

УДК 621.438

## МЕТОДЫ РАСЧЁТА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Д.В. Голованов, М.Е. Коварский,  
В.В. Магин, И.Г. Трунов  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассматриваются особенности проектирования и создания высокоскоростных генераторов для турбогенераторных установок автономных электростанций. Приведены расчёты генераторов для различных компоновочных схем генератор – привод и описание конструкции макета высокоскоростного генератора мощностью 100 кВт на 60 000 об/мин.  
**Ключевые слова:** высокоскоростной генератор, турбогенераторная установка, механический расчёт.*

Высокоскоростные генераторы (ВГ) нашли широкое применение в турбогенераторных установках автономных электростанций. Созданы генераторы мощностью в пределах 100 – 300 кВт с частотой вращения до 100 000 об/мин. Выбор высокой частоты вращения позволяет значительно снизить массогабаритные характеристики генератора. Для достижения эффективных массогабаритных показателей ВГ, например, менее 1 кг/кВт частота вращения генератора должна составлять не менее 30 000 об/мин. Известно несколько предложений автономных электростанций от иностранных фирм [1, 2]. Фирма [1] «Capstone» создала серию автономных электростанций с газотурбинными установками на мощности 30, 60 и 200 кВт.

В состав турбогенераторной установки (ТГУ) входит привод – турбокомпрессорная установка, ВГ и преобразователь частоты, обеспечивающий на выходе установки электрические параметры промышленной сети. Электростанция на 100 кВт имеет однороторную конструкцию с двумя газодинамическими радиальными и одним осевым воздушными подшипниками (ВП). Частота вращения ВГ составляет 500 Гц. Фирма [2] предлагает электростанцию на 100 кВт с масляными подшипниками качения на свободном конце вала и скольжения для промежуточной опоры. Частота вращения ВГ составляет 500 Гц.

Конструктивная схема однороторной турбогенераторной установки фирмы Elliott представлена на рис. 1.

Электростанция на 200 кВт фирмы «Capstone» имеет двухроторную схему и гибкий торсион соединяющий ротор ВГ и привода. Частота вращения ВГ составляет 1000 Гц. Конструктивная схема турбогенераторной установки представлена на рис. 2.

Высокоскоростные генераторы в составе автономных электростанций находят широкое применение в удалённых районах, не имеющих централизованного электроснабжения, в частности, в

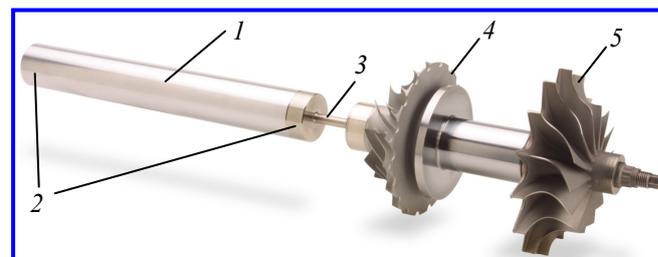
районах крайнего Севера и Восточной Сибири. Для создания ВГ необходимо разработать новые расчётные методы.

Основной особенностью и сложностью расчётов ВГ является необходимость решения помимо традиционных электромагнитных расчётов комплексной задачи динамики роторной системы генератор – привод. Эта задача предполагает определение динамических характеристик роторных систем с учётом реальных жёсткостей опор, расчёт прочности бандажей, определения аэродинамических потерь на поверхности роторов и добавочных электрических потерь в электропроводящих массивах ротора.

Ниже приведены расчёты ВГ турбогенераторных установок. Расчёты представлены для трёх возможных схем компоновки турбогенераторной



**Рис. 1. Однороторная турбогенераторная установка**



**Рис. 2. Двухроторная турбогенераторная установка: 1 – ротор генератора; 2 – шейки воздушных подшипников ротора; 3 – гибкий торсион; 4 – компрессор; 5 – турбина**

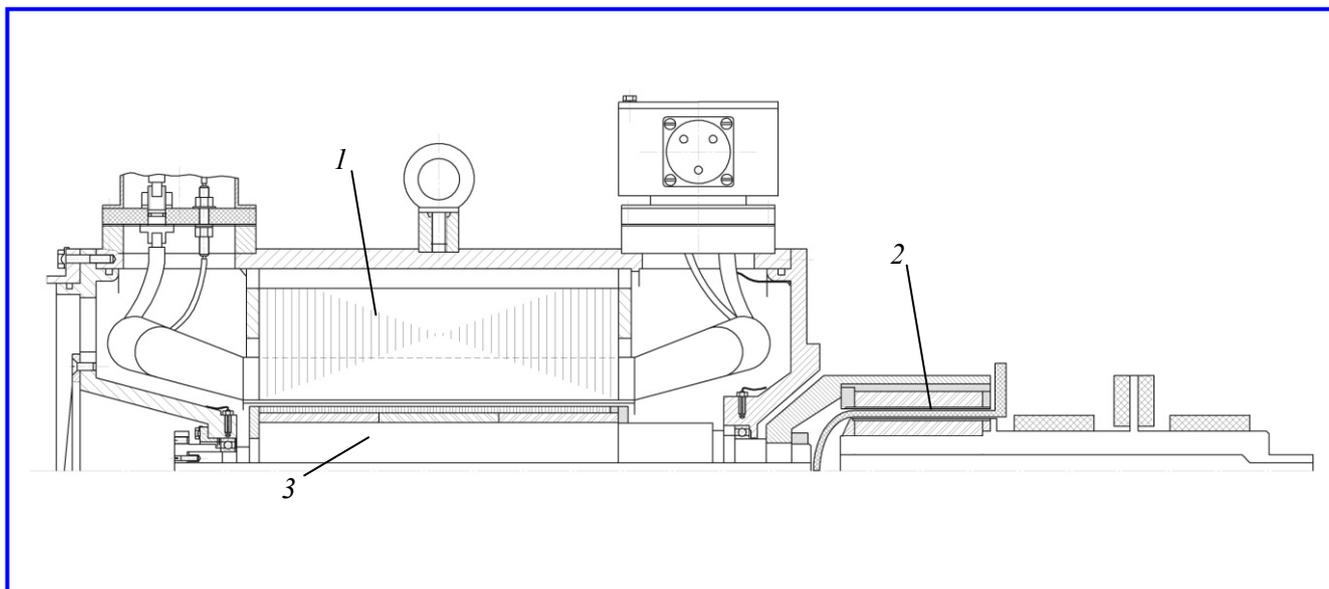


Рис. 3. Конструктивная схема двухвальной турбогенераторной установки с магнитной муфтой

Таблица 1

Результаты расчёта собственных частот ротора с ведомой частью муфты

Диаметр вала, мм	Первая изгибная собственная частота зафиксированного вала, Гц	Первая изгибная собственная частота колебаний свободного вала, Гц
35	492	630
40	598	730
45	711	811

установки: двухвальная, ВГ и привод соединяются посредством магнитной муфты; двухвальная, ВГ и привод соединяются посредством торсиона; одновальная с единым валом ВГ и привода. Мощность рассматриваемой установки 100 кВ·А. Частота вращения вала составляет 30 000 об/мин. Конструктивная схема двухвальной турбогенераторной установки с магнитной муфтой представлена на рис. 3.

Установка включает высокоскоростной генератор 1, разделительную магнитную муфту 2 и газотурбинный привод (на рис. не показан). Предварительное определение главных размеров машины проводится по известным правилам [3, 4] для линейной нагрузки  $A$  порядка 400 – 500 А/см и индукции в воздушном зазоре  $B$  порядка 0,4 – 0,5 Тл. Диаметр расточки статора ВГ составляет 85 мм. ВГ выполнен двухполюсным с жидкостной системой охлаждения. Охлаждение ВГ осуществляется жидкостью, циркулирующей через рубашку статора. Пакет статора выполнен из стали типа 2421 с толщиной листа 0,18 мм. Обмотка статора двухслой-

ная, петлевая выполнена из 25 параллельных проводов ПЭТД-2 диаметром 0,8 мм.

Ротор ВГ 3 содержит вал, выполненный из магнитопроводящей стали типа 20X13, на котором размещен кольцеобразный двухполюсный, намагниченный в радиальном направлении магнит, изготовленный из материала SmCo. Магнит окружает бандаж из титанового сплава. Параметры SmCo сплава:  $B_r$  – 1,05 Тл,  $H_c$  – 590 кА/м, рабочая температура составляет 150°C, прочность на растяжение порядка 120 МПа, прочность на сжатие 900 МПа. Механическая характеристика – прочность на растяжения для стали 20X13 порядка 400 МПа, а для титанового сплава порядка 930 МПа. Ротор установлен на двух радиально-упорных подшипниках производства FAG. На валу ротора жёстко закреплена ведомая часть магнитной муфты. Муфта представляет собой восьмиполюсную магнитную систему. Длина магнитной муфты рассчитана из условия передачи номинального момента с коэффициентом запаса 1,8. Внешняя – ведомая часть муфты выполнена из редкоземельного материала типа NdFeBr с параметрами  $H_c = 820$  кА/м,  $B_r = 1,07$  Тл. Внутри ведомой муфты вращается ведущая часть магнитной муфты, выполненная из SmCo сплава с параметрами  $H_c = 590$  кА/м,  $B_r = 1,045$  Тл. Выбор сплава для ведущей муфты диктуется высокой рабочей температурой материала SmCo. Ведущая магнитная муфта жёстко закреплена на приводном валу, на котором установлены также компрессор и турбина. Приводной вал подвешен на двух радиальных и одном аксиальном гидродинамических воздушных подшипниках,

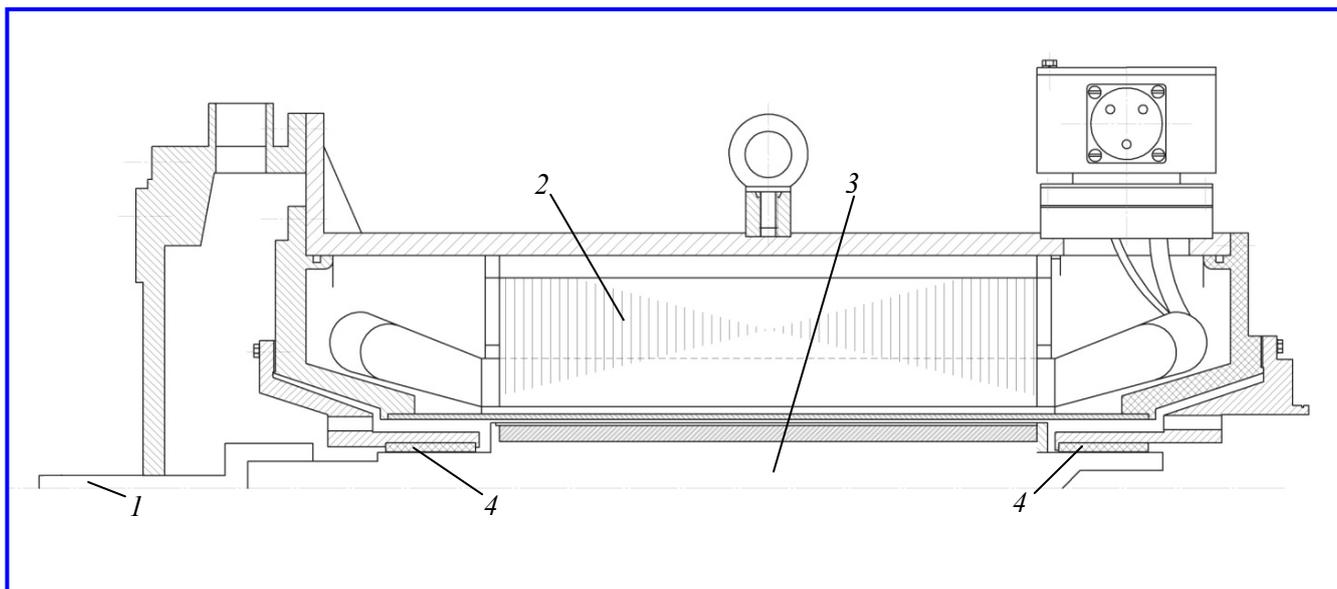


Рис. 4. Конструктивная схема двухвальной с гибким торсионом турбогенераторной установки

которые практически не имеют ограничений по рабочей температуре. Охлаждение ведущей муфты обеспечивается циркуляцией воздуха вдоль поверхности муфты. ВГ подключён к преобразователю частоты, который обеспечивает выходные параметры электроэнергии по частоте (50 Гц) и напряжению (380 В) при работе установки в штатном режиме, а также запуск от аккумулятора газотурбинной установки из холодного состояния. Ниже приведены

результаты электромагнитных и механических расчётов методом конечных элементов ВГ и магнитной муфты для одновальной ТГУ. В табл. 1 приведены результаты расчёта собственных частот ротора с ведомой частью муфты для трёх возможных диаметров выходного конца вала, определяемых диаметром внутреннего кольца примененного подшипника.

Расчёты показывают, что первая изгибная собственная частота вала ВГ не превышает 711 Гц для вала,

Таблица 2

Максимальные напряжения в бандаже из сплава Инконель 718 и магнитах для различных величин натяга

Натяг (по диаметру), мм	Максимальное напряжение в бандаже, МПа	Среднее напряжение в бандаже, МПа	Максимальное напряжение в магните, МПа
0,1	330	315	65
0,15	421	410	41
0,2	513	500	18
0,25	667	630	9

Таблица 4

Механические напряжения в элементах гильзы при различных величинах натягов

Натяг (по диаметру), мм	Максимальное напряжение в корпусе, МПа	Среднее напряжение в яме, МПа	Среднее напряжение в магните, МПа	Среднее напряжение в бандаже, МПа
0,36	818	92	18	72
0,4	840	70	17	77
0,45	880	50	20	38

Таблица 3

Максимальные напряжения в бандаже из сплава титана ВТ22 и магнитах для различных величин натяга

Натяг (по диаметру), мм	Максимальное напряжение в бандаже, МПа	Среднее напряжение в бандаже, МПа	Максимальное напряжение в магните, МПа
0,1	180	170	87
0,15	230	220	74
0,2	285	270	61
0,25	341	325	47

Таблица 5

Механические напряжения в ведущей части муфты при различных натягах для титанового бандажа

Натяг (по диаметру), мм	Максимальное напряжение в бандаже, МПа	Среднее напряжение в магните, МПа	Среднее напряжение в яме (вал), МПа
0,18	431	11	17
0,2	468	9	20
0,22	461	8	30

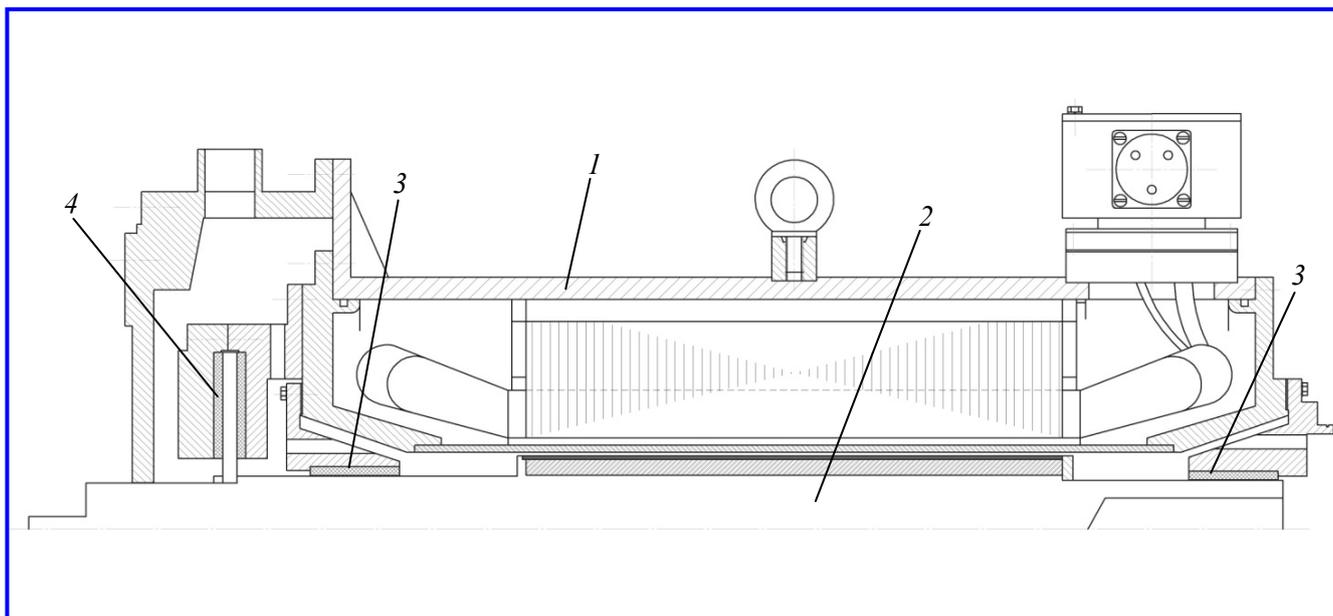


Рис. 5. Конструктивная схема одновальной с единым валом ВГ и привода турбогенераторной установки

опирающегося на подшипник с внутренним диаметром 45 мм. Первая изгибная собственная частота колебаний вала турбокомпрессора составила 2425 Гц, что значительно превышает частоту вращения турбогенераторной установки. Механический расчёт ротора ВГ проведён для частоты вращения 30 000 об/мин. При расчёте полагалось, что все центробежные усилия от магнитов приложены к бандажу. В результате расчёта оценивались нагрузки, действующие на конструктивные элементы ротора и вызванные ими деформации деталей ротора. В табл. 2, 3 приведены результаты расчётов для трёх величин натягов для бандажей, выполненных из сплавов Инконель 718 и титана ВТ22 соответственно.

Расчёты свидетельствуют, что оба материала: сплав Инконель 718 и сплав титана ВТ22 обеспечивают работоспособность ВГ.

Механический расчёт магнитной муфты проведён отдельно для ведомой и ведущей частей. Для обеспечения требуемой жёсткости конструкция ведомой муфты содержит корпус толщиной 5 мм из стали 20Х13, внутри которого с натягом установлена магнитная система. Магнитная система состоит из ярма толщиной 5 мм, на внутренней поверхности которого закреплены магниты. Внутреннюю поверхность магнитов защищает гильза из немагнитного материала. Результаты расчётов механических напряжений в элементах гильзы при различных величинах натягов приведены в табл. 4.

В табл. 5 приведены значения механических напряжений, возникающих в ведущей муфте при различных натягах для бандаж, выполненного из титана ВТ22.

Конструктивная схема двухвальной с гибким торсионом турбогенераторной установки представлена на рис. 4, где в состав турбогенератора 2 входит ротор 3, подвешенный на двух радиальных газовых подшипниках 4. В конструкции турбогенераторной установки турбокомпрессорная часть турбогенератора имеет свои опоры и передает на вал ВГ через торсион 1 только вращающий момент и обеспечивает осевое позиционирование ротора ВГ. Это обстоятельство позволяет исключить опорный подшипник, уменьшить суммарную длину ротора, уменьшить внешний диаметр ротора ВГ до 73 мм и увеличить активную длину генератора с 225 до 320 мм. Расчёт собственных частот ротора ВГ показал, что первая изгибная собственная частота колебаний вала при диаметре шейки вала под подшипником 40 мм составляет 1029 Гц. Такой результат позволяет с большой долей вероятности утверждать, что ВГ при всех режимах работы сохраняет вал «жёстким».

Конструктивная схема одновальной с единым валом ВГ и привода турбогенераторной установки представлена на рис. 5.

Турбогенераторная установка включает в себя турбогенератор 1, ротор с магнитами из материала SmCo 2, газовые радиальные подшипники 3 и аксиальный подшипник 4. На свободном конце

вала консольно устанавливается рабочее колесо привода (на рис. не показано).

Конструктивная длина ротора в этом варианте несколько превышает предыдущий вариант за счёт применения аксиального (упорного) подшипника. Внешний диаметр ротора увеличен до 83 мм, длина активной части машины снижена до 310 мм. Внутренний диаметр подшипника со стороны привода равен 60 мм со стороны противоположной приводе 55 мм.

Расчёт собственных частот ротора ВГ показал, что первая изгибная собственная частота колебаний вала составляет 606 Гц, что значительно ниже расчётной жёсткости вала в предыдущем варианте.

Механический расчёт ротора ВГ проведен для частоты вращения 30 000 об/мин. При расчёте полагалось, что все центробежные усилия от магнитов приложены к бандажу. В результате расчёта оценивались нагрузки, действующие на конструктивные элементы ротора и вызванные ими деформации деталей ротора. В табл. 6 приведены результаты расчётов механических напряжений для трёх величин натягов бандаж, выполненного из сплавов Инконель 718.

Расчётный порядок прочности материала составляет 1500 МПа. Максимальное напряжение, возникающее в бандаже составляет 670 МПа.

Экспериментальная проверка расчётных методик проведена на ВГ мощностью 100 кВт 60 000 об/мин. Фотография генератора представлена на рис. 6.

Генератор имеет ротор с магнитоэлектрическим возбуждением. Материал магнитов SmCo с параметрами  $H_c = 820$  кА/м,  $B_r = 1,1$  Тл. Бандаж ротора выполнен из стали 30ХГСН2МА с пределом прочности 1700 МПа. Подшипники шариковые керамические, радиально-упорные. Предусмотрена установка альтернативного варианта радиальных и упорных газодинамических воздушных подшипников. Статор имеет прочный корпус с запрессованным пакетом, собранным из листов электротехнической стали 2421 толщиной 0,18 мм. Обмотка статора двухслойная двухполюсная. В процессе испытаний подтверждены результаты электромагнитных и механических расчётов.

### Выводы

1. Разработаны методы расчётов высокоскоростных турбогенераторов для автономных газотурбинных установок, предложенные методы позволили рассчитать сложные электромеханические комплексы автономных турбогенераторных установок.



Рис. 6. Генератор 100 кВт, 60 000 об/мин

Таблица 6

Механические напряжения для трёх величин натягов для бандаж, выполненного из сплавов Инконель 718

Натяг (по диаметру), мм	Максимальное напряжение в бандаже, МПа	Максимальное напряжение в магните, МПа
0,14	392	59
0,2	523	28
0,26	670	20

2. Двухвальная компоновочная схема турбогенераторной установки с гибким торсионом обеспечивает наибольшую жёсткость установки и позволяет создавать модули ВГ – ТКУ наибольшей мощности.

3. Полученные расчётные значения с высокой точностью сходятся с результатами экспериментов.

### Литература

1. Micro-turbine generators / edited by M. J. Moore // Professional Engineering. – Printed in the USA, 2002.
2. Elliott Energy Systems, Inc. TA 100 R CHP. 100 кВт микротурбинная установка для комбинированного производства тепла и электроэнергии. Техническое описание. – Киев : НПП «Мадек», 2008.

3. Виноградов Н. В. Проектирование электрических машин / Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов, П. С. Сергеев. – М. : Энергия, 1969. – 632 с. : ил.

4. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения / Я. Б. Данилевич, В. Н. Антипов, И. Ю. Кручинина и др. – СПб. : Наука, 2009. – 102 с. : ил.

*Поступила в редакцию 14.03.2012*

*Дмитрий Викторович Голованов, канд. техн. наук,  
научный сотрудник, т. (495) 366-15-61.*

*Михаил Ефимович Коварский, канд. техн. наук, главный конструктор,  
заместитель начальника отдела, т. (495) 366-15-61.*

*Вячеслав Валерьевич Магин, начальник лаборатории, т. (495) 366-30-01.*

*Игнат Геннадьевич Трунов, ведущий конструктор, т. (495) 366-14-10.*

*E-mail: vniiem@vniiem.ru.*