

Я.З. Гузельбаев, А.И. Архипов, А.В. Андрианов, А.М. Ахметзянов, А.П. Харитонов, И.Ф. Хуснутдинов (ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»), И.Г. Хисамеев, Е.Р. Ибрагимов (ОАО «Казанькомпрессормаш»), г. Казань, Россия

## Конструктивное решение сухого компрессорного агрегата

Обоснован выбор схемы энергоэффективного надежного компрессорного агрегата без мультипликатора с высокочастотным электроприводом для энергетических газотурбинных установок.

**Ключевые слова:** компрессорный агрегат, высокочастотный электродвигатель, электромагнитный подшипник, регулирование, частота вращения, охлаждение, технологический газ.

Обґрунтований вибір схеми енергоефективного надійного компресорного агрегату без мультиплікатора з високочастотним електроприводом для енергетичних газотурбінних установок.

**Ключові слова:** компресорний агрегат, високочастотний електродвигун, електромагнітний підшипник, регулювання, частота обертання, охолодження, технологічний газ.

The choice of chart of energyeffective reliable compressor aggregate is reasonable without a cartoonist with a high-frequency electromechanic for power gas-turbine plants.

**Keywords:** compressor aggregate, high-frequency electric motor, electromagnetic bearing, adjusting, frequency of rotation, cooling, technological gas.

В ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» с 2003 г. выполняется инициативная научно-исследовательская опытно-конструкторская разработка безмультипликаторных, безмасляных компрессорных агрегатов со встроенным высокочастотным электродвигателем, ротором на электромагнитных подшипниках (ЭМП) и с регулируемой частотой вращения. Работы по этой тематике выполнялись по запросам потребителей компрессорной техники.

Многочисленные запросы в 2008 - 2010 годах изготовителей-поставщиков газотурбинного привода для энергетических газотурбинных установок (ГТУ) мощностью от 16 до 30 МВт и парогазотурбинных установок (ПГУ) мощностью от 40 до 500 МВт свидетельствуют о широкой потребности в дожимных компрессорах топливного газа (КТГ).

Требуемые параметры топливного газа по запросам заказчиков представлены в табл.1.

Наряду с требуемыми параметрами в заказах к компрессорам пред-

ставлялись следующие дополнительные индивидуальные требования:

- регулирование производительности (в т.ч. при использовании одного КТГ на несколько ГТУ) от 25 до 100%;
- компактность (возможность использования существующих помещений при модернизации без дополнительного строительства новых помещений);
- диапазон климатических исполнений по ГОСТ 15150 от У1 до УХЛ4;
- повышенный ресурс непрерывной работы – от 2 до 5 лет;
- короткие сроки поставки – до 7 месяцев;
- «сухое» безмасляное исполнение;
- патентная чистота компрессора, поставляемого на экспорт.

Часть запросов 2010 года по компрессорам промышленных газов также требуют схемы «сухого» компактного исполнения центробежных компрессоров. Конструктивное исполнение компрессоров топливного газа, как и компрессоров промышленных газов, должно производиться с учетом индивидуальных требований заказчика, но на базе унифицированных решений.

По расчетам ЗАО НТК дожимные компрессоры топливного газа могут обеспечить параметры, представленные в табл.2.

### Перспективный компрессорный агрегат

Современные разработки [1-3] некоторых зарубежных фирм по созданию центробежных компрессорных агрегатов с минимально

Таблица 1. Требуемые параметры топливного газа

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Давление начальное, абс.	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	от 0,2 до 2,5 (2... 25)
Давление конечное, абс.	МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	от 1,6 до 5,0 (16... 50)
Весовой расход	кг/с	от 1 до 20

необходимым количеством составных частей и сроком непрерывной эксплуатации до 5 лет (40 000 часов) представляют интерес. Из традиционной классической конструктивной схемы предлагается исключить: мультипликатор, муфты, концевые уплотнения, систему смазки и систему подготовки уплотняющего газа. Масляные подшипники заменить на электромагнитные.

Несомненно, что сокращение количества составных частей компрессорного агрегата – потенциальный путь повышения его эксплуатационной надежности, сокращения числа вспомогательных систем обеспечения, уменьшения количества контролируемых параметров, снижения объемов регламентных работ при техобслуживании и ремонте, снижения массо-габаритных показателей. Все вышесказанное должно привести к сокращению эксплуатационных затрат – самой расходной части жизненного цикла изделия.

Сокращение числа вращающихся частей и вспомогательных систем обеспечения создает предпосылки к созданию герметичных компрессорных агрегатов, а для исключения контакта загрязненного газа с электрическими частями предлагается использовать капсулирование частей электропривода (статора, ротора) и ЭМП [1].

Таким образом, перспективный герметичный компрессорный агрегат состоит из:

- высокочастотного электропривода;
- единого вала на (электро) магнитных опорах;
- модуля (модулей) сжатия.

#### **Выбор высокочастотного электропривода**

Центробежные компрессорные установки (ЦКУ) применяются в основном в непрерывном произ-

**Таблица 2. Расчетные параметры дожимных компрессоров ЗАО НТК**

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Отношение давлений		от 2 до 25
Объемная производительность по условиям всасывания	м <sup>3</sup> /мин	от 10 до 350
Потребляемая мощность на расчетном режиме	кВт	от 200 до 10 000
Частота вращения ротора компрессора на расчетном режиме	об/мин	от 7000 до 50 000
Мощность электропривода	кВт	от 250 до 11 000
Наружный диаметр базовых рабочих колес	мм	от 200 до 675
Наружный диаметр не базовых рабочих колес	мм	от 130 до 200
Базы корпусов		от 1 до 5
Число ступеней сжатия		от 1 до 16

водстве, часто без резерва. Они должны быть надежными и безотказными, т.к. каждый час простоя приносит потребителю значительные убытки. Сроки создания ЦКУ от 7 до 12 месяцев, а сроки поставки некоторых комплектующих достигают 9 месяцев. Времени на разработку, доводку, дополнительные исследования и испытания новых комплектующих нет, поэтому ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» применяет в своих проектах в основном серийные (отработанные и доведенные) образцы комплектующих, в частности электродвигатели.

Выбор готовых высокочастотных электродвигателей на ЭМП под оптимальные параметры (мощность, частота вращения) компрессора, не требующих доработок, ограничен.

В табл.3 приведен ряд высокочастотных электродвигателей с номинальным значением мощности и частоты вращения фирмы SKF (S2M) [3].

Фирма «CONVERTEAM» (ALSTOM) [2] является пионером в применении высокоскорост-

ных прямоприводных технологий. Она разработала ряд технических решений по созданию как синхронных, так и индукционных электродвигателей. Индукционное решение, называемое MGV, базируется на запатентованной конструкции, которая остается до настоящего времени оригинальной и уникальной в промышленности.

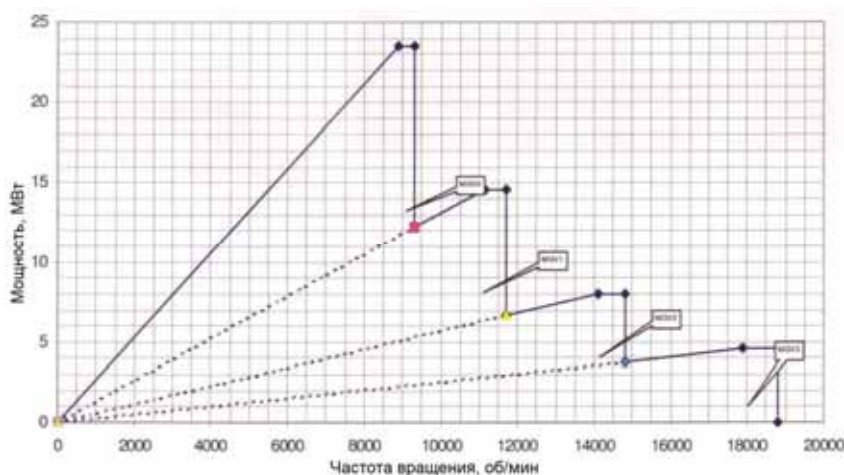
На рис. 1 показаны возможные области применения каждого из четырех типов асинхронных высокочастотных электродвигателей фирмы «CONVERTEAM».

Вертикальные линии указывают максимальную скорость (частоту вращения), соответствующую каждому из четырех нормализованных диаметров ротора. Верхняя точка каждой вертикальной линии указывает значение максимальной мощности электродвигателя, работающего на этой скорости.

Технические характеристики высокочастотных электроприводов фирмы «SIEMENS» [1] для компрессоров герметичного типа приведены в табл.4. Привод – частотно регулируемый. Диапазон

**Таблица 3. Характеристика электродвигателей SKF (S2M)**

$N_{ном}$ , кВт	15	40	70	150	175	250	300	360
$n_{ном}$ об/мин.	80 000	45 000	30 000 45 000 70 000	30 000	45 000	45 000	30 000	20 500



**Рис. 1. Зависимость мощности от частоты вращения для электродвигателя типа «Stand Alone»**

частот вращения от 30 до 105%.

Анализ материалов по компрессорам топливного газа, сданных в эксплуатацию, вновь разработанных, а также КТГ по запросам 2008-2010 гг. в применении к схеме «HOFIM» позволил провести частичную унификацию высокочастотного привода с преобразователем частоты вращения. Результаты анализа сведены в табл. 5.

Таким образом, из имеющихся готовых электроприводов, при потребляемой мощности (КТГ по схеме «HOFIM»):

- до 350 кВт необходимо применять электропривод фирмы SKF (S2M);
- от 750 до 1600 кВт - электропривод фирмы «CONVERTEAM» с номинальной мощностью 1,8 МВт и номинальной частотой вращения ротора 17 420 об/мин;
- от 1600 до 2700 кВт - электропривод фирмы «CONVERTEAM»

с номинальной мощностью 3,0 МВт и номинальной частотой вращения ротора 13 400 об/мин;

- от 3000 до 6000 кВт - электропривод фирмы «CONVERTEAM» с номинальной мощностью 6,0 МВт и номинальной частотой вращения ротора 12 130 об/мин.

**Выбор конструктивного решения в разработке ЗАО НТК**

При использовании в схеме «HOFIM герметичный» высокочастотных электродвигателей на ЭМП ротора, уже поставляемых фирмами «CONVERTEAM» или SKF, проблемы остаются те же, что и при использовании их в схеме «MOPICO» [3]. Понятны и доступны те преимущества, которые появляются в центробежных компрессорных установках с применением высокочастотного электропривода и ЭМП ротора. В целях рекламы и сбыта своей продукции заинтересованные фирмы преподносят

**Таблица 4. Характеристики электродвигателей фирмы «SIEMENS»**

$N_{ном}$ , МВт	7,5	10	15	20
$n_{ном}$ , об/мин.	12 200	9500	9500	7600

**Таблица 5. Унификация высокочастотного электропривода по базам корпусов сжатия**

	N эл. двигателя, МВт	n, об/мин	База корпуса сжатия
1	1,8	17 420	2
2	3,0	13 400	3
3	6,0	12 130	4

только преимущества, не представляя никакой информации о сопутствующих недостатках. Указанные преимущества носят относительный характер. Один и тот же признак, являясь преимуществом в одном вопросе, может быть недостатком в другом.

Опыт ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» по применению высокооборотных прямоприводных электродвигателей в конструкциях центробежных компрессорных агрегатов, в том числе КТГ, выявил несколько проблем, которые могут оказать влияние на выбор схемы.

1. Охлаждение ротора электродвигателя технологическим газом в схемах «MOPICO» и «HOFIM герметичный».

В указанных схемах ротор электродвигателя и компрессора находится в среде технологического газа. Если съем тепла от статорной части может быть осуществлен жидкостью, в частности, водой, то охлаждение роторной части (в том числе и ЭМП) возможно только технологическим газом. Так как высокочастотный электродвигатель, а соответственно его ротор, имеют меньшие размеры (что преподносится как преимущество по сравнению с асинхронным электродвигателем нормальной (1500, 3000 об/мин) частоты вращения, а количество тепла, подлежащее съему с ротора, в обоих случаях примерно одинаковы, то площадь поверхности теплообмена высокочастотного ротора из-за меньших размеров недостаточна при одинаковых параметрах (расходе, начальной температуре и давлении) охлаждающего газа для нормального охлаждения ротора. Ротор будет нагреваться. Проблема охлаждения ротора высокочастотного электродвигателя возникала во всех разработках ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» по схемам «MOPICO» и «HOFIM герметичный», в частности:

- в проекте компрессора топливного газа с электроприводом S2M мощностью 250 кВт и частотой вращения 47 000 об/мин.;

- в проекте вакуумного компрессора с высокочастотным элек-

троприводом фирмы «ANSALDO» мощностью 800 кВт и частотой вращения 8 300 об/мин.

Одна из разработок – компрессорная установка для сжатия и подачи природного газа в камеры сгорания авиационных двигателей в условиях ограниченного пространства существующих помещений испытательной станции. Производительность установки – 1 кг/с, начальное давление – 2,35 Па, конечное давление – 4,6 МПа. Габариты компрессорного агрегата даны на рис. 2.

По тепловым расчетам, выполненным специалистами S2M, «ANSALDO», ЗАО НТК, для успешного охлаждения роторов электродвигателя необходимо либо увеличение примерно в два раза поверхности теплообмена ротора, либо дополнительное охлаждение технологического газа, направляемого на охлаждение ротора.

Первый путь связан с увеличением длины ротора электродвигателя в два раза, т.к. диаметр ротора из условия прочности увеличивать нельзя. Но это ведет к разработке нового электродвигателя, новых ЭМП, увеличению габаритов, массы, соответственно и стоимости, т.е. к потере того преимущества, которое имел изначально высокочастотный электродвигатель.

Второй путь – это дополнительные энергозатраты на охлаждение технологического газа. Газ, подаваемый на охлаждение, должен быть хорошо подготовлен, пройти глубокую очистку. Но разработка и создание системы охлаждения ведет к увеличению стоимости установки и снижению ее эксплуатационной надежности.

2. Дополнительные (длительные или эквивалентные) испытания материалов, соприкасающихся с технологическим газом в условиях воздействия электромагнитного поля.

Реальные технологические газы, проходящие через компрессор и обтекающие ротор и статорные части электродвигателя, могут содержать различные виды примесей, а также коррозионно-активные агенты, абразивные включения. Неочищенный газ вызывает

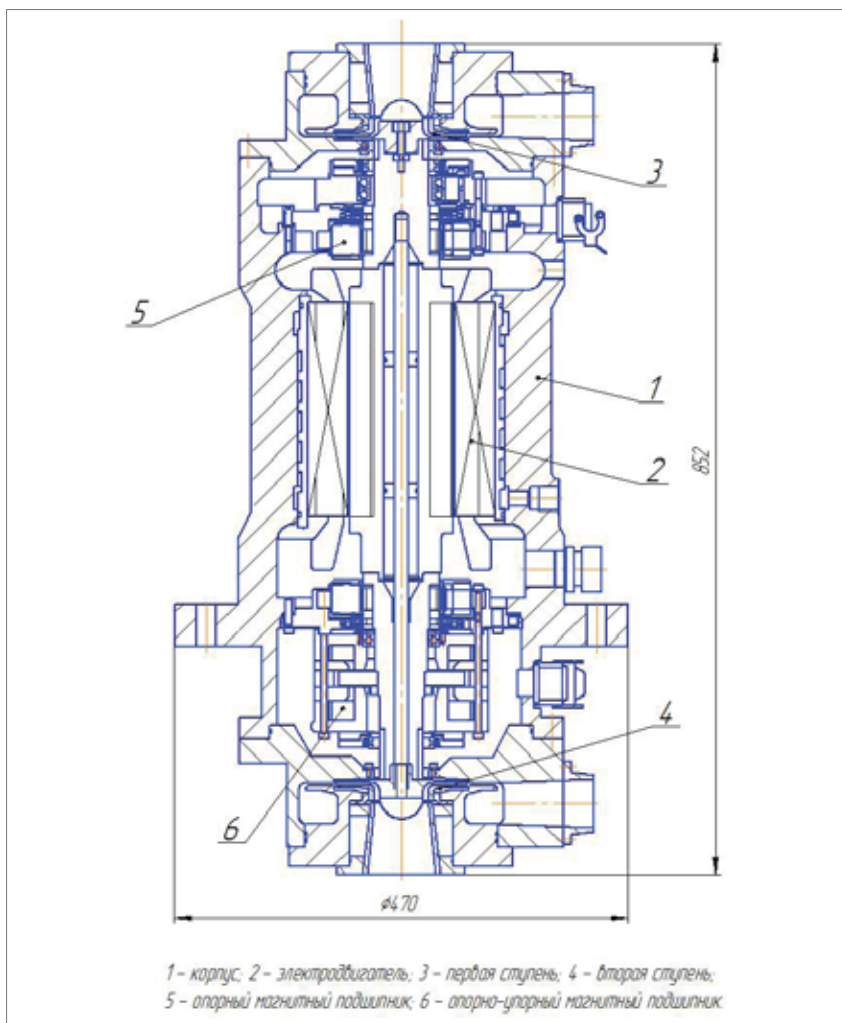


Рис. 2. Компрессорный агрегат топливного газа

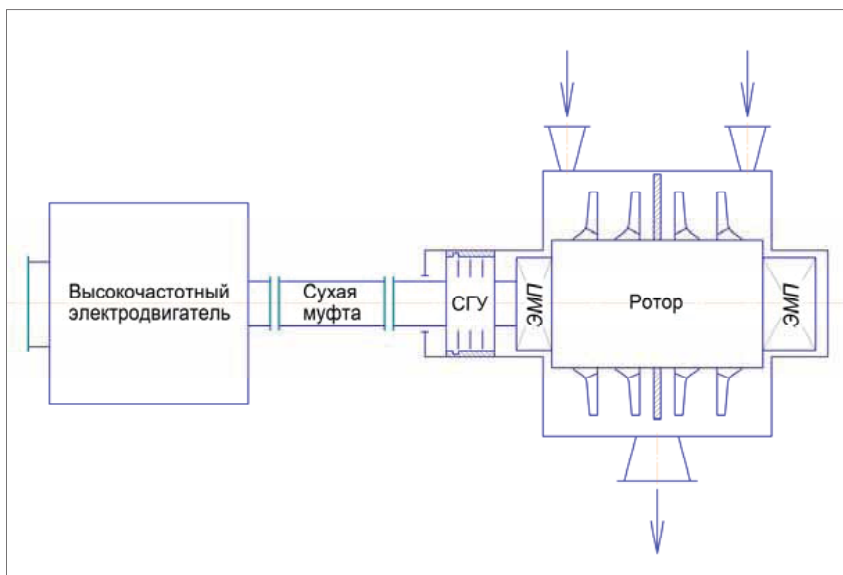
быстрое образование отложений на горячих частях электродвигателя, выводит его из строя, подвергает обмотки статора неизбежному риску короткого замыкания, приводит к отказам магнитных подшипников.

Работы по испытаниям материалов потребуют дополнительных затрат времени и дополнительного финансирования для создания испытательного стенда и проведения испытаний.

Размещение дополнительного оборудования с системой контроля его работы, а также увеличение габаритов статорной части электромотора (для компенсации воздействия изолирующего стакана при капсулировании) приведут к увеличению габаритов электропривода, т.е. к утрате ряда преимуществ высокочастотного электропривода.

3. Все высокочастотные электродвигатели как герметичные, так и негерметичные – единичного производства [1-3]. Как показывают коммерческие предложения поставщиков высокочастотного электропривода (даже негерметичного исполнения) стоимость их более чем в два раза превышает стоимость обычного асинхронного электродвигателя той же мощности с преобразователем частоты вращения, с мультипликатором, муфтами, агрегатом смазки.

С целью исключения указанных проблем предлагается: в разработках безмасляных, безмультипликаторных компрессорных агрегатов ориентироваться на схему «NOFIM» с отдельным расположением высокочастотного электродвигателя (с ротором на ЭМП и отработанной воздушной или жидкостной системой охлаждения) и корпуса



**Рис. 3. Конструктивная схема компрессорного агрегата**

сжатия (с ротором на своих ЭМП), соединенных сухой муфтой.

Для исключения попадания воздуха из атмосферы в технологический газ или минимизации утечек технологического газа в атмосферу в корпусе сжатия применять сухие газодинамические уплотнения. При необходимости сохранения постоянства состава технологического газа в газодинамическом контуре предлагается использовать в качестве буферного газа газ того же состава, что и технологический.

Предложенная схема (рис. 3) позволяет использовать покупной высокочастотный электропривод без доработок, т.к. исключается:

- а) контакт с технологическим газом;
- б) проблема охлаждения и дополнительных испытаний;
- в) проблема с обеспечением герметичности электродвигателя.

В качестве примера компрессорного агрегата, выполненного по разработанной схеме, рассмотрен компрессорный агрегат для вакуумной центробежной установки. Это позволит провести сравнение по технико-экономическим показателям масляного мультипликаторного и «сухого» с высокочастотным электроприводом вариантов компрессорного агрегата при прочих равных условиях.

Компрессорный агрегат выполнен в виде функционального модуля максимальной заводской готовности и включает в себя корпус сжатия, соединительную сухую муфту с кожухом, высокочастотный электродвигатель, раму.

Переход от компрессорного агрегата с системой смазки к полностью «сухому» компрессорному агрегату позволяет:

1. Полностью исключить применение масла (исключить возможность попадания масла в проточную часть компрессора и, соответственно, в газодинамический контур установки), что очень важно для безопасной эксплуатации установки.

2. Упростить конструкцию компрессорного агрегата, исключив мультипликатор, муфту «мультипликатор-электродвигатель», агрегат смазки и систему смазки, а также систему подвода барьерного газа.

3. Снизить габариты агрегата:
  - в длину примерно на 1,5 метра;
  - в ширину примерно на 2,05 метра.

При этом в «сухом» исполнении несколько возрастают габариты преобразователя частоты вращения (ПЧВ), сухого трансформатора (СТ) и шкафов управления.

Потребляемая мощность компрессора на расчетном режиме в «сухом» исполнении – 740 кВт, а в масляном исполнении – 870 кВт, т.е. меньше на 13,5%. Стоимость «сухого» варианта компрессора по предложенной схеме выше стоимости масляного исполнения компрессора (по традиционной классической схеме) примерно на 25%.

### **Выводы**

1. Разработана конструктивная схема (аналог «HOFIM») безмультипликаторных компрессорных агрегатов, не требующих смазки и герметичного исполнения.

Полное исключение системы смазки повышает эксплуатационную надежность компрессорного агрегата. По данным фирмы «SIEMENS» на 20% снижается количество вынужденных остановов компрессорных агрегатов. Наряду с сокращением числа составных частей компрессорного агрегата это обстоятельство увеличивает межремонтный пробег компрессора.

2. Отсутствие широкого рынка высокочастотных электроприводов (не требующих серьезных доработок) на ЭМП ротора, вынуждает разработчиков компрессоров подбирать электродвигатели из имеющихся по мощности и частоте вращения, часто не совсем оптимальные по габаритам и стоимости, что ведет к утере некоторых преимуществ высокочастотного электропривода.

3. Для привода компрессоров топливного газа подобран унифицированный ряд высокочастотных электродвигателей трех типоразмеров мощностью 1,8; 3; 6 МВт, охватывающий всю область запросов по компрессорам топливного газа.

### **Список литературы**

1. Дурьманов В.В. На суше и под водой: капсулированный компрессорный агрегат STC-ECO компании SIEMENS // В.В. Дурьманов, С.А. Леонтьев, В.В. Седов // Турбины и дизели, 2010.- март-апрель.- С. 10-14.
2. Сайт: [www.convertteam.com](http://www.convertteam.com)
3. Сайт: [www.S2M.FR](http://www.S2M.FR)