

УДК 62-233.2

*Розглянуто особливості застосування електромагнітних підшипників в газотурбінній установці, а також результати дослідження їх працездатності в енергоблоках. Наведено масогабаритні характеристики валопроводу, який включає в себе ротори двигуна й турбогенератора. Описана конструкція системи та особливості її налагодження*

*Ключові слова: газотурбінний двигун, магнітний підшипник, валопровід, система регулювання, вібрація, левітація*

*Рассмотрены особенности применения электромагнитных подшипников в газотурбинной установке, а также результаты исследования их работоспособности в энергоблоках. Приведены массогабаритные характеристики валопровода, включающего в себя роторы двигателя и турбогенератора. Описана конструкция системы и особенности ее отладки*

*Ключевые слова: газотурбинный двигатель, магнитный подшипник, валопровод, система регулирования, вибрация, левитирование*

*Features of application of electromagnetic bearings in gas-turbine power plant to installation, and also results of research of their working capacity in power units are considered. Are brought mass-dimensional characteristics wire-shaft, the engine including rotors and a turbogenerator. The design of system and feature of its debugging is described*

*Key words: gas-turbine engine, magnetic bearing, wire-shaft, system, regulation, vibration, levitation*

## РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕРИЙНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ НА МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

**Ю.М. Ануров**

Доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор\*

**Е.В. Литвинов**

Главный конструктор департамента газовых турбин\*  
\*ОАО «ГТ ТЭЦ ЭНЕРГО»  
ул. Трфолева, 2-В, г. Санкт-Петербург, Россия

На предприятиях Группы «Энергомаш» (Генеральный проектировщик ОАО «ГТ-ТЭЦ Энерго») начиная с 2000 г. реализуется проект «ГТ-009», связанный со строительством газотурбинных электростанций малой мощности собственной разработки для выработки, как электроэнергии, так и тепла. Источник механической энергии в энергоблоке - одновальный газотурбинный двигатель с рекуперативным подогревателем ГТ-009, имеющий частоту вращения ротора 6 094 об/мин. Энергоблок включает в себя понижающий редуктор и турбогенератор ТФЭ-10-2ГУЗ (частота вращения 3 000 об/мин). Роторы турбины и генератора опираются на подшипники скольжения. Для выработки тепловой энергии использован котел-утилизатор собственной разработки КУВ-23,2(20)-170.

К настоящему времени уже работает 20 из 24 запланированных к эксплуатации энергоблоков в восьми

городах России. На лето 2009 г. запланирован запуск последней станции в Великом Новгороде с четырьмя энергоблоками.

На начало июля 2009 г. суммарная выработка электроэнергии по станциям составила более 2,2 млрд. кВт·час. Суммарная наработка блоков составляет 335 тыс. часов, а наработка лидерного газотурбинного двигателя ГТ-009 в городе Вельск составила более 40 тыс. часов.

С целью дальнейшего развития проекта газотурбинных электростанций малой мощности в 2002 г. руководством «Энергомаш» принято решение о проектировании станции нового поколения с применением газотурбинного двигателя и генератора без использования смазки - с отказом от масляных подшипников и понижающего редуктора. При этом потребовалось спроектировать новый высокооборотный турбогене-

ротор ТФЭ-10-2(3×2)/6000 УЗ с частотой 101,6 Гц. Для выдачи электроэнергии во внешнюю сеть с частотой 50 Гц было принято решение о проектировании тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ). Проект получил наименование «ГТ-009М», где в качестве альтернативы масляным опорам были приняты магнитные подшипники (МП), преимуществом которых является [1,2]:

- отсутствие механического контакта между ротором и статором;
- отсутствие трения в МП, что означает отсутствие какого-либо износа и, как следствие, отпадает необходимость в обслуживании, наладке и в ремонтных работах;
- ресурс МП сопоставим с ресурсом газовой турбины и турбогенератора;
- жёсткость и вибросостояние опор на виброперемещения вала влияют незначительно;
- мощность, потребляемая МП, в 2...3 раза меньше мощности трения в подшипниках скольжения;
- отсутствие маслосистемы, и как следствие, упрощение и удешевление компонентов станции за счёт устранения значительного количества насосов, фильтров, редукционных клапанов, теплообменников и пр.;
- отсутствие маслосистемы значительно снижает пожароопасность станции в целом.

Общее число энергоблоков, выполненных по проекту «ГТ-009М», составляет 96.

Так как на момент принятия решения о применении МП в конструкции ГТ-009М у российских предприятий не было достаточного опыта не только в их эксплуатации, но и в проектировании (особенно учитывая общую массу роторов - более 10 т), то в качестве стратегического партнёра была выбрана французская компания S2M. Основные параметры и характеристики роторов с магнитными опорами приведены ниже.

Валопровод включает в себя ротор турбины и ротор генератора, соединённые между собой промежуточным валом (рис. 1, 2).

Ротор турбины расположен на двух радиальных МП, а также имеет осевой МП, расположенный в передней опоре компрессора. Ротор турбогенератора также установлен на два радиальных магнитных подшипника, и при этом фиксация в осевом направлении не предусмотрена. В каждом радиальном МП дополнительно установлено по два страховочных подшипника с керамическими телами качения без смазки (рис. 2), которые необходимы для обеспечения выбега ротора в случае отказа системы магнитной подвески.

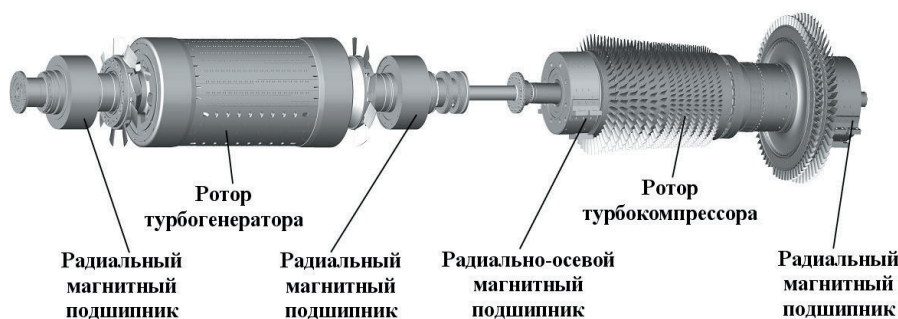


Рис. 1. Внешний вид валопровода энергетической установки ГТ-009М

Массогабаритные характеристики валопровода машины, параметры МП и системы электропитания приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики валопровода энергоустановки ГТ-009М

	Длина, м	Масса, кг
Ротор ГТД	4,82	6 000
Ротор турбогенератора	4,34	4 200
Промежуточный вал	0,82	60
Суммарное значение	9,98	10 260

Таблица 2

Параметры МП и системы электропитания ГТ-009М

Тип магнитного подшипника	Радиально-осевой	Радиальный	
	Газотурбинный двигатель	Генератор	
Расположение подшипника	Газотурбинный двигатель	Генератор	
Допустимая нагрузка (радиальная / осевая), Н	40 000/40 000	43 000 / -	38 000 / -
Масса, кг	1 030	800	750
Мощность шкафа управления, кВт	5,8		5,8
Мощность шкафа питания МП, ВА	14 480		
Напряжение питания электромагнитов МП, В	300; постоянный ток		
Напряжение питания сенсорных датчиков положения, В	30; при частоте 20 кГц		
Срок службы, ч	150 000		

Забегая вперёд, необходимо отметить, что надёжность МП оказалась на таком высоком уровне, что за весь период пуско-наладочных работ, опытной доводки и штатной эксплуатации (наработка более чем 6 000 часов) не было ни одного отказа магнитной подвески.

На первом этапе проектирования роторов, устанавливаемых на МП, были проведены динамические расчёты роторов турбины и турбогенератора по отдельности и всего валопровода в целом. Результаты расчёта, полученные с помощью конечно-элементной модели, сравнивались с результатами экспериментального определения собственных частот свободного вала. На основании полученных результатов корректировалась расчётная модель с целью получения необходимой точности результатов.

Турбогенератор с частотой вращения 6094 об/мин был специально спроектирован с учётом применения в нем магнитных подшипников. Его массивный ротор опирается на вынесенные из корпуса подшипниковые опоры, уста-

новленные на одном основании со статором. Такая компоновка значительно упрощает не только процесс установки и ремонтов, но и эксплуатации.

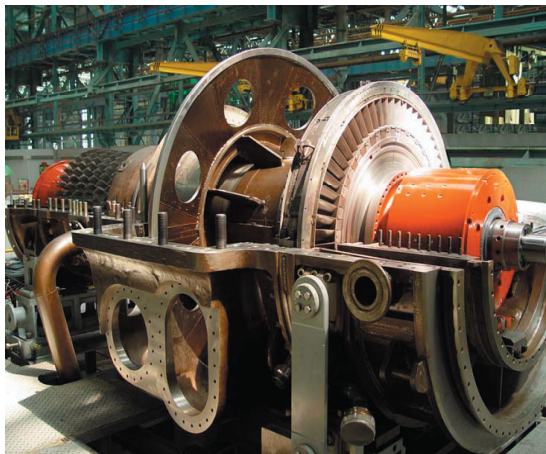


Рис. 2. Газотурбинный двигатель ГТ-009М (верхняя крышка снята; на переднем плане радиальный магнитный подшипник)



Рис. 3 Радиальный магнитный и страховочный подшипники  
 Выбранные материалы и изоляция для конструкции магнитных подшипников обеспечивают их работоспособность при температуре до 160°С. В связи с этим в конструкции энергоблока предусмотрена система принудительного охлаждения МП, которая обеспечивает подачу охлаждающего воздуха на режимах левитирования ротора, запуска, работы под нагрузкой и останова с последующим остыванием узлов.

Подача воздуха на МП передней опоры компрессора осуществляется по двум вариантам. При низкой частоте вращения ротора воздух поступает от вентилятора, нагнетающего воздух в МП; после выхода ротора на номинальную частоту вращения 6094 об/мин вентилятор отключается, и подача воздуха в МП идет за счёт наличия небольшого разряжения перед первым рабочим колесом компрессора.

Охлаждение МП задней опоры (турбина) также осуществляется по двум вариантам. При низкой частоте вращения за счёт нагнетающего вентилятора, а при номинальной частоте вращения за счёт эжекции холодного воздуха отбираемого из-за 6-ой ступени компрессора.



Рис. 4. Вентиляторы подачи воздуха к магнитным подшипникам компрессора и турбины

В обоих случаях с целью уменьшения загрязнения магнитных подшипников воздух отбирается из канала после КВОУ. По результатам эксплуатации зафиксировано, что температура магнитных подшипников при работе не превышает 60...80°С, что полностью подтверждает работоспособность системы охлаждения.

Пусконаладочные работы (ПНР) на головной станции, расположенной в г. Екатеринбург, начались в 2006 г. Этапы ПНР по настройке МП проводились с непосредственным участием французских специалистов из S2M, работа которых была связана с настройкой системы управления МП под конкретные динамические характеристики ротора.

Однако сразу после окончания ПНР с МП, к сожалению, не удалось начать эксплуатацию энергоблоков в режиме выдачи электрической мощности, так как на тот момент не был готов к работе тиристорный преобразователь частоты. К концу 2008 г. все работы по ТПЧ были

завершены и в последних числах декабря успешно проведены необходимые испытания с применением экспериментальной оснастки для измерения параметров потока в проточной части двигателя, а также определения температур и давлений в полостях наддува (в том числе МП), закончившиеся 72-х часовым комплексным опробованием. Были экспериментально подтверждены расчётные критические частоты вращения валопровода, установленного на магнитных подшипниках. Расхождение фактических значений с расчётными не превысило 3 %. Валопровод при выходе на номинальную частоту вращения 6094 об/мин проходит формы колебания вала как жёсткого тела, а затем первую изгибную форму колебаний ротора турбогенератора, которые подавляются средствами управления МП.

Зависимость изменения активной мощности газотурбинной установки ГТ-009М от времени показана на рис. 5. Характеристики вибросмещений качественно отбалансированного ротора турбины при работе под нагрузкой, показанные на рис. 6, не превышают 40...50 мкм (предельно допустимые вибросмещения 105 мкм).

Следует отметить, что при переходе с подшипников скольжения на магнитные подшипники ротор турбины стал более чувствительным к технологическим отклонениям при его сборке. Так, в ходе испытаний была установлена связь между нестабильностью динамических характеристик одного из роторов турбины и грубыми нарушениями, допущенными при его из-

готовлении. Указанный ротор был направлен на завод для переборки с целью устранения отклонений от требований документации. В результате были откорректированы технологические требования к изготовлению и контролю роторов в серийном производстве.

Перевод ротора с режима левитации на страховочные подшипники сопровождался резким ударом (соответствующим падению ротора с высоты 0,35...0,5 мм). В ходе ПНР была предложена и совместно с S2M опробована и внедрена система ступенчатого опускания роторов на страховочные подшипники, значительно снижающая интенсивность динамического воздействия на роторы и опоры.

Отмечена надежность страховочных керамических шарикоподшипников, которые выдержали на рабочих частотах вращения аварийную осевую нагрузку до 7 т, действовавшую на ротор турбины одного из агрегатов в течение 10 минут. После восстановления вышедшего из строя лабиринтного уплотнения осевое усилие ротора нормализовалось.

Конструкция элементов МП, несмотря на достаточную сложность и высокие требования к точности изготовления, предусматривает возможность переборки в условиях станции, при этом достаточно высока степень унификации и взаимозаменяемости основных деталей. Также подтверждена возможность и отработана технология переборки турбоагрегата с выемкой и

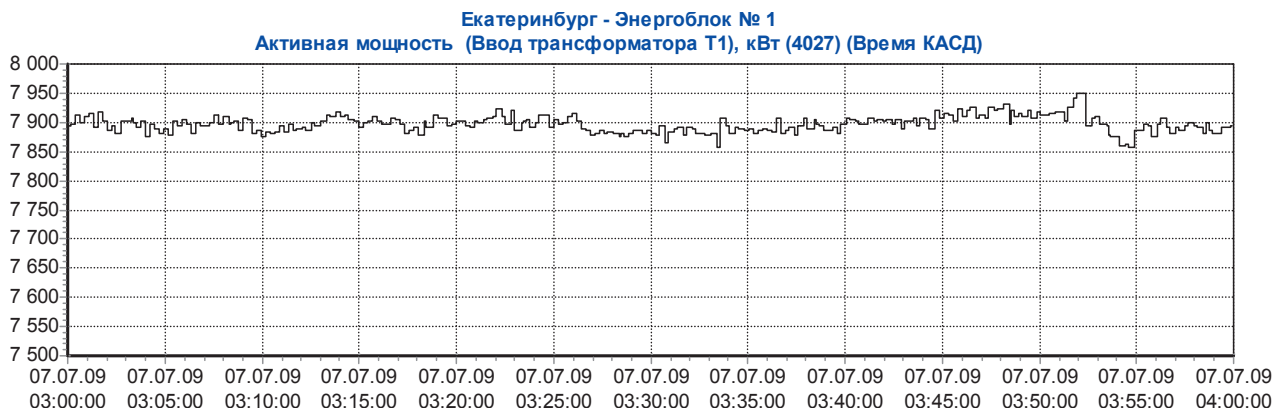


Рис. 5. Электрическая мощность энергоблока

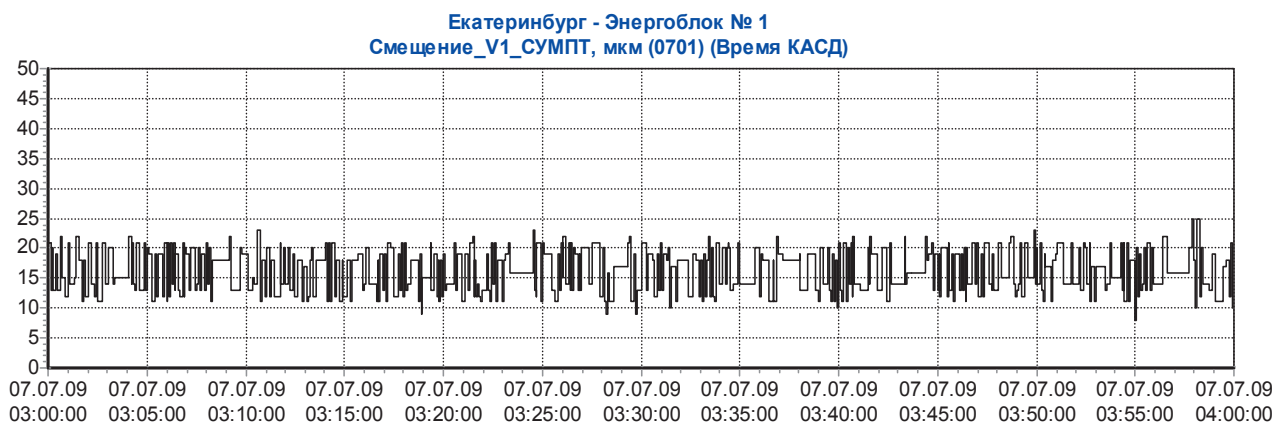


Рис. 6. Характеристики вибросмещения ротора

заменой ротора в условиях станции, регламентированы операции по переборке элементов МП.

На предприятиях «Энергомаш» освоено серийное производство магнитных подшипников, а электронные компоненты, система измерений и контроля, а также программы управления МП поставляются фирмой S2M. Однако в «Энергомаш» ведутся разработки собственной системы управления магнитными подшипниками и уже имеются положительные результаты.

Сейчас находятся в эксплуатации две газотурбинные станции с ГТ-009М (каждая по два энергоблока) в городах Екатеринбурге и Тамбове. Суммарная наработка блоков на середину июля 2009 г. составляет более 6 500 часов.

Достигнутые к настоящему времени специалистами «Энергомаш» результаты интеграции МП в конструкцию и систему управления газотурбинного блока, а также применение тиристорного преобразователя частоты можно считать успешными, что позволяет ускорить реализацию программы ввода новых станций – на 2009 г. запланирован запуск ещё трёх двухблочных станций в городах Магнитогорск, Щёлково и Сасово.

#### Литература

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – С. 206.
2. Активные электромагнитные подшипники для крупных энергетических машин//ВНИИЭМ. Техн. Информ, – ОАБ.– 10 с.

УДК 621.438:226.2

## СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК СОВРЕМЕННЫХ ГТД

**А.А. Халатов**

Доктор технических наук, профессор, заведующий  
отделом\*

Контактный тел.: 8 (044) 456-93-02

E-mail: khalatov@vortex.org.ua

**И.И. Борисов**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник\*

Контактный тел.: 8 (044) 456-28-53

E-mail: borisov@vortex.org.ua

\*Отдел высокотемпературной термогазодинамики

Институт технической теплофизики НАН Украины

ул. Желябова, 2а, г. Киев, Украина, 03057

**Ю.Я. Дашевский**

Ведущий инженер-конструктор

Отдел турбин

ГП НПКГ «Зоря-Машпроект»

пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина, 54018

Контактный тел.: 8 (0512) 49-76-20

E-mail: spe@mashproekt.nikolaev.ua

*В настоящей статье, в виде краткого обзора, представлены наиболее часто применяемые в современных высокотемпературных энергетических ГТД схемы охлаждения сопловых и рабочих лопаток первой ступени. На основе данных, приводимых в открытой литературе, и собственного опыта проектирования рассмотрены достоинства и недостатки этих схем*

*Ключевые слова: охлаждение, двигатель, температура*

*The present report gives a brief survey of the turbine first stage nozzle vanes and blades cooling circuits which are often being used in modern advanced gas turbines for power generation. Based on the data from the open literature and own designing experience, advantages and disadvantages of these circuits are considered*

*Keywords: cooling, the engine, temperature*

### 1. Введение

Повышение температуры газа на входе в турбину остается одним из основных направлений увеличения экономичности ГТД любого назначения, а также соз-

даваемых на их базе газотурбинных установок (ГТУ) и парогазотурбинных установок (ПГУ).

К 2000 году в ряде зарубежных стационарных ГТД большой мощности, таких как M501G, M701G, M701H фирмы «Мицубиси», MS7001G, MS9001G, MS9001H