

13. Мнацаканов, Р. Г. Триботехнические свойства смазочных материалов в нестационарных режимах работы [Текст] / Р. Г. Мнацаканов. — Киев: КМУГА, 1997. — 109 с.
14. Мнацаканов, Р. Г. Влияние неустановившихся режимов работы на смазочное действие масел и смазок в условиях качения со скольжением [Текст]: дисс. ... к. т. н.: 05.02.04 / Р. Г. Мнацаканов. — Киев: КИИГА, 1986. — 156 с.
15. Кламман, Д. К. Смазки и родственные продукты [Текст]: пер. с англ. / Д. К. Кламман. — М.: Химия, 1988. — 488 с.
16. Ребиндер, П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды [Текст] / П. А. Ребиндер. — М.: Наука, 1979. — 384 с.
17. Официальный сайт ОАО «Полема» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: http://www.polema.net
18. Dimofte, F. Tests of bearings and gears with PVD coatings for aerospace transmissions; results and problems [Text] / F. Dimofte, T. L. Krantz; ed. by K.-D. Bouzakis // Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 1–3 October 2008. — Chalkidiki, Greece: EEDM and PCSSM, 2008. — P. 33–44.

АНАЛІЗ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОФЛЮСУЮЧИХ ПОКРИТТІВ В УМОВАХ КОЧЕННЯ З КОВЗАННЯМ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

У роботі проведено аналіз кінетики зміни фізико-механічних, протизношувальних і антифрикційних властивостей покриття, отриманого при напиленні на контактні поверхні самофлюсуючого порошку ПГ-АН9. Встановлено збільшення тривалості нормальної роботи покриття з найбільшою товщиною при змащуванні контактних поверхонь трансмісійною оливою в умовах ступеневого підвищення навантаження. Визначено механізми розміцнення поверхневих шарів металу, що визначають зносостійкість контактних поверхонь.

Ключові слова: самофлюсуючі покриття, знос, антифрикційні властивості, мікротвердість, нестационарне навантаження.

Микосянчик Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности жизнедеятельности,

Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технических наук, профессор, заведующий отдела упрочнения поверхности элементов конструкций, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, Киев, Украина.

Агеев Максим Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра эксплуатации судовых энергетических установок и общепромышленной подготовки, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Лопата Виталий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерии поверхности, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Микосянчик Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент, кафедра безпеки життєдіяльності, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу зміцнення поверхні елементів конструкцій, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, Київ, Україна.

Агеев Максим Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра експлуатації судових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки, Херсонська державна морська академія, Україна.

Лопата Виталий Миколайович, кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерии поверхности, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Mikosyanchuk Oksana, National Aviation University, Kyiv, Ukraine, e-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Lyashenko Boris, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine.

Ageev Maxim, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Lopata Vitaly, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 621.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66948

Иванов В. Б.

АНАЛИЗ ПРЕИМУЩЕСТВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

В статье рассмотрены преимущества использования электроприводных газоперекачивающих агрегатов при транспортировке природного газа на основе анализа эксплуатационных, экологических и экономических факторов. Выполнено сравнение частотно-регулируемых, гидродинамических и механотронных электроприводных агрегатов с турбоприводными. Показаны условия эффективного использования различных видов приводов.

Ключевые слова: газовая турбина, электродвигатель, компрессор, регулируемый привод, эксплуатационные, экологические, экономические факторы.

1. Введение

Расширение сферы использования электроприводных центробежных компрессоров стало заметной тенденцией как в технологиях переработки нефти и газа, так и процессах транспортировки и хранения газа. В США, Европе, на Ближнем Востоке и Юго-Восточной Азии увеличивается доля нагнетателей, использу-

ющих электропривод. Даже в обеспеченной дешевым собственным газом России на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ «Кстово», «Кириши») и компрессорных станциях (КС 22 «Чебоксарская») за последние годы были реализованы проекты по замене газовых турбин на электродвигатели в качестве приводов центробежных компрессоров. Распространению данной тенденции способствовал целый ряд факторов, а именно:

- профицит электроэнергии при одновременном обострении в ряде регионов дефицита природного газа;
- доступная стоимость электроэнергии и возможность использовать льготные ночные тарифы, которые еще больше увеличивают ценовое преимущество по отношению к стоимости газа;
- рост экологических требований к использованию технологического оборудования и увеличение объемов производства «чистой» электроэнергии из возобновляемых источников;
- более высокая техническая готовность электроприводных агрегатов в сравнении с газовыми турбинами, что особенно важно в условиях необходимости частых пусков компрессоров;
- более высокая долговечность электроприводов, простота их эксплуатации и существенно более низкие затраты на техническое содержание, что в совокупности обеспечивает снижение затрат жизненного цикла как наиболее объективного критерия эффективности технологии;
- развитие технологий управления производительностью центробежных компрессоров (частотное регулирование, гидродинамическое регулирование).

Рассматривая каждый из приведенных факторов можно предположить, что с течением времени каждый из них будет играть все более существенную роль в выборе электродвигателей в качестве альтернативы газотурбинному приводу.

Этим обосновывается актуальность проведенного исследования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Преимущества более гибких, надежных и экологически безопасных электроприводных технологий подтверждается как со стороны технических, так и экономических и нормативных требований [1–3]. Это тем более важно, когда речь идет об оборудовании, рассчитанном на срок службы в 30–40 лет, в течение которых возможны значительные изменения расхода газа, режимов работы оборудования и условий его использования.

Модернизации Украинской газотранспортной системы предусматривает замену устаревшего оборудования ряда КС, где установлено 160 электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) общей мощностью 828 МВт. До обострения отношений с Россией и значительного повышения стоимости газа доля ЭГПА в общих объемах перекачки была крайне незначительной и коэффициент использования оборудования доходил до 0,03. Это объяснялось наличием как объективных причин (технологических и коммерческих проблем в случае использования ЭГПА), так и субъективных (простота выполнения задач транспортировки газа при одновременном его использовании в качестве энергетического ресурса для работы оборудования). Технологические проблемы связаны с невозможностью регулировать производительность подавляющего большинства ЭГПА, используемых в ГТС Украины. Проблемы коммерческого характера связаны с необходимостью использовать ресурс (электроэнергию), которым распоряжается другое ведомство. Газовый кризис заставил резко изменить отношение к использованию ЭГПА и существенно увеличить их вклад в перекачку

газа. Несомненно, уровень использования ЭГПА мог бы быть еще более значительным, если бы находящиеся в эксплуатации электроприводы обладали способностью адаптации давления и расхода к условиям работы газотранспортной системы [4, 5]. Регулирование давления и расхода необходимо, чтобы компенсировать сезонные и суточные колебания вследствие неравномерного разбора газа, пусков и остановов ГПА, изменения потоков газа по отдельным газопроводам.

В современных системах магистральных газопроводов для управления производительностью ЭГПА применяются технологии частотного и гидродинамического регулирования [6–9]. Частотное предполагает управление скоростью вращения электродвигателя, в то время как гидродинамическое состоит в управлении скоростью вращения центробежного компрессора при неизменной скорости вращения электродвигателя. В качестве механизмов, реализующего функцию управления скоростью вращения компрессора, используется либо гидромурфта с изменяющимся уровнем заполнения, либо планетарная передача с непрерывно изменяющимся передаточным числом (механотронный привод «Ворекон»), что обеспечивает бесступенчатое изменение скорости выходного вала [10].

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — технологии приводов центробежных газоперекачивающих агрегатов.

Цель исследования — проанализировать факторы, влияющие на выбор привода газоперекачивающего агрегата, показать преимущества использования ЭГПА, определить необходимые условия для их применения.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Выполнить классификацию факторов, влияющих на выбор привода ГПА центробежного типа.
2. Проанализировать преимущества электроприводных газоперекачивающих агрегатов на основе выделенных факторов.
3. Показать необходимые условия использования ЭГПА, позволяющие реализовать их объективные преимущества.

4. Результаты исследования факторов, определяющих выбор привода газоперекачивающих агрегатов центробежного типа

Задача выбора газотурбинного или электрического (с частотным или гидродинамическим регулированием) привода для центробежного компрессора не может быть сведена к использованию какого-либо одного критерия оценки и требует рассмотрения целого ряда факторов, учитывающих эксплуатационные возможности оборудования, экологические последствия и, конечно же, экономические преимущества [4].

Характеристику эксплуатационным возможностям оборудования можно дать, рассмотрев различные типы приводов с точки зрения их соответствия основным показателям работы. К ним относятся: соответствие технологическим параметрам работы компрессорной станции (напор, расход, структура сети), требуемому диапазону регулирования, имеющимся производственным площадям и электрической сети; показатели надежности

и технической готовности; уровень гибкости предлагаемых решений; простота и доступность обслуживания.

С точки зрения **экологических** требований необходимо учесть, прежде всего, такие факторы, как: воздействие на окружающую среду; выбросы в атмосферу; уровень шума.

К **экономическим** критериям относятся объем суммарных инвестиций в проект, стоимость используемых энергетических ресурсов, величина затрат на техническое обслуживание и ремонты, а также интегральные показатели, такие как стоимость жизненного цикла и срок окупаемости.

4.1. Эксплуатационные возможности оборудования. Выбор конструкции компрессорного агрегата и типа привода основывается на анализе операционных потребностей и проектируемых рабочих точек. Выбирая между турбо- и электроприводом, прежде всего, необходимо проанализировать низкоскоростные режимы (малое давление газа). Турбины не накладывают существенных ограничений, за исключением колебаний их производительности в зависимости от атмосферного давления и условий эксплуатации (состояние фильтров и загрязнение компрессора, старение уплотнений). Электроприводы накладывают определенные ограничения относительно нижней части кривой сжатия, что требует более тщательного анализа рабочих точек на предмет их достижимости данным приводом. Если в результате такого анализа подтверждена приемлемость электропривода, то его существенным преимуществом является обеспечение гибкости системы по сравнению с газовой турбиной, что особенно необходимо в условиях частых пусков, поскольку:

- газовая турбина имеет более низкую пусковую надежность;
- частые пуски увеличивают тепловые нагрузки турбины и ведут к уменьшению наработки на отказ и увеличению затрат на обслуживание;
- необходимость очистки и времени предварительного прогрева увеличивает продолжительность пуска газовых турбин.

Недостаточная гибкость газотурбинного привода влияет на показатели эффективности, особенно в режимах частичной загрузки. При частотном регулировании или использовании такой разновидности гидродинамического, как механотронный привод «Ворекон», их К.П.Д. остается практически неизменным на всем диапазоне изменения скорости вращения, в то время как для газовой турбины К.П.Д. существенно снижается при частичной нагрузке [4]. В то же время диапазон регулирования ограничивается возможностями компрессоров. Центробежные компрессоры обычно работают в режимах не ниже 55 % от номинальной скорости вращения.

Надежность современных электродвигателей практически зависит только от надежности энергоснабжения. Чтобы добиться не уступающему электроприводу уровня надежности, для газовой турбины необходима совершенная и дорогостоящая система ее обслуживания. Ресурс электродвигателя также значительно больше ресурса газовой турбины. Однако, на срок службы всей системы электропривода существенно влияет использование частотных преобразователей, ресурс которых составляет 10–12 лет. В этом смысле предпочтительнее гидродинамический регулируемый привод, имеющий ресурс не менее 30 лет [3], что соответствует проектному сроку эксплуатации КС.

Оценивая необходимое для размещения оборудования пространство можно отметить преимущества газовой турбины и гидродинамического электропривода, в то время как частотно-регулируемые приводы требуют значительных площадей для размещения высоковольтных вспомогательных устройств, трансформаторов, фильтров гармоник, маслоохладителей. Как и все высоковольтное оборудование, они должны выполнять требования относительно минимальных безопасных расстояний, допустимых для человека и техники, вся инфраструктура должна быть недоступной для возгораний газа. Опыт показывает, что при использовании частотно-регулируемых приводов потребность в производственных площадях для КС увеличивается примерно вдвое по сравнению с газотурбинным приводом и примерно в 3–4 раза по сравнению с гидродинамическим [4].

Важным ограничением в использовании электрических приводов является состояние надежности и готовности сети электроснабжения, а также качество электроэнергии. Это обуславливает выбор вида электросети, размера кабелей, с учетом потенциального воздействия устройства на сеть. Электрическая сеть подвергается экологической опасности, как при наземных, так и при подземных ЛЭП. Следовательно, может быть необходим резервный источник питания и дополнительные затраты на реализацию проекта.

В свою очередь, оценивая эксплуатационные возможности газовых турбин важно учитывать качество газа. Напротив, это не накладывает никаких ограничений при использовании электропривода.

4.2. Экологические ограничения по выбору оборудования. Хотя экологические ограничения в Украине не столь существенны, как в странах Евросоюза, рассматривая перспективные проекты необходимо учитывать ограничения на CO, CO₂, NO_x и CH₄. Для газовых турбин проблема поддержания допустимого уровня выбросов при низкой частичной нагрузке является чрезвычайно актуальной и требует активно совершенствовать конструкции, реагируя на постоянное ужесточение норм выбросов. Это еще больше ограничивает гибкость режимов использования газовых турбин и ведет к удорожанию оборудования. К экологическим ограничениям следует отнести также уровень шума, который в случае применения газовых турбин более высок, чем при электроприводах и часто требует устройств защиты от звукового давления.

4.3. Экономические критерии. Наиболее корректным экономическим критерием выбора типа привода является оценка стоимости жизненного цикла, предполагающая расчет полной стоимости реализации проекта на протяжении всего жизненного цикла работы оборудования. Корректным является расчет стоимости жизненного цикла за 30-летний период, т. е. проектный срок эксплуатации компрессорной станции. Такой расчет должен включать суммарные инвестиции в проект и эксплуатационные расходы, связанные с работой оборудования.

При расчете инвестиционных затрат ключевую роль играют затраты на подключение к электрическим сетям. Без учета этих затрат газовая турбина всегда будет более дорогим приводом, чем гидродинамический и в большинстве случаев даже более дорогим, чем частотно-регулируемый. В то же время, если требуется подключение к сетям, то кроме дополнительного оборудования большое влияние на величину затрат оказывает как состояние до существующей сети, так и ее состояние.

Анализируя эксплуатационные расходы можно выделить постоянные и переменные. Постоянные расходы, включающие накладные и заработную плату персонала, условно можно считать одинаковыми для всех типов приводов. Что же касается переменных, то они зависят от годовой загрузки оборудования и включают затраты энергетических ресурсов, затраты на техническое обслуживание. В перспективе следует учитывать и плату за выбросы парниковых газов. При расчете затрат на энергетические ресурсы необходимо учитывать продолжительность работы компрессорного агрегата в году, а также показатели эффективности работы или К.П.Д. с различными типами приводов. Расчеты, выполненные для конкретных проектов приводов компрессорных агрегатов, показывают, что все перечисленные составляющие переменных расходов для газовых турбин существенно больше, чем для электроприводов.

На затраты на техническое обслуживание и ремонты, которые применительно к газовым турбинам имеют тенденцию роста к концу основного жизненного цикла компонентов (газогенератор, горячая секция, силовая турбина) влияет интенсивность эксплуатации. Газовые турбины требуют сложного дорогостоящего обслуживания, периодических проверок и относительно частых профилактических воздействий. На работоспособность данных приводов также существенно влияет качество газа, что потенциально увеличивает и затраты на техническое обслуживание. Обслуживание газовых турбин, как правило, осуществляется на основе сервисных договоров с производителями турбин. Не менее дорогостоящим с привлечением специалистов высшей квалификации является обслуживание частотно-регулируемых приводов. Что же касается механических работ, к которым относят и обслуживание гидродинамических приводов, то квалификация персонала компрессорных станций позволяет внедрить систему обслуживания собственными силами без привлечения производителей оборудования или же с их привлечением только для выполнения капитального ремонта. Гидродинамические приводы, как и стандартные приводные электродвигатели требуют минимума работ по обслуживанию.

5. Обсуждение результатов исследования факторов, влияющих на выбор привода газоперекачивающих агрегатов центробежного типа

Перспективы расширения использования электропривода для транспортировки газа не вызывают сомнения. Это связано с тем, что технологии управления скоростью вращения в электроприводах, постоянно совершенствуется, при этом расширяя продуктовую линейку таких приводов. Существует возможность использовать гораздо более мощные и более эффективные приводы, чем это было в недавнем прошлом. На магистральных газопроводах США используются регулируемые ЭГПА мощностью 30 и более МВт. Перспективе расширения сферы их применения не противоречит гораздо более низкая, чем в Украине стоимость природного газа.

Разрабатываемая методика расчета затрат жизненного цикла позволит учесть все рассмотренные выше факторы и дать инструмент объективной оценки каждого из приводов при их использовании в конкретных проектах строительства и модернизации КС.

6. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Выделены эксплуатационные, экологические и экономические группы факторов, определяющих выбор приводов для центробежных газоперекачивающих агрегатов.
2. По каждому из факторов представлен сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования электроприводных газоперекачивающих агрегатов.
3. Определены необходимые условия использования ЭГПА.

Литература

1. Цирулева, Н. Н. Перспективы применения электроприводных ГПА [Текст] / Н. Н. Цирулева, А. А. Рябышев // Газовая промышленность. — 2010. — № 10. — С. 12–15.
2. Kurtz, R. Application guideline for electrical motor drive equipment for natural gas compressors [Text] / R. Kurtz, R. Frogge, M. Hinchliff, G. Lortie, R. Raymer, J. Redfield, A. Sites, R. Smith. — Southwest Research Institute, 2009. — 79 p.
3. Костенко, Д. А. Регулируемые приводы: возможности, затраты, эффективность [Текст] / Д. А. Костенко, В. Б. Иванов // ТЭК. — 2008. — № 4. — С. 30–33.
4. Кончаков, Н. Н. Применение гидромфт Фойт для регулирования центробежных компрессоров [Текст] / Н. Н. Кончаков, М. Рихтер, В. И. Ситас, В. Б. Иванов, А. В. Федюхин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 3/7(63). — С. 4–8. — Режим доступа: \www/URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/14807>
5. Ишков, А. Г. Современное состояние и перспективное развитие направлений энергосбережения в транспорте газа [Текст] / А. Г. Ишков, Г. А. Хворов, М. В. Юмашев // Газовая промышленность. — 2010. — № 9. — С. 36–39.
6. Ernstberger, A. Speed Control of Turbocompressors [Text]: Reprint from VDI Report № 1425 / A. Ernstberger; Voith Turbo. — Germany: K & E, 2000. — 10 p.
7. Онищенко, Г. Б. Энергоэффективность электроприводных газоперекачивающих агрегатов [Текст] / Г. Б. Онищенко // Промышленная энергетика. — 2014. — № 8. — С. 23–29.
8. Крюков, О. В. Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов [Текст] / О. В. Крюков // Приводная техника. — 2010. — № 5. — С. 20–27.
9. Жабин, В. М. Сравнительный анализ способов регулирования режимов работы центробежных нагнетателей электроприводных ГПА [Текст] / В. М. Жабин, Д. В. Косарев // Транспорт газа. — 2007. — № 7. — С. 23–30.
10. Иванов, В. Б. К вопросу о сравнительной эффективности механотронного и частотно-регулируемого приводов [Текст] / В. Б. Иванов, М. Рихтер, В. И. Ситас // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 3/10(57). — С. 32–35. — Режим доступа: \www/URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4180>

АНАЛІЗ ПЕРЕВАГ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

У статті розглянуті переваги використання електропривідних газоперекачувальних агрегатів при транспортуванні природного газу на основі аналізу експлуатаційних, екологічних та економічних факторів. Виконане порівняння частотно-регульованих, гідродинамічних та механотронних електроприводних агрегатів із турбоприводними. Показані умови ефективного використання різних видів приводів.

Ключові слова: газова турбіна, електродвигун, компресор, регульований привід, експлуатаційні, екологічні, економічні фактори.

Іванов Вадим Борисович, директор, Представителство «Фойт Турбо Сп. з о. о.», Київ, Україна, e-mail: Vadim.Ivanov@voith.com.

Іванов Вадим Борисович, директор, Представництво «Фойт Турбо Сп. з о. о.», Київ, Україна.

Ivanov Vadim, Voith Turbo Sp. z o. o. Representation, Kyiv, Ukraine, e-mail: Vadim.Ivanov@voith.com