

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

На правах рукописи



ПОДГУЗОВ ВЛАДИМИР АНДРЕЕВИЧ

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ С
МАГНИТНЫМ ВТСП ПОДВЕСОМ**

Специальность 2.4.2. –

«Электротехнические комплексы и системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, с.н.с.
Ковалев К.Л.

Москва - 2023

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

КНЭ – кинетический накопитель энергии

КЛА – космический летательный аппарат

ЛА – летательный аппарат

ПМ – постоянный магнит

ЭМН – электромеханический накопитель

ЭМП – электромеханический преобразователь

КПД – коэффициент полезного действия

КПК – карманный персональный компьютер

ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник

НТСП – низкотемпературный сверхпроводник

СП – сверхпроводимость

МО – магнитная опора

СМ – синхронная машина

ЭДС – электродвижущая сила

РЗМ – редкоземельный металл

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ КНЭ	15
Выводы по главе	29
2. КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ЭМН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ	30
Выводы по главе	42
3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЭМН.....	43
3.1 Выбор и расчет маховика	47
3.2 Выбор и расчет ВТСП подшипников.....	79
3.3 Выбор и расчет магнитной опоры.....	91
3.4 Выбор и расчет мотор-генератора.....	97
3.5 Конструктивные особенности системы безопасности ЭМН.....	102
Выводы по главе	104
4. ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ ЭМН ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ 0,5 МДЖ	106
4.1 Описание рациональной схемы ЭМН	106
4.2 Описание системы запуска и регулирования ЭМН.....	107
4.3 Параметры макетного образца ЭМН-0,5 МДж	108
4.4 Расчёт маховика на механическую прочность.....	110
4.5 Расчёт параметров мотор-генератора ЭМН-0,5 МДж.....	114
4.6 Методика расчета аэродинамических потерь	127
4.7 Разработка конструкции ЭМН.....	133
4.8 Экспериментальные исследования ЭМН	137
Выводы по главе	144
5. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КНЭ С ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ 5 МДЖ.....	145
5.1 Описание конструкции ЭМН.....	145
5.2 Описание экспериментального стенда для исследования ЭМН.....	151

5.3 Результаты экспериментальных исследований ЭМН	161
Выводы по главе	170
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	171
СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ	175
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	179
ПРИЛОЖЕНИЕ А	192
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	205
ПРИЛОЖЕНИЕ В	212

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием высокотехнологичных отраслей промышленности, а также всеобщей компьютеризацией общества повышается нагрузка на энергосистему и, следовательно, повышаются требования к качеству и бесперебойности энергоснабжения. Для обеспечения потребителей качественной электроэнергией требуется обеспечить бесперебойность питания потребителей и резервирование мощности в энергосистеме. В энергосети часто возникают неисправности, причиной которых могут быть повреждения линий электропередач, перегрузки, неисправная работа вспомогательного оборудования. Стоимость перерыва в энергоснабжении для различных потребителей измеряется в широком диапазоне, в зависимости от рода их деятельности и размеров производства. Решением этих проблем является использование накопителей энергии на различных физических принципах, которые позволяют обеспечить резервирование мощности и работают на нагрузку параллельно с сетью. Также накопители могут работать некоторое время автономно, в качестве аварийного источника питания для обеспечения требования бесперебойности электроснабжения.

Электромеханический накопитель энергии (ЭМН), частью которого является кинетический накопитель энергии (КНЭ) – это устройство для накопления и хранения энергии, которое преобразует кинетическую или механическую энергию вращающегося маховика в электрическую энергию мотор – генератора.

ЭМН возможно использовать в качестве резервного источника питания, источника бесперебойного питания для ответственных потребителей, например, медицинских учреждений, информационно-вычислительных центров, объектов атомной промышленности или высокотехнологичных производств. Также ЭМН может использоваться в составе энергосети для “сглаживания” пиков потребления электроэнергии (в дневные часы нагрузка на сеть возрастает по сравнению с ночными часами). ЭМН используются для

улучшения показателей энергосистем при кратковременном включении потребителей повышенной мощности (компенсирует пиковые нагрузки) и для повышения устойчивости работы энергоустановок и систем электроснабжения в целом. В этих случаях ЭМН являются рекуператорами энергии между генерирующими установками и потребителями, работающими в нестационарных режимах.

В качестве основных типов подшипников для ЭМН обычно рассматриваются механические, газодинамические, электромагнитные и магнитные. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию магнитных опор на основе массивных высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) элементов и постоянных магнитов (ПМ). Такие магнитные ВТСП опоры обеспечивают значительное снижение потерь кинетической энергии при вращении маховика ЭМН за счет существенного снижения потерь на трение в подшипниках. Как показывают исследования, использование в составе ЭМН магнитного ВТСП подвеса позволяет обеспечить сохранение запасенной энергии практически без потерь.

Основными требованиями предъявляемыми высокотехнологичными потребителями к качеству электроэнергии являются: бесперебойность электропитания и отсутствие “провалов” напряжения. Такими потребителями могут быть заводы по производству электроники и полупроводниковых компонентов, химические заводы, металлургические комбинаты, центры анализа и обработки данных и т.д. Для таких потребителей даже кратковременный перебой или “провал” напряжения может привести к нестабильной работе оборудования и как следствие нарушение производственных циклов, а также к браку всей партии продукции (для промышленных предприятий) или другим негативным последствиям. Например, отключение длительностью $\sim 0,5$ с на конвейерной линии по производству жидкокристаллических широкоэкранных дисплеев может привести к потере продукции на сумму $\sim 500\,000$ € [1]. Другие исследования, проведённые зарубежными компаниями, такими как Pacific Gas & Electric,

показали, что для 2% крупных промышленных потребителей потери при каждом отключении составляют порядка \$1000000 США [2]. По прогнозным оценкам такие проблемы могут быть успешно решены путем внедрения кинетических накопителей энергии.

Разработки энергетических систем с применением накопителей связаны с тем, что в последнее время в ряде стран рассматривается возможность введения ответственности производителя электроэнергии с возмещением ущерба в случае перерыва в электроснабжении или ухудшении качества поставляемой электроэнергии.

Авария в энергосистеме России 25 мая 2005 г., затронувшая Москву, Московскую, Тульскую и Рязанскую области по оценке Ростехнадзора нанесла ущерб промышленности пострадавших областей в размере 150 млн € [3]. Одной из причин аварии было резкое увеличение потребления электроэнергии, связанное с использованием устройств климат-контроля в дневные часы. На европейской части России была аномальная жара. Хотя данное происшествие носит “случайный” характер, оно дает представление насколько может различаться дневное и ночное потребление энергии. Поэтому одна из задач, которая может быть решена с помощью использования ЭМН, это выравнивание нагрузки в суточном цикле и накопление резерва мощности энергосети. В ночное время, когда нагрузка на электросеть минимальна, ЭМН работает в режиме запаса и хранения энергии. В дневное время ЭМН отдает накопленную ночью энергию в электросеть, покрывая дефицит мощности. Тем самым происходит выравнивание нагрузки для электростанции, резервирование мощностей.

В связи с вышесказанным, для предотвращения аварийных ситуаций целесообразно использовать различные типы накопителей энергии, в том числе-кинетические.

Виды накопителей энергии и их сравнительные характеристики

Существует несколько видов накопителей энергии, основанных на разных физических принципах.

Основными достоинствами любого накопителя энергии перед традиционными дизель-генераторами являются:

- время включения в работу на сеть (зависит только от времени коммутационных процессов, в среднем меньше секунды);
- экологичность, т. к. накопители не требуют горючего для работы и при создании накопителей не используются вредные для экологии материалы;
- у любого накопителя энергии выше КПД, чем у дизель-генератора.

На данный момент существует пять видов источников питания, которые способны накапливать энергию и отдавать её в сеть.

Первый тип – химический (аккумуляторные батареи). Этот тип источников способен запасать большие объемы энергии и достаточно часто используется, но обладает некоторыми недостатками. Во-первых, частые циклы заряда-разряда аккумуляторной батареи приводят к её деградации – уменьшению её емкости. Во-вторых, аккумуляторные батареи не способны поддерживать большие пиковые мощности.

Второй тип – суперконденсатор источник не постоянной, а импульсной мощности. Она ограничена лишь эквивалентным внутренним сопротивлением, которое позволяет элементу работать, фактически, на токах короткого замыкания.

Но при этом, в отличие от аккумулятора, это источник кратковременных, хотя и мощных импульсов энергии. Соответственно, и используются суперконденсаторы там, где нужна большая мощность на небольшое время.

Третий тип – сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии. Этот тип запасает энергию в виде магнитного поля сверхпроводниковой катушки. Такие накопители способны работать на больших пиковых мощностях. Главным минусом таких накопителей является их высокая цена из-

за дороговизны сверхпроводящих материалов, высокая стоимость, сложность обслуживания и большое количество коммутационного и инверторного оборудования.

Четвертый тип – электромеханические накопители энергии (ЭМН). По показателю удельной энергии и удельной мощности он находится между аккумуляторными батареями и сверхпроводниковыми индуктивными накопителями (СПИН). Мощность ЭМН ограничена параметрами мотор-генератора. По удельным показателям КНЭ хуже, чем СПИН, но ЭМН значительно дешевле и прост в обслуживании.

К достоинствам ЭМН также можно отнести высокую способность к циклированию, масштабируемость и модульность. На основе единичного ЭМН могут быть построены «матричные» системы накопления энергии на большие уровни запасаемой энергии и мощности как передвижного, так и стационарного исполнения.

Пятый тип-конденсаторные накопители, однако у них есть 2 основных недостатка. Во-первых, малая удельная плотность запасаемой энергии и потому малая ёмкость. Во-вторых, малое время хранения заряда, которое может быть несколько секунд или минут, реже несколько часов. Из-за этих недостатков сфера применения у них ограничена кратковременным накоплением заряда, достаточным для выпрямления, коррекции и фильтрации тока в электротехнике.

Сравнительные характеристики приведены на рисунке В1 и в таблице В1 [4].

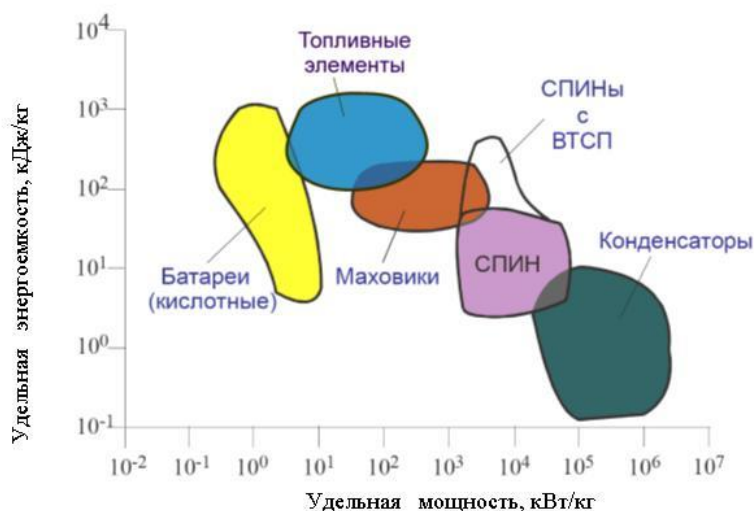


Рисунок В1-Сопоставление накопителей энергии по удельной энергоёмкости и удельной мощности.

Таблица В1-Сравнительные характеристики накопителей энергии

Тип накопителя	Аккумуляторные батареи			КНЭ
	Кислотные <i>GEL</i>	Щелочные <i>NiCd</i>	<i>Li-ion</i>	
Уд. мощность, Вт/кг	30...90	150...300	150...315	400...1600
Ресурс, циклов	100...400	1000...2000	500...2500	10^7
Срок службы, лет	2...10	10...15	5...10	>20
КПД, %	70...85	65...80	80...95	96...98

Целью работы является разработка методик расчета и проектирования ЭМН на основе подшипников с высокотемпературными сверхпроводниковыми элементами и высококоэрцитивными постоянными магнитами.

Задачи работы

1. Провести обзор литературных данных в области накопителей энергии. Показать, что ЭМН обладают высокой энергоёмкостью, экологичны, обладают высоким ресурсом и их применение перспективно в качестве аварийных источников питания ответственных потребителей.
2. Выбрать рациональную конструктивную схему ЭМН с запасенной удельной энергией 5 МДж.

3. Провести расчеты основных узлов: мотор-генератора ЭМН, маховика, магнитной опоры и ВТСП магнитных подшипников.
4. Провести экспериментальные исследования макетного образца ЭМН с запасенной удельной энергией 5 МДж.

Предмет исследования

Предметом исследования являются разработка комплексной методики расчета включая ЭМН, расчет немагнитной электрической машины, использованной в качестве мотор-генератора, прочностной расчет маховика, магнитной опоры, ВТСП подшипников, а также исследование полученного макетного образца.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Анализ параметров современных ВТСП материалов и методика выбора рациональных параметров ВТСП материалов для их использования в составе магнитного подвеса ЭМН.
2. Аналитические методики расчета основных параметров ЭМН, включая расчет бесконтактного подвеса на основе объемных ВТСП элементов и постоянных магнитов, магнитной опоры, аэродинамических потерь, синхронной электрической машины без ферромагнитопровода.
3. Сопоставительный анализ теоретических расчетов по предложенным методикам с экспериментальными данными макетных образцов ЭМН, которые подтвердили правильность выбранных теоретических решений.
4. Результаты экспериментального исследования ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией до 5 МДж.

Научная значимость

1. Впервые предложен комплексный подход к разработке ЭМН с ВТСП магнитным подвесом.

2. Разработаны новые конструкции и методики расчета ВТСП магнитных подвесов с постоянными магнитами.

3. Впервые предложено использовать магнитную опору с целью обезвешивания маховика в составе ЭМН для обеспечения его длительной стабильной работы.

4. Разработана новая методика расчета синхронной электрической машины без ферромагнитопровода.

5. Предложена и экспериментально отработана перспективная технология создания многослойного маховика с бандажированием из углеволоконного материала.

Практическая направленность

1. Предложена и апробирована новая инженерная методика расчета синхронных электрических машин с немагнитным индуктором и якорем, для уменьшения магнитных потерь и увеличения времени работы ЭМН.

2. Разработана технология создания бесконтактных подшипников на основе ПМ и ВТСП с охлаждением жидким азотом.

3. Разработан единственный в России ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией 5 МДж.

4. Проведена коррекция методики определения аэродинамических потерь при вращении маховика в зависимости от его геометрии и окружающей его среды.

5. Проведена верификация теоретических расчетов на основе конечно-элементного моделирования и экспериментальных исследований макетных образцов ЭМН, подтвердившие корректность разработанных методик.

6. Показано, что введенные в конструкцию ЭМН новые технологические решения дали возможность существенно увеличить

время хранения запасенной энергии в ЭМН и применять их в различных областях народного хозяйства.

Степень достоверности результатов

Высокий научный уровень выполненных исследований, апробация работы на множестве международных конференций, внушительное количество публикаций в рецензируемых, в т.ч. зарубежных научных изданиях, убеждают в надежности и **достоверности** представленных результатов.

Апробация работы

1. Основные результаты обсуждались и докладывались на конференциях: 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» сборник тезисов, Москва МАИ 2017, «Кинетический накопитель энергии с запасенной энергией 0.5 МДж на основе магнитного ВТСП подвеса», Ковалев К. Л., Подгузов В. А., Полтавец В. Н., Русанов Д. В.
2. XLIV Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» Сборник тезисов докладов, Том 2, Москва 2018 г., «Кинетический накопитель энергии с подвесом на основе высокотемпературных сверхпроводников», Русанов Д. В., Подгузов В. А., Научный руководитель-профессор, д.т.н. Ковалев К. Л.
3. 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» сборник тезисов, Москва МАИ 2018, Кинетический накопитель энергии Русанов Д.В., Подгузов В.А. МАИ, г. Москва
4. 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» сборник тезисов, Москва МАИ 2019, Принципиальный анализ гибридных силовых установок на основе сверхпроводниковых электрических машин Русанов Д.В., Подгузов В.А., Ильясов Р.И. МАИ, г. Москва, Россия
5. XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» Сборник тезисов докладов, Москва 2021 г., «Кинетический накопитель энергии», Подгузова М. А., Подгузов В. А., Научный руководитель-профессор, д.т.н. Ковалев К. Л. (в стадии подачи тезисов)
6. XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» Сборник тезисов докладов, Москва 2021 г., «Методика расчета полностью сверхпроводниковых электрических машин», Дежина И. Н., Подгузов В. А., Научный руководитель-доцент, к.т.н. Дежин Д. С.
7. 15th European Conference on Applied Superconductivity 2021 Suspended kinetic energy storage based on high-temperature superconductors D.S. Dezhin, K.L. Kovalev, V.A. Podguzov, V.N. Poltavets, D.V. Rusanov Moscow 2021

Публикации

Результаты выполненных исследований отражены в 23 научных публикациях, в том числе в 3 изданиях рекомендованных ВАК РФ, в 10 статьях индексируемых в базах Scopus и WoS, в 10 тезисах докладов Всероссийских и Международных научных конференций.

Степень участия автора в работе состоит в:

- проведении научных исследований лично и под руководством;
- теоретическом обосновании проблематики и в постановке основных подходов к моделированию;
- разработке аналитической методики расчета и численному моделированию;
- личном участии в выполнении основного объема исследований;
- оценке, обобщении полученных теоретических и экспериментальных данных и формулировке выводов;
- подготовке основных публикаций и участии в научных мероприятиях по выполненной работе.

Научные положения, рекомендации и выводы обоснованы использованием современного математического аппарата и подтверждены сравнительным анализом аналитических решений с результатами численного моделирования методом конечных элементов и результатами натурных испытаний, соблюдением правил составления и тестирования вычислительных программ и алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 115 наименований. Общий объем работы составляет 213 страниц машинописного текста, включая 112 рисунков, 27 таблиц и приложения.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И СОЗДАНИЯ КНЭ

Одним из перспективных направлений развития современных бесперебойных систем электропитания является создание электромеханических накопителей энергии (ЭМН), частью которых являются кинетические накопители энергии (КНЭ). Электромеханические накопители энергии предназначены для накопления, хранения и отдачи электроэнергии, работы в качестве резервных и аварийных источников питания, а также для компенсации пиковых нагрузок при кратковременном включении потребителей повышенной мощности [24].

В данном разделе приведен обзор литературных данных по реализованным проектам ЭМН и КНЭ, а также проектов по созданию крупных вспомогательных источников бесперебойного питания на основе КНЭ.

Наибольшее распространение КНЭ получили в транспортных системах в качестве устройств рекуперации энергии торможения (kinetic energy recovery system KERS) [5]. В связи с развитием гибридных систем для гражданских автомобилей расширилось внедрение систем рекуперативного торможения на основе КНЭ. Такие системы есть практически у всех ведущих автопроизводителей [6]. В 2014-2016 гг. инженеры из Williams Formula-1 оснастили КНЭ автобусы в Лондоне, что позволило сэкономить примерно 20% топлива [7]. Для метрополитена Лос-Анджелеса компания Vusion развернула систему на основе КНЭ для оптимизации потребления электроэнергии [8]. Система работает следующим образом: прибывающий на станцию поезд

заряжает КНЭ, затем запасенная в КНЭ энергия используется для разгона отбывающего со станции состава.

Электроэнергетика. Активно развиваются проекты, в которых на базе КНЭ строятся вспомогательные электростанции. Такие электростанции служат для выравнивания суточного энергопотребления крупных электростанций. Также вспомогательные электростанции используются при получении электроэнергии из возобновляемых источников энергии, но уже для компенсации просадки электропитания или в качестве бесперебойных источников питания. Такие проекты реализовывала компания Weason Power (см. рисунок 1.1) [9]. Она построила три вспомогательных электростанции, оснащенные блоками КНЭ мощностью 20 МВт. Каждая электростанция состоит из двухсот КНЭ работающих параллельно и управляющей аппаратуры. Такие проекты также предлагает компания Vuson [10], технические данные приведены в таблице 1.1.



Рисунок 1.1 – Вспомогательная электростанция компании Weason power

Таблица 1.1-Технические данные современных КНЭ и ЭМН для разных отраслей промышленности

Изготовитель	Запасаемая энергия, МДж	Мощность, кВт	Масса маховика, кг	Обороты, об/мин	Применение	Год
Beacon Power	109,44	190	1134	16000	Модуль в составе вспомогательных электростанций	2010 Серийный
Volvo Car Corporation	-	60	13,2	60000	В системе рекуперации энергии	2013 Серийный
Williams Hybrid Power	1,3	120	-	36000	В системе рекуперации энергии	2010 Серийный
Vycon	1,8	125	-	20000	Модуль для Метрополитена ЛА, вспомогательные электростанции	Серийный
University of Texas at Austin	360	2000	8600 вся установка	15000	Для привода локомотива	2003 Экспериментальный
ЭМН МАИ ВТСП 5 МДж	5	100	700	8000	Источник бесперебойного питания для атомных станций	2015 Экспериментальный
ЭМН МАИ ВТСП 0,5 МДж	0,5	10	100	6000	Источник бесперебойного питания	2012 Экспериментальный
Kinetic Power	100	300			Портовые мостовые краны, рельсовый электротранспорт	Серийный

Космос. С 1980-х годов NASA Glenn Research Centre (GRC) проводит исследования по созданию КНЭ для космических летательных аппаратов (КЛА) [11]. Целью этих исследований является создание систем на основе КНЭ для

замены традиционных электрохимических источников энергии на борту космических аппаратов. Исследования включают в себя теоретическое обоснование возможности и целесообразности использования КНЭ на борту КА, исследования в области материаловедения, исследование в области электроники, разработка бесконтактных подшипников, работы по созданию образцов КНЭ, моделирование работы электрооборудования КЛА совместно с КНЭ. В этих изысканиях участвуют ведущие научные и инженерные организации США [12].

При разработке системы питания международной космической станции МКС инженеры NASA предложили вариант, в котором, вместо традиционных батарей, устанавливаются КНЭ (на то же место и такой же массы). КНЭ ставятся парно, чтобы исключить гироскопическое воздействие на МКС при работе. Каждая пара КНЭ обладает энергией 15 МДж и имеет пиковую мощность 4,1 кВт, КПД всей сети 93,7%. Для замены всех батарей потребуется 48 КНЭ, и их суммарная мощность составит 150 кВт. По оценкам NASA замена батарей на КНЭ позволила бы сэкономить более 200 миллионов долларов США [13].

Также NASA провела полномасштабное моделирование работы энергосистемы для спутника дистанционного зондирования земли. Результаты расчета показали, что энергосистема на основе КНЭ на 35% легче и на 55% меньше в объеме, чем энергосистема с традиционными батареями [14]. КНЭ обладает большим КПД, чем электрохимическая батарея, поэтому энергосистема с КНЭ позволяет уменьшить площадь солнечных батарей на 6,7%. Другим важным преимуществом КНЭ является намного более долгий срок службы.

В 2000-х годах инженеры NASA разработали и испытали серию КНЭ для КЛА. Помимо хранения энергии, разработкам КНЭ необходимо обеспечивать управление ориентацией КЛА в пространстве и маневрировании при смене орбиты [15]. Технические данные КНЭ разработанных в NASA приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Технические данные КНЭ разработанных NASA для космического применения

КНЭ	HSS	Dev1	D1	G2	FESS	G3
Ротор	Стальной	Однослойный композитный	Многослойный композитный 750 м/с	Многослойный композитный 750 м/с	Многослойный композитный 950 м/с	Многослойный композитный 1100 м/с
Запасаемая энергия, МДж	0,06	1,08	1,26	2,09	10,8	7,7
Удельная энергия, Вт*ч /кг	1	23	20	26	40	80

Разработки в России. В России также есть опыт использования мощных накопительных комплексов на базе КНЭ для питания токамаков с сильным магнитным полем. Объединением «Электросила» были созданы четыре агрегата ТКД-200-2УЗ, каждый из которых имел энергоемкость 277 кВт·ч (1 ГДж). Агрегаты использовались в кратковременном режиме работы при длительности импульса 5 секунд попарно [16].

Ведутся работы по созданию аксиального ВТСП подвеса (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва) [17]. Конструкция данной системы представлена на рисунке 1.2. Опора состоит из корпуса – 1, в котором размещены два статора – 2 и ротор – 4. Статоры образуют магнитную систему из двух пар кольцевых постоянных магнитов – 3 из Nd-Fe-B. Ротор содержит семь ВТСП дисковых элементов – 5 (Ø 28 мм, h=4 мм), в которых циркулируют сверхпроводящие токи порядка 8000 А, и каждый из дисков захватывает магнитный поток величиной 0.8 Тл. Постоянные магниты объединены попарно по потоку магнитной индукции двумя кольцевыми магнитопроводами. Магниты

взаимодействуют с ВТСП элементами, обеспечивая устойчивый подвес ротора, как в аксиальном, так и в радиальном направлениях.

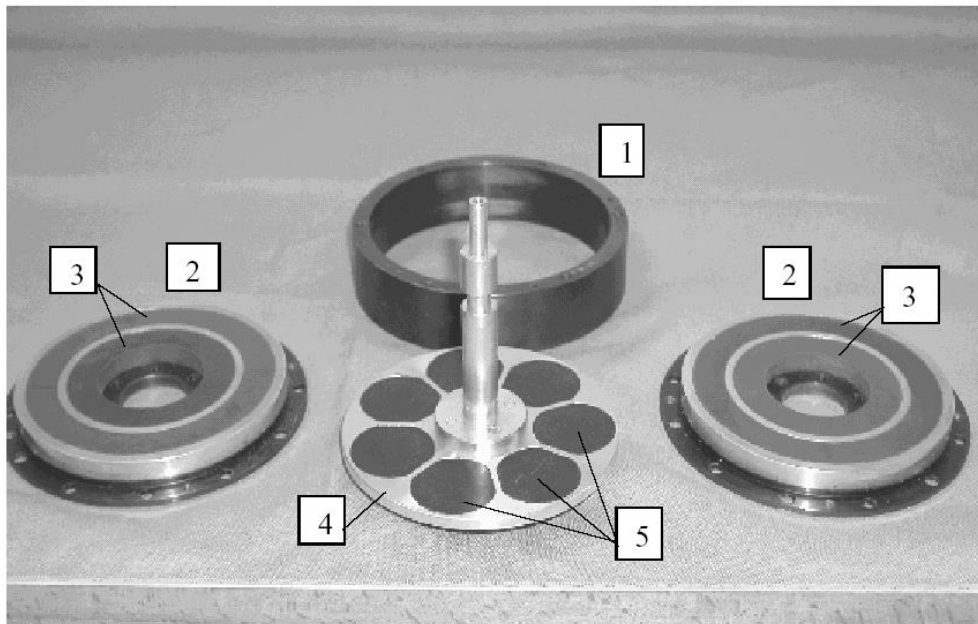


Рисунок 1.2- Компоненты магнитной опоры на ВТСП. Разработка МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002 г

1 – корпус; 2 – статор; 3 – кольцевые магниты статора; 4 – ротор; 5 – дисковые элементы из ВТСП (7шт.)

Московским авиационным институтом (МАИ) совместно с АО «НИИЭМ» г. Истра, а также с Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана, ОКБ «Горизонт», акционерным обществом Владимирское производственное объединение «Точмаш» разработан и испытан электромеханический накопитель энергии (ЭМН) с запасенной энергией 5 МДж на основе ВТСП магнитного подвеса. Также коллектив МАИ самостоятельно разработал ЭМН с ВТСП подвесами с запасенной энергией 500 кДж (см. рисунок 1.3).

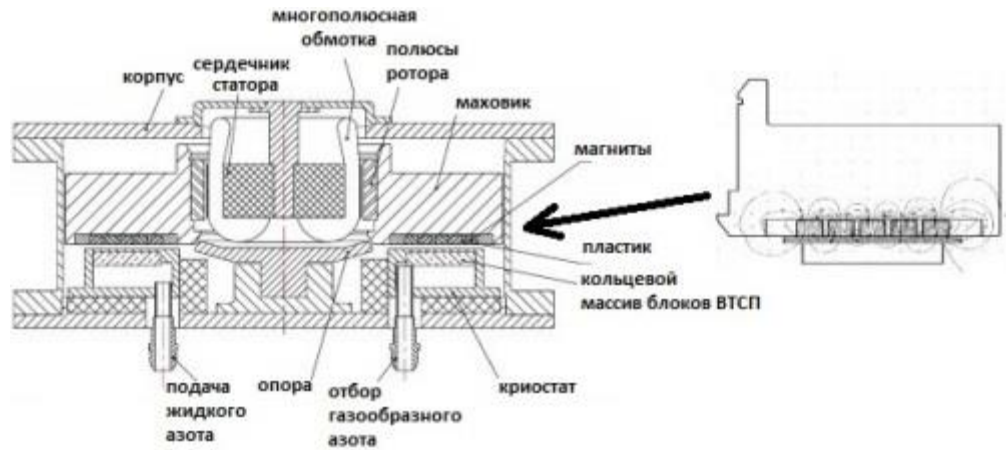


Рисунок 1.3 – ЭМН 0,5 МДж разработанного МАИ

Российская компания Kinetic Power разрабатывает системы на основе КНЭ для портовых кранов и рельсового транспорта (см. рисунок 1.4), которые позволяют экономить до 40 % электроэнергии. [18].



Рисунок 1.4 – КНЭ российской компании Kinetic power

В совместном проекте университетов Венгрии и Израиля в 1999-2002 гг. проведена разработка модельного дискового КНЭ для солнечной энергетики. В настоящее время это устройство демонстрируется в Будапештском Техническом университете [19].

В Корею компаниями Korea Electric Power Research Institute и Korea Electric Power Corporation разработаны маховичные системы вертикального и горизонтального исполнения с запасенной энергией 0,3 кВт ч (1,08 МДж) [20].

В рамках проекта “Energiespeicherwerk für Gleichstromnetze im Nahverkehr” в Германии был разработан, а затем испытан накопитель с запасенной энергией 14,4 МДж (см. рисунок 1.5) [21]. Мощность накопителя составляет 2 кВт. Конструктивной особенностью является маховик, совмещенный с мотор-генератором. Охлаждение подшипника – масляное прокачное, мотор-генератор имеет водяное охлаждение. В таблице 1.4 представлены основные параметры КНЭ.

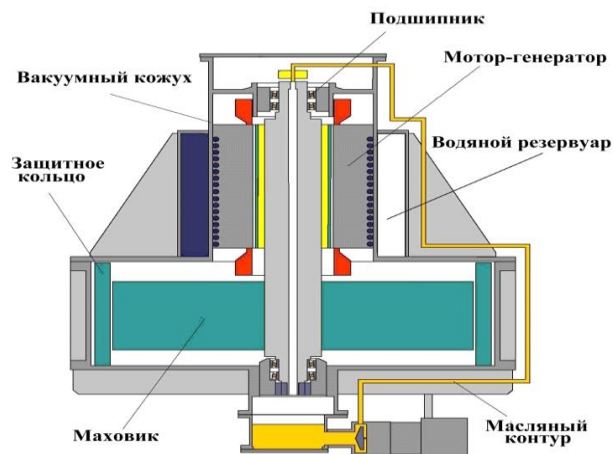


Рисунок 1.5 – Схема КНЭ компании «Energiespeicherwerk für Gleichstromnetze im Nahverkehr»

Таблица 1.4-Параметры КНЭ«Energiespeicherwerk fur Gleichstromnetze im Nahverkehr»

Параметр	Значения
Напряжение	450...1000 В
Максимальный ток	-1000...+1000 А
Частота вращения	15000...25000 мин ⁻¹
Запасенная энергия	4 кВт ч (14,4 МДж)
Вырабатываемая мощность	2 кВт
Потребляемая мощность	2,5 кВт
КПД	80%
Габариты	3м x 1,8м x 3,15м
Расчетный срок окупаемости	20 лет

Параллельно с работами по созданию КНЭ ведется разработка бесконтактных опор для них. Наиболее перспективными опорами для КНЭ являются подшипники на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и постоянных магнитов, конструкция таких опор будет рассмотрена ниже. Также в качестве опор для КНЭ возможен вариант использования комбинации активных (подвес на основе электромагнитов) и пассивных (магнитный подвес) опор. Разработки активно-пассивных опор ведутся в Китае. Эти опоры разрабатываются для накопителя с частотой вращения маховика 60000 об/мин и массой маховика 3 кг [22].

Что касается ВТСП магнитных подшипников, то фирмой Siemens разработан радиальный ВТСП подшипник с грузоподъемностью 500 кг для КНЭ с энергоемкостью 36 МДж. Конструкция накопителя представлена на рисунке 1.6 [23].

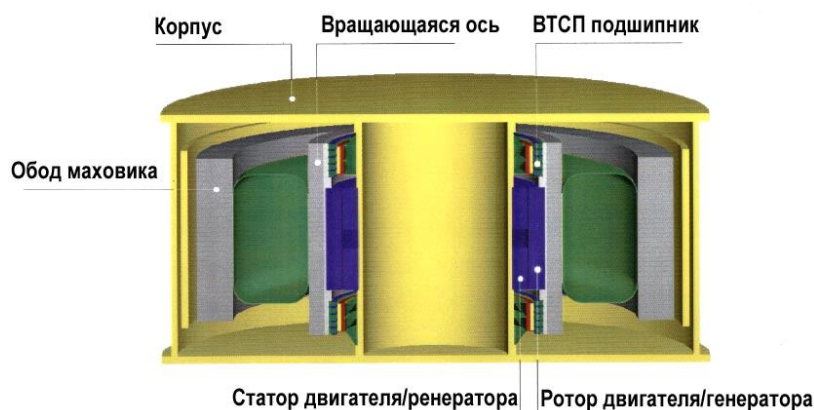


Рисунок 1.6 – Конструкция перспективного КНЭ (энергоемкость 10 кВт·ч, мощность 1 МВт)

Особенностью данной конструкции является наличие неподвижной и вращающейся оси. Вращающаяся ось представляет собой полый цилиндр. Радиальные ВТСП подвесы устанавливаются в верхней и нижней частях конструкции. При этом ВТСП массив размещается на неподвижной оси, а постоянные магниты на вращающейся. Мотор-генератор является обращенной электрической машиной, индуктор которой располагается на вращающейся оси. Композитный маховик в виде цилиндрического обода крепится к вращающейся оси с помощью эластичной вставки. Размеры маховика: наружный диаметр – 1300 мм, высота обода – 493 мм. Масса маховика – 450 кг. Предполагаемые габаритные размеры установки: наружный диаметр – 1500 мм, высота – 650 мм. Масса установки – 1000 кг.

Кинетический накопитель энергии, изготовленный в Техническом университете Цюриха, имеет мощность 250 кВт, энергоемкость 1 кВт·ч (3,6 МДж), частоту вращения 15000 мин^{-1} (см. рисунок 1.7а) [24]. Особенностью конструкции КНЭ является расположение композитного маховика дисковой формы над двигателем-генератором. Подвес маховика и ротора машины осуществляется с помощью радиальных и аксиальных магнитных подшипников.

Установка фирмы ASPES Engineering AG имеет мощность 1260 кВт, запасаемую энергию 33,3 кВт·ч (120 МДж) и достигаемую частоту вращения

15 000 мин⁻¹ при вертикальном положении маховика (см. рисунок 1.7б) [25]. Особенность конструкции состоит в том, что мотор-генератор (синхронная машина с постоянными магнитами) имеет обращенную конструкцию: ротор машины вращается снаружи неподвижного статора. Беспазовый статор с однослойной обмоткой якоря имеет центральное отверстие, по которому циркулирует вода для косвенного охлаждения машины. Ротор машины совмещен с маховиком в форме обода из графитоволокна. Ротор-маховик удерживается в магнитных опорах, состоящих из радиальных и аксиальных магнитных подшипников. Габариты маховика: наружный диаметр – 836 мм, внутренний диаметр – 684 мм, высота – 1 м.

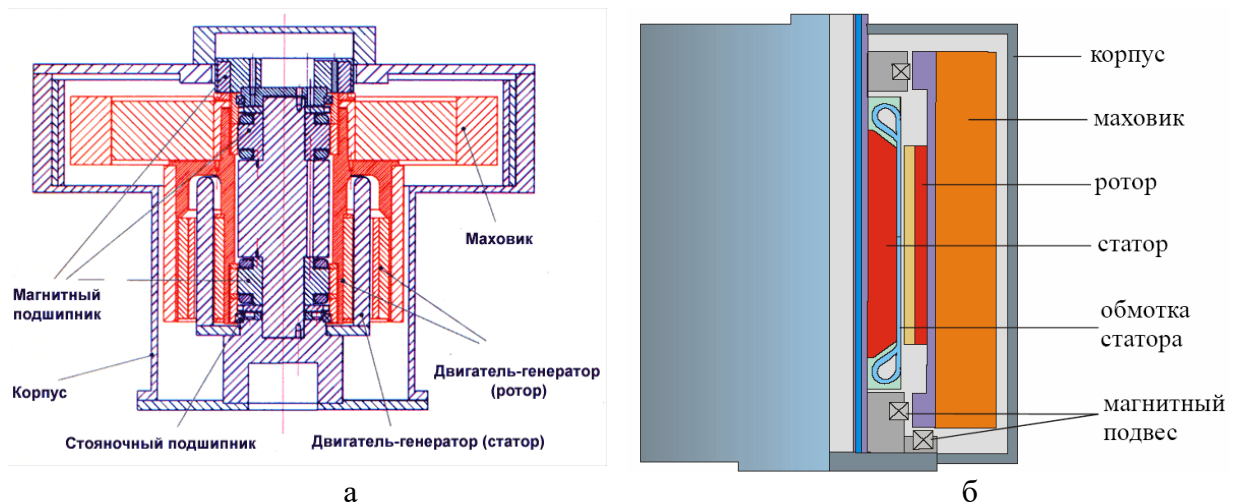


Рисунок 1.7 – Швейцарские разработки КНЭ технического университета Цюриха и фирмы ASPES Engineering AG (Швейцария), 2000 г

а — с дисковым ободом (250 кВт; 1 кВт·ч (3,6 МДж); 15 000 мин⁻¹),

б — с цилиндрическим ободом (1,26 МВт; 33,3 кВт·ч (120 МДж); 15 000 мин⁻¹)

Также известны разработки КНЭ для заряда батарей на основе технологии M2E [26]. Разработка включает миниатюрный генератор, соединённый с традиционной аккумуляторной батареей, которая будет улавливать даже низкочастотную кинетическую энергию, таким образом, большая часть повседневных движений человека будет преобразована в электричество,

достаточное для работы электронных устройств, таких как мобильные телефоны, КПК или MP3-плееры (см. рисунки 1.8, 1.9) [27].



Рисунок 1.8 – Внешний вид устройства на основе технологии M2E

M2E планируют внедрить свои технологии в различные области – ветровой энергетики, автомеханической энергетики и для производства небольших генераторов. Кроме того, M2E надеются в конечном итоге создать заряжающиеся от движения батареи, которые заменят традиционные батареи.

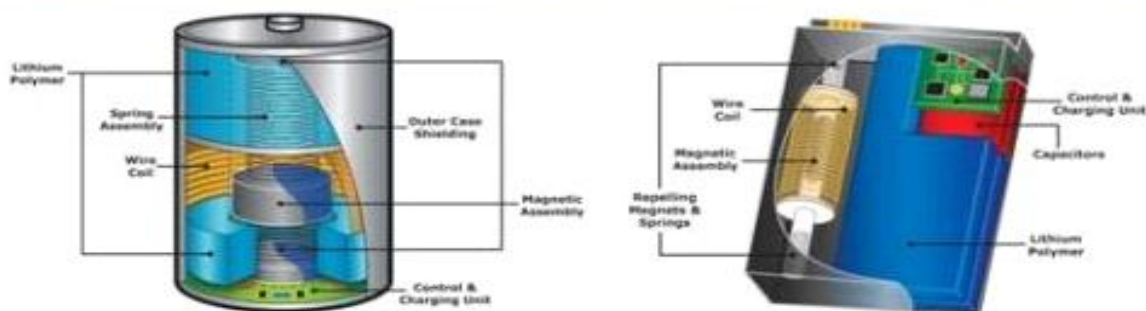


Рисунок 1.9 – Внутреннее устройство изделия на основе технологии M2E

Компания Volvo испытала на дорогах общего пользования системы, которые позволят улучшить динамику автомобилей, сократив при этом расход топлива на 20%. Новинка представляет собой маховик, установленный на задней оси, который запасает кинетическую энергию при торможении (см. рисунок 1.10) [28]. На разработку подобной технологии

"Вольво" получила грант от Министерства энергетики Швеции в размере 6,57 миллиона крон (около 738 тысяч евро) [29].

При начале замедления двигатель внутреннего сгорания, отвечающий за переднюю ось, отключается, а маховик при этом начинает раскручиваться до $60\,000\text{ мин}^{-1}$. При начале движения эта энергия передается на задние колеса с помощью специальной трансмиссии. В результате кинетическая система рекуперации энергии KERS позволяет увеличить динамические характеристики при разгоне [30].

Маховик, изготовленный из карбона, весит около шести килограммов, а его диаметр составляет 20 сантиметров. Углепластиковое "колесо" вращается в вакууме для того, чтобы снизить потери на трение. Энергия, запасаемая KERS, прибавит к мощности обычного двигателя 80 лошадиных сил.

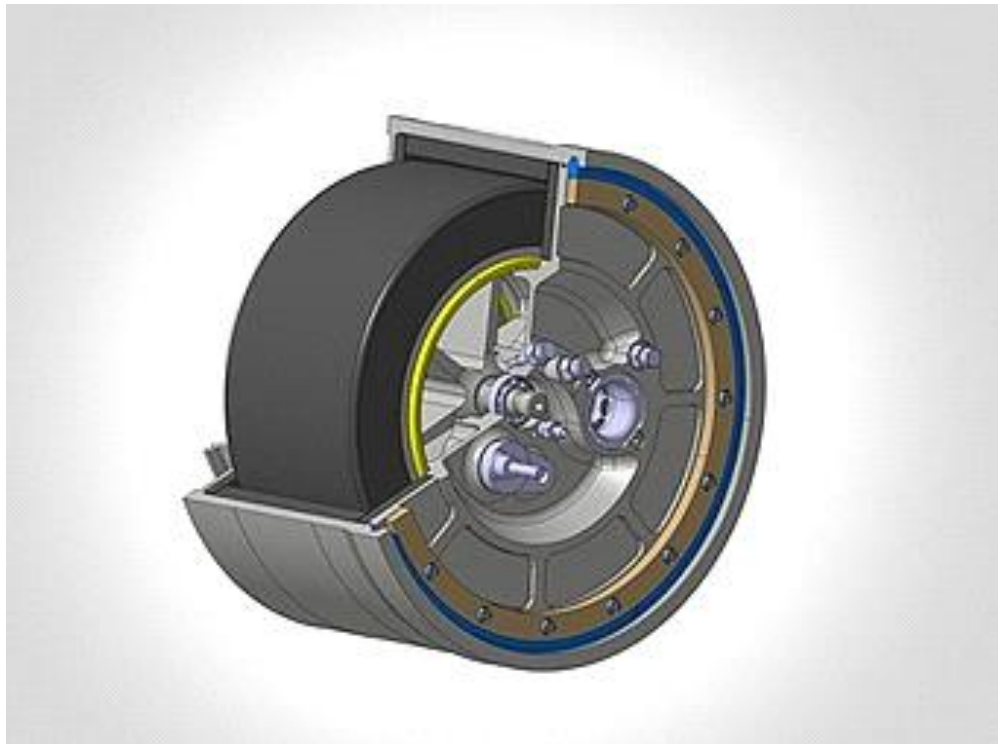


Рисунок 1.10 – Внутреннее устройство кинетической системы рекуперации энергии KERS

Возможно применение системы KERS (система восстановления кинетической энергии) для болидов Формулы-1. Однако данная технология применяется не только в болидах, но и в обычных гибридных автомобилях. Система KERS превращает механическую энергию при торможении в электрическую энергию, которая сохраняется в качестве электрического заряда в батареях [31].

Принцип действия KERS заключается в следующем (см. рисунок 1.11):

1. При торможении электродвигатель переходит в режим генератора (таким образом, кинетическая энергия автомобиля преобразуется в электроэнергию). Генератор создаёт тормозной момент, поэтому появляется возможность остановить автомобиль без использования тормозов. Электрическая энергия переходит к аккумуляторной батарее через блок управления KERS и запасается в ней.

2. При ускорении электродвигатель переходит в основной режим работы (таким образом, электрическая энергия преобразуется обратно в механическую энергию).

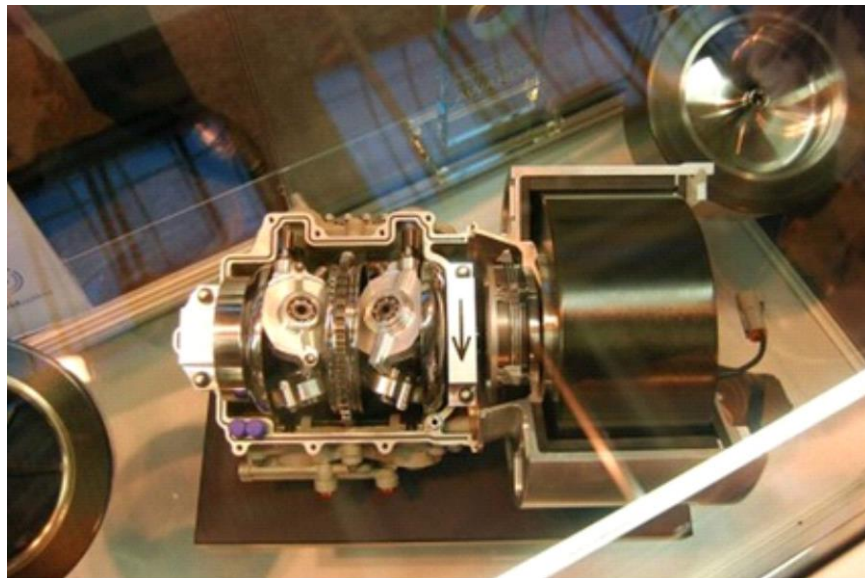


Рисунок 1.11- Часть трансмиссии болида формулы-1 со встроенным КНЭ

Выводы по главе:

1. Обзор литературных данных по разработкам КНЭ ЭМН показал, что при их создании возможно снижение эксплуатационных расходов, времени технического обслуживания, а также увеличение энергоэффективности и экологичности систем аварийного и бесперебойного электропитания ответственных потребителей наземного назначения и специального транспорта.
2. В настоящее время концепция ЭМН реализована в основном без применения эффекта сверхпроводимости, однако, применение бесконтактных ВТСП подшипников позволяет существенно увеличить время хранения запасаемой энергии и увеличить КПД.
3. Обзор публикаций, посвященных созданию КНЭ и ЭМН, показал, что в настоящее время реализованы и коммерчески доступны ЭМН с запасенной удельной энергией до 45МДж при частоте вращения 20000 мин⁻¹ и более, в зависимости от типа примененных подшипников.
4. Проектирование ЭМН без применения ВТСП подшипников приводит к сильному снижению КПД устройств, из-за значительных потерь кинетической энергии при вращении маховика ЭМН за счет существенного трения в подшипниках.

2. КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ ЭМН РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Основными областями применения ЭМН являются следующие: Дополнительные источники питания мощных потребителей, потребляющих энергию периодически (токамаки, химическое производство и пр.). В этом случае ЭМН позволяет обеспечить энергоснабжение потребителей при потреблении пиковой мощности (как правило, это низко-или среднеоборотные КНЭ); Аварийные источники питания ответственных потребителей (data и медицинские центры, АЭС и пр.) (как правило, это средне-или высокооборотные ЭМН); Рекуперация энергии на транспортных объектах (как правило, это высокооборотные ЭМН)

В данном разделе представлены реализованные разработки ЭМН и КНЭ в зависимости от области их применения.

В Японии разработкой КНЭ занимается ассоциация NEDO, фирмы Chubu electric power company incorporated и Mitsubishi heavy industries [32]. Ими были проведены работы по созданию серии кинетических накопителей энергии различных мощностей и конструкций. Дальнейшим развитием этих исследований является создание кинетического накопителя энергии с запасённой энергией 360 МДж [33]. В рамках проведенных исследований эти компании разработали и протестировали КНЭ на 1,4 кВт·ч (5,04 МДж) (см. рисунок 2.1, а), который являлся прототипом КНЭ энергоёмкостью 12,5 кВт·ч (45 МДж) (см. рисунок 2.1, б). при частоте вращения 10000 мин^{-1} . Наружный диаметр маховика составит 1,2 м.

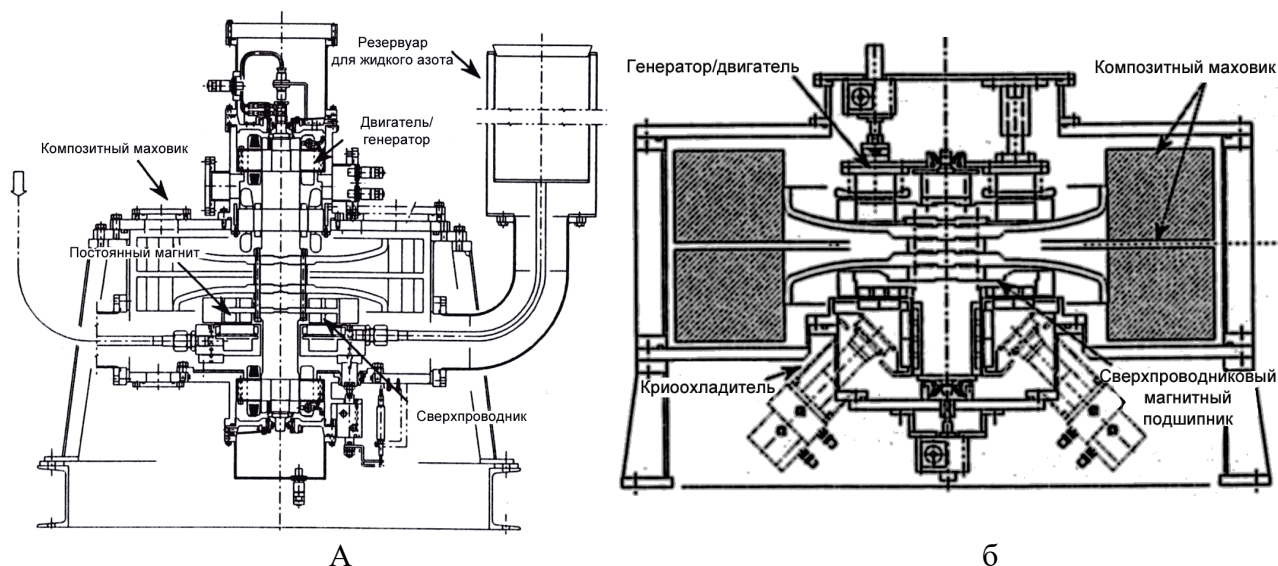


Рисунок 2.1 – Конструктивные схемы моделей КНЭ, Chubu Electric Power Company и Mitsubishi Heavy Industries (Япония), 2001 г. а — 1,4 кВт·ч (5,04 МДж), б — 12,5 кВт·ч (45 МДж)

Модель КНЭ (см. рисунок 2.1, а) включает два дисковых маховика, ВТСП подвес аксиального типа и мотор-генератор, размещенный над маховиками. Особенностью данной разработки является трехслойная конструкция каждого маховика. Материал каждого слоя подобран таким образом, чтобы эластичность при переходе от внутреннего слоя к наружному слою увеличивалась. Размеры маховика: наружный диаметр – 600 мм, внутренний диаметр - 450 мм, высота - 70 мм. При максимальной частоте вращения 20000 мин^{-1} КНЭ обладает энергоемкостью 1,4 кВт·ч (5,04 МДж). Для охлаждения ВТСП подвеса использовался криокулер Гиффорда-Макмагона [34].

На основе полученных результатов начата разработка следующего перспективного КНЭ энергоемкостью 100 кВт·ч (360 МДж) (рисунок 2.2) [35]. Особенность конструкции данного устройства заключается в том, что в его центральной части проходит неподвижная ось, вокруг которой вращается ротор в виде полого цилиндра. В результате мотор-генератор, размещенный над маховиком, имеет обращенную конструкцию. К ротору через мощные спицы стыкуется маховик из композитного материала. Для подвеса ротора используется гибридная система подвеса: активный магнитный подшипник в

верхней части и радиальный ВТСП подшипник в нижней. Эти подшипники обеспечивают левитацию и стабилизацию ротора [36].

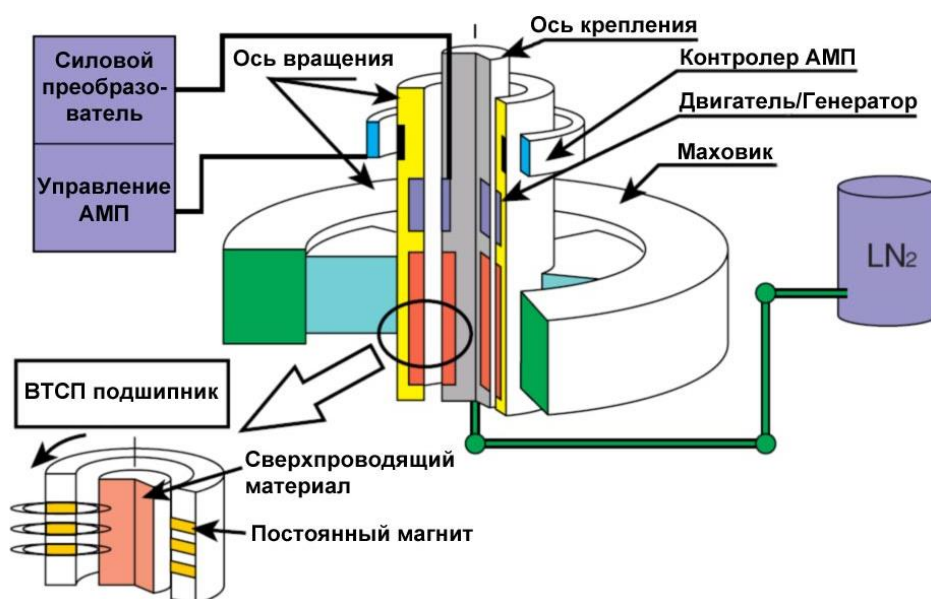


Рисунок 2.2. Конструкция КНЭ (мощность 10 кВт; энергоемкость 100 кВт·ч(360 МДж)). Разработка ассоциации NEDO (Япония), 2000-2004 гг.

Также в Японии исследовательский институт Shibaura Institute of Technology (Superconductivity Research Lab. ISTEC) представил КНЭ с тремя активными магнитными подшипниками (один - аксиальный, два - радиальных) и с центральным сверхпроводниковым радиальным магнитным подшипником (см. рисунок 2.3). Запасенная энергия маховика составляет приблизительно 10 кВт ч (36 МДж). Частота вращения достигала 15860 мин^{-1} . Диаметр маховика – 1 м, масса маховика – 125 кг [37]. При испытаниях исследовались зависимость силы левитации от радиального смещения, уменьшение левитирующих свойств сверхпроводникового подшипника в результате крипа магнитного потока и зависимость потерь запасенной энергии от частоты вращения маховика.

Basic Structure of 10kWh Class FESS

Required Rotation Speed for 10 kWh Storage : 15,860 rpm

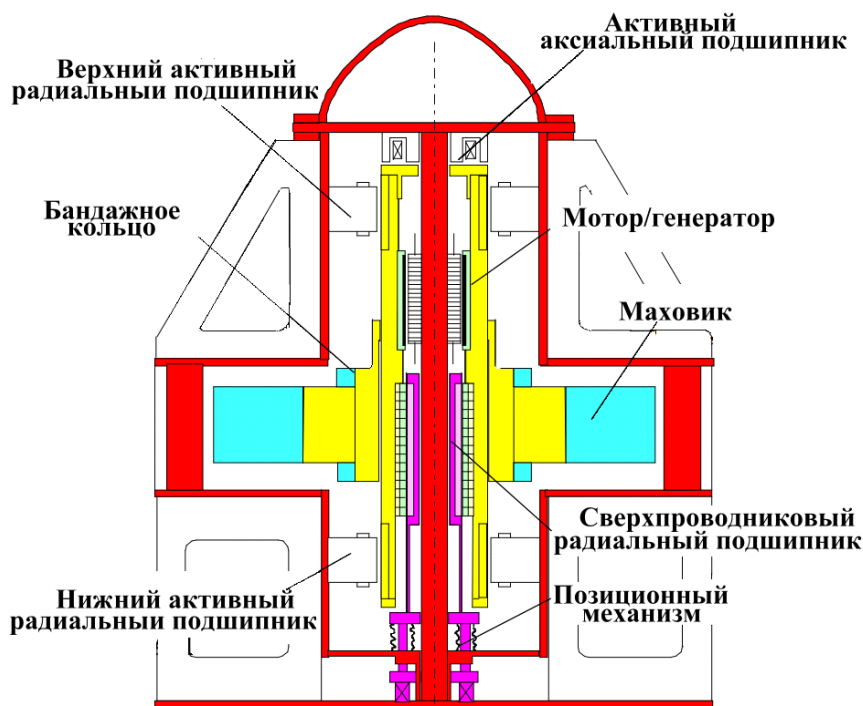


Рисунок 2.3- КНЭ разработки Shibaura Institute of Technology (Япония)

Японский институт «Railway Technical Research Institute» создал при поддержке Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism КНЭ с запасенной энергией 3,3 кВт ч (12 МДж) (см. рисунок 2.4), при этом масса маховика составляла 2 т при диаметре 1 м, а частота вращения достигала 3600 об/мин [38]. Показано преимущество использования пониженных температур ($T = 65\text{K}$) с использованием переохлажденного жидкого азота. Увеличение силы левитации за счет увеличения сверхпроводящего тока в объемных сверхпроводниковых блоках при одной и той же величине тока в сверхпроводниковых катушках, согласно представленным материалам, составляет примерно 25%, что существенно сказывается на допустимых перегрузках и амплитудах колебаний при резонансных частотах.

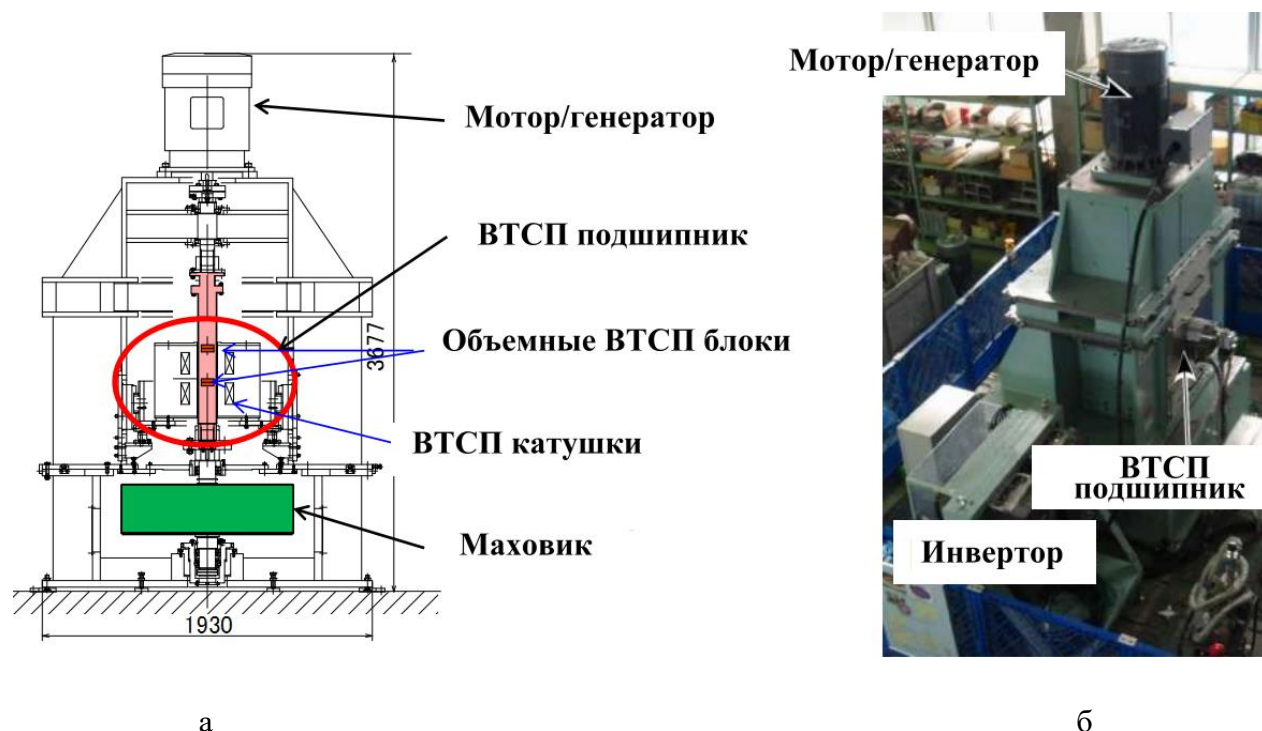


Рисунок 2.4 – Схема КНЭ «Railway Technical Research Institute» а – схема КНЭ,
б – фотография КНЭ

Кинетический накопитель энергии компании Boeing (США), энергоемкостью 10 кВт·ч (36 МДж) (см. рисунок 2.5, а) имеет цилиндрическую конструкцию обода маховика, выполненного из композитного материала [39]. Особенностью данной модели является ее компактность. Для достижения этой цели мотор-генератор размещен внутри маховика. При этом мотор-генератор имеет «разветвленный» ротор, охватывающий машину. Этот ротор одновременно является опорой для крепления ступицы маховика и элементом системы аксиального ВТСП подвеса. Ступица маховика имеет коническую форму. Маховик в форме обода выполнен из композитного материала. Конструкция опирается на осевой ВТСП подшипник (аналогичный используемому в предыдущей модели) снизу и пусковой подшипник, закрепленный на крышке вакуумной камеры. Пусковой подшипник снижает вибрации при пуске.

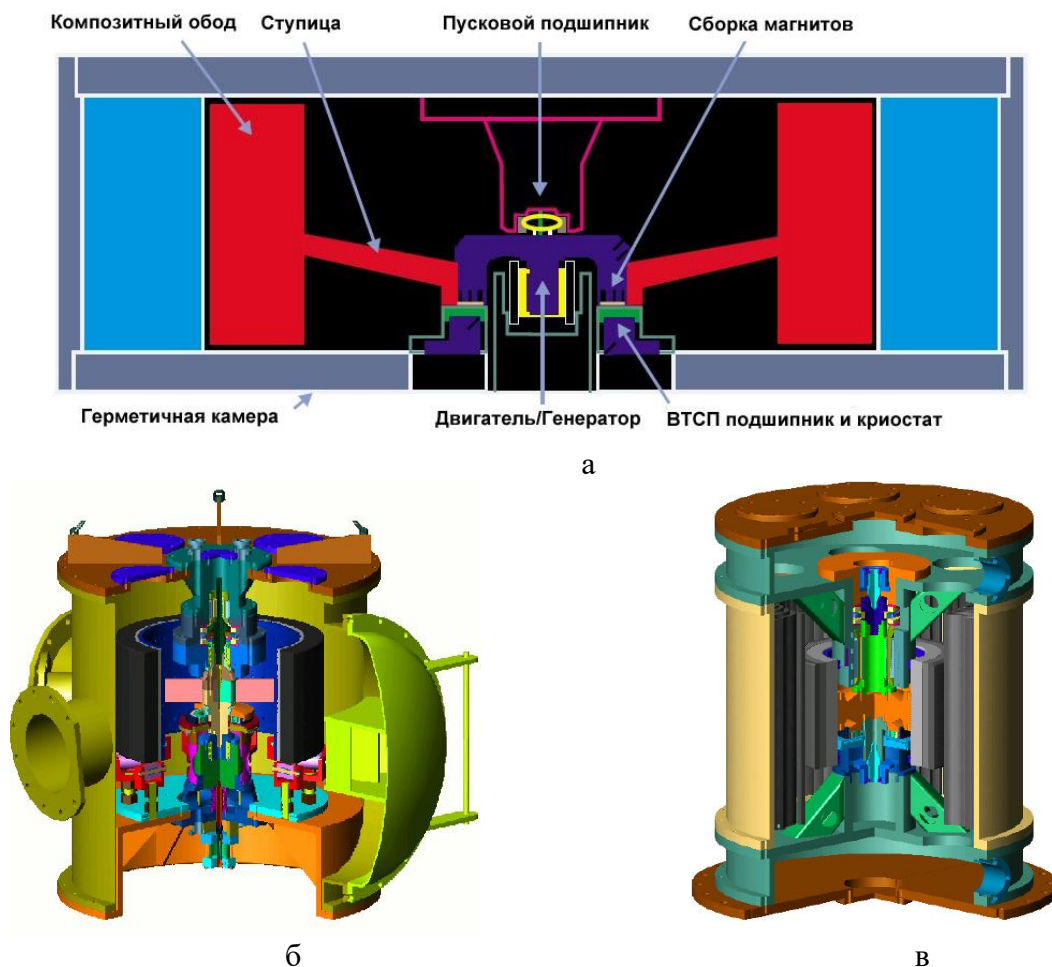


Рисунок 2.5 – Конструктивные схемы моделей КНЭ, Boeing (США), 2002-2005 гг
 а — 10 кВт·ч (36 МДж), б — 3 кВт/10 кВт·ч (36 МДж), в — 100 кВт/10 кВт·ч (36 МДж)

Модель КНЭ (мощность 3 кВт, энергоемкость 10 кВт·ч (36 МДж)), представленная на рисунке 2.5б имеет более совершенную систему магнитного подвеса гибридного типа. Левитация ротора обеспечивается аксиальным ВТСП подшипником, расположенным в нижней части конструкции, и аксиальным подшипником с постоянными магнитами в верхней части. ВТСП подшипник, размещенный внутри обода маховика, демпфирует осевые и радиальные колебания системы. Стояночные подшипники в форме штыря обеспечивают опору ротора в неподвижном состоянии. Верхний и нижний шарикоподшипники обеспечивают стабилизацию системы при разгоне и торможении. Цилиндрический обод из композитного материала крепится на спицах к мощной ступице. Мотор-генератор расположен над маховиком. Его

статор крепится к верхней крышке вакуумной камеры, а ротор жестко связан со ступицей. При испытаниях данная установка разрушилась. Данная авария подтвердила, что наиболее опасным элементом конструкции КНЭ является маховик и его составные части.

В КНЭ, представленном на рисунке 2.5в, получена мощность в 100 кВт и энергоемкость 35 кВт·ч (126 МДж). В данной конструкции система подвеса аналогична предшествующей модели (см. рисунок 2.5, б). Изменения коснулись конструкции маховика: обод маховика крепится непосредственно на алюминиевую ступицу в форме цилиндра. Это позволяет увеличить частоту вращения маховика и надежность конструкции. Мотор-генератор частично располагается внутри обода маховика, что позволяет уменьшить габариты конструкции. Ротор мотор-генератора жестко состыкован со ступицей. Статор крепится к верхней крышке вакуумной камеры. Для повышения безопасности установки вакуумная камера имеет энергопоглощающую вставку.

Американская компания «Power Thru» (Pentadyne) представила в феврале 2011 г конструкцию КНЭ (см. рисунок 2.6) с углепластиковым маховиком [40]. Вся установка весит 23 кг. Частота вращения маховика достигала при испытаниях 52000 об/мин.

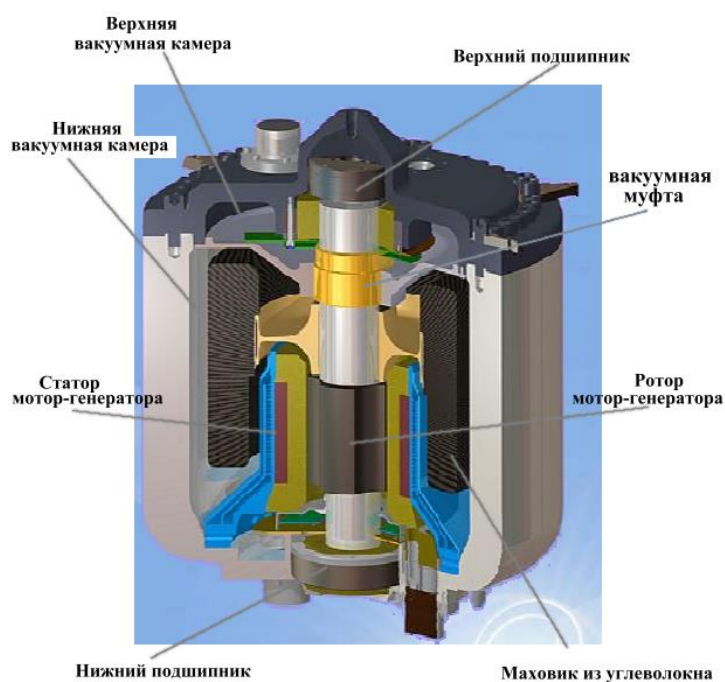


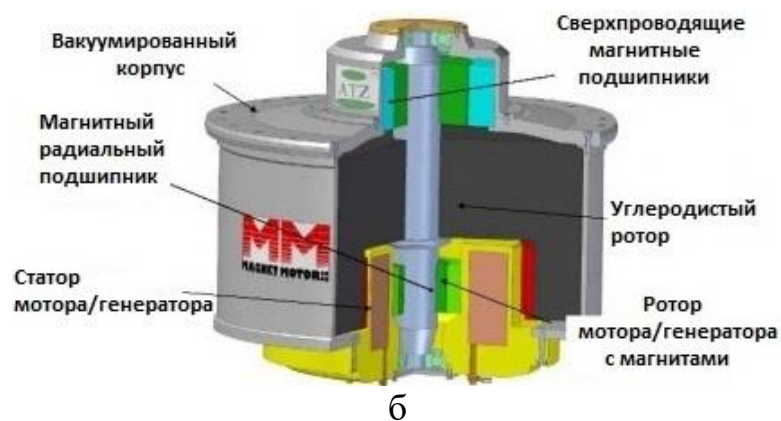
Рисунок 2.6 – Схема КНЭ «Power Thru» (Pentadyne)

Немецкая ATZ производит накопители на 20 МДж, способные отдавать в нагрузку мощность до 250 кВт, оснащенные системой синхронизации с сетью [41]. При этом размеры устройства не превышают 1,5 метров [41] (см. рисунок 2.7 а).

Маховик накопителя, изготовленный из высокопрочного карбонового волокна, установлен на подвес из ВТСП керамики. Электрическая машина, разгоняющая маховик ATZ и генерирующая электроэнергию, выполнена на базе постоянных редкоземельных магнитов [42] (см. рисунок 2.7 б).



а



б

Рисунок 2.7 – Схема КНЭ фирмы ATZ

а-фотография КНЭ, б-схема КНЭ

Американская Weason Power выпускает цилиндрические накопители на 6 кВт·ч и на 25 кВт·ч, которые можно использовать, набирая кластерами для обеспечения устойчивости параметров тока в промышленных электросетях страны [43] (см. рисунок 2.8 а, б).



Рисунок 2.8 – КНЭ фирмы Weason Power

а-фотография КНЭ, б-схема КНЭ

В Московском авиационном институте созданы экспериментальные образцы ВТСП подвесов, обеспечивающие устойчивую левитацию маховика

массой до 600 кг. Изготовлены и испытаны ЭМН энергоемкостью 0,139 кВт·ч (0,5 МДж) и 5 МДж для питания ответственных потребителей [44].

Конструкция ЭМН 0,5 МДж. Основные параметры ЭМН 0,5: максимальный уровень запасаемой энергии — не менее 0,5 МДж, время заряда — 300 с, время разряда (мощность 10 кВт) — 25 с, диапазон выходного напряжения — 220...240 В, частота выходного напряжения — 50 Гц; частота вращения маховика — 4000...6000 об/мин, масса маховика — 100 кг; мощность мотор-генератора — 11 кВт, КПД мотор-генератора — 90...99%.

В качестве мотор-генератора используется синхронная электрическая машина с постоянными магнитами, а в качестве подшипниковой опоры — магнитный подвес на основе постоянных магнитов и массивных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). Применение подвеса такого типа позволяет исключить затраты энергии на поддержание вращающегося маховика в левитирующем положении, а использование синхронной электрической машины с постоянными магнитами и немагнитным статором позволило сделать конструкцию мотор-генератора компактной, избежать потерь на перемагничивание в режиме хранения энергии и исключить энергозатраты на создание магнитного поля возбуждения [45].

Схема разработанной конструкции ЭМН и вид ее узлов представлены на рисунке 2.9.

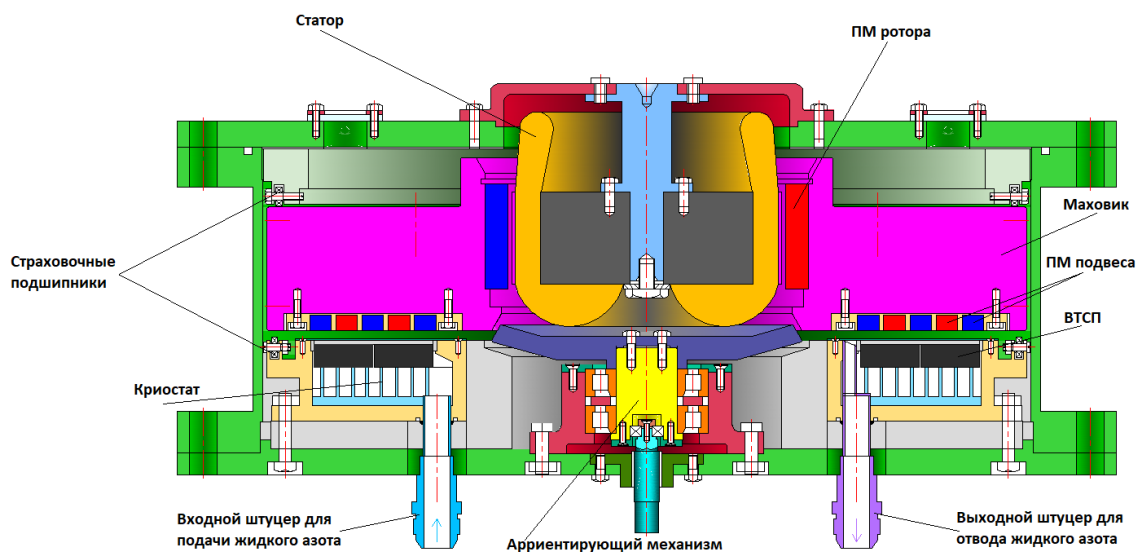


Рисунок 2.9- Конструктивная схема ЭМН 0,5 МДж (МАИ, г. Москва)

В НИУ “МЭИ” разработан кинетический накопитель энергии с высокотемпературным сверхпроводниковым подвесом (см. рисунок 2.10) [46]. По заявлению разработчиков КНЭ с бесконтактным магнитным подвесом на основе эффекта высокотемпературной сверхпроводимости повышает эффективность хранения энергии до уровня современных аккумуляторных батарей. Его особенностью является эффективное сглаживание быстрых колебаний мощности с характерным временем от долей секунды до десятков минут. КНЭ могут использоваться для быстрого реагирования энергетической системы на изменение баланса между генерируемой и потребляемой мощностью, связанных, например, с непостоянством скорости ветра.

Ученые создали полностью интегрированную систему КНЭ, где все элементы находятся в одной вакуумной камере. Это помогло отказаться от теплоизоляции для сверхпроводящих элементов, уменьшить немагнитный зазор в подвесе до 1 мм и, соответственно, повысить его характеристики.

Затем были разработаны оригинальная конструкция магнитного бесконтактного арретира, чтобы установить положения маховика внутри вакуумной камеры в момент охлаждения сверхпроводящих элементов (до

охлаждения сверхпроводящий подвес не удерживает маховик), и конструкция мотор-генератора для КНЭ, встраиваемого внутрь маховика, которая обеспечила минимальные потери энергии в режиме хранения. Особенность мотор-генератора – система постоянных магнитов в теле стального маховика, что дает возможность использовать его как ротор [47].



Рисунок 2.10 – Фото КНЭ НИУ МЭИ

Выводы по главе:

1. Главным преимуществом конструкции ЭМН является то, что они обладают хорошей масштабируемостью в зависимости от назначения и области их применения.
2. В настоящее время в России и за рубежом реализован ряд конструкций ЭМН различного назначения и мощности, но самыми энергоэффективными являются ЭМН с применением ВТСП магнитных подшипников.
3. Обзор публикаций, посвященных созданию ЭМН, показал, что в настоящее время реализованы проекты ЭМН с большой запасенной удельной энергией и относительно малым КПД из-за больших потерь на трение или наоборот с большим КПД, но уровень запасенной удельной энергии не превышает 1 МДж.

3. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ЭМН

Основными конструктивными элементами любого ЭМН с магнитным ВТСП подвесом являются: маховик, опоры / подшипники, мотор-генератор, система безопасности, корпус ЭМН, система управления, а также вспомогательные элементы: система синхронизации с сетью (при работе на неавтономную нагрузку), система разгона и рекуперации энергии, дающая на выходе ЭМН заданное напряжение и частоту, система подачи и циркуляции хладагента (жидкого азота если в конструкции ЭМН предусматривается использование ВТСП подшипников), система управления активным подвесом (если используется подвес на основе электромагнитов).

В данной главе описаны математические модели основных и вспомогательных элементов ЭМН с ВТСП магнитным подвесом.

Частота вращения маховика определяется свойствами материала, из которого он изготовлен. При заданном наружном радиусе маховика максимальная частота определяется величиной допустимой безопасной скорости на периферии маховика [48]. Для современных высокоскоростных ЭМН частота вращения лежит в диапазоне 10 000 – 40 000 мин⁻¹ [49]. При этом уровень их энергоемкости составляет 1 – 100 кВт·ч. Однако, наибольшую единичную энергоемкость позволяют получить ЭМН, выполненные на базе энергетических турбо- (горизонтальное исполнение) и гидрогенераторов (вертикальное исполнение) [50]. В горизонтальной конструкции предусматривается отдельный металлический маховик в защитном кожухе, в вертикальной – маховик совмещен с утяжеленным ротором генератора. Такие установки разрабатывались для питания токамаков. Они имеют энергоемкость порядка 1 – 8 ГДж (278 – 2250 кВт·ч) и мощность 100 – 1400 МВА [51]. Однако стоимость такого источника может достигать 50% стоимости крупного промышленного предприятия. Следует обратить внимание, что в 80-ые годы разрабатывались системы активного магнитного подвеса на основе НТСП для

замены подпятников вертикальных синхронных машин, а также для замены подшипников машин горизонтального исполнения.

На рисунке 3.1 изображены маховики различной формы для инерционных накопителей.

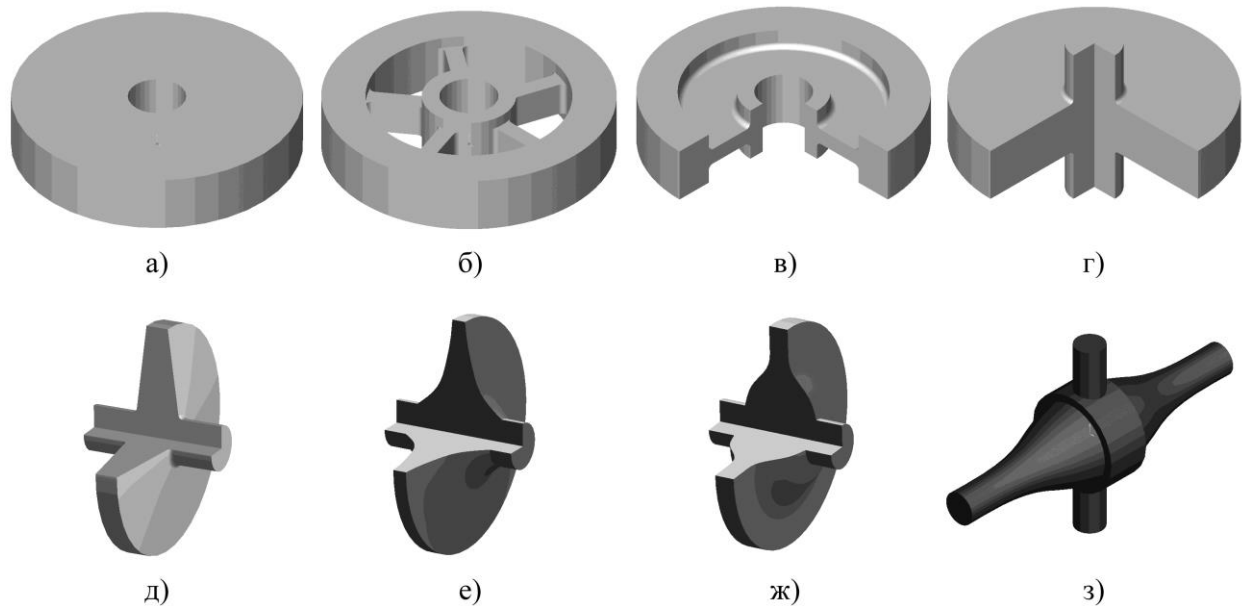


Рисунок 3.1 – Маховики различной формы: а - диск постоянной толщины с малым отверстием в центральной зоне; б - тонкий обод; в - диск с ободом; г - диск постоянной толщины без центрального отверстия; д, е - конический и гиперболический диски без отверстия; ж - диск равной прочности; з - стержень равной прочности.

Вопросы выбора формы, материала и параметров маховиков подробно рассмотрены в [52].

Потери на трение и пути их уменьшения в механических накопителях. Для всех типов маховиков в режимах заряда и разряда целесообразно снижать потери на трение. Согласно уравнению баланса энергии для ЭМН (3.2) КПД

заряда будет иметь вид $\eta_3 = \frac{W_K}{(W_K + W_T)}$, а КПД разряда $\eta_P = 1 - \left(\frac{W_T}{W_K} \right)$. Если

маховик вращается в воздушной среде нормального давления и установлен в

обычных опорах качения либо скольжения, то учитываемые посредством η_p, η_3 потери могут оказаться недопустимо большими ($\eta_p \approx 0,7$).

Энергия потерь трения в расчете на пару подшипников может быть рассчитана, как:

$$W_{m,n} = \varphi_c M_{m,n} = M_{m,n} \int_{t_1}^{t_2} \Omega(t) dt,$$

где φ_c — суммарный угол поворота маховика за время $\Delta t = t_2 - t_1$.

Момент трения (для пары подшипников)

$$M_{m,n} = 0,5 \cdot gM \cdot f_{m,n} \cdot d_\epsilon, \quad (3.3)$$

где $f_{m,n}$ — коэффициент трения подшипника; d_ϵ — диаметр вала в опоре; M — масса маховика; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Для опор качения $f_{m,n} = 0,001 \div 0,004$, для опор скольжения $f_{m,n} = 0,015 \div 0,02$ в зависимости от качества подшипника. При заданной угловой скорости $\Omega = 2\pi n$ мощность потерь в двух подшипниках $P_{m,n} = 2\pi n \cdot M_{m,n}$.

Момент потерь аэродинамического трения цилиндрического маховика в кожухе $M_{m,a} = M_{m,u} + M_{m,o}$ складывается из момента $M_{m,u}$ на цилиндрической поверхности шириной L и момента $M_{m,o}$ на двух торцевых дисковых поверхностях диаметром $D = 2R$. Соответствующие мощности потерь $P_{m,u}, P_{m,o}$ могут быть рассчитаны на основе классической модели течения Куэтта (оно наблюдается в канале, у которого одна из стенок движется; теоретически течение Куэтта не имеет пограничных слоев у стенок канала). В случае турбулентного течения расчет с учетом эмпирических коэффициентов дает [53]:

$$\left. \begin{aligned} P_{m,u} &= 2\pi n \cdot M_{m,u} = 0,458 \cdot D^4 L \cdot n^3; \\ P_{m,o} &= 2\pi n \cdot M_{m,o} = 3,82 \cdot 10^2 \cdot C_M \gamma_a D^5 n^3, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

причем коэффициент момента аэродинамического сопротивления

$C_M = 0,0277 \cdot \text{Re}_\delta^{-0,2} \left(\frac{\delta_m}{R} \right)^{-0,2}$, число Рейнольдса для диска $\text{Re}_\delta = \frac{\Omega R^2}{\nu_a}$; δ_m —

торцевой зазор между маховиком и кожухом, L, γ_a, ν_a — плотность и кинематическая вязкость среды, окружающей вращающийся маховик.

Известны также эмпирические формулы для расчета $M_{m,a}$ дисковых маховиков в различных средах, которые можно свести к общему выражению [54]:

$$M_{m,a} = k_a \cdot 10^{-3} \xi \cdot p_*^z [1 + \lambda(4 + y)] D^{4+y} n^{1+z}, \quad (3.5)$$

где $p_* = p/p_0$ — относительное давление среды, p_0 — нормальное атмосферное давление; $\xi \approx 0,8$ при наличии кожуха и $\xi = 1$ в отсутствие кожуха; $\lambda = L/D$ — относительная длина.

Для воздушной среды $k_a = 10,6$; $y = 0,4$; $z = 0,7$; для водородной среды $k_a = 1,69$; $y = 0$; $z = 0,5$; для гелиевой среды $k_a = 3,54$; $y = 0$; $z = 0,5$.

Из приведенных соотношений видны пути повышения КПД ЭМН. Согласно (3.3) для уменьшения потерь в подшипниках следует снижать массу маховика и коэффициент трения $f_{m,n}$. С этой целью выбирают легкие материалы для изготовления маховика; наряду с традиционными подшипниками качения или скольжения применяют специальные конструкции опор. Для ЭМН представляют интерес опоры с использованием магнитных подпятников и магнитных ВТСП опор.

При выборе конструкции и материала маховика, разрабатываемого ЭМН учитывались следующие моменты:

- композитные материалы, производимые за рубежом, имеют допустимое напряжение -1500 МПа;
- композитные материалы, производимые в России, имеют допустимое напряжение -750 МПа;
- композитные материалы имеют плотность 1,6 г/см³, а сталь 7,8 г/см³;
- сталь имеет допустимое напряжение -400 МПа;

Учитывая выше изложенное, рационально разрабатывать маховик ЭМН в виде стальной трубы, обмотанной относительно тонким слоем углеволокна. Такой бандаж должен повысить допустимые обороты, надежность и безопасность конструкции.

При этом диаметр трубы может быть выбран из условия использования стандартных толстостенных труб, производимых промышленностью. В данной работе выбраны горячекатаные бесшовные трубы, изготовленные из стали 9Г2С диаметром до 550 мм с толщиной стенки до 35 мм.

Предварительный расчет, выполненный по представленной ниже методике, показал, что заданную энергию 5 МДж маховик накапливает при толщине 25 мм и $\sim 7000 \text{ мин}^{-1}$.

3.1 Выбор и расчет маховика

Расчет запасаемой энергии ЭМН. Маховик электромеханического накопителя энергии (ЭМН) конструктивно состоит из двух вложенных друг в друга коаксиальных полых цилиндров высотой (осевой длиной) h_m : внутреннего из конструкционной стали плотностью $\gamma = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и пределом прочности $\sigma = 834 \text{ МПа}$, выполняющего функцию ступицы, и внешнего из углеволокна плотностью $\gamma = 1600 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Стальная ступица обеспечивает крепление к валу через дисковое ребро. Углеволоконный цилиндр выполняет основную функцию упрочняющего бандажа и является периферийной массой, увеличивающий момент инерции маховика.

В разработанной методике сначала выбираются размеры маховика, исходя из доступной технологии изготовления, возможностей производства, габаритов стандартных заготовок. Номинальная частота вращения n определяется связанными параметрами мотор-генератора: необходимой электрической частотой выходного напряжения в генераторном режиме, и частоты питающего напряжения в двигательном режиме. Как правило,

типовыми частотами вращения роторов ЭМН большой мощности являются 8000 и 12000 мин⁻¹. Дальнейшее повышение номинальной частоты вращения возможно применением специальных высокооборотных электрических машин. Следует также учитывать, что для увеличения времени хранения запасенной кинетической энергии, магнитные потери (зависящие от частоты вращения в степени ~1,5-1,7) и потери на трение должны быть минимальны. Для исключения потерь на трение в скользящих контактах, мотор-генератор должен быть бесконтактным.

Параметры каждого полого цилиндра рассчитываются по следующим формулам. Суммарная запасаемая энергия определяется суммой запасаемых энергий этих двух полых цилиндров. Основными параметрами полого цилиндра являются: его внешний диаметр D , внутренний диаметр d и высота $h_{\text{мц}}$.

Относительная осевая длина маховика:

$$\lambda = \frac{h_{\text{мц}}}{D}.$$

Толщина стенки полого цилиндра:

$$\delta = \frac{D - d}{2}.$$

Продольная площадь сечения полого цилиндра:

$$S = \delta \cdot h_{\text{мц}}.$$

Объём полого цилиндра определяется по известной формуле:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D^2 - d^2}{4} \right) \cdot h_{\text{мц}},$$

Масса полого цилиндра вычисляется как:

$$m_{\text{мц}} = V \cdot \gamma,$$

где γ — плотность материала.

Окружная скорость определяется как:

$$v = \pi \cdot \frac{(D + d)}{2} \cdot \frac{n}{60}.$$

Угловая частота вращения:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}.$$

Момент инерции полого цилиндра ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$):

$$J_{\text{ци}} = \frac{m_{\text{ци}}}{2} \cdot \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 + \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right].$$

Суммарный момент инерции маховика и его полная масса складывается из массы всех полых цилиндров:

$$J_{\text{м}} = \sum J_{\text{ци}}, \quad m_{\text{м}} = \sum m.$$

Вал, дисковое ребро, и роторные части опор незначительно добавляют запасаемую энергию в связи с их относительно малой массой, радиусами и моментами инерций.

Кинетический момент (момент импульса), необходимый для расчета гироскопического момента ЭМН с подвижным основанием, может быть вычислен как [55]:

$$H_{\text{к}} = J_{\text{м}} \cdot \Omega.$$

При вращении основания с закреплённым в опорах маховиком ЭМН, возникает гироскопический момент, равный:

$$M_{\text{г}} = H_{\text{к}} \cdot \omega \cdot \sin \beta,$$

где ω — угловая скорость вращения основания, равная скорости вращения Земли [56]

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{23ч \cdot 3600 \frac{с}{ч} + 56.м \cdot 60 \frac{с}{м} + 5с} = 7,292 \times 10^{-5} \cdot с^{-1},$$

а β — угол между осями вращения маховика и основания ЭМН, для жёстко установленного на Земле основания, равный разнице 90° и географической широты установки с вертикальной осью вращения маховика.

Радиальная сила, дополнительно действующая на опоры из-за гироскопического момента маховика, может быть вычислена как:

$$F_{\text{р}} = \frac{M_{\text{г}}}{h_{\text{оп}}},$$

где $h_{\text{мц}}$ — расстояние между опорами, как правило, приблизительно равное высоте маховика.

Гироскопический момент можно полностью устранить, располагая ось вращения маховика параллельно оси вращения Земли. Однако, при установке ЭМН на подвижные объекты, которые могут совершать резкие развороты со сравнительно большой угловой скоростью ω , расчёт радиальной силы может показать необходимость установки маховика ЭМН в кардановом подвесе.

Запасаемая энергия (Дж) вращения каждого полого цилиндра и его удельная запасаемая энергия (Дж/кг) вычисляется соответственно:

$$W_{\text{мц}} = \frac{J_{\text{мц}} \cdot \Omega^2}{2},$$

$$W_{\text{мц}} = \frac{W_{\text{мц}}}{m}.$$

Функция запасаемой кинетической энергии маховика в зависимости от частоты вращения ротора:

$$W_{\text{м}}(n) = \frac{J_{\text{м}} \cdot \Omega^2(n)}{2}$$

По представленной формуле построен график зависимости запасаемой энергии $W_{\text{м}}$ от частоты вращения n маховика массой $m_{\text{м}}$ и моментом инерции $J_{\text{мц}}$ (см. рисунок 3.3).

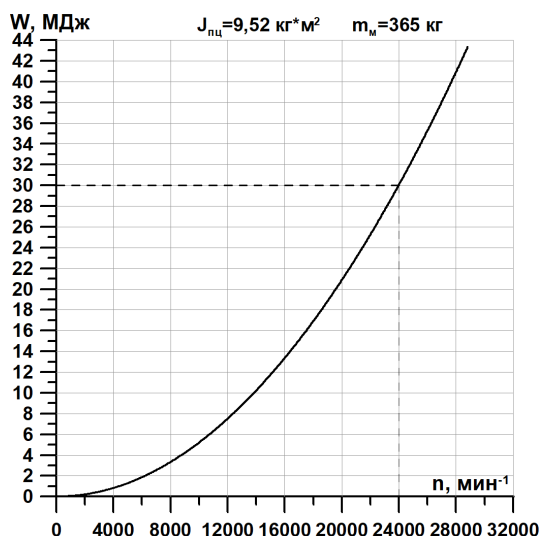


Рисунок 3.3 — Зависимость запасаемой энергии W от частоты вращения n маховика массой $m_{\text{м}} = 365 \cdot \text{кг}$ и моментом инерции $J_{\text{мц}} = 9,52 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2$

Видно, что величина запасаемой энергии имеет явно выраженный квадратичный характер роста от частоты вращения, поэтому целесообразно выбирать максимально возможную частоту вращения, ограниченную прочностью маховика. Для маховика с рассчитанными параметрами, номинальное значение запасаемой энергии достигается при частоте вращения $n = 24000 \text{ мин}^{-1}$.

Расчет прочности маховика. Основной задачей расчета кинетического накопителя является расчет прочности маховика. Поскольку энергия, запасаемая маховиком, зависит от квадрата его частоты вращения, необходимо предварительно аналитически оценить принципиальную возможность его работоспособности при выбранных геометрических размерах и применяемых конструкционных материалах. Затем необходимо провести численное моделирование с учётом всех элементов конструкции, подтверждающие правильность оценочного аналитического расчета.

Каждый полый цилиндр сначала отдельно рассчитывается на разрыв под действием центробежных усилий по следующей методике.

По условиям симметрии, полый цилиндр, в перерезном сечении представляющий собою кольцо, может быть мысленно разрезан пополам [57].

Положение центра масс полукольца полого цилиндра определяется по следующей формуле [58]:

$$r_{цм} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^3 - \left(\frac{d}{2}\right)^3}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)},$$

где π — является, в общем виде, углом раскрытия кругового сектора (в радианах), в случае полукольца равным 180° .

Центробежная сила, действующая в радиальном направлении, полукольца полого цилиндра вычисляется как [59]:

$$F = \frac{\pi \cdot D \cdot S \cdot \gamma}{4} \cdot \Omega^2 \cdot r_{цм} \cdot k_\sigma^2,$$

где k_σ — коэффициент угонной частоты вращения (коэффициент безопасности, как правило, выбираемый равным 1,2.)

Механическое напряжение на центробежный разрыв отдельного полого цилиндра:

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Радиальное давление внутреннего полого цилиндра на внешний коаксиальный полый цилиндр:

$$\sigma_{rad} = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot h_{цил}},$$

где D — внешний диаметр внутреннего цилиндра (равный внутреннему диаметру внешнего полого цилиндра той же осевой длины).

Максимальное относительное удлинение отдельного полого цилиндра:

$$\varepsilon = \frac{F}{E \cdot S},$$

где E — модуль Юнга материала соответствующего полого цилиндра. Например, для стали марки 30ХГСА эта величина равна 210 ГПа, для углепластика *UM 46-12K F202* компании «*Toho Tenax Co., Ltd*», Япония-420 ГПа [60].

Увеличение внешнего радиуса:

$$\Delta R = \frac{D}{2} \cdot \varepsilon.$$

По предыдущей формуле необходимо рассчитать значения увеличений внутреннего радиуса внешнего (углеволоконного) и внешнего радиуса внутреннего (стального) полых цилиндров. Необходимым граничным условием непроскальзывания полых цилиндров относительно друг друга, является бóльшая величина увеличения внешнего радиуса внутреннего цилиндра, чем внутреннего радиуса внешнего цилиндра. При использования внешнего полого цилиндра (бандажа) с бóльшим модулем Юнга и меньшей плотностью (сопоставимой со ступицей массой), это условие, как правило, выполняется. В случае, когда бандаж в разы тяжелее ступицы, возможно проскальзывание.

Фиксирование шпонкой или шлицевым соединением углеволоконного бандажа и ступицы невозможно. Применяется посадка с натягом.

Удлинение длины окружности полого цилиндра под собственными растягивающими центробежными усилиями:

$$\Delta l = \pi \cdot D \cdot \varepsilon.$$

Окружная жесткость полого цилиндра (Н/м):

$$C = \frac{F}{\Delta l}.$$

Для полых цилиндров маховиков с большой площадью сечения S , жесткость является значительной по порядку величины, удобнее измеряемой в тоннах силы на микрон (тс/мкм).

Исходя из граничного условия неразрывности общих стенок полых коаксиальных цилиндров, развернутые по окружности полые цилиндры можно представить прямоугольными брусками с общей жесткостью, равной сумме жесткостей каждого бруска по отдельности:

$$C_m = \sum C.$$

Суммарная, растягивающая параллельно соединённые бруски, сила, складывается из растягивающей каждый отдельный брусочек силы:

$$F_m = \sum F.$$

Одинаковое абсолютное удлинение окружностей полых цилиндров с общей стенкой (композитного маховика), вычисляется как:

$$\Delta l_m = \frac{F_m}{C_m}.$$

При этом относительное удлинение композитного маховика с внутренним диаметром внешнего (углеволоконного) полого цилиндра $d_{y\phi}$ по окружности:

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{\pi \cdot d_{y\phi}}{\pi \cdot d_{y\phi} + \Delta l_m}.$$

Фактическая механическая напряжённость на разрыв каждого полого цилиндра под действием центробежных сил вычисляется как:

$$\sigma_\phi = \varepsilon_m \cdot E.$$

Запас прочности каждого полого цилиндра с учетом угонной частоты вращения:

$$k_{зан} = \frac{\sigma_m}{\sigma_\phi},$$

где σ_m — предел текучести (для хрупких закалённых сплавов и углепластика предел прочности) выбранного для каждого полого цилиндра конструкционного материала. Например, для стали марки 30ХГСА равный 834 МПа, для углепластика *UM 46* равный 3667 Мпа [61]. Условием надёжной работоспособности маховика является $k_{зан} > 2$ (на угонной частоте вращения).

Абсолютное «разбухание» маховика в радиальном направлении, необходимое для расчёта фактического остаточного зазора между ротором и внешним статором, рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta R_m = \frac{D_{м-внеш}}{2} \cdot \varepsilon_m.$$

Максимальная удельная энергия (Дж/кг), запасаемая маховиком ЭМН, и предельная окружная скорость (м/с), полностью определяются всего двумя параметрами материала маховика: прочностью σ_m и плотностью γ :

$$W_{уд} = \frac{\sigma_m}{2 \cdot \gamma \cdot k_\phi^2},$$

$$V_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_m}{2 \cdot \gamma \cdot k_\phi^2}},$$

для стального маховика равные 36 МДж/т и 200 м/с, для углеволоконного — 800 МДж/т и 900 м/с, соответственно. Сплошной маховик из углеволокна технически труднореализуем, поскольку работающий на кручение и изгиб вал может быть только стальным. Комбинация большого углеволоконного полого цилиндра с узким стальным валом неработоспособна, поскольку под действием центробежных сил, находящийся на периферии углеволоконный полый цилиндр увеличивается в радиальном размере больше вала и начинает проскальзывать. Для композитных маховиков со стальной ступицей и

углеволоконным бандажом, предельные значения будут находиться в диапазоне между ними, ближе к значению стали: 80 МДж/т и 600 м/с.

Расчет номинальной мощности мотор-генератора ЭМН.

Необходимый номинальный механический момент мотор-генератора определяется как [62]:

$$M_n = \frac{a_\tau \cdot J_M}{2},$$

где a_τ — угловое ускорение маховика при изменении частоты вращения на Δn за время Δt :

$$a_\tau = \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot \frac{\Delta n}{\Delta t}.$$

Необходимая номинальная мощность мотор-генератора определяется моментом инерции маховика J_M и временем его разгона Δt до номинальной частоты вращения n :

$$P_{Mz} = \frac{J_M \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}\right)^2}{2 \cdot \Delta t}.$$

Функция разгона маховика до номинальной частоты вращения мотор-генератором задаётся как:

$$n(t) = \frac{60 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{Mz} \cdot t}{J_M}}}{2 \cdot \pi}.$$

По данной функции было построено семейство кривых, представленных на рисунке 3.4: для номинальной, двукратной и половинной мощностей.

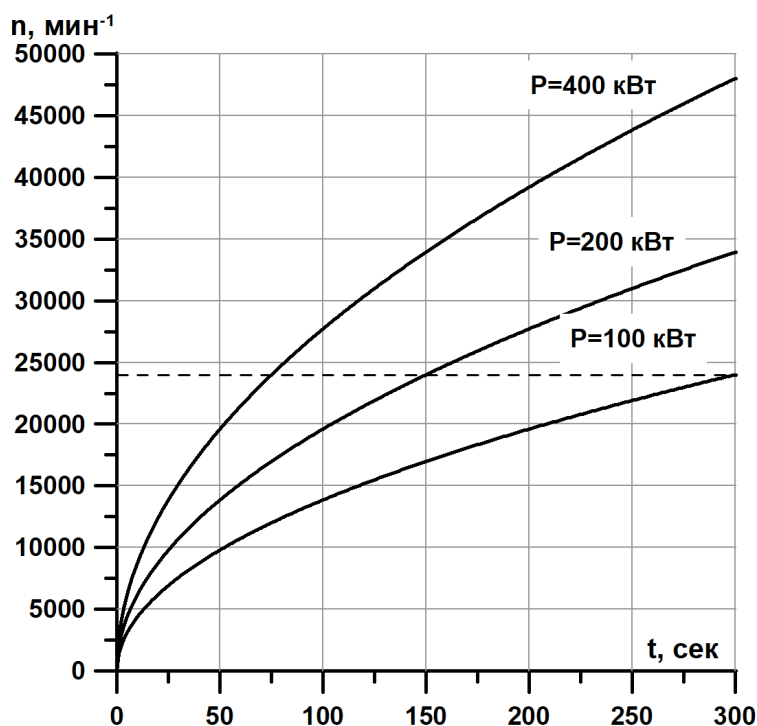


Рисунок 3.4 — Время разгона (и торможения) маховика до заданной частоты вращения мотор-генераторами различной мощности

Из графика видно, что мотор-генератор мощностью 200 кВт обеспечивает разряд запасенной энергии от частоты вращения $n = 24000 \cdot \text{мин}^{-1}$ до нуля за заданное время $t = 150 \cdot \text{с}$. Медленный разгон маховика с рассчитанным моментом инерции за время $t = 300 \cdot \text{с}$ до номинальной частоты вращения $n = 24000 \cdot \text{мин}^{-1}$, может быть обеспечен мотор-генератором с потребляемой мощностью 100 кВт. При максимальной частоте вращения, разряд КНЭ до нуля за заданное время $t = 75 \cdot \text{с}$, может быть обеспечен мотор-генератором мощностью 400 кВт. Это значение максимальной мощности разряда КНЭ, которое может быть выдано при допустимой плотности тока.

Мотор-генератор должен обладать минимальными потерями в режиме хранения энергии. Мотор-генератор должен обладать высокой перегрузочной способностью и, в случае необходимости, кратковременно развить двухкратную мощность. По основному расчетному уравнению (формуле Арнольда) оцениваются размеры активной зоны, и его основные параметры

[63]. После этого строится расчетная геометрическая модель, и производится уточняющий численно-аналитический расчет.

Расчет прочности вала ЭМН. Ещё одним важным конструктивным элементом электромеханического преобразователя вращающегося типа, является вал. С целью уменьшения массы вала, повышения его жёсткости на кручение и изгиб, как правило, применяют полые валы, массу и момент инерции которого можно вычислить по формулам, представленным в предыдущем разделе. В связи с трудностью изготовления полого вала значительной длины, вал может быть и сплошным. Чаще всего, во избежание ослабления сечения шпонками или шлицами, вал вытачивается из единой поковки легированной стали зацело с дисковым ребром и полым цилиндром ступицы. Для магнитных подвесов, в которых ферромагнитный вал одновременно является ярмом магнитной системы, его предпочтительнее делать сплошным.

Основным условием работоспособности является превышение предельным критическим моментом номинального механического момента [64]:

$$M_n = \frac{P_2}{\Omega}, \quad M_n = \frac{P_2}{\Omega \cdot \eta} < \frac{\pi}{16} \cdot d_s^3 \cdot \frac{\tau_T}{k_s},$$

где $\tau_T \approx 0,5 \cdot \sigma_T$ — предел текучести материала вала при кручении ~ 834 МПа для стали 30ХГСА, k_s — коэффициент запаса прочности вала, для машин общепромышленного изготовления может приниматься равным 10-20, для специальных облегчённых машин — 5. Отсюда диаметр сплошного вала круглого сечения может быть выражен как:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_n \cdot k_s}{\frac{\pi}{\sqrt{3}}}}$$

Ниже изложена методика расчёта для полых валов. При расчёте сплошного вала, можно приравнять внутренний диаметр полого вала $d_g = 0$.

Внешний диаметр полого вала D_e , неизменный по всей осевой длине, выбирается из ряда размеров стандартных подшипников или бесконтактных опор. В случае применения бесконтактных опор, диаметр вала выбирается по расчётам их необходимых усилий, радиальных и осевых жёсткостей.

Для расчёта внутреннего диаметра полого вала d_b формула имеет вид [65]:

$$d_b = \frac{\sqrt[4]{D_e^4 \cdot \left(\frac{\pi}{\sqrt{3}}\right)^4 \cdot \tau_T^4 - 16 \cdot M_n \cdot k_s \cdot D_e \cdot \left(\frac{\pi}{\sqrt{3}}\right)^3 \cdot \tau_T^3}}{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \tau_T}.$$

где D_e — задаваемый внешний диаметр полого вала.

Реальное касательное напряжение на поверхности вала, которое необходимо сравнить с допустимым для данного материала τ_T :

$$\tau_e = \frac{16 \cdot M_n \cdot k_s \cdot D_e}{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot (D_e^4 - d_e^4)}.$$

Для расчёта прочности вала на жёсткость кручения, необходимо выбрать граничное условие допустимого угла закручивания вала на метр его осевой длины:

$$\phi' = 2 \frac{\text{град}}{\text{м}}$$

Модуль упругости второго рода (модуль сдвига) имеет вид [66]:

$$G_e = \frac{E_e}{2 \cdot (1 + \nu)},$$

где E_e — модуль Юнга материала вала, $\nu = 0,24$ — коэффициент Пуассона.

С учётом выбранных ограничений и свойств конструкционного материала, внутренний диаметр полого вала из условия жёсткости может быть вычислен как:

$$d_{вж} = \frac{\sqrt[4]{D_e^4 \cdot \left(\frac{\pi}{\sqrt{3}}\right)^4 \cdot G_e^4 \cdot \phi'^4 - 32 \cdot M_n \cdot k_s \cdot \left(\frac{\pi}{\sqrt{3}}\right)^3 \cdot G_e^3 \cdot \phi'^3}}{\frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot G_e \cdot \phi'}.$$

При сравнении величин полученных внутренних диаметров полого вала по условиям прочности d_b и жесткости $d_{вж}$ на кручение, из них выбирается меньшее значение (с большей стенкой полого вала).

Толщина стенки полого вала и площадь продольного сечения полого вала вычисляются соответственно:

$$\delta_g = \frac{D_g - d_g}{2},$$

$$S_g = \pi \cdot \left(\frac{D_g^2 - d_g^2}{4} \right).$$

Масса вала при этом вычисляется как:

$$m_g = S_g \cdot h_g \cdot \gamma_g.$$

Полная масса ротора, состоящая из массы маховика и массы вала, необходимая для последующего расчёта суммарной требуемой грузоподъёмности опор, и вычисляются соответственно:

$$m_r = m_m + m_g,$$

$$F_{опор} = m_r \cdot g.$$

При расположении маховика с вертикальной осью вращения, масса ротора сжимает вал в осевом направлении. Эта осевая нагрузка на вал может быть вычислена как:

$$\sigma_{ос} = \frac{F_{опор}}{S_g}.$$

Как правило, площадь продольного сечения вала S_g выбирается по условию жёсткости на кручение, и при этом осевое напряжение вала оказывается пренебрежительно мало.

Относительное сжатие вала может быть вычислено как:

$$\varepsilon_g = \frac{\sigma_{ос}}{E_g}.$$

Для расчёта валов с горизонтальной осью вращения и расчёта собственных критических резонансных частот, необходимо провести расчёт валов на изгиб.

Основным параметром, определяющим прочность балок разнообразных форм поперечного сечения, является их полярный момент инерции. Для полого вала (кольца), полярный момент инерции на изгиб и кручение соответственно, является справочными величинами [67]:

$$J_{p-u} = \frac{\pi \cdot D_6^4}{64} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_B}{D_6} \right)^4 \right],$$

$$J_{p-\kappa} = \frac{\pi \cdot D_6^4}{32} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_B}{D_6} \right)^4 \right].$$

Жесткость вала на изгиб [68]:

$$C_{\epsilon-u} = \frac{48 \cdot E_6 \cdot J_{p-u}}{L_{опор}^3}.$$

Статический прогиб вала при горизонтальной оси вращения маховика под действием силы тяжести массивного ротора:

$$h_{снг} = \frac{F_{опор}}{C_{\epsilon-u}}.$$

Реальный угол закручивания, который необходимо сравнить с условием ϕ' :

$$\phi'_\epsilon = \frac{M_n \cdot k_s}{G_6 \cdot J_{p-\kappa}}.$$

При эксплуатации ЭМН необходимо знать собственные резонансные частоты вращения ротора. Как правило, для массивных маховиков с длинным валом, собственная резонансная частота сравнительно мала (меньше номинальной частоты вращения). Таким образом, при проектировании необходимо: либо значительно увеличить жесткость вала на изгиб с целью её выведения выше за пределы эксплуатационных частот вращения, либо точно вычислять и при разгоне быстро проходить эту опасную частоту (и кратные ей) за малое время, не допуская критического значения увеличения амплитуды резонансных колебаний ротора. В любом случае, номинальная частота вращения маховика в режиме хранения энергии, должна отличаться от резонансной не менее чем в 1,3 раза.

Собственная критическая резонансная частота ротора вычисляется как:

$$n_{\text{крит}} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{e-u}}{m_r}}$$

Пример расчёта ЭМН с запасаемой энергией 30 МДж. В качестве примера, по приведённой выше методике был проведён расчет ЭМН. Перспективными для применения в малой авиации, являются ЭМН с запасаемой энергией не менее 30 МДж и временем разряда 150 секунд [69]. Сектор расчётного эскиза показан на рисунке 3.5

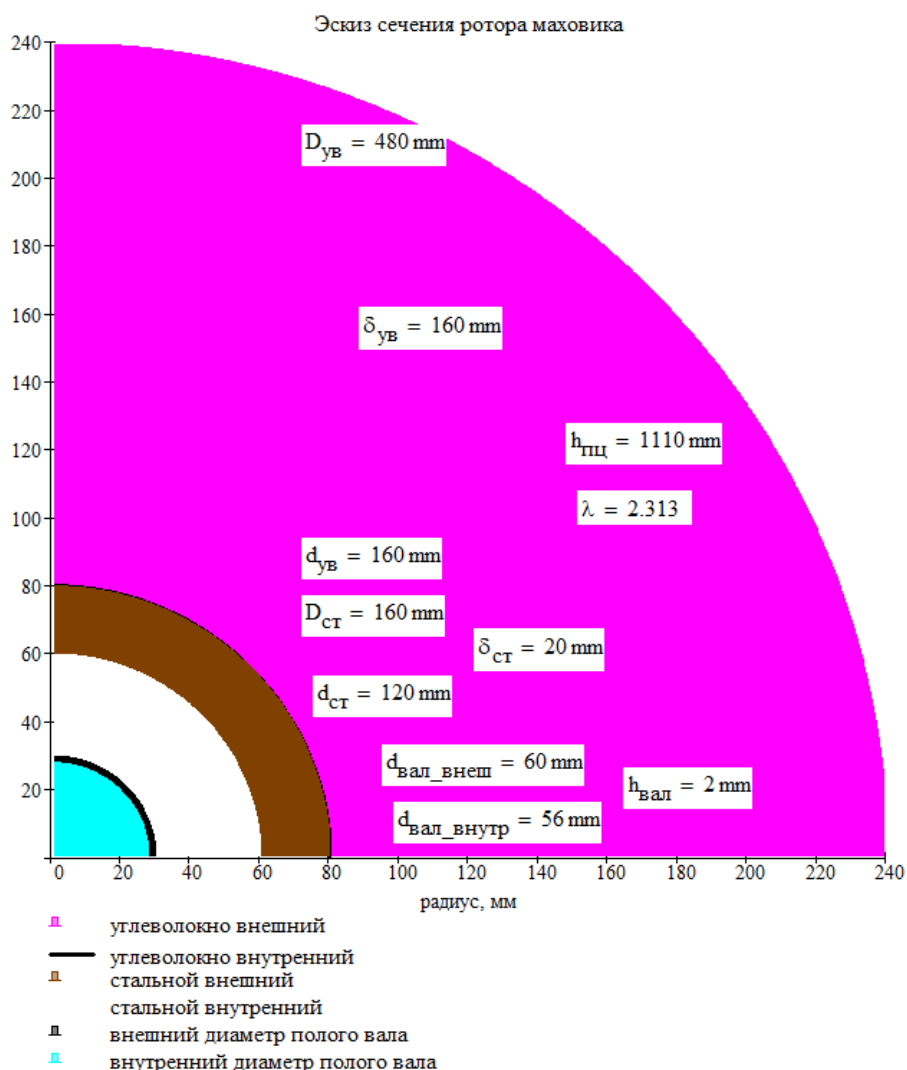


Рисунок 3.5 — Расчётный эскиз маховика ЭМН (поперечное сечение)

Полученные результаты расчета по аналитической методике показаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1 — Сводные результаты аналитического расчёта маховика ЭМН с запасаемой энергией 30 МДж

Параметр	обозн.	ед. изм.	ступица	бандаж	маховик
Внешний диаметр полого цилиндра	D	мм	160	480	480
Внутренний диаметр полого цилиндра	d	мм	120	160	120
Толщина стенки полого цилиндра	δ	мм	20	160	180
Осевая длина маховика	h	мм	1110	1110	1110
Масса полого цилиндра	m	кг	76,65	285,7	362,3
Момент инерции	J	кг*м ²	0,3832	9,141	9,525
Запасаемая энергия вращения	W	МДж	1,21	28,87	30,08
Номинальная окружная скорость	V	м/сек	175,9	402,1	603,2
Центробежная сила полукольца	F	тс	911,3	10960	11880
Механическое напряжение на разрыв	σ_r	МПа	402,6	605,4	-
Относительное удлинение	ϵ	%	0,1917	0,1441	-
Удлинение внешнего радиуса	ΔR	мм	0,115	0,1153	0,1768
Удлинение окружности	Δl	мм	0,7227	1,359	1,273
Жесткость обода на разрыв	C	тс/мкм	1,261	8,071	9,332
Предел прочности материала	σ_m	МПа	834	3667	-
Плотность материала	γ	кг/м ³	7800	1600	4725
Удельная энергия	$W_{y\delta}$	МДж/т	36,89	795,79	83,025
Максимальная окружная скорость	V_{max}	м/сек	192,067	892,07	723,823

С целью подтверждения правильности представленной аналитической методики расчёта в программе численного моделирования *COMSOL Multiphysics* был проведён расчет. Значения полученных удельных усилий хорошо совпадают с результатами аналитического расчёта. Подтверждён двукратный запас прочности при угонной частоте вращения.

После этого был разработан макет маховика и проведены расчетные исследования прочностных характеристик маховика в широком диапазоне оборотов и толщин бандажа [70].

В настоящее время для расчёта механической прочности тел сложной формы применяется численное моделирование в специализированных пакетах прикладных программ. Численный расчёт основан на методе конечных элементов, при котором объекты сложной формы разбиваются расчётной сеткой на элементарные геометрические тела (конечные элементы). Для

каждого конечного элемента выполняется численное решение уравнений теории упругости. В данном случае для расчёта маховика ЭМН на механическую прочность используется пакет Ansys Mechanical 12.1. [71]

При разработке методики принимаемые допущения:

- исследуемые тела считаются непрерывными (сплошными). При этом атомистическая структура вещества или наличие каких-либо пустот не учитывается.
- начальное напряженное (деформированное) состояние тела, возникшее до приложения силовых воздействий, не учитывается, т. е. предполагается, что в момент нагружения тела деформации и напряжения в любой его точке равны нулю.
- тела считаются однородными, т.е. состав тела одинаков во всех точках.
- считается, что механические свойства материала одинаковы по всем направлениям (изотропны). Кристаллы металла не обладают таким свойством, но для металла в целом, состоящего из большого числа мелких кристаллов, можно считать, что эта гипотеза справедлива. Для материалов, обладающих различными механическими свойствами в разных направлениях, как, например, для слоистых пластиков, разработана теория упругости ортотропных и анизотропных материалов.
- исследуемые тела считаются идеально упругими. Предполагается полное исчезновение деформации после снятия нагрузки.
- зависимость между составляющими деформациями и напряжениями линейная. Предполагается, что относительные линейные и угловые деформации малы по сравнению с линейными размерами тел.

При решении задач теории упругости используют теорему о единственности решения. Положение о единственности решения справедливо, если только справедливы допущение о естественном состоянии тела (иначе возможно бесчисленное количество решений) и допущение о линейной зависимости между деформациями и внешними силами [72].

При решении задач теории упругости часто пользуются принципом Сен-Венана: если внешние силы, приложенные на небольшом участке упругого тела, заменить действующей на том же участке статически эквивалентной системой сил (имеющей тот же главный вектор и тот же главный момент), то эта замена вызовет лишь изменение местных деформаций.

3.1.1 Расчётные исследования прочностных характеристик маховиков КНЭ

Ниже рассматриваются две модели маховика ЭМН:

- двухслойный маховик (диск из алюминиевого сплава, труба из конструкционной стали),
- трёхслойный маховик (диск из алюминиевого сплава, труба из конструкционной стали, бандаж из углеволокна).

Исследование механической прочности однослойного маховика ЭМН. На рисунке 3.7, а, б показан эскиз маховика ЭМН с запасаемой энергией 5 МДж.

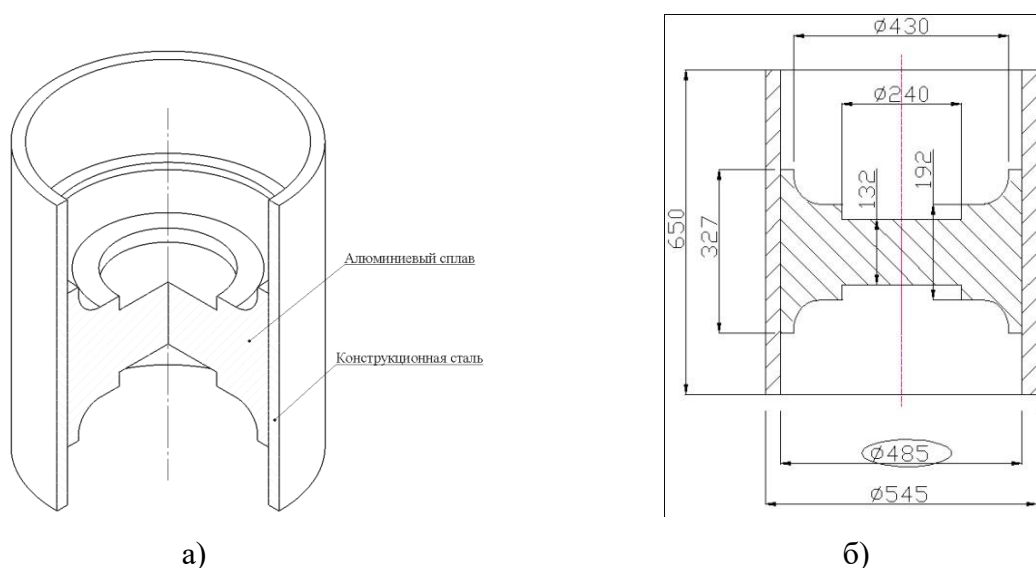


Рисунок 3.7 – Маховик ЭМН

а) эскиз маховика КНЭ; б) эскиз с размерами элементов конструкции маховика

Маховик представляет собой стальную трубу, закрепленную на центральном диске сложной формы. Диск выполняется из высокопрочного алюминиевого сплава (Д16), труба из конструкционной стали.

Геометрическая модель исследуемого маховика строится в программе Autocad (см. рисунок 3.7а) и транслируется в формат SAT для дальнейшего импорта в расчётный модуль Ansys_Mechanical. Задача решается (см. рисунок 3.8, б) в осесимметричной постановке, oY – ось вращения.

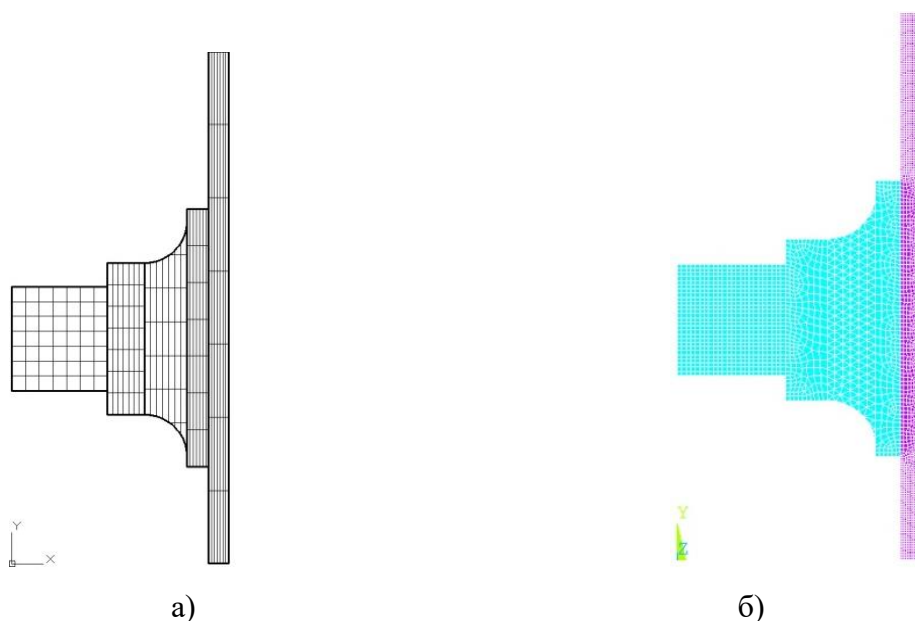


Рисунок 3.8—Элементы геометрической модели маховика

а) подготовка геометрии маховика в Autocad, б) расчётная сетка в Ansys Mechanical

Для подготовки расчётной сетки (см. рисунок 3.8, б) был выбран плоский элемент PLANE82, который может использоваться как для задач в плоскопараллельной постановке, так и для задач в осесимметричной постановке. Считаем, что наружная стальная оболочка механически не связана со сплошным внутренним диском, т.е. стальная оболочка может свободно перемещаться относительно диска - данная задача называется контактной [73]. Для её решения необходимо применение специальных элементов, описывающих контакт двух тел - элемент CONTA175 и CONTA176 для целевой и контактной поверхности [74].

Механические и физические свойства материалов маховика, принимаемые в расчёте, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2-Свойства материалов

Материал	Модуль Юнга E [МПа]	Коэффициент Пуассона	Плотность ρ [кг/м ³]	Предел текучести $\sigma_{0.2}$ [МПа]	Предел прочности σ_B [МПа]
Конструкционная сталь (30)	$2 \cdot 10^5$	0,3	7850	350	450
Алюминиевый сплав (Д16)	$0,72 \cdot 10^5$	0,33	2800	300	400
Графитоволокно	$4,5 \cdot 10^5$	0,3	1600	1500	4500

Исследование представленного маховика ЭМН проводилось для диапазона частот вращения 6000 – 8000 об/мин с шагом 250 об/мин. Эквивалентное напряжение по Мизесу, применяемое к пластичным материалам, как критерий оценки прочности, рассчитывается по формуле [75]:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2)]} \quad (35)$$

В результате расчёта была получена картина напряжённого и деформированного состояния исследуемого маховика. На рисунке. 3.9 а, б. показана первая расчётная точка - для частоты вращения 6000 мин⁻¹. Из рисунков видно, что при вращении маховика происходит отслоение наружной стальной оболочки от тела диска. При этом максимальные напряжения приходятся на внутреннюю поверхность стальной оболочки и составляют 222 МПа. В диске наиболее нагруженной является его центральная часть, однако величина напряжений в нём не более 110 МПа при 8000 мин⁻¹, что даёт запас прочности 2,7.

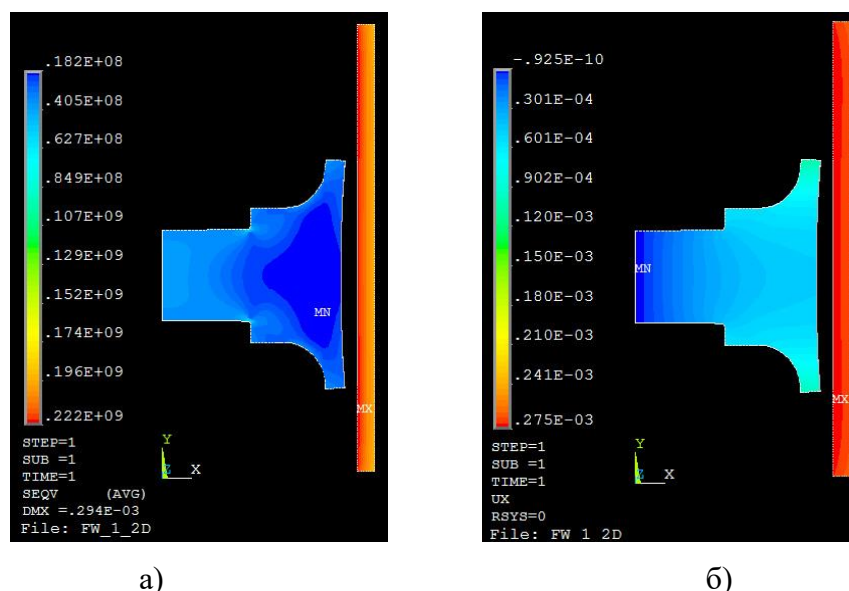


Рисунок 3.9 –Результаты моделирования

- а) картина напряжённого состояния маховика (размерность в Паскалях);
 б) картина деформации маховика в радиальном направлении (размерность в метрах)

Величину радиального перемещения (вдоль оси X) оболочки и диска, а также величину "ухода" оболочки от диска можно определить из графиков рисунка 3.10, б. Для оболочки расчеты выполнены на её внутренней поверхности вдоль линии между точками 3 и 4 (см. рисунок 3.10, а), для диска - на его наружной поверхности - линия между точками 1 и 2 (см. рисунок 3.10, а). Из графиков видно, что максимальное перемещение наружной трубы составляет $\sim 0,275$ мм, а перемещение диска $\sim 0,1$ мм, при этом максимальный "уход" трубы от диска составляет $\sim 0,225$ мм. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что при данной конструкции маховика стальная оболочка должна устанавливаться на диск с натягом $\sim 0,2 - 0,25$ мм, чтобы предотвратить отслоение от поверхности диска.

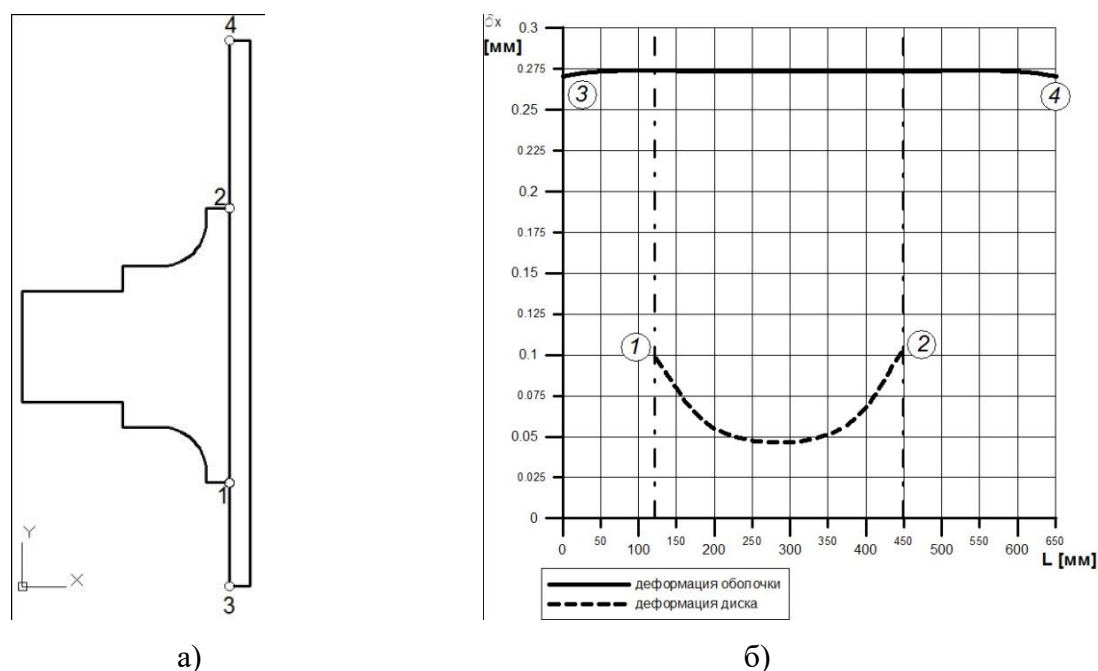


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования

- а) положение точек, приведённых на графиках деформации и напряжения;
 б) радиальные перемещения оболочки и диска (для частоты 6000 мин^{-1})

Исходя из рисунка 3.9 б и рисунка 3.10 б можно сказать о форме деформированного состояния алюминиевого диска и цилиндра: для диска характерен изгиб наружной поверхности и максимальное перемещение на торцах в точках 1 и 2 - данный эффект является следствием "ступенчатой" формы диска.

Для наружной трубы картина деформации практически линейна по всей внутренней поверхности. Аналогичные зависимости для расчётных точек 7000 мин^{-1} и 8000 мин^{-1} приведены на графиках рисунок 3.11, а, б. Для частоты вращения 7000 мин^{-1} максимальный "уход" диска от оболочки составляет $\sim 0,31 \text{ мм}$, для частоты 8000 мин^{-1} - $0,4 \text{ мм}$.

Механические напряжения на внутренней поверхности трубы между точками 3 и 4 практически одинаковы по всей длине (см. рисунок 3.12).

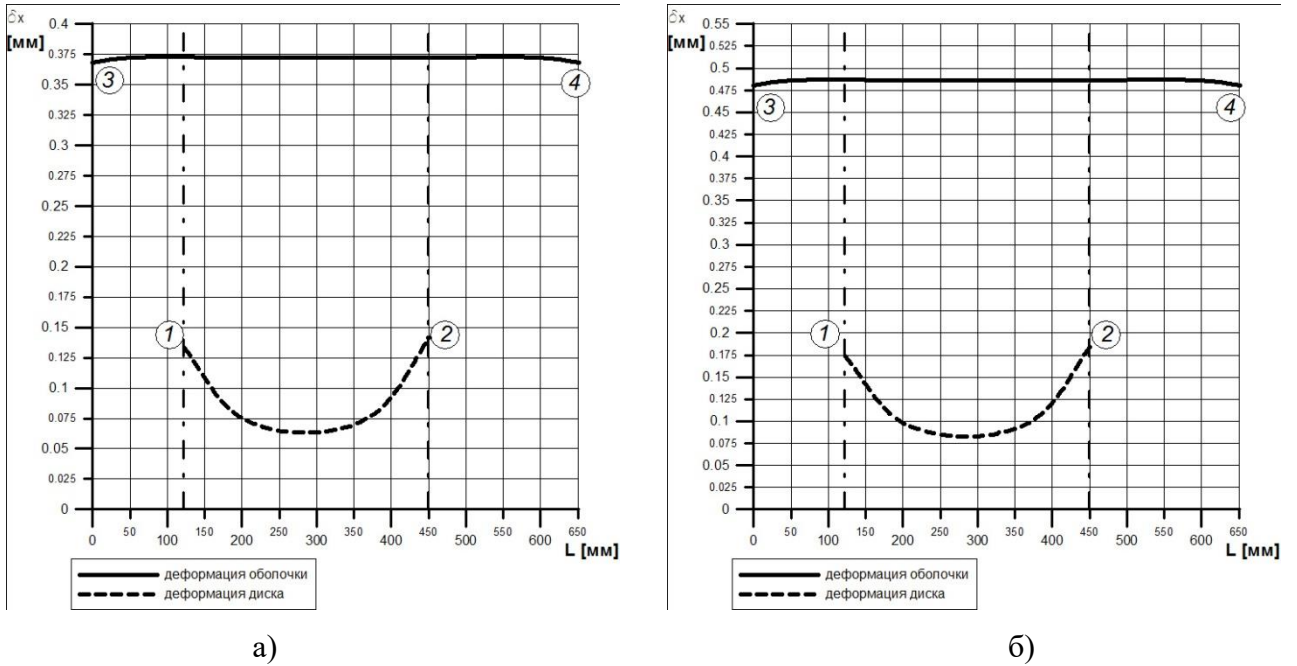


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования

а) радиальные перемещения оболочки и диска (для частоты 7000 min^{-1})

б) радиальные перемещения оболочки и диска (для частоты 8000 min^{-1})

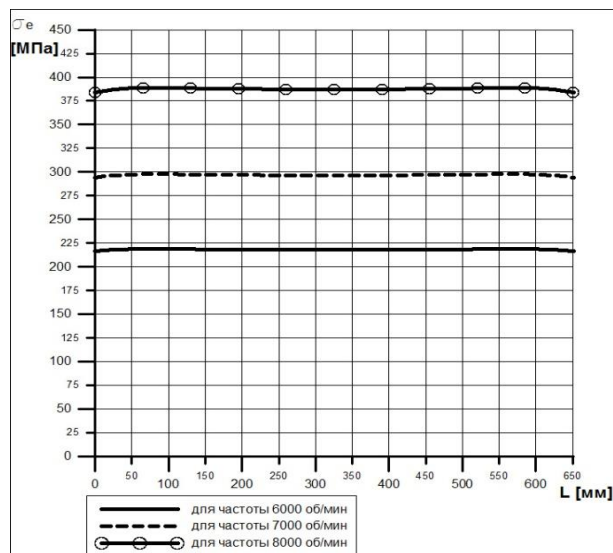


Рисунок 3.12– Распределение механических напряжений на внутренней поверхности трубы

Наиболее нагруженной частью маховика в данной конструкции является наружная труба, поэтому на графиках (см. рисунок 3.13) для неё приведены

максимальные значения механических напряжений и перемещений в зависимости от частоты вращения. В общем случае можно сказать, что для данной конструкции маховика начиная с частоты вращения 7500 мин^{-1} будет достигнут предел текучести для заданных материалов. Это значит, что в диапазоне скоростей вращения $7500 - 8000 \text{ мин}^{-1}$ будет происходить необратимая пластическая деформация, что не допустимо. Максимальный коэффициент запаса прочности - $1,57$ - при 6000 мин^{-1} .

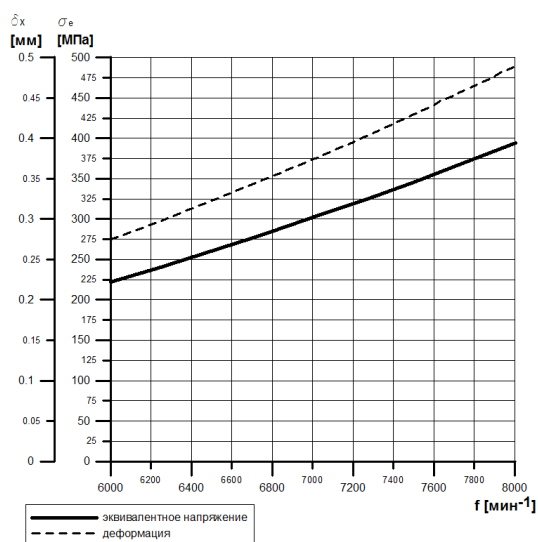


Рисунок 3.13 – Зависимость максимального значения напряжения и деформации от частоты вращения

3.1.2 Исследование механической прочности двухслойного маховика ЭМН.

Из полученных выше результатов можно сделать вывод, что наиболее нагруженной частью двухслойного маховика является наружная стальная оболочка. Заданный предел текучести $\sigma_{0,2}=350 \text{ МПа}$ был достигнут при частоте вращения 7500 мин^{-1} . Для дальнейшего повышения частоты вращения и запасаемой энергии маховика необходимо снизить механические напряжения в наружной трубе. Этого можно достичь с помощью применения наружного бандажа, выполненного из высокопрочного материала - например материала на основе графитового волокна [76]. На рисунке 3.14 показан эскиз конструкции такого маховика.

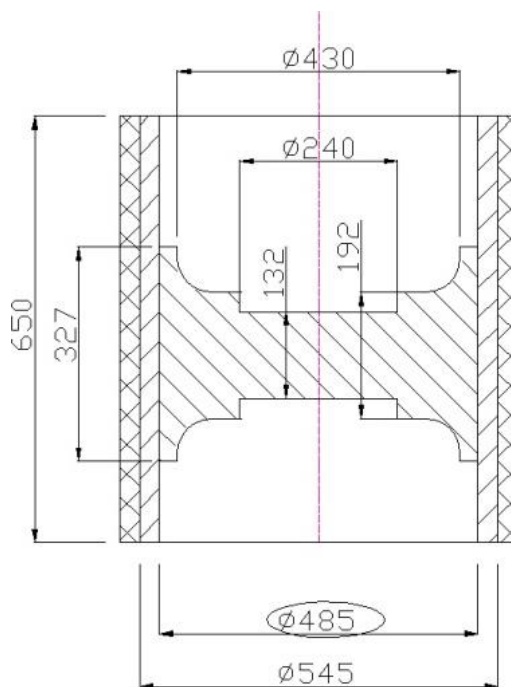


Рисунок 3.14 – Эскиз двухслойного маховика ЭМН

Расчёт выполняется, как и в предыдущем случае для диапазона скоростей 6000 - 8000 мин⁻¹с шагом 250 мин⁻¹. Толщина бандажа выбирается равной 10 мм, 20 мм и 25 мм. Подход к решению данной задачи в целом аналогичен, однако отличительной особенностью является наличие двух контактных поверхностей: диск - труба, труба - силовая оболочка. Механические свойства материалов приведены в таблице 3.2.

Геометрическая модель трехслойного маховика, созданная в Autocad и её представление в расчётном модуле Ansys Mechanical показана на рисунке 3.15 а, б, в. Как и в предыдущем случае задача решается в осесимметричной постановке. С целью повышения точности расчёта для наиболее напряжённых деталей конструкции - стальная труба и силовая оболочка из графитоволокна выбран уменьшенный размер расчётных элементов PLANE82 — 2,5 мм для области 2 и 1,25 мм для области 3, для области 1 задан переменный размер элементов 5 - 10 мм.

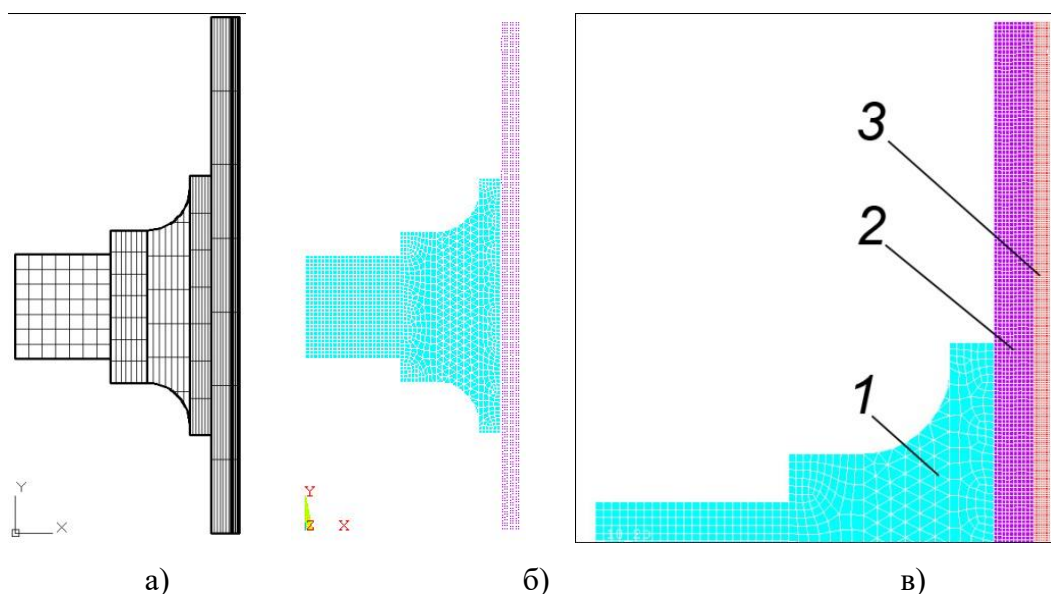


Рисунок 3.15 – Геометрическая модель трехслойного маховика
 а) подготовка геометрии маховика в Autocad; б) расчётная сетка в Ansys Mechanical; в) увеличенное изображение

Результат решения для расчётных точек 6000 мин^{-1} при толщине силового бандажа 10 мм, 20 мм и 25 мм представлен на рисунках 3.15-3.17. Видно, что максимальные напряжения приходятся на силовой бандаж из графитоволокна, при этом величина радиальных перемещений стальной трубы и, как следствие, напряжения в ней уменьшились. Силовой бандаж играет роль "разгрузочного" компонента для стальной трубы, ограничивая её перемещение и снижая напряжения в ней. Для данной конструкции маховика, как и в предыдущем случае, наблюдается "уход" стальной трубы от поверхности диска. Величины радиальных перемещений элементов конструкции маховика вдоль отрезков 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6 (см. рисунок 3.16) представлены на графиках рисунка 3.18, а – е и рисунка 3.19, а – в. На рисунке 3.20, а – в и таблицах 3.3 – 3.6 представлены зависимости напряжений и перемещений для силовой оболочки (бандажа из углеволокна) от частоты вращения.

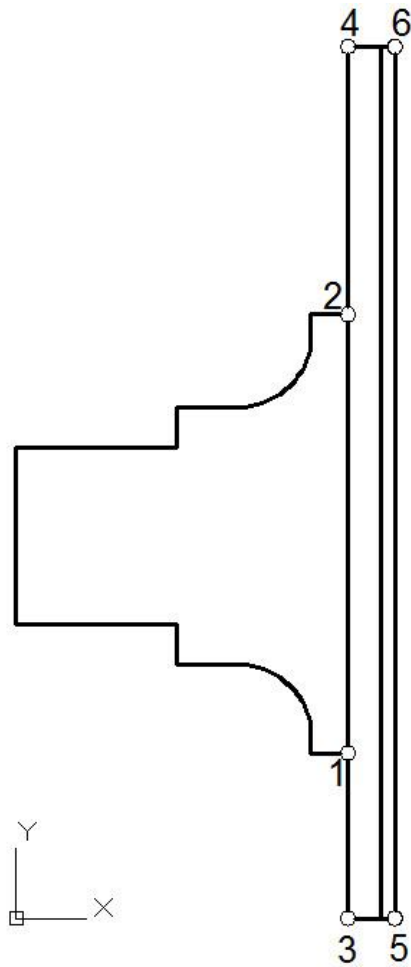


Рисунок 3.16–Положение точек, приведённых на графиках деформации и напряжения

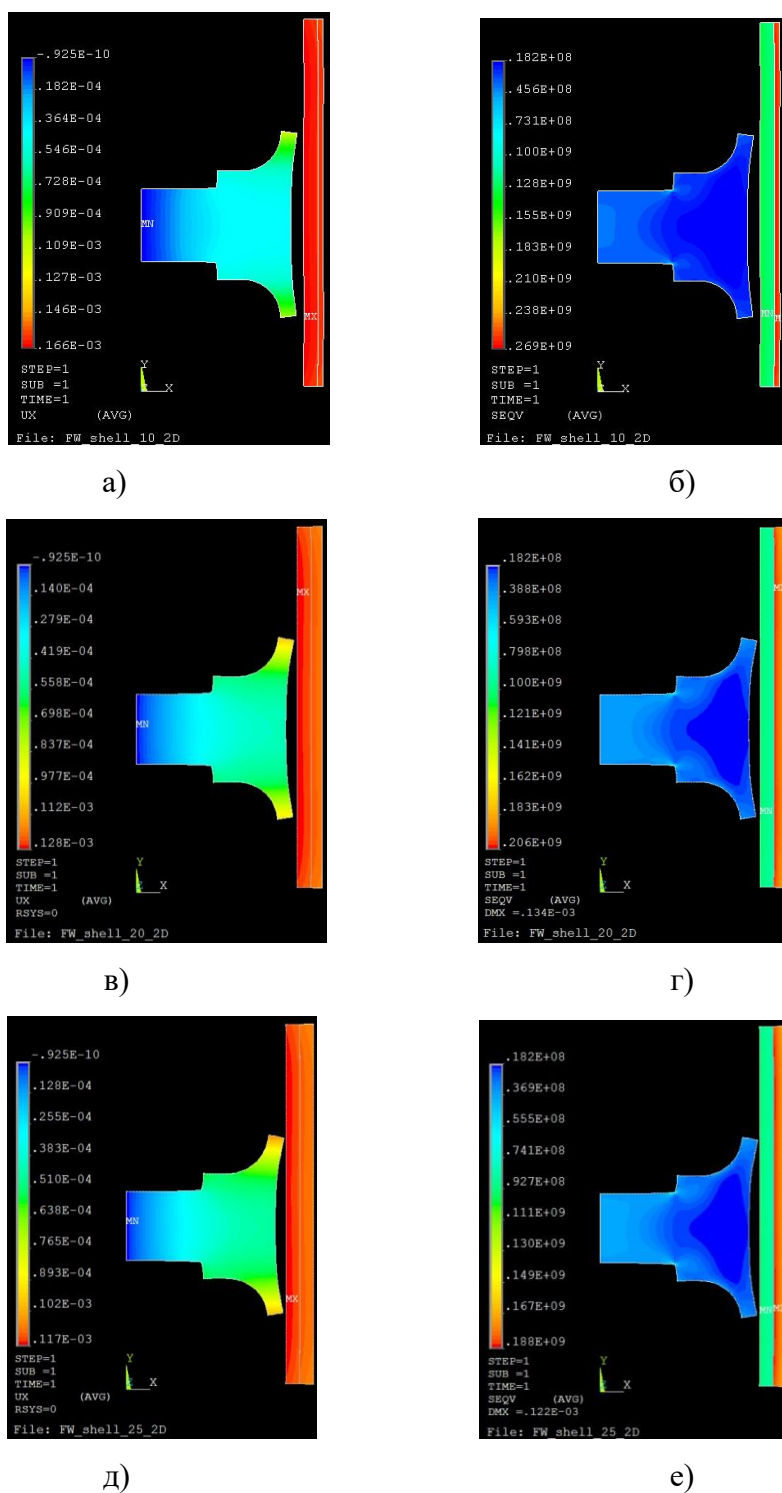
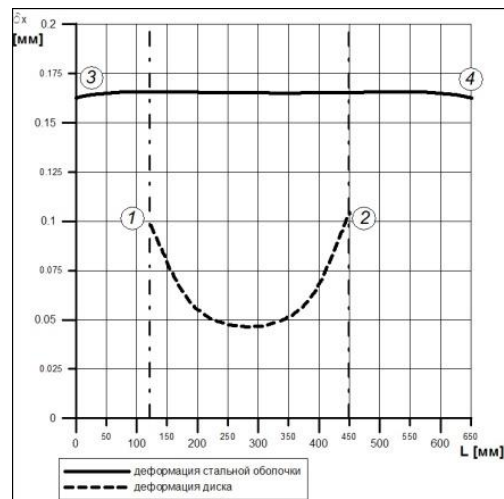


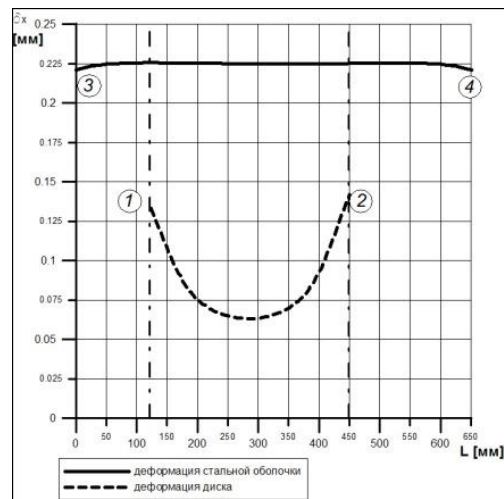
Рисунок 3.17– Картина напряжённого и деформированного состояния

двухслойного маховика ЭМН (для 6000 мин^{-1})

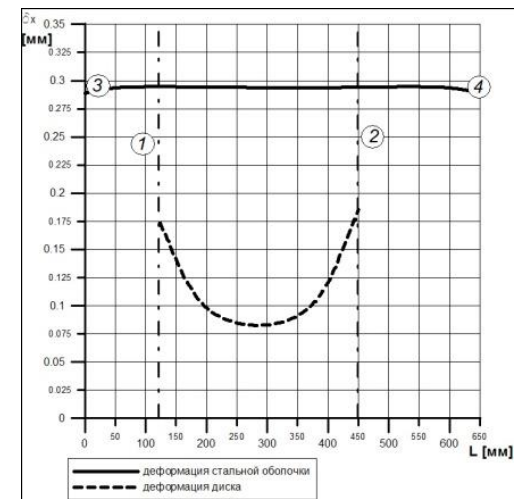
- а) радиальные перемещения [м] (бандаж 10 мм) б) напряжения [Па] (бандаж 10 мм)
 в) радиальные перемещения [м] (бандаж 20 мм) г) напряжения [Па] (бандаж 20 мм)
 д) радиальные перемещения [м] (бандаж 25 мм) е) напряжения [Па] (бандаж 25 мм)



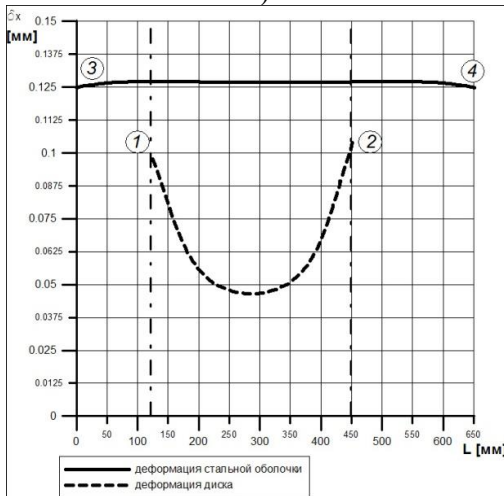
а)



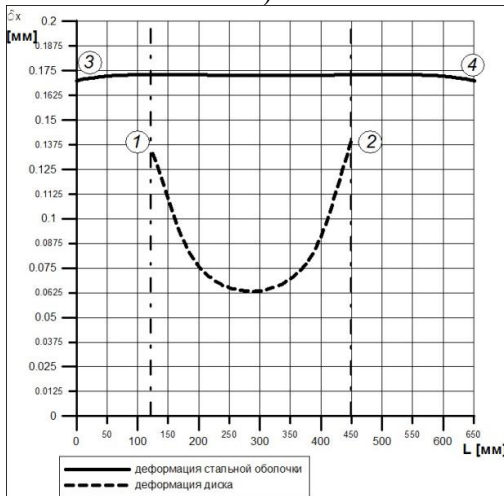
б)



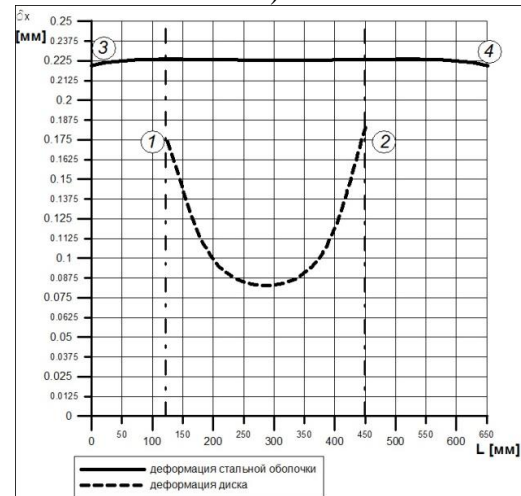
в)



г)



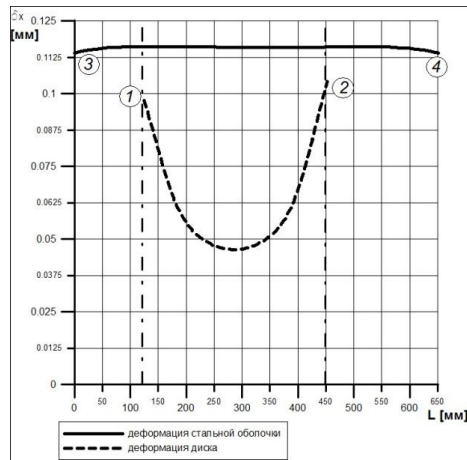
д)



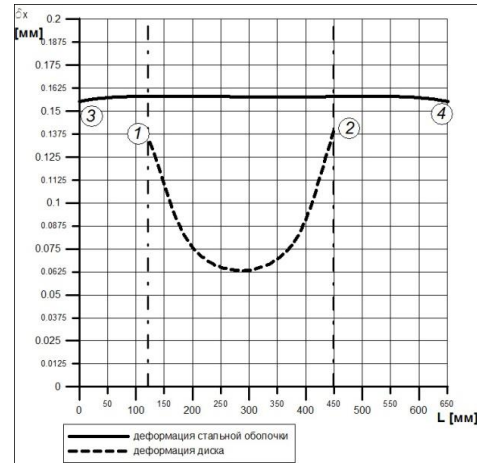
е)

Рисунок 3.18– Радиальные перемещения стальной оболочки и диска

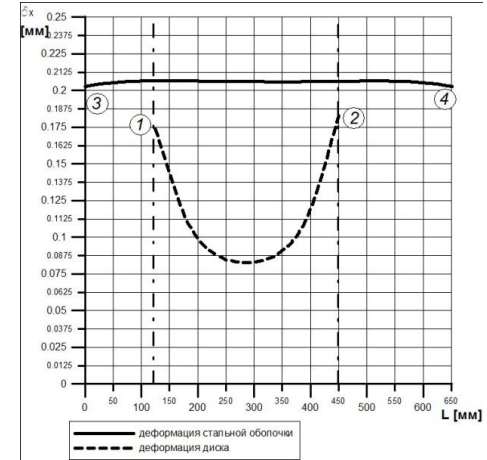
а) для частоты 6000 мин^{-1} (бандаж 10 мм); б) для частоты 7000 мин^{-1} (бандаж 10 мм); в) для частоты 8000 мин^{-1} (бандаж 10 мм); г) для частоты 6000 мин^{-1} (бандаж 20 мм); д) для частоты 7000 мин^{-1} (бандаж 20 мм); е) для частоты 8000 мин^{-1} (бандаж 20 мм)



а)



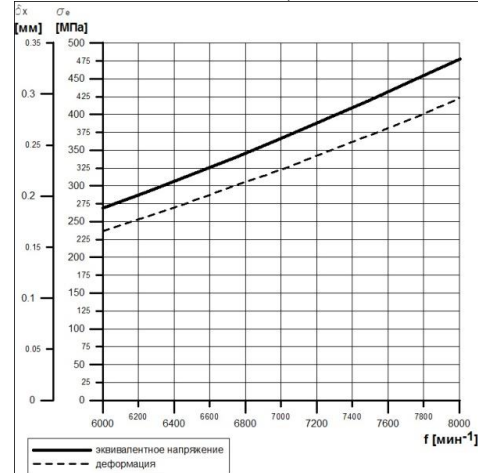
б)



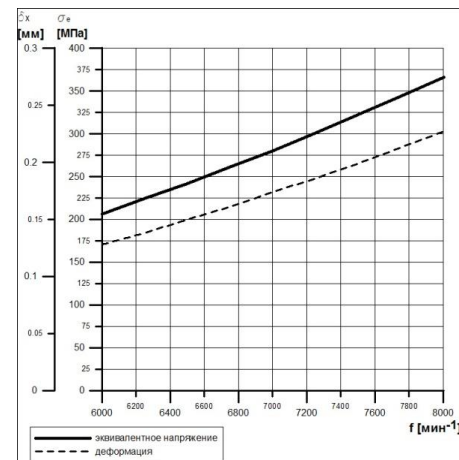
в)

Рисунок 3.19– Радиальные перемещения стальной оболочки и диска

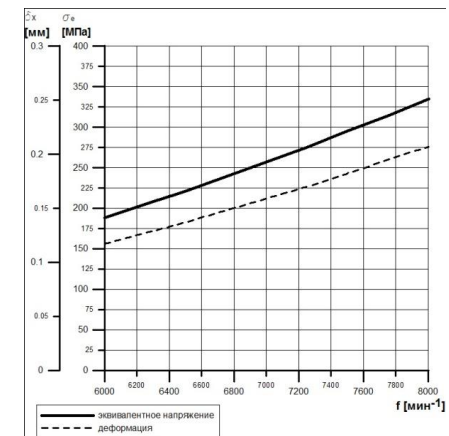
а) для частоты 6000 мин^{-1} (бандаж 25 мм); б) для частоты 7000 мин^{-1} (бандаж 25 мм); в) для частоты 8000 мин^{-1} (бандаж 25 мм)



а)



б)



в)

Рисунок 3.20 – Зависимость максимального значения напряжения и деформации силовой оболочки от частоты вращения

а) бандаж 10 мм; б) бандаж 20 мм; в) бандаж 25 мм

Таблица 3.3 – Результат расчёта однослойного маховика ЭМН

Частота вращения		Максимальное напряжение оболочки [МПа]	Максимальная радиальная деформация оболочки [мм]	Коэффициент запаса прочности
мин ⁻¹	рад/с			
6000	628,3	222	0,275	1,57
6250	654,5	240	0,298	1,45
6500	680,7	260	0,323	1,34
6750	706,9	280	0,348	1,25
7000	733	302	0,374	1,16
7250	759,2	323	0,401	1,08
7500	785,4	346	0,43	1,01
7750	811,6	370	0,459	0,94
8000	837,7	394	0,489	0,88

Таблица 3.4 – Результат расчёта двухслойного маховика ЭМН с бандажом 10 мм

Частота вращения		Максимальное напряжение силовой оболочки [МПа]	Максимальное напряжение стальной трубы [МПа]	Максимальная радиальная деформация силовой оболочки [мм]	Коэффициент запаса прочности
мин ⁻¹	рад/с				
6000	628,3	269	132	0,166	2,65
6250	654,5	292	143	0,180	2,44
6500	680,7	316	155	0,195	2,25
6750	706,9	340	167	0,211	2,09
7000	733	366	179	0,226	1,95
7250	759,2	393	192	0,243	1,82
7500	785,4	420	206	0,26	1,69
7750	811,6	449	220	0,277	1,59
8000	837,7	478	234	0,296	1,49

Таблица 3.5 – Результат расчёта двухслойного маховика ЭМН с бандажом
20 мм

Частота вращения		Максимальное напряжение силовой оболочки [МПа]	Максимальное напряжение стальной трубы [МПа]	Максимальная радиальная деформация силовой оболочки [мм]	Коэффициент запаса прочности
мин ⁻¹	рад/с				
6000	628,3	206	101	0,128	3,46
6250	654,5	224	110	0,138	3,18
6500	680,7	242	118	0,15	2,96
6750	706,9	261	128	0,161	2,73
7000	733	280	137	0,174	2,55
7250	759,2	301	147	0,186	2,38
7500	785,4	322	158	0,199	2,21
7750	811,6	344	169	0,213	2,07
8000	837,7	366	180	0,227	1,94

Таблица 3.6 – Результат расчёта двухслойного маховика ЭМН с бандажом
25 мм

Частота вращения		Максимальное напряжение силовой оболочки [МПа]	Максимальное напряжение стальной трубы [МПа]	Максимальная радиальная деформация силовой оболочки [мм]	Коэффициент запаса прочности
мин ⁻¹	рад/с				
6000	628,3	188	92	0,117	3,8
6250	654,5	205	100	0,127	3,5
6500	680,7	221	108	0,137	3,24
6750	706,9	239	117	0,148	2,99
7000	733	257	126	0,159	2,77
7250	759,2	275	135	0,17	2,59
7500	785,4	295	144	0,182	2,43
7750	811,6	314	154	0,195	2,27
8000	837,7	335	164	0,207	2,13

По результатам расчётных исследований можно сделать следующие рекомендации:

1. Расчёты показывают целесообразность применения силового бандажа из графитоволокна, т.к. при этом можно существенно снизить напряжения в стальной трубе маховика, а значит увеличить номинальную частоту вращения и величину запасаемой энергии. При наличии бандажа в исследуемом диапазоне

частот вращения ни в одной расчётной точке не был достигнут предел текучести для заданных материалов.

2. При отсутствии бандажа из графитоволокна максимальная частота вращения для исследуемой конструкции ограничена 7500 мин^{-1} .

На основании анализа полученных результатов для проектирования маховика может быть выбран вариант с толщиной стальной трубы 30мм и бандажом 25мм. Масса такого маховика с центральным диском составляет ~600кг.

Для обеспечения нормального контакта центральный диск устанавливается в стальную трубу с натягом 0,25мм.

Рациональная конструкция маховика может быть следующей:

- вал маховика выполнен из нержавеющей стали 12X18H10T;
- равнонапряженный диск из алюминиевого сплава Д-16 запрессованный на вал;
- кольцо из стали 12X18H10T, закрепленное на диске;
- углеволоконный бандаж из нити UMS45, намотанный на наружное кольцо. Намотка осуществлялась с предварительным натягом, а также с пропиткой эпоксидным связующим [77].

3.2 Выбор и расчет ВТСП подшипников

Основными потерями в ЭМН являются потери на трение в опорах и трение ротора о воздух. Из этих соображений опоры для ЭМН рекомендуется делать бесконтактными. Существует несколько конструкций таких опор: ВТСП подшипник, магнитный подвес, электромагнитные опоры [78].

В зависимости от исполнения ЭМН (горизонтального или вертикального) используются различные типы опор или их комбинации.

ВТСП подшипник может работать как в радиальном, так и в осевом направлении, причем у ВТСП подшипника жесткость в осевом направлении больше, чем в радиальном направлении [79].

Вертикальное исполнение ЭМН предпочтительнее так как в этом случае масса маховика сможет удерживаться магнитной опорой на основе постоянных магнитов, а в радиальном направлении маховик фиксируется ВТСП подшипниками или электромагнитными подшипниками. Если масса маховика достаточно мала, то возможно осевое удержание маховика только за счет ВТСП подшипников, как это реализовано в ЭМН фирмы Siemens [80]. При экстремально малом весе маховика возможно применение игольчатых подшипников с сапфировым подпятником [81].

В горизонтальном исполнении маховик удерживается только ВТСП подшипниками или электромагнитными подшипниками, что приводит к необходимости увеличения их радиальной жесткости, а, следовательно, увеличению габаритов подшипников, что ведет к значительному удорожанию и усложнению подшипниковых опор.

Если сравнивать между собой ВТСП подшипник и электромагнитный подшипник, то главным минусом электромагнитного подшипника является его конструктивная сложность и сложность аппаратуры регулирования [82].

Минусом ВТСП подшипника является необходимость использования системы криогенного охлаждения ВТСП элементов подшипника и обеспечение минимизации теплопритоков к ним. Так же минусом ВТСП подшипника является время захолаживания подшипника до рабочей температуры (для ВТСП подшипника, рассчитанного для маховика массой 600 кг и при использовании в конструкции ЭМН дополнительно осевого магнитного подвеса, время захолаживания составляет 60 минут).

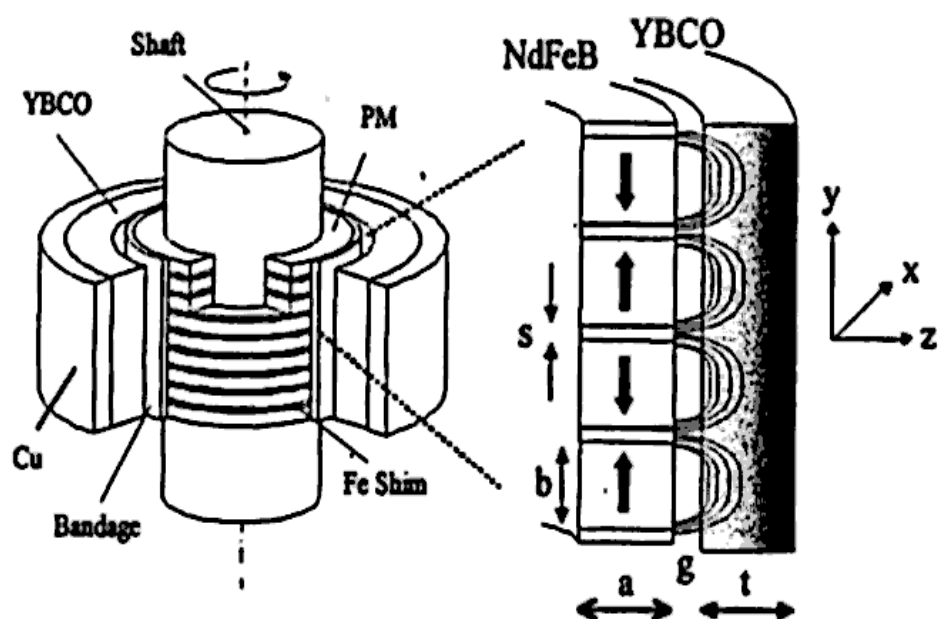


Рисунок 3.21 – Конструкция ВТСП подшипника фирмы Siemens

Как видно из рисунка 3.21, на вращающейся части (роторе) расположены неодимовые постоянные магниты. На неподвижной части (статоре) установлены массивные ВТСП элементы. Магниты ротора установлены встречно в аксиальном направлении, а между магнитами установлены пластины из ферромагнитного материала. Таким образом, силовые магнитные линии проходят через воздушный зазор в сверхпроводящий статор и при переходе сверхпроводника в сверхпроводящее состояние, сверхпроводник «захватывает» магнитное поле от магнитов. Статор ВТСП подвеса представляет собой криостат с установленными в нем массивными СП элементами на медной подложке (для охлаждения), а также вакуумной полости для минимизации теплопритоков к ВТСП элементам. ВТСП подвес обладает жесткостью в радиальном и в осевом направлении. Основные достоинства ВТСП подвеса:

- отсутствие потерь на трение;
- низкий уровень вибраций;
- способность к самоцентрированию;
- работа без смазки.

Электромагнитный подшипник состоит из статора и ротора (см. рисунок 3.22). Как правило, статор состоит из электромагнитов, а ротор из постоянного

магнита. Система управления по данным с датчиков управляет токами в обмотках электромагнитов, тем самым регулируя конфигурацию магнитного поля в зазоре между ротором и статором и направление результирующей силы со стороны магнитного поля статора на ротор (см. рисунок 3.23) [83]. Таким образом, поддерживается постоянный воздушный зазор между ротором и статором [84].



Рисунок 3.22 – Статор магнитного подшипника и его ротор

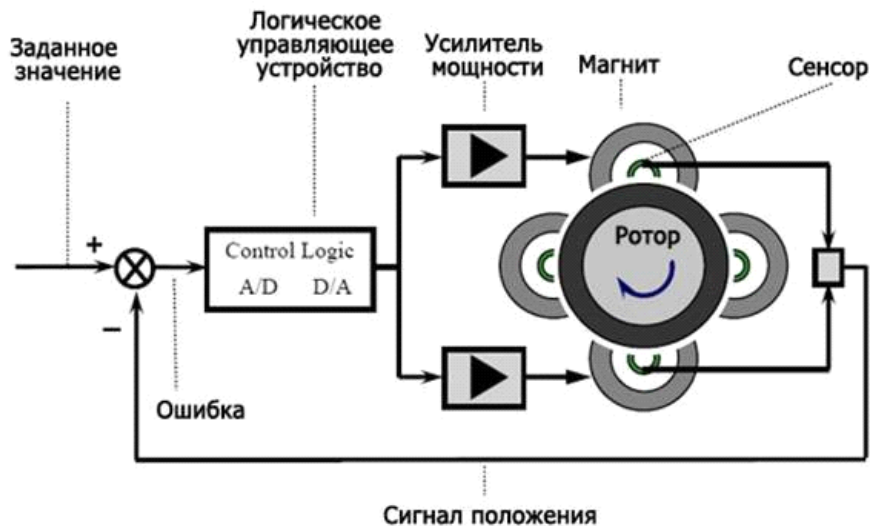


Рисунок 3.23 – Принципиальная схема управления электромагнитным подшипником

Рассматриваемый в работе ВТСП подвес представляет собой цилиндрические подвесы, расположенные в верхней и нижней части маховика. ВТСП подвес необходим чтобы жестко закрепить ось вращения маховика в

вертикальном положении, сохранять равномерный зазор между вращающимися и статическими частями ЭМН, а также демпфировать радиальные колебания маховика. Общий вид ВТСП опоры ЭМН приведен на рисунке 3.24. Он включает в себя ротор и статор, которые в рабочем положении удерживаются магнитными силами.

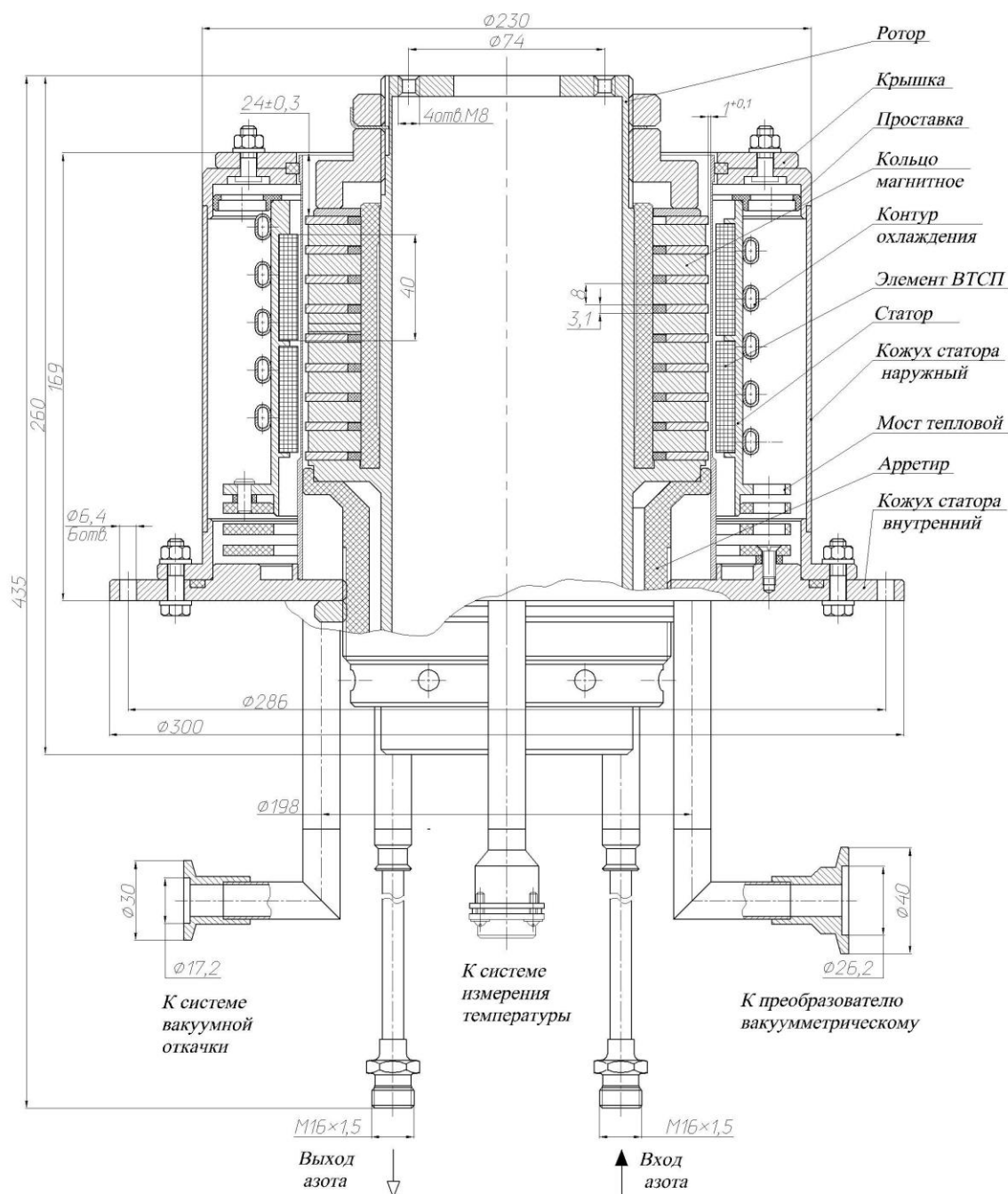


Рисунок 3.24 — Общий вид макета магнитного подвеса

Ротор ВТСП подвеса закреплен на валу маховика. На роторе установлены кольцевые Ne-Fe-B магниты. Между магнитными кольцами находятся пластины из магнитомягкого материала (Сталь 10). Магниты и пластины склеены между собой эпоксидным клеем [85]. Соседние кольца намагничены параллельно оси вращения, навстречу друг другу.

Статор состоит из вакуумного кожуха с экранно-вакуумной изоляцией, выполненного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, кольцевого медного цилиндра с ВТСП элементами и тепловых мостов, предназначенных для распределения тепловых потоков от ВТСП элементов (см. рисунок 3.24). Охлаждение ВТСП элементов осуществляется путем прокачки жидкого азота через медные трубки, намотанные и припаянные к медному цилиндру (позиция «контур охлаждения» см. рисунок 3.24).

Проведенные расчеты показали, что разработанный подвес (с диаметром ротора 150 мм и высотой 120 мм) обеспечивает вертикальную жесткость 1500 Н/мм и радиальную жесткость 800 Н/м [86].



Рисунок 3.25 – Узлы магнитного ВТСП подвеса

Основным назначением ротора является формирование необходимой конфигурации магнитного поля в магнитном ВТСП подвесе и обеспечение его свободного вращения во внутренней цилиндрической полости статора.

Предварительно на основе расчетных и экспериментальных исследований были определены рациональные геометрические размеры ротора: диаметр и толщина магнитов и шимов. Шимы, выполненные в виде кольцевых проставок из магнитомягкой стали вместе с кольцами из сплава Nd-Fe-B обеспечивают формирование магнитного поля и его азимутальную равномерность. Последняя чрезвычайно важна с точки зрения отсутствия дополнительного тепловыделения в металлической оболочке статора [87].

С целью определения качества выравнивания магнитного поля с помощью шимов по азимуту производилось измерение радиальной и осевой составляющих магнитного поля на различных расстояниях от шима (см. рисунки 3.27 и 3.28). Результаты измерений представлены в таблице 3.7.

Результаты измерений демонстрируют достаточно равномерное распределение поля по азимуту. Средняя неравномерность поля не превышает 1,5%, что меньше точности измерений, которая по оценке составляет не менее 5% (точность измерения прибора и точность установки датчика Холла магнитометра) при плотном поджатии кромки датчика Холла к магниту [88].

Величина неравномерности осевой составляющей по азимуту не превышает 5%, что находится в пределах погрешности измерений.

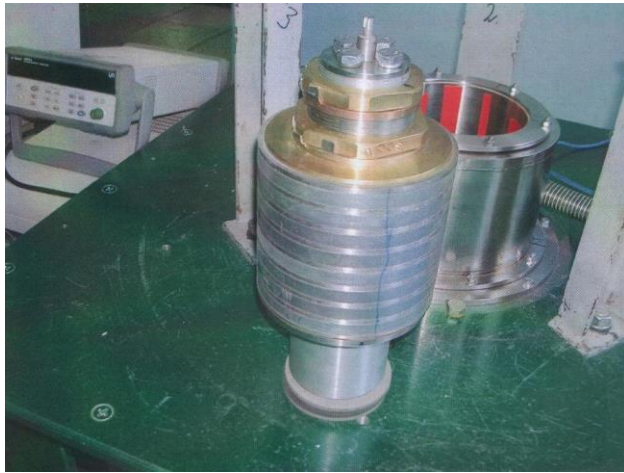


Рисунок 3.26 – Фотография ротора в сборе с технологическим валом



Рисунок 3.27 – Установка для измерения радиальной составляющей магнитной индукции на различных расстояниях от шима



Рисунок 3.28 – Установка для измерения осевой составляющей индукции магнитного поля над ротором

Таблица 3.7-Радиальная составляющей измерений магнитной индукции по длине ротора в сечениях А; В; С, расположенных под углом 120° на расстоянии 1,5мм и 3,2мм от боковой поверхности магнитного наконечника

		А; мТл	В; мТл	С; мТл
1	1,5 мм	400	421	420
	3,2 мм	220	255	291
2	1,5 мм	880	805	874
	3,2 мм	620	620	610
3	1,5 мм	780	798	803
	3,2 мм	532	520	532
4	1,5 мм	840	832	832
	3,2 мм	560	599	585
5	1,5 мм	774	772	789
	3,2 мм	536	536	555
6	1,5 мм	800	827	830
	3,2 мм	590	589	603
7	1,5 мм	780	781	807
	3,2 мм	532	547	538
8	1,5 мм	878	881	892
	3,2 мм	631	638	640
9	1,5 мм	465	465	460
	3,2 мм	316	314	316

В таблице 3.8 представлены величины осевой составляющей индукции магнитного поля на разных расстояниях от поверхности магнита. Эти данные важны для расчета жесткости системы.

Таблица 3.8-Осевая составляющая индукции магнитного поля на разных расстояниях от поверхности магнита

Расстояние от поверхности магнита, мм	Величина осевой составляющей индукции магнитного поля над серединой магнитов, мТл
0	591
0,5	504
1,0	468
1,5	405

Наиболее важной функцией ротора является обеспечение его свободного без касаний о статор вращения со скоростью до 8000 мин^{-1} при номинальной частоте вращения. Если погрешности в обеспечении необходимого распределения магнитного поля могут лишь несколько снизить предполагаемые характеристики, то касание ротора о статор может сделать невозможной дальнейшую эксплуатацию подвеса. Среднее расстояние от ротора до поверхности магнита – 1,5 мм.

Основными причинами касания, кроме эллипсности отверстия статора, являются эллипсность ротора и отклонение оси ротора от геометрической за счет дисбаланса.

С целью снижения биений наружного диаметра ротора производилась их дополнительная обработка шимов в собранном состоянии на технологическом валу. Вал устанавливался в центрах на станок IA62, для измерений использовался стрелочный индикатор с ценой деления 0,002 мм и удлиненным немагнитным щупом. Максимальное радиальное отклонение по результатам этих измерений составило, не более 0,14 мм [89].

Статические и динамические испытания ротора с технологическим валом производились следующим образом: ротор был установлен в центральное отверстие статора маломасштабного макета, так что край магнитов на 20 мм был выше края ВТСП-элементов. После захолаживания до температуры $T = 77\text{К}$ и откручивания арретиров ротор опустился на 0,17 мм. При массе ротора 18 кг это соответствовало осевой жесткости не менее 1000 Н/мм. Реальная жесткость с учетом четырех - пятикратного силового циклирования обычно на 15-20% выше первоначальной.

Далее были проведены динамические испытания ротора в составе маломасштабного макета подвеса. Ротор разгонялся до частоты вращения 6000 мин^{-1} , после чего механическая связь между ротором и приводным двигателем устранялась и ротор вращался в режиме свободного выбега.

Анализ зависимости показывает плавный характер торможения без фиксации участков очевидного притормаживания.

Полученные характеристики дают возможность заключить, что требования по обеспечению жесткости с помощью исследованного ротора выполнены.

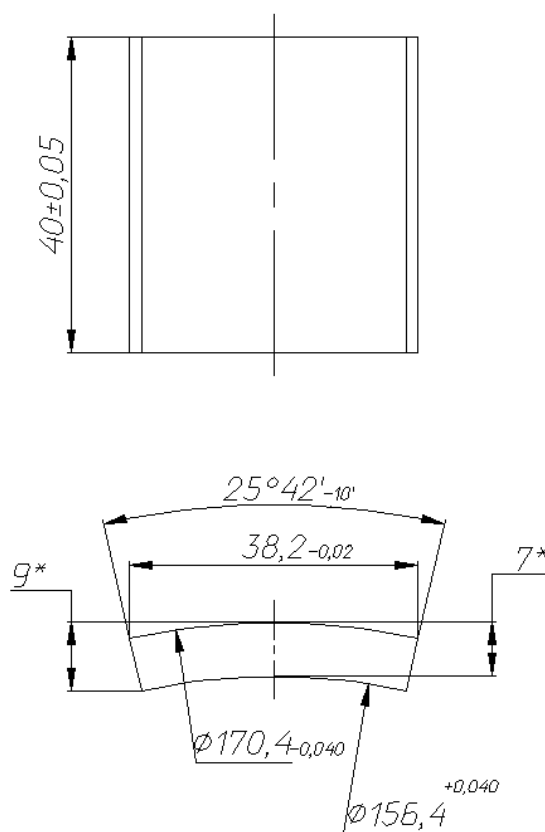


Рисунок 3.29-Чертеж ВТСП элемента для магнитного подшипника

Материалы для изготовления ВТСП опор и их первичный контроль были выполнены в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Требования к чистоте исходных материалов:

Y_2O_3 – не менее, 99,998 % основного вещества

Gd_2O_3 - не менее 99,998 % основного вещества,

$BaCO_3$ - ОСЧ 7-5 – не менее 99,5% основного вещества

CuO – ОСЧ 9-6 – не менее 99,9 % основного вещества,

Sm_2O_3 - 99,99 % основного вещества,

CeO_2 – не менее 99,99% основного вещества.

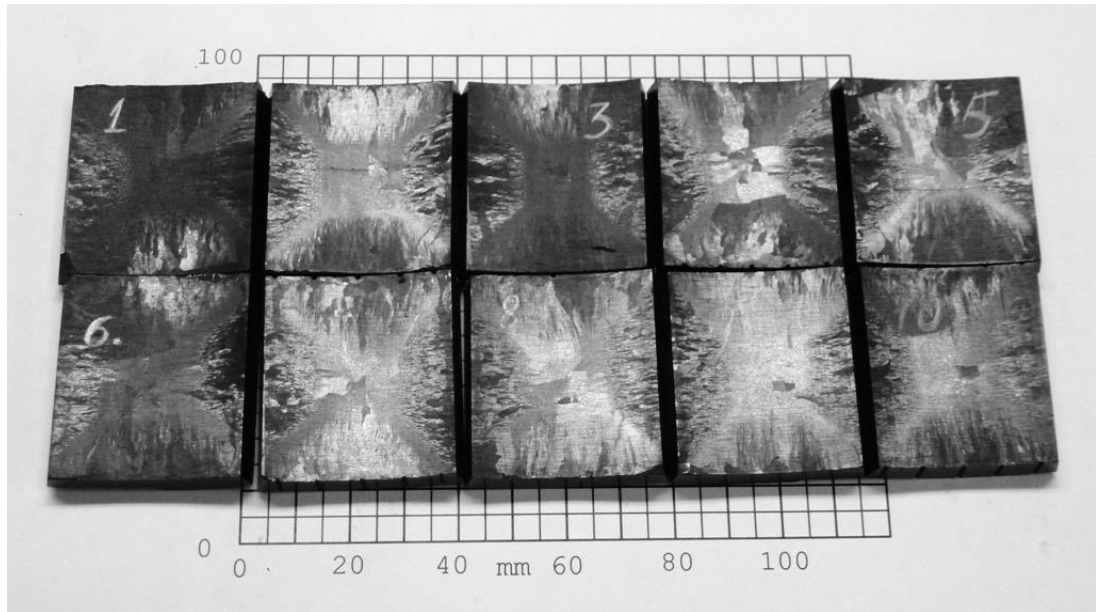


Рисунок 3.30-Партия готовых ВТСП элементов

Величина левитационной силы при зазоре между поверхностями образца и магнита 1 мм составила от 105 до 115 Н. Величина гистерезиса составляла порядка 0,25 Н. На рисунке 3.31 показана типичная графическая зависимость левитационной силы от расстояния для одного из образцов [90].

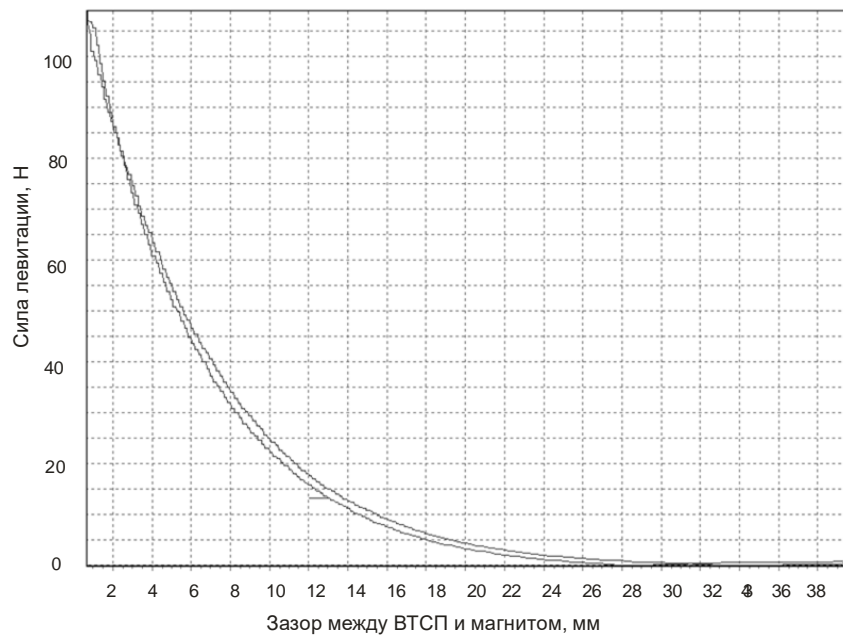


Рисунок 3.31-Зависимость силы левитации от расстояния между ВТСП пластиной и постоянным магнитом

3.3 Выбор и расчет магнитной опоры

Маховик удерживается осевой магнитной опорой (МО), которая состоит из статора и ротора. Конструкция обеих частей представляет собой стальную обойму и вклеенных в нее Nd-Fe-B магнитов. Обоймы с магнитами устанавливаются таким образом, чтобы намагниченность магнитов была встречной. Таким образом, опоры отталкиваются друг от друга и удерживают вес маховика. Рабочий зазор между статором и ротором МО составляет 2-4 мм. Для увеличения прочности обойма ротора МО дополнительно усилена углеволоконным бандажом.

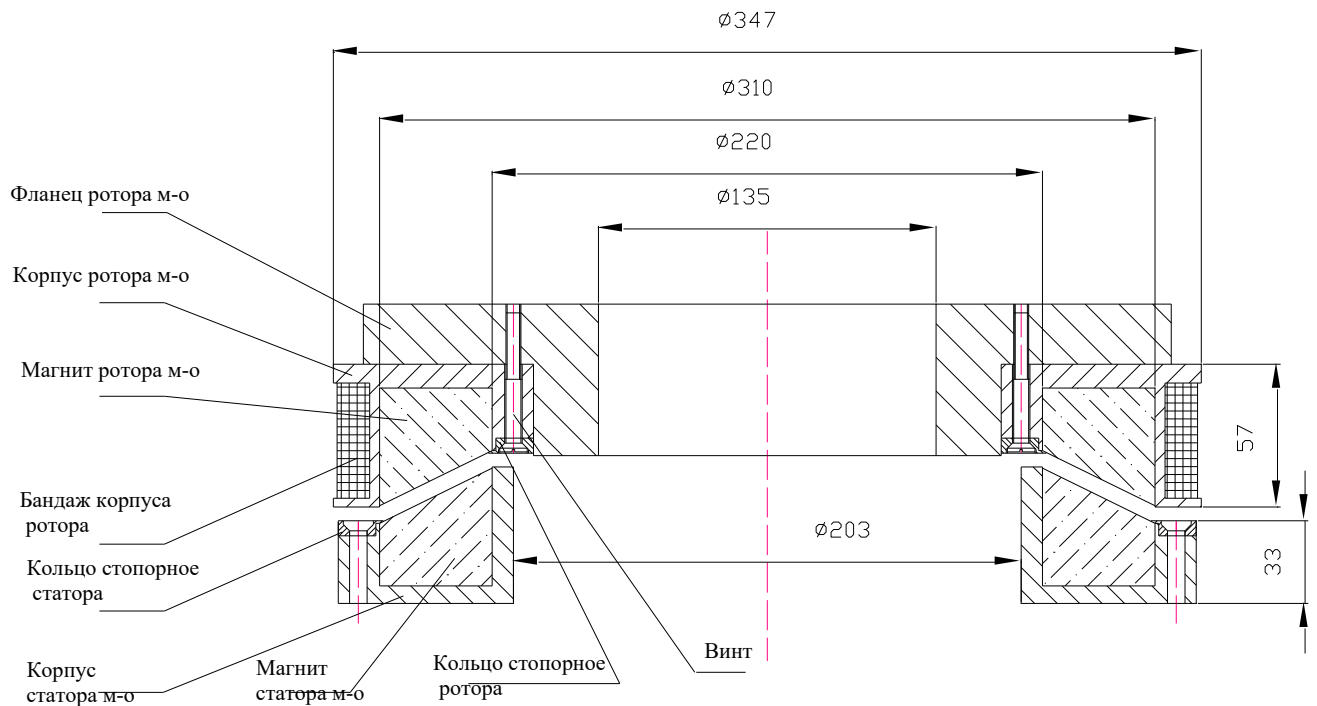


Рисунок 3.32 – Общий вид магнитной опоры

Расчет несущей способности МО был проведен в программном пакете Elcut. По результатам расчетов были выбраны размеры магнитов: ширина, внутренний и внешний диаметры, угол сопряжения опор. От ширины и диаметров зависит несущая способность опоры.

Следует учитывать, что, согласно теореме Ирншоу-Бранцбека, опора, состоящая из постоянных магнитов, является статически неустойчивой. Это приводит к возникновению радиальной силы, смещающей ротор относительно

статора МО в радиальном направлении. Величина этой силы зависит от угла сопряжения между ротором, статором и осевого зазора.

С учетом осевой жесткости ВТСП опор магнитная опора рассчитывалась на нагрузку 6000 Н.

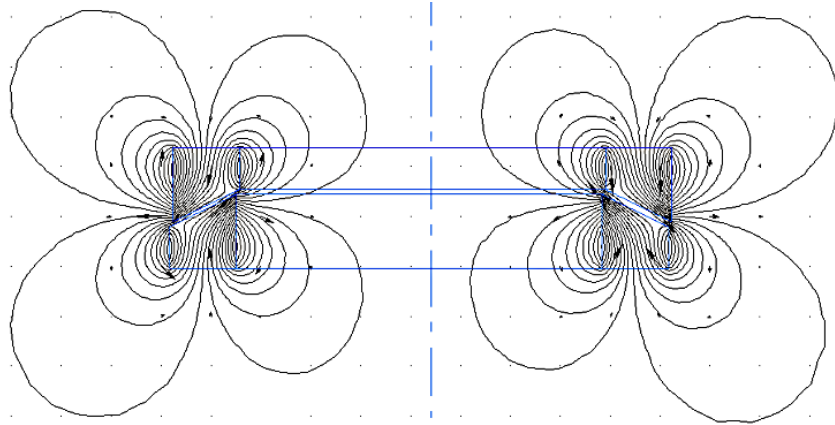


Рисунок 3.33-Картина распределения магнитных линий от двух кольцевых встречно включенных постоянных магнитов с трапецидальными поперечными ($D_{\text{внеш}} = 310$ мм; $D_{\text{внутр}} = 220$ мм; $\alpha = 64^\circ$; $b = 25$ мм; $\delta = 3$ мм.)

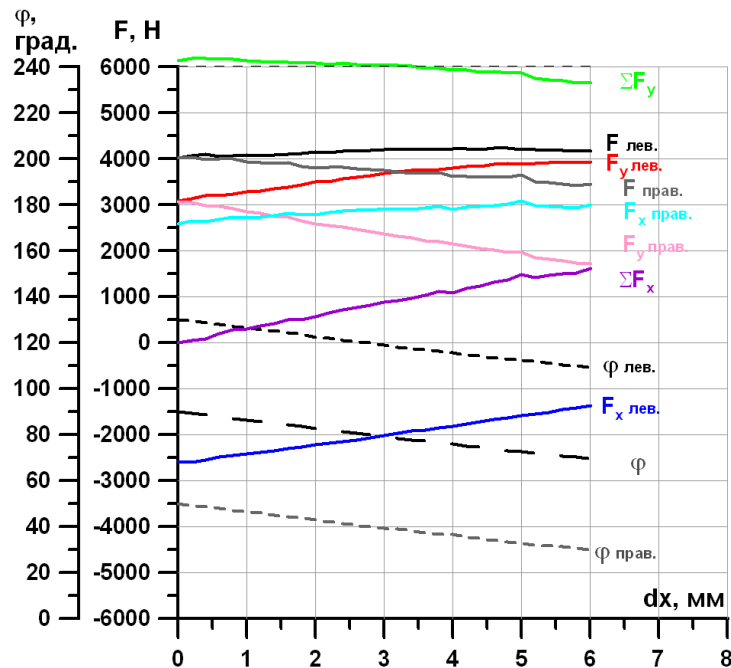


Рисунок 3.34-Зависимости вертикальной и горизонтальной компонент силы магнитной левитации от величины горизонтального смещения верхней опоры

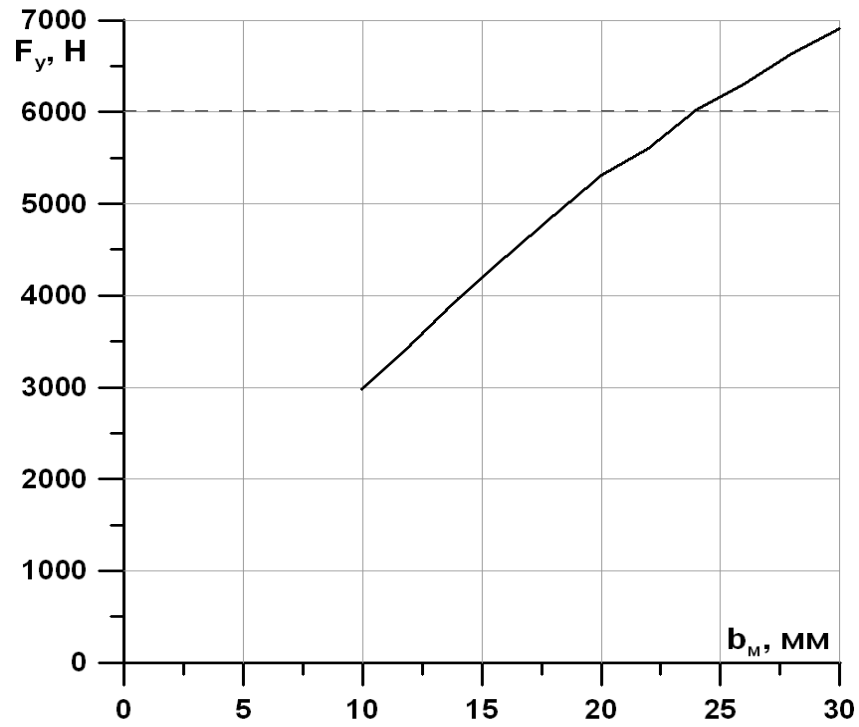


Рисунок 3.35-Зависимость силы магнитной левитации от толщины колец
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

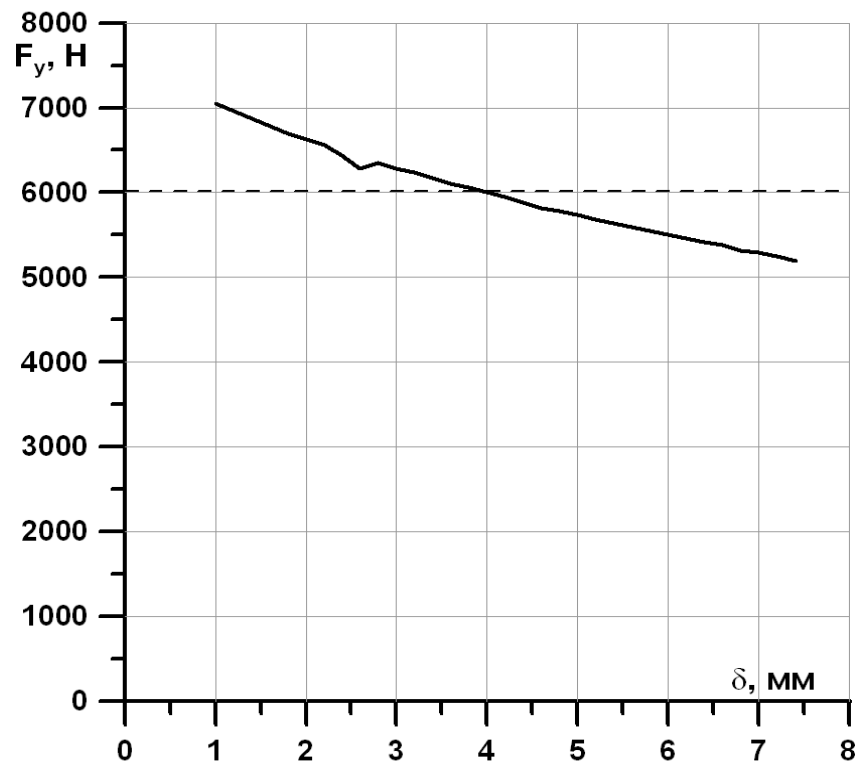


Рисунок 3.36-Зависимость силы магнитной левитации от величины рабочего
зазора

По результатам расчетов были выбраны наиболее рациональные размеры магнитных опор: $D_{\text{внеш}} = 310$ мм; $D_{\text{внутр}} = 220$ мм; $\alpha = 64^\circ$; $b = 25$ мм

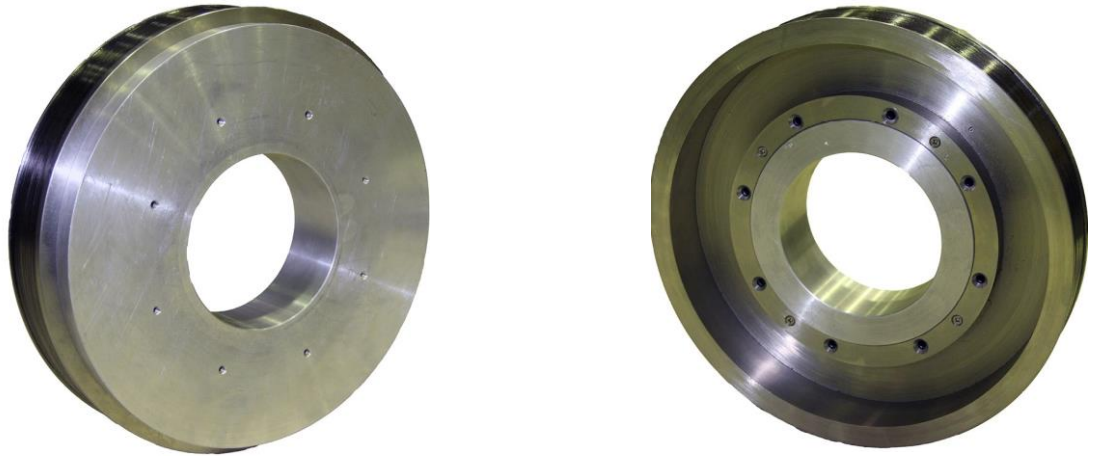
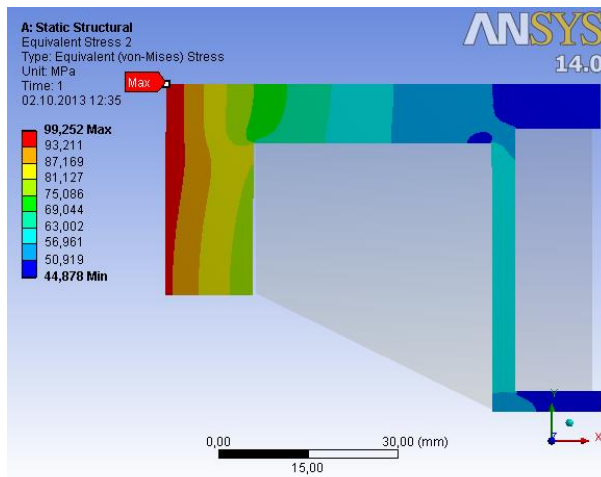
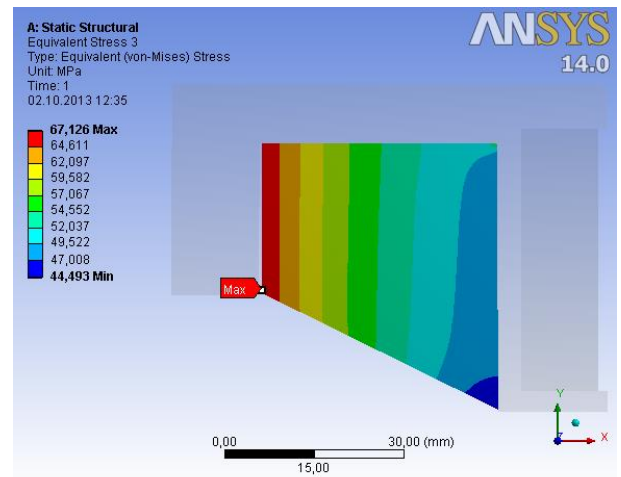


Рисунок 3.37-Общий вид ротора магнитной опоры без магнитов

Основные результаты расчета магнитной опоры на прочность приведены на рисунках 3.38 и 3.39.



а)



б)

Рисунок 3.39-Напряженное состояние элементов магнитной опоры

а) картина напряженного состояния стальной обоймы опоры с использованием углеродного банджа; б) картина напряженного состояния постоянного магнита опоры с использованием углеродного банджа

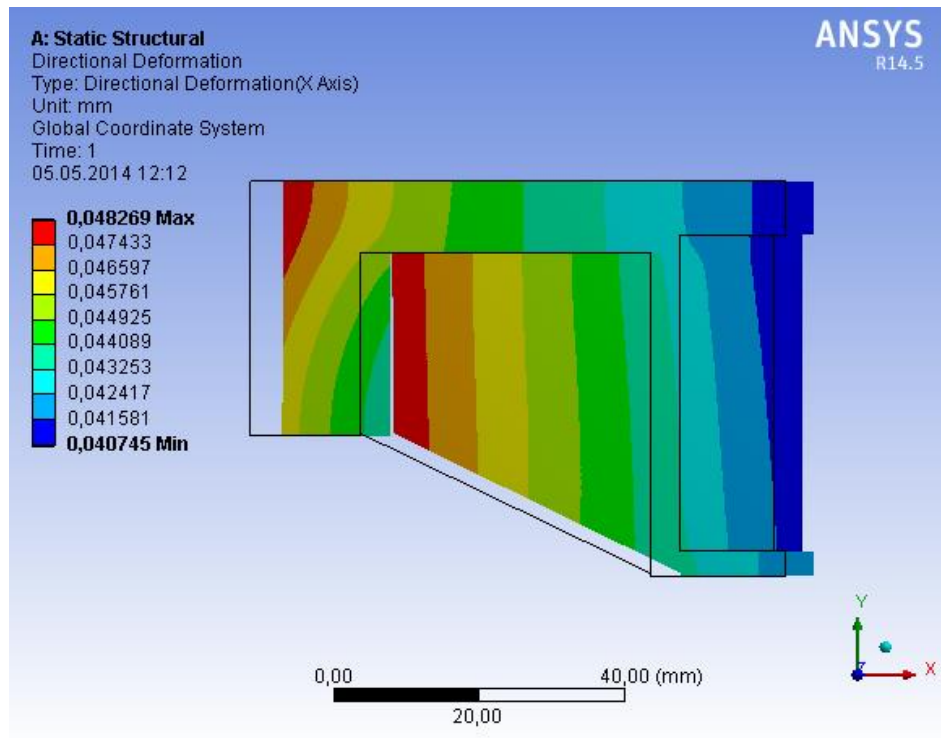


Рисунок 3.39-Деформация элементов опоры

Расчеты проводились с использованием программы Ansys_WorkBench [91]. Геометрическая модель исследуемой опоры строилась в программе Autocad и транслировалась в формат SAT для дальнейшего импорта в расчётный модуль.

Исследование опоры ЭМН проводилось для диапазона частот вращения 8000 – 12000 мин⁻¹. За номинальный режим принята частота вращения 8000 мин⁻¹. В результате расчёта была получена картина напряжённого состояния элементов исследуемой опоры. На рисунке 3.38 а, б показано напряжённое состояние для частоты вращения 8000 мин⁻¹.

Из рисунков видно, что в постоянном магните возникают местные напряжения, значительно превышающие допустимые. Во избежание возникновения местных напряжений в месте контакта постоянного магнита и стальной обоймы, выполнена фаска на внешней поверхности магнита. Однако,

даже без учета этих напряжений, в магните будет достигнуто предельное значение напряжения, что может привести к разрушению.

Использование бандажа из углеродного материала позволяет избежать местного перенапряжения магнитов (см. рисунок 3.38 б) и снизить максимальное напряжение постоянного магнита. Однако, и в этом случае напряжения на внутренней поверхности постоянного магнита близки к предельным и составляют 67 МПа. Напряжения в стальной оболочке и углеродном бандаже не превышают допустимые значения.

На рисунке 3.39 представлены картины деформаций магнитной опоры. Видно, что максимальная деформация внутренней стенки корпуса ротора составляет 0,048 мм. Для обеспечения надежной работы опоры, корпус и фланец ротора должны соединяться с натягом 0.1 мм.

В таблице 3.9 приведены результаты прочностных расчетов при частоте вращения опоры 8000-12000 мин⁻¹. Из таблицы видно, что разрушение постоянного магнита произойдет по внутренней кольцевой поверхности при частоте вращения опоры 8250 мин⁻¹, коэффициент запаса прочности в этом случае составит 1,04. Для предотвращения такого разрушения, магнит изготовлен из 6 секторов. В этом случае магнитная опора на постоянных магнитах может надежно работать до 12000 мин⁻¹.

Таблица 3.9-Результаты прочностных расчетов при скорости вращения опоры 8000-12000 мин⁻¹

Частота вращения мин ⁻¹	Угловая частота вращения рад/с	Максимальное напряжение стальной обоймы МПа	Максимальное напряжение постоянного магнита МПа	Максимальное напряжение углеродного бандажа МПа	Коэффициент запаса прочности магнита
8000	838	99,25	67,13	143,89	1,04
8250	865	105,49	71,35	152,94	0,98
8500	891	111,98	75,74	162,35	0,92
8750	917	118,67	80,26	172,04	0,87
9000	943	125,54	84,91	182,01	0,82
9250	970	132,61	89,69	192,26	0,78
9500	996	139,88	94,60	202,80	0,74
9750	1022	147,34	99,65	213,61	0,70
10000	1048	154,99	104,82	224,71	0,67
10250	1074	162,84	110,13	236,08	0,64
10500	1101	170,88	115,57	247,74	0,61
10750	1127	179,11	121,14	259,68	0,58
11000	1153	187,54	126,84	271,90	0,55
11250	1179	196,16	132,67	284,40	0,53
11500	1205	204,98	138,63	297,18	0,50
11750	1232	213,99	144,72	310,24	0,48
12000	1258	223,19	150,95	323,58	0,46

3.4 Выбор и расчет мотор-генератора

Мотор-генератор — устройство для преобразования кинетической энергии вращающегося маховика в электрическую энергию, а также для раскрутки маховика до заданных оборотов.

Наиболее целесообразной конструкцией мотор-генератора для ЭМН является бесконтактная синхронная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов [92]. Конструкция такой машины достаточно проста и

надежна. Но при использовании ее в качестве мотор-генератора для ЭМН возникает ряд особенностей.

В зависимости от условий работы и нагрузочно-разгрузочной характеристики выбираются материалы мотор-генератора. Например, для цикла при котором время хранения энергии намного превышает время работы накопителя на сеть, мотор-генератор следует делать из немагнитного материала (нержавеющая сталь) или вовсе безжелезным (композитные материалы, стекловолокна, пластмассы). Немагнитный материал необходим чтобы избежать потерь на перемагничивание железа, при вращении маховика в режиме сохранения энергии. Энергетические параметры немагнитной машины на 30 % хуже, чем параметры традиционной машины из шихтованной электротехнической стали. Также немагнитный мотор-генератор требует специального преобразователя для раскрутки маховика. Еще одной особенностью выполнения немагнитного мотор-генератора является проблема охлаждения медной обмотки, вследствие низкой теплопроводности материала. Также такой статор обладает меньшей механической прочностью.

Если режим хранения энергии ненамного больше времени разряда, статор можно выполнять традиционным, что позволит избежать перечисленных выше сложностей.

Так как работа ЭМН предусматривает продолжительное время в режиме хранения энергии, то для уменьшения потерь на перемагничивание железа статора, мотор-генератор рационально выполнять из немагнитных материалов. Статор набран из листов нержавеющей стали 12Х18Н10Т, а ротор из титановых листов ВТ6.

Обмотка статора трехфазная, двухслойная. Ротор имеет следующую конструкцию: из листов титана набирается обойма, в которую клеиваются постоянные Ne-Fe-B магниты. Магниты устанавливаются по схеме Хальбаха [93].

На рисунке 3.40 приведен расчет мотор-генератора, выполненный в программе Elcut, а его параметры представлены в таблице 3.10.

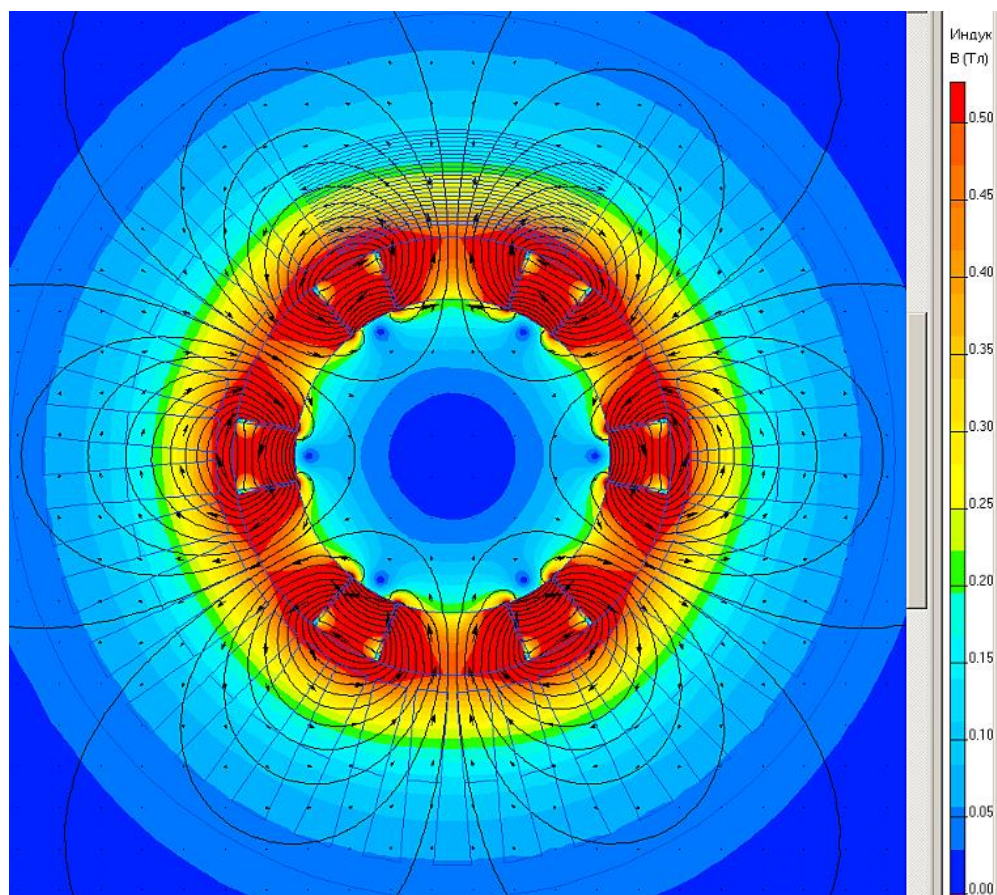


Рисунок 3.40-Картина распределения магнитной индукции в мотор-генераторе
ЭМН

Таблица 3.10-Расчетные параметры мотор-генератора с немагнитным
статором

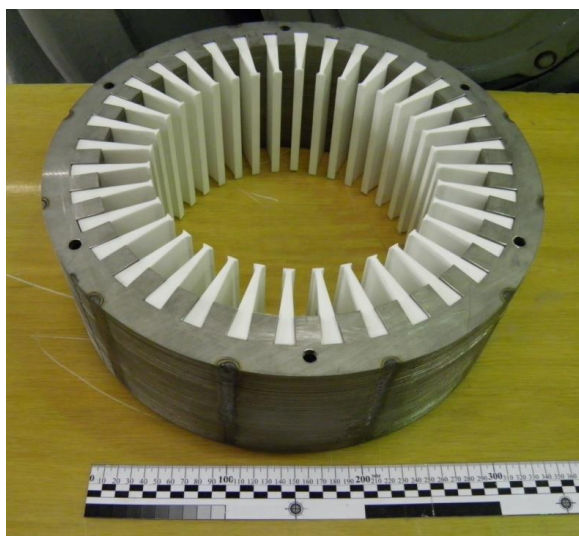
Мощность (кВт)		100
Напряжение питания фазное (В)		230 – 380
Номинальный ток (А)		156 – 96
Номинальная плотность тока (А/мм ²)		7,84 – 4,83
Частота вращения (мин ⁻¹)		8000 – 5000
Число фаз обмотки	m	3
Число полюсов	$2p$	6
Диаметр расточки статора (мм)		220
Включение фаз		Y
Индукция в зубце/ярме при ном. нагрузке макс. (Тл)		0,24/0,13

Таблица 3.11-Параметры постоянных магнитов

Количество радиальных/тангенциальных секторов	6/6
Материал магнитов	Nd-Fe-B
Коэрцитивная сила магнитов расчетная (А/м)	1 000 000
Масса магнитов (кг)	14,8

Таблица 3.12-Потери в обмотке якоря

Электрические потери в обмотке якоря (кВт)	3,43 – 1,3
Скорость нагрева при отсутствии охлаждения (К/мин)	16,7 – 6,4
Время достижения предельной температуры изоляции (с)	480 – 1200
КПД с учетом электрических потерь (%)	96,4 – 98,7



а)



б)

Рисунок 3.41 –Внешний вид статора мотор-генератора ЭМН

а –статор мотор-генератора; б – лист пакета статора



Рисунок 3.42-Лист ротора мотор-генератора ЭМН

Также был проведен прочностной расчет ротора, в результате которого в качестве материала для обоймы ротора был выбран титан марки ВТ6.

Аэродинамические потери ротора мотор-генератора пренебрежимо малы вследствие нахождения в вакуумируемой (~ 1 мм. р.ст) полости. Омические потери в обмотке якоря рассчитываются по закону Джоуля-Ленца, и в режиме номинальной мощности 100 кВт составляют 1,3 кВт при частоте вращения 5000 мин^{-1} и 3,4 кВт при 8000 мин^{-1} [94].

Магнитные потери в магнитопроводе статора состоят из потерь на перемагничивание (характерное только для ферромагнитных материалов) и потерь на вихревые токи (для металлических конструкций). Результаты численного моделирования немагнитной конструкции показали, что средняя величина индукции в немагнитном зубце из коррозионностойкой стали равна $B_z = 0,039$ Тл, в ярме $B_y = 0,007$ Тл. Расчеты показали, что при частоте вращения 8000 мин^{-1} потери составляют 2,75 Вт в зубцах и 69 мВт в ярме, при частоте вращения 5000 мин^{-1} потери составляют 1,42 Вт в зубцах и 36 мВт в ярме.

Таким образом, в режиме хранения энергии, при отключенной обмотке якоря, потери в мотор-генераторе не превышают 1%, а при работе на полную мощность при частоте вращения 8000 мин^{-1} , КПД накопителя составляет 98,7 %.

При условии поддержании частоты вращения 8000 мин^{-1} неизменной, за 24 часа потери в металлическом немагнитном статоре, соответствующие значению всего 2,82 Вт, составят 0,244 МДж. Количество энергии, потраченной на потери, станет сопоставимым по величине с запасаемой энергией 5 МДж через 20 суток хранения.

3.5 Конструктивные особенности системы безопасности ЭМН

Система безопасности созданного ЭМН представляет собой два коаксиальных цилиндра. Между стенками цилиндров в несколько слоев намотана металлическая сетка с ячейкой 10x10 мм. Материал обоих цилиндров сталь 12X18Н10Т. Толщина стенки наружного цилиндра 10 мм, внутреннего 2 мм.

Дополнительным элементом защиты маховика является корпус ЭМН. Корпус герметичен — это сделано для возможности откачивания воздуха из корпуса ЭМН, чтобы убрать потери на трения маховика о воздух. Толщина стенки корпуса 16 мм. Корпус ЭМН состоит из трех частей для удобства сборки. Герметизация корпуса обеспечивается путем установки резиновых шнуров на сопрягающиеся поверхности частей корпуса. В корпусе предусмотрены технологические окна для контроля рабочих зазоров магнитной опоры и ВТСП подвесов.

Важная часть конструкции ЭМН - это верхняя и нижняя опоры. Нижняя опора является подвижной. В процессе захолаживания ВТСП опор маховик должен быть предварительно зафиксирован в рабочем положении. Фиксация оси маховика осуществляется при помощи этих опор. Также опоры должны обеспечить сохранение оси вращения маховика в случае выхода из строя ВТСП опор. Для центровки и обеспечения вращения маховика на опорах установлены

конические роликовые подшипники, наружные кольца которых расположены на маховике.

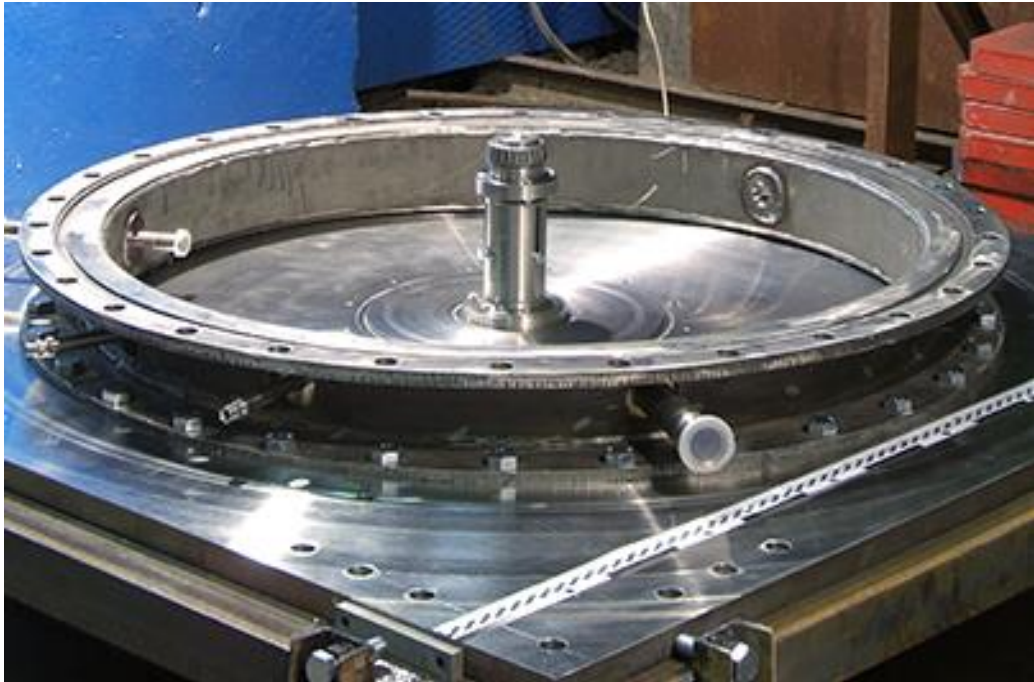


Рисунок 3.43-Нижняя опора подвижная и нижняя часть корпуса ЭМН

Подвижность нижней опоры позволяет контролировать осевое положение маховика при сборке ЭМН, а также фиксировать в подшипники маховик или уводить подшипники во время левитации ротора ЭМН при эксплуатации. Выводы мотор-генератора через корпус осуществляются через вакуумные токовводы.

Выводы по главе:

1. На основе решений двумерных электродинамических задач получены аналитические соотношения для расчета двумерных магнитных полей в активной зоне мотор-генератора ЭМН с возбуждением от ПМ.
2. Показано, что при выполнении мотор-генератора из немагнитного или слабомагнитного материала, потери запасенной энергии в режиме хранения энергии, не превышают 1%.
3. Построенные аналитические решения двумерных электродинамических задач для определения магнитных полей и выходных параметров мотор-генератора с возбуждением от ПМ позволяют проводить количественные оценки выходных характеристик синхронной машины с учетом количества пар полюсов, размеров постоянных магнитов и режима работы мотор-генератора. И могут быть использованы при выборе предварительных размеров ЭМП с ПМ на этапе их эскизного проектирования.
4. Наиболее целесообразной конструкцией мотор-генератора КНЭ является бесконтактная синхронная электрическая машина, с возбуждением от постоянных магнитов, для длительных режимов хранения энергии, мотор-генератор ЭМН следует сделать немагнитным, несмотря на то, что энергетические параметры машины, выполненной из немагнитного материала, на 30% хуже традиционной машины, изготовленной из шихтованной электротехнической стали.
5. Расчёты показывают целесообразность применения силового бандажа ротора маховика из графитоволокна, т.к. при этом можно существенно снизить напряжения в стальной трубе элементов маховика, а значит увеличить номинальную частоту вращения и величину запасаемой энергии. При наличии бандажа в исследуемом

диапазоне частот вращения ни в одной расчётной точке не был достигнут предел текучести для заданных материалов.

6. При отсутствии бандажа из графитоволокна максимальная частота вращения для исследуемой конструкции ограничена 7500 мин^{-1} .
7. Магнитная опора ЭМН должна быть выполнена из секторов постоянных магнитов, а ротор магнитной опоры, помимо этого должен быть окружен углеволоконным бандажом, препятствующим разрушению, в этом случае возможно безопасное использование ЭМН при частотах вращения $8000-12000 \text{ мин}^{-1}$.
8. Для создания маховиков с особо большими показателями удельной энергии $W_{\text{уд}}$ (супермаховиков), необходимо использовать тонковолкнистые материалы, т.к. металлы могут обеспечить $W_{\text{уд}} = 200-300 \text{ кДж/кг}$, а в свою очередь такие материалы, как стеклянные нити обладают $W_{\text{уд}} = 650 \text{ кДж/кг}$, у кварцевых нитей до $W_{\text{уд}} = 5000 \text{ кДж/кг}$, а у углеродного волокна $W_{\text{уд}} \approx 15000 \text{ кДж/кг}$, поэтому для изготовления маховика макетного образца, были выбраны именно углеволоконные нити.
9. Техническая реализация ЭМН требует установить его маховик в вакуумируемый кожух, чтобы избежать скачков уплотнения воздуха, ударных волн, а также резкого повышения аэродинамического сопротивления и температуры.

4. ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ ЭМН ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ 0,5 МДЖ

Удельная запасенная энергия ЭМН сопоставима с традиционными аккумуляторными батареями, но количество зарядно-разрядных циклов у ЭМН практически неограничено, а удельная мощность выше. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию магнитных опор на основе массивных высокотемпературных (ВТСП) элементов и постоянных магнитов (ПМ). Принцип действия такого подвеса основан на силовом взаимодействии индуктора, состоящего из постоянных магнитов на основе ПМ, и массива ВТСП элементов, расположенного на якоре и переведенного в сверхпроводящее состояние в присутствие магнитного поля индуктора. Достоинствами ВТСП подвеса являются: отсутствие трения в подшипнике, низкий уровень вибраций, способность к самоцентрированию, постоянная работа без смазки.

В данной главе приведена конструктивная схема ЭМН, методика расчета аэродинамических потерь ЭМН с запасенной энергией 0,5МДж, проведены расчеты мотор-генератора ЭМН, маховика и магнитного подвеса, проведены экспериментальные исследования ЭМН на захолаживание и холостом ходу, полученные характеристики ЭМН являются ключевыми при работе ЭМН в составе систем аварийных источников питания.

4.1 Описание рациональной схемы ЭМН

Концепция ЭМН с синхронным двигателем обращенного исполнения с магнитоэлектрическим возбуждением. Схема ЭМН с синхронным двигателем обращенного исполнения с магнитоэлектрическим возбуждением приведена на рисунке 4.1.

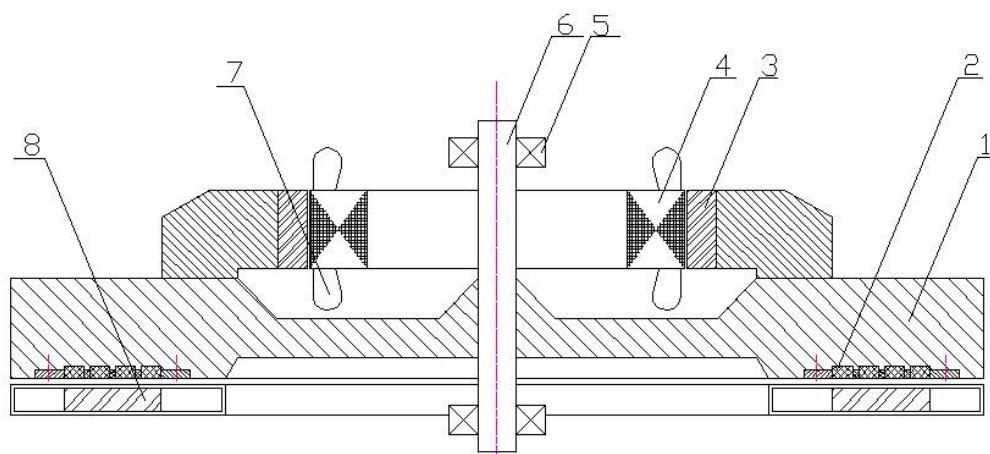


Рис. 4.1-Схема ЭМН с синхронным двигателем обращенного исполнения с магнитоэлектрическим возбуждением

1 – маховик; 2 – постоянные магниты магнитных ВТСП опор; 3 – постоянные магниты мотор-генератора; 4 – пакет статора (немагнитный); 5 – подшипник; 6 – вал; 7 – трёхфазная обмотка; 8 – блоки ВТСП

Достоинствами данной схемы являются: простота изготовления и сборки; отсутствие потерь в стали.

К недостаткам относятся: небольшая удельная мощность мотор-генератора.

4.2 Описание системы запуска и регулирования ЭМН

Схема регулирования и запуска кинетического накопителя энергии представлена на рисунке 4.2. Так как при отборе энергии на выходе частота вращения вала снижется, рационально выходное напряжение с генератора выпрямлять и инвертировать в заданную частоту.

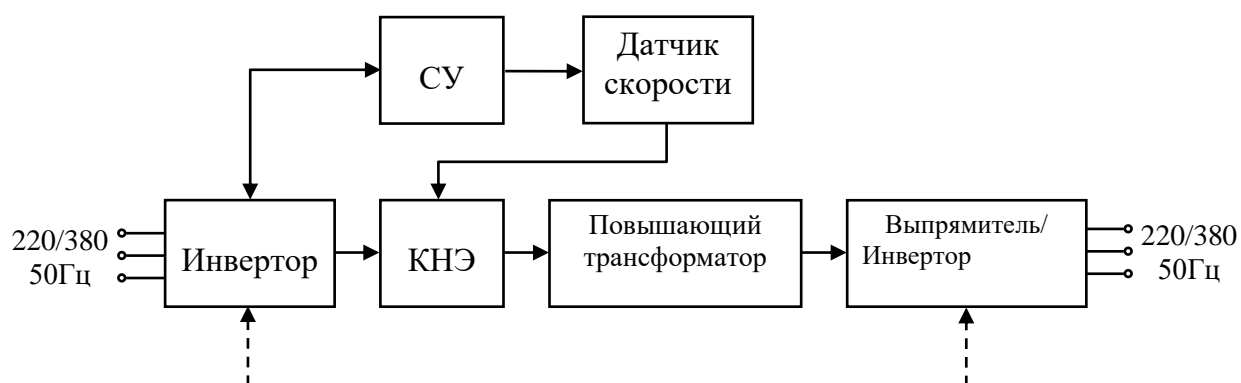


Рисунок 4.2- Принципиальная схема запуска и регулирования ЭМН

4.3 Параметры макетного образца ЭМН-0,5 МДж

Отличительными особенностями ЭМН дисковой конструкции с магнитным подвесом на основе массивных ВТСП элементов и постоянных магнитов являются мотор-генератор обращенной конструкции, массивный стальной маховик и расположение магнитного подвеса в нижней части маховика. Основные параметры ЭМН-0,5 МДж приведены в таблице 4.1

Таблица 4.1-Параметры макетного образца ЭМН-0,5 МДж

Параметр	Величина
<i>Параметры накопителя</i>	
Максимальный уровень запасаемой энергии, не менее	0,5 МДж
Номинальный уровень отдаваемой энергии	0,25 МДж
Время заряда (время разгона маховика)	300 с
Время разряда (время питания нагрузки) при мощности 10 кВт	25 с
Время разряда при мощности 1 кВт	250 с
Максимальная мощность накопителя, отдаваемая за время разряда	10 кВт
Уровень выходного напряжения	220 – 240 В
Частота выходного напряжения	50 Гц
<i>Параметры маховика</i>	
Частота вращения маховика	4000 – 6000 мин ⁻¹
Момент инерции	3,55 кг·м ²
Масса	100 кг
<i>Параметры мотор-генератора</i>	
Максимальная мощность	12,5 кВт
Напряжение питания	160 – 240 В
Количество фаз	3
Частота тока	200 Гц
Число пар полюсов	2
КПД	90 – 99%
Коэффициент мощности ($\cos \varphi$)	> 0,9

Расчет запасенной энергии маховика. Момент инерции маховика рассчитывается по соотношению [95]:

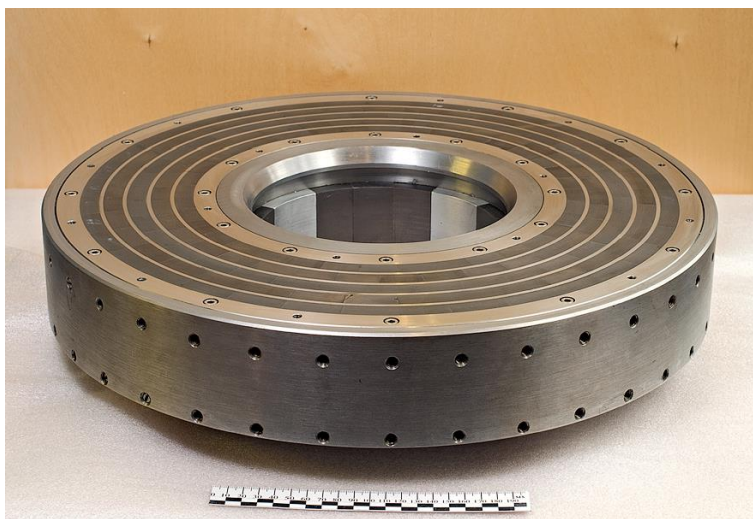


Рисунок 4.3- Маховик ЭМН-0,5 МДж

$$J_z = \frac{m}{2} (R_{\text{внешн}}^2 + R_{\text{внутр}}^2),$$

где m — масса маховика, а $R_{\text{внешн}}$ и $R_{\text{внутр}}$ — внешний и внутренний радиусы маховика.

Запасаемая энергия маховика определяется как [96]:

$$W = \frac{J_z \cdot \Omega(t)^2}{2},$$

где $\Omega(t)$ — угловая скорость маховика.

Для определения мощности, выделяемой при торможении или затрачиваемой на разгон маховика необходимо определить время, за которое эта мощность будет выделяться или потребляться. Было задано, что время разгона $t_p = 300$ с, а время торможения $t_t = 25$ с. Графические зависимости, соответствующие этим режимам представлены на рисунке 4.4. Их расчет был произведен по формуле:

$$\Omega(t) = \sqrt{\frac{2P \cdot t}{J_z}},$$

где, P — мощность, выделяемая или потребляемая за время t .

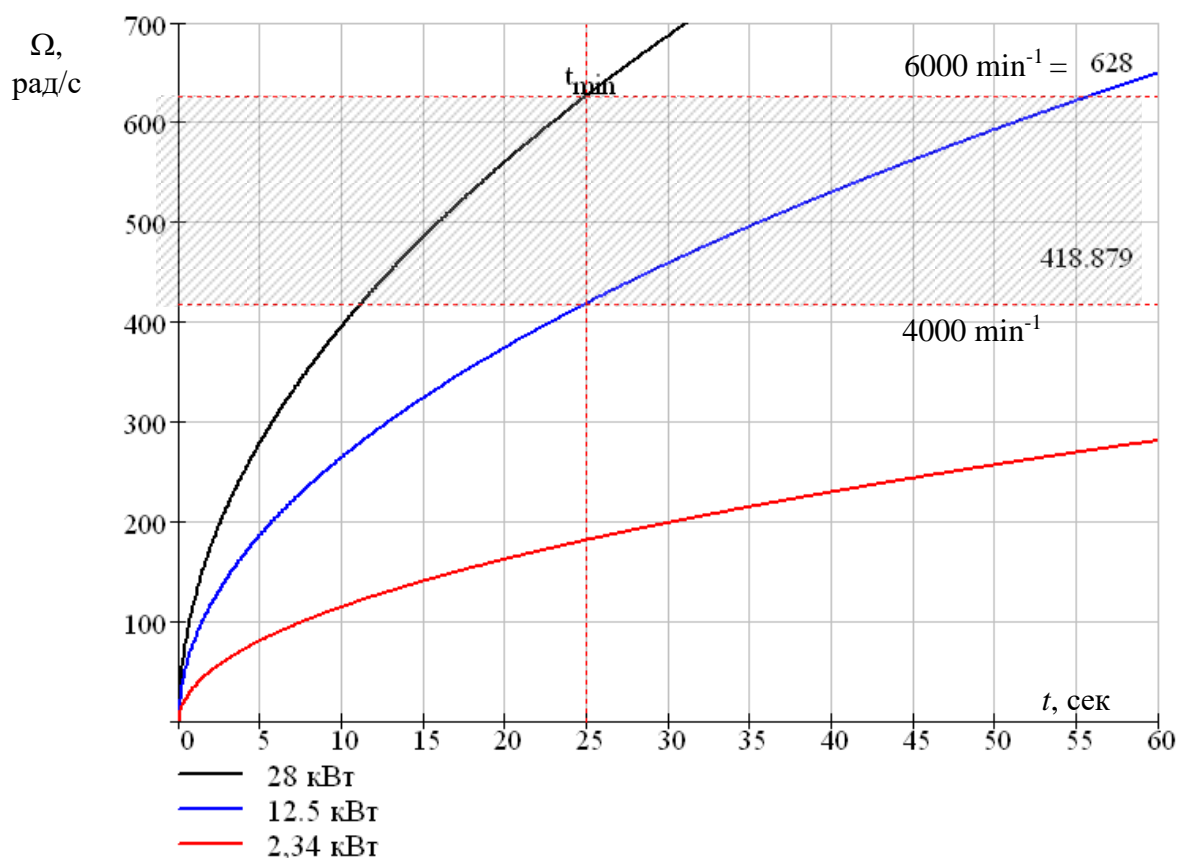


Рисунок 4.4-Графики разгона и торможения маховика ЭМН

4.4 Расчёт маховика на механическую прочность

Анализ маховика ЭМН на механическую прочность проводился методом конечных элементов в программной среде *CosmosWorks* [97]. На начальном этапе в программной среде *SolidWorks* была построена твердотельная модель маховика ЭМН (см. рисунок 4.5).

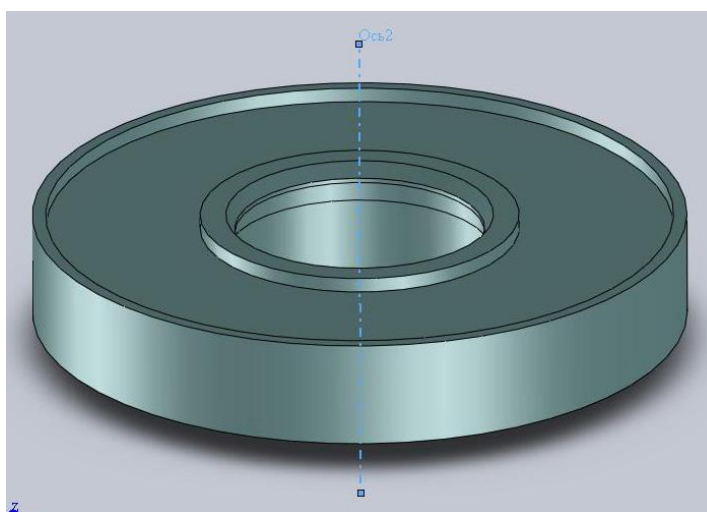


Рисунок 4.5 — Твердотельная модель маховика ЭМН

Материал маховика – легированная конструкционная сталь 30ХГСА, обладающая следующими механическими свойствами: предел текучести $\sigma_{0,2} = 620 \text{ МПа}$, предел прочности $\sigma_{0,2} = 1470 \text{ МПа}$. Далее в среде *CosmosWorks*, была сформирована сетка конечных элементов (см. рисунок 4.6) и наложены внешние нагрузки (в данной задаче задаётся частота вращения маховика относительно центральной оси — 6000 мин^{-1}).

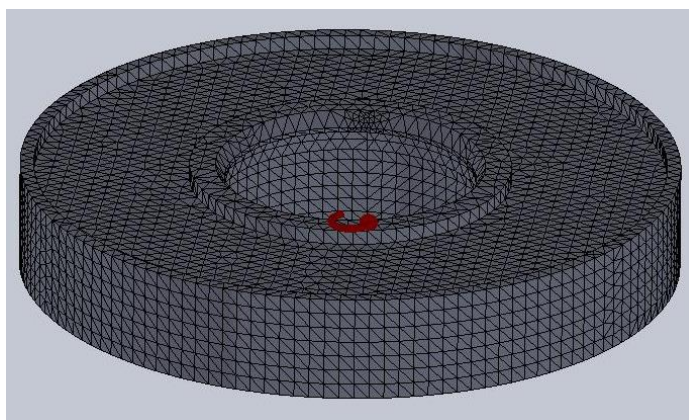


Рисунок 4.6-Сетка конечных элементов

По результатам численного моделирования можно оценить напряжения в маховике при его вращении с номинальной частотой (см. рисунок 4.7).

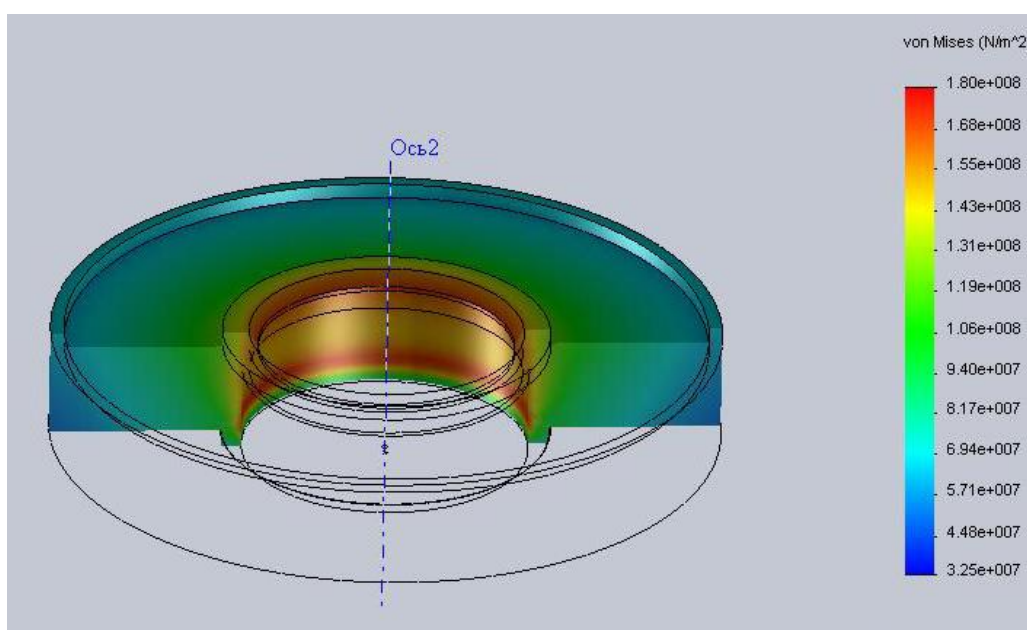


Рисунок 4.7-Механические напряжения в маховике ЭМН

Из эпюры (см. рисунок 4.7) видно, что основная нагрузка действует на внутреннюю поверхность маховика, при этом максимальное значение напряжения достигает величины 180 МПа, что в 3.4 раза меньше предела текучести для конструкционной легированной стали 30ХГСА. На рисунке 4.8 показаны перемещения, возникающие в различных точках маховика при его вращении.

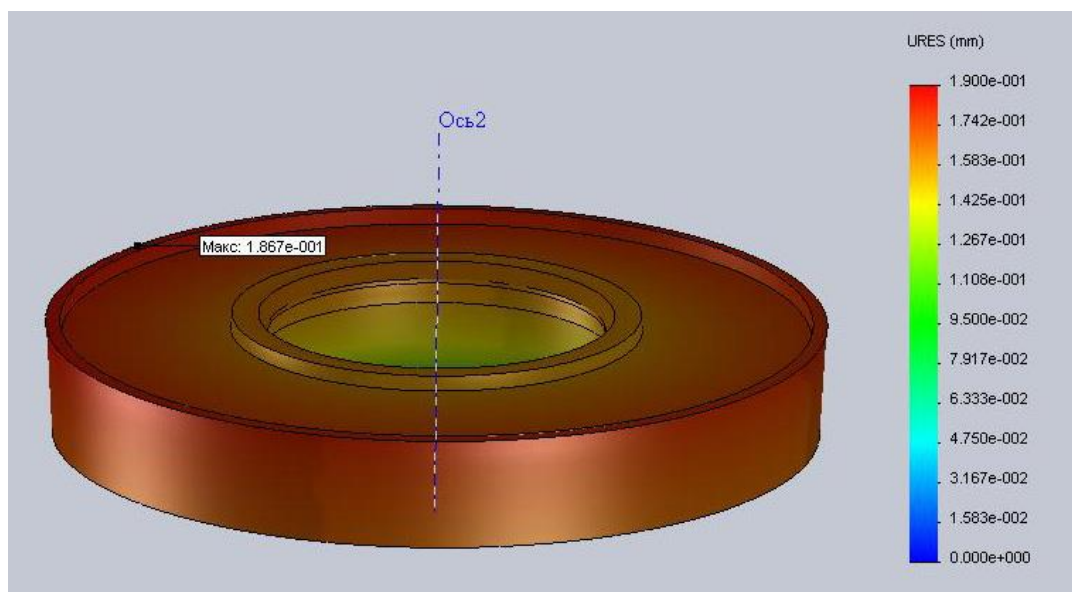


Рисунок 4.8-Деформации в маховике ЭМН при вращении

Максимальные перемещения при вращении возникают на внешней поверхности и не превышают 0,2 мм, что вполне допустимо и не оказывает существенного влияния на силы магнитной левитации. Далее была проведена оценка запаса прочности исследуемого маховика ЭМН (см. рисунок 4.9). Коэффициент запаса прочности получился равным 5,2.

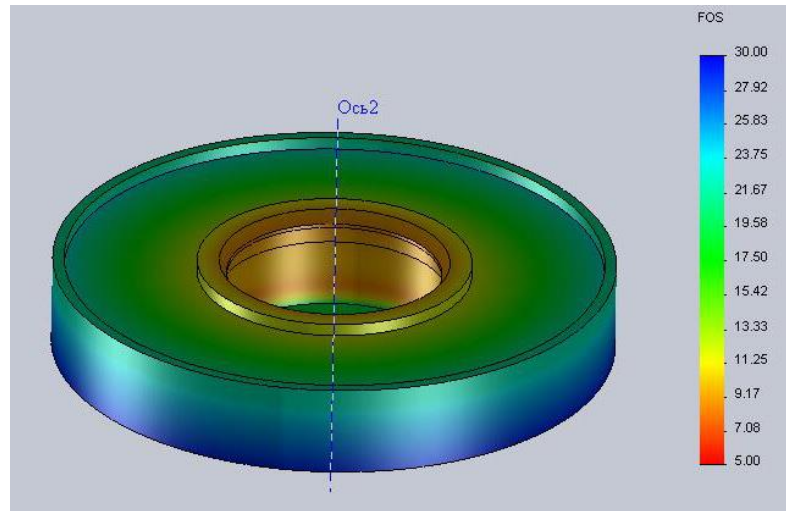


Рисунок 4.9-Картина запаса прочности маховика ЭМН

На рисунке 4.10 приведен чертеж разработанного маховика ЭМН. Он представляет собой цельнометаллический диск с местами под установку постоянных магнитов, для роторов мотор-генератора и магнитного подвеса.

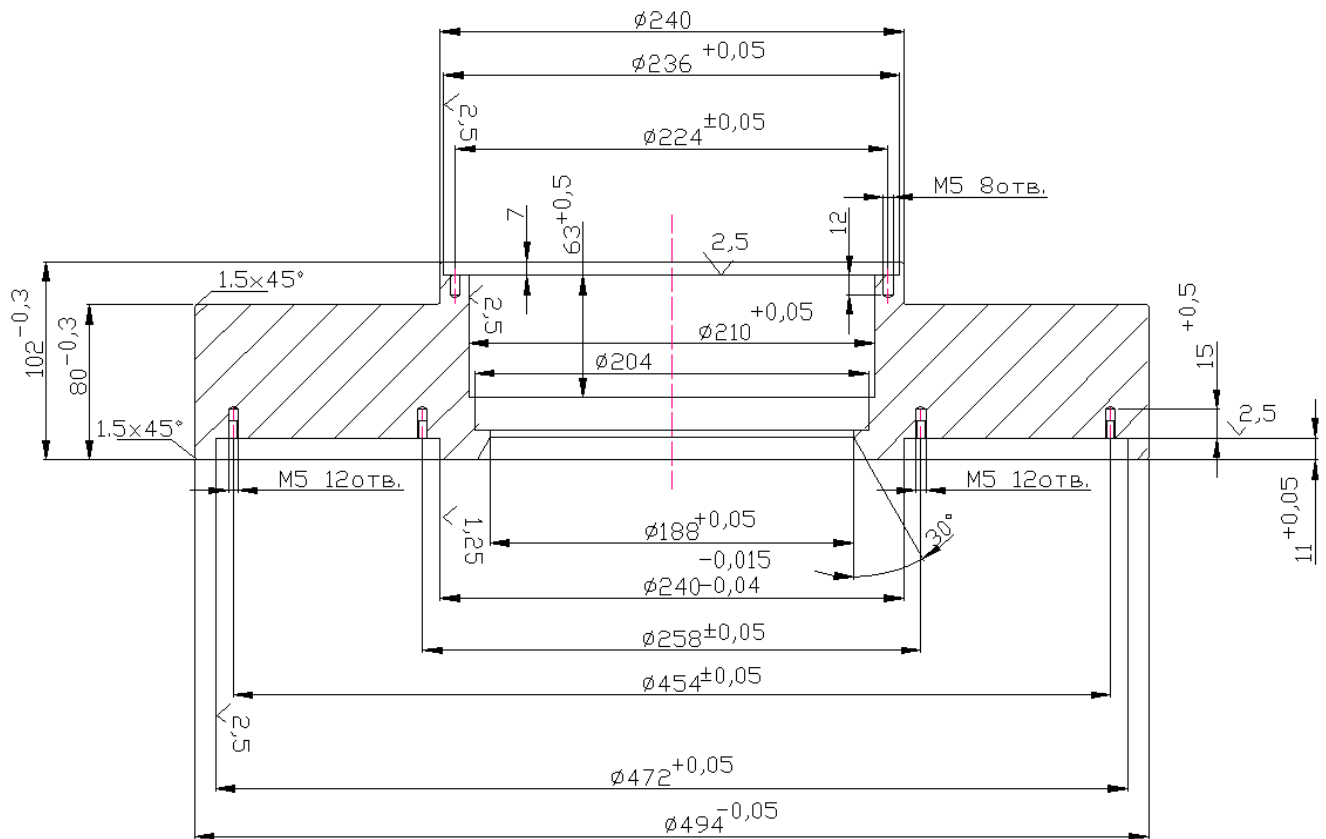


Рисунок 4.10-Чертеж маховика ЭМН-0,5 МДж

4.5 Расчёт параметров мотор-генератора ЭМН-0,5 МДж

Обоснование выбора конструктивной схемы машины. В таблицах 4.2, 4.3 представлены основные расчётные параметры вариантов разрабатываемого мотор-генератора, обеспечивающего процессы ввода-вывода энергии в маховик. Сравниваются параметры и характеристики (см. рисунки 4.11б, 4.12б) двух вариантов.

В первом варианте рассматривалась электрическая машина, имеющая на якоре статора ферромагнитное ярмо из шихтованного пакета тонколистовой электротехнической стали марки 1521 [98]. Результаты расчёта потерь на перемагничивание и вихревые токи (12 Вт) и сравнительный анализ расчётных параметров (см. рисунки 4.11, 4.12 и таблицу 4.2) ферромагнитного и немагнитного ярма показали нецелесообразность использования стали в якоре. Дополнительным фактором, определившим отказ от ферромагнитного ярма, является возможность бокового тяжения маховика вследствие неоднородности магнитного поля постоянных магнитов ротора.

Оптимизационный расчёт ярма якоря с целью уменьшения размеров лобовых частей обмотки и уточнения изменившихся параметров мотор-генератора показал, что вариант якоря с 36 пазами имеет большой вылет лобовых частей обмотки, мешающий расположению элементов накопителя. Поэтому выбран вариант якоря с 24 прямоугольными пазами, обеспечивающий необходимые характеристики мотор-генератора и сокращающий вылет лобовых частей. В таблице 4.2 представлены результаты расчёта для данного варианта электрической машины.

Картины распределения магнитных полей представлены на рисунках 4.11а, 4.12а. На рисунках 84.11б, 4.12б представлены расчётные зависимости мощности, коэффициента мощности ($\cos \varphi$) и плотности тока от рабочего угла θ .

Уменьшение магнитного потока в воздушном зазоре машины с немагнитным статором компенсируется увеличением числа витков обмотки,

что позволяет сохранить значение выходной мощности и прочих параметров на том же уровне, как и в машине с ферромагнитопроводом.

Таблица 4.2-Основные расчётные параметры мотор-генератора с немагнитным якорем

	Обозначение	Величина
Номинальные параметры		
Мощность, кВт	$P_{\text{ном}}$	12,5
Фазное напряжение питания, В	$U_{\text{ном}}$	220
ЭДС, В	E_0	248,95
Номинальный ток фазы, А	$I_{\text{ном}}$	12
Частота, Гц	f	200
Число фаз	m	3
Число пар полюсов	p	2
Частота вращения, мин ⁻¹	n	6000
КПД	η	0,93
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,99
Геометрия машины		
Диаметр ротора, мм	d_r	210
Диаметр статора, мм	D_s	196
Активная длина, мм	L_s	60
Величина воздушного зазора, мм	δ	14
Площадь паза, мм ²	$S_{\text{п}}$	142
Количество пазов	z_s	36
Параметры обмотки		
Число витков фазы	w_a	168
Диаметр провода, мм	$d_{\text{пр}}$	1,18
Плотность тока, А/мм ²	j	5,64
Активное сопротивление обмотки фазы,	R_a	1,35

Ом		
Полное индуктивное сопротивление, Ом	$X=X_d=X_q$	3,63
Другие параметры		
Магнитная индукция в зазоре, Тл	B_δ	0,26
Магнитный поток в зазоре (на единицу длины машины), Вб/м	Φ_δ	0,03
Номинальный угол нагрузки, град	θ	11
Индуктивное сопротивление рассеяния, Ом	X_s	2,08

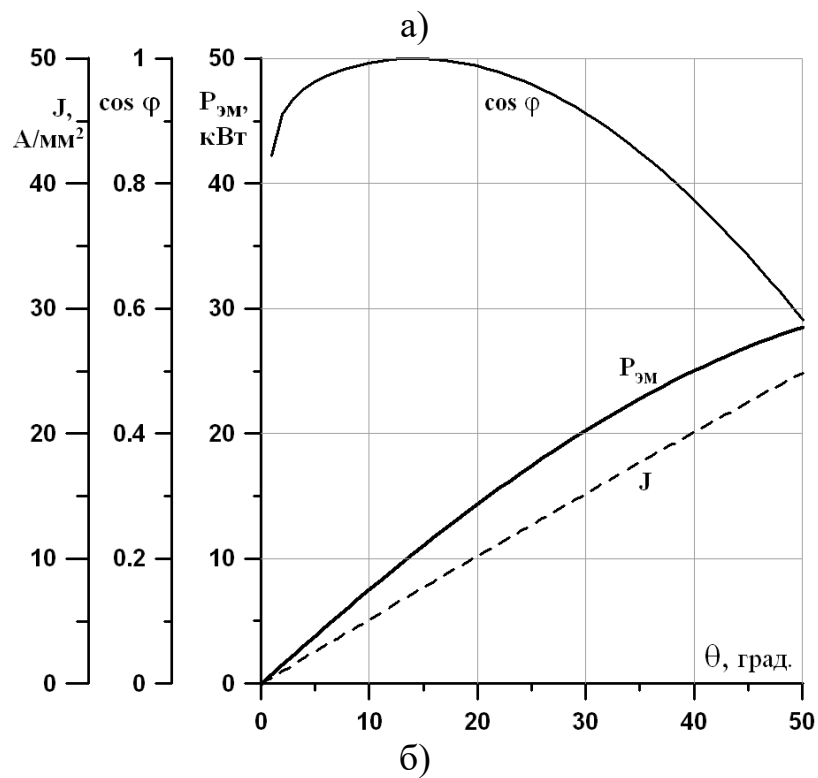
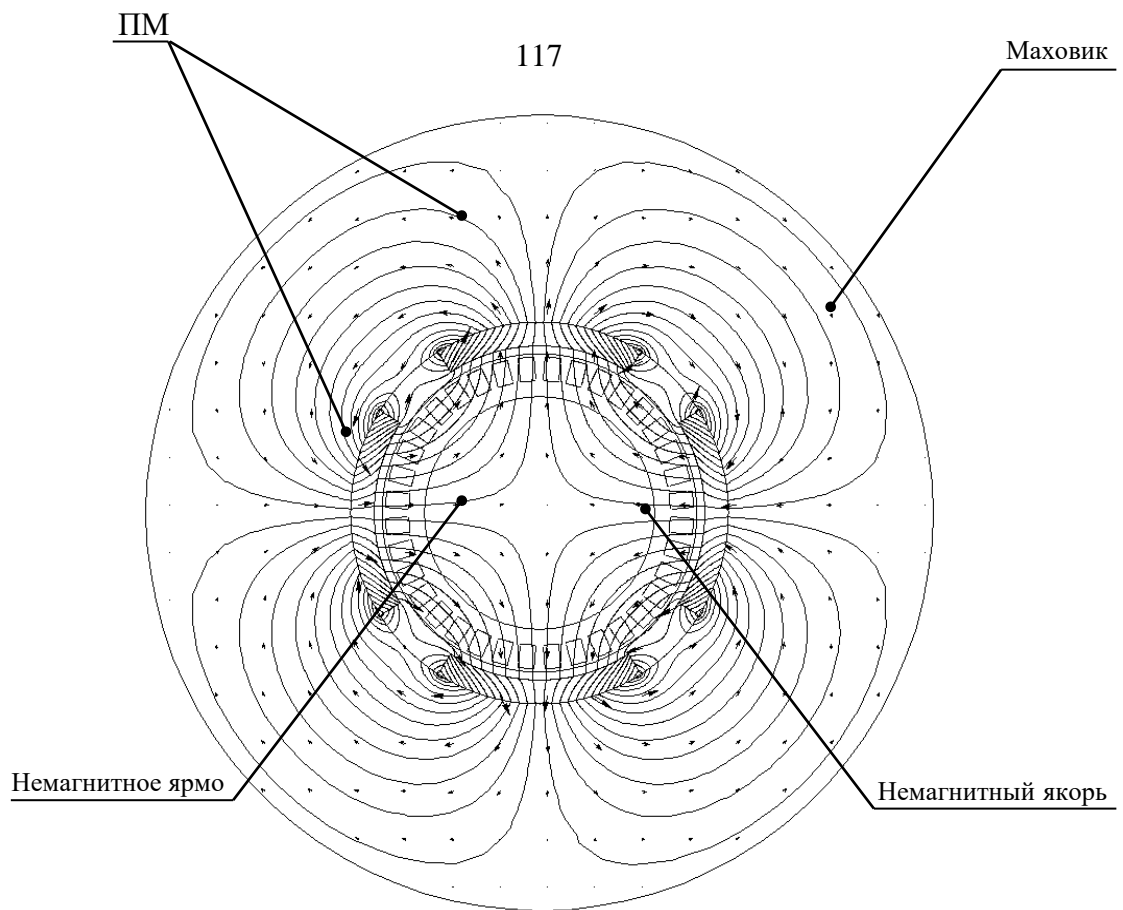
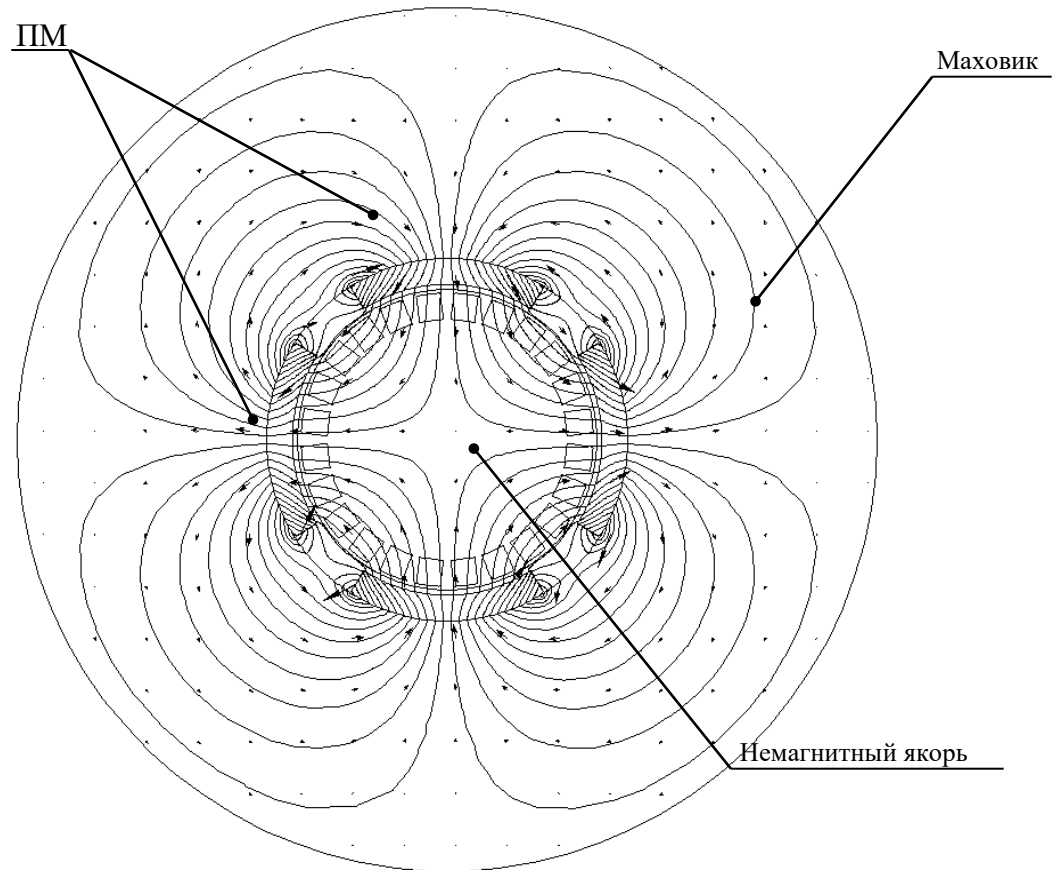


Рисунок 4.11-Мотор-генератор с немагнитным ярмом

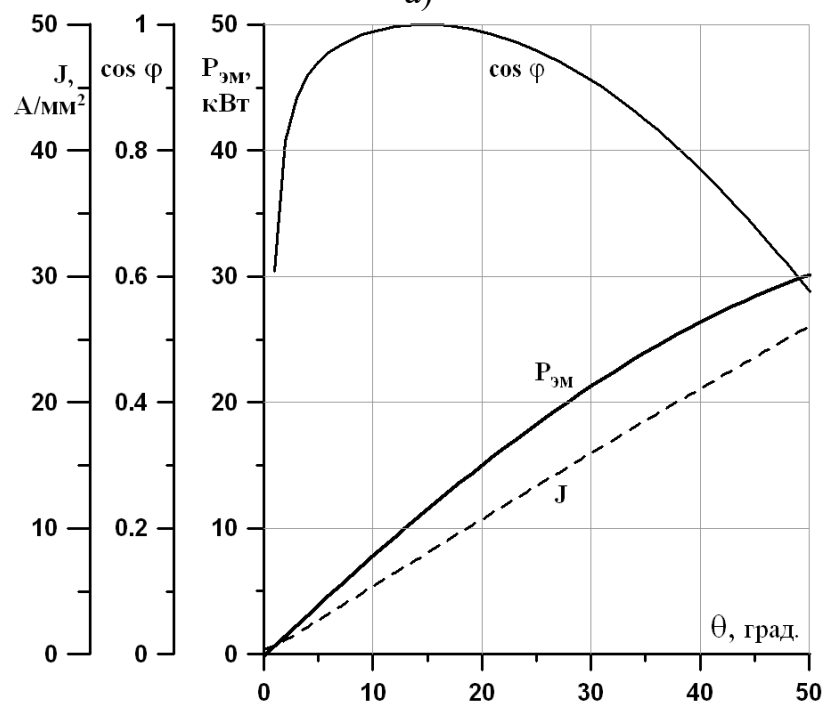
(а — картина распределения магнитных полей; б — расчётные характеристики)

Таблица 4.3-Основные расчётные параметры мотор-генератор с немагнитным якорем

	Обозначение	Величина
Номинальные параметры		
Мощность, кВт	$P_{\text{НОМ}}$	8,54
Фазное напряжение питания, В	$U_{\text{НОМ}}$	250
ЭДС, В	E_0	247
Номинальный ток фазы, А	$I_{\text{НОМ}}$	13
Частота, Гц	f	200
Число фаз	m	3
Число пар полюсов	p	2
Частота вращения, мин ⁻¹	n	6000
КПД	η	0,93
Коэффициент мощности	$\cos \varphi$	0,99
Геометрия машины		
Диаметр ротора, мм	d_r	180
Диаметр статора, мм	D_s	170
Активная длина, мм	L_s	60
Длина воздушного зазора, мм	δ	5
Площадь паза, мм ²	$S_{\text{п}}$	215
Количество пазов	z_s	24
Параметры обмотки		
Число витков фазы	w_a	168
Диаметр провода, мм	$d_{\text{пр}}$	1,18
Плотность тока, А/мм ²	j	5,925
Активное сопротивление обмотки фазы, Ом	R_a	1,23
Полное индуктивное сопротивление, Ом	$X=X_d=X_q$	3,47
Другие параметры		
Магнитная индукция в зазоре, Тл	B_{δ}	0,28
Магнитный поток в зазоре (на единицу длины машины), Вб/м	Φ_{δ}	0,03
Номинальный угол нагрузки, град	θ	11
Индуктивное сопротивление рассеяния, Ом	X_s	2,04



а)



б)

Рисунок 4.12-Мотор-генератор с немагнитным ярмом (24 паза)

(а — картина распределения магнитных полей; б — расчётные характеристики)

Расчёт торцевого магнитного потока от постоянных магнитов в ЭМН с неферромагнитным статором. Традиционно торцевой магнитный поток Φ_T в электрических машинах называют потоком рассеяния, поскольку он представляет ту часть полного потока, которая не замыкается через якорную обмотку, а проходит через зазор в аксиальном направлении. Как следствие, Φ_T не наводит в якорной обмотке ЭДС и оказывает лишь вредное воздействие, поскольку насыщает магнитопровод индуктора.

В беззубцовых конструкциях статоров, из-за увеличенного магнитного зазора, торцевое рассеяние существенно возрастает, но не вызывает столь сильного увеличения ЭДС, поскольку не весь Φ_T охватывает лобовую часть якорной обмотки. Надо отметить, что в беспазовых статорах не существует четкого деления на пазовую и лобовую зону, поскольку доля Φ_T достаточно велика и составляет по оценкам 15 – 25% в зависимости от геометрических соотношений [99]. В дальнейшем лобовые части будем называть торцевыми.

В полностью немагнитных статорах, в которых отсутствуют не только ферромагнитные зубцы, но и ферромагнитное ярмо, доля Φ_T сопоставима с рабочим магнитным потоком Φ_δ . На рисунке 4.13 показана магнитная цепь четвертой части мотор-генератора и схема ее замещения.

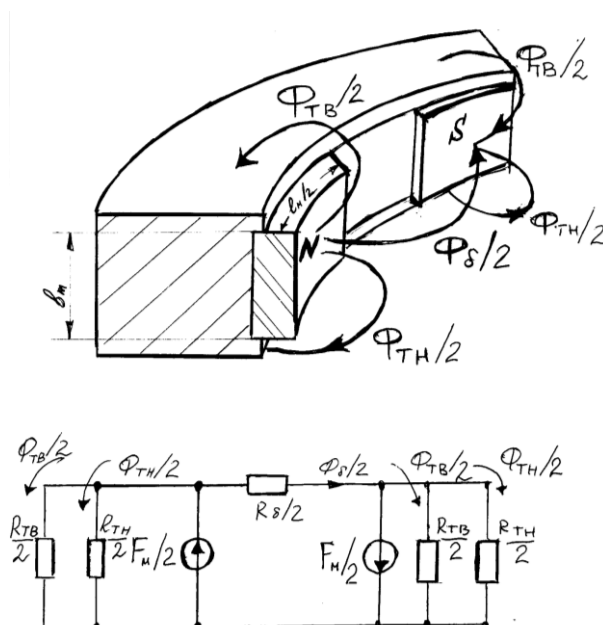


Рисунок 4.13-Магнитная цепь и схема ее замещения

В схеме все МДС, потоки, и магнитные сопротивления поделены на 2, поскольку из соображений симметрии рассматриваются половины двух соседних магнитов. Магнитные сопротивления указанных пяти потоков примерно равны, поскольку средние длины силовых линий по воздуху и поперечные сечения потоков примерно одинаковы:

$$R_{m\delta}/2 = R_{mn}/2 \approx R_{\delta}/2 = R.$$

Торцевой поток от половин двух соседних магнитов:

$$\Phi_m/2 = 2 \cdot (\Phi_{mn}/2 + \Phi_{m\delta}/2).$$

Параллельное соединение верхнего и нижнего торцевого потока от половины магнита определяет соответствующий поток:

$$\Phi_{m\delta}/2 + \Phi_{mn}/2 = \frac{F_M/2}{R/2}.$$

То же самое для двух половин:

$$\Phi_m/2 = 2 \frac{F_M/2}{R/2} = \frac{2F_M}{R}.$$

А для двух соседних магнитов торцевой магнитный поток будет равен:

$$\Phi_m = 2\Phi_m/2 = \frac{4F_M}{R}.$$

Межполюсный поток между половинами двух соседних магнитов будет равен:

$$\Phi_{\delta}/2 = \frac{F_M/2 + F_M/2}{R_{\delta}/2} = \frac{F_M}{R}.$$

Межполюсный поток между магнитом и половинами двух соседних магнитов:

$$\Phi_{\delta} = 2 \frac{F_M/2 + F_M/2}{R_{\delta}/2} = \frac{2F_M}{R}.$$

Таким образом, на основе приведенной схемы замещения можно оценить Φ_T в $\sim 120\%$ от межполюсного потока Φ_{δ} .

Анализ распределения индукции магнитного потока Φ_T в двухмерной осесимметричной постановке (см. рисунки 4.14, 4.15, 4.16) показал, что

торцевой поток распространяется на центральную зону крышки, на подъемный стакан и внутреннюю стенку криостата. Данное двухмерное распределение поля в силу допущения (униполярности магнитного потока) не соответствует трехмерной картине в центральной зоне ротора, однако в зоне постоянных магнитов картина поля не искажена.

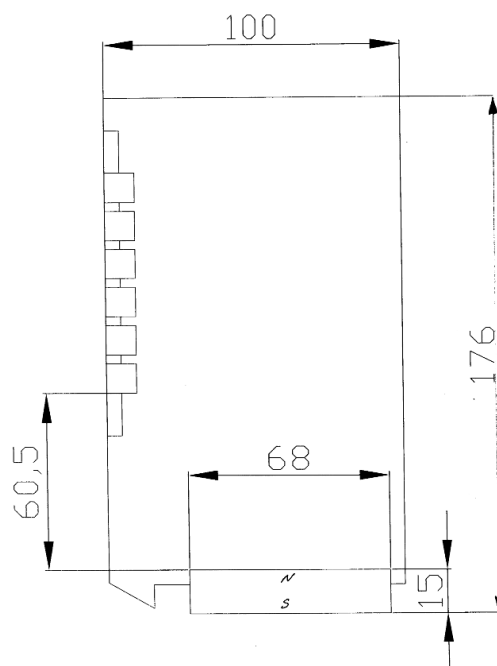


Рисунок 4.14-Эскиз исследуемой области мотор-генератора

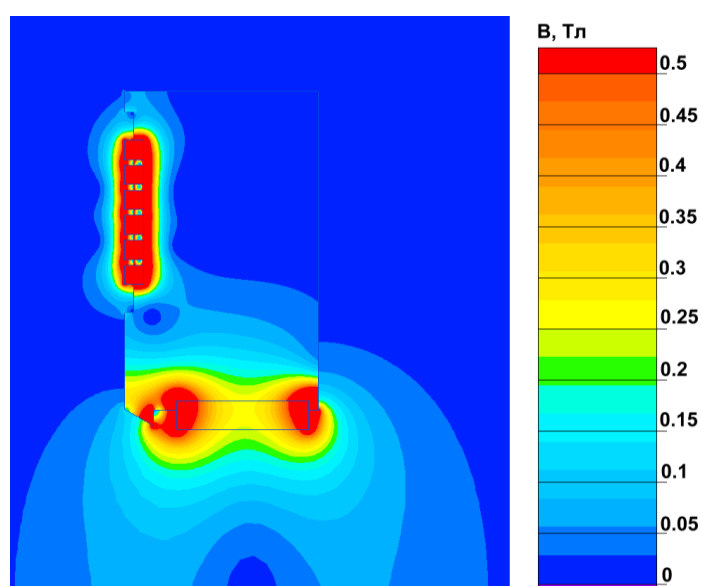


Рисунок 4.15-Эквипотенциальные поверхности магнитного поля от ПМ

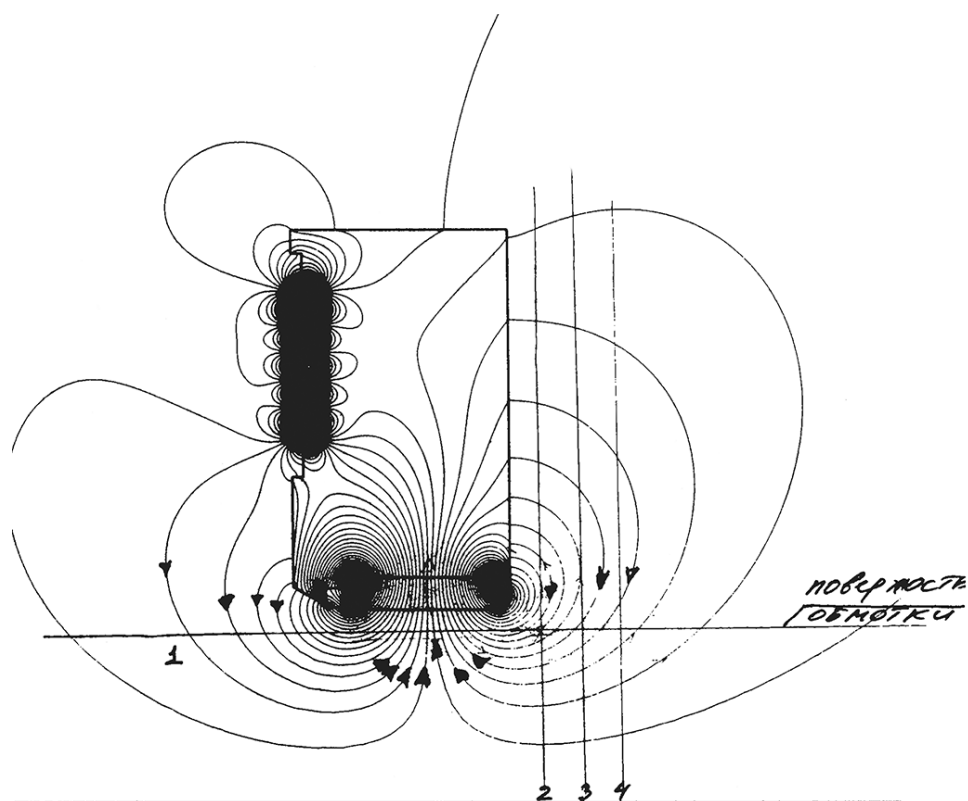


Рисунок 4.16-Картина магнитных силовых линий от ПМ

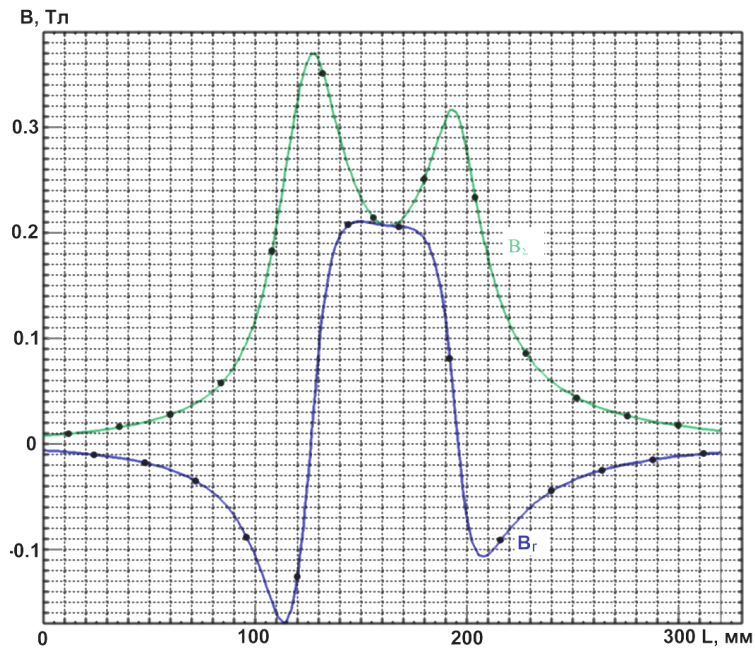
Эта зона, в силу высоких значений индукций (см. рисунки 4.17, 4.18) и представляет интерес в плане источника переменного магнитного поля в неподвижных элементах конструкции машины.

Из рисунков 4.17, 4.18 видно, что максимальная индукция на расстоянии 1 см от верхней поверхности маховика составляет 0,2 Тл; на расстоянии 2 см — 0,1 Тл; на расстоянии 3 см — 0,08 Тл.

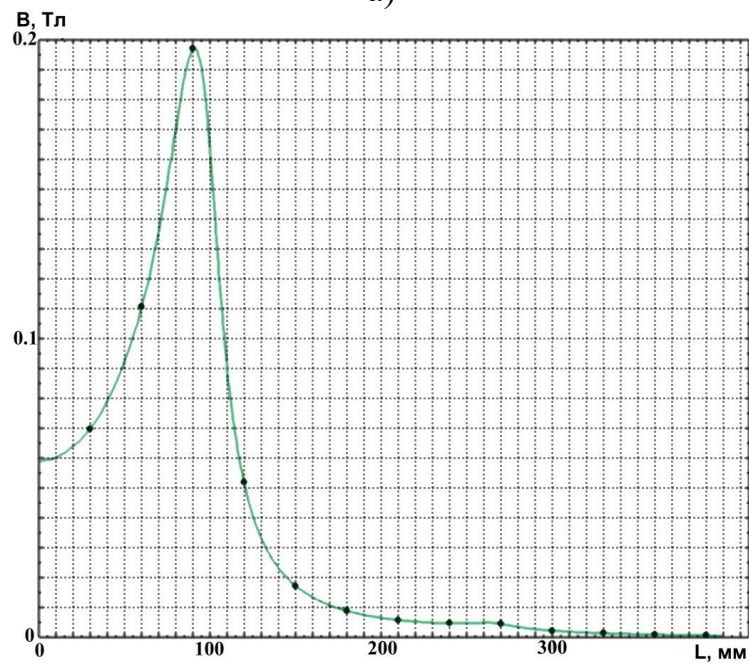
Исходя из полученной картины квазипеременного магнитного поля, необходимо центральную зону крышки, внутреннюю стенку криостата и подъемный стакан изготавливать, по возможности, из диэлектрических материалов.

Также из сопоставления чертежа активной зоны мотор-генератора и картины поля торцевого магнитного потока можно обнаружить, что в случае, если торцевые части обмотки находятся за пределами магнитов, то Φ_T не участвует в наведении ЭДС в якорной обмотке, поскольку не охватывает

секцию обмотки. Если торцевые части расположить в пределах магнитов, то ЭДС может существенно возрасти, пропорционально увеличению потока Φ_T .



а)

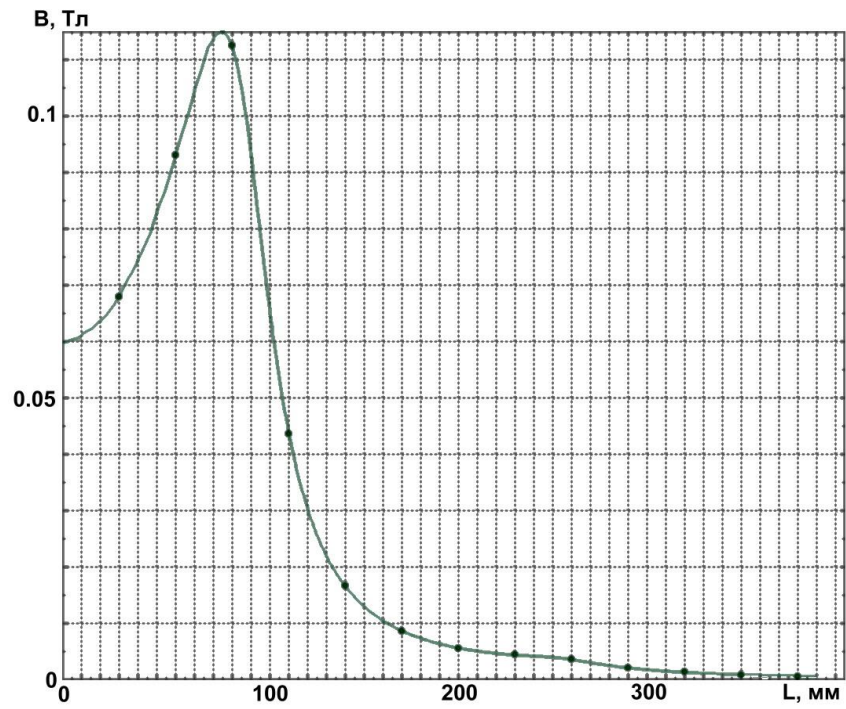


б)

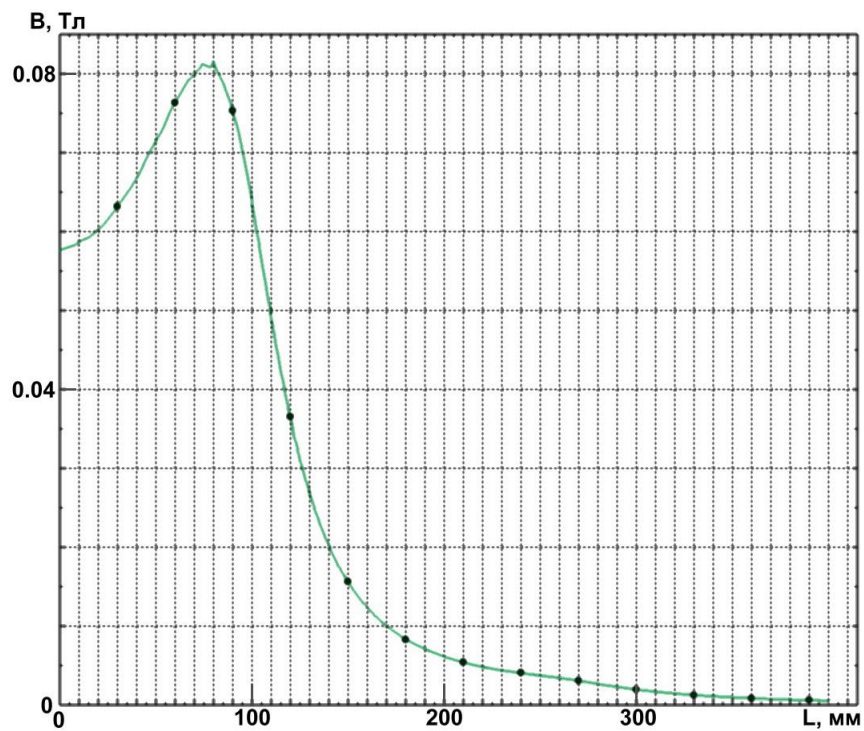
Рисунок 4.17-Распределение магнитных полей

(а — на поверхности обмотки статора;

б — на расстоянии 1 см от верхней поверхности маховика)



а)



б)

Рисунок 4.18-Распределение магнитных полей

(а — на расстоянии 2 см от верхней поверхности маховика;

б — на расстоянии 3 см от верхней поверхности маховика)

На рисунках 4.19, 4.20 приведены чертежи электрической машины и общий вид электромеханического накопителя

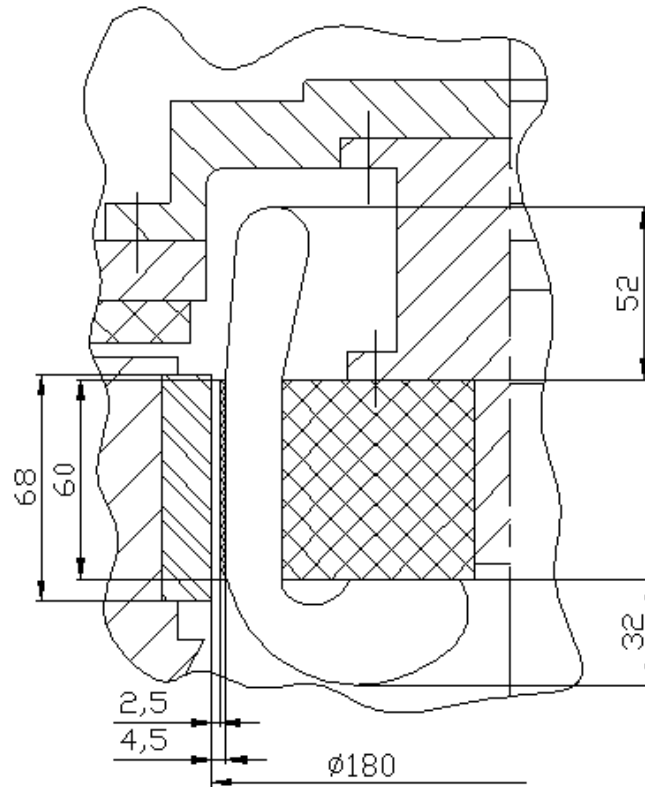


Рисунок 4.19-Эскиз активной зоны мотор-генератора

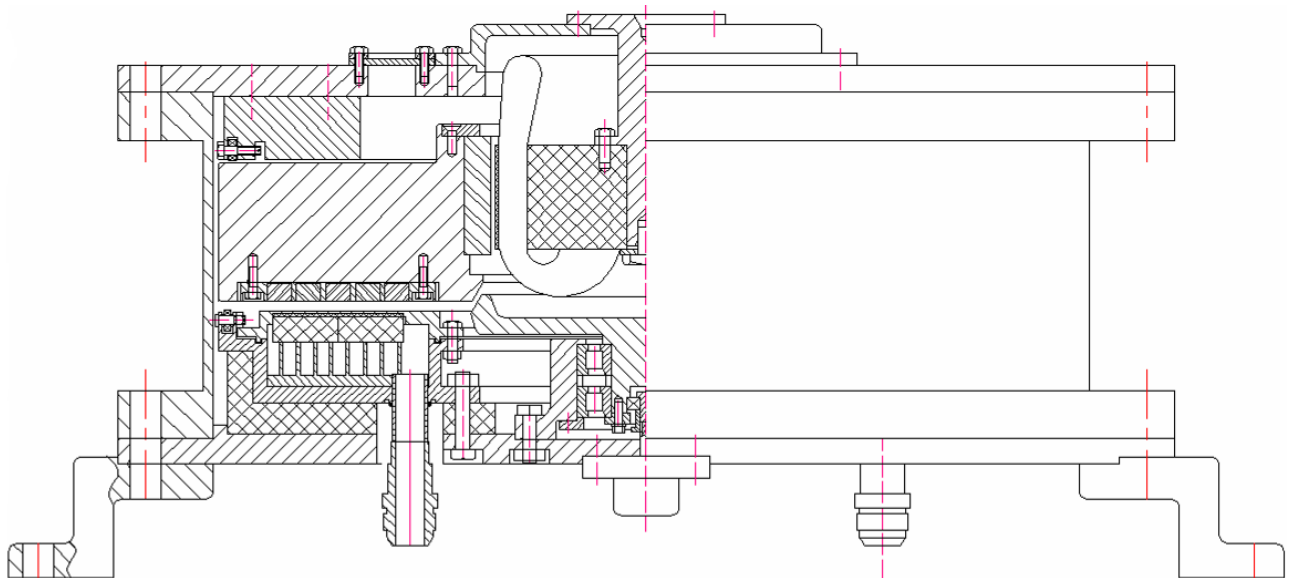


Рисунок 4.20-Общий вид ЭМН-0,5 МДж

4.6 Методика расчета аэродинамических потерь

Механические потери связаны с потерями в подшипниках, с трением вращающихся частей о воздух и в скользящих контактах, механическими потерями также являются вентиляционные (аэродинамические) потери. Аэродинамические потери зависят от конфигурации вращающейся детали, её частоты вращения и уровня давления.

Рассмотрим потери связанные, с трением вращающихся частей о воздух, при этом возможны два варианта, а именно ламинарное течение воздушных масс или турбулентное.

Ламинарное течение – упорядоченное течение жидкости или газа, при котором жидкость (газ) перемещается как бы слоями, параллельными направлению течения (наблюдается либо у очень вязких жидкостей, либо при течениях, происходящих с достаточно малыми скоростями, а также при медленном обтекании жидкостью тел малых размеров) [100].

Турбулентное течение – форма течения жидкости или газа, при которой их элементы совершают хаотичные движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию между слоями движущихся жидкости или газа. Из-за сложности пульсационных движений математическое описание процесса приходится искать лишь для осреднённых во времени величин. При турбулентном движении скорость в каждой точке беспорядочно меняется во времени, по величине и направлению, поэтому при турбулентном течении нет стационарности [101].

В качестве газообразной среды рассмотрим воздух. Необходимо рассчитать аэродинамические потери на трение о воздух при вращении маховика. Рассмотрим задачу по частям: рассмотрим в отдельности 2 цилиндра – внешний и внутренний, 2 половины диска (с учётом того, что размер одной половины диска можно было изменить). Причём каждый цилиндр (внутренний

и внешний) являются полыми, т.е. каждый из них состоит из 2 коаксиальных цилиндров: один с заданным радиусом, а другой с радиусом, большим чем заданный на величину воздушного промежутка (с учётом кожуха). Произведём расчёт зависимости момента сопротивления от числа Рейнольдса отдельно для каждого цилиндра и половин диска и сложим полученные зависимости. После расчёта суммарного момента сопротивления вычислим крутящий момент и оценим потери на трение о воздух. Сравним с моментом вращения вала, определив запас энергии и сделаем вывод, нужно ли откачивать воздух для создания вакуума в кожухе с целью уменьшения аэродинамических потерь и увеличения времени хранения запасённой энергии, что изменило бы конструкцию за счёт установки устройства откачки воздуха.

Для расчёта аэродинамических потерь необходимо задать частоту вращения вала, геометрию маховика (радиус внутреннего цилиндра, радиус внешнего цилиндра, высота цилиндра, радиус диска, толщина кожуха диска, ширина воздушного промежутка между цилиндрами), плотность воздуха, вязкость воздуха (при заданной температуре) [102].

При течении между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых внутренний вращается, а внешний покоится, возникает неустойчивое расслоение жидкости, так как частицы жидкости, находящиеся вблизи внутренней стенки, стремятся вследствие большой центробежной сил, переместится наружу [102].

Условие неустойчивости течения в кольцевом пространстве, следовательно и условие возникновения вихрей можно выразить при помощи *числа Тейлора* Ta в виде соотношения [102]:

$$Ta = \frac{U_i d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{R_i}} \geq 41,3$$

где d - ширина промежутка между цилиндрами, R_i и U_i - радиус и скорость внутреннего цилиндра.

При больших числах Рейнольдса $Re=322$ ($Ta=141$) и $Re=868$ ($Ta=387$) течение все еще остается ламинарным [103]. Только при $Re=3960$ ($Ta=1715$) развивается отчетливо выраженная турбулентность. Необходимо особо подчеркнуть, что проявление первых нейтральных вихрей при достижении предела устойчивости и последующее нарастание этих вихрей при несколько больших числах Тейлора отнюдь не означает, что течение уже стало турбулентным. Напротив, оно по-прежнему остается еще упорядоченным и ламинарным. Переход в турбулентную форму происходит только после того, как число Тейлора, следовательно, и число Рейнольдса становится значительно больше предела устойчивости. Существует равновесие между переносом энергии из основного течения во вторичное течение и диссипацией энергии во вторичном течении вследствие трения. Перенос энергии из основного течения во вторичное течение приводит к сильному увеличению момента сопротивления внутреннего цилиндра [104].

$$C_M = \frac{M_i}{\frac{\pi}{2} \rho U_i^2 R_i^2 h},$$

где U_i и R_i – скорость и радиус внутреннего цилиндра, а h – высота внутреннего цилиндра.

Коэффициент сопротивления для цилиндра обратно пропорционален числу Тейлора [105].

Графически эта зависимость будет выглядеть как гипербола. (см. рисунок 4.21)

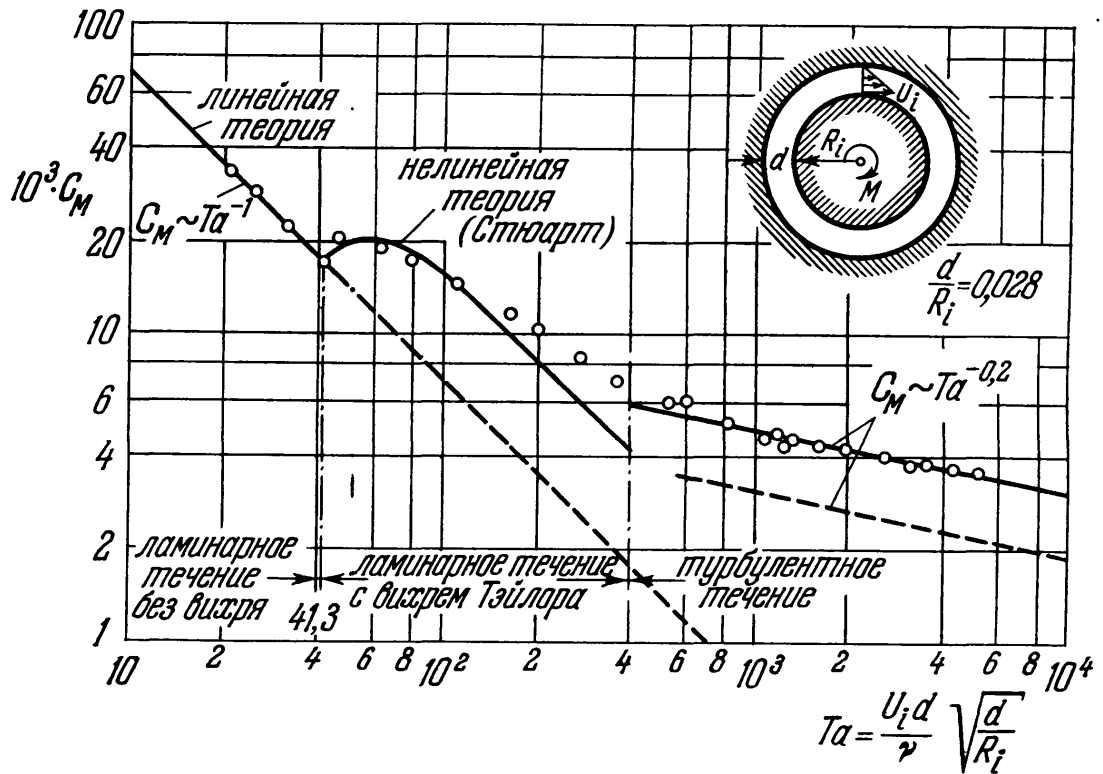


Рисунок 4.21-Особенности расчёта коэффициентов момента сопротивления для вращающегося диска

При числах Рейнольдса

$$Re = \frac{UR}{\nu} > 3 \cdot 10^5$$

где R – есть радиус диска, а $U = \omega R$ – окружная скорость диска, оно всегда турбулентное. Слой жидкости, находящийся в непосредственной близости от диска, увлекается диском и под действием центробежной силы отбрасывается наружу. Следовательно, скорость в пограничном слое имеет не только окружную составляющую, но и радиальную. Отбрасываемая наружу жидкость заменяется жидкостью, притекающей в осевом направлении. Простая оценка, основанная на рассмотрении равновесия между силами трения и центробежной силой, позволяет показать, что при ламинарном течении толщина пограничного слоя пропорциональна $\delta = \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$, следовательно, не зависит от радиуса, и что

момент сопротивления M , пропорциональный $\mu R^3 U / \delta$, определяется

соотношением $M \approx \mu R^3 U \left(-\frac{UR}{\nu}\right)^{-1/2}$ [106]. Момент сопротивления принято выражать через коэффициент момента сопротивления, который для диска, смоченного с обеих сторон, определяется посредством равенства $C_M = \frac{2M}{\frac{\rho}{2} \omega^2 R^5}$ [107].

Особенно простое решение получается в том случае, когда течение около вращающегося диска ламинарно и ширина щели между кожухом и диском очень мала. Течение остается ламинарным при числах Рейнольдса $Re < 10^5$ ширина щели S меньше толщины пограничного слоя, то окружная скорость распределяется в промежутках между вращающимся диском и стенками неподвижного кожуха так же, как и при течении Куэтта, т. е. линейно, и поэтому касательным напряжением на расстоянии r от оси будет $\tau = \frac{r\omega\mu}{s}$

Момент сил трения для одной стороны диска равен $M = 2\pi \int_0^R \tau^2 dr = \frac{\pi}{2} \frac{\omega\mu R^4}{s}$, а для обеих сторон — $2M = \frac{\pi\omega R^4 \mu}{s}$

Следовательно, для коэффициента момента сил трения, определяемого равенством, мы имеем формулу $C_M = 2\pi \frac{R}{s} \frac{1}{Re}$ [108]

При большой ширине щели между кожухом и диском течение около диска имеет существенно иной характер. Если ширина щели между кожухом и диском в несколько раз больше толщины пограничного слоя, то на каждой стороне диска и на каждой стенке кожуха образуется пограничный слой. Газ в пограничных слоях на вращающемся диске отбрасывается под действием центробежной силы наружу, а в пограничных слоях на стенке неподвижного кожуха, наоборот, движется снаружи к центру. Между каждой парой пограничных слоев находится слой газа, в котором радиальная скорость незначительна и который вращается с угловой скоростью, равной приблизительно половине угловой скорости диска.

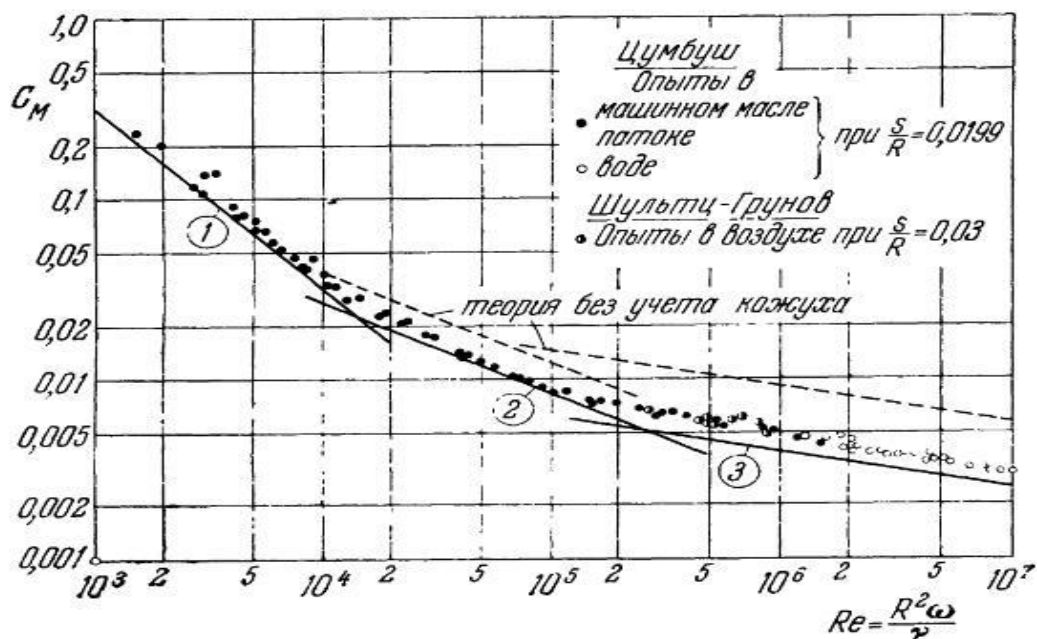


Рисунок 4.22- Зависимость коэффициента момента сопротивления от числа Рейнольдса

Рисунок 4.22 показывает, что сопротивление трения диска, вращающегося внутри кожуха. Кривая (1) соответствует зависимости для ламинарного течения; кривая (2) — зависимости для ламинарного течения; кривая (3) — зависимости для турбулентного течения. Для сравнения штрихами отмечены теоретические кривые для «свободного» диска [109].

При ламинарном течении для момента сил трения диска, смоченного с обеих сторон, справедлива формула $2M = 1.334\mu R^4 \omega \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ [110].

Следовательно, коэффициент момента сопротивления равен

$$C_M = 2,67Re^{-1/2} \quad (4.2)$$

Результаты, даваемые формулой (4.2), совпадают с измерениями приблизительно до $Re = 2 \cdot 10^5$.

При числах Рейнольдса $Re > 3 \cdot 10^5$ течение около диска, вращающегося в кожухе, становится турбулентным. Для распределения скоростей в окружном направлении принят закон степени 1/7 [111]. При турбулентном течении жидкость между каждой парой пограничных слоев вращается, как и при

ламинарном течении, с угловой скоростью, равной половине угловой скорости вращения диска. Коэффициент момента сопротивления может быть вычислен по формуле $C_m = 0,0622 Re^{-1/5}$ (турбулентное течение) [112]. Для течения около диска, вращающегося в кожухе, особенно примечательно следующее обстоятельство: если не считать случая очень малой ширины щели между диском и кожухом, то момент сил трения, совершенно не зависит от ширины кожуха. Если мы сравним момент сил трения для диска в кожухе с аналогичным моментом для «свободного» диска, то увидим, что для свободного диска этот момент больше, чем для диска в кожухе. Причина меньшей величины момента сил трения в кожухе объясняется тем, что жидкость между пограничными слоями с каждой стороны диска вращается с угловой скоростью, в два раза меньшей, чем угловая скорость диска. Вследствие этого здесь градиент окружной скорости в направлении, перпендикулярном к диску, приблизительно в два раза меньше, чем в случае свободного диска, и именно поэтому силы трения для диска в кожухе меньше, чем для «свободного» диска. Методика расчета потерь на трение маховика приведена в Приложении А. На рисунках А7, А8 приведены результаты расчета зависимостей полного момента сопротивления от угловой скорости маховика.

4.7 Разработка конструкции ЭМН

Расчет параметров магнитного ВТСП подвеса и оптимизация его конструкции. В качестве базовых вариантов были выбраны конструкции подвеса с 3 и 5 постоянными магнитами. Геометрия расчетных моделей и картины распределения магнитных полей для случая 3-х и 5-ти постоянных магнитов показаны на рисунках 4.23 и 4.24 соответственно.

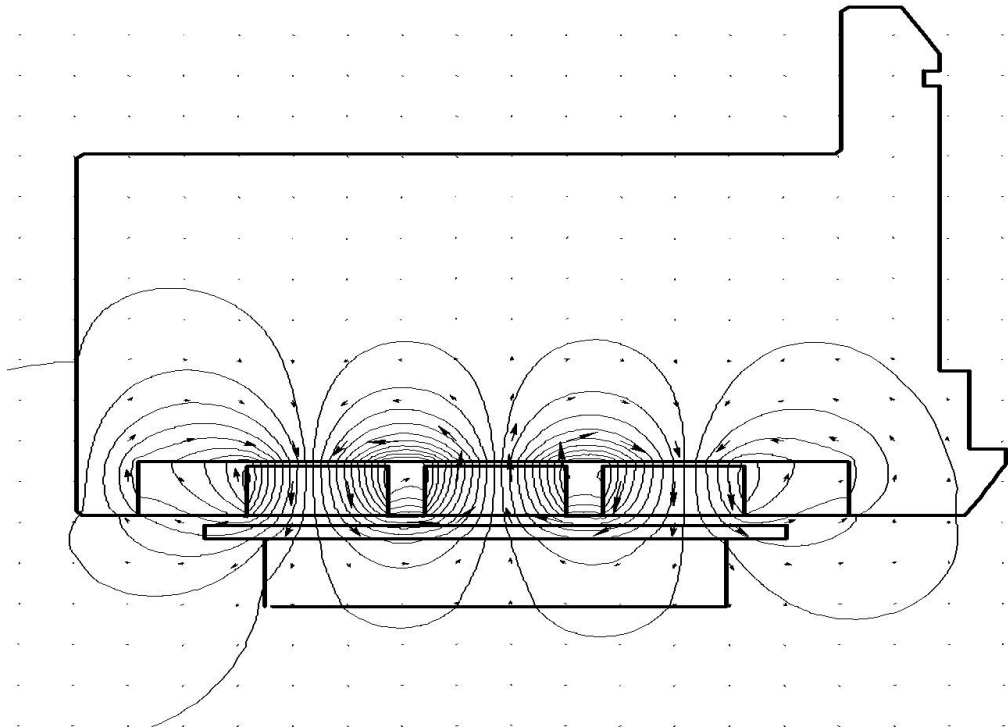


Рисунок 4.23-Картина распределения магнитных полей в системе ВТСП магнитного подвеса с тремя постоянными магнитами.

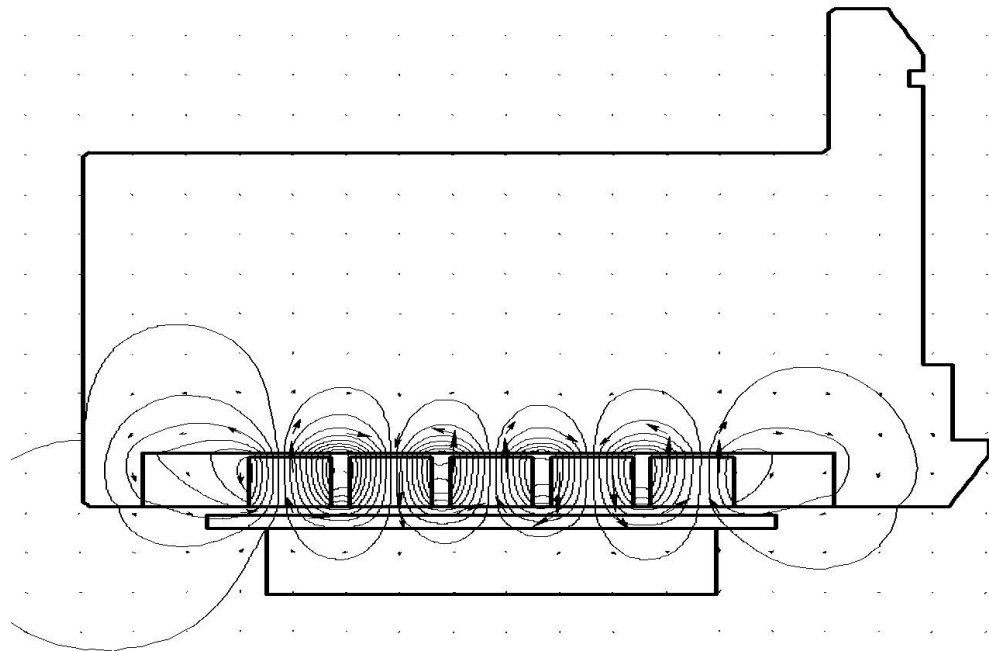


Рисунок 4.24-Картина распределения магнитных полей в системе ВТСП магнитного подвеса с пятью постоянными магнитами.

На рисунке 4.25 показаны зависимости вертикальной силы левитации в зависимости от вертикального смещения подвеса для различных значений начального зазора вмораживания поля. Из рисунка 4.25 видно, что преимущество имеет конструкция с 5-ю магнитами при относительно небольших зазорах замораживания (6-9 мм).

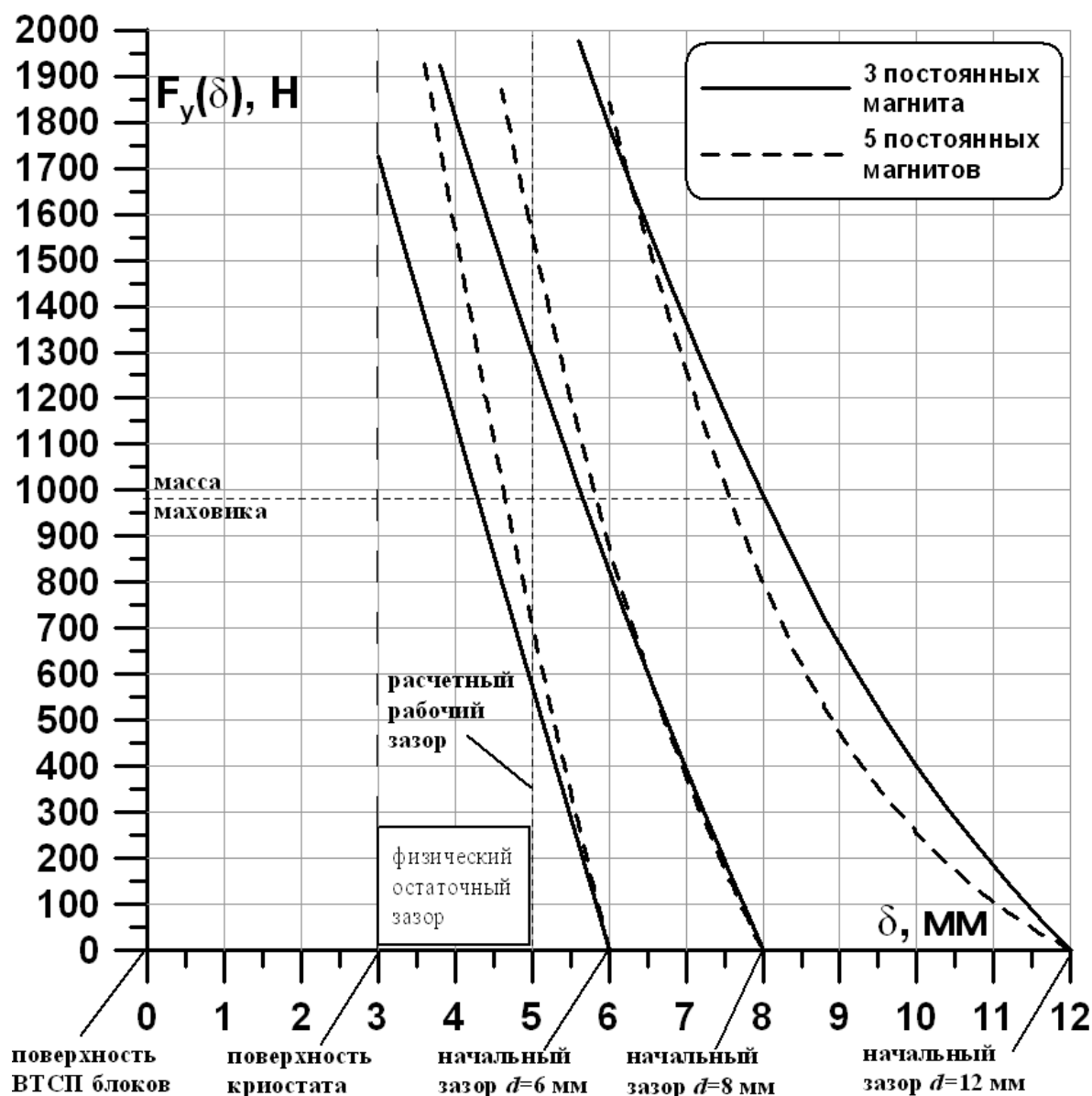


Рисунок 4.25-Зависимости вертикальной силы левитации в зависимости от вертикального смещения подвеса для различных значений начального зазора вмораживания поля.

Для оценки «снизу» величины возвратной силы при боковом смещении маховика были проведены расчеты при нулевом смещении маховика в вертикальной плоскости (без учета просадки за счет его веса). Кривые возвратных сил показаны на рисунке 4.26. Видно, что при небольших зазорах вмораживания конструкция с 5-ю магнитами обеспечивает большие или сопоставимые возвратные силы.

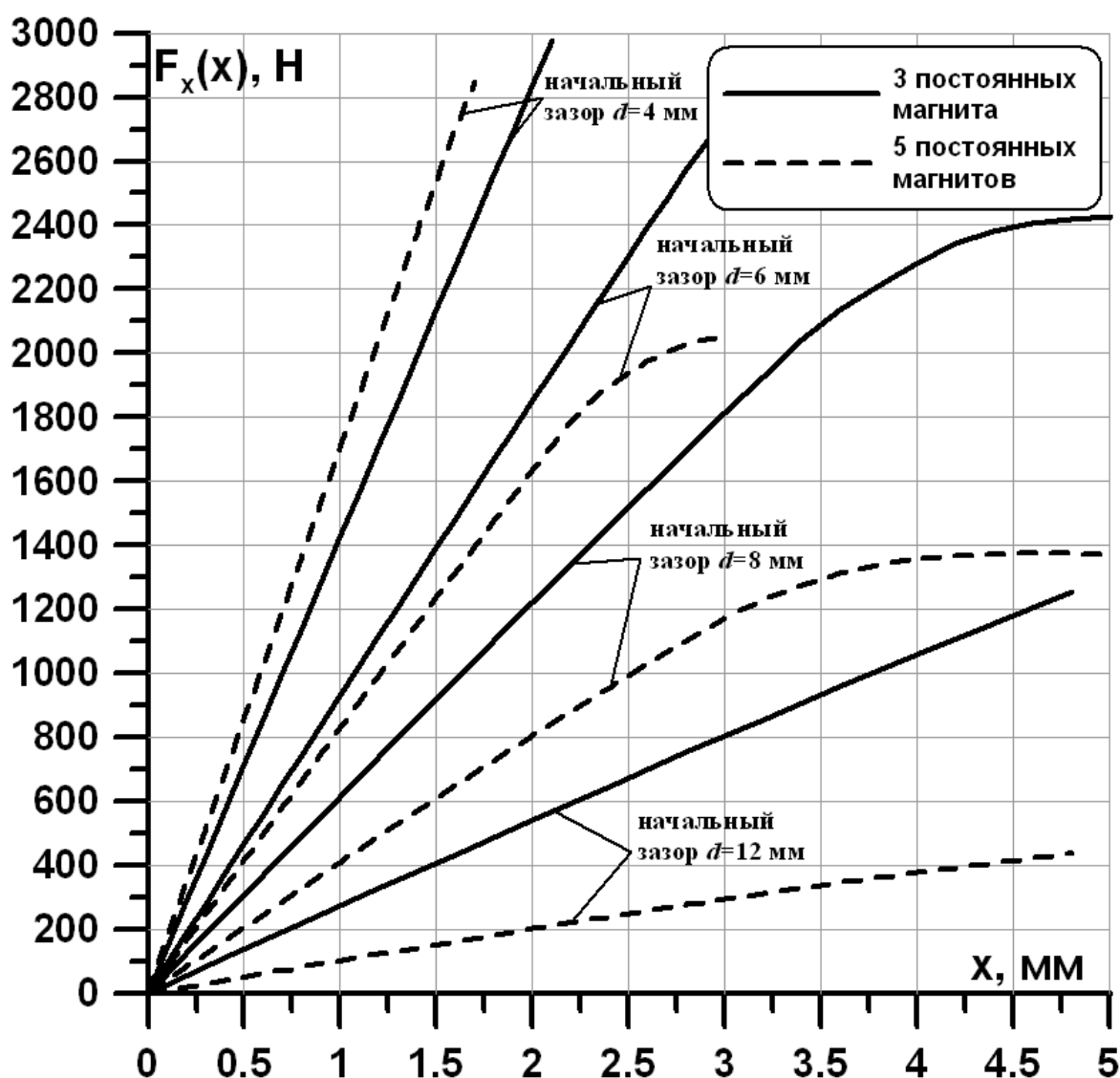


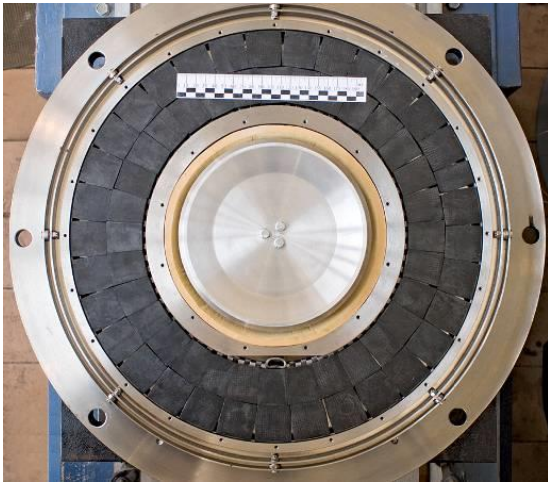
Рисунок 4.26-Зависимости боковой возвратной силы в зависимости от горизонтального смещения подвеса для различных значений начального зазора вмораживания поля.

На основе проделанных расчетов в качестве базовой конструкции была выбрана система на основе 5-ти постоянных магнитов.

4.8 Экспериментальные исследования ЭМН

По результатам созданных методик был спроектирован, изготовлен и испытан ЭМН-0,5 МДж.

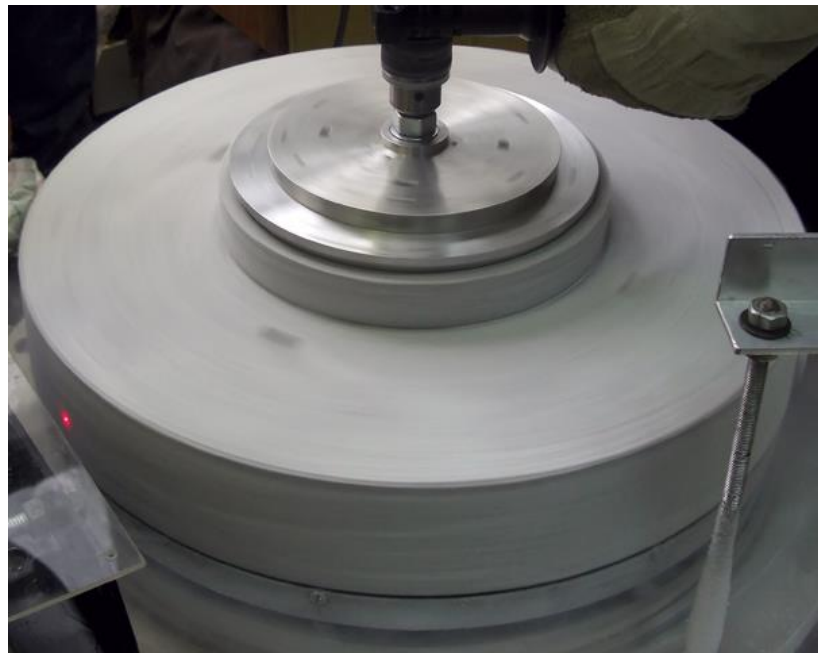
На рисунке 4.27 представлены: фотографии криостата с массивными ВТСП элементами иттриевой керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_{6-7}$ - (а), маховика с чередующимися кольцевыми рядами постоянных магнитов $Nd-Fe-B$ - (б) и процесс испытания левитации маховика - (в).



а



б



в

Рисунок 4.27-Элементы ЭМН-0,5 МДж

А, - криостат с элементами ВТСП керамики,

Б, - маховик,

В, - экспериментальные исследования подвеса.

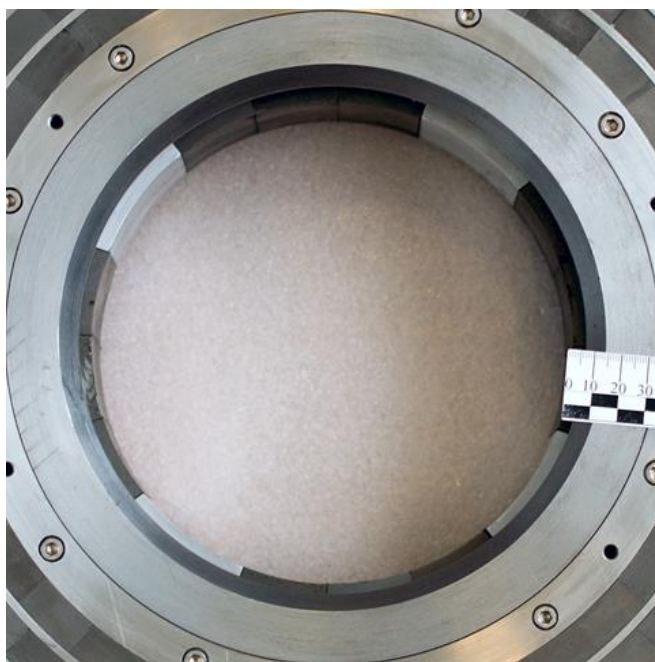
Результаты испытаний приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Левитационные характеристики магнитного ВТСП подвеса

Параметры	Измеренные значения
Величина гарантированного осевого зазора, мм	3
Масса маховика, кг	105
Допустимые радиальные смещения, мм	1

Из результатов экспериментальных исследований видно, что магнитный ВТСП подвес полностью соответствует проектным параметрам и обеспечивает бесконтактную устойчивость маховика ЭМН-0,5 МДж.

Испытания 4-х полюсного мотор-генератора с постоянными магнитами и немагнитным 3-х фазным якорем. На рисунке 4.28 представлены ротор - (а) электрической машины с постоянными магнитами из $Nd-Fe-B$, закрепленными на маховике ЭМН-0,5 МДж и неподвижный немагнитный якорь, обеспечивающий отсутствие магнитных потерь с 3-х фазной обмоткой - (б).



а



б

Рисунок 4.28-Мотор-генератор ЭМН-0,5 МДж

А, - ротор,

Б, - статор.

Испытания мотор-генератора проводились с использованием подшипниковой опоры без активации магнитного ВТСП подвеса.

Результаты испытаний начальных пусковых режимов вращения ЭМН ВТСП 0,5 представлены в таблице 4.5:

Таблица 4.5-Пусковые режимы вращения маховика ЭМН

Параметры	Измеренные значения
Пусковой ток, А	8-12
Номинальное напряжение, В	220
Номинальная частота, Гц	200
Время выхода на номинальный режим хранения энергии (из положения покоя), сек	600

Разработанная конструкция мотор-генератора с минимальными магнитными потерями на стационарных режимах вращения маховика обеспечивает начальный этап запуска ЭМН-0,5 МДж.

Также были проведены комплексные испытания ЭМН-0,5 МДж в рабочих режимах работы при плавном разгоне маховика и его торможении при генераторном режиме ЭМН. На рисунке 4.29 представлен общий вид ЭМН-0,5 МДж, после сборки.

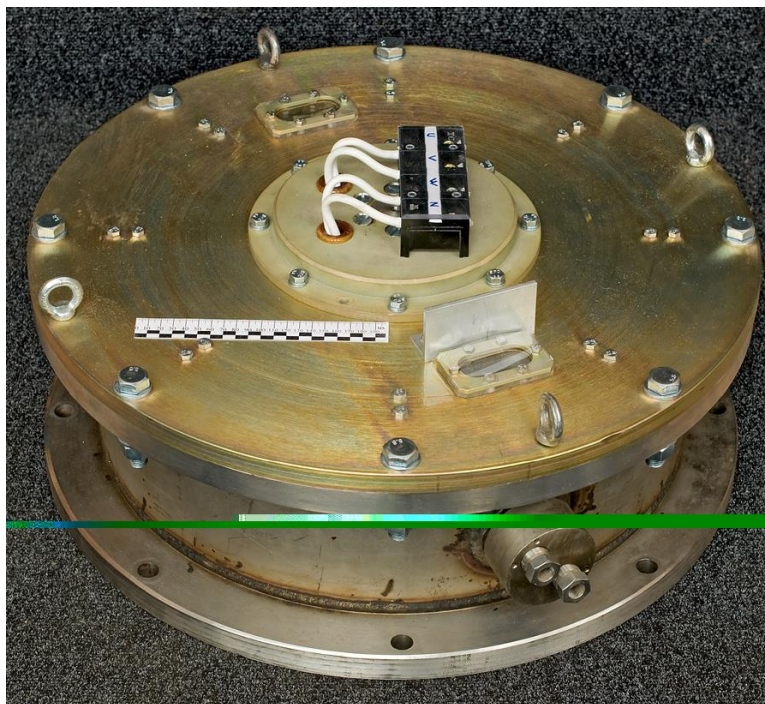


Рисунок 4.29 – ЭМН-0,5 МДж в сборе.

Результаты комплексного испытания ЭМН-0,5 МДж представлены в таблице 4.6:

Таблица 4.6-Результаты комплексного испытания

Параметры	Измеренные значения
Масса маховика, кг	105
Максимально запасаемая энергия маховика, МДж	0,5
Рабочий зазор ВТСП магнитного подвеса, мм	3,2
Напряжение питания электрического двигателя, В	220/380
Номинальный ток двигателя, А	до 10
Частота вращения маховика, мин ⁻¹	6000
Максимальная мощность нагрузки, кВт	9
Время выбега маховика при работе на нагрузку 9 кВт, сек	60

Разработанная конструкция электромеханического накопителя энергии с ВТСП магнитным подвесом и мотор-генератором с 3-х фазной обмоткой на

неподвижном якоре и индуктором на постоянных магнитах позволяет накапливать энергию $\sim 0,5$ МДж и обеспечивает устойчивую работу энергосистемы как в режиме накопления и хранения энергии, так и в режиме питания нагрузки.

На рисунке 4.30 изображена характеристика захлаживания ВТСП подвеса.

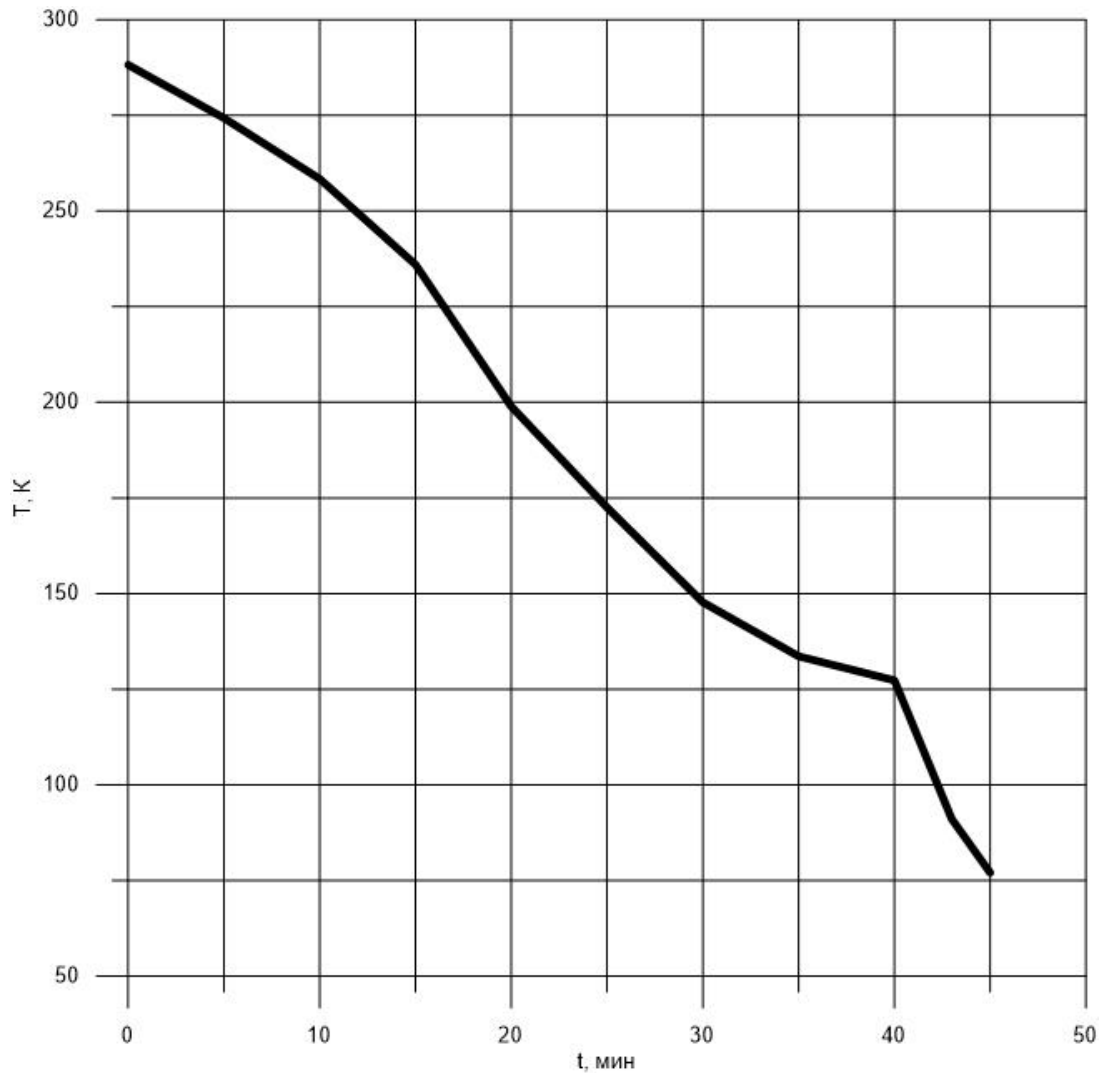


Рисунок 4.30 - Падение температуры ВТСП в криостате во время захлаживания

На рисунке 4.31 изображен график выбега ЭМН с магнитным ВТСП подвесом на холостом ходу.

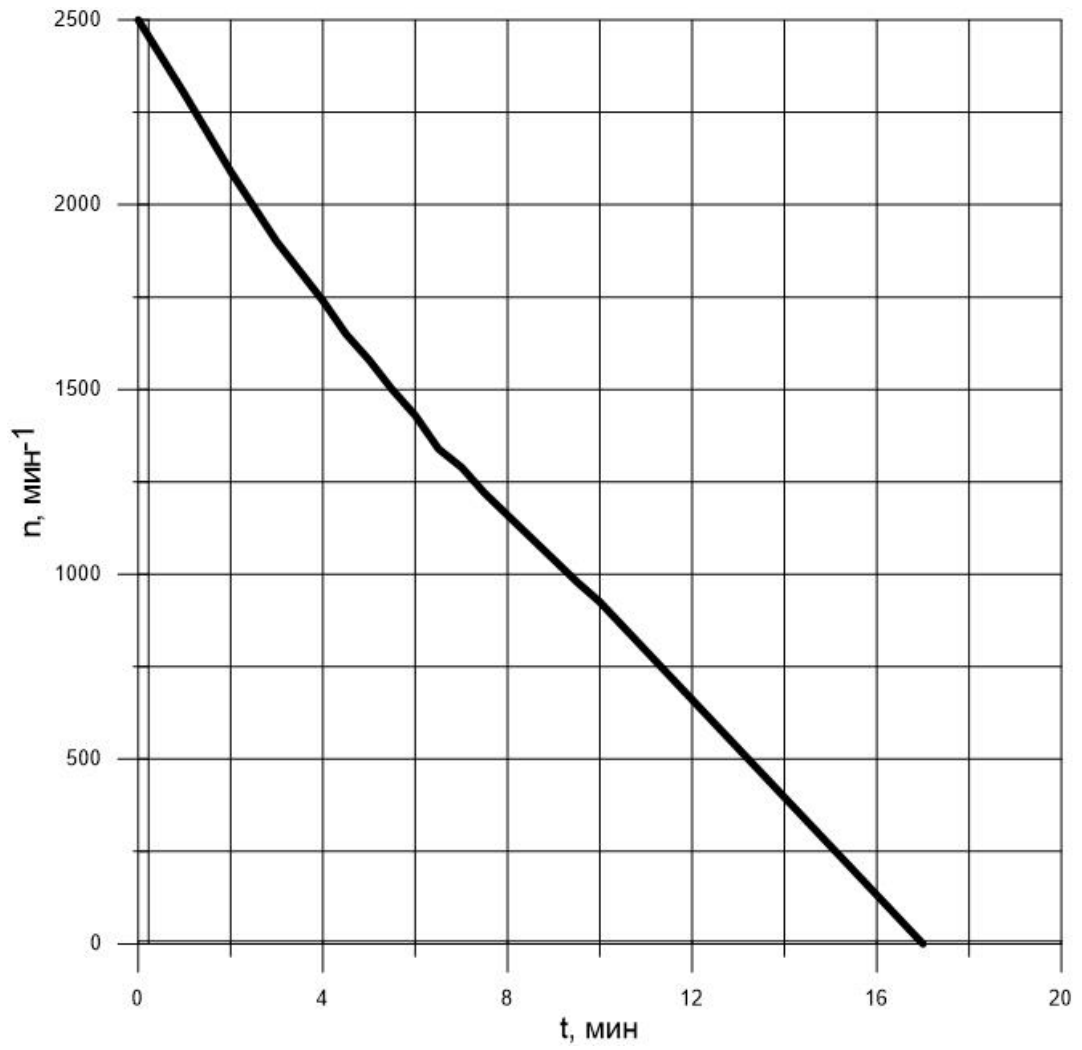


Рисунок 4.31 - Падение частоты вращения маховика ЭМН с течением времени

Выводы по главе:

1. Показано, что при расчете параметров ЭМН необходимо учитывать аэродинамические потери и гистерезисные потери, т. к. данные потери сильно снижают КПД ЭМН и время хранения запасенной энергии.
2. На основе инженерной методики расчета аэродинамических потерь ЭМН, показано, что аэродинамические потери являются незначительными для маховиков дисковой формы и очень существенны для маховиков цилиндрической формы большой высоты, со значительным расстоянием от вращающейся части, до неподвижного кожуха, что приводит к сильному разогреву маховика, лавинному возрастанию момента сопротивления и снижению КПД устройства.
3. Проведенные экспериментальные исследования маломасштабной модели ЭМН доказали необходимость использования немагнитной электрической машины в качестве мотор-генератора КНЭ, в противном случае, невозможно обеспечить длительное хранение запасенной энергии без подпитки из-за гистерезисных потерь и вихревых токов.
4. Из картины распределения магнитных полей в системе ВТСП магнитного подвеса, видно, что конструкция с пятью рядами постоянных магнитов имеет преимущество, при относительно небольших зазорах «замораживания» маховика (6 – 9 мм).
5. Показано, что при расчете якоря мотор-генератора, нужно руководствоваться необходимостью уменьшения размеров лобовых частей обмотки, а следовательно, делать выбор в пользу варианта якоря с меньшим количеством пазов, при обеспечении необходимых характеристик мотор-генератора.

5. РАЗРАБОТКА, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КНЭ С ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ 5 МДЖ

Кинетический накопитель энергии (КНЭ) является одной из частей электромеханических накопителей энергии (ЭМН), которые применяются в качестве аварийных источников питания, вспомогательных источников питания, необходимого при пиковых нагрузках на электросеть.

Основные параметры макетного образца ЭМН: максимальный уровень запасаемой энергии не менее 5 МДж, выходная мощность мотор-генератора 100 кВт при частоте вращения маховика 8000-5000 об/мин, диапазон выходного напряжения 350-150 В (без использования инвертора на выходе), частота напряжения 50 Гц (с использованием инвертора на выходе), время разряда 50 с, время заряда 300 с, масса маховика 650 кг,

Главной конструктивной особенностью макетного образца ЭМН является магнитный подвес с использованием высокотемпературных сверхпроводников, стоит отметить, что воздушный зазор между маховиком и криостатом до 5 мм, как в статическом, так и в динамическом режиме.

В данной главе приведено описание, основные параметры, конструктивные особенности ЭМН с запасенной энергией 5 МДж., а также результаты экспериментальных исследований макетного образца с применением вакуумирования корпуса и без.

5.1 Описание конструкции ЭМН

Технические характеристики разрабатываемого ЭМН с магнитным ВТСП подвесом близки зарубежным аналогами и по величине накопленной энергии, и по выходной мощности [113]. Отечественные ЭМН на сопоставимые параметры в настоящее время отсутствуют.

Наиболее ответственным элементом ЭМН является маховик, который обеспечивает энергоемкость, надежность и безопасность эксплуатации ЭМН.

Поэтому выбору конструктивной схемы и размеров маховика уделялось особое внимание. Конструктивная схема маховика выбиралась из условия наиболее эффективного использования его массы.

Это условие выполняется, когда вся масса маховика распределена на максимальном удалении от оси его вращения, т.е. когда он выполняется в виде трубы или обода (см. главу 3). Диаметр и толщина трубы и обороты выбираются из условий обеспечения необходимой прочности. Длина трубы обычно выбирается примерно равной диаметру. При этом необходимо учитывать, что коэффициент запаса прочности должен быть не менее 2.

На основании предварительных оценок была выбрана стальная труба с наружным диаметром 545 мм, толщиной 30 мм и длиной 650 мм. Проведенные расчеты показали, что заданную запасенную энергию 5 МДж выбранная стальная труба, имеет при оборотах 6700 об/мин. Прочностные расчеты показали, что коэффициент запаса прочности на этих оборотах составляет 1.2, что недостаточно. Поэтому было принято решение обмотать трубу бандажом из графитоволокна [114]. Расчеты показали, что при бандаже 10 мм максимальное напряжение в стальной трубе уменьшаются в два раза и допустимые обороты увеличиваются до 7000 об/мин, а при бандаже 25 мм обороты можно увеличить до 8000 об/мин. При этом накопленная энергия увеличивается до 7.3 МДж.

На валу маховика установлен ротор мотор-генератора. Мотор-генератор синхронного типа выполняет две функции: разгоняет маховик до номинальных оборотов и в режиме выдачи энергии тормозит его, преобразуя кинетическую энергию маховика в электрическую энергию. Ротор мотор-генератора выполняется на основе постоянных магнитов из РЗМ [115].

Статор может выполняться в двух вариантах в зависимости от назначения и режимов работы ЭМН. При режиме «заряд-разряд», когда время хранения энергии незначительно, статор выполняется как обычно с ферромагнитопроводом. В случае необходимости длительного хранения (например, при работе в режиме аварийного источника питания) статор целесообразно изготавливать безжелезным, для сокращения электромагнитных

потерь в статоре и увеличении времени хранения запасенной энергии накопителя.

В верхней и нижней частях вала маховика установлены два цилиндрических магнитных ВТСП подвеса. На валу маховика закрепляется ротор подвеса, который состоит из набора колец постоянных магнитов, между которыми установлены кольца из стали. Кольца намагничиваются вдоль оси знакопеременно.

Статоры подвесов крепятся на специальных фланцах и состоят из керамических ВТСП блоков, помещенных в криостат и охлаждаемых жидким азотом или с помощью криокулера.

ВТСП подвесы предназначены для частичной компенсации веса маховика и вала и обеспечения его радиальной и осевой устойчивости в рабочих режимах. Еще одно важное назначение ВТСП опор — это демпфирование колебаний маховика, которые могут возникать по разным причинам (например, при переходе через критические обороты, при землетрясениях и др.).

Под центральным диском установлена магнитная опора, которая выполнена в виде двух осесимметричных кольцевых магнитов, намагниченных встречно. Опора предназначена для выполнения двух функций: компенсации веса маховика вместе с ВТСП подвесами и предотвращения аварийной ситуации в случае выхода из строя одного ВТСП подвеса. При этом жесткость системы уменьшится, но ее должно хватить для безаварийного останова маховика.

В верхнем и нижнем концах вала установлены опоры на основе конических подшипников (см. рисунок 5.1). Кольца подшипников закрепляются на валу, а кольца с роликами устанавливаются в опорах на фланцах ЭМН. Нижняя опора подвижная и может перемещаться в вертикальном направлении.

Привод опоры может быть пневматическим, гидравлическим, винтовым и др. опоры предназначены для предварительного центрирования маховика и удержания маховика при выключении ЭМН плановом или аварийном режимах.

Верхний и нижний фланцы соединяются корпусом. Между корпусом и маховиком установлен защитный экран ребристо сотовой конструкции, предназначенный для гашения энергии маховика при его аварийном разрушении (см. рисунок 5.1). Такой экран позволяет существенно уменьшить толщину корпуса, при сохранении гарантии безопасности.

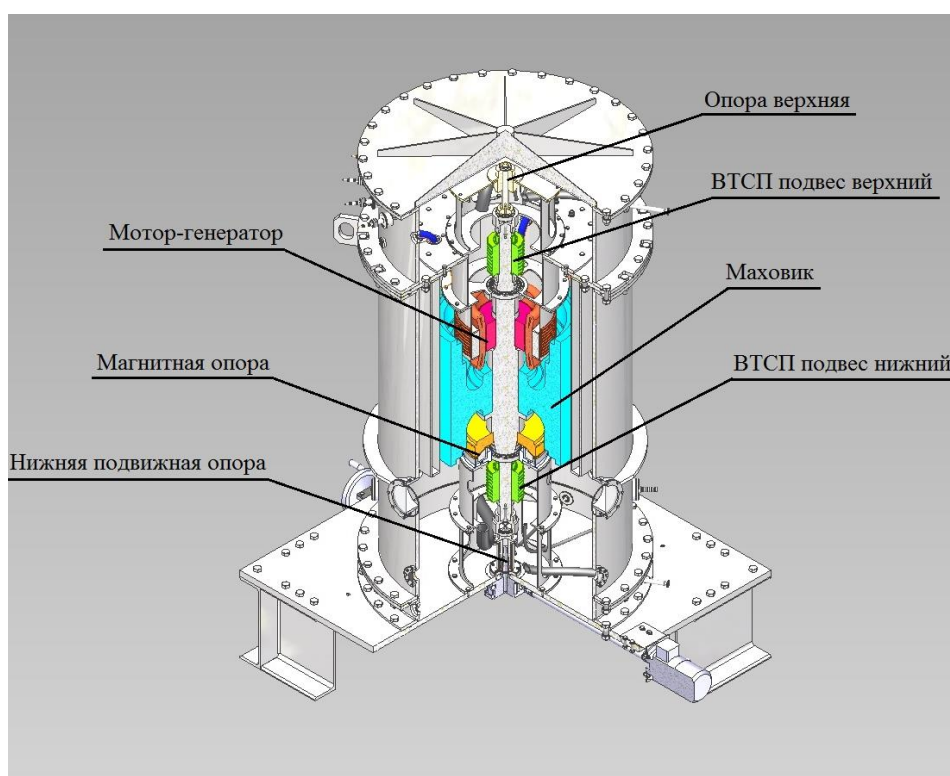


Рисунок 5.1–Общий вид ЭМН 5 МДж

Объектом испытаний является опытный образец кинетического накопителя энергии с магнитным подвесом на основе высокотемпературных сверхпроводников с запасенной энергией не менее 5 МДж. Испытуемый ЭМН представляет собой конструкцию с вертикальной осью вращения маховика. В качестве мотор-генератора выбрана синхронная шестиполюсная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов, работающая в двигательном режиме при накоплении кинетической энергии (заряде) и в генераторном режиме при отдаче накопленной энергии (разряде). Подвес маховика осуществляется двумя цилиндрическими магнитными ВТСП подвесами,

находящимися в верхней и нижней частях вала маховика, и магнитной опорой на постоянных магнитах.

Основные технические характеристики разработанного опытного образца ЭМН приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1-Технические характеристики опытного образца ЭМН

Наименование параметра, размерность	Значение
Запасаемая энергия, МДж	5,0
Выходная мощность, кВт	100
Частота питающего напряжение, Гц	300 – 400
Диапазон выходного напряжения, В	150 – 350
Частота выходного напряжение с использованием инвертора, Гц	50
Время заряда, с	300
Время разряда, с	50

В состав изделия входит:

- маховик ЭМН;
- магнитный подвес на основе ВТСП;
- магнитная опора на постоянных магнитах;
- мотор-генератор;
- системы вакуумирования, измерения и криообеспечения.

Конструктивные требования:

– магнитный подвес ЭМН выполнен с использованием массивных ВТСП материалов;

– внешние поверхности ЭМН находятся в тепловом контакте с окружающей средой.

Общий вид разработанного электромеханического накопителя энергии с магнитным ВТСП подвесом представлен на рисунке 5.2.

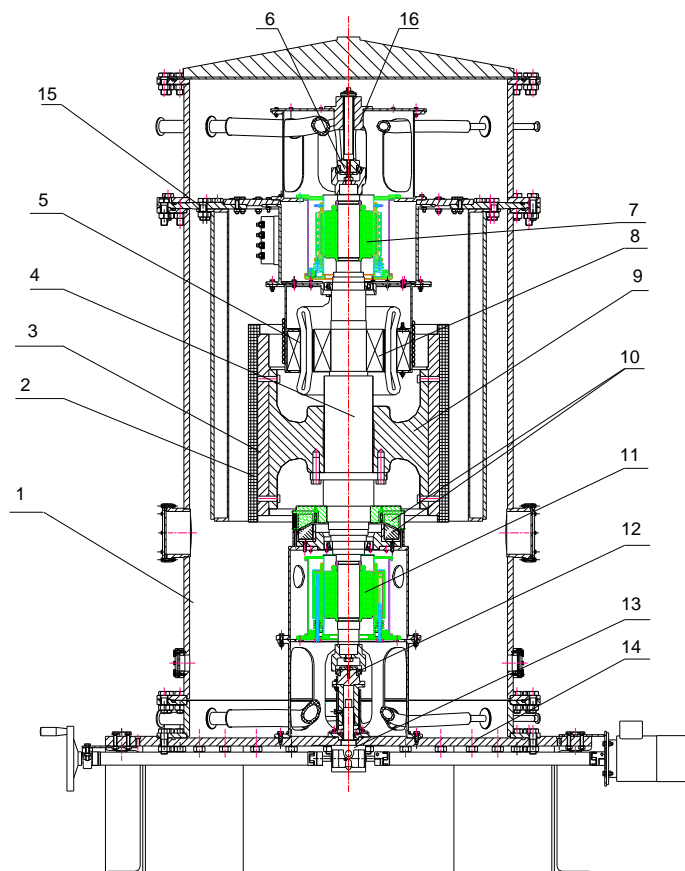


Рисунок 5.2-Конструкция ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасенной энергией 5 МДж

1 - корпус, 2 - бандаж, 3 - стальная труба, 4 - вал, 5 - статор мотор-генератора, 6 - опора верхняя, 7- верхний ВТСП подвес, 8- ротор мотор-генератора, 9- центральный диск, 10- магнитная опора, 11- нижний ВТСП подвес, 12 - опора нижняя подвижная, 13 – домкрат, 14 - фланец нижний, 15- защитный экран, 16- фланец верхней опоры.

На рисунке 5.3 представлена фотография опытного образца ЭМН при проведении экспериментальных исследований.



Рисунок 5.3-Опытный образец ЭМН с магнитным ВТСП подвесом при проведении испытаний

5.2 Описание экспериментального стенда для исследования ЭМН

На рисунке 5.5 приведена электрическая принципиальная схема испытательного стенда зоны испытаний опытного образца ЭМН с магнитным ВТСП подвесом. Кинетический накопитель энергии подключается к 3-фазной сети 380/220 В через преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Конструктивно преобразователь построен из двух модулей. Первым модулем является серийный преобразователь частоты мощностью 45 кВт ATV71HD45D4, а второй модуль — это дополнительный автономный диодно-транзисторный инвертор напряжения мощностью 38 кВт (макс. 130 кВт) VW3A7208.

Первый модуль обеспечивает разгон (т.е. заряд) накопителя, передавая ему энергию из питающей сети, а второй, включённый параллельно диодному выпрямителю первого модуля, используется при разряде накопителя для передачи энергии из звена постоянного тока преобразователя в питающую сеть 380/220 В. Для уменьшения высших гармонических составляющих,

обусловленных этим методом, на выходе каждого инвертора должен быть включен 3-фазный индуктивный фильтр.

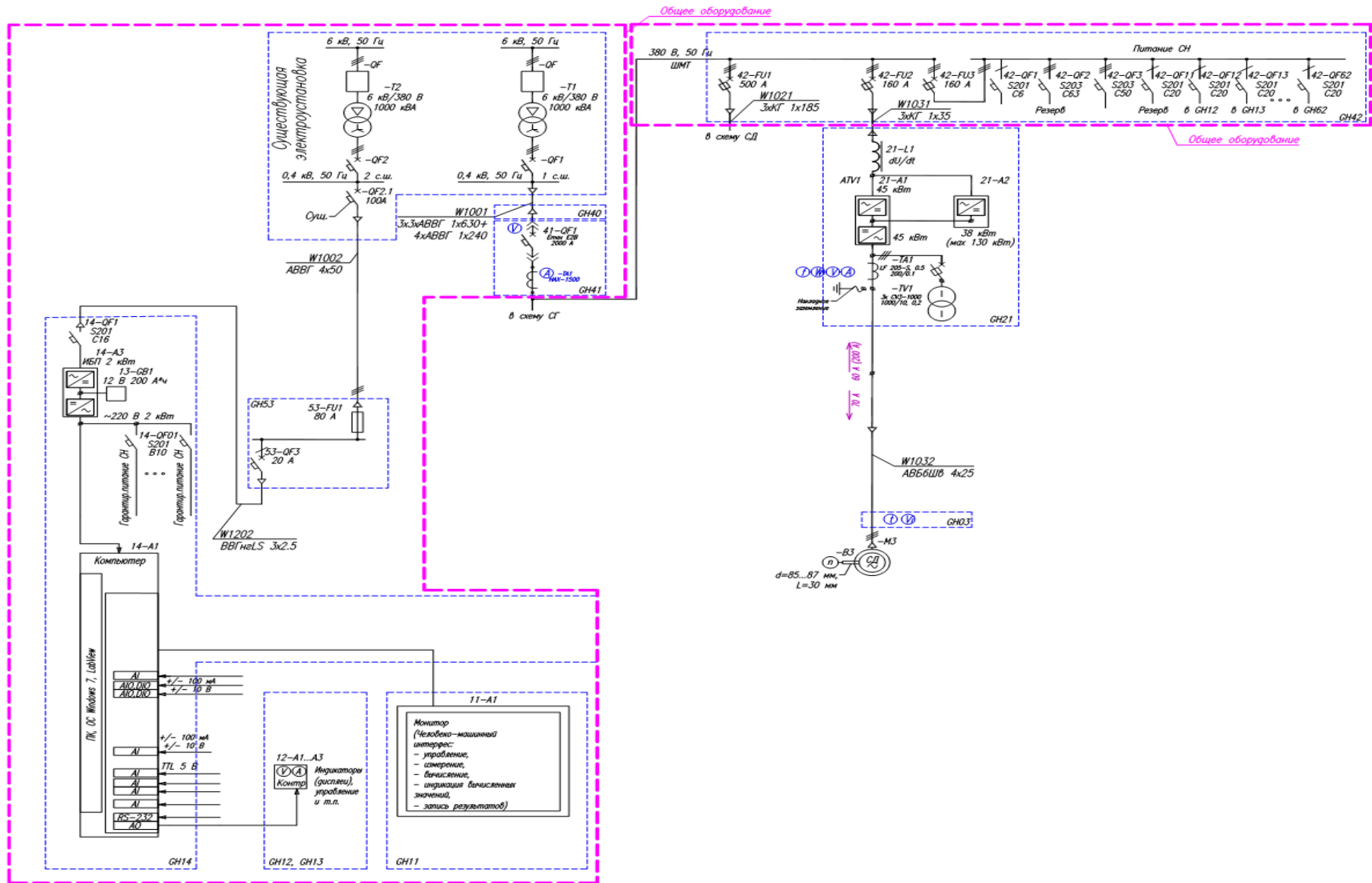


Рисунок 5.5-Схема электрическая принципиальная испытательного стенда ЭМН

Важным элементом стенда является система измерения и контроля характеристик ЭМН, включающая следующие приборы:

- датчик тока LEM LF 205 – S (измерение тока на клеммах мотора-генератора);

- датчик LEM CV 3-1000 (измерение напряжения и частоты на клеммах мотора-генератора);

- термосопротивление ЭЧП-41 с преобразователем сигнала НПСИ-ТС-1-24-МО (измерение температуры статора мотора-генератора и статора магнитной опоры);

- датчик вибрации с токовым выходом ДВСТ-1-20-2-Р (измерение частоты и амплитуды вибрации корпуса ЭМН);

- датчик РФ603НС.60-125/500-232-СG-5 (измерение частоты и амплитуды вибрации маховика ЭМН).

Обработка и анализ сигналов с датчиков, сохранение и визуализация данных, а

также управление процессом испытания производится программным комплексом LabVIEW (National Instruments, США) с пульта автоматического управления стендом (см. рисунки 5.6 и 5.7).



Рисунок 5.6-Общий вид экспериментального стенда



Рисунок 5.7-Пульт автоматического управления испытательным оборудованием
стенда

5.2.1 Системы обеспечения работы магнитного ВТСП подвеса

Система измерения и контроля характеристик магнитного ВТСП подвеса

На рисунке 5.8 дана принципиальная схема измерения и контроля характеристик магнитного ВТСП подвеса, расшифровка обозначений схемы представлена в приложении Б.

Схема включает в свой состав несколько блоков и узлов, ответственных за измерения отдельных видов параметров на всех этапах испытаний:

- баллон гелиевый с редуктором баллонным RPA2CP-CB-0,6-G-HOS-HE;
- криоёмкость ПМН 2.00.10.000;

- датчики вакуумные PCG-750KF16SD2;
- моновакууметр ГОСТ 2405-72;
- насос турбомолекулярный Agilent Turbo-V 81;
- персональный компьютер;
- термодатчики DYE 3695 HEL-705-T-1-12-C1;
- термопара медь-константовая, Стандарт GB/N 2903.

Основным параметром, определяющим жесткость подвеса, является температура ВТСП блока и оказывающее сильное влияние на нее давление в вакуумной камере статора.

Измерение температуры ВТСП блока производится при помощи термопар из медной и константановой проволоки и термометров сопротивления HEL-705.

Измерение давления в полости статора производится при помощи вакуумметров Agilent PCG-750, имеющих встроенные дисплеи для оперативного контроля давления.

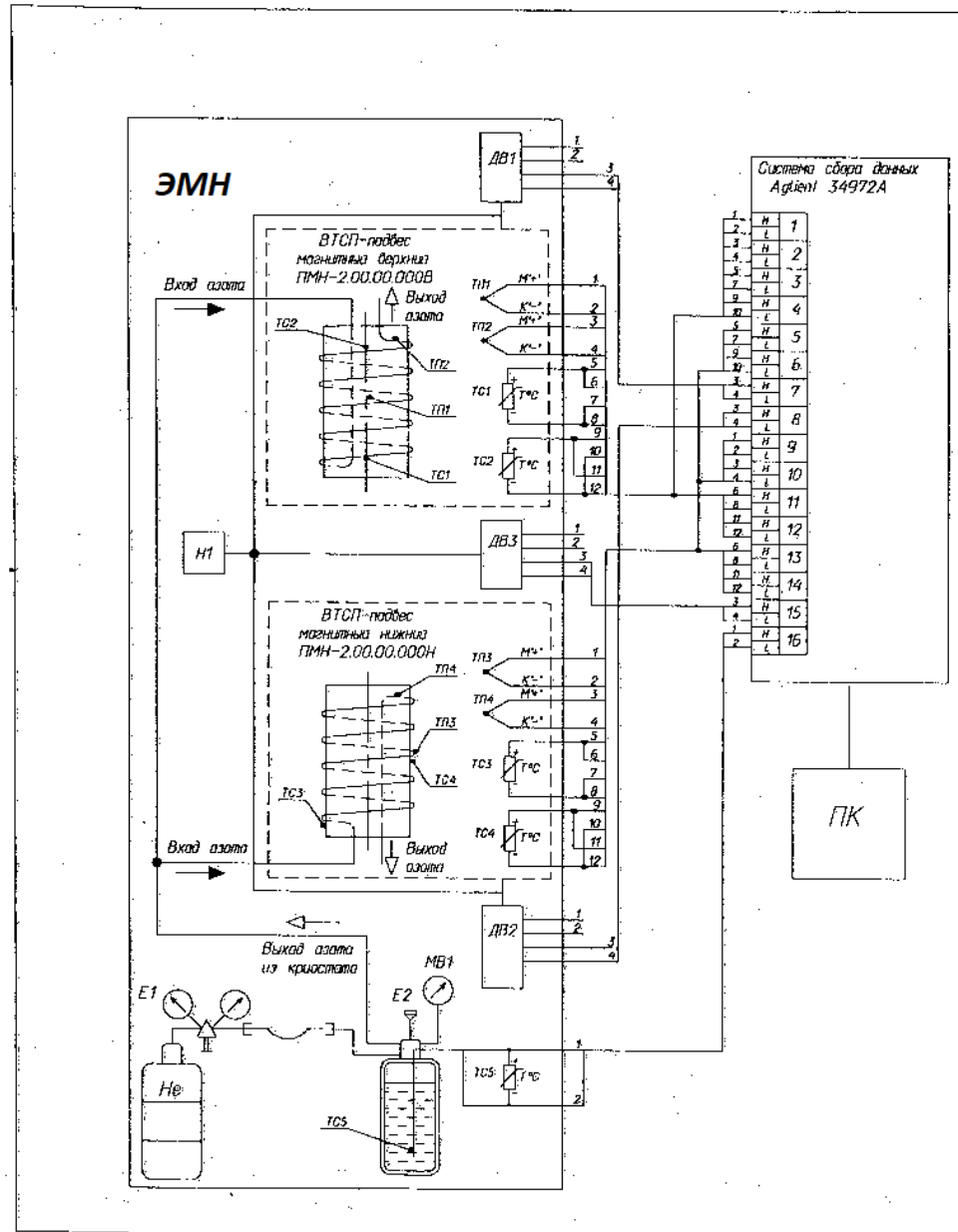


Рисунок 5.8-Схема системы измерения и контроля характеристик магнитного
VTСП подвеса

Система криообеспечения магнитного VTСП подвеса

Принципиальная схема системы криообеспечения опытных образцов магнитных VTСП подвесов ПМН-2 представлена на рисунке 5.9.

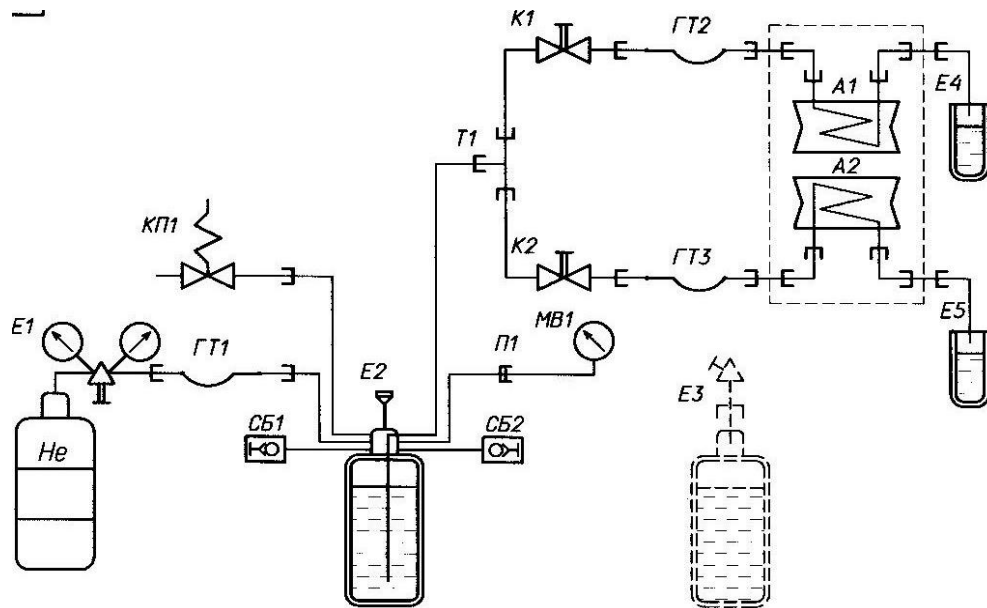


Рисунок 5.9-Схема принципиальная системы криообеспечения ПМН-2.00.00.000

СЗ

Данная система криообеспечения является расходной. Она обеспечивает функционирование сразу двух магнитных ВТСП подвесов (нижнего и верхнего) при температуре 77К в режиме сброса паров азота в окружающее пространство, снятие статических и динамических характеристик объектов испытания и системы в целом и работу в стационарном режиме с расходом жидкого азота на уровне 2,5 кг/час.

Общий вид системы криообеспечения приведен на рисунке 5.10. Каждый из подвесов присоединяется шлангом к общей магистрали через регулирующий вентиль для управления расходом жидкого азота.



Рисунок 5.10-Общий вид расходной системы криообеспечения

Вакуумная система магнитного ВТСП подвеса

Основным назначением вакуумной системы магнитного ВТСП подвеса является обеспечение нормальных условий для функционирования экранно-вакуумной изоляции ВТСП – блока статора подвеса.

Вакуумная система магнитного ВТСП подвеса обеспечивает получение необходимого давления в корпусе статора подвеса и снижение уровня теплопритоков теплопроводностью через остаточный газ до уровня меньше, чем теплопритоки теплопроводностью по элементам конструкции подвеса. На рисунке 5.11 приведена фотография фрагмента вакуумной системы, ее активные части, располагающиеся за пределами камеры накопителя. Она включает в свой состав форвакуумный насос с масляным уплотнением DS – 42, турбомолекулярный насос TURBO-V-81-T, сифонный патрубок, соединяющий их с помощью быстроразъемных хомутов, вакуумный вентиль.



Рисунок 5.11-Вакуумная система в сборе (до вводов в камеру накопителя)

5.3 Результаты экспериментальных исследований ЭМН

Испытания проводились в соответствии с документом «Программа и методики испытаний опытного образца кинетического накопителя энергии с ВТСП магнитным подвесом с запасенной энергией не менее 5 МДж» (см. приложение Б).

Проверка габаритных, установочно-присоединительных размеров, внешнего вида, примененных материалов и комплектующих элементов требованиям конструкторской документации

Проверка проводилась внешним осмотром путем сличения с конструкторской документацией.

Результаты проверки

Комплектность опытного образца ЭМН 5 МДж с зав. №1386981701 полностью соответствует конструкторской документации на ЭМН 21ПИГН.565515.326.

Все необходимые знаки и надписи на ЭМН по месторасположению и способу выполнения соответствуют конструкторской документации.

Габаритные и установочные размеры соответствуют указанным в соответствующих габаритных чертежах. Защитные и декоративные покрытия не имеют расслоений, трещин, сколов, а также других видимых дефектов.

ЭМН 5 МДж с зав. №1386981703 полностью соответствует конструкторской документации 21ПИГН.565515.326.

Вакуумная система магнитного ВТСП подвеса ЭМН обеспечивает разрежение $0,02 \text{ кг/см}^2$ за время 15 мин.

Система криообеспечения магнитного ВТСП подвеса ЭМН устойчиво удерживает маховик с ротором накопителя в радиальном и осевом направлениях во всем диапазоне частот вращения.

Вибрационная характеристика по перемещению ротора ВТСП подвеса (маховика накопителя) определяется в процессе обкатки на частотах вращения 2000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000 мин^{-1} (частота тока 100, 200, 250, 300, 350, 400 Гц соответственно).

На частоте вращения 2000 мин^{-1} в процессе нескольких пусков согласовывалось напряжение выхода преобразователя частоты с ЭДС обмотки статора мотор-генератора накопителя путём достижения минимального тока в фазах.

Вибрационная характеристика определялась по величине перемещения маховика лазерным датчиком. Уровень перемещения маховика на номинальной частоте вращения не превысил 30 мкм, на меньших частотах вращения он был ниже.

Определение тока, напряжения, мощности холостого хода при работе мотор-генератора в режиме синхронного двигателя проводилось на частоте вращения 8000 мин^{-1} (частота тока 400 Гц) при $\cos\varphi \approx 1$ и номинальном напряжении.

$\cos\varphi \approx 1$ достигался путём равенства выходного напряжения и ЭДС обмотки статора мотор-генератора, то есть минимального тока в фазах.

Значения тока в фазах, линейного напряжения, потребляемой мощности при разряжении в полости маховика $0,03 \text{ кг/см}^2$ составили:

$$P=18 \text{ кВт}, U_{\text{л}} = 550 \text{ В}; I_{\phi} = 20 \text{ А}.$$

Определение тока, линейного напряжения, активной мощности, частоты вращения осуществлялось отключением статора накопителя от разгонного преобразователя частоты и включения на рекуператор, работающий на промышленную сеть частотой 50 Гц , напряжением 380 В .

Время работы в режиме генератора 50 с . Отдаваемая в сеть мощность $P=100 \text{ кВт}$ в диапазоне частот с 8000 до 5000 мин^{-1} , при напряжении $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$.

В таблице 5.4 приведены результаты измерений.

Таблица 5.4-Результаты разгона и выбега маховика

t, с	50	85	130	180	225
n, мин ⁻¹	2500	3500	4200	4800	5200

разгон маховика

t, с	260	330	370	410	450	500
n, мин ⁻¹	5800	6300	6800	7200	7500	8000

выбег маховика

t, с	510	520	530	545	550	575	600
n, мин ⁻¹	7400	6700	6000	5500	5000	4400	3900

Также были проведены испытания без откачки воздуха из корпуса ЭМН для верификации методики расчета аэродинамических потерь. По полученным результатам экспериментальных исследований (см. рисунки 5.12, 5.13) можно сделать выводы, что кинетический накопитель энергии сохраняет устойчивость при набросе нагрузки в режиме разгона при прекращении разгона маховика

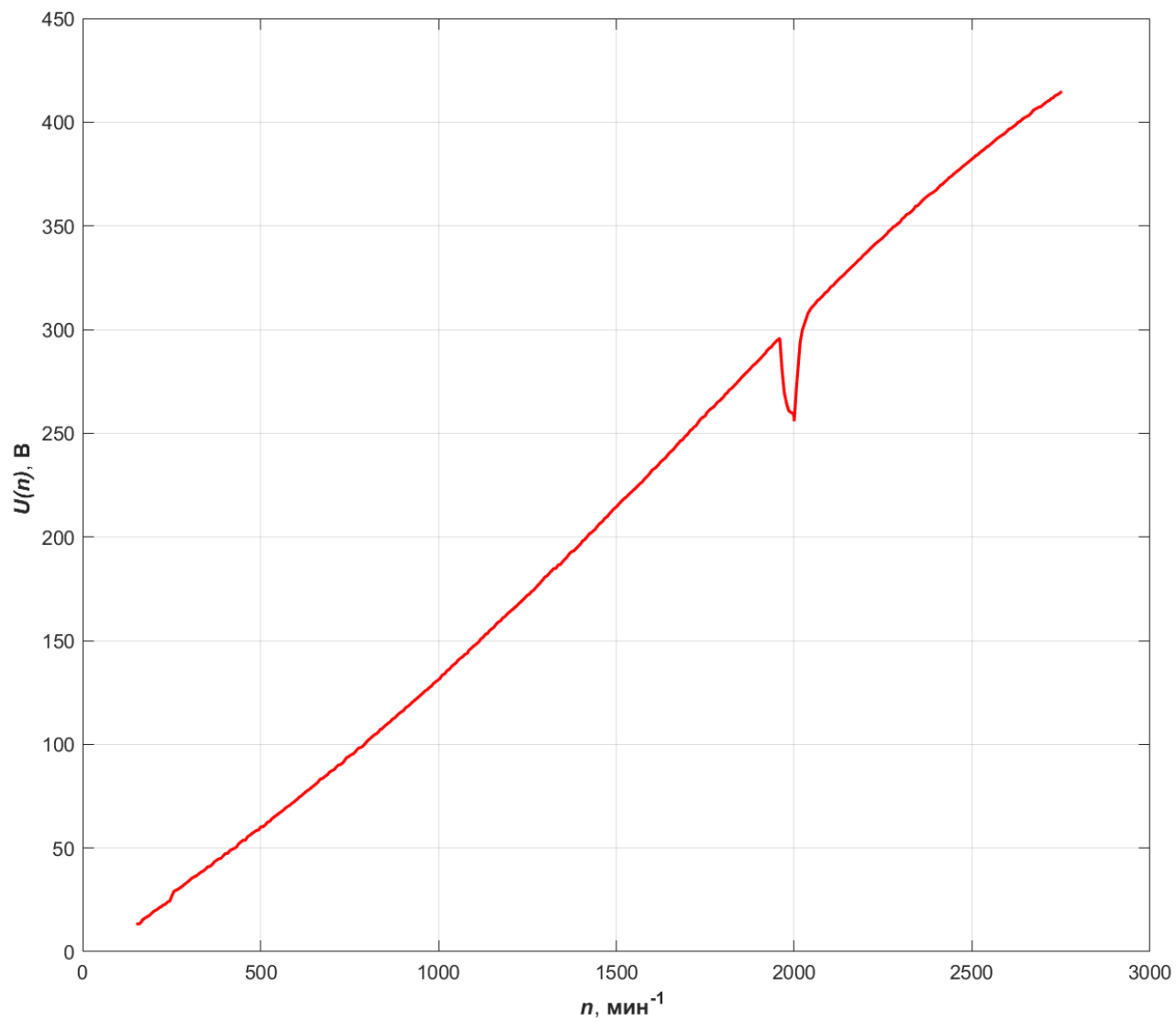


Рисунок 5.12-Напряжение мотор-генератора при разгоне маховика

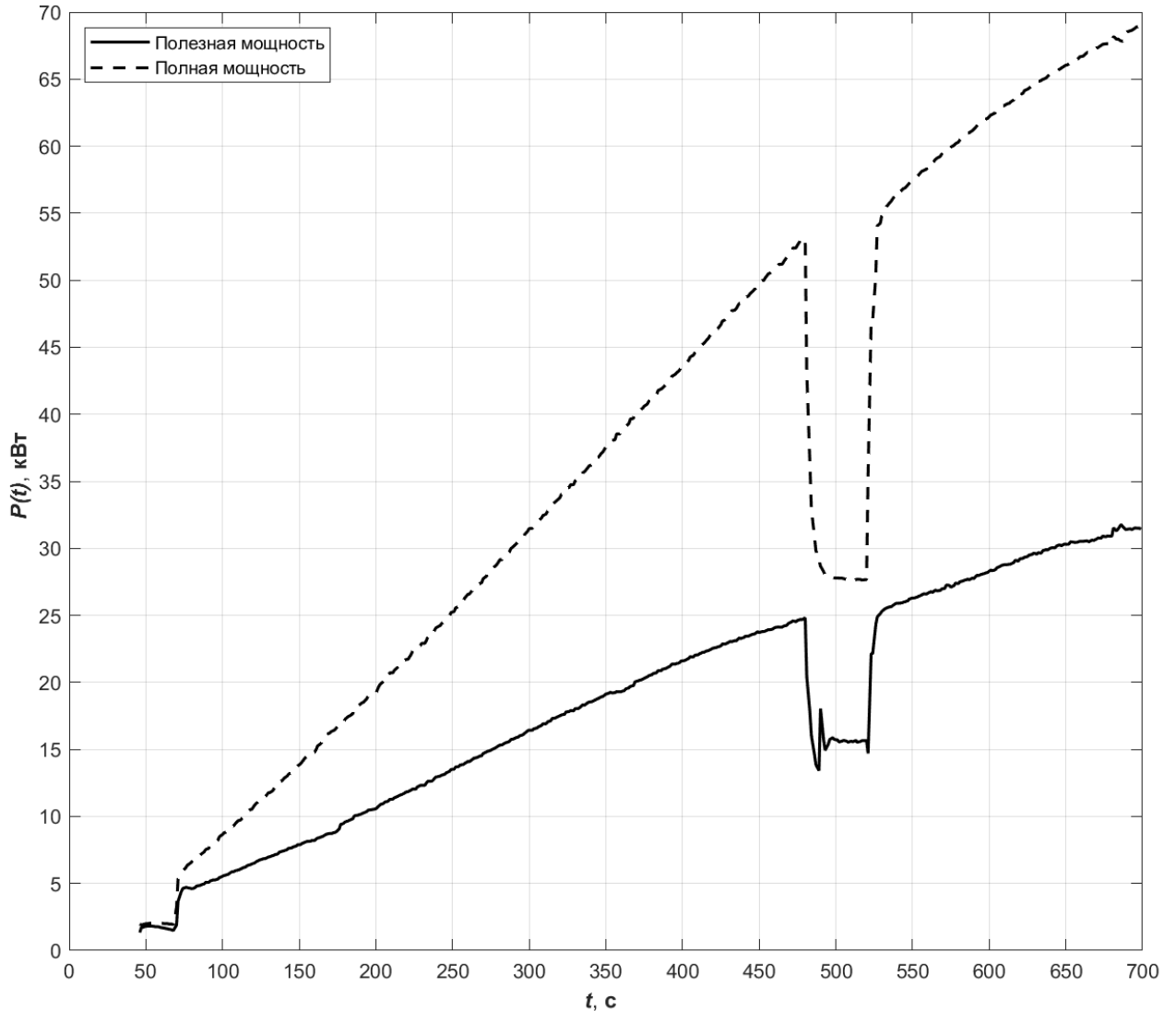


Рисунок 5.13-Зависимость мощности мотор-генератора от времени разгона маховика

На рисунке 5.14 видно, что разгон маховика происходит достаточно быстро несмотря на то, что мотор-генератор является немагнитной машиной, а масса маховика 600 кг., выбег занимает большое количество времени, даже с учетом того, что на данном этапе испытаний не было произведено вакуумирование корпуса электромеханического накопителя энергии, то есть трение о воздух вращающихся частей присутствует.

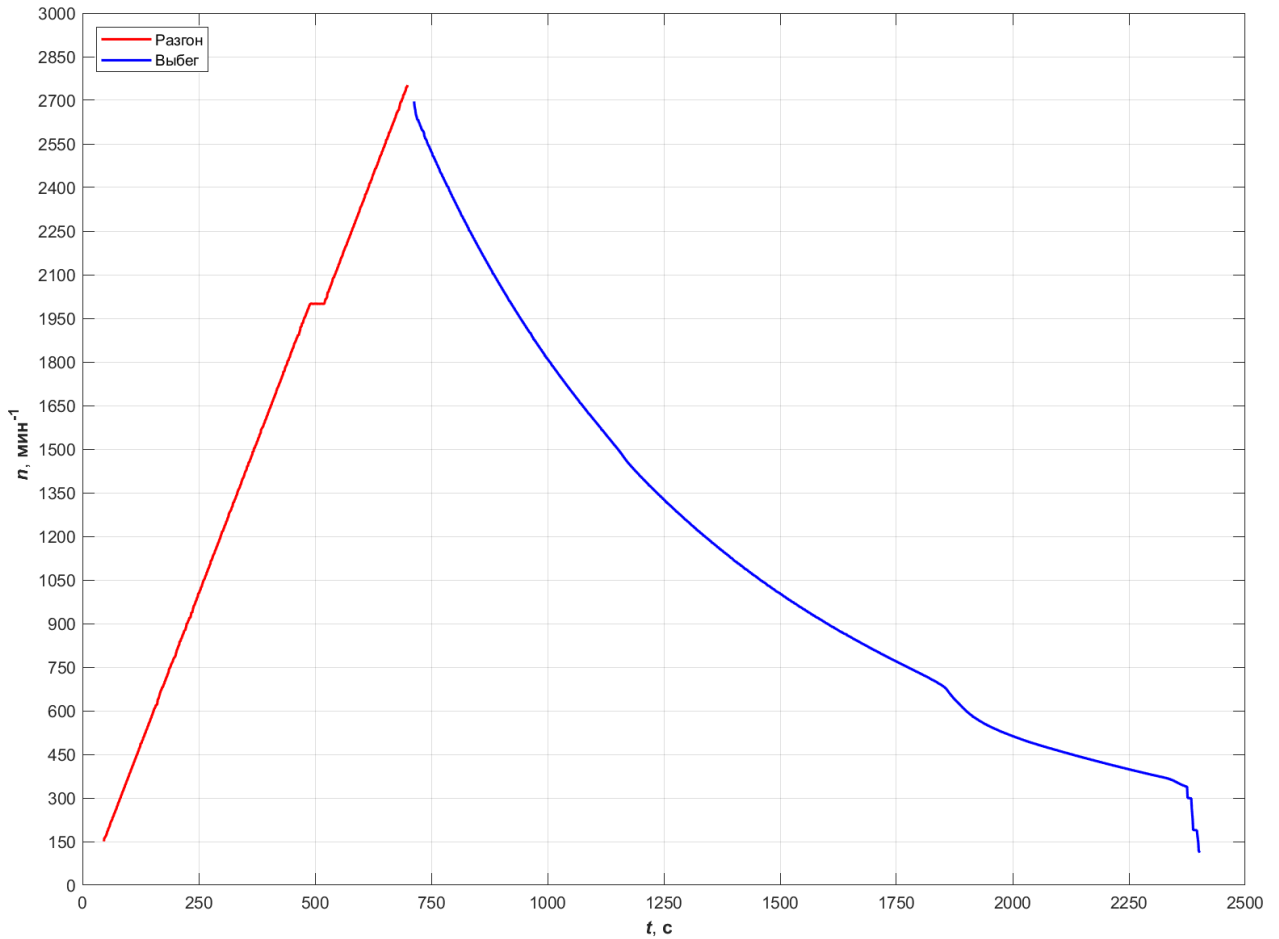


Рисунок 5.14-Зависимость скорости вращения маховика от времени при разгоне и при выбеге на холостом ходу

На рисунке 5.15 показано, что напряжение падает пропорционально падению частоты вращения маховика, если снимать значения напряжения непосредственно с обмоток мотор-генератора без использования инвертора.

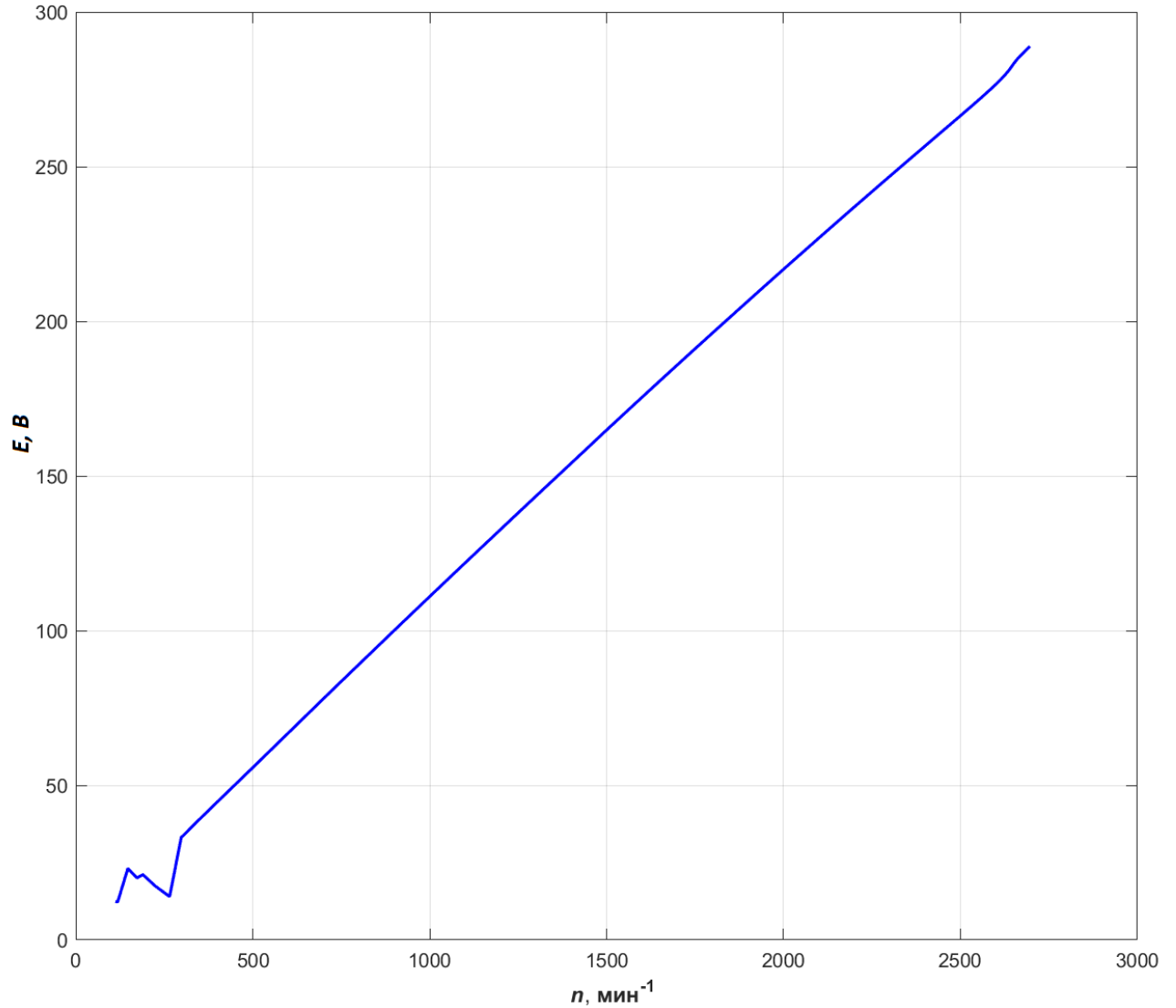


Рисунок 5.15-Зависимость напряжения холостого хода мотор-генератора ЭМН от времени при выбеге маховика

На графике рисунка 5.16 представлен ток, потребляемый мотор-генератором при разгоне маховика, два присутствующих провала связаны с прохождением критических частот и проверкой устойчивости работы ЭМН на критической частоте.

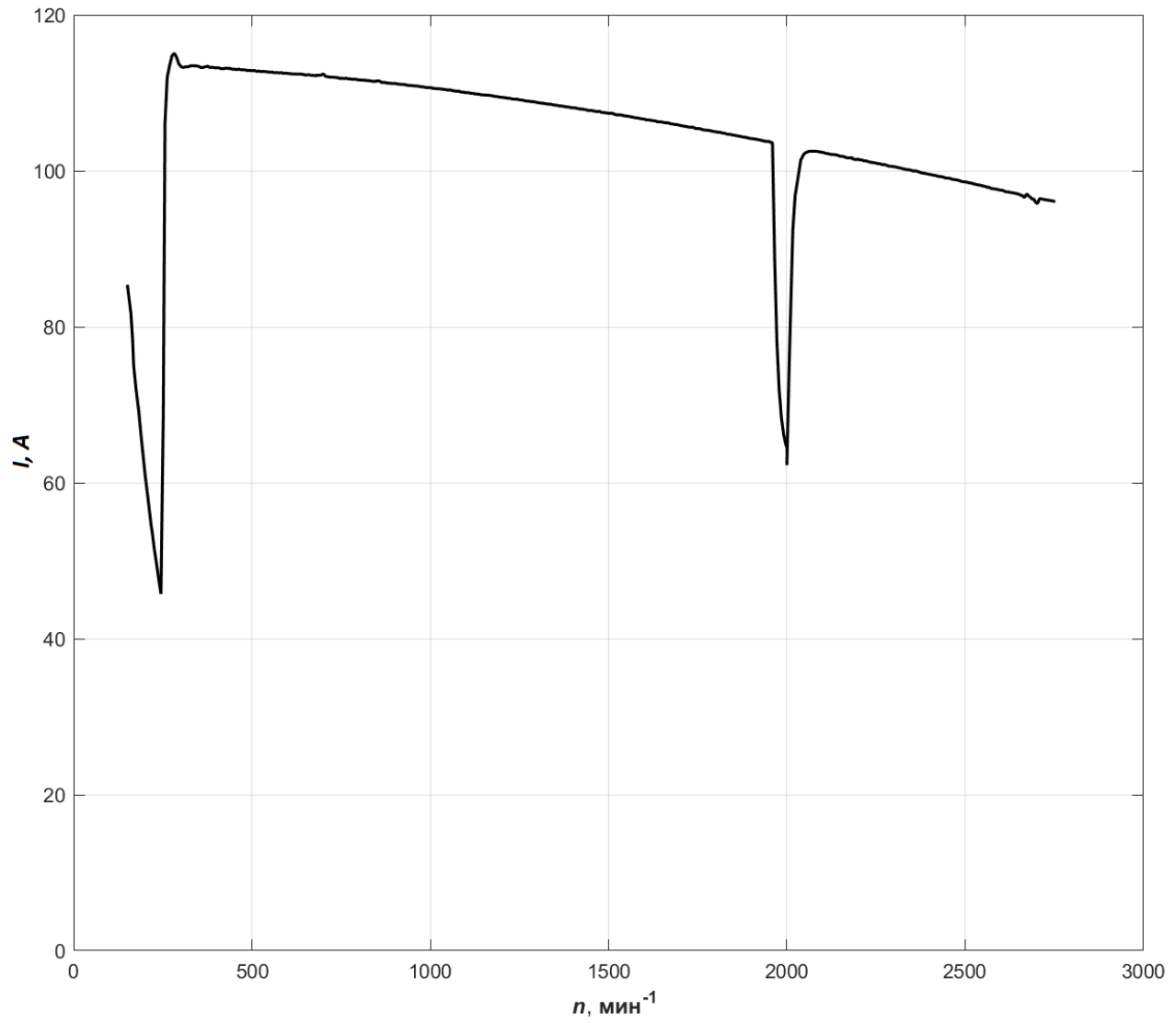


Рисунок 5.16-Зависимость тока мотор-генератора от частоты вращения маховика ЭМН при разгоне

Выводы по главе

1. Проведены расчеты, проектирование, изготовление и экспериментальные исследования опытного образца электромеханического накопителя энергии с магнитным ВТСП подвесом с запасаемой энергией 5 МДж.
2. Показано, что разработанные расчетные методики с приемлемой точностью описывают прочностные процессы в элементах маховика.
3. Экспериментально показано, что выбранные материалы и технологии намотки бандажа обеспечивают надежную работу маховика во всех режимах работы.
4. Выбранная конструкция ЭМН доказала свою надежность во всем рабочем диапазоне, простоту эксплуатации и надежность.
5. Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет рекомендовать принятые конструктивные решения и разработанные методики расчетов при создании ЭМН различного назначения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы «Электромеханический накопитель энергии с магнитным ВТСП подвесом» можно отметить следующее:

1. Показано, что электромеханический накопитель энергии является перспективной разработкой в области электромеханики, позволяющей заменить существующие источники аварийного питания (дизель-генераторы), превосходя их по экономичности, надежности, долговечности, экологичности, а также ЭМН имеет широкие возможности для применения в различных системах электроснабжения.
2. Разработка и внедрение накопителей энергии в систему электроснабжения представляет собой перспективное направление для развития электросетей в условиях постоянно повышающихся требований со стороны потребителей электроэнергии.
3. Электромеханический накопитель энергии наиболее простой и эффективный вариант накопителя. Кинетический накопитель прост в обслуживании, цена его меньше, чем у сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии и АКБ, а удельные параметры и срок службы выше, чем у химических источников энергии. Учитывая это можно сказать, что создание и внедрение кинетических накопителей с различной мощностью и накопленной энергии приведет к развитию автономных сетей электроснабжения, а, следовательно, улучшению качества питания потребителей электроэнергии.
4. Проведенный обзор накопителей энергии показывает, что ЭМН по показателю удельной энергии и удельной мощности находится между АКБ и сверхпроводниковыми индуктивными накопителями, т.к. мощность ЭМН ограничена параметрами мотор-генератора. Также

ЭМН обладают следующими преимуществами, по сравнению с другими типами накопления энергии: способность к практически неограниченному циклированию заряд-разряд, хорошая масштабируемость, а также модульность, на основе которой могут быть построены «матричные» системы накопления энергии на любые уровни запасаемой энергии и мощности, стационарного и передвижного исполнения.

5. Из концепции создания ЭМН различного назначения видно, что ЭМН могут быть использованы в качестве аварийного источника питания, источника бесперебойного питания ответственных потребителей, для выравнивания суточных нагрузок (день-ночь), также кинетические накопители могут быть использованы для улучшения показателей энергосистем при кратковременном включении потребителей повышенной мощности и рекуперацией энергии между генерирующими установками и потребителями, работающими в нестационарных режимах и на транспорте, для использования энергии, выработанной при торможении состава, для его последующего разгона.
6. Для увеличения времени хранения запасенной энергии, необходимо минимизировать магнитные потери и потери на трение в скользящих контактах, для исключения вышеперечисленных потерь, мотор генератор ЭМН должен быть выполнен в виде бесконтактной и немагнитной электрической машины, таким образом в режиме хранения энергии, при отключенной обмотке якоря, потери в мотор-генераторе не превышают 0,01, а при работе на полную мощность, при частоте вращения 8000 мин^{-1} , КПД составляет 98,7 %.
7. Вертикальное исполнение ЭМН предпочтительнее, т.к. в этом случае ротор маховика может удерживаться магнитной опорой на основе постоянных магнитов, а в радиальном направлении маховик

фиксируется ВТСП подшипниками или электромагнитными подшипниками.

8. Изготовление и испытания маломасштабной модели ЭМН, полностью верифицировали все использованные методики, при проектировании ЭМН с запасенной удельной энергией, от 0,5 до 5 МДж, а следовательно, при использовании методик для расчета ЭМН различной мощности и различных областей применения, разработанные методики и программы расчета можно рассматривать в качестве аналога «цифровых двойников», что существенно удешевит себестоимость разрабатываемых ЭМН.
9. Основным фактором, определяющим направления развития технологии магнитных ВТСП подвесов для электромеханических накопителей энергии, является их энергоемкость. Рост энергоемкости связан с увеличением массы накопительных элементов – маховиков и увеличением их угловых скоростей.
10. Большим запасом возможностей по снижению рабочей температуры является применение криокулеров, которые способны снизить температуру до 28 К, что позволило бы увеличить массу и размер маховика и, как следствие, удельную запасенную энергию.
11. При построении типоразмерного ряда ЭМН на ВТСП магнитном подвесе, главной проблемой является построение ряда ВТСП подшипников, которая в свою очередь решается построением типового ряда магнитного ВТСП подвеса:
 - магнитный ВТСП подвес с циркуляционным охлаждением жидкого азота с помощью микрофрижератора и непрерывной вакуумной откачки;
 - магнитный ВТСП подвес с охлаждением криокулером и криогенной системой непрерывной вакуумной откачки;

- магнитный ВТСП подвес с охлаждением криокулером и отпаянной вакуумной полостью статора.

12. Для увеличения устойчивости ВТСП опор, необходимо уменьшать величину магнитного зазора и температуру ВТСП элементов. Их уменьшение целесообразно во всем диапазоне и ограничивается лишь техническими и технологическими факторами.
13. Для эффективного функционирования сверхпроводника, необходимо обеспечить минимальный температурный перепад между ВТСП элементами и азотом.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК:

1. Занегин С.Ю., Зубко В.В., Иванов Н.С., Ковалев К.Л., **Подгузов В.А.**, Экспериментальное и численное исследование потерь в втсп катушках переменного тока // Электротехника. 2022. № 6. С. 65-70.
2. **Подгузов В.А.**, Русанов Д.В., Голованов Д.В., Кинетический накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2022. № 1. С. 169-174.
3. Подгузова М.А., Шевцов Д.А., Шишов И.М., **Подгузов В.А.**, Машуков Е.В., Влияние паразитных параметров трансформатора гальванической развязки на процессы переключения драйверов силовых транзисторных ключей // Практическая силовая электроника. 2023. № 2 (90). С. 41-45.

Научные статьи в журналах, входящих в международные системы цитирования Scopus и WoS:

1. Zanegin, S.Y., Zubko, V.V., **Podguzov V.A.**, Zanegin, Y.A., DC and AC Testing of HTS Coils for Magnetolectric Generator // IEEE Transactions on Applied Superconductivity [this link is disabled](#), 2023, 33(6), 5203506
2. Zanegin, S.Y., Zubko, V.V., Ivanov, N.S., Kovalev, K.L., **Podguzov V.A.**, Experimental and Numerical Study of AC Losses in HTS Coils of AC Electric Machines // Russian Electrical Engineering [this link is disabled](#), 2022, 93(6), страницы 424–429
3. K. Kovalev, N. Ivanov, S. Zhuravlev, M. Zdorova, A. Shirokov, N. Malevich, V. Kaderov, O. Kharkina, **V. Podguzov**, S. Zanegin, Y. Zanegin, V. Merkushev, A. Sukhanov, D. Shishov, V. Zubko, Superconducting System

- with 100 kW Output Power for Experimental Research // IEEE Transactions on Applied Superconductivitythis link is disabled, 2022, 32(4)
4. **Podguzov V.A.**, Rusanov D.V., Golovanov D.V., Suspended Kinetic Energy Storage Based on High-Temperature Superconductors // Russian Aeronauticsthis link is disabled, 2022, 65(1), страницы 193–199
 5. Kovalev K., Ivanov N., **Podguzov V.**, Zanehin S., Zhuravlev S. Modelling and experimental research of machine with annular HTS winding using equivalent magnetic permeability Journal of Physics: Conference Seriesthis link is disabled, 2021, 2043(1), 012003
 6. Kovalev K., Ivanov N., Zhuravlev S., ...Kuznetsov G., **Podguzov V.**, Calculation, design and test results of 3 kW fully HTS electric machine // Physica C: Superconductivity and its Applicationsthis link is disabled, 2021, 587, 1353892
 7. Zanehin S., Ivanov N., Zubko V., ...Shishov D., **Podguzov V.**, Measurements and analysis of ac losses in hts windings of electrical machine for different operation modes//Applied Sciences (Switzerland), 2021, 11(6), 2741
 8. Sergey Zanehin, Nikolay Ivanov, Vasily Zubko, Konstantin Kovalev, Aleksey Alekseev, **Vladimir Podguzov**, Maxim Ovdienko, Anton Varyukhin, Losses analysis of HTS racetrack coil carrying a distorted sinusoidal current // Proceedings - ICOECS 2021: 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2021, страницы 297–300
 9. Zanehin S., Ivanov N., Zubko V., ...Shishov I., **Podguzov V.**, Losses analysis of HTS racetrack coil operating in an external magnetic field // Proceedings - ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278514
 10. **Podguzov V.**, Kovalev K., Zhuravlev S., Rusanov D., ...Zanehin S., Experimental research of stator with HTS ring winding // Proceedings -

ICOECS 2020: 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems, 2020, 9278433

Доклады и материалы конференций

1. Ковалев К.Л., **Подгузов В.А.**, Полтавец В.Н., Русанов Д.В., Кинетический накопитель энергии с запасенной энергией 0.5 мдж на основе магнитного втсп подвеса // В книге: Авиация и космонавтика - 2017. тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2017. С. 188-189. Издательство: Типография «Люксор»
2. Русанов Д.В., **Подгузов В.А.** Кинетический накопитель энергии // В сборнике: Молодёжь и будущее авиации и космонавтики. 10-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов: аннотации конкурсных работ. 2018. С. 135-136.
3. Русанов Д.В., **Подгузов В.А.** Кинетический накопитель энергии // В книге: Авиация и космонавтика - 2018. Тезисы 17-ой Международной конференции. 2018. С. 206-208.
4. Русанов Д.В., **Подгузов В.А.** Кинетический накопитель энергии с подвесом на основе высокотемпературных сверхпроводников // В книге: Гагаринские чтения - 2018. Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции. 2018. С. 317-319.
5. Rusanov D.V., **Podguzov V.A.**, Ilyasov R.I., Principal analysis of hybrid power systems with hts electrical machines // В книге: 18th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2019" Abstracts. Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 416а.
6. Русанов Д.В., **Подгузов В.А.**, Ильясов Р.И., Принципиальный анализ гибридных силовых установок на основе сверхпроводниковых электрических машин // В книге: 18-я Международная конференция

- "Авиация и космонавтика - 2019". Тезисы. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 107.
7. Русанов Д.В., **Подгузов В.А.**, Концепции более электрического и полностью электрического самолетов // В книге: Гагаринские чтения - 2019. Сборник тезисов докладов XLV Международной молодежной научной конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2019. С. 474-475.
8. Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Журавлев С.В., **Подгузов В.А.**, Здорова М.В., Кадеров В.А., Широков А.А., ВТСП электрические машины и устройства для гибридных силовых установок // В книге: 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». Тезисы 19-ой Международной конференции. Москва, 2020. С. 211-212.
9. Подгузова М.А., **Подгузов В.А.**, Кинетический накопитель энергии // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 505-506.
10. Дежина И.Н., **Подгузов В.А.**, Методика расчета полностью сверхпроводниковой электрической машины // В книге: XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 488.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мировое обозрение. Телевизоры и мониторы подорожают из-за отключения электричества на японском заводе по производству стекла - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehnovar.ru/190046-Televizory-i-monitory-podoroghayut-iz-za-otklyucheniya-elektrichestva-na-yaponskom-zavode-po-proizvodstvu-stekla.html>. Дата доступа: 24.10.2023.
2. Мировые факты. Страны, наиболее подверженные финансовым потерям при отключении электроэнергии стекла - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stranatur.ru/countries-most-prone-to-power-outage-financial-losses.html>. Дата доступа: 25.10.2023.
3. ТАСС. Авария в энергосистеме Москвы 25 мая 2005 года. Досье - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stranatur.ru/countries-most-prone-to-power-outage-financial-losses.html>. Дата доступа: 25.10.2023.
4. Diesel Staff. Характеристика аккумулятора: Характеристики автомобильного аккумулятора - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m-gen.ru/raznoe-2/xarakteristika-akkumulyatora-xarakteristiki-avtomobilnogo-akkumulyatora.html>. Дата доступа: 25.10.2023.
5. Inside car electronics. Как работает электрическая система Керс (KERS) в болидах гонок формула-1- [Электронный ресурс]. Режим доступа: [Как работает электрическая система Керс \(KERS\) в болидах гонок формула-1 \(insidecarelectronics.com\)](http://insidecarelectronics.com). Дата доступа: 25.10.2023.
6. Pop Hi-Tech новости высоких технологий. Система KERS на дорожных Ferrari - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pop-hi-tech.ru/tehnologii/sistema-kers-na-dorozhnyx-ferrari.html>. Дата доступа: 25.10.2023.

7. Just Auto. UK: GKN in deal to supply KERS flywheel tech on London buses - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.just-auto.com/news/uk-gkn-in-deal-to-supply-kers-flywheel-tech-on-london-buses/>. Дата доступа: 25.10.2023.
8. Fb Inside. Метро Лос-Анджелеса получило «вечный двигатель» - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fbinside.org/technology/metro-los-andzhelesa-poluchilo-vechnyy-dvigatel>. Дата доступа: 25.10.2023.
9. Beacon Power. Our History» - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://beaconpower.com/company/our-history.asp>. Дата доступа: 25.10.2023.
10. Vycon. Vycon technology - [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vyconenergy.com/technology/>. Дата доступа: 25.10.2023.
11. C news. NASA Glenn Research Center - [Электронный ресурс]. Режим доступа: [NASA Glenn Research Center - Центр космических исследования NASA имени Джона Х. Гленна - CNews](#). Дата доступа: 25.10.2023.
12. Руденок А.И., Руди Д.Ю., Халитов Н.А., Нурахмет Е.Е., Шарков Н.В. Разработка накопителя кинетической энергии маховикового типа на магнитных осях // Международный научно-исследовательский журнал, 2016, №5 (47) часть 3, май – с. 158-161.
13. Kenny et al., "Control of a High Speed Flywheel System for Energy Storage in Space Applications," NASA internal report (NASA/TM-2004-213356), 2004.
14. Dever et al., "Estimator Based Controller for High Speed Flywheel Magnetic Bearing System," NASA internal report (NASA/TM-2002-211795), 2002.

15. P. Studer and E. Rodriguez, "High Speed Reaction Wheels for Satellite Attitude Control and Energy Storage", *Proceedings of the 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, vol. 2, pp. 2.349-2.352, 1985.
16. Хуторецкий Г.М., Фридман В.М., Загородная Г.А., Дроздова Л.А., Азизов Э.А., Васильев Р.П., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Создание и исследование электромеханического накопителя энергии, состоящего из генератора типа ткд-200-2 и маховика м-60/3000 // В сборнике: Источники импульсов электрической мощности. Ленинград, 1990. С. 11-17.
17. Полущенко О.М., Матвеев В.А., Нижельский Н.А. Магнитный подвес с дисковыми монодоменными втсп элементами на роторе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2006. № 2. С. 15-22.
18. Kinetic power. Технологии – [Электронный ресурс]. Режим доступа: [Technology | Kinetic Energy Storage | KEST \(kinetic-power.com\)](http://kinetic-power.com). Дата доступа: 28.10.2023.
19. С.Г. Казанцев. Кинетические накопители: мировые тренды и отечественные разработки с применением ВТСП-лент второго поколения // ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ, 2016, Т.155. – с. 3-21.
20. T. H. Sung, S. C. Han, Y. H. Han, J. S. Lee, N. H. Jeong, S. D. Hwang, et al., "Designs and analysis of flywheel energy storage system using high-Tc superconductor bearings", *Cryogenics*, vol. 42, pp. 357-362, 2002.
21. Projektbeschreibung. Energiespeicherwerk für Gleichstromnetze im Nahverkehr, rosseta Technik GmbH - Projektbeschreibung, pp. 14.
22. Superconductive and energy-storage magnetic suspension flywheel with high energy density: пат. CN102664567 Китай: МПК7 Н 02 К 7/02 / Tang J. [и др.]. — заявл. 11.05.2012.

23. Y. H. Han et al., "Design a hybrid high T superconductor bearings for flywheel energy storage system," *Physica C*, vol. 372–376, no. 3, pp.1457–1461, 2002.
24. Ковалев К.Л., Полтавец В.Н., Колчанова И.П., Ильясов Р.И. Кинетический накопитель энергии с магнитным втсп подвесом для автономной ветроэнергетической установки // Новое в российской электроэнергетике. 2020. № 6. С. 26-34.
25. Ковалёв Л.К., Ковалёв К.Л., Колчанова И.П., Полтавец В.Н. Зарубежные и российские разработки в области создания сверхпроводниковых электрических машин и устройств // Известия российской академии наук. Энергетика, 2012, № 6, - с. 3-26.
26. Se4ever. Статьи – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.se4ever.ru/articles/2997-m2e-power-zarjazhaet-telefon-pri-pomoshhi.html> . Дата доступа: 29.10.2023.
27. Кинетический аккумулятор: пат. 2118876 Российская Федерация: Власов В.И. [и др.]; заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Новолипецкий металлургический комбинат". — заявл. 24.12.1996.
28. Quto. Статьи – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://quto.ru/journal/articles/volvo-nachnet-ispytaniya-sistemy-rekuperatsii-s-mahovikom.htm> . Дата доступа: 29.10.2023.
29. A. Rufer, " The dream of efficient energy storage — From BESS, KERS & Co to the hybrid power plant", 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), 2017.
30. Hadi et al., "Pengembangan Manajemen Energi Pada Kendaraan Hybrid Dengan KERS" in , Surabaya, Indonesia, 2014.
31. Zero-100. Архив статей – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://zero->

100.ru/index/tekhnologii_formuly_odin_kers_kinetic_energy_recovery_system/0-317 . Дата доступа: 29.10.2023.

32. "Development of SMB Technologies for Flywheel Energy Storage Systems," ISTECS, Tokyo, 2002 NEDO Report, 2003.
33. S. Yamaguchi, M. Hamabe, I. Yamamoto, T. Famakinwa, A. Sasaki, A. Iiyoshi, et al., "Research activities of DC superconducting power transmission line in Chubu University", *J. Phys.: Conf. Series*, vol. 97, pp. 012290, Mar. 2008.
34. Evgeny Kostrov, Evgeny Demikhov, Anton Bagdinov, Timofey Demikhov, Valeriy Lysenko, Yuri Tsyachnykh. Magnetic Field Operation and Shielding of a G-M Cryocooler. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volume: 26, Issue: 4, June 2016.
35. Shinichi Mukoyama, Kengo Nakao, Hisaki Sakamoto, Taro Matsuoka; Ken Nagashima, Masafumi Ogata; Tomohisa Yamashita, Yoshiki Miyazaki, Kazufumi Miyazaki, Tadakazu Maeda, Hideki Shimizu. Development of Superconducting Magnetic Bearing for 300 kW Flywheel Energy Storage System. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Volume: 27, Issue: 4, June 2017
36. R. Ravaud, G. Lemarquand, V. Lemarquand. Force and Stiffness of Passive Magnetic Bearings Using Permanent Magnets. Radial Magnetization Part 2 // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2009. T. 45, № 9. — C. 3334.
37. N. Koshizuka. R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems // *Physica C*. 2006. T. 445–448. — C. 1103.
38. Long Zhou, Xisheng Tang, Zhiping Qi. Control method for flywheel array energy storage system in energy harvesting from electric railway. *IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014.

39. M. Strasik [и др.] An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high temperature superconducting bearings // Superconductor Science and Technology 2010. № 23. — 034021.
40. Константин Сергеев. Характеристики и сферы применения маховичных накопителей энергии // Энерговектор, №2 (66), февраль 2017, - с. 8.
41. F.N. Werfel [и др.]. Towards High-Capacity HTS Flywheel Systems // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2010. Т. 20, № 4. — С. 2272.
42. Adelwitz Technologiezentrum GmbH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://atz-gmbh.com>. Дата доступа: 29.10.2023.
43. Dzen. Статьи [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dzen.ru/a/XH5_xCwc9ACz0UR1 . Дата доступа: 29.10.2023.
44. Кинетический накопитель энергии: пат. 97018 Российская Федерация: Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Полтавец В.Н., Дежин Д.С., Ильясов Р.И., Егошкина Л.А., Чугунов А.А.; заявитель и патентообладатель Кацай А.В.. — заявл. 30.03.2010.
45. Русанов Д.В., Ковалев К.Л., Подгузов В.А.. Кинетический накопитель энергии // Репозиторий БНТУ, - с. 106-111.
46. Магнитный подвес на высокотемпературных сверхпроводниках: пат. на полезн. модель 152834 Российская Федерация: МПК7 Н 01 L 39/00 / Курбатов П.А., Курбатова Е.П., Матвеев В.А., Маевский В.А., Сысоев М.А., Асеев В.В., Ивлев А.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ») — заявл. 04.12.2014.

47. П.А. Дергачев, А.А. Костерин, П.А. Курбатов, Е.П. Курбатова. Полностью интегрированный кинетический накопитель энергии с магнитным ВТСП подвесом маховика // Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2015. № 22. — С. 95.
48. Холикова А.Р., Низамиев М.Ф. Анализ развития кинетических накопителей энергии // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х частях. Том Часть 1. 2020. – с. 65-67.
49. Золотарев Т.А., Кущенко Е.А., Курбатова Е.П. Кинетический накопитель энергии со сверхпроводниковым генератором // Статья в сборнике трудов конференции «VI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов», 2022. -с. 78-83.
50. Ковалев К.Л., Полтавец В.Н., Колчанова И.П. Применение сверхпроводниковых технологий для возобновляемой энергетики // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы, 2020, № 2 (103). – с. 82-96.
51. Economist. Technology-quarterly [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2012/03/03/packing-some-power?frsc=dg%7Ca>. Дата доступа: 29.10.2023.
52. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.А. Накопители энергии // М.: Энергоатомиздат, 1991 г.
53. Седов Л. И. Механика сплошной среды. том 2 - М.: Наука, 1970-568 с.
54. П.А. Курбатов. Основы теории электрических аппаратов / 5-е изд. перераб. и доп. // СПб.: Издательство «Лань», 2015 —592с.
55. Н. В. Гулиа. Инерционные аккумуляторы энергии. Издательство ВГУ, Воронеж 1973

56. Ковалев Л.К., Конеев С.М.-А., Полтавец В.Н., Гончаров М.В., Ильясов Р.И. Магнитные подвесы с использованием объёмных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта // Электричество №6/2007
57. А. И. Лурье, «Теория упругости» изд. «Наука», Москва 1970 г.
58. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Учебник для энергетических и электротехнических институтов и факультетов. // 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 648 с.
59. Динник А. Н. Справочник по технической механике. ОГИЗ. Гостехиздат. М: - 1949.
60. Ю.В. Корицкого. В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Справочник по электротехническим материалам. Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
61. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя. – М.: Машиностроение, 2001. Т.1 – 920 с., Т.2 – 912с., Т3 – 864 с.
62. О.Д.Гольдберг, Я.С.Гурин, И.С.Свириденко. Проектирование электрических машин / 2-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 2001. 430 с.
63. И.П.Копылов, Б.К.Клоков, В.П.Морозкин, Б.Ф.Токарев. Проектирование электрических машин / 3-е изд. испр. и доп. М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
64. Я.Б. Данилевич, Л.И. Чубраева. Новые конструкции генераторов и проблемы их создания // СПб.: Наука, 1993. 224 с.
65. А. В. Лукутин, Е. Б. Шандарова. Расчет характеристик электрических машин // Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 112 с.
66. Козловский А.Э. Расчёт элементов конструкций на сдвиг и кручение // Ивановский государственный химико-технологический университет, 2016. – 100 с.

67. А. А. Игнатъев, В. А. Малярчук, Л. А. Романченко. Физический практикум. Упругие деформации // Издательство Сарат. ун-та, 2012. – 24 с.
68. Витюнин М.А., Чикова О.А. Сопротивление материалов // Урал. гос. пед. ун-т, 2014. – 136 с.
69. A.Kubo, H. Kameno, R. Takahata. Development of compact flywheel energy storage system (ComFESS) // Koyo Engineering Journal English Edition, 2005, № 167E. — С. 29.
70. Введение в COMSOL Multiphysics. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/acdc-module>. Дата доступа: 30.10.2023.
71. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS // Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
72. В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков. Введение в расчетную платформу ANSYS workbench: лабораторные работы // Университет ИТМО, 2019. – 46 с.
73. Гараев И.Р. Исследование прочности электротехнических конструкций с использованием программного комплекса ANSYS // Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. – с. 113-115.
74. Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Максимович В.А. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS // Механика. Исследования и инновации, 2022. – с. 147-151.
75. И.Э. Келлер, Д.С. Петухов. Критерии прочности и пластичности // Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2020. — 157 с.
76. Соединительный элемент из композитного материала из графита и армированного углеродным волокном углерода: пат. 2514733

- Российская Федерация: Монтмайни Д.; заявитель и патентообладатель СГЛ КАРБОН СЕ — заявл. 01.10.2010.
77. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Сверхскоростные и ультраскоростные синхронные машины с возбуждением от постоянных магнитов (обзор зарубежных публикаций) // ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, 2014. – с. 35-42.
78. Schweitzer, G. Magnetic Bearings Theory, Design, and Application to Rotating Machinery / G. Schweitzer, E.H. Maslen. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 — 535 с.
79. S. Nagaya [и др.] Study on High Temperature Superconducting Magnetic Bearing for 10 kWh Flywheel Energy Storage System // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, Т. 11, № 1. — С. 1649
80. G. Nerowski; J. Frauenhofer; G. Ries; W. Nick; H.-W. Neumiiller Advances and prospects of HTS rotating machine development at Siemens // IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.
81. Узел трения скольжения: пат. 1771524 СССР: Багдасаров Х.С., Жаворонкин В.С., Семенов В.Б., Уюкин Е.М., Федоров Е.А. заявитель и патентообладатель Научно-производственный центр "лазер и монокристаллы". — заявл. 30.07.1990.
82. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев. — СПб.: Политехника, 2003. — 206 с.
83. И.Г. Руковицын, А.П. Сарычев. Применение электромагнитных подшипников в газовой промышленности // Компрессорная техника и пневматика – 2008.
84. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Гибридные магнитные подшипники. Виды конструкций и перспективы развития // Надежность и безопасность энергетики. 2016. № 1 (32). - С. 30-34.
85. Мишин Д.Д. Магнитные материалы: учеб. Пособие. – М.: Высш. Школа, 1981. – 335 с.

86. Тыричев П.А. Кузнецова Е.А. Общие технические требования к постоянным магнитам / / XIV Международная конференция по постоянным магнитам: Тез. докл. – Суздаль 2003 г. – С.230-231.
87. Потокосцепление магнитного поля постоянного магнита с катушкой Гельмгольца. Методика выполнения измерений МИ 2806-2003. – М.: ГНМЦ ВНИИФТРИ, 2003. – 12 с.
88. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. – М.: энергия, 1969. – 360 с.
89. High temperature superconducting magnetic bearings. Chase K. McMichael, Wei-Kan Chu. 1993. US Patent №5177387.
90. Дергачев П.А., Курбатова Е.П., Курбатов П.А. Анализ процесса намагничивания объемных втсп элементов в составе магнитной системы для электрических машин // Труды XVII Международной конференции "Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические Материалы и Компоненты". 2018. С. 158-160.
91. Пронин В.А., Жигановская Д.В., Цветков В.А. введение в расчетную платформу ANSYS workbench // Лабораторные работы / Том Часть 1. Санкт-Петербург, 2019.
92. Русанов Д.В., Подгузов В.А. Кинетический накопитель энергии // Авиация и космонавтика - 2018. Тезисы 17-ой Международной конференции. 2018. С. 206-208.
93. Вольдек А. И. Электрические машины // Энергия, 1974. – с. 839.
94. Подгузов В.А., Русанов Д.В., Голованов Д.В. Кинетический накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника, 2022, № 1. – с. 169-174.
95. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины // Издательский дом МЭИ, 2006. – с. 652.

96. M. Farhadi, O. Mohammed. Energy Storage Technologies for High-Power Applications // IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, T.52, № 3. — С. 1953.
97. Гуськов М.С. Разработка схемы армирования и исследование свойств композиционного материала системы TI-AL с применением программного модуля COSMOSWORKS // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. – С. 157.
98. Л.Г. Петрова, М.А. Потапов, О.В. Чудина. Электротехнические материалы // МАДИ (ГТУ). – М., 2008. - 198 с.
99. Штень Д.Э., Черных Т.Е. Преимущества использования беззубцовой конструкции синхронных генераторов в маломощных ветроэнергетических установках // Воронежский государственный технический университет , 2018. С. 180-182.
100. Г. Шлихтимг. Теория пограничного слоя под ред. Л. Г. Лайцянского // Наука, 1969г. 654 с.
101. В.В. Бирюк, Е.В. Благин, Ю.Д. Лысенко, Д.А. Угланов. Аэродинамика и самолетостроение // Изд-во Самарского университета, 2018. – 180 с.
102. А.Г. Голубев, А.С. Епихин, В.Т. Калугин, А.Ю. Луценко, В.О. Москаленко, Е. Г. Столярова, А. И. Хлупнов, П. А. Чернуха. Аэродинамика // Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. -607 с.
103. Н.Г. Полюшкин. Основы теории трения, износа и смазки // Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2013. – 192 с.
104. Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. Введение в гидродинамику // Изд-во Урал, ун-та, 2012. — 112 с.
105. В.М. Ларионов, С.Е. Филипов. Введение в гидродинамику // Казань: КГУ, 2010. – 108 с.

106. Анисимова О.С., Ткаченко Н.И. Гидрогазодинамика // Донской ГАУ, 2020. –169 с.
107. В.Г. Зезин. Гидрогазодинамика // Издательство ЮУрГУ, 2010. 132 с.
108. В.Г. Зезин. Механика жидкости и газа // Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 250 с.
109. В. Е. Щерба, В. В. Шалай, Е. А. Павлюченко, Е. Ю. Носов. Механика жидкости и газа. Спецглавы // Изд-во ОмГТУ, 2020. – 92 с.
110. С. А. Смайлов, К. А. Кувшинов. Механика жидкости и газа // Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 12 с.
111. Никитин В.И. Механика жидкостей и газов // Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 63 с.
112. Н.М. Вайсман, В.А. Голиков, А.А. Жарковский. Механика жидкости и газа. Гидравлика // Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 222 с.
113. Сумбаев С.Ю. Тенденция кинетических накопителей энергии // Тенденции развития науки и образования, 2022, № 92-12. – с. 133-135.
114. Ласанху К.А., Касмамытов Н.К. Физико-химические свойства композиционных материалов легированных графитовым волокном // Современные научные исследования и разработки, 2017, № 5 (13). –с. 197-202.
115. Бертинов А.И. Специальные электрические машины // Энергоиздат, 1982. 552 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет потерь на трение

Исходные данные

$n := 3000$	$\frac{\text{об}}{\text{мин}}$	частота вращения вала
$\omega_{\text{об}_c} := \frac{\pi n}{30}$		
$\omega_{\text{об}_c} = 314.159$	$\frac{\text{об}}{\text{с}}$	угловая скорость вращения
$R_{\text{внутр}} := 120 \cdot 10^{-3}$	м	радиус внутреннего цилиндра
$R_{\text{внешн}} := 250 \cdot 10^{-3}$	м	радиус внешнего цилиндра
$h_{\text{цил}} := 80 \cdot 10^{-3}$	м	высота цилиндра
$\rho_{\text{возд}} := 1.21$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	плотность воздуха
$\mu_{\text{возд}} := 17.9 \cdot 10^{-6}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	вязкость воздуха
$\nu := \frac{\mu_{\text{возд}}}{\rho_{\text{возд}}}$		кинематическая вязкость воздуха
	$\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{кг}} \rightarrow \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	
$\nu = 14.8 \times 10^{-6}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	

Рассмотрим внутренний цилиндр с радиусом

$$R_{\text{внутр}} := 120 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}$$

Окружная скорость внутреннего цилиндра равна произведению угловой скорости цилиндра на радиус цилиндра:

$$U_{\text{внутр.цилиндр}} := \omega_{\text{об}_c} \cdot R_{\text{внутр}}$$

$$U_{\text{внутр.цилиндр}} = 37.699 \quad \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Условие неустойчивости течения в кольцевом пространстве, следовательно и условие возникновения вихрей можно выразить при помощи числа Тейлора Ta в виде соотношения:

$$Ta = \frac{U_i d}{\nu} \sqrt{\frac{d}{R_i}} \geq 41,3$$

где d -ширина промежутка между цилиндрами, R_i и U_i - радиус и скорость внутреннего цилиндра

Зададимся шириной воздушного промежутка между цилиндрами (для внутреннего полого цилиндра)

$$\delta_{\text{цил}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

В установившемся режиме (при фиксированной постоянной угловой скорости вращения) число Тейлора

$$Ta_{\text{внутр.цилиндр}} := \frac{U_{\text{внутр.цилиндр}} \cdot \delta_{\text{цил}}}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внутр}}}}$$

$$Ta_{\text{внутр.цилиндр}} = 1208,8$$

где $\delta_{\text{цил}}$ – ширина промежутка между цилиндрами

При $Ta > 41,3$ возникают вихри

Данному числу Тейлора соответствует число Рейнольдса Re , которое (для установившегося режима) вычисляется по формуле

$$Re_{\text{внутр.цилиндр}} := \frac{U_{\text{внутр.цилиндр}} \cdot \delta_{\text{цил}}}{\nu}$$

$$Re_{\text{внутр.цилиндр}} = 7645,127$$

Для того чтобы определить в каком течении находится воздух, помимо вычисления числа Тейлора необходимо задать критические (граничные) числа Тейлора:

$$Ta_{\text{границ1}} := 41.3$$

$$Ta_{\text{границ2}} := 400$$

Определяем в области какого течения находится число Тейлора в установившемся режиме

$$\text{область} := \begin{cases} \text{"ламинарное течение Куэтта"} & \text{if } Ta_{\text{внутр.цилиндр}} < 41.3 \\ \text{"ламинарное течение с вихрями Тейлора"} & \text{if } 41.3 < Ta_{\text{внутр.цилиндр}} < 400 \\ \text{"турбулентное течение"} & \text{if } Ta_{\text{внутр.цилиндр}} > 400 \end{cases}$$

$$\text{область} = \text{"турбулентное течение"}$$

Коэффициент момента сопротивления для внутреннего (вращающегося) цилиндра при небольшом отношении $\delta_{\text{цил}}/R_{\text{внутр}}$ определяется формулой

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.лам}}(Ta) := 4 \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внутр}}}} \cdot (Ta)^{-1}$$

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.турб.границ}} := 6 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{const}_{\text{внутр.цилиндр.турб}} := \frac{C_{\text{м.внутр.цилиндр.турб.границ}}}{(Ta_{\text{границ2}})^{-0.2}}$$

$$\text{const}_{\text{внутр.цилиндр.турб}} = 0.02$$

Определив коэффициент пропорциональности, можно задать зависимость коэффициента момента сопротивления от числа Тейлора при турбулентном течении

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.турб}}(Ta) := \text{const}_{\text{внутр.цилиндр.турб}} \cdot (Ta)^{-0.2}$$

Зависимость C_m от числа Тейлора показана на рисунке А1.

Далее необходимо построить график зависимости коэффициента момента сопротивления от числа Тейлора при ламинарном течении с вихрем Тейлора, т.е. при переходном течении.



Рисунок А1-Зависимость коэффициента момента сопротивления внутреннего цилиндра от числа Тейлора

Выразим число Тейлора через число Рейнольдса и подставим в предыдущие формулы

$$Ta = Re \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внутр}}}}$$

Тогда зависимость коэффициента момента сопротивления внутреннего цилиндра от числа Рейнольдса для ламинарного течения будет иметь вид:

$$C_{m, \text{внутр. цилиндр. лам.}}(Re) := 4 \cdot Re^{-1}$$

Зависимость коэффициента момента сопротивления внутреннего цилиндра от числа Рейнольдса для турбулентного течения:

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.турб}}(Re) := \text{const}_{\text{внутр.цилиндр.турб}} \left(Re \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внутр}}}} \right)^{-0.2}$$

Зависимость коэффициента момента сопротивления внутреннего цилиндра (при переходном течении) от числа Рейнольдса:

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.перех}}(Re) := \left(Re \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внутр}}}} \right)^{K_{\text{внутр.цилиндр.перех}}} \cdot 10^{b_{\text{внутр.цилиндр.перех}}}$$

Граничные числа Рейнольдса для внутреннего цилиндра:

$$Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич1}} := Ta_{\text{гранич1}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{внутр}}}{\delta_{\text{цил}}}} \quad Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич1}} = 261.204$$

$$Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич2}} := Ta_{\text{гранич2}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{внутр}}}{\delta_{\text{цил}}}} \quad Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич2}} = 2.53 \times 10^3$$

Значения коэффициентов моментов сопротивления внутреннего цилиндра при граничных числах Рейнольдса будут следующие

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.лам}}(Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич1}}) = 0.0153$$

$$C_{\text{м.внутр.цилиндр.турб}}(Re_{\text{внутр.цилиндр.гранич2}}) = 0.006$$

График зависимости коэффициента момента сопротивления от числа Рейнольдса приведен на рисунке А2.

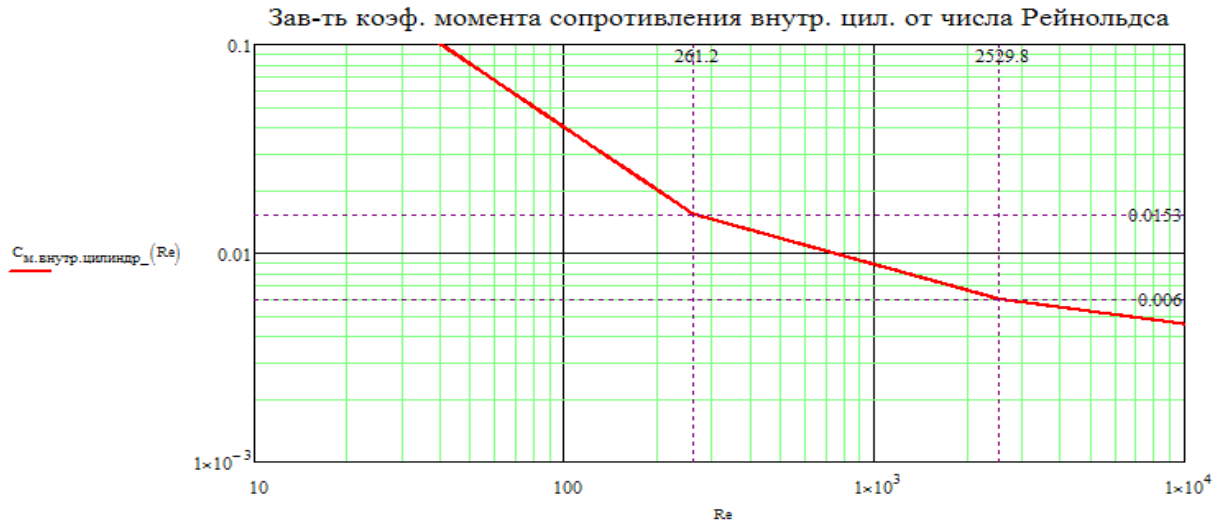


Рисунок А2-Зависимость коэффициента момента сопротивления от числа Рейнольдса

Ширина промежутка между цилиндрами та же что и для внутреннего (полого) цилиндра

$$\delta_{\text{цил}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Аналогично рассчитываем *окружную скорость внешнего цилиндра*

$$U_{\text{внешн.цилиндр}} := \omega_{\text{об}_c} \cdot R_{\text{внешн}}$$

$$U_{\text{внешн.цилиндр}} = 78.54 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

число Тейлора в установившемся режиме:

$$Ta_{\text{внешн.цилиндр}} := \frac{U_{\text{внешн.цилиндр}} \cdot \delta_{\text{цил}}}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внешн}}}}$$

$$Ta_{\text{внешн.цилиндр}} = 1744.8$$

число Рейнольдса в установившемся режиме

$$Re_{\text{внешн.цилиндр}} := \frac{U_{\text{внешн.цилиндр}} \cdot \delta_{\text{цил}}}{\nu}$$

$$Re_{\text{внешн.цилиндр}} = 15927.348$$

задаём граничные числа Тейлора:

$$Ta_{\text{гранич1}} = 41.3$$

$$Ta_{\text{гранич2}} = 400$$

зависимость коэффициента момента сопротивления внешнего цилиндра (при ламинарном течении) от числа Тейлора

$$C_{\text{м.внешн.цилиндр.лам}}(Ta) := 4 \cdot \sqrt{\frac{\delta_{\text{цил}}}{R_{\text{внешн}}}} \cdot (Ta)^{-1}$$

Аналогично можно рассчитать и внутреннюю зависимость коэффициента сопротивления внешнего цилиндра от числа Тейлора, график которого приведен на рисунке А3.

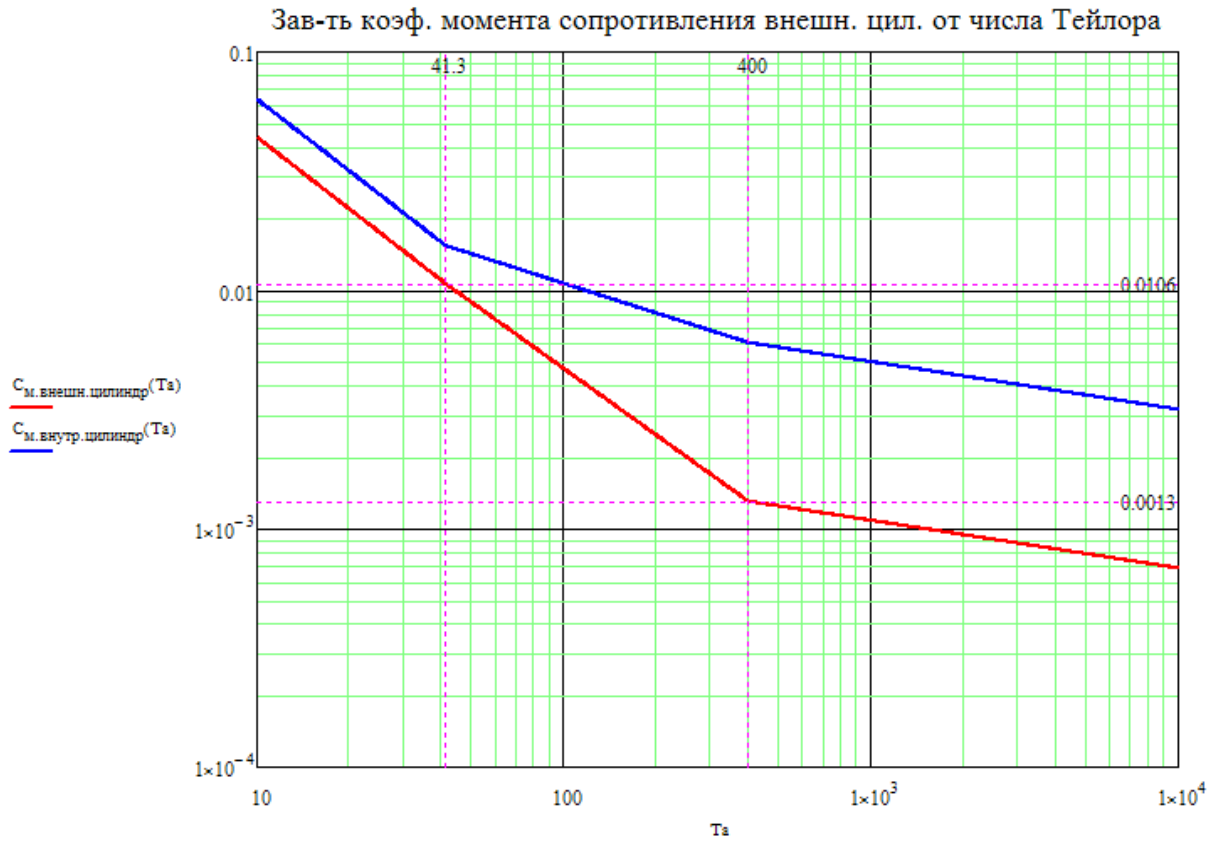


Рисунок А3-Внутренняя зависимость коэффициента сопротивления внешнего цилиндра от числа Гейлора

Граничные числа Рейнольдса для внешнего цилиндра

$$Re_{\text{внешн.цилиндр.границ1}} := Ta_{\text{границ1}} \sqrt{\frac{R_{\text{внешн}}}{\delta_{\text{цил}}}}$$

$$Re_{\text{внешн.цилиндр.границ2}} := Ta_{\text{границ2}} \sqrt{\frac{R_{\text{внешн}}}{\delta_{\text{цил}}}}$$

$$Re_{\text{внешн.цилиндр.границ1}} = 377$$

$$Re_{\text{внешн.цилиндр.границ2}} = 3651.5$$

Зависимость коэффициента момента сопротивления внешнего цилиндра от числа Рейнольдса

$$C_{\text{м.внешн.цилиндр}}(Re) := \begin{cases} C_{\text{м.внешн.цилиндр.лам}}(Re) & \text{if } Re < Re_{\text{внешн.цилиндр.границ1}} \\ C_{\text{м.внешн.цилиндр.перех}}(Re) & \text{if } Re_{\text{внешн.цилиндр.границ1}} \leq Re \leq Re_{\text{внешн.цилиндр.границ2}} \\ C_{\text{м.внешн.цилиндр.турб}}(Re) & \text{if } Re > Re_{\text{внешн.цилиндр.границ2}} \end{cases}$$

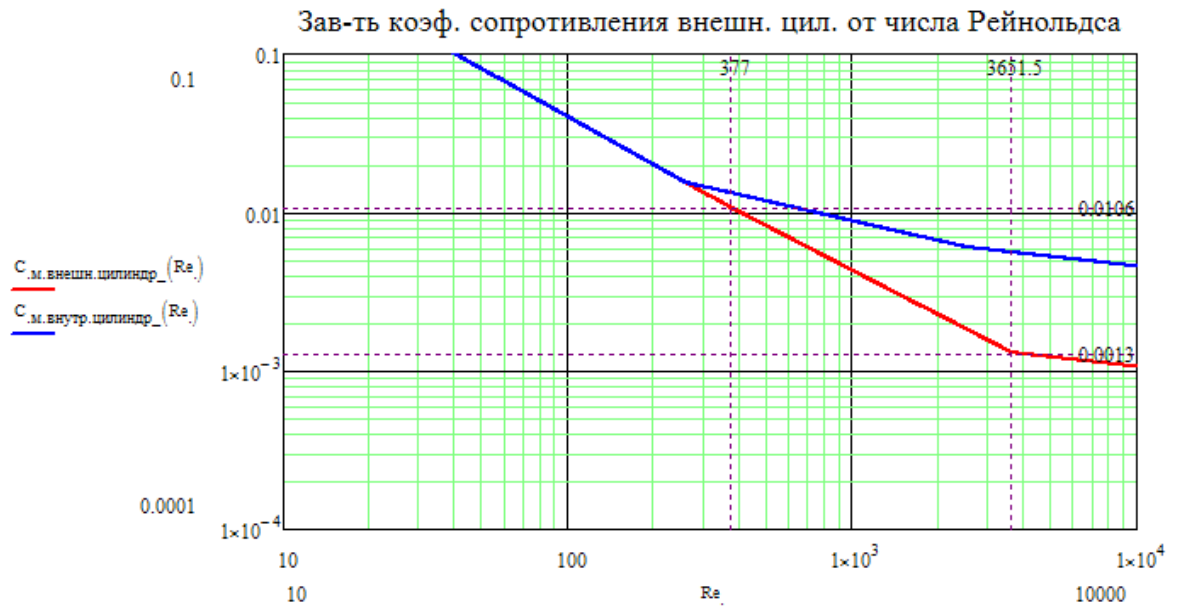


Рисунок А4-Зависимость коэффициента сопротивления внешнего цилиндра от числа Рейнольдса

Для расчёта окружной скорости берётся радиус внешнего цилиндра

$$U_{\text{диск}} := \omega_{\text{об}_c} \cdot R_{\text{внешн}} \quad U_{\text{диск}} = 78.54 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Зададим отдельно толщину воздушного промежутка 1 половины диска и толщину воздушного промежутка 2 половины диска, чтобы при необходимости

можно было изменить толщину одной из половин диска (из конструктивных соображений).

$$\delta_{1_0.5\text{диска}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\delta_{2_0.5\text{диска}} := 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Число Рейнольдса в установившемся режиме:

$$Re_{\text{диск}} := \frac{U_{\text{диск}} \cdot R_{\text{внешн}}}{\nu}$$

$$Re_{\text{диск}} = 1.33 \times 10^6$$



Рисунок А5-Зависимость суммарного момента двух цилиндров от угловой скорости

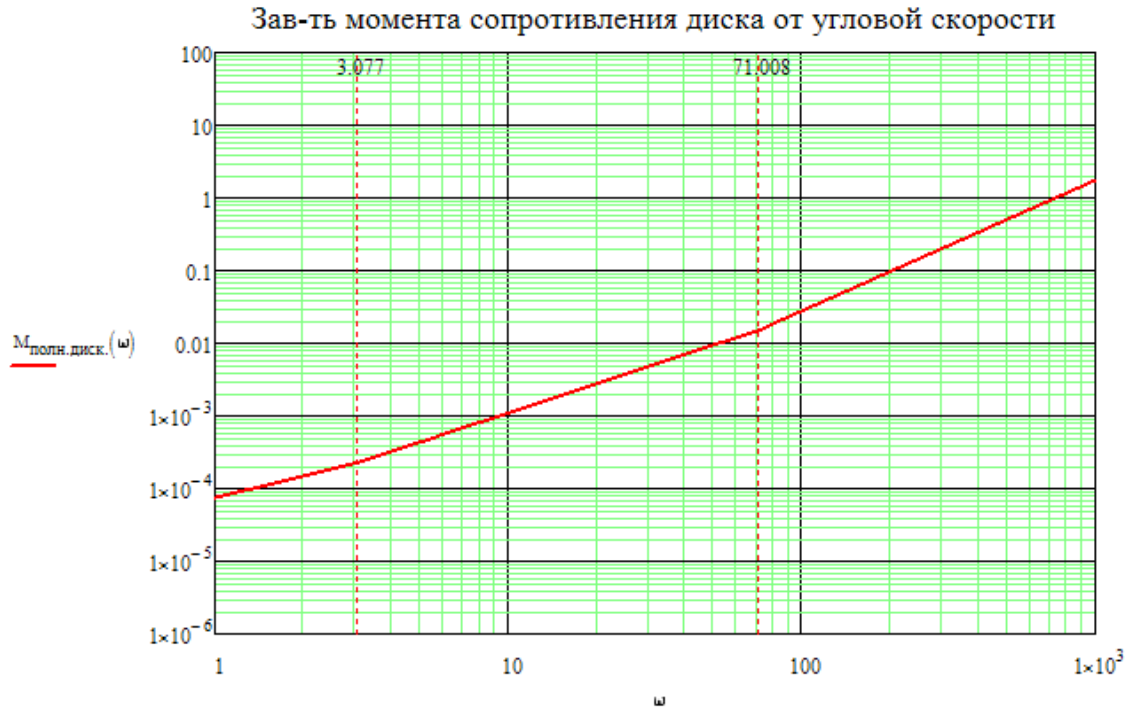


Рисунок А6-Зависимость сопротивления диска от угловой скорости

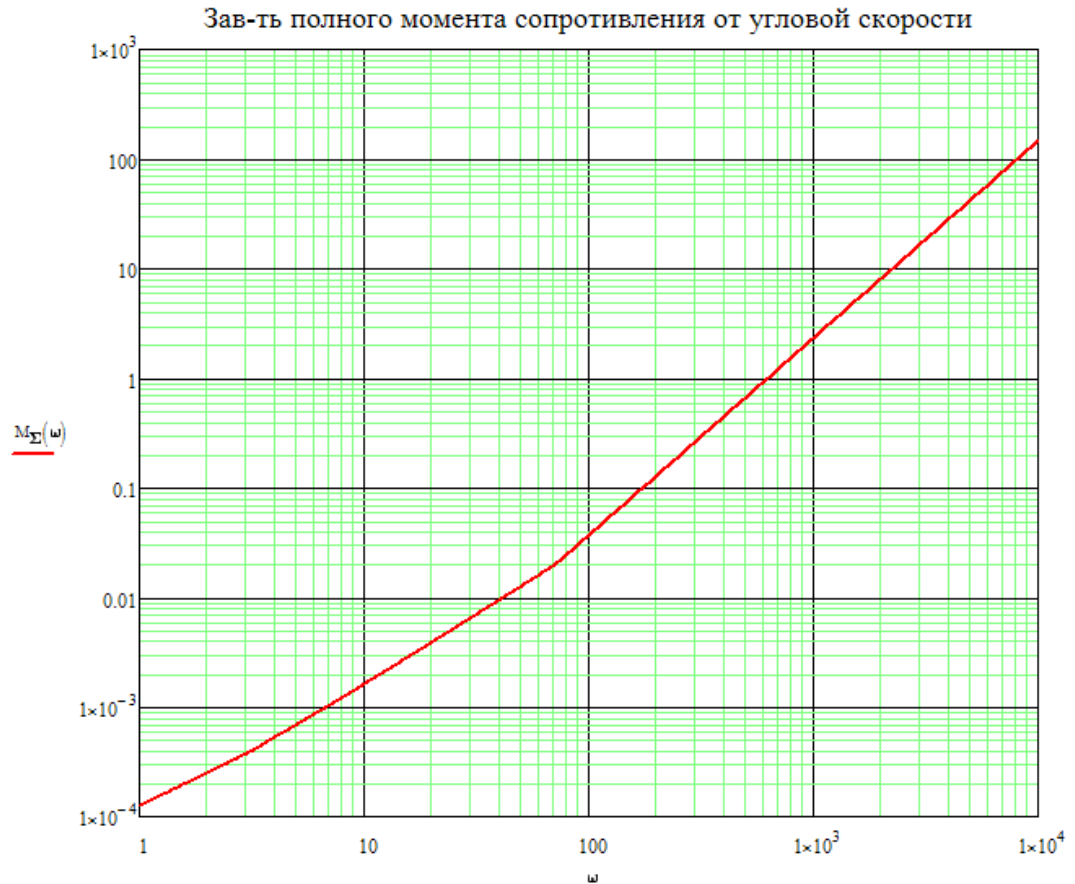


Рисунок А7-Зависимость полного момента сопротивления от угловой скорости

Из формулы для времени разгона маховика

$$t := \int_0^{\omega_{об_с}} \frac{J_{о.махов} \cdot \rho_{махов}}{M_{кр} - M_{тр}(\omega)} d\omega$$

видно, что чем больше будет разность моментов в знаменателе, тем меньше будет время разгона. Т.е. чем больше будет крутящий момент, тем быстрее разгонится маховик до необходимой частоты вращения(угловой скорости вращения).

Крутящий момент определяется отношением выходной мощности на валу к угловой скорости вращения вала. А значит, чем больше мощность на валу, тем меньше время разгона.

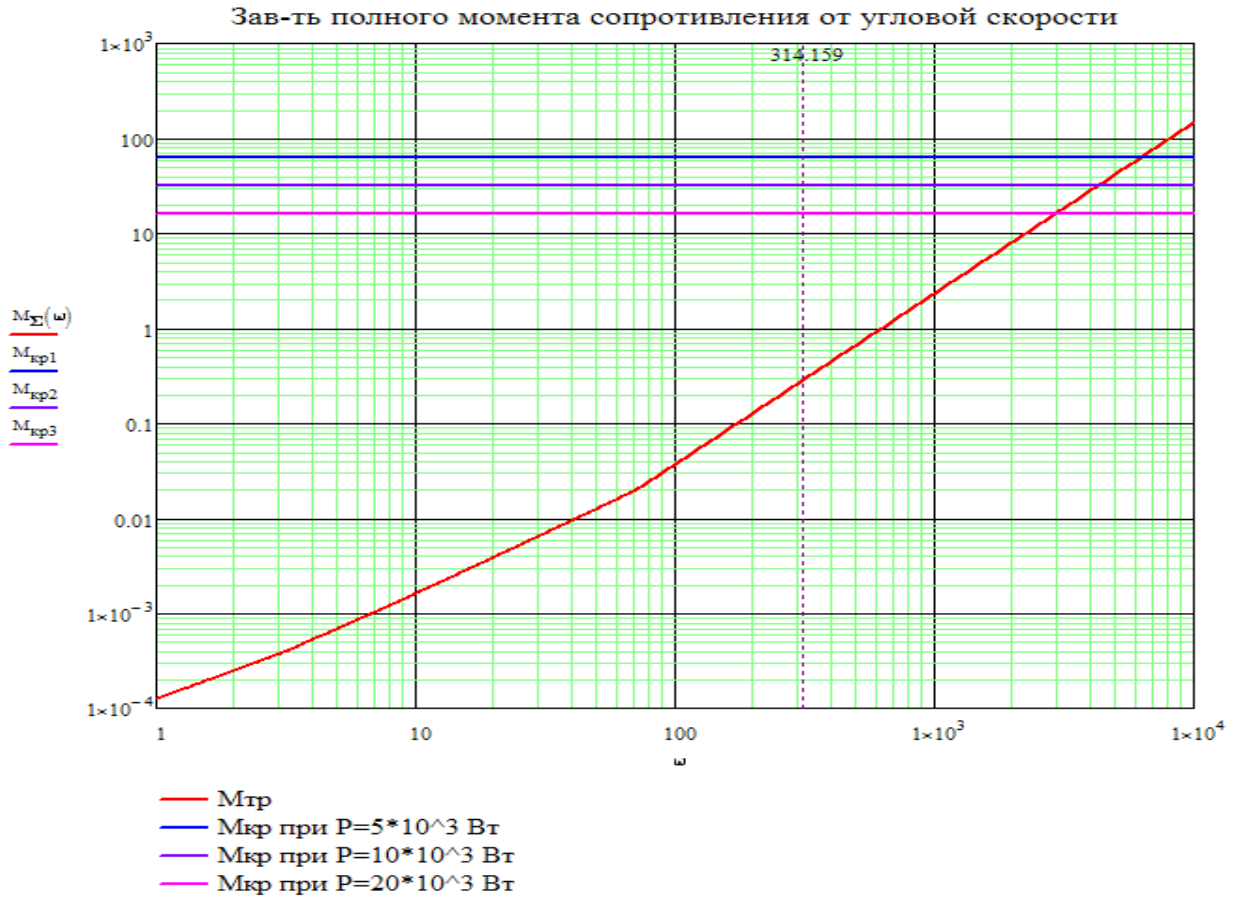


Рисунок А8-Зависимость полного момента сопротивления от угловой скорости

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Программа испытаний

Целью испытаний опытного образца кинетического накопителя энергии с магнитным ВТСП подвесом является:

- исследование технических характеристик объекта испытаний и путей достижения значений, установленных требованиями технического задания;
- экспериментальная проверка соответствия результатов расчетов на основе теоретических моделей и результатов опытного определения интегральных характеристик опытного образца ЭМН;
- анализ результатов экспериментальных исследований и выработки рекомендаций по практическому использованию полученных результатов.

Программа испытаний ЭМН приведена в таблице Б1.

Таблица Б1 – Программа испытаний опытного образца ЭМН с магнитным ВТСП подвесом с запасенной энергией не менее 5 МДж

Пункт программы испытаний	Наименование показателя	Пункт методики
3.1	Проверка комплектности <i>объекта испытаний</i> , его соответствия спецификациям, сборочным чертежам и общим схемам	6.1
3.2	<i>Проверка работоспособности магнитного ВТСП подвеса ЭМН</i>	6.2
3.2.1	Проверка работоспособности магнитного ВТСП подвеса ЭМН без вакуумирования корпуса	6.2.1
3.2.2	Проверка работоспособности	6.2.2

	магнитного ВТСП подвеса ЭМН в вакуумированном корпусе ЭМН.	
3.3	<i>Проверка работоспособности мотор-генератора ЭМН</i>	6.3
3.3.1	Измерение тока, напряжения и частоты на клеммах мотора-	6.3.1
3.3.2	генератора Измерение температуры статора мотора-генератора	6.3.2

Продолжение таблицы 5.3

3.4	<i>Проверка работоспособности ЭМН на оборотах до 6000 мин⁻¹</i>	6.4
3.4.1	Измерение и контроль уровня вибрации маховика и корпуса ЭМН	6.4.1
3.4.2	Измерение скорости вращения ротора	6.4.2
3.4.3	ЭМН.	6.4.3
3.4.4	Измерение давления в корпусе ЭМН Определение тока в фазах, линейного напряжения, мощности мотора-генератора в режиме синхронного двигателя	6.4.4
3.5	<i>Исследование ЭМН при работе на автономную нагрузку</i>	6.5
3.5.1	Измерение и контроль уровня вибрации маховика и корпуса ЭМН	6.5.1
3.5.2	Определение тока, линейного напряжения, активной мощности, частоты вращения	6.5.2

Методики испытаний

1. Проверка по п. 3.1 Программы выполняется следующим образом.

Проводится проверка внешнего вида, габаритных, установочно-присоединительных размеров, примененных материалов и комплектующих элементов требованиям конструкторской документации 21ПИГН.565515.326.

Маховик висит на магнитной опоре с постоянными магнитами и зафиксирован нижней и верхней опорами.

Проверяется соответствие:

- комплектности объекта испытаний ЭМН-5;
- объекта испытаний ЭМН-5 – спецификациям, сборочным чертежам;

Перед началом испытаний опытного образца ЭМН необходимо провести предварительную подготовку, которая заключается в следующем;

- снять верхнюю крышку корпуса ЭМН и открыть два иллюминатора;
- проверить соединение вакуумных, криогенных и кабельных патрубков на корпусе ЭМН с соответствующими системами обеспечения (вакуумная и криогенная), измерения и контроля;
- проверить систему электропитания мотор-генератора;
- подать электропитание на все блоки питания вакуумных насосов и измерительных приборов ВТСП подвесов;
- включить измерительные приборы и прогреть их в течение 20÷30 минут;
- проверить целостность и герметичность вакуумных трактов и статора верхнего и нижнего ВТСП подвесов пробным включением вакуумного механического насоса. Если давление на статоре подвеса выше 10^{-1} торр, то необходимо проверить вакуумную плотность системы при помощи течеискателя.

2 Проверка по п. 3.2 Программы испытаний - Проверка работоспособности магнитного ВТСП подвеса ЭМН:

2.1 Проверка работоспособности магнитного ВТСП подвеса ЭМН без вакуумирования корпуса.

Программы выполняется следующим образом:

- включить систему вакуумирования ВТСП подвесов и довести давление в статорах подвесов не выше 10^{-3} торр.

- поднять верхнюю опору на 6 мм;

- нижней опорой поднять маховик и прижать его к верхней опоре.

- включить систему захлаживания ВТСП подвесов;

- захлаживать ВТСП блоки статоров до температуры не выше 80К;

- после выхода на рабочий температурный режим ВТСП подвесов нижнюю опору опустить до зависания маховика (контролируется визуально через иллюминаторы);

- проверить отсутствие касания маховика и элементов корпуса методом прозвонивания, при необходимости опустить нижнюю опору или поднять верхнюю и зафиксировать их положение;

- подключить систему питания и систему измерения параметров мотора-генератора;

- раскрутить маховик до 2000 мин^{-1} ;

- остановить маховик;

- подвести нижнюю опору к маховику и поднять его до верхней опоры.

2.2 Испытания по п.3.3.2 Программы - Проверка работоспособности магнитного ВТСП подвеса ЭМН в вакуумированном корпусе ЭМН.

Программы выполняется следующим образом:

- устанавливается верхняя крышка корпуса ЭМН;

- закрываются иллюминаторы;

- ВТСП подвесы приводятся в рабочее состояние (вакуумируются и захолаживаются);
- подключить систему питания и систему измерения параметров мотора-генератора;
- раскрутить маховик до заданных оборотов;
- остановить маховик;
- подвести нижнюю опору к маховику и поднять его до верхней опоры.

3 Испытания по п.3.3 Программы - Исследование характеристик мотор-генератора ЭМН:

3.1 Методика измерение тока, напряжения и частоты на клеммах мотора-генератора

Ток измеряется датчиком тока LEM LF 205 – S.

Напряжение и частота измеряется датчиком напряжения LEM CV 3-1000.

3.2 Методика измерение температуры статора мотора-генератора

Температура измеряется термосопротивлением ЭЧП-41 с преобразователем сигнала НПСИ-ТС-1-24-МО. Результаты измерения фиксируются.

Испытания по п.4.4 Программы - Проверка работоспособности ЭМН на оборотах не менее 6000 мин⁻¹:

4.1 Методика измерения и контроля уровня вибрации маховика и корпуса КНЭ

Частота и амплитуда вибрации корпуса ЭМН измеряется датчиком виброскорости с токовым выходом ДВСТ-1-20-2-Р.

Частота и амплитуда вибрации маховика ЭМН измеряется с помощью лазерного датчика типа РФ603HS.60-125/500-232-CG-5 по колебаниям корпуса ротора магнитной опоры.

Измеренные значения поступают в систему сбора данных, где вычисляются: активная, реактивная, полная мощности и $\cos \varphi$. Далее все измеренные и вычисленные значения выводятся на дисплей в цифровом и графическом виде и записываются в файл с задаваемой периодичностью.

С пультов осуществляется управление преобразователями и контроль за работой системы по электронным и стрелочным приборам.

4.2 Методика измерения скорости вращения ротора ЭМН

В рабочем режиме, когда обороты изменяются от 5000 мин⁻¹ до 8000 мин⁻¹, раскрутка и рекуперация накопленной энергии в сеть осуществляется преобразователем мощностью 38 кВт (*max* 130 кВт) VW3A7208 фирмы «Schneider».. В этом режиме обороты измеряются по частоте на клеммах преобразователя.

В пусковом режиме, когда обороты маховика изменяются от 0 мин⁻¹, плавный разгон маховика ЭМН до необходимой частоты вращения (5000-8000) мин⁻¹ осуществляет преобразователь частоты мощностью 45 кВт ATV71HD45D4 фирмы «Schneider». При этом на клеммах мотор-генератора будет частота пускового тока.

Поэтому при запуске, обороты маховика измеряются с помощью лазерного датчика типа РФ603HS.60-125/500-232-CG-5 по меткам на корпусе ротора магнитной опоры.

4.3 Методика измерения давления в корпусе ЭМН

Давление в корпусе ЭМН измеряется манометром, который подсоединяется к специальному штуцеру, вваренному в нижний корпус. Результаты измерения передаются в пультовую.

4.5 Методы измерения тока в фазах, линейного напряжения, мощности мотор-генератора в режиме синхронного двигателя

Ток, напряжение, мощность (потери холостого хода) в режиме синхронного двигателя определяются на частоте 8000 мин-1 (частота тока 400 Гц) при $\cos\varphi \approx 1$ и номинальном напряжении.

Значение $\cos\varphi \approx 1$ достигается путём равенства выходного напряжения и э.д.с. обмотки статора двигателя, то есть минимального тока в фазах.

Испытания по п.4.5 Программы - *Исследование ЭМН при работе на автономную нагрузку*

5.1 Методика измерения и контроля уровня вибрации маховика и корпуса ЭМН

Частота и амплитуда вибрации корпуса ЭМН измеряется датчиком виброскорости с токовым выходом ДВСТ-1-20-2-Р.

Частота и амплитуда вибрации маховика ЭМН измеряется с помощью лазерного датчика типа РФ603HS.60-125/500-232-CG-5 по колебаниям корпуса ротора магнитной опоры.

5.2 Методы определения тока, линейного напряжения, активной мощности, частоты вращения

Определение тока, линейного напряжения, активной мощности, частоты вращения осуществляется отключением статора накопителя от разгонного преобразователя частоты и включения на рекуператор, работающий на промышленную сеть частотой 50 Гц, напряжением 380 В. Время работы в режиме генератора 50 с.

При необходимости статор может включаться на заранее подготовленную активную нагрузку 100 – 200 кВт при линейном напряжении 380 В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«МОСКОВСКИЙ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МАИ)**

**Институт № 3
«Системы управления, информатика и
электроэнергетика»**

Волоколамское ш., дом 4
Москва, А-80, ГСП-3 125993
Факс: (499)158-29-77
Телефон: (499)158-00-02, 158-58-70
Телефон дирекции: (499)158-27-21

Электронная почта: mai@mai.ru
Электронная почта института: dekan3@mai.ru

«24» октября 2023 г.

Пер. № 300-17/263

АКТ

о внедрении в учебный процесс кафедры 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» результатов диссертационной работы Подгузова Владимира Андреевича «Электромеханический накопитель энергии с магнитным ВТСП подвесом»

Результаты диссертационной работы Подгузова Владимира Андреевича «Электромеханический накопитель энергии с магнитным ВТСП подвесом» в частности: аналитическая методика расчета немагнитных электрических машин; численная методика расчета аэродинамических потерь электромеханических накопителей энергии; инженерный подход для расчета ВТСП подвеса электромеханических накопителей энергии в зависимости от массы и размеров маховика, используются в учебных курсах лекций и практических занятий по дисциплинам: «Системы аналитических вычислений в электромеханике» и «Основы научных исследований» для студентов, обучающихся на направлении 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилям «Информационные технологии в электроэнергетических и электромеханических системах» и «Электрооборудование летательных аппаратов».

Директор дирекции института №3
«Системы управления, информатика и
электроэнергетика»



Следков Ю. Г.

Заведующий кафедрой 310 «Электроэнергетические,
электромеханические и биотехнические системы»

Ковалев К. Л.