

## НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОБОРОТНОГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*С использованием современных активных материалов сердечников статора и ротора и конструкционных материалов вращающихся элементов предложены новые технические решения, облик и конструкция высокооборотного энергоэффективного турбоэлектрогенератора. Особенностью турбоэлектрогенератора является соосная двухроторная система, где каждый ротор базируется на двух опорных подшипниках. В результате сокращается суммарная длина системы, возрастает её жесткость, увеличиваются собственные частоты.*

**Ключевые слова:** турбокомпрессорная система, высокооборотный электрогенератор, роторная система, нанокристаллический сплав.

Газотурбинные электроагрегаты малой мощности (до 1 МВт) широко применяются для энергоснабжения, так как обладают рядом достоинств: высокой надёжностью, компактностью, возможностью масштабируемого наращивания мощности, высоким КПД (около 35%), они нашли широкое применение. Их преимущество как автономных источников электроэнергии обусловлено значительным ресурсом, в 2 – 3 раза превышающим ресурс дизельных и газопоршневых электроагрегатов, простотой конструкции, эксплуатации и обслуживания, высокой экологичностью.

Основой газотурбинного электроагрегата является микрогазотурбинный двигатель, приводящий в действие электрогенератор. Вращаемый турбиной газотурбинный двигатель преобразует в механическую работу кинетическую энергию подводящего рабочего тела – газа. Обязательным элементом газотурбинного двигателя, помимо турбины, является компрессор.

Для обеспечения высокого КПД агрегата номинальная частота вращения турбины должна находиться в диапазоне от 60 000 до 96 000 об/мин и приводиться во вращение струей горячего газа с температурой порядка 1000 ÷ 1500 °С. Это является источником целого ряда технических проблем.

Для увеличения теплового сопротивления и достижения оптимальных динамических характеристик роторной системы между турбокомпрессором и электрогенератором применяют трансмиссию, представляющую собой гибкий элемент, либо электромагнитную муфту. Одна из наиболее отработанных конструкций такого электроагрегата раз-

работана фирмой Capstone (США) и защищена более чем 100 патентами.

В ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» разработаны варианты высокоскоростного электрогенератора для транспортного энергетического модуля [1], включая соединение электрогенератора и турбокомпрессора с использованием магнитной муфты, механической трансмиссии и на основе единого вала.

В работе [2] предложена двухроторная компоновка турбокомпрессорной системы, и приведены соответствующие расчёты.

В данной статье приведены технические решения для этой компоновки с учётом заявок на изобретения [3, 4], облик турбокомпрессорной системы, позволяющий оптимизировать её габариты и увеличить жёсткость роторной системы, повысить её первую резонансную частоту. Представлены новые технические решения для электрогенератора, в том числе, использование активных материалов, обладающих необходимыми свойствами, которые ещё не применялись для вращающихся электрических машин.

### Облик турбокомпрессорной системы

При определении нового облика турбокомпрессорной системы (рис. 1) ставилась цель минимизации её габаритов. Поскольку в ряде случаев генератор может длительно работать при частоте вращения меньше номинальной и в переходных режимах, то первая резонансная частота вращения (критическая скорость) должна быть как можно выше и желательно больше номинальной частоты вращения. В предлагаемой конструкции необходимо

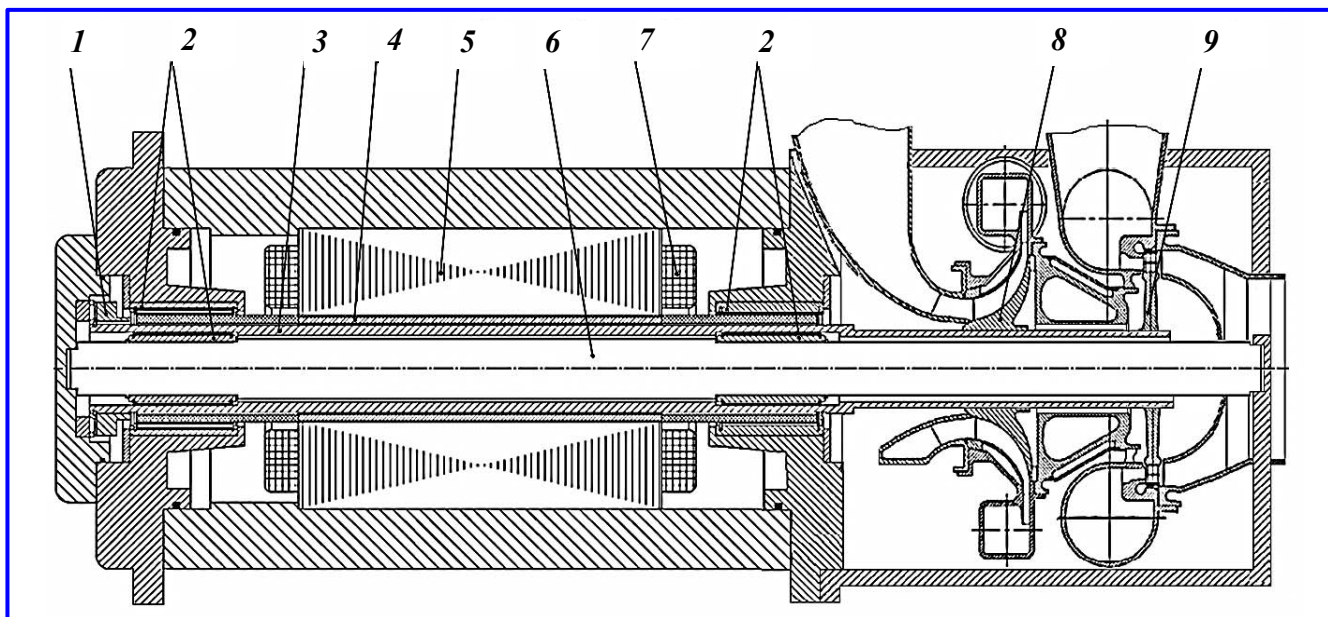


Рис. 1. Эскиз компоновки турбокомпрессорной системы: 1 – упорный подшипник; 2 – опорный подшипник; 3 – внутренний ротор; 4 – внешний ротор; 5 – сердечник статора; 6 – опорный неподвижный вал; 7 – обмотка статора; 8 – колесо компрессора; 9 – колесо турбины

увеличить жёсткость роторной системы, уменьшить её длину, массу и момент инерции. Роль теплового сопротивления между турбиной и электрогенератором (рис. 1 и 2) играет воздушный зазор между внутренним 3 и внешним 4 роторами, препятствующий нагреванию газом, приводящим в

действие турбину 9, постоянных магнитов 10, сердечника статора 5 и обмотки 7. Внутренний ротор 3 выполнен полым из магнитомягкого материала (например стали), в активной части которого нарезаны зубцы, число которых равно числу магнитов 10 внешнего ротора.

На внутреннем роторе 3 расположены колёса турбины 9 и компрессора 8. Внутренний 3 и внешний 4 роторы, выполняя функцию электромагнитной муфты, демпфируют колебания колёс компрессора 8 и турбины 9. Следует отметить, что турбокомпрессор на рис. 1 показан условно как приводной элемент электрогенератора.

В качестве опор высокоскоростной роторной системы могут использоваться подшипники различного типа: газостатические, газодинамические лепестковые или магнитные. С точки зрения уменьшения габаритов наиболее предпочтительны газодинамические подшипники. Они относятся к подшипникам скольжения и обеспечивают подвес ротора за счёт «газовой смазки», аналогично тому, как масляные подшипники скольжения обеспечивают подвес ротора за счёт «масляного клина».

### Новые технические решения при создании конструкции высокооборотного электрогенератора

Рассмотрим конструкцию статора электрогенератора. Высокие обороты приводят к большой частоте перемагничивания сердечника генератора

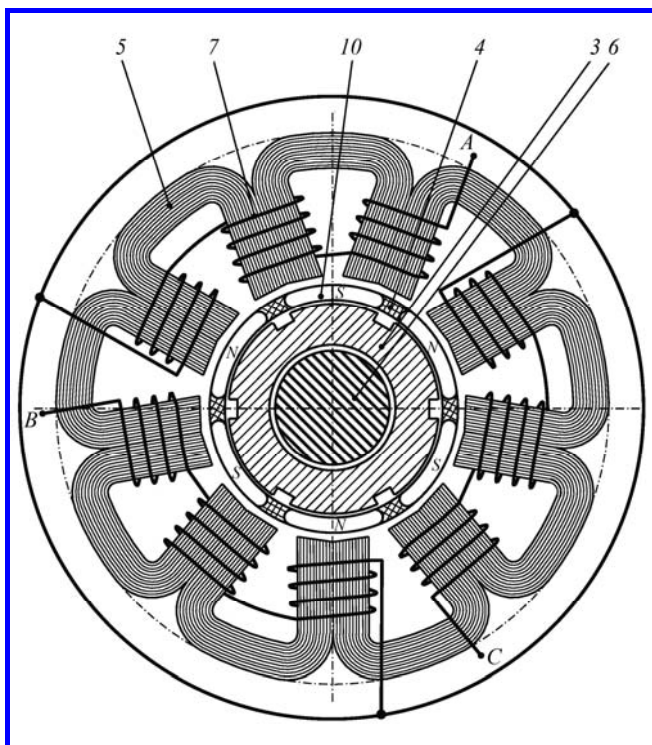


Рис. 2. Поперечное сечение высокооборотного электрогенератора: 10 – постоянные магниты

(порядка 1 кГц), что, в свою очередь, приводит к увеличению потерь в сердечнике статора и добавочных потерь. Это определяет необходимость применения для сердечника статора материала с низкими магнитными потерями, например, нанокристаллического сплава (аморфной стали). Например при частоте перемагничивания 3 кГц и магнитной индукции 1 Тл удельные потери подобного материала в уже собранном магнитопроводе с учётом технологических операций составляют менее 10 Вт/кг.

Направление наилучших магнитных свойств нанокристаллического сплава совпадает с направлением ленты. Поскольку коэффициент анизотропии аморфной стали достаточно высок, при традиционной технологии шихтовки сердечника магнитная проницаемость в направлении одного из полюсов будет максимальной, а в остальных направлениях значительно меньше. Такая несимметрия приводит к недопустимому ухудшению характеристик и невозможности использования традиционной технологии шихтовки статоров электрических машин.

Для достижения поставленной цели требуется собирать перемагничиваемый с высокой частотой сердечник статора так, чтобы магнитный поток всегда проходил по пути с наилучшими магнитными свойствами. Для этого предлагается технология изготовления сердечника 5 путём формирования активной зоны статора из многослойных отрезков аморфных лент, сформированных в виде  $U$  – образных сердечников (см. рис. 2), таким образом, что ось формирования каждого  $U$  – образного сердечника параллельна продольной оси статора [4].

На рис. 2 приведён пример выполнения поперечного сечения активной части генератора, выполненного в виде синхронной электрической машины с числом зубцов сердечника 1 статора (якоря)  $Z = 9$ , на котором размещена трёхфазная обмотка 7, где  $A, B, C$  – начала соответствующих фаз.

Рассмотрим конструкцию ротора турбогенератора. Магнитоэлектрические машины обладают наилучшими массогабаритными показателями, поэтому возбуждение генератора осуществляется от постоянных магнитов. Постоянные магниты размещены во внешнем роторе 4 генератора (см. рис. 2). Взаимодействие внешнего и внутреннего роторов и передача момента осуществляется за счёт «магнитной жёсткости».

Число полюсов ротора (индуктора)  $2p = 6$ , полюса образованы при помощи шести постоянных магнитов 10 чередующейся полярности. Число па-

зов на полюс и фазу машины  $q = 1/2$ . В такой обмотке лобовые части имеют минимальную длину, что важно для сокращения габаритов системы. Кроме того, лобовые части фаз не пересекаются, что оптимально для высоковольтных обмоток, у которых фазное напряжение больше 1 кВ. Недостатком таких обмоток является обширный гармонический состав МДС и высокие потери от высших гармоник, что компенсируется малыми удельными потерями используемого материала.

Наружный ротор представляет собой внешний и внутренний пустотелые цилиндры из высокопрочного немагнитного, неэлектропроводящего материала. Таким материалом может служить стеклопластик. Между кольцами равномерно размещены постоянные магниты 10, которые намагничены в радиальном направлении, полярность постоянных магнитов 10 по окружности чередуется. Между постоянными магнитами имеются зазоры, в которых размещены выполненные из немагнитного неэлектропроводящего материала, например, стеклопластика, удерживающие элементы. Внешний и внутренний пустотелые цилиндры, удерживающие элементы, технологически представляют собой внешний ротор 4.

Неподвижный вал 6 должен быть изготовлен из стали с высокой прочностью и магнитной проницаемостью.

Для решения задачи оптимизации конструкции генератора в работе [2] была описана комплексная (мультифизическая) математическую модель, позволяющая провести анализ:

- электромагнитного поля;
- теплового поля, учитывающего собственные тепловые потери, а также теплообмен с турбиной, нагреваемой гелий-ксеноновой газовой смесью;
- собственных частот колебаний ротора;
- усилий от центробежных сил, действующих на внешний ротор;
- аэродинамического поля, обуславливающего механические потери.

Такой дополнительный анализ может быть проведён для оптимизации газотурбинного агрегата с учётом специфических требований турбокомпрессора и электрогенератора.

## Выводы

В результате применения новых технологий и материалов для изготовления сердечников статора и ротора разработан вариант конструкции электрогенератора с высоким КПД и расположением ротора электрогенератора, компрессора и турбины на

одном валу. Этим достигается сокращение габаритов агрегата, повышение критических частоты вращения роторной системы.

#### Литература

1. Жемчугов Г.А., Коварский М.Е., Магин В.В. Высокооборотный электрогенератор для космического буксира // Труды XIV Международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты». Труды МКЭЭЭ-2012 – С. 89 – 90.
2. Комплексная математическая модель высокоскоростного

электрогенератора / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, И. А. Мещихин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 122. – № 3 – С. 3 – 10.

3. Жемчугов Г.А., Сарычев А.П., Геча В.Я., Захаренко А.Б., Мещихин И.А. Роторная система магнитоэлектрической машины. Заявка на изобретение РФ № 2011131722. Решение о выдаче патента на изобретение 29.08.2012.

4. Геча В.Я. Способ изготовления сердечника электрической машины. Заявка на изобретение РФ № 2011 148459.

Поступила в редакцию 09.11.2012

**Владимир Яковлевич Геча**, д-р техн. наук, зам. генерального директора, т. (495) 365-26-69.

**Андрей Борисович Захаренко**, д-р техн. наук, начальник отдела, т. (495) 366-26-44.

E-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru).