. В зарубежных образцах аккумуляторные батареи (АКБ) резервных источников обычно входят в состав шкафов, а в отечественных в качестве резервных источников используются АКБ, имеющиеся на компрессорных станциях. В результате объем и масса зарубежной аппаратуры получаются существенно больше, чем у отечественной.

В целом отечественные образцы ЭМП, разработанные и изготовленные в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», не уступают зарубежным образцам и могут быть рекомендованы для использования в различных областях техники.

В итоге многолетней деятельности по разработке и изготовлению ЭМП для космической техники и газовой промышленности в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» сформировались специальные научные и производственные подразделения для решения рассмотренных научно-технических задач, увеличения объема поставок и выпуска новых образцов ЭМП.

В перспективе существует тенденция на повышение грузоподъемности ЭМП, которые предназначены для крупных энергетических установок с массой ротора более 5 тонн. Кроме того, возникает потребность в разработке высокотемпературных ЭМП, позволяющих работать при температуре 400 – 500 °С.

### Выводы

1. Основные направления разработок ЭМП в ФГУП «НПП ВНИИЭМ», связанные с космической техникой и газовой промышленностью, охватывают широкий круг рассмотренных научно-технических задач, уровень решения которых соответствует мировой практике.

2. В итоге развития научных исследований и производства ЭМП в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» созданы необходимые условия для обеспечения разработки и изготовления до 50-ти комплектов ЭМП в год для перекачивающих агрегатов ОАО «Газпром».

3. Перспективным является применение ЭМП в современных энергетических установках с массой ротора более 5 тонн, где в некоторых местах расположения ЭМП температура может повышаться до 400°С. Кроме того, актуальными становятся

разработки высокотемпературных ЭМП для авиационной и космической техники, исследования по которым в настоящее время проводятся в ФГУП «НПП ВНИИЭМ».

### Литература

1. Роторный вакуумметр с магнитным подвесом / Д. Бимс, Р. Спитцер, К. Уэйт // Приборы для научных исследований. – 1962. – Т. 3. – № 2 – С. 3 – 7.
2. К расчету характеристик электродвигателя с шаровым ротором / Н.Я. Альпер, В.П. Верещагин // Труды ВНИИЭМ. Электромеханика. – 1972. – Т. 38. – С. 143 – 158.
3. Проблемы создания шарового двигателя-маховика для управления положением космического объекта / Н.Н. Шереметьевский, Н.Н. Данилов-Нитусов, Д.М. Вейнберг [и др.] // Доклад 7.03 на ВЭЛК-77. – 1977. – 16 с.
4. Системы магнитного подвеса в исполнительных органах управления ориентацией космических аппаратов / Д.М. Вейнберг, В.П. Верещагин, Н.Н. Данилов-Нитусов [и др.] // Известия Академии наук СССР. Механика твердого тела. – 1981. – № 3. – С. 152 – 157.
5. Опыт эксплуатации силовых гироскопов-гиродинов с магнитными опорами на орбитальном комплексе «Мир» / В.П. Верещагин, Д.М. Вейнберг, С.А. Стома // Труды ВНИИЭМ. – 1997. – Т. 97. – С. 5 – 12.
6. Магнитный подвес роторов электрических машин и механизмов. Труды ВНИИЭМ. – 1989. – Т. 89. – 135 с.
7. Опыт наладки и эксплуатации газоперекачивающих агрегатов с магнитными подшипниками / Д.А. Кочетов, Е.В. Кравцова, Г.А. Жемчугов [и др.] // Конверсия в машиностроении. – 1994. – № 4. – С. 23 – 29.
8. Разработка электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов / А.П. Сарычев // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 110. – № 3. – С. 3 – 10.
9. Методика проектирования электромагнитных подшипников / В.П. Верещагин, А.В. Рогоза, Т.Н. Савинова // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 3 – 12.
10. Методика поверочного расчета электромагнитных подшипников / В.П. Верещагин, А.В. Рогоза, Т.Н. Савинова // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 3 – 12.
11. Особенности управления активными электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов с гибкими роторами / А.П. Сарычев, И.Г. Руковицын // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 13 – 18.
12. Особенности цифровой аппаратуры управления электромагнитными подшипниками газоперекачивающих агрегатов / А.С. Абдурагимов, В.П. Вер-

шагин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 115. – № 2. – С. 19 – 26.

13. Структура системы управления электромагнитными подшипниками / Д.Н. Богданов, В.П. Верещагин // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2010. – Т. 114. – № 1. – С. 9 – 14.

14. Математическая модель магнитного подшипника /

В.П. Верещагин, В.А. Клабуков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 17 – 22.

15. Научно-технические задачи развития магнитных подшипников для газоперекачивающих агрегатов / А.З. Шайхутдинов [и др.] // Газовая промышленность. – 2009. – № 7 – С. 66 – 70.

*Поступила в редакцию 31.03.2011*

*Леонид Алексеевич Макриденко, д-р техн. наук, генеральный директор – генеральный конструктор, т. (495) 365-56-10.*

*Алексей Петрович Сарычев, канд. техн. наук, зам. генерального директора – генерального конструктора, т. (495) 365-56-29.*

*Владимир Петрович Верещагин, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 365-50-73.*

*Александр Валерьевич Рогоза, аспирант, начальник научно-производственного комплекса, т. (495) 366-04-79.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.*