

ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОДВЕСА РОТОРОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ АГРЕГАТОВ

О.В. Крюков

Рассмотрены новые разработки газотранспортных агрегатов компрессорных станций с использованием электромагнитного подвешивания роторов электродвигателей мегаваттного класса. Проведён анализ основных преимуществ активных электромагнитных подшипников по повышению надёжности, ресурса и снижению эксплуатационных затрат на обслуживание электроприводных газоперекачивающих агрегатов. Представлены результаты анализа эффективной работы электромагнитного подвеса в динамических режимах и при реализации принципов малолюдных и безлюдных технологий. Показаны эффективные результаты реализации безредукторных и безмасляных технологий электромагнитных подшипников для повышения функциональных возможностей, надёжности, энергоэффективности и экологичности наиболее ответственных агрегатов магистральных газопроводов.

Ключевые слова: электромагнитный подвес, газоперекачивающий агрегат, компрессорная станция, электропривод, энергоэффективность.

Введение

Современные турбомеханизмы с приводными синхронными машинами мегаваттного класса мощности составляют основу электроэнергетических установок в различных отраслях промышленности. Это обусловлено высокими энергетическими характеристиками и надёжностью их работы [1 – 6]. Главным их недостатком является наличие подшипников скольжения с системами смазки, уплотнений и охлаждения, значительно влияющих на ресурс и эксплуатационные затраты. Кроме того, наличие редуктора (мультипликатора) для повышения скоростей вращения выше 3000 об/мин приводит к снижению надёжности и ресурса агрегата. Современные системы «электромагнитных подшипников» обеспечивают реализацию бесконтактных и безмасляных технологий стабильной работы синхронных машин, в том числе и в электроприводах газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС).

Системы электромагнитного подвешивания (ЭМП) и поддержки вращательных и линейных элементов движущихся агрегатов без вхождения в контакт с ротором известны достаточно давно и основаны на принципе левитации или отталкивания (притяжения) ферромагнитного материала ротора полем электромагнита (подшипника) [1, 6].

Основными преимуществами отсутствия прямого контакта между ротором и подшипником являются:

- уменьшение износа узлов из-за отсутствия трения при вращении ротора, что повышает долговечность эксплуатации машины;
- отсутствие затрат на смазочные материалы и дорогостоящие баббит и бронзу для механических частей подшипников;

- вследствие отсутствия трения нет и механических потерь энергии на трение при вращении электродвигателя во всём диапазоне скоростей;

- возможность работы агрегата в экстремальных условиях при воздействии высоких и низких температур, в условиях вакуума, химически агрессивных сред и повышенной влажности;

- в отсутствии контактной теплопередачи хорошая теплоизоляция корпуса статора от ротора, что улучшает общее тепловое состояние машины;

- максимальная скорость вращения ротора не ограничена как при традиционных подшипниках свойствами материала, из которого они изготовлены, позволяя создавать безредукторные высокоскоростные машины;

- отпадает необходимость в трудоёмких работах по техническому обслуживанию и ремонту масляных систем, систем охлаждения и самих подшипников, значительно сокращая эксплуатационные расходы;

- повышается уровень оперативного диагностирования и прогнозирования технического состояния машины в целом за счёт адекватной и достоверной системы автоматического мониторинга работы магнитного подвеса;

- экологическая чистота.

Главные из перечисленных выше преимуществ ЭМП – отсутствие механического контакта и маслосмазки позволяют использовать его при высоких скоростях вращения, больших перепадах температур и в агрессивных средах. Поэтому наиболее целесообразными областями применения ЭМП являются следующие классы исполнительных механизмов:

- газовые турбины и турбоэлектрические агрегаты, в которых применение ЭМП в качестве опор решает проблемы смазки при высоких температурах, увеличивает ресурс работы и улучшает вибро-

акустические характеристики для автономных энергоустановок и ЭГПА;

– турбомеханизмы (турбокомпрессоры, воздухоподогреватели и турбовентиляторы), работающие в широких диапазонах скоростей, мощностей, давлений и температур, где использование ЭМП позволяет значительно увеличить скорость вращения без использования редукторов, повысить их производительность и снизить массогабаритные показатели. Если к перекачиваемой среде предъявляются повышенные требования по чистоте или в ней имеются взрывоопасные компоненты, ЭМП являются единственно возможным типом опор (ЭГПА, спецагрегаты высокотемпературных и взрывоопасных технологий);

– турбодетандеры, в которых с помощью ЭМП получают повышенную надёжность и производительность в условиях низких температур и больших перепадов давления. При создании агрегатов, совмещённых в одном корпусе с электрической машиной, появляется возможность создания компактных турбодетандеров с электрическим отбором мощности;

– инерционные накопители энергии на основе маховиковых электроприводов с композитными супермаховиками, в которых использование ЭМП позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели и энергетику.

Современное состояние развития и внедрения ЭМП

Конструктивно, как и любой традиционный подшипник ЭМП состоит из неподвижного стато-

ра, который за счёт создаваемого электромагнитного поля поддерживает вращающийся вал ротора. Поэтому вместо несущей силы, наводимой масляной пленкой между ротором и статором в обычных подшипниках скольжения, в ЭМП действуют силы магнитного притяжения, устойчиво поддерживающие ротор в состоянии левитации внутри машины.

Электромагнитное поле, создающее силу левитации ротора, генерируется обмотками электромагнитов, располагаемыми по внутренней окружности статора вокруг вала. Это поле воздействует на ферромагнитные пластины ротора, сводящие к минимуму потери на вихревые токи в роторе при его вращении, обеспечивая высокую магнитную проницаемость и концентрацию магнитного потока в подшипнике с минимальным рассеянием.

Вместе с тем, в отличие от традиционных механических («пассивных») подшипников, ЭМП являются «активными», поскольку стабилизация положения ротора осуществляется силами электромагнитного притяжения. Для полного неконтактного электромагнитного подвеса ротора в конструкции необходимо предусмотреть два радиальных и один осевой ЭМП, поэтому САУ ЭМП включает в себя сами подшипники, встроенные в корпус статора, и блоки управления, соединённые по цепи обратной связи с датчиками и исполнительными обмотками электромагнитов.

Первым компрессором с ЭМП был агрегат мощностью 12 МВт и скоростью вращения 5250 об/мин. ЭМП серии ACTIDYNE S2M начали выпускать с 1985 г. для турбомашин до 29 МВт и скоростью вращения до 70000 об/мин.

Номенклатура унифицированных электромагнитов и аппаратура управления

Грузоподъёмность подшипника, Н	1000 – 2500	2500 – 6000	6000 – 12000	12000 – 25000	25000 – 80000
Диаметр расточки электромагнита, мм	100	150	200	300	500
Длина пакета электромагнита, мм	75 – 150	100 – 200	120 – 250	150 – 300	200 – 600
Габариты аппаратуры управления, мм	600×400×400		1200×450×600	2000×600×600	
Мощность потребления, кВт	0,25 – 0,75		0,5 – 1,5	0,75 – 3,0	
Масса ротора, кг	100 – 600		600 – 3000	2000 – 10000	
Области применения	Вентиляторы, турбодетандеры, насосы		Турбокомпрессоры	Синхронные компенсаторы, преобразователи, синхронные двигатели	

Лидером отечественных разработок в области ЭМП является АО «Корпорация ВНИИЭМ», которое впервые реализовало идею ЭМП в электромеханических комплексах космической техники и ЭГПА мощностью 12 – 16 МВт, с частотой вращения до 6800 об/мин. Разработанные ВНИИЭМ ЭМП (см. таблицу), успешно работают на КС «Тольяттинская» (ГПА-Ц-16), КС «Сызранская» (4ГПА-Ц-16), КС «Помарская» и КС «Пермская». Вся гамма выпускаемых сегодня в мире центробежных компрессоров для целей ЭГПА КС может быть разделена на 5 основных типов [7 – 12].

1. Турбокомпрессоры с тихоходным приводом и повышающей передачей, используя ЭМП, могут работать без масла в самом компрессоре. Однако для работы мультипликатора необходимо масло, и поэтому эффективность ЭМП состоит только в повышении уровня надёжности агрегата.

2. Турбокомпрессоры с приводом от обычной турбины применяют на магистральных газопроводах (МГ), где ЭМП даёт дополнительное преимущество снижения затрат ТООР с надёжностью агрегатов на уровне до 99,9 %.

3. Турбокомпрессоры с приводом от паровой турбины позволяют использовать ЭМП на обоих агрегатах, что увеличивает эффективность и надёжность всего комплекса в целом.

4. Тихоходные турбокомпрессоры с непосредственным приводом от синхронного двигателя с минимальным числом пар полюсов 1 ($\omega=3000$ об/мин) используются в локальных ТП. Применение ЭМП даёт немного преимуществ, но в отдельных случаях сочетание сухих газовых уплотнений и ЭМП полностью исключает риски масляного загрязнения ТП и возможность работы при неуровновешенности из-за скопления продукта на рабочем колесе.

5. Высокооборотный турбокомпрессор с непосредственным приводом от высокоскоростного электродвигателя (асинхронного или синхронного) представляет собой наиболее инновационное техническое решение для ЭГПА КС МГ. При этом использование систем ЭМП для двигателя и агрегата при исключении из схемы мультипликаторов делает всю установку «сухой», без использования маслосмазки, что имеет наивысший экономический эффект от внедрения ЭМП. В 1993 г. на ПХГ Германии был запущен в эксплуатацию первый промышленный агрегат на 150 бар с непосредственным приводом от высокоскоростного двигателя на ЭМП. Шестиступенчатый компрессор Зульцер и двигатель АСЕС мощностью 2 МВт на ЭМП работают со скоростью 20000 об/мин. За время эксплу-

атации цифровая САР ЭМП с дистанционным управлением подтвердили высокий уровень надёжности всего агрегата.

Успешное внедрение высокоскоростных электродвигателей с ЭМП и современных высоковольтных ПЧ на базе автономных инверторов тока с векторным мультипроцессорным управлением позволило фирмам АСЕС и Зульцер разработать новую концепцию ЭГПА. Она заключается в создании турбокомпрессора с регулируемым двигателем в едином конструктиве с консольным колесом на каждом конце вала и охлаждением агрегатов перекачиваемым газом. При этом все вращающиеся элементы заключены в единый герметичный корпус и находятся в прямом контакте с газом. Простота и компактность этой машины значительно упрощает её установку, повышая надёжность, а чистый безмасляный принцип работы делает эксплуатацию ЭГПА вне конкуренции по экологическим соображениям.

Преимущества ЭМП при запуске ЭГПА в работу

Динамические режимы ЭГПА являются наиболее ответственными и сложными в реализации [13 – 17]. Для устранения проблем, связанных с прямым пуском ЭГПА, используются следующие способы:

- пуск синхронной машины по асинхронной характеристике с предвключённым токоограничивающим индуктивным сопротивлением в статорных обмотках (реакторный, автотрансформаторный и т. п.);

- использование устройств мягкого пуска с регулированием напряжения статора и тока возбуждения двигателя;

- частотный пуск ЭГПА (с нагрузкой или разгруженным нагнетателем) с использованием полупроводниковых преобразователей частоты (ПЧ);

- пуск ЭГПА с применением разгонного двигателя;

- пуск методом инвертирования центробежного нагнетателя путём перевода его в турбодетандерный режим.

Последние два способа редко находят применение на КС МГ из-за отсутствия технических возможностей их реализации.

Использование предвключённых в статорную цепь реакторов и трансформаторов в качестве добавочных реактивных токоограничивающих сопротивлений также ограничено малыми и средними мощностями двигателей и в принципе не решает вопрос для мощных ЭГПА из-за снижения динамического момента. К тому же большие и дли-

тельные пусковые токи при этом сохраняются, увеличивая продолжительность запуска в 3 – 5 раз (так как площади под кривыми динамического момента должны быть одинаковыми для создания энергии вращающихся масс ротора с учётом потерь).

Наиболее кардинальным способом пуска мощных ЭГПА является использование тиристорных или транзисторных мягких пускателей и ПЧ. Современные ПЧ имеют высокую стоимость, затраты на ремонт и обслуживание и потребление электроэнергии. Однако эти затраты быстро окупаются при использовании ЭМП, так как срок службы ЭГПА увеличивается в среднем на 5 лет, число пусков – с 50 в несколько раз, а также снижается расход энергии при пуске.

Возможности перехода к малолюдным технологиям обслуживания

Применение ЭМП позволяет полностью раскрыть и новые функции автоматизации КС на основе малолюдных и безлюдных технологий [18 – 22]. Функциональные возможности современных автоматизированных установок электроприводных КС стимулируют к рациональной реализации комплекса технических, организационных и экономических аспектов этой задачи.

При этом в основе технической составляющей малолюдных технологий заложены средства современного многофункционального и высоконадёжного оборудования основных и вспомогательных систем КС, интегрированного программного обеспечения и телекоммуникационных сетей. Расширение комплекса функциональных возможностей автоматизации ЭГПА, аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа и других подсистем КС в части оперативного мониторинга, взаимосвязанного управления, координации и оптимального регулирования технологических параметров с интегрированием их в рамках систем принятия решений создаёт все предпосылки к замещению функций, выполнение которых в настоящее время возложено на обслуживающий персонал электроприводных КС.

Внедрение современных систем ЭМП для ЭГПА с продолжительным сроком службы, увеличенным временем наработки на отказ и сроками регламентных работ позволяет сократить трудозатраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) с организацией обслуживания оборудования по фактическому техническому состоянию. Поэтому применение на КС принципов малолюдных технологий позволяет иметь меньшие штаты

персонала, а выполнение части работ возможно за счёт передачи их централизованным службам газотранспортных предприятий или специализированным службам и заводам-изготовителям.

Экономическая составляющая малолюдных технологий обеспечивает принципиальную возможность реализации их на агрегатах с ЭМП электроприводных КС. Принятие решения о приемлемости экономических показателей в каждом конкретном случае определяется индивидуально и является многоплановым, с сокращением инвестиционных издержек и эксплуатационных затрат при сохранении высокого уровня надёжности транспорта газа.

Оценка эффективности применения ЭМП в ЭГПА КС

В настоящее время по сравнению с другими типами привода ЭГПА, как известно, имеет существенные преимущества: высокая эксплуатационная надёжность и долговечность; минимальные затраты на ТОиР; большой моторесурс узлов и деталей ЭГПА, в том числе с ЭМП; простота автоматизации и управления; пожаро- и взрывобезопасность; экологическая чистота.

Для объективной оценки технико-экономической эффективности ЭГПА с использованием ЭМП и сухих уплотнений в электроприводе и нагнетателях, рассмотрим четыре основных варианта компоновки с синхронными двигателями типа СТД-12500:

1. Традиционная схема ЭГПА без ЭМП с двигателем, редуктором (мультипликатором) и нагнетателем, которые установлены на двух рамах и связаны между собой провалами, передающими крутящий момент от двигателя к нагнетателю. В состав ЭГПА входят системы контроля, управления и защиты, системы маслосмазки и маслоуплотнения, а также электропитания.

2. ЭГПА с нагнетателем на ЭМП, электродвигателем и редуктором с маслосистемой, которые механически связаны аналогично варианту 1. Однако использование в компоновке нагнетателя ЭМП вала позволяет исключить маслосистему в компрессоре, что значительно упрощает всю маслосистему ЭГПА и её габариты, повышает надёжность установки с дистанционным контролем и управлением нагнетателем. Для предотвращения протечки газа по валу из ЭГПА в зал применяются сухие торцевые уплотнители.

3. ЭГПА с нагнетателем на ЭМП и высокоскоростным электродвигателем с маслосистемой, которые могут размещаться на одной раме и связаны

между собой муфтой. Использование высокоскоростного электродвигателя позволяет исключить из компоновки повышающий редуктор.

4. ЭГПА с нагнетателем и высокоскоростным электродвигателем на ЭМП, которые механически соединены аналогично варианту 3 или объединены в одном корпусе (вариант «МОПИКО»).

При технико-экономическом сопоставлении четырех приведённых вариантов ЭГПА принята одноцеховая КС с синхронными двигателями типа СТД-12500 в количестве трёх рабочих и одного резервного агрегата, для которой определены капитальные и эксплуатационные затраты в текущих ценах. Ресурс всего оборудования, применяемого в ЭМП определён в 300 тыс. ч и основан на данных фирмы S2M.

Результаты расчётов [23 – 26] по капитальным затратам сравниваемых вариантов дали ряд следующих значений, соответственно (млн. руб.): 59,1; 72,3; 117 и 125. Вместе с тем снижается годовое потребление масла соответственно для вариантов (т): 26,3; 5,3; 3,5 и 0. Годовое потребление электроэнергии при коэффициенте загрузки КС 0,7 (ГВт·ч): 230, 224, 219 и 218.

Выводы

Опыт эксплуатации и результаты исследований, проведённых в последние годы, свидетельствуют [27 – 31], что более 70 % нештатных ситуаций, возникающих при эксплуатации турбокомпрессоров, связаны с маслосистемами, традиционно используемыми для смазки подшипников и уплотнений вала. В отличие от громоздких и ненадёжных маслосистем работа систем ЭМП не требует к себе постоянного внимания и характеризуется принципом «включил и забыл».

Системы ЭМП доказали свою принципиальную пригодность и надёжность для удержания в состоянии левитации роторов турбомашин и электродвигателей. Промышленная наработка отдельных агрегатов с ЭМП достигла 300 тыс. ч без поломок и остановов, что обусловлено высокими эксплуатационными характеристиками магнитных опор и стабильностью САУ.

Одним из главных недостатков агрегатов с ЭМП является их относительно высокая цена (в соответствии с расчётами 125 млн. руб. против 59,1 млн. руб.). Высокий уровень капитальных затрат обусловлен новыми высокотехнологичными агрегатами с большими издержками производства, которые в дальнейшем значительно снизятся. К тому же значительное снижение эксплуатационных затрат из-за отсутствия маслосистем приведёт

к быстрой окупаемости систем ЭМП в течение 2 – 3 лет.

В целом проведённые научно-исследовательские и маркетинговые исследования показали, что направление по внедрению ЭМП и безмасляных технологий на ЭГПА КС является актуальным и перспективным в плане повышения энергоэффективности и надёжности работы электрооборудования и технологических агрегатов МГ.

Литература

1. Пужайло А. Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / под ред. О. В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС. – 2010. – 570 с.
2. Milov V. R., Suslov B. A., Kryukov O. V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095 – 1101.
3. Крюков О. В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х тт. / отв. за выпуск И. В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 157 – 163.
4. Крюков О. В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15: сборник. – М.: ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, 2015. – С. 368 – 386.
5. Крюков О. В., Горбатушков А. В., Степанов С. Е. Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции: сборник / под общ. ред. В. Ю. Островляничка. – Новокузнецк, 2010. – С. 38 – 45.
6. Крюков О. В. Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 53 – 58.
7. Крюков О. В. Комплексный анализ условий эксплуатации электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 4. – С. 14 – 20.
8. Бабичев С. А., Бычков Е. В., Крюков О. В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30 – 36.
9. Крюков О. В., Степанов С. Е. Модернизация систем управления электроприводными газоперекачивающими агрегатами // Проблемы автоматизации и управления в технических системах. Сборник статей МНТК / под ред. М. А. Щербакова. – Пенза, 2013. – С. 29 – 32.
10. Крюков О. В., Степанов С. Е. Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» // Газовая промышленность. – 2014. – № 8 (710). – С. 50 – 56.

11. Крюков О. В. Парадигма применения электроприводных газоперекачивающих агрегатов на объектах ОАО «Газпром» // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. Материалы МНТК: (XVIII Бенардосовские чтения): сборник. – Иваново, 2015. – С. 61 – 65.
12. Крюков О. В. Методология и средства нейронечёткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52 – 60.
13. Крюков О. В. Анализ систем безопасного пуска электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. – 2012. – № 2. – С. 12 – 17.
14. Крюков О. В., Титов В. Г. Анализ пусковых режимов электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 29 – 35.
15. Крюков О. В. Аппаратные и алгоритмические средства безопасного пуска электродвигателей большой мощности. Ч. 1) // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2013. – № 9. – С. 23 – 30.
16. Крюков О. В., Васенин А. Б., Серебряков А. В. Экспериментальный стенд электромеханической части энергетической установки // Приводная техника. – 2012. – № 4. – С. 2 – 11.
17. Серебряков А. В., Крюков О. В., Васенин А. Б. Нечёткие модели и алгоритмы управления энергетическими установками // Материалы конференции «Управление в технических, эргатических, орг. и сетевых системах» / под ред. С. Н. Васильева. – 2012. – С. 467 – 469.
18. Крюков О. В. Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45 – 50.
19. Крюков О. В. Принципы малолюдных технологий в организации работы электроприводных компрессорных станций // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 4. – С. 10 – 13.
20. Спиридович Е. А., Воронков В. И., Крюков О. В. Системная оптимизация энергопотребления агрегатов компрессорных станций // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 1 (49). – С. 58 – 70.
21. Крюков О. В. Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Труды IX Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления», SICPRO'12. – 2012. – С. 222 – 236.
22. Хлынин А. С., Крюков О. В. Реализация факторов энергоэффективности электроприводных газоперекачивающих агрегатов в проектах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 32 – 37.
23. Крюков О. В. Стабилизация систем электромагнитного подвеса роторов двигателей газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 7. – С. 27 – 32.
24. Крюков О. В. Эксплуатация систем электромагнитного подвеса роторов двигателей газоперекачивающих агрегатов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 7. – С. 13 – 20.
25. Крюков О. В., Титов В. Г. Автоматическая стабилизация систем электромагнитного подвеса роторов двигателей газоперекачивающих агрегатов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 50 – 54.
26. Крюков О. В. Преимущества электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Главный энергетик. – 2015. – № 9. – С. 16 – 23.
27. Kryukov O. V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – March 2013. – Vol. 84. – Issue 3. – Pp. 135 – 140.
28. Захаров П. А., Крюков О. В. Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях // Вестник Ивановского государственного энергетического университета, 2008. – № 2. – С. 98 – 103.
29. Крюков О. В., Степанов С. Е., Бычков Е. В. Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 / отв. за вып. И. В. Гуляев. – Саранск, 2014. – С. 409 – 414.
30. Захаров П. А., Крюков О. В. Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64 – 70.
31. Степанов С. Е., Крюков О. В., Плехов А. С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 29 – 31.

Поступила в редакцию 16.11.2016

Олег Викторович Крюков,
д-р техн. наук, доцент, главный специалист АО «Газпрогазцентр»,
т. (831) 428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru.

PERSPECTIVES OF ELECTROMAGNETIC SUSPENSION INTENDED FOR THE ROTORS OF GAS COMPRESSOR UNITS

O.V. Kriukov

New types of gas compressor units have been revised which use electromagnetic suspension of the megawatt-class electric drive rotors. Primary advantages of active electromagnetic suspension have been analyzed, such as enhancement of its reliability, life of equipment as well as reduction of operation costs related to the maintenance of electrically driven gas compression units. The effective operation of the electromagnetic suspension in the dynamic modes as well as during the realization of partially manned and unmanned technologies has been analyzed and the results have been provided. Viable results of implementation of electromagnetic suspension direct-drive and oil-free technologies have been demonstrated. These technologies are intended for functional and reliability improvement as well as energy and ecological performance of the critical units in main gas pipelines.

Key words: electromagnetic suspension, gas compressor unit, compressor station, electric drive, energy performance.

References

1. Puzhailo A. F. and others. Energy saving and automation of the compressor stations electric equipment: Monography / edited by O. V. Kriukov– Nizhny Novgorod: Vector TiS, 2010. – 570 p.
2. Milov V. R., Suslov B. A., Kryukov O. V. Intellectual management decision support in gas industry // Automation and Remote Control. – 2011. – T. 72. – № 5. – С. 1095 – 1101.
3. Kriukov O. V. Experience of manufacturing energy efficient electric drives for gas compressor units // Proceedings of the VIII International (XIX Russian national) conference on automated electric drive AED-2014 (2 tomes) // Releaser Guliaev I. V. – Saransk, 2014. – P. 157 – 163.
4. Kriukov O. V. Strategies of non-variant electric drive control systems of ‘Gazprom’ PJSC // SICPRO’15 control tasks and system identification: Collection. – M. : Trapeznikov V. A. Institute of Control Sciences. – 2015. – P. 368 – 386.
5. Kriukov O. V., Gorbatushkov A. V., Stepanov S. E. The foundations of designing the non-variant electric drives of the power sites // Automated electric drive and industrial electronics. Proceedings of the IV National Research-to-Practice conference: collection / under the general editorship of V. Iu. Ostrovlianchik. – Novokuznetsk, 2010. – P. 38 – 45.
6. Kriukov O. V. Analysis of the single block structures of homopolar machines intended for gas compression units // Industrial engineering: scientific internet journal. – 2015. – T. 3. – No 4. – P. 53 – 58.
7. Kriukov O. V. Integrated analysis of the operation conditions of electric drives within the gas-transport units // Compressor engineering and pneumatics. – 2013. – No 4. – P. 14 – 20.
8. Babichev S. A., Bychkov E. V., Kriukov O. V. Analysis of the technical condition and reliability of electrically driven gas compressor units // Electric engineering. – 2010. – No 9. – P. 30 – 36.
9. Kriukov O. V., Stepanov S. E. Upgrading control systems of electrically driven gas compressor units // Engineering systems automation and control issues. International science and technology conference article collection / edited by M. A. Sherbakov. – Penza, 2013. – P. 29 – 32.
10. Kriukov O. V., Stepanov S. E. Improving stability of electric drive operation of the centrifugal blowers on ‘Gazprom’ JSC compressor stations // Gas industry. – 2014. – No 8 (710). – P. 50 – 56.
11. Kriukov O. V. Paradigm of application of the electrically driven gas compression units on ‘Gazprom’ JSC installations // Current state and future development of electric and heat technologies. International science and technology conference records: (XVIII Benardos readings): Collection. – Ivanovo, 2015. – P. 61 – 65.
12. Kriukov O. V. Methodology and tools of the neuro-fuzzy systems of predicting the condition of electric drives within the gas compressor units // Electric engineering. – 2012. – No 9. – P. 52 – 60.
13. Kriukov O. V. Analysis of the safe launch systems intended for electrically driven gas compression units // Compressor engineering and pneumatics. – 2012. – No 2. – P. 12 – 17.
14. Kriukov O. V., Titov V. G. Analysis of launch modes of electrically driven gas compression units // News of the Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2012. – No 3. – P. 29 – 35.
15. Kriukov O. V. Hardware and algorithmic facilities intended for safe launch of high-power drives. Part 1 // Electric equipment: operation and maintenance. – 2013. – No 9. – P. 23 – 30.
16. Kriukov O. V., Vasenin A. B., Serebriakov A. V. Test bed of the power installation electromechanical part // Drive engineering. – 2012. – No 4. – P. 2 – 11.
17. Serebriakov A. V., Kriukov O. V., Vasenin A. B. Fuzzy models and algorithms of control of energy installations // Conference proceedings ‘Control processes within technical, ergatic, organizational and network systems’: collection / edited by S. N. Vasilev. – 2012. – P. 467 – 469.
18. Kriukov O. V. Virtual load sensor of synchronous machines // Electric equipment: operation and maintenance. – 2014. – No 3. – P. 45 – 50.
19. Kriukov O. V. Basic principles of partially manned technologies in operation of electrically driven gas compressor stations // Electric equipment: Operation and maintenance. – 2014. – No 4. – P. 10 – 13.

20. Spiridovich E. A., Voronkov V. I., Kriukov O. V. System power consumption optimization of the compressor station units // Science and technology in gas industry. – 2012. – No 1 (49). – P. 58 – 70.
21. Kriukov O. V. Application tasks of the experiment planning theory intended for the non-variant objects of the gas-transport systems // Studies of the IX International conference ‘Control tasks and system identification’, SICPRO’12: Collection. – 2012. – P. 222 – 236.
22. Khlynin A. S., Kriukov O. V. Implementation of the energy saving factors for gas compressor units in projects // Electric engineering: scientific internet journal. – 2014. – T. 1. – No 2. – P. 32 – 37.
23. Kriukov O. V. Stabilization of the electromagnetic suspension systems intended for the drive rotors of the gas compressor units // Compressor engineering and pneumatics. – 2013. – No 7. – P. 27 – 32.
24. Kriukov O. V. Operation of electromagnetic suspension systems intended for the drive rotors of the gas compressor units // Electric equipment: Operation and maintenance. – 2014. – No 7. – P. 13 – 20.
25. Kriukov O. V., Titov V. G. Automated stabilization of the electromagnetic suspension systems intended for the drive rotors of the gas compressor units // Industrial automation. – 2011. – No 6. – P. 50 – 54.
26. Kriukov O. V. Benefits of the electromagnetic suspension intended for the electric drive motors of gas compression units // Chief power engineer. – 2015. – No 9. – P. 16 – 23.
27. Kryukov O. V. Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – March 2013. – Vol. 84. – Issue 3. – P. 135 – 140.
28. Zakharov P. A., Kriukov O. V. The foundations of non-variant control over the electric drives of gas-transport systems during random perturbations // Reporter of Ivanovo State Power University. – 2008. – No 2. – P. 98 – 103.
29. Kriukov O. V., Stepanov S. E., Bychkov E. V. Non-variant systems of technologically interconnected electric drives of the main pipeline objects // Proceedings of the VIII International (XIX Russian national) conference on automated electric drive AED-2014: collection / releaser I. V. Guliaev. – Saransk, 2014. – P. 409 – 414.
30. Zakharov P. A., Kriukov O. V. Methodology of the non-variant control over the compressor station units under random effects // News of the Higher Educational Institutions. Electromechanics. – 2009. – No 5. – P. 64 – 70.
31. Stepanov S. E., Kriukov O. V., Plekhov A. S. Basic principles of automated control over the excitation of synchronous machines within the gas compressor units // Industrial automation. – 2010. – No. 6. – P. 29 – 31.

***Oleg Victorovich Kriukov**, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor,
Chief Specialist of ‘Giprogazcentr’ JC,
tel. (831) 428-25-84, e-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru.*