

УДК 621.313

## **Высокооборотный генератор на электромагнитных подшипниках для энергетических установок космического назначения**

В.В Магин , В.АКлабуков , А.В Рогоза .

### **Аннотация**

В настоящей работе представлена проработка и проведены исследования возможного проектного облика высокооборотных (частота вращения 60000 об/мин) электрических генераторов мощностью 250 кВт и электромагнитных подшипников применительно к их использованию в агрегатах газотурбинной системы преобразования энергии энергетических установок космического назначения.

Проведена проработка наиболее оптимальных типов высокооборотных электрических генераторов: синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и генератор с внешнезамкнутым магнитным потоком. Выполненная проработка выявила невозможность выполнения генератора с внешнезамкнутым магнитным потоком мощностью 250кВт на частоту вращения 60000 об/мин. Поэтому единственным возможным типом высокооборотного генератора стал синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов.

Рассмотрены электромагнитные подшипниковые опоры, способные длительное время без обслуживания обеспечивать работу турбогенератора. Определена конструкция радиального и осевого электромагнитных подшипников. Выполнены расчетно-теоретические исследования проектных характеристик электромагнитных подшипников. Проведены расчеты критических частот вращения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, показавшие необходимость прохождения минимум одной критической частоты вращения.

**Ключевые слова:** турбогенератор; электромагнитный подшипник; газовый подшипник; синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов; генератор с внешне замкнутым магнитным потоком.

В Российской Федерации началась разработка энергодвигательной установки мегаваттного класса для космической техники нового поколения [1]. Такие масштабные проекты как, пилотируемые экспедиции на планеты Солнечной системы, освоение Луны, создание защитных систем нашей планеты от астероидно-кометной опасности способны стать одним из основных путей развития современных космических технологий. Очевидно, что реализация этих проектов потребует существенного повышения энергообеспечения космических средств – с имеющихся на сегодняшний день десятков киловатт до десятков мегаватт. Такое увеличение энергообеспечения на сегодняшний день возможно лишь с использованием ядерных источников энергии. Для ядерных энергоустановок мегаваттного уровня мощности газотурбинное преобразование энергии, по сравнению с другими способами является предпочтительным с точки зрения снижения стоимостных и массогабаритных характеристик.

Эффективность и надежность таких систем во многом зависит от параметров входящих в ее состав генераторов, преобразующих механическую энергию вращающегося ротора турбокомпрессорного агрегата в электричество. Условия работы электрических генераторов будет характеризоваться высокой частотой вращения (проектное задание 60000 об/мин), длительным ресурсом работы (более 80 000 часов), воздействием ионизирующих излучений. Основными требованиями [2], которые предъявляются к электрогенераторам, являются:

- высокие значения коэффициента полезного действия;
- высокая функциональная надежность в течение всего срока службы;
- минимально возможные масса и габариты;
- работоспособность на частотах вращения, соответствующих получению оптимальных характеристик турбоагрегатов.

Современные тенденции создания газотурбинных систем преобразования энергии с электрической мощностью в сотни киловатт свидетельствуют об использовании в таких системах высокоэффективных бесконтактных электрических генераторов переменного тока на постоянных магнитах. В качестве примера могут быть приведены газотурбинные установки фирмы Capstone (США) [3], используемые в качестве автономных источников электропитания с мощностью в одном агрегате от 30 до 200кВт, в составе которых

применяются высокооборотные (60000...96000 об/мин) электрические генераторы на постоянных магнитах.

Условия работы в замкнутом контуре газотурбинного преобразования в течение длительного времени однозначно определяют необходимость использования в качестве опор вращающихся роторов турбоагрегатов и электрогенератора бесконтактных подшипников, не требующих смазки. Одним из типов таких подшипников являются электромагнитные подшипники (ЭМП), представляющие собой управляемое электромеханическое устройство, в котором стабилизация положения ротора осуществляется силами магнитного притяжения, действующими на ротор со стороны электромагнитов, ток в которых регулируется системой автоматического управления по сигналам датчиков перемещения ротора. Электромагнитные подшипники в настоящее время достаточно широко используются в качестве опор вращающихся роторов, в частности, в высокоскоростных шпинделях металлообрабатывающих станков, в турбокомпрессорных агрегатах, насосах, турбодетандерах. Примером использования ЭМП в космосе являются опоры гиродинной системы стабилизации и ориентации орбитальной станции «Мир» [4].

Целью работы является определение проектного облика высокооборотных электрических генераторов с электромагнитными и газовыми подшипниками применительно к их использованию в агрегатах газотурбинной системы преобразования энергии энергетических установок космического назначения.

### **1.Расчётно-теоретическое исследование проектных характеристик электрических генераторов.**

В последнее время в ряде областей техники, таких, как автомобилестроение, авиация, бытовая электротехника, нашли применение электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов. Интерес к этому классу электрических машин обусловлен их высокими массоэнергетическими показателями, большим сроком службы, надёжностью, способностью работать при высоких частотах вращения, в тяжёлых условиях эксплуатации.

Новый импульс развитию электрических машин с постоянными магнитами дала разработка высококоэрцитивных магнитов на основе редкоземельных элементов.

Опыт применения постоянных магнитов в автономных системах электроснабжения и приводах имеет давнюю историю.

Такие достоинства электрических машин с постоянными магнитами, как простота конструкции, бесконтактность электромагнитной части, относительно высокая механическая прочность элементов конструкции, отсутствие потерь мощности на возбуждение, привлекали

и привлекают инженеров-разработчиков электрооборудования. В нашедших применение двигателях постоянного тока и синхронных генераторах с постоянными магнитами были успешно решены вопросы стабилизации частоты вращения и напряжения, найдены удачные конструктивные решения, позволяющие наиболее полно реализовать достоинства постоянных магнитов.

Высокая магнитная энергия редкоземельных постоянных магнитов позволяет существенно снизить массу и габаритные размеры машин, что делает их не только конкурентоспособными с электрическими машинами с электромагнитным возбуждением, но и значительно превосходящими их по массогабаритным и энергетическим показателям. Зачастую только применение высококоэрцитивных магнитов позволяет успешно решать поставленные технические задачи.

Попытка использования редкоземельных магнитов в традиционных конструкциях электрических машин, как правило, не дают желаемого эффекта снижения массы и габаритных размеров, увеличение КПД. Их эффективное использование возможно только при специальных конструкциях, как ротора, так и статора электрической машины.

Оптимальной конструкцией ротора (индуктора) для высокоскоростных машин является явнополюсный индуктор без полюсных наконечников.

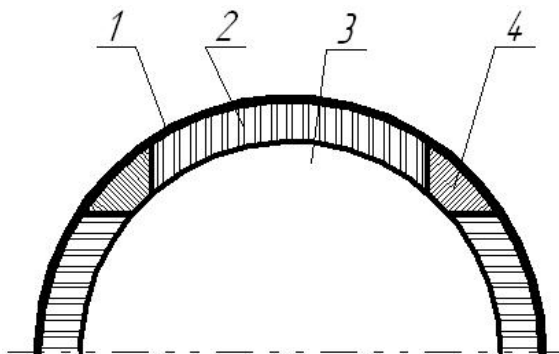


Рис.1. Конструкция явнополюсного индуктора без полюсных наконечников.

Конструкция ротора выполнена следующим образом: на магнитный вал – 3 устанавливаются постоянные магниты – 2. Вал необходимо выполнить из магнитного материала для создания путей замыкания магнитного потока от постоянных магнитов соседних полюсов, таким образом вал является ярмом ротора. Магнитный поток, замыкающийся по валу, является постоянным, что определяет отсутствие магнитных потерь. Такая конструкция позволяет максимально увеличить диаметр вала и тем самым повысить жесткость конструкции в целом.

Магниты приклеиваются к валу специальным анаэробным клеем, удерживающим магниты на валу, компенсируя действие на них центробежных сил. В качестве иллюстрации на рис.1 представлена конструкция ротора, в которой полюса созданы из одного целого магнита. Возможно создание полюса из нескольких одинаково намагниченных магнитов. При этом результирующий поток одного полюса создается суммарным потоком этих магнитов. Полюса между собой разделяются вставками – 4. Вставки выполняются из немагнитных материалов для уменьшения потоков рассеяния между соседними полюсами индуктора.

После фиксации магнитов на слой из магнитов устанавливается гильза – 1 из немагнитного материала. Гильза, во первых, позволяет дополнительно удерживать магниты на ярме, испытывающие действие центробежных сил, во вторых, гильза вместе с торцевыми шайбами создает герметичную оболочку ротора, которая обеспечивает защиту магнитов от воздействия агрессивных сред, заполняющей внутреннюю полость турбогенератора (ТГ), и коррозии. Гильза выполняется из немагнитного материала для уменьшения потоков рассеяния. Толщина гильзы выбирается из условия ее механической прочности. Напряжения, возникающие от действия центробежных сил, действующих на магниты, не должны превышать предел текучести материала гильзы.

Эскиз синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) на магнитных подшипниках представлен на рис.2. В данном случае применена классическая компоновка ТГ с двумя радиальными опорами, расположенными по разным сторонам активных частей СГПМ и одной осевой опорой. Основные расчетные параметры СГПМ приведены в таблице 1.

Расчет критических частот СГПМ показал, что при достижении номинальной частоты вращения необходимо пройти по крайней мере одну критическую частоту вращения. Прохождение критических частот на газовых подшипниках практически невозможно. Выполнение СГПМ мощностью 250 кВт на 60000 об/мин к примеру на газовых подшипниках проблематично. Поэтому уточненный расчет критических частот ротора проводился только для МП.

Для устойчивой работы электрогенератора с магнитными опорами необходимо, чтобы первая изгибная частота валопровода лежала за пределами рабочих частот вращения. Отстройка должна быть как минимум 20 %.

Для устойчивой работы электрогенератора с магнитными опорами необходимо, чтобы первая изгибная частота валопровода лежала за пределами рабочих частот вращения. Отстройка должна быть как минимум 20 %.

Выполнение данного требования достигается конструктивными методами (уменьшение межопорного расстояния, минимальные массы на свободных концах вала).

Жесткость ЭМП зависит от многих факторов и может колебаться в широких пределах. Для оценки собственных частот и форм колебаний ротора динамический расчёт проводится для жесткости МП 0,28 Н/мкм.

Результаты расчёта представлены в таблице 2.

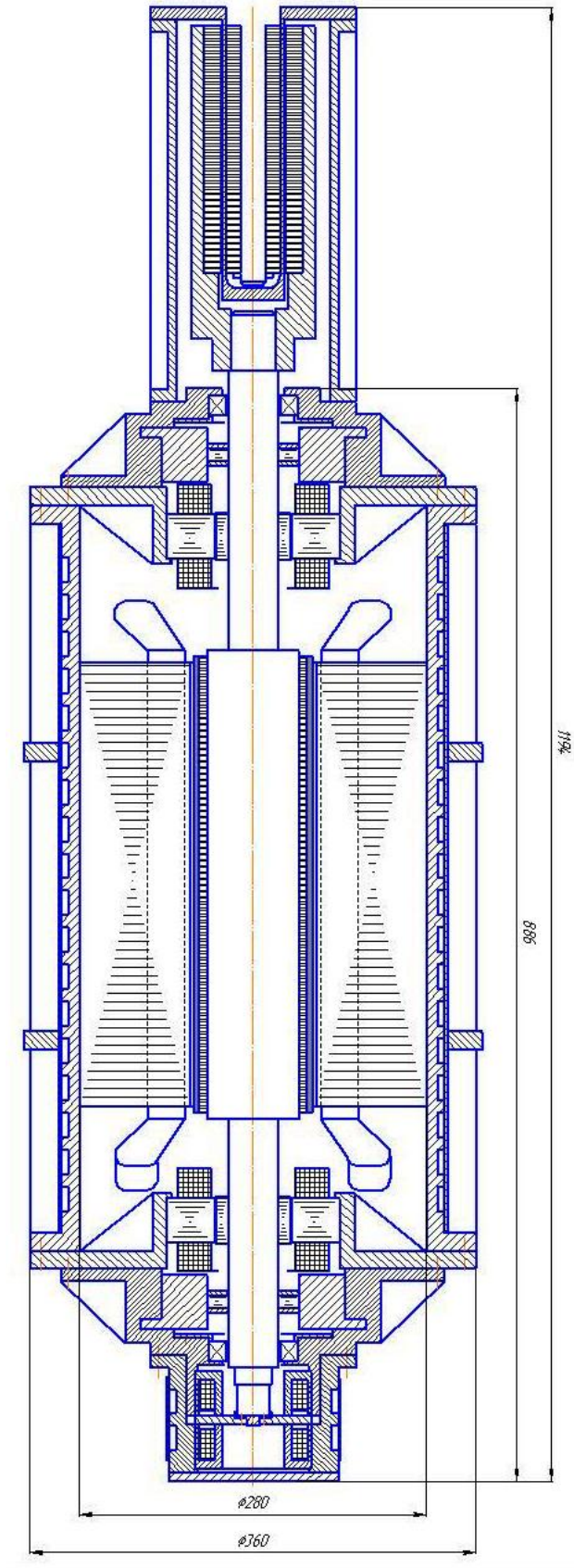


Рис. 2. Эскиз синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ) на магнитных подшипниках

Таблица 1 . Расчетные параметры генератора с постоянными магнитами

Номинальная мощность генератора, кВт	255
Номинальное напряжение фазное, В	800
Номинальная частота тока, Гц	1000
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	60000
Окружная скорость, V, м/с	298
Диаметр расточки статора, Di , мм	98
Наружный диаметр ярма статора, Da , мм	260
Высота зубца статора, hz ,мм	38
Вылет лобовых частей обмотки статора, lb, мм	100
Длина пакета статора, li , мм	360
Число пар полюсов, p	1
Воздушный зазор, мм	1,0
Масса ротора, кг	34
Масса активных материалов генератора, кг	120
Масса корпуса, кг	140
КПД электромагнитный, %	95

Таблица 2. Результаты модального анализа ротора ТГ

Форма	Частота, Гц	Частота вращения, об/мин
1	22,1	1326
2	32,9	1972
3	435,8	26150
4	696,5	41790
5	1702,2	102132
6	2332,2	139932



Расчёт показал, что отстройка от ближайших критических частот составляет около 30% от 4-й формы и более 70% от 5-й формы. Несмотря на значительный опыт ФГУП «НПП ВНИИЭМ» по созданию ЭМП, позволяющих преодолевать первую изгибную (3-я форма колебаний), необходимо проведение макетных испытаний по преодолению 3-й и 4-й форм колебаний. По результатам макетных испытаний необходимо внести корректировки в закон управления ЭМП, а также определить требования к балансировке ротора.

Прорабатывался и второй вариант ТГ - генератора с внешнезамкнутым магнитным потоком мощностью 250кВт. За основу была взята методика расчета и проектирования ОАО «НИИЭМ» (г.Истра). Генератор с внешнезамкнутым магнитным потоком (ВЗМП) и цельносваренным когтеобразным ротором выполнялся на предельном диаметре по условиям прочности на частоте вращения  $3 \times 10^4$  мин<sup>-1</sup>, что соответствует предельной мощности по условию прохождения магнитного потока  $P=270$  кВА.

Ротор генератора выполнен из высоколегированной магнитной стали, являющейся оптимальной по сочетанию магнитных и прочностных характеристик:  $B_{50} = 1,65$  Т;  $\sigma_T = 70 \div 75$  кг/мм<sup>2</sup>.

Учитывая особенности конструкции магнитной цепи генератора с ВЗМП и требование минимальных габаритов, наиболее приемлемым вариантом охлаждения генератора является косвенное жидкостное охлаждение обмоток статора и тела ротора, что позволяет наиболее компактно решить проблему подвески ротора, применив в качестве смазки подшипников охлаждающую жидкость. Подшипники скольжения могут быть реализованы на гидростатическом гели, гидродинамическом принципе в зависимости от свойств жидкости и реальных динамических нагрузок на опоры. Охлаждение обмоток статора осуществляется камерами охлаждения, расположенными в лобовых частях обмоток якоря и между корпусом и пакетом статора.

Охлаждение ротора осуществляется через центральное отверстие в вале ротора по каналам, проходящим по периферии бочки ротора с одновременной подачей жидкости в подшипники.

Такая конструкция наиболее компактно интегрируется в общую компоновку генератора практически в габаритах внешнего магнитопровода. Такое решение снимает проблемы вакуумирования полости ротора, одновременно снижая тепловые потоки от турбокомпрессорного блока к генератору. Основные расчётные параметры генератора с ВЗМП приведены в таблице 3.

Таблица 3. Расчетные параметры генератора с ВЗМП

Номинальная мощность генератора, кВт	250
Номинальное напряжение фазное, В	855
Номинальная частота тока, Гц	500
Номинальная частота вращения, мин <sup>-1</sup>	30000
Окружная скорость, V, м/с	270
Диаметр расточки статора, Di, мм	180
Наружный диаметр ярма статора, Da, мм	340
Высота зубца статора, hz, мм	40
Вылет лобовых частей обмотки статора, lb, мм	100
Длина пакета статора, li, мм	120
Число пар полюсов, p	1
Воздушный зазор, мм	4,0
Масса ротора, кг	78
Масса активных материалов генератора, кг	270
Масса внешнего магнитопровода	170
КПД электромагнитный, %	96

Из проведенных расчетов была выявлена невозможность выполнения генератора с ВЗМП мощностью 250 кВт на частоту вращения 60000 об/мин.

На рис.3 приведены зависимости предельной мощности генератора ВЗМП в зависимости от характеристик прочности материала ротора для различных частот вращения из которого следует, что с ростом частоты вращения мощность, которую можно реализовать для заданного материала, уменьшается.

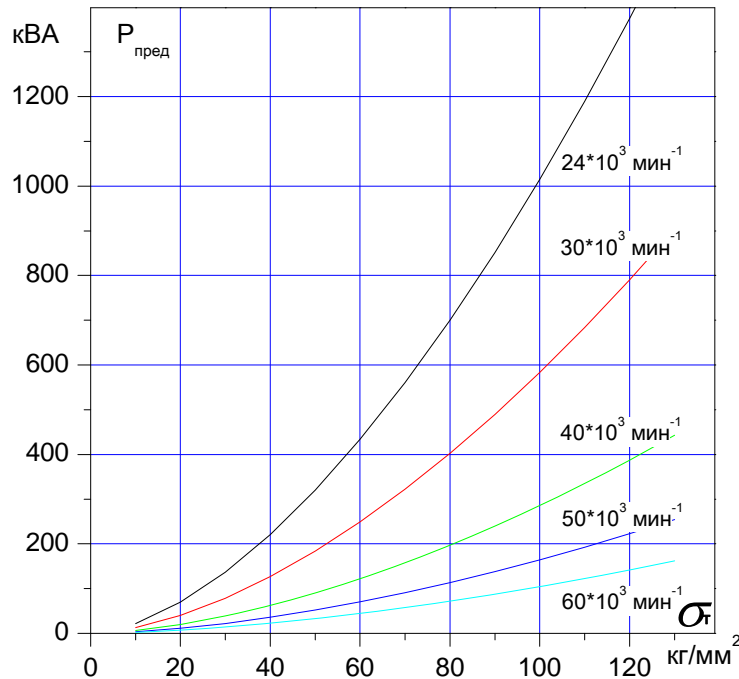


Рис.3. Зависимость предельной мощности от предела текучести материала ротора.

Рассмотрен также вариант компоновки генератора с электромагнитными подшипниками. Следует отметить, что осевые габариты генератора существенно возрастают, увеличивается расстояние между опорами, усложняются узлы подвода хладагента и уплотнения вращающихся узлов.

## 2. Подшипниковые опоры для разрабатываемого генератора

ЭМП является электромеханическим устройством с автоматическим регулированием положения ротора, которое конструктивно состоит из двух составных частей:

- электромеханической части, которая выполняет роль подшипника и располагается в корпусе машины;
- электронной аппаратуры управления, которая обеспечивает функционирование подшипника и располагается в отдельном блоке.

Кроме того, в состав ЭМП входит кабельная сеть, соединяющая электронную и электромеханическую части.

Стоит отметить, что при работе ЭМП механического контакта между вращающимся ротором и неподвижным статором нет. Однако при отключении ЭМП, а также при сбоях или отказах в работе ротор опирается на страховочные подшипники, зазор в которых значительно меньше воздушного зазора в электромагнитах и в электрогенераторе. В нормальном режиме страховочные подшипники не работают.

В настоящее время во ФГУП «НПП ВНИИЭМ» разработаны и серийно производятся радиальные магнитные подшипники (РМП) имеющие четыре активные зоны (восемь катушек, соединённые попарно), расположенные по окружности подшипника под углом 90 градусов, каждая из которых является самостоятельным электромагнитом. Такая конструкция электромагнита обеспечивает нормальное функционирование подшипника с приемлемыми массо-габаритными и энергетическими показателями.

Расчёт РМП производился исходя из необходимости преодоления всех усилий, отклоняющих ротор от центрального положения. Учитывая необходимость проведения наземных испытаний турбогенератора, номинальная нагрузка на каждую радиальную опору складывается из следующих составляющих:

- статическое усилие от веса ротора – 150 Н;
- одностороннее магнитное тяжение – 100 Н;
- динамические нагрузки на ротор – 50 Н.

$$F_{\text{ном}} = 150 + 100 + 50 = 300 \text{ Н.}$$

Расчёт габаритных размеров и тяговых характеристик производился в разработанной во ФГУП «НПП ВНИИЭМ» программе. Расчётная тяговая характеристика и габаритные размеры РМП представлены, соответственно на рисунках 4 и 5. Масса РМП 6,2 кг, из них масса ротора 0,5 кг.

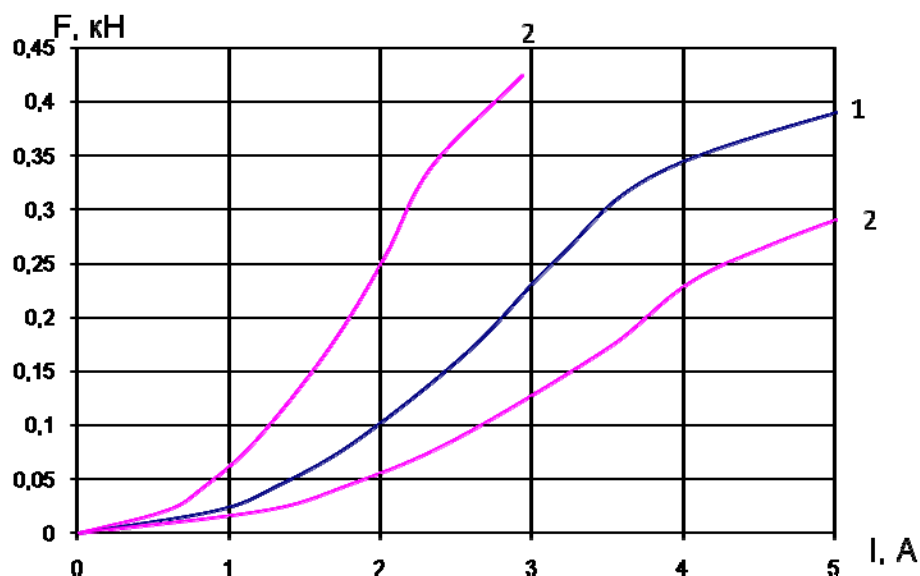


Рис. 4 – Расчётная тяговая характеристика радиального электромагнитного подшипника:

1 – при центральном положении ротора; 2 – при отклонении ротора в пределах страховочного подшипника.

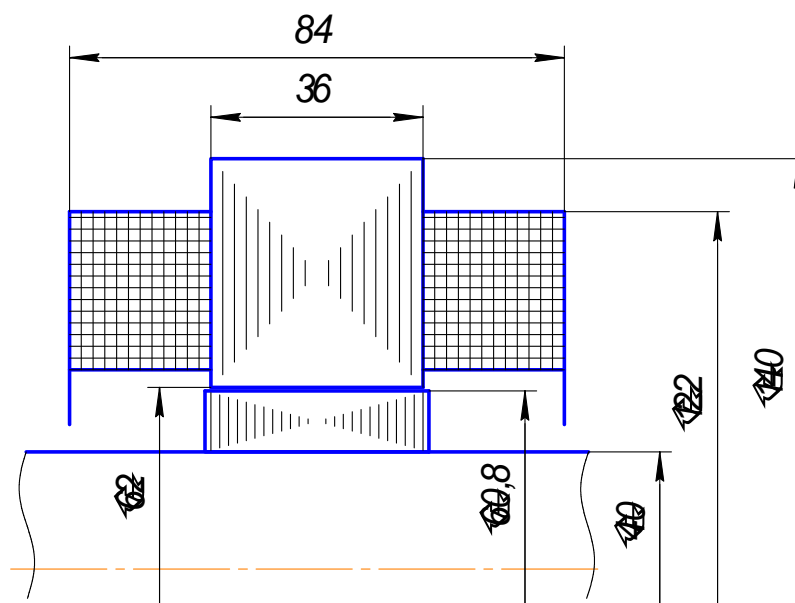


Рис. 5 – Габаритные размеры радиального электромагнитного подшипника

Осевой магнитный подшипник (ОМП) состоит из двух статорных электромагнитов и расположенным между ними диском, который закрепляется на роторе машины. При проектировании ОМП возникает оптимизационная задача по выбору типа электромагнита, создающего тяговое усилие. Сравниваются варианты «П» и «Ш»-образных магнитных систем электромагнитов. По сравнению с «П»-образной магнитной системой, при одинаковых объёмах обмотки «Ш»-образный электромагнит имеет большее энергопотребление, но меньшую высоту магнитопровода, т.к. по его спинке протекает только половина рабочего магнитного потока в зазоре. В результате габаритные размеры такого электромагнита оказываются меньше. Обычно применение «Ш»-образного магнитопровода целесообразно для ОМП с большой грузоподъёмностью.

В рамках данной работы были проведены расчёты и конструкторская проработка обоих вариантов магнитных систем. Применение Ш-образного магнитопровода в данном случае не даёт существенного сокращения габаритов при возрастающей сложности изготовления и снижении технологичности конструкции. За рабочий вариант принят электромагнит с П-образным магнитопроводом.

Особенностью ОМП является значительное снижение тяговых характеристик с увеличением частоты возмущающих усилий. Для обеспечения стабильной работы турбогенератора на высоких частотах вращения требуется создать запас по тяговому усилию. Номинальное тяговое усилие ОМП принято 1000 Н. Расчётная тяговая характеристика и габаритные размеры ОМП представлены, соответственно на рисунках 6 и 7. Масса ОМП 3,2 кг, из них масса ротора 0,4 кг.

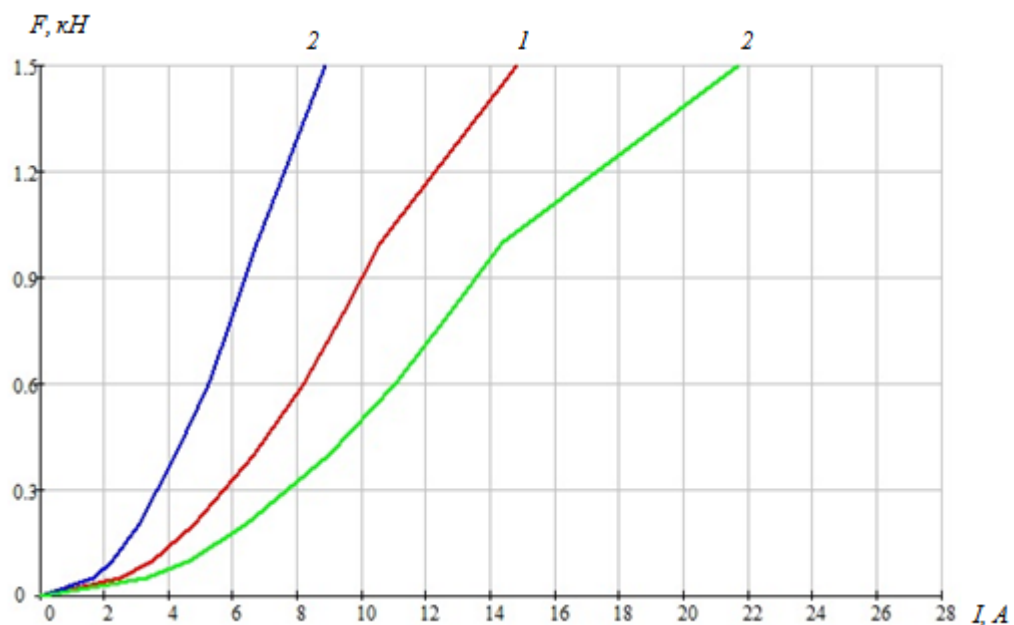


Рис. 6 – Расчётная тяговая характеристика осевого электромагнитного подшипника:

1 – при центральном положении диска; 2 – при перемещениях диска в пределах страховочного подшипника.

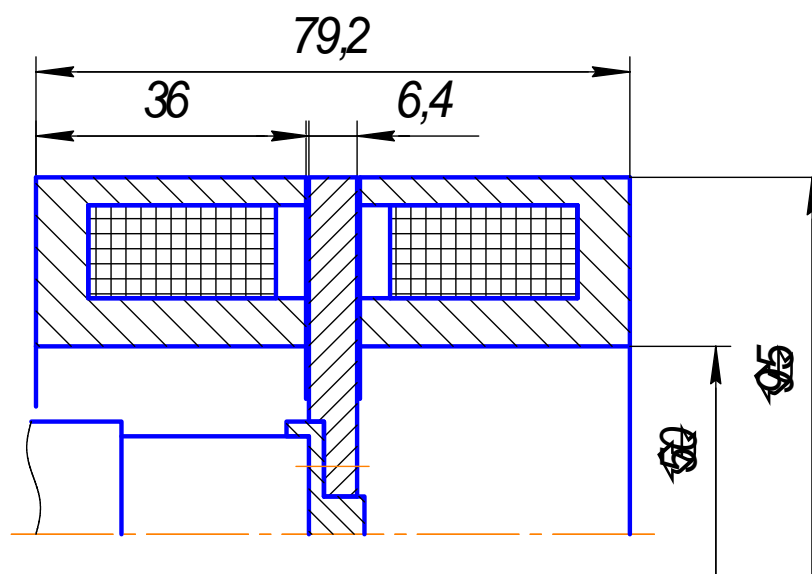


Рис. 7 – Габаритные размеры осевого электромагнитного подшипника

### 3. Выводы

В работе проведены проработки наиболее оптимальных типов высокооборотных электрических генераторов: синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и генератор с внешнезамкнутым магнитным потоком. Выполненная проработка выявила невозможность выполнения генератора с ВЗМП мощностью 250кВт на частоту вращения

60000об/мин. Поэтому единственным возможным типом высокооборотного ЭГ является СГПМ.

Рассмотрены подшипниковые опоры, способные длительное время без обслуживания обеспечивать работу ТГ. К таким типам подшипниковых опор относятся: ЭМП и газовые подшипники. Проведены расчеты критических частот вращения СГПМ, показавшие необходимость прохождения минимум одной критической частоты вращения ТГ. Прохождение критических частот на газовых подшипниках невозможно, поэтому единственным возможным типом подшипниковых опор стали ЭМП.

Создание высокооборотного ТГ на ЭМП является актуальной и перспективной задачей. На сегодняшний день существуют значительные трудности, вызванные отсутствием необходимых изоляционных, конструкционных материалов и электронных комплектующих системы управления, обладающих достаточной надёжностью, а также опытом разработки подобных ТГ в Российской Федерации.

Для осуществления всех требований, предъявляемых к ТГ, необходимо освоение новых передовых изоляционных и конструкционных материалов, разработка новых электронных комплектующих систем управления ЭМП, проведение экспериментальных исследований по влиянию радиации на постоянные магниты и тщательная отработка динамики ротора как отдельного ТГ так целиком турбоагрегата.

### **Библиографический список**

- [1] – [www.roscosmos.ru/main.php?id=182](http://www.roscosmos.ru/main.php?id=182)
- [2] - Техническое задание на выполнение НИР «Двигатель-ВНИИЭМ»
- [3] - [www.capstone.ru](http://www.capstone.ru)
- [4] – Электромеханические исполнительные органы с магнитными опорами для управления ориентацией космических станций / Стома С.А., Верещагин В.П., Вейнберг Д.М.// Космический бюллетень. – 1995. – Т.2. -№1

### **Сведения об авторах**

Магин Вячеслав Валерьевич, начальник лаборатории лаборатории ФГУП «НПП ВНИИЭМ», магистр

Ул.Вольная, д.30, Главпочтамт, а/я 496, Москва, 101000;  
тел.: +7(926) 186-16-28; e-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru)

Клабуков Владимир Александрович, начальник лаборатории ФГУП «НПП ВНИИЭМ», аспирант

Ул.Вольная, д.30, Главпочтамт, а/я 496, Москва, 101000;

тел.: (495) 366-35-65;

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

Рогоза Александр Валерьевич, начальник научно-производственного комплекса ФГУП «НПП ВНИИЭМ», аспирант.

Ул.Вольная, д.30, Главпочтамт, а/я 496, Москва, 101000;

тел.: (495) 366-04-79;

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