

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт Механико-технологический факультет
Кафедра «Мехатроника и автоматизация»
Направление «Мехатроника и робототехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2017 г.

Разработка мехатронной системы стартер-генератора
микрогазотурбинной установки

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ МАГИСТРА
ЮУрГУ – 15.04.06.2017.082. ПЗ (ВКР)

Нормоконтролер:
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2017 г.

Руководитель работы:
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2017 г.

Нормоконтролер:
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2017 г.

Автор работы:
студент группы П-264
Анатолий Анатольевич Демов

2017 г.

Челябинск 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Институт Политехнический институт
Факультет Механико-технологический
Кафедра Мехатроники и автоматизации
Направление 15.04.06 «Мехатроника и робототехника»
Профиль Мехатроника

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ В.Р. Гасияров
подпись

«___» _____ 2017 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ МАГИСТРА**

Студенту группы П-264 _____ Демову Анатолию Анатольевичу
группа (Ф.И.О. полностью)

1 Тема работы

Разработка мехатронной системы стартер-генератора микрогазотурбинной установки

утверждена приказом по университету от _____ 201_ г. № _____
(утверждена распоряжением по факультету от _____ 201_ г. № _____)

2 Срок сдачи студентом законченной работы _____

3 Исходные данные к работе материалы производственной практики _____

4 Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Ведение

1 Анализ технологического процесса и выбор основного оборудования

1.1 Характеристика предприятия

1.2 Описание и принцип работы газотурбинного двигателя

1.3 Характеристика и кинематическая схема модернизируемого механизма

1.4 Система запуска газотурбинных установок

1.5 Выбор технического решения

1.6 Описание оборудования

1.7 Требования к системам запуска газотурбинных двигателей

1.8 Расчет стартер-генератора микрогазотурбинной установки

2 Моделирование вентильного электропривода

2.1 Исходные данные для проектирования

2.2 Краткое описание функциональной схемы

2.3 Синтез контура тока

2.4 Синтез контура скорости

2.5 Анализ динамических свойств виртуальной модели вентильного двигателя в среде Matlab

3 Испытания и моделирование рабочих процессов стартер-генератора

3.1 Измерение ЭДС на холостом ходу

3.2 Испытания в режиме стартера

4 Моделирование механических переходных процессов СГ в стартерном режиме

4.1 Составляющие механической нагрузки. Схема замещения

4.2 Исходные данные к уточнению параметров схемы замещения

4.3 Моделирование процесса разгона турбины стартером

Заключение

5 Перечень графического и иллюстративного материала

Кинематическая схема микрогазотурбинной установки;

Математическая модель вентильного электропривода;

Графики основных показателей электрической машины;

Схема замещения нагрузки для стартера газовой турбины;

Рассчитанные с помощью разработанной модели графики переходных процессов;

Графики испытаний стартер-генератора в стартерном и генераторном режимах.

Всего 79 листов

Согласовано:

Руководитель

подпись

к.т.н.

Должность, звание

Гасияров Вадим Рашитович

Фамилия И.О.

Дата выдачи задания « ____ » _____ 201_ г.

Задание принял к исполнению студент

подпись

Демов Анатолий Анатольевич

Фамилия И.О.

АННОТАЦИЯ

Демов А.А. Разработка мехатронной системы стартер-генератора микрогазотурбинной установки. – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2017, 79 с. 33 ил., библиогр. список – 32 наим.

Дипломный проект представляет собой исследование системы запуска микрогазотурбинной установки с целью повышения надежности и улучшению динамических и энергетических показателей.

В работе была приведена общая характеристика исследуемого объекта, сделано патентное исследование применяемых в настоящее время систем запуска ГТД и выбрано техническое решение с учетом недостатков существующих. Совместно с инженерами предприятия произведен расчет двигателя стартер-генератора и получены основные показатели электрической машины, сделан расчет системы управления стартер-генератора и разработана математическая модель привода, осуществлено моделирование рабочих процессов стартер-генератора и выполнены испытания полученного электродвигателя в лаборатории института и на самом предприятии на микрогазотурбинной установке. После анализа полученных графиков и переходных процессов пришли к выводу, что разработанный привод удовлетворяет предъявляемые требования.

Спроектированная система запуска может быть применена на любых газотурбинных установках и газотурбинных двигателях малой мощности. В результате внедрения этого технического решения исключаются недостатки существующих методов запуска, улучшаются энергетические и качественные характеристики привода.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 10 |
| 1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ | 12 |
| 1.1 Характеристика предприятия..... | 12 |
| 1.2 Описание и принцип работы газотурбинного двигателя..... | 15 |
| 1.3 Характеристика и кинематическая схема модернизируемого механизма . | 19 |
| 1.4 Система запуска газотурбинных установок..... | 21 |
| 1.5 Выбор технического решения..... | 23 |
| 1.6 Описание оборудования | 26 |
| 1.7 Требования к системам запуска газотурбинных двигателей..... | 29 |
| 1.8 Расчет стартер-генератора микрогазотурбинной установки | 30 |
| 1.8.1 Конструкция стартер-генератора..... | 30 |
| 1.8.2 Определение диаметра и длины ротора | 33 |
| 1.8.3 Определение основных электромагнитных нагрузок..... | 34 |
| 1.8.4 Выбор величины воздушного зазора..... | 35 |
| 1.8.5 Выбор обмоточных данных..... | 39 |
| 1.8.6 Расчет магнитной цепи | 41 |
| 1.8.7 Моделирование магнитного поля и определение основных показателей машины..... | 44 |
| 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА..... | 51 |
| 2.1 Исходные данные для проектирования | 51 |
| 2.2 Краткое описание функциональной схемы | 53 |
| 2.3 Синтез контура тока..... | 54 |
| 2.4 Синтез контура скорости..... | 56 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5 Анализ динамических свойств виртуальной модели вентильного двигателя в среде Matlab | 58 |
| 3 ИСПЫТАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА | 62 |
| 3.1 Измерение ЭДС на холостом ходу | 62 |
| 3.2 Испытания в режиме стартера | 64 |
| 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СГ В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ | 75 |
| 4.1 Составляющие механической нагрузки. Схема замещения | 75 |
| 4.2 Исходные данные к уточнению параметров схемы замещения..... | 76 |
| 4.3 Моделирование процесса разгона турбины стартером..... | 77 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 80 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 81 |

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микротурбинные установки представляют собой наиболее современную разработку в области оборудования, предназначенного для выработки электроэнергии. Они представляют собой автономные генераторы, способные работать на многих типах топлива, вплоть до отходов производства и биологического мусора, что является одним из главных их достоинств. Кроме того, данные установки отличает широкая область применения. Они могут использоваться как в помещениях, так и в условиях воздействия окружающей среды; функционировать либо отдельно, либо в кооперации с основной электростанцией; применяться для выработки энергии в различных сферах хозяйственной жизни

человека: нефте- и газодобыче, промышленности, сельском хозяйстве, на военных объектах, в муниципальном хозяйстве, предпринимательских проектах и других сферах.

Для запуска газотурбинного двигателя необходимо принудительно, от внешнего источника энергии раскрутить вал турбины компрессора, подать в камеру сгорания определённое количество топлива, воспламенить его.

Несмотря на многообразие систем запуска газотурбинных двигателей, они все имеют стартер, обеспечивающий предварительную прокрутку ротора двигателя, источник энергии, необходимый для работы стартера, устройства, обеспечивающие подачу топлива и зажигание горючей смеси в камерах сгорания, агрегаты, обеспечивающие автоматизацию процесса запуска. Наименование систем запуска определяется типом стартера и источником питания.

В данный момент большинство электростартеров и стартер-генераторов реализованы с помощью ДПТ и релейной аппаратуры, которые имеют ряд известных недостатков, таких как наличие щеточного узла, ступенчатое регулирование, нестабильность временных характеристик.

Данная тема становится все более актуальной, потому что прогресс в областях электроники и используемых в электротехнике материалов изменили ситуацию в технике привода. До сих пор в технике применялись в основном двигатели постоянного тока. Главным недостатком двигателей переменного тока по сравнению с двигателями постоянного тока были в ограниченные возможности регулирования скорости. За последние десятилетия достижения в области преобразовательной техники, особенно в микроконтроллерах, позволяют компенсировать этот недостаток путем использования современных систем управления.

Одним из пример решения этих недостатков является использование частотно-регулируемого привода. Преимущества данной системы - это плавное регулирование скорости вращения электродвигателя, позволяющее в большинстве случаев отказаться от использования редукторов, дросселей и другой регулирующей аппаратуры, что значительно упрощает управляемую механическую систему, повышает ее надежность и снижает эксплуатационные расходы. Частотный пуск

управляемого двигателя обеспечивает его плавный без повышенных пусковых токов и механических ударов разгон, что снижает нагрузку на двигатель и связанные с ним передаточные механизмы, увеличивая срок их эксплуатации.

Цель работы: разработка мехатронной системы стартер-генератора микрогазотурбинной установки.

Достижение поставленной цели потребовало решения в дипломном проекте следующих основных задач:

- определение технологических требований к системе запуска микрогазотурбинной установки;
- расчет стартер-генератора, в качестве которого будет использован вентильный двигатель. Моделирование и проверка рабочих процессов двигателя;
- выбор системы управления электроприводом, расчет ее элементов и снятие переходных процессов;
- моделирование механических переходных процессов СГ в стартерном режиме.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика предприятия

АО СКБ «Турбина» является специализированным и единственным в РФ и ближнем зарубежье разработчиком и производителем малогабаритных газотурбинных двигателей (ГТД) и многофункциональных газотурбинных энергоагрегатов (ГТА) мощностью до 45 кВт. АО СКБ «Турбина» обладает опытом и возможностями для выполнения разработок в самом широком диапазоне требований Заказчика, обеспечивая при этом многофункциональность агрегатов, суммарную выходную мощность приводных агрегатов в диапазоне 12-45 кВт, выпол-

нение вспомогательных силовых установок с любым уровнем автономности, выполнение вспомогательных силовых установок в любых компоновочных вариантах.

Основная продукция АО СКБ «Турбина» – газотурбинные энергоагрегаты – относятся к высоко сложным изделиям, конструкция агрегата предъявляет производству повышенные требования. Для обеспечения указанных требований на АО СКБ «Турбина» организованы все основные виды производств, включающие порядка 20 технологических переделов, в том числе специальных и авиационных технологий, в том числе:

- литейное;
- кузнечно-штамповочное;
- холодно-штамповочное и трубогибочное;
- сборочно-сварочное;
- механообрабатывающие;
- гальвано-химические;
- лакокрасочное;
- термообработка;
- испытания;
- производство пружин;
- производство резино-технических изделий.

Литейное производство обеспечивает вакуумное литьё жаропрочных сплавов (в том числе цельное колесо турбины), алюминиевое литьё тонкостенных (5-6 мм) корпусных деталей, литьё фасонных деталей по выплавляемым моделям из широкой гаммы материалов, в том числе бронзовых сплавов. Качество литья 100% контролируется неразрушающими методами контроля. Имеется собственная лаборатория. Для ряда заготовок из труднодерных сплавов применяются операцииковки.

Холодно-штамповочное производство оснащено универсальным прессовым оборудованием, позволяет изготавливать сложные детали из листового мате-

риала и труб, в том числе из жаропрочных сталей. Обеспечивает следующие виды штамповочных техпроцессов: вырубка, гибка, просечка, вытяжка, выдавка и т.д.

Сварочное производство обеспечивает широкую гамму различных видов сварки и пайки (в том числе сварка трением разнородных материалов и пайка высокотемпературными припоями). Работы по пайке и сварке деталей преимущественно выполняются из нержавеющей и жаропрочных сплавов на основе никеля. Пайка производится в высокотемпературной печи в среде аргона. Сварочное производство оснащено необходимым комплектом оборудования для:

- автоматической сварки в среде защитных газов;
- точечной сварки;
- сварки трением.

Механообрабатывающее производство изготовления и доводки деталей характеризуется повышенной точностью изготовления, высокой чистотой обрабатываемой поверхности, сложной геометрией обрабатываемых поверхностей. В производственной базе имеются обрабатывающие центры, координатно-расчетные станки, зубошлифовальные станки, а также фрезерные установки собственного изготовления. На механическом переделе производятся операции резьбошлифовки, электрохимической и электрохимической электрохимической и электроэрозийной обработки, наружной, внутренней, бесцентровой и плоской шлифовки, доводки протягивания, зубодолбежки, зубофрезерования и зубошлифования. Освоены практически все виды мехобработки с точностью по 5-6 квалитету, в том числе из труднообрабатываемых материалов, а также тонкостенных деталей и узлов сложной конфигурации, зубошлифование с 5 степенью точности.

В производстве деталей и узлов на ОАО СКБ «Турбина» широко применяются электрохимические и химические процессы: оцинковка, омеднение, хромирование, лужение, химическое оксидирование, серноокисное анодирование, хромовокисное анодирование, твердое анодирование, электрополирование и пассивирование нержавеющей сталей.

Термообрабатывающее производство осуществляет термообработку деталей в камерных, шахтных и вакуумных печах сопротивления периодического действия, а также химико-термическую обработки (азотирование, нитроцементация, газовая цементация, цианирование) в шахтных печах.

В производстве резино-технических изделий подготовка резиновых смесей производится на вальцовочных и первичных машинах, вулканизация осуществляется на специализированных вулканизационных прессах. Позволяет изготавливать детали из резиновых смесей на основе фторкаучука.

Сборка агрегатов производится в изолированном помещении, обеспечивающем высокие требования по чистоте. Жесткие требования к балансировке вращающихся на высоких оборотах деталей и узлов обеспечиваются на серийно выпускаемом оборудовании. Приемосдаточные, периодические и квалификационные испытания выпускаемых изделий производятся в изолированных оборудованных необходимыми системами и приборами боксах.

АО СКБ «Турбина» обладает полным комплексом испытательного оборудования для осуществления всех видов испытаний:

- климатические;
- стенд наработки;
- вибродинамические;
- разгоночные.

Квалифицированный персонал и оборудование позволяют предприятию проводить следующие испытания:

- предварительные;
- приемо-сдаточная;
- квалификационные;
- периодические.

Испытательное оборудование позволяет симитировать любые внешние условия для испытания изделий в пределах норм, оговоренных в ТУ.

1.2 Описание и принцип работы газотурбинного двигателя

Газотурбинный двигатель (ГТД) – тепловой двигатель, в котором газ сжимается и нагревается, а затем энергия сжатого и нагретого газа преобразуется в механическую работу на валу газовой турбины.

На рисунке 1.1 представлен принцип работы ГТД. В отличие от поршневого двигателя, в ГТД процессы происходят в потоке движущегося газа. Сжатый атмосферный воздух из компрессора поступает в камеру сгорания, куда также подаётся топливо, которое, сгорая, образует большое количество газообразных продуктов сгорания под высоким давлением. Затем в газовой турбине энергия давления продуктов сгорания преобразуется в механическую работу за счёт вращения лопаток, часть которой расходуется на сжатие воздуха в компрессоре. Остальная часть работы передаётся на приводимый агрегат. Работа, потребляемая этим агрегатом, и считается полезной работой двигателя. Газотурбинные двигатели имеют самую большую удельную мощность среди ДВС, до 6 кВт/кг. В качестве топлива может использоваться любое горючее, которое можно диспергировать: бензин, керосин, дизельное топливо, мазут, природный газ, судовое топливо, водяной газ, спирт и измельчённый уголь.

Для понятия его работы газотурбинного двигателя, можно представить как вал, на котором находится два диска с лопатками, первый диск – компрессора, второй – турбины, в промежутке между ними установлена камера сгорания.

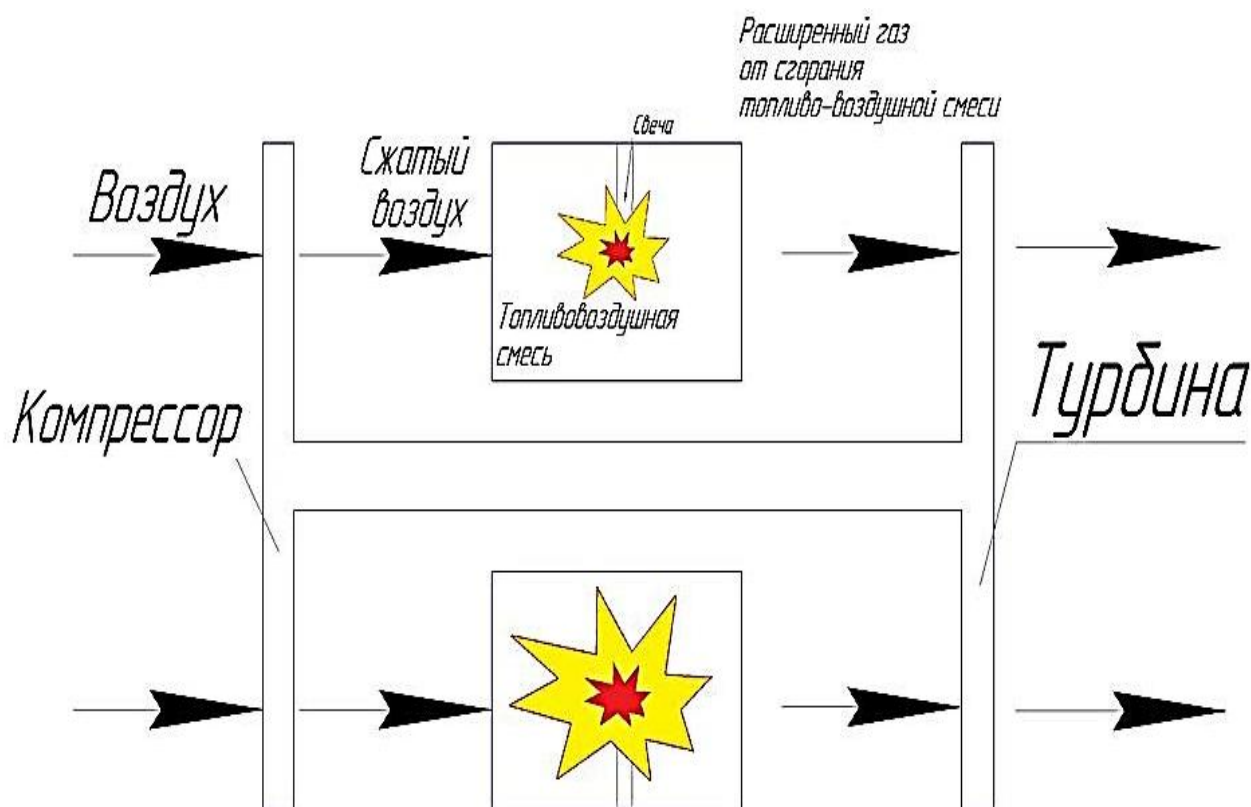


Рисунок 1.1 – Принцип работы газотурбинного двигателя

Одну из простейших конструкций газотурбинного двигателя, для понятия его работы, можно представить как вал, на котором находится два диска с лопатками, первый диск – компрессора, второй – турбины, в промежутке между ними установлена камера сгорания.

Принцип работы газотурбинного двигателя:

- всасывание и сжатие воздуха в лопаточном компрессоре, подача его в камеру сгорания;
- смешение сжатого воздуха с топливом для образования топливо-воздушной смеси (ТВС) и сгорание этой смеси;
- расширение газов из-за её нагрева при сгорании топливо-воздушной смеси, что формирует вектор давления газа, направленный в сторону меньшего сопротивления (в направлении лопаток турбины), передача энергии (давления) газа лопатками турбины на диск или вал, в котором эти лопатки закреплены;
- привод во вращение диска турбины и, вследствие этого, передача крутящего момента по валу с диска турбины на диск компрессора.

Увеличение количества подаваемого топлива (добавление «газа») вызывает генерирование большего количества газов высокого давления, что, в свою очередь, ведёт к увеличению числа оборотов турбины и диска(ов) компрессора и, вследствие этого, увеличению количества нагнетаемого воздуха и его давления, что позволяет подать в камеру сгорания и сжечь больше топлива. Количество топливо-воздушной смеси зависит напрямую от количества воздуха поданного в камеру сгорания. Увеличение количества ТВС приведёт к увеличению давления в камере сгорания и температуры газов на выходе из камеры сгорания и, вследствие этого, позволяет создать большую энергию выбрасываемых газов, направленную для вращения турбины и повышения реактивной силы.

Как и во всех циклических тепловых двигателях, чем выше температура сгорания, тем выше топливный коэффициент полезного действия (Если точнее, чем выше разница между «нагревателем» и «охладителем»). Сдерживающим фактором является способность стали, никеля, керамики или других материалов, из которых состоит двигатель, выдерживать температуру и давление.

Значительная часть инженерных разработок направлена на то, чтобы отводить тепло от частей турбины. Большинство турбин также пытаются рекуперировать тепло выхлопных газов, которое, в противном случае, теряется впустую. Рекуператоры – это теплообменники, которые передают тепло выхлопных газов сжатому воздуху перед сгоранием. При комбинированном цикле тепло передается системам паровых турбин. И при комбинированном производстве тепла и электроэнергии (когенерация) отработанное тепло используется для производства горячей воды.

Чем меньше двигатель, тем выше должна быть частота вращения вала (ов), необходимая для поддержания максимальной линейной скорости лопаток, так как длина окружности (путь, проходимый лопатками за один оборот), прямо зависит от радиуса ротора. Максимальная скорость турбинных лопаток определяет максимальное давление, которое может быть достигнуто, что приводит к получению максимальной мощности, независимо от размера двигателя. Реактивный двигатель вращается с частотой около 10000 об/мин и с частотой около 100000 об/мин.

Для дальнейшего развития авиационных и газотурбинных двигателей рационально применять новые разработки в области высокопрочных и жаропрочных материалов для возможности повышения температуры и давления. Применение новых типов камер сгорания, систем охлаждения, уменьшения числа и массы деталей и двигателя в целом, возможно в прогрессе применение альтернативных видов топлива, изменение самого представления конструкции двигателя.

1.3 Характеристика и кинематическая схема модернизируемого механизма

В настоящее время конструкторы СКБ Турбина занимаются проектировкой новой микротурбинной установки МГТУ-100. МГТУ 100 – микротурбинная энергоустановка, не имеющая аналогов на отечественном рынке.

Данная установка имеет ряд технологических преимуществ:

- низкие расходы на эксплуатацию: в работе системы не используются масла, смазки, охлаждающие жидкости (в процессе работы отсутствуют трение элементов и вибрации, а значит риск поломок минимален;
- сервисное обслуживание занимает 1 рабочий день, интервал обслуживания – 1 год. При этом в течение 2-3 лет после начала эксплуатации обслуживание состоит из визуального осмотра, диагностики и замены расходников (воздушных фильтров, инжекторов, термопар и свечей зажигания);
- микротурбина имеет возможность работать с такой производительностью, которая необходима в данный момент, а значит не будет возникать проблем с переизбытком энергии;
- экологичность. Бесспорное преимущество этой установки – низкий показатель вредных выбросов в атмосферу;
- возможность комбинирования нескольких функций: режим когенерации (энергия и тепло) и режиме тригенерации (энергия, тепло и кондиционер);
- коэффициент использования топлива свыше 90%, а значит установка выдает высокую отдачу за счет трансформации тепловой энергии.

Она предназначена для автономного энергоснабжения:

- жилых зданий. Оборудование подойдет как для многоквартирных, так и для частных домов;

- производственных помещений;

- коммерческих сооружений.

Турбина МГТУ 100 может не только обеспечивать электричеством жилые и промышленные объекты, но может выполнять функции когенерационной установки, обогревая помещения.

Используя это оборудование в нефтегазовой отрасли, можно повысить экологичность процесса добывания нефти, используя попутный нефтяной газ в качестве топлива для турбины, и отказавшись от факельных систем утилизации, загрязнявших атмосферу.

Преимущества МГТУ 100:

- более выгодная себестоимость электроэнергии. Стоимость электричества, полученного с помощью турбины вдвое ниже сетевых цен. Инвестиции, вложенные в это оборудование, окупятся за 2-4 года;

- высокая энергоэффективность оборудования. Для работы МГТУ 100 используется только газ. Коэффициент его переработки 90%;

- турбина МГТУ 100 позволяет резервировать электроэнергию, поэтому, используя это оборудование, вы получаете полную независимость от централизованной электросети;

- не требуется больших эксплуатационных расходов;

- оборудование имеет компактные размеры и его легко устанавливать;

- можно компоновать несколько турбин в большие блоки. При этом новые электрогенераторы можно подключать к уже работающим турбинам. В блоке может быть до 10 турбин по 100 кВт. Для выполнения такого монтажа не потребуется много времени.

МГТУ 100 может работать не только в режиме когенерации, но и в режиме тригенерации (вырабатывать электричество, обеспечивать обогрев и кондиционирование помещения).

Для оптимального режима работы турбина должна быть подключена к газовой сети. Использовать газ в баллонах не выгодно. Поэтому турбину лучше применять в населенных пунктах для обеспечения бесперебойной подачи электричества на предприятия и в жилые дома.

1.4 Система запуска газотурбинных установок

Для возможности использования любого двигателя по прямому назначению необходимо вывести его на минимальный режим устойчивой работы. Процесс вывода двигателя на этот режим, называемый режимом малого газа, и представляет собой запуск. Для запуска ГТД нужно раскрутить его ротор до определённых оборотов, чтобы компрессор начал подавать достаточное количество воздуха (в отличие от объёмных компрессоров, подача инерционных (динамических) компрессоров квадратично зависит от частоты вращения и поэтому на малых оборотах практически отсутствует), и поджечь подаваемое в камеру сгорания топливо. Со второй задачей справляются свечи зажигания, зачастую установленные на специальных пусковых форсунках, а раскрутка выполняется стартёром той или иной конструкцией.

В зависимости от требуемой мощности и условий применения используются различные стартеры, из которых наибольшее распространение получили три типа: электрический, газотурбинный и воздушный.

Электростартер (ЭСТ). Электростартер представляет собой электрический двигатель постоянного тока, питаемый от аккумуляторных батарей или от газотурбинной вспомогательной установки с электрогенератором. Ротор электростартера через зубчатую передачу соединяется при запуске с ротором двигателя. В электростартере при постоянном напряжении питания по мере увеличения n из-за уменьшения силы тока существенно понижается крутящий момент. Силу тока, а, следовательно, и крутящий момент при увеличении n можно повысить, увеличив напряжение питания. Для этого используют переключение аккумуляторных батарей с параллельной схемы на последовательную: в начале запуска осуществ-

ляют питание электростартера напряжением 24 В, а затем 48 В. В результате не возникает чрезмерно большой ток в начале запуска и увеличивается мощность стартера при повышенной n . Система питания 24/48 В несколько усложняет аппаратуру включения и приводит к более быстрой разрядке аккумуляторных батарей, но позволяет ускорить запуск.

Помимо электростартеров широкое применение нашли электрические стартеры-генераторы, которые на запуске работают как стартеры, а на основных режимах – как генераторы, приводимые от двигателей.

Стартер-генератор состоит из двух основных узлов: неподвижного статора и вращающегося ротора-якоря. Статор включает корпус, в котором размещены полюса с обмоткой и щетки коллектора. По торцам к корпусу прикреплены болтами фланцы с шарикоподшипниками, в которых вращается якорь. Обмотки якоря выведены на пластины коллектора. В верхней части статора установлена клеммная панель с болтами, к которым крепятся шины электропитания. Для воздушного охлаждения якоря на роторе установлена крыльчатка вентилятора. Для облегчения центровки и уменьшения передаваемых вибраций соединение стартера с двигателем осуществляется посредством гибкого вала-рессоры.

Таким образом, стартер-генератор кинематически всегда связан с ротором двигателя. В то же время частота вращения вала стартера-генератора должна быть при запуске малой, а при работе в генераторном режиме – большой. Поэтому в приводе от стартера-генератора к ротору двигателя применяется двухскоростная передача, включающая в себя планетарную передачу и две муфты свободного хода: храповую и роликовую.

Основное преимущество стартера-генератора заключается в том, что вместо двух агрегатов (стартера и генератора) на двигатель устанавливается один, что уменьшает массу и стоимость системы. Стартеры-генераторы достаточно компактны и выполнены почти в тех же габаритах, что и электрические стартеры прямого действия, развивают в стартерном режиме мощности до 20.. 25 кВт, а их КПД составляет 0,8...0,9.

1.5 Выбор технического решения

Преимущества электрического запуска определяются общими достоинствами электрического привода: простота управления, легкость автоматизации, надежность, быстрота пуска. Важно и то, что электрический запуск не требует специальных источников питания, для него используются существующие источники, необходимые в качестве резерва или работы самолетных систем в аварийных режимах или на стоянке. К этим источникам относятся аккумуляторные батареи и вспомогательные силовые установки.

Недостатком электростартеров является увеличение их массы с ростом мощности. Применение стартер-генераторов позволяет снизить массу, приходящуюся на стартерную часть системы запуска, так как в качестве стартера используется генератор, необходимый для электроснабжения.

В настоящее время известны несколько способов запуска ГТД, в которых в качестве пускового устройства используется Э/С или СТГ.

В известном техническом решении (см. [1]) Э/С или СТГ подключается к бортовым или наземным источникам электроэнергии через пусковое сопротивление, которое необходимо для исключения динамических перегрузок в механизме сцепления Э/С или СТГ с ротором ГТД.

В процессе запуска ГТД непрерывная раскрутка ротора ГТД обеспечивается при условии избытка мощности пускового устройства по отношению к мощности, затрачиваемой на работу компрессора, на работу насосов и других агрегатов, а также на преодоление момента сил трения в ГТД. По мере роста частоты вращения Э/С или СТГ увеличивается противоЭДС и ток Э/С или СТГ уменьшается. Для обеспечения избытка мощности последовательно исключают (шунтируют) пусковое сопротивление с дальнейшим повышением напряжения на Э/С или СТГ путем переключения соединения источников электроэнергии с параллельного на последовательное. Команды на выполнение операций по исключению (шунтированию) пускового сопротивления и переключения источников электроэнергии выдаются по жесткой временной программе.

Недостатком существующего технического решения является то, что при изменении состояния источников электроэнергии или атмосферных условий запуска возникает большой разброс временных характеристик запуска ГТД, а также происходит значительное изменение тока Э/С или СТГ, что отрицательно сказывается на источниках электроэнергии.

Известна система запуска газотурбинного двигателя, содержащая электростартер или стартер-генератор, механически соединенный с ротором газотурбинного двигателя, источники электроэнергии, пусковое сопротивление, коммутационные элементы, обеспечивающие отключение пускового сопротивления и переключение источников электроэнергии электростартера или стартера-генератора (см. [2]), в котором в процессе запуска ГТД исключение (шунтирование) пускового сопротивления и (или) очередное увеличение напряжения питания осуществляются по сигналу реле минимального тока, включенного в цепь якоря Э/С или СТГ.

Недостатком таких технических решений является то, что сигнал, выдаваемый реле, настраивается на максимальную величину тока, которая определяется предельно допустимым тепловым режимом Э/С или СТГ, который реализуется при повышенной температуре окружающей среды и максимально допустимого количества попыток запуска подряд. В то же время при запуске ГТД в условиях отрицательных значений температуры окружающей среды требуется повышенная величина тока, либо запуск ГТД вообще не состоится, и в этом случае надо настраивать реле на выдачу сигнала с более высоким порогом срабатывания реле. Такой режим работы стартера неэкономичен на этапе сопровождения во время запуска (т.е. период, когда частота вращения турбины приближается к частоте вращения стартера, близкой к максимальной частоте вращения холостого хода). Кроме того, при длительном запуске стартер работает в режиме тяжелой нагрузки, что сказывается на его надежности и долговечности. Даже кратковременная работа стартера в режиме максимальных оборотов холостого хода также нежелательна, так как при этом резко возрастает возможность механической перегрузки якоря и растут требования к подшипникам стартера.

С целью преодоления этих недостатков в известных газотурбинных двигателях прибегают к значительному повышению температуры рабочего тела во время запуска, превышающей температуру рабочего тела при работе под нагрузкой. Это нежелательно, так как резкая тепловая перегрузка холодного двигателя приводит к существенному снижению его надежности и долговечности. Кроме того, это неэкономично и полностью не решает проблему сокращения времени запуска.

Задачей, на решение которой направлено настоящее техническое, является оптимизация энергетических характеристик запуска вне зависимости от состояния источников электроэнергии при запуске ГТД, а так же увеличение надежности системы и упрощение конструкции.

Поставленная задача решается за счет того, что запуск газотурбинного двигателя осуществляется стартер-генератором на базе вентильного двигателя, управляемого в момент пуска преобразователем частоты.

Электрическая машина выполнена с возможностью работы в режиме синхронного электрического генератора после запуска газотурбинного двигателя и с возможностью работы в режиме электрического двигателя во время фазы запуска газотурбинного двигателя, при этом главная электрическая машина содержит статор со статорными обмотками и ротор с постоянными магнитами. Сам вентильный двигатель механически соединен с валом газотурбинного двигателя.

Согласно отличительному признаку стартера-генератора, он управляется преобразователем частоты, который в свою очередь управляется микроконтроллером. Информация об угловом положении ротора высчитывается в математической модели по токовым значениям электродвигателя. В нашем случае значение положения ротора вентильного двигателя определяется по безынерционному датчику положения. В частности, областью применения данного технического решения являются стартеры-генераторы для авиационных тяговых газотурбинных двигателей или для вспомогательных газотурбинных силовых установок или АРУ («Auxiliary Power Unit»), установленных на летательных аппаратах. Вместе с тем

изобретение можно применять и для других типов газотурбинных двигателей, например, для промышленных турбин.

1.6 Описание оборудования

Вентильный электродвигатель (ВД) – это разновидность электродвигателя постоянного тока, у которого коллекторно-щеточный узел заменен бесконтактным полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора. Механическая и регулировочная характеристики вентильного двигателя линейны и идентичны механической и регулировочной характеристикам электродвигателя постоянного тока. Как и электродвигатели постоянного тока, вентильные двигатели работают от сети постоянного тока. ВД можно рассматривать как двигатель постоянного тока (обращенный), в котором щеточно-коллекторный узел заменён электроникой, что подчёркивается словом «вентильный», то есть «управляемый силовыми ключами» (вентильями). Фазные токи вентильного двигателя имеют синусоидальную форму. Как правило, в качестве усилителя мощности применяется автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией. В русскоязычной литературе двигатель называют вентильным, если противо-ЭДС управляемой синхронной машины синусоидальная, а бесконтактным двигателем постоянного тока, если противо-ЭДС трапецеидальная.

Вентильные двигатели, сочетающие в себе надёжность машин переменного тока с хорошей управляемостью машин постоянного тока, являются альтернативой двигателям постоянного тока (ДПТ), которые характеризуются рядом изъянов, связанных со щеточно-коллекторным узлом (ЩКУ), таких как искрение, помехи, износ щёток, плохой теплоотвод якоря и проч. Отсутствие ЩКУ позволяет применять ВД в тех приложениях, где использование ДПТ затруднено или невозможно.

Конструктивно современные вентильные привода состоят из электромеханической части (синхронной машины и датчика положения ротора) и из управляющей части (микроконтроллер и силовой мост).

По расположению ротора вентильные двигатели делятся на внутрироторные (англ. *inrunner*) и внешнероторные (англ. *outrunner*).

Синхронная машина, используемая в ВД, состоит из шихтованного (собранного из отдельных электрически изолированных листов электротехнической стали – для снижения вихревых токов) статора, в котором расположена многофазная (обычно двух- или трёхфазная) обмотка, и ротора (обычно на постоянных магнитах).

Для изготовления ротора раньше использовались ферритовые магниты, что определялось их распространённостью и дешевизной. Однако такие магниты характеризуются низким уровнем магнитной индукции. В настоящее время интенсивно используются магниты из сплавов редкоземельных элементов, поскольку они позволяют получить более высокий уровень магнитной индукции и уменьшить размер ротора.

В качестве датчиков положения ротора в БДПТ применяются датчики Холла, а в ВД – вращающиеся трансформаторы и накапливающие датчики. В «бездатчиковых» системах информация о положении определяется системой управления по мгновенным значениям фазных токов.

Информация о положении ротора обрабатывается микропроцессором, который, согласно программе управления, вырабатывает управляющие ШИМ-сигналы. Низковольтные ШИМ-сигналы микроконтроллера затем преобразуются усилителем мощности (обычно транзисторным мостом) в силовые напряжения, подаваемые на двигатель.

Вентильные двигатели призваны объединить в себе лучшие качества двигателей переменного тока и двигателей постоянного тока. Это обуславливает их достоинства.

Достоинства:

- широкий диапазон изменения частоты вращения;
- бесконтактность и отсутствие узлов, требующих частого обслуживания;
- возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде;
- большая перегрузочная способность по моменту;

- высокие энергетические показатели (КПД выше 90 %);
- большой срок службы и высокая надёжность за счёт отсутствия скользящих электрических контактов.

Вентильные двигатели характеризуются и некоторыми недостатками, главный из которых – высокая стоимость. Однако, говоря о высокой стоимости, следует учитывать и тот факт, что вентильные двигатели обычно используются в дорогостоящих системах с повышенными требованиями по точности и надёжности.

Недостатком является высокая стоимость двигателя, обусловленная частым использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора. Стоимость электропривода с ВД, однако, сопоставима со стоимостью аналогичного электропривода на основе ДПТ с независимым возбуждением (регулируемые характеристики такого двигателя и ВД сопоставимы).

Вообще говоря, в вентильном двигателе может быть использован и ротор с электромагнитным возбуждением, однако это сопряжено с комплексом практических неудобств. В ряде случаев предпочтительным оказывается применение асинхронного двигателя с преобразователем частоты.

Существенно лучшие условия пуска обеспечивает преобразователь частоты, который позволяет в пределах диапазона регулирования поддерживать любой момент на валу вплоть до критического без риска для двигателя.

Используя ПЧ, можно добиться следующих преимуществ:

- высокий коэффициент мощности (при использовании неуправляемого выпрямителя);
- малая мощность управления (единицы Вт);
- малое время переключения (сотни наносекунд), высокая допустимая частота коммутации (до 15 кГц);
- возможность выпуска в виде гибридных модулей.

Применение системы ПЧ - ВД обеспечивает:

- решение сложных технологических задач за счёт регулирования параметров движения рабочих машин и механизмов, в том числе в замкнутых САУ;

- существенное энерго- и ресурсосбережение благодаря оптимизации режимов работы оборудования с учетом его свойств и характеристик, высоких энергетических показателей;

- эффективное использование приводных электродвигателей за счет оптимизации законов частотного управления, высокого качества выходного напряжения;

- увеличение ресурса работы электротехнического и механического оборудования, в том числе электродвигателей, за счет плавности регулирования, отсутствия пусковых токов повышенной кратности и механических ударных нагрузок.

1.7 Требования к системам запуска газотурбинных двигателей

К системам запуска предъявляют следующие основные требования:

1) Создание необходимого момента (19,7 Н·м) для преодоления статического и динамического момента сопротивления;

2) Обеспечение вывода авиадвигателя на заданный режим за время не более 20 секунд. Это время не может быть больше некоторого предельного значения, чтобы не допустить перегрева газов в камере сгорания и снижения прочности и ресурса лопаток турбины вследствие повышения температур;

3) Экономичное и рациональное расходование электрической энергии. Это требование обуславливается ограниченной мощностью источника электрической энергии, в качестве которых для стартеров могут использоваться аккумуляторные батареи, бортовые или аэродромные генераторные установки;

4) Двигатель должен надежно запускаться во всех условиях эксплуатации без дополнительной регулировки перед запуском элементов автоматики и топливорегулирующей аппаратуры;

5) Запуск двигателей от бортовых источников энергии должен быть автономным, а емкость бортовых источников энергии должна обеспечивать (без их промежуточной дозарядки или дозаправки) последовательные запуски;

6) Запуск двигателя должен быть автоматизированным;

7) Система запуска должна быть безопасной и при необходимости обеспечивать быстрое прекращение процесса запуска;

8) Система запуска должна иметь минимально возможные габариты и массу, а агрегаты системы запуска – возможность многоцелевого использования;

9) Система запуска должна иметь низкую стоимость изготовления и технического обслуживания;

10) Ресурс системы запуска должен быть соизмерим с ресурсом двигателя.

1.8 Расчет стартер-генератора микрогазотурбинной установки

На основе параметров микрогазотурбинной установки мы с инженерами СКБ «Турбина» сформировали параметры электрической машины, необходимой для надежного пуска ГТД.

Требуемые показатели электрической машины приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Заданные параметры

| Наименование параметра | Значение параметра |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Выходная мощность, кВт | 100 |
| Номинальная частота вращения ротора, об/мин | 60000 |
| Максимальная частота вращения ротора, об/мин | 65000 |
| Тип системы охлаждения | воздушная с продувом |
| Номинальное напряжение (амплитудное значение линейного напряжения), В | 400–500 |

1.8.1 Конструкция стартер-генератора

Машина имеет классическую конструкцию (см. рисунок 1.2): ротор, несущий постоянные магниты, расположен внутри, статор с обмоткой якоря — снаружи. Ввиду высокой частоты вращения число полюсов ротора принято равным 2.

Функцию сердечника ротора выполняет вал (1) из магнитопроводящей стали. Магниты (2) на поверхности ротора дополнительно крепятся немагнитным бандажом (на рисунке не показан).

Статор (3) зубчатый, в пазы уложена распределенная обмотка якоря (4). Каждый полюс предлагается набирать из трех магнитных сегментов. Направление намагниченности каждого сегмента совпадает с осью, перпендикулярной его основанию (например, на рисунке 1.3 – ось «у» для верхнего сегмента).

Сегментирование позволяет снизить поверхностные потери в магнитах и упрощает технологию их намагничивания. Для предотвращения проворачивания магнитов между полюсами предусмотрены промежутки для немагнитных клиньев.

Ротор отделен от статора воздушным зазором, размер которого должен быть достаточным для размещения бандажной оболочки и исключения касания ротором статора вследствие термического расширения элементов магнитной системы.

В качестве материала сердечника статора выбрана высококачественная листовая сталь 2421 с толщиной листа 0,28 мм по ГОСТ 21427-2-83. Возможность замены на более доступную сталь 2412 с толщиной листа 0,35 мм может быть рассмотрен после моделирования магнитного поля.

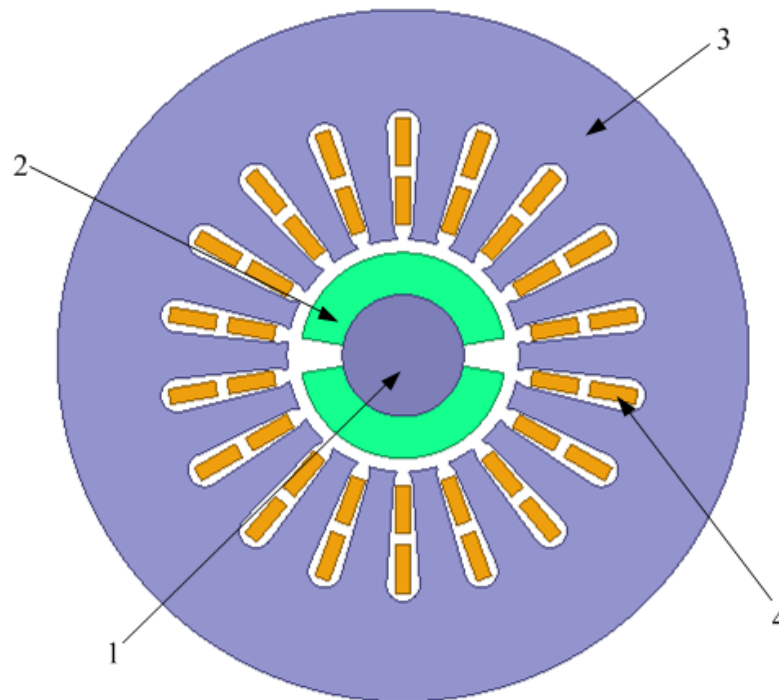
Материал сердечника ротора (вала) – сталь 30ХГСА. Материал магнитов – SmCo с параметрами $B_r = 1,08$ Тл, $H_c = 780$ кА/м (при 20 °С).

Материала бандажа ротора – титановый сплав ВТ-22 со следующими характеристиками: предел прочности на текучесть 900 МПа, модуль Юнга 112 ГПа, плотность 4600 кг/м³, коэффициент теплового расширения $12 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, электрическое сопротивление $1,53 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Расчет высокооборотной машины должен проводиться при комплексном учете электромагнитных явлений, тепловых процессов и механической прочности конструкции.

Вследствие достаточно компактных размеров электрической машины, обусловленных необходимостью обеспечения механической прочности вращающего-

ся с большой скоростью ротора, ожидается, что тепловые нагрузки будут на предельном уровне. Вследствие этого, расчетная температура внутри машины была принята близкой к предельной температуре изоляции проводников якорной обмотки – на уровне 170 °С.



1 – сердечник ротора (вал), 2 – полюс, 3 – сердечник статора,
4 – якорная обмотка

Рисунок 1.2 – Эскиз электромагнитной части стартер-генератора

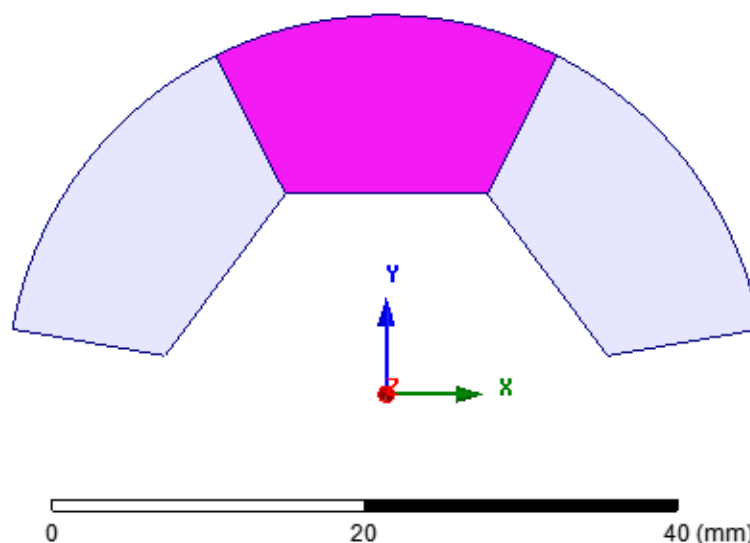


Рисунок 1.3 – К пояснению сегментирования магнитов

1.8.2 Определение диаметра и длины ротора

Максимально допустимый по условиям прочности диаметр ротора может быть рассчитан по выражению [3]:

$$D_1 = \frac{60}{\pi \cdot n_{\max}} \sqrt{\frac{\sigma g}{\rho k_T}}, \quad (1)$$

где n_{\max} – максимальная частота вращения ротора;

σ – предел текучести материала постоянного магнита;

g – ускорение свободного падения;

ρ – плотность материала постоянного магнита;

k_T – коэффициент запаса по пределу текучести, равный 1,3–1,5.

В качестве постоянного магнита видится целесообразным применение материала SmCo. Выбор материала продиктован вероятной высокой температурой внутри электрической машины. Ввиду малости диаметра расточки статора, скорее всего, отвод и съем тепла от обмотки и с поверхности якоря будет затруднен.

Следует также ожидать существенного значения магнитных потерь в сердечнике статора и добавочных потерь в бандаже и на поверхности магнитов, обусловленных высокой частотой перемагничивания. Кроме того, близость турбины также создает предпосылки к высокой температуре внутри машины. Тогда максимально допустимый по условиям прочности диаметр ротора составит:

$$D_1 = \frac{60}{\pi \cdot 65000} \sqrt{\frac{35 \cdot 10^6 \cdot 9,8}{8200 \cdot 1,3}} = 0,053 \text{ м.}$$

Длина ротора высокооборотной машины выбирается, с одной стороны, как можно более малой, что позволяет обеспечить нормальную роторную динамику, с другой стороны – короткий ротор обладает относительно большим рассеянием.

Поскольку на данном этапе проектирования анализ роторной динамики не проводился, выберем длину ротора, минимально возможной, ориентируясь на оптимальности электромагнитных характеристик. В дальнейшем расчет может быть скорректирован. В ряде работ [4, 5] длину ротора рекомендуется выбирать по соотношению:

$$l_{\delta}=(2\div 3)D_1. \quad (2)$$

В работе [3] показано, что оптимальное распределение магнитных потоков в высокооборотной машине достигается при $l_{\delta} \geq 3D_1$.

Предварительно примем активную длину ротора равной:

$$l_{\delta}=3D_1 \approx 0,16 \text{ м.}$$

1.8.3 Определение основных электромагнитных нагрузок

По рекомендациям [6] для авиационных синхронных генераторов максимальная линейная нагрузка якоря для машины с продувом может быть принята равной $3,8 \cdot 10^4$ А/м, произведение линейной нагрузки на плотность тока не должно превышать $7 \cdot 10^5$ (А/мм²).

Тогда магнитная индукция, обеспечивающая развитие номинальной мощности, может быть рассчитана по уравнению Арнольда:

$$B_{\delta} = \frac{6,1k_e P}{\alpha_{\delta} D_1^2 l_{\delta} A n k_{\phi} k_{об}}, \quad (3)$$

где k_e – отношение эдс в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению;

P – номинальная мощность;

α_{δ} – коэффициент полюсной дуги;

n – номинальная частота вращения;

k_{ϕ} – коэффициент формы поля, который при трапецеидальном поле в зазоре может быть принят равным 1,25–1,29;

$k_{об}$ – обмоточный коэффициент (примем $k_{об}=0,95$).

Тогда индукция в воздушном зазоре составит:

$$B_{\delta} = \frac{6,1 \cdot 1,11 \cdot 105 \cdot 10^3}{0,87 \cdot 0,053^2 \cdot 0,16 \cdot 3,8 \cdot 10^4 \cdot 60000 \cdot 1,25 \cdot 0,95} = 0,66 \text{ Тл.}$$

1.8.4 Выбор величины воздушного зазора

Воздушный зазор выбирается, главным образом, исходя из технологических ограничений с учетом возможного термического расширения бандажной оболочки ротора.

Полный немагнитный зазор равен:

$$\delta = \delta_{\phi} + \delta_{в}, \quad (4)$$

где δ_{ϕ} – толщина бандажа;

$\delta_{в}$ – минимальная величина воздушного зазора между бандажированным ротором и статором.

Рекомендованное в [3] значение величины воздушного зазора составляет 1–1,2 мм. Примем $\delta_{в} = 1,2$ мм. Толщина бандажа выбирается исходя из требований прочности. Бандажная оболочка может быть выполнена в виде цельной немагнитной гильзы, устанавливаемой с натягом поверх магнитов, или путем намотки на ротор нити из специального композиционного материала.

Второй способ хоть более технологичным, требует специального намоточного оборудования. Для изготовления гильз используют жаропрочные хромоникелевые сплавы (З6НХТЮ «Элинвар», Инконель718) или титан марок ВТ-8, ВТ-22.

Выберем в качестве материала бандажа титановый сплав ВТ-22. Рассчитаем требуемую толщину бандажа [3]. Предварительно примем толщину магнита равной 10 мм. Предварительная толщина бандажа ротора без учета массы бандажной оболочки:

$$b = \frac{\omega^2 \rho_c (r_1 + r_2) (D_4^2 - D_3^2)}{16 \sigma_M} k_\sigma, \quad (5)$$

где ω – максимальная угловая скорость ротора;
 ρ_c – средняя плотность материала ротора;
 r_1 и r_2 – внутренний и наружный диаметры ротора;
 σ_M – предел прочности на текучесть материала бандажа;
 D_3 и D_4 – внутренний и внешний диаметры магнита;
 $k_\sigma = 1,5$ – коэффициент запаса прочности бандажа.

$$b = \frac{\left(65000 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60}\right)^2 \cdot 8000 \cdot (0,0265 + 0,0005) \cdot (0,05^2 - 0,03^2)}{16 \cdot 900 \cdot 10^6} \cdot 1,5 = 1,67 \text{ мм.}$$

Напряжения, действующие в бандажной оболочке должны быть меньше предела текучести материала бандажа. При этом бандаж должен создавать усилие, прижимающее магнит к ротору. Эту силу можно найти по системе уравнений, представленной ниже:

$$\begin{cases} p_N = p_{\text{пред}} + p_{\text{терм}} - p_{\text{ц}} > 0; \\ k_\sigma (\sigma_{\text{пред}} + \sigma_{\text{терм}} + \sigma_{\text{ц}}) < \sigma, \end{cases} \quad (6)$$

где p_N – остаточное давление бандажа на магнит;
 $p_{\text{пред}}$, $\sigma_{\text{пред}}$ – давление и механическое напряжение, создаваемые преднатягом бандажа;

$p_{\text{терм}}, \sigma_{\text{терм}}$ – давление и механическое напряжение, создаваемые термическим расширением ротора;

$p_{\text{ц}}, \sigma_{\text{ц}}$ – давление и механическое напряжение, создаваемые центробежными силами.

При расчете предварительно принято, что толщина бандажа составляет 1,5 мм, внутренний диаметр ротора условно принят равным 1мм, средняя плотность ротора определена исходя из того что плотность стали 30ХГСА составляет 7800 кг/м³, плотность магнита – 8200 кг/м³.

Механическое напряжение и давление, определяемые преднатягом бандажа найдем по следующим формулам:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{пред}} = \frac{\Delta D_6}{D_4} E_6; \\ p_{\text{пред}} = \sigma_{\text{пред}} \left[\frac{r_{\text{вну}}^2}{r_{\text{вн}}^2 - r_{\text{вну}}^2} \left(1 + \frac{r_{\text{вн}}^2}{r_{\text{ср}}^2} \right) \right]^{-1}, \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta D_6 = 100$ мкм – преднатяг бандажа;

E_6 – модуль Юнга;

$r_{\text{вну}}, r_{\text{вн}}, r_{\text{ср}}$ – внутренний, наружный и средний радиусы бандажа.

$$\sigma_{\text{пред}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,05} 112 \cdot 10^9 = 220 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{пред}} = 20 \cdot 10^6 \left[\frac{0,025^2}{0,027^2 - 0,025^2} \left(1 + \frac{0,027^2}{0,026^2} \right) \right]^{-1} = 15,63 \text{ МПа}.$$

Внутренний, наружный и средний радиусы бандажа:

$$r_{\text{вну}} = \frac{D_4}{2} - \Delta D_6 = \frac{0,05}{2} - 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,025; \quad (8)$$

$$r_{BH} = \frac{D_4}{2} + b = \frac{0,05}{2} + 1,67 \cdot 10^{-3} = 0,0267; \quad (9)$$

$$r_{cp} = \frac{r_{BHy} + r_{BH}}{2} = \frac{0,025 + 0,0267}{2} = 0,026. \quad (10)$$

Механическое напряжение и давление, создаваемые термическим расширением ротора:

$$\begin{cases} \sigma_{терм} = \frac{\Delta D_T}{D_4} E_{\sigma} = \frac{6,4 \cdot 10^{-5}}{0,05} 112 \cdot 10^9 = 132 \text{ МПа}; \\ p_{терм} = \sigma_{терм} \frac{b}{2r_{BHy}} = 132 \cdot 10^6 \frac{1,67 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,025} = 4,42 \text{ МПа} \end{cases} \quad (11)$$

где $\Delta D_T = \alpha_{Bt} D_4 (T_{2M} - T_{1M})$ – линейное расширение магнита при нагреве;

α_{Bt} – коэффициент линейного расширения магнита в радиальном направлении;

T_{2M}, T_{1M} – установившаяся и начальная температура магнита соответственно.

$$\Delta D_T = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,05 (170 - 20) = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Механическое напряжение и давление, создаваемые центробежной силой:

$$\begin{cases} \sigma_{ц} = \omega^2 r_{cp}^2 \rho_6^2 = \left(\frac{65000 \cdot 2 \cdot \pi}{60} \right)^2 \cdot 0,026^2 \cdot 4600^2 = 141,7 \text{ МПа}; \\ p_{ц} = \rho_6 \omega^2 r_{cp} b = 4600 \left(\frac{65000 \cdot 2 \cdot \pi}{60} \right)^2 \cdot 0,026 \cdot 1,67 \cdot 10^{-3} = 9,17 \text{ МПа}, \end{cases} \quad (12)$$

где ρ_6 – плотность материала бандажа.

Произведем проверку механической прочности бандажа по уравнениям:

$$\begin{cases} p_N = 15,63 + 4,42 - 9,17 = 10,89 \text{ МПа} > 0; \\ k_\sigma (\sigma_{\text{перед}} + \sigma_{\text{терм}} + \sigma_{\text{ц}}) = 1,5(220 + 132 + 141,7) = 740,5 \text{ МПа} < 900 \text{ МПа}. \end{cases} \quad (13)$$

Толщина бандажа обеспечивает механическую прочность ротора. Уточним толщину бандажа, произведя расчет с учетом его массы:

$$b = \frac{\omega^2 \left[\rho_\sigma \left(\frac{D_6}{2} + \frac{D_4}{2} - \Delta D_6 \right) (D_6^2 - (D_4 - \Delta D_6)^2) + \rho_c (r_1 + r_2) (D_4^2 - D_3^2) \right]}{16\sigma_M} k_\sigma \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (14)$$

Таким образом, толщина бандажа составила 2 мм, тогда суммарная величина немагнитного зазора – 3,2 мм.

1.8.5 Выбор обмоточных данных

Далее произведем расчет обмотки. Число витков в фазе обмотки статора определим по выражению:

$$W_\phi = \frac{pk_e U_\phi}{4k_{\text{об}} k_\phi f B_\delta D_1 l_\delta} = \frac{1,1 \cdot 285,78}{4 \cdot 0,95 \cdot 1,25 \cdot 1000 \cdot 0,66 \cdot 0,053 \cdot 0,16} = 11,73 \quad (15)$$

Ближайшее целое число витков – 12.

Фазное напряжение, соответствующее этому числу витков выразим через следующее уравнение:

$$U_\phi = \frac{4W_\phi k_{\text{об}} k_\phi f B_\delta D_1 l_\delta}{pk_e} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 0,95 \cdot 1,25 \cdot 1000 \cdot 0,66 \cdot 0,053 \cdot 0,16}{1,1} = 292,33 \text{ В}. \quad (16)$$

Далее нам необходимо найти фазный ток электрической машины. Зная мощность и фазное напряжение можно найти фазный ток из выражения, приведенного ниже:

$$I_{\phi} = \frac{P}{m \cdot U_{\phi}} = \frac{105000}{3 \cdot 292,33} = 119,73 \text{ А.} \quad (17)$$

Уточним линейную нагрузку якоря:

$$A = \frac{2mI_{\phi}W_{\phi}}{\pi D_a} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 119,73 \cdot 12}{\pi \cdot 0,0594} = 46200 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (18)$$

Полученное значение линейной нагрузки отличается от ранее принятого более чем на 20% и превосходит допустимое значение. При заданных значениях индукции в воздушном зазоре и частоты вращения ротора скорректировать линейную нагрузку можно только изменяя длину машины. Более того, проведенный расчет магнитной цепи показал, что при заданных размерах магнитной системы удастся получить индукцию в воздушном зазоре лишь на уровне 0,52 Тл. С учетом указанных обстоятельств была произведена корректировка длины ротора и числа витков якоря. При этом были получены следующие результаты: длина ротора была принята равной 0,19 м.

Число витков в фазе:

$$W_{\phi} = \frac{1,1 \cdot 285,78}{4 \cdot 0,95 \cdot 1,25 \cdot 1000 \cdot 0,66 \cdot 0,053 \cdot 0,19} = 9,8 \quad (19)$$

Примем $W_{\phi} = 12$. Напряжение на фазе:

$$U_{\phi} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 0,95 \cdot 1,25 \cdot 1000 \cdot 0,66 \cdot 0,053 \cdot 0,16}{1,1} = 347,14 \text{ В.} \quad (20)$$

Ток фазы и линейная нагрузка якоря:

$$I_{\phi} = \frac{105000}{3 \cdot 289,28} = 100,82 \text{ А;} \quad (21)$$

$$A = \frac{2 \cdot 3 \cdot 100,82 \cdot 12}{\pi \cdot 0,0594} = 38900 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (22)$$

Для размещения проводников якорной обмотки примем число пазов статора равным 18. При этом число пазов на полюс и фазу получается равным $q=3$. Шаг обмотки по пазам примем укороченным, равны 8, что позволит несколько сэкономить обмоточный провод, уменьшит сопротивление обмотки. На одну фазу приходится 6 пазов, поэтому каждая катушка фазы состоит из 2 эффективных проводников.

1.8.6 Расчет магнитной цепи

Для расчета магнитной цепи необходимо уточнить параметры постоянных магнитов с учетом температуры. Основные параметры постоянного магнита не остаются неизменными при нагреве. Как правило, эти изменения приводят к изменению мощности двигателя. Коэрцитивная сила и остаточная индукция изменяются в соответствии с выражениями:

$$B_r = B'_r \left(1 - \frac{k_B}{100} (t - t_0) \right); \quad (23)$$

$$H_c = H'_c \left(1 - \frac{k_H}{100} (t - t_0) \right), \quad (24)$$

где B'_r, H'_c – остаточная индукция и коэрцитивная сила при базовой t_0 ;
 k_B, k_H – температурные коэффициенты по индукции и по напряженности;
 t – температура магнита;
 t_0 – базовая температура, для которой заданы параметры магнита.

Например, для магнитов N35EH на основе NdFeB производства фирмы SpaceMagnets по сведениям [3] $k_B = 0,09\%/^{\circ}\text{C}$, $k_H = 0,5\%/^{\circ}\text{C}$, предельная рабочая

температура составляет 200°C.

Для магнитов SmCo – $k_B = 0,04\%/^\circ\text{C}$, $k_H = 0,3\%/^\circ\text{C}$, предельная рабочая температура составляет 350°C. Принимая во внимание вышеизложенное, в качестве материала магнитов выберем $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$.

Основные параметры выбранного материала приведены в таблице 2. Рабочую температуру магнита примем равной 170°C.

Таблица 2 – Основные параметры постоянных магнитов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

| Наименование параметра | Значение параметра |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Остаточная индукция при 20°C, Тл | 1,08 |
| Коэрцитивная сила по индукции при 20°C, кА/м | 780 |
| Температурный коэффициент по индукции, %/°C | -0,03 |
| Температурный коэффициент по напряженности, %/°C | -0,2 |
| Предельная рабочая температура, °C | 300 |
| Плотность, кг/м ³ | 8200 |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °C) | 13 |
| Коэффициент теплового расширения в направлении намагничивания, 1/°C | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| Коэффициент теплового расширения в направлении перпендикулярном направлению намагничивания, 1/°C | $11 \cdot 10^{-6}$ |
| Предел прочности на растяжение, МПа | 35 |
| Предел прочности на сжатие, Мпа | 800 |
| Твёрдость по Виккерсу (HV) | 500 |
| Удельное электрическое сопротивление, Ом/м | $8,6 \cdot 10^{-7}$ |

На рисунке 1.4 показаны зависимости индукции, коэрцитивной силы и энергетического произведения магнитов из рассматриваемых материалов в зави-

симости от температуры. Кривые построены в предположении, что температурные коэффициенты остаются неизменными во всем диапазоне температур.

В действительности эти параметры можно считать неизменными лишь до 120°C. При дальнейшем повышении температуры коэффициенты несколько увеличиваются. Как видно из полученных зависимостей, в области температур выше 70°C магниты из материала SmCo превосходят магниты из материала NdFeB по энергетическому произведению и коэрцитивной силе.

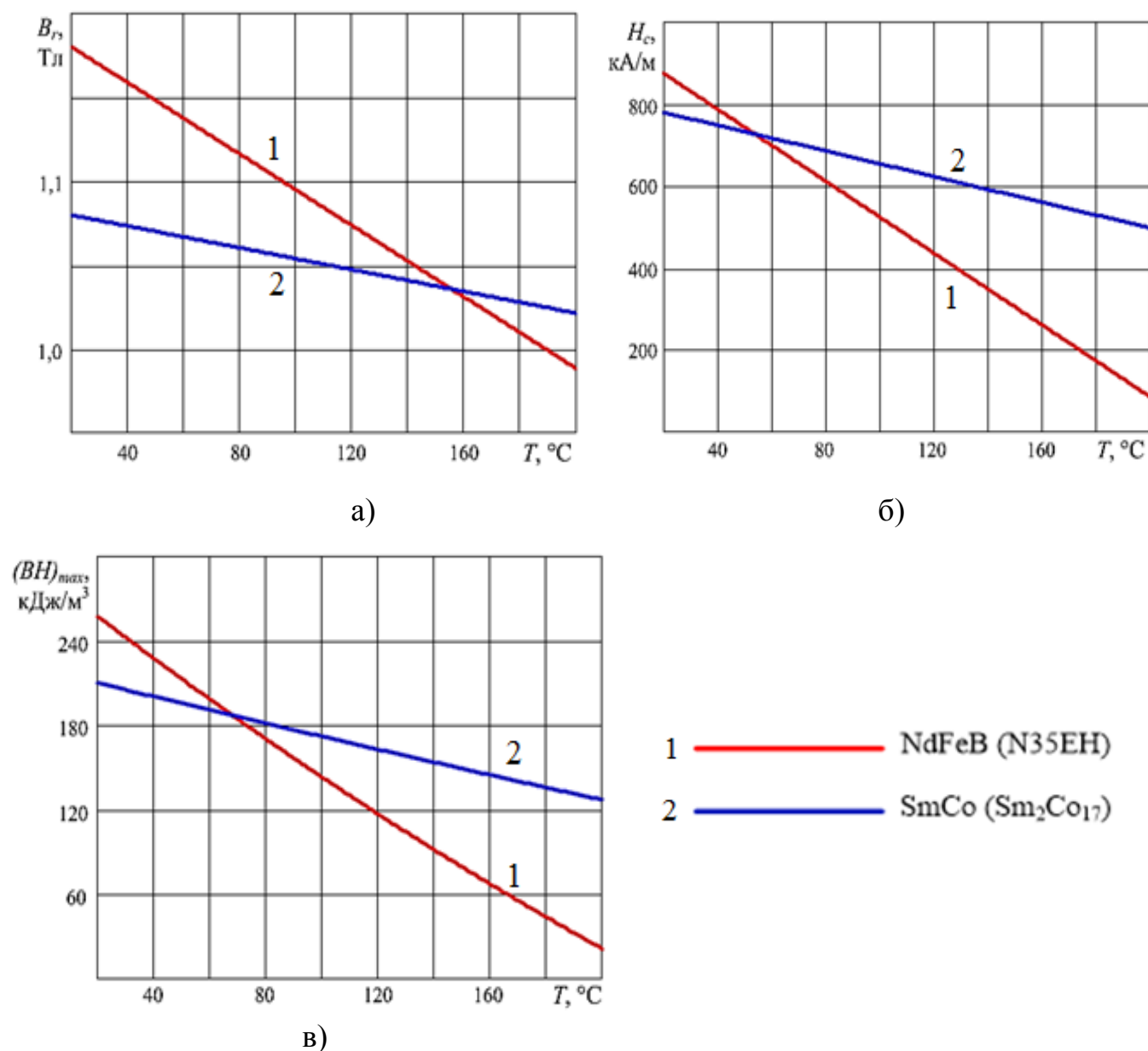


Рисунок 1.4 – Зависимости остаточной индукции (а), коэрцитивной силы (б) и энергетического произведения (в) магнитов от температуры

При принятой рабочей температуре остаточная индукция и коэрцитивная сила магнитов составит:

$$B_r = B'_r \left(1 - \frac{k_B}{100} (t - t_0) \right) = 1,08 \left(1 - \frac{0,03}{100} (170 - 20) \right) = 1,03 \text{ Тл}; \quad (25)$$

$$H_c = H'_c \left(1 - \frac{k_H}{100} (t - t_0) \right) = 780 \left(1 - \frac{0,2}{100} (170 - 20) \right) = 546 \frac{\text{кА}}{\text{м}}. \quad (26)$$

Расчет магнитной цепи проводился по стандартной методике. В результате были определены размеры участков магнитной системы, уточнены электромагнитные нагрузки. Эскизы магнитной системы представлены на рис.

В ходе расчетов было выявлено, что при заданных условиях не удается получить индукцию воздушного зазора более 0,53 Тл. Большие значения индукции могут быть получены при выборе другого материала магнита. В тоже время, хотя информация о материалах на основе SmCo с лучшими чем принято показателями встречается в литературе, возникают сомнения в широкой доступности этих материалов. По указанной причине было принято решение увеличить длину ротора до 205 мм.

1.8.7 Моделирование магнитного поля и определение основных показателей машины

Уточнение параметров конструкции электрической машины и определение ее показателей производилось по результатам моделирования магнитного поля в активном объеме. Совместно с инженерами предприятия была создана конечная элементная модель магнитного поля, которая была построена в программном комплексе ANSYS Electronics Desktop. Расчетная модель генератора представлена на рисунке 1.5. В силу симметрии магнитного поля рассматривалась половина магнитной системы машины. Для всех элементов конструкции были заданы свой-

ства материалов. Обмотка генератора нагружалась на неуправляемый мост, к выходу которого была подключена активная нагрузка (см. рисунок 1.6). Величина нагрузочного резистора подбиралась экспериментально. Сопротивление диода в открытом состоянии было принято равным 1 мОм.

На начальном этапе моделирование проводилось в 2D постановке задачи.

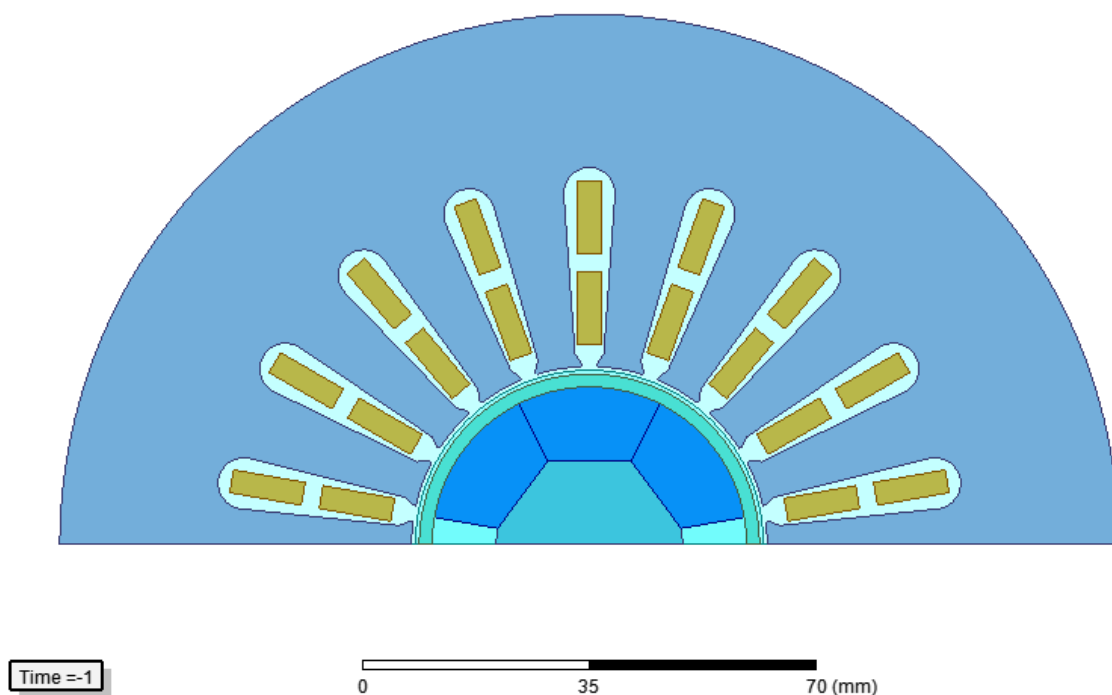


Рисунок 1.5 – Расчетная модель стартер-генератора

В качестве граничных условий были приняты:

- 1) условия непрерывности поля на линии симметрии модели,
- 2) нулевое значение векторного магнитного потенциала на внешнем контуре модели.

Моделирование проводилось в режиме Transient. При этом учитывалось движение ротора относительно статора, изменение магнитного поля в магнитопроводе машины и изменение токов в ее обмотках.

Рассчитывались мгновенные значения электрических и магнитных параметров машины: токов и эдс обмоток, тока и напряжения на нагрузке, мощности на нагрузке. Определялись потери в железе статора, потери в обмотках, потери в бандаже и магнитах.

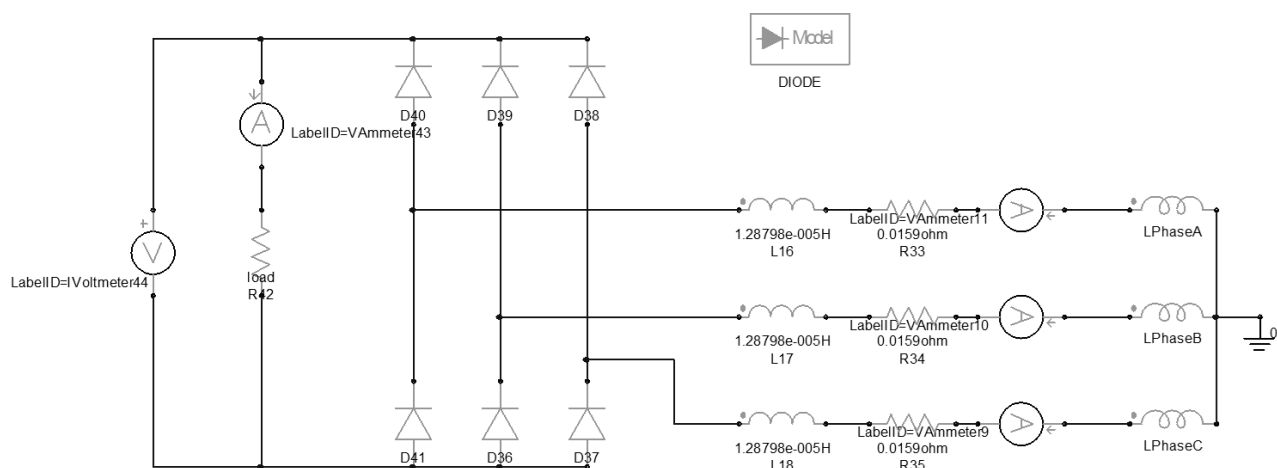


Рисунок 1.6 – Модель полупроводникового преобразователя для генераторного режима работы

Температура обмотки была принята равной 170°C , температура постоянных магнитов также принималась равной 170°C . Для выполнения предъявленных требований пришлось увеличить длину машины еще на 5 мм, до 210 мм. Расхождение с первоначальным расчетом можно объяснить более полным учетом потерь в машине при решении полевой задачи.

Результаты моделирования магнитного поля представлены на рисунке 1.7. Результаты расчета показателей машины – на рисунках 1.8–1.11. Все результаты получены при частоте вращения ротора 60000 об/мин, сопротивлении нагрузки $R_n=3,7$ Ом, температуре обмотки и магнита $T_m=T_{об}=170^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, по результатам численных экспериментов были рассчитаны потери в машине. Результаты расчета потерь приведены в таблице 3.

Моделирование работы в двигательном режиме проводилось в предположении, что питание машины осуществляется от источника синусоидального напряжения. Для выхода на заданный режим угол между напряжением и эдс был установлен равным 11 эл. градусов. При этом на частоте вращения 40000 об/мин электрическая машина обеспечивает момент на валу 10 Нм. Фазные токи в этом режиме составили 78 А (среднеквадратичное значение), что не превышает номинального тока генераторного режима.

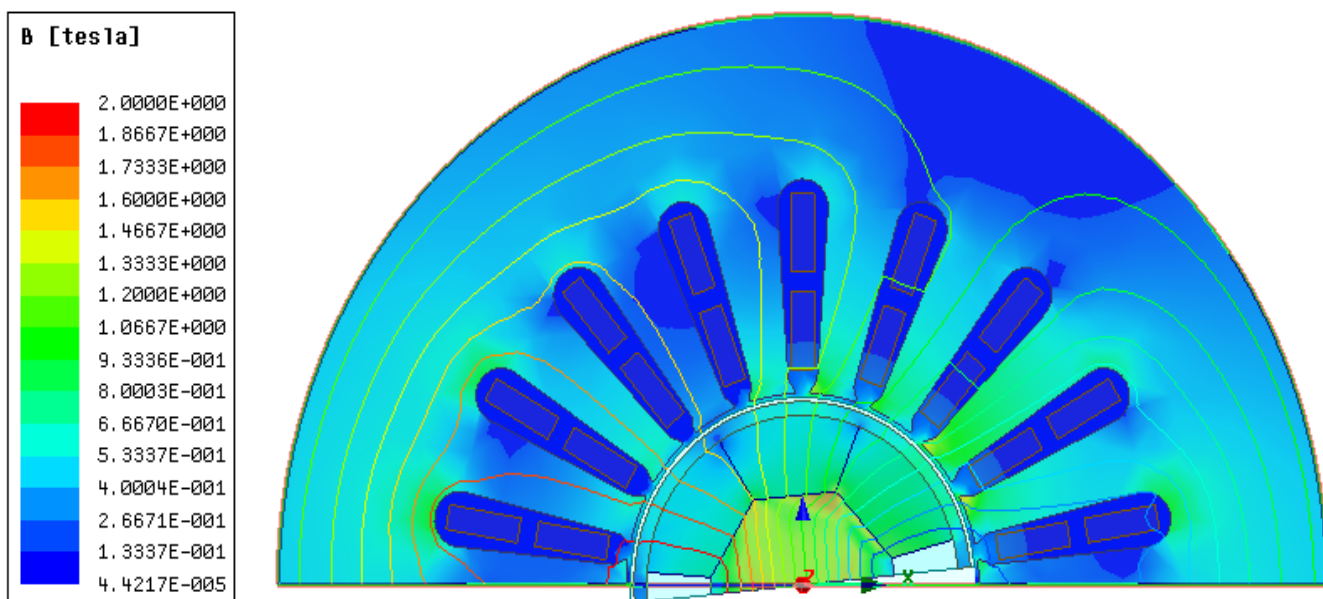


Рисунок 1.7 – Распределение магнитного поля в рабочем объеме машины для одного из моментов времени

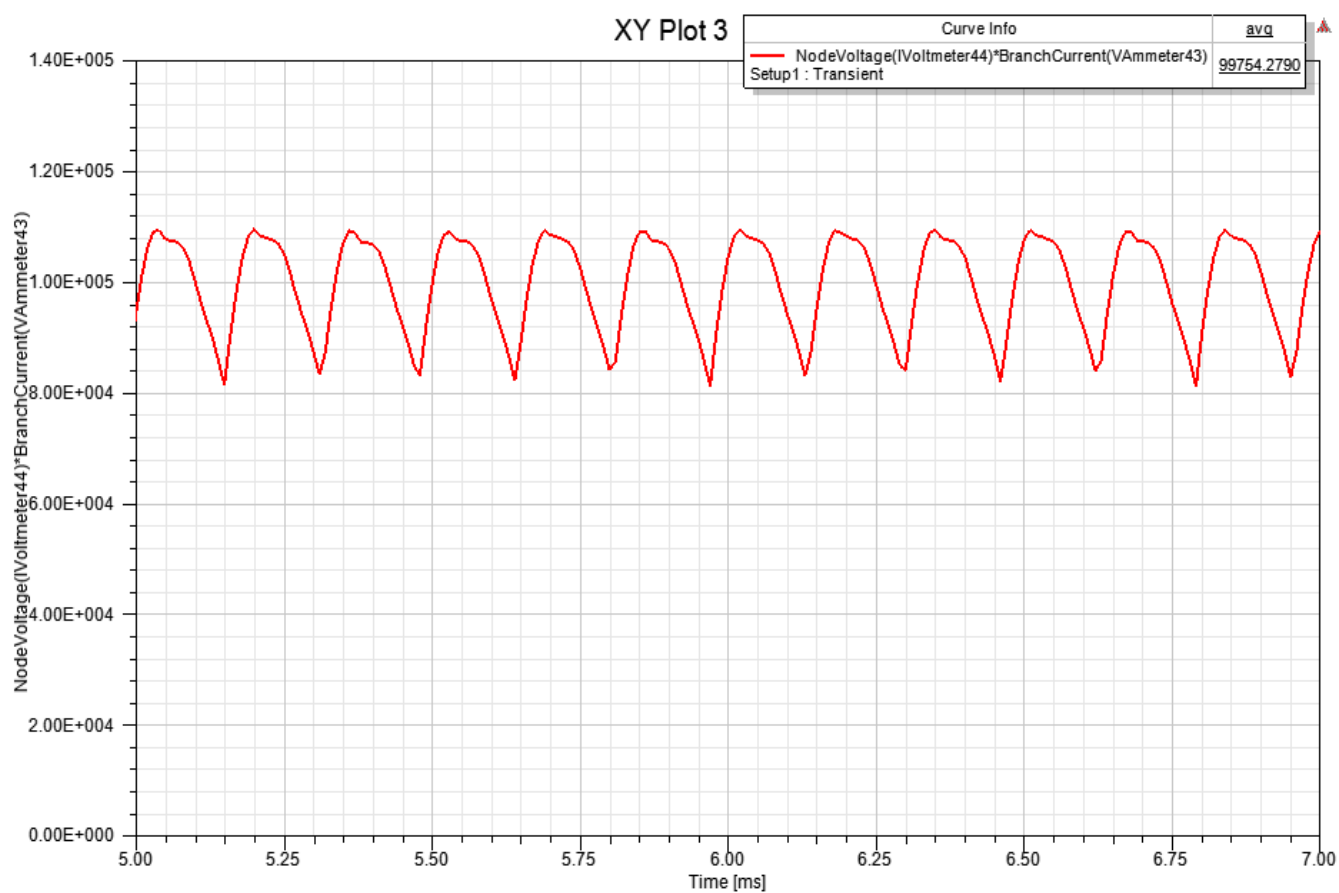


Рисунок 1.8 – Выходная мощность в генераторном режиме (среднее значение 99,75 Вт)

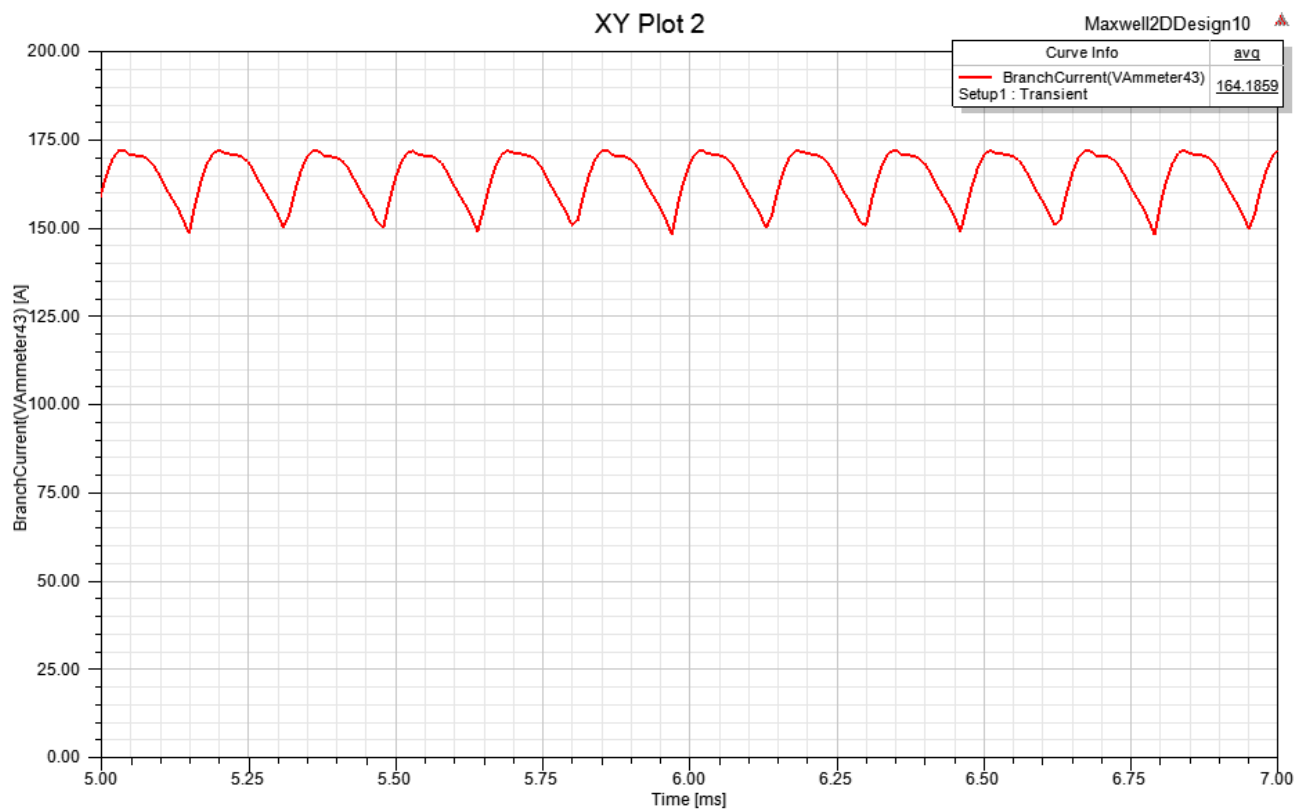


Рисунок 1.9 – Ток нагрузки (среднее значение 164,2 А)

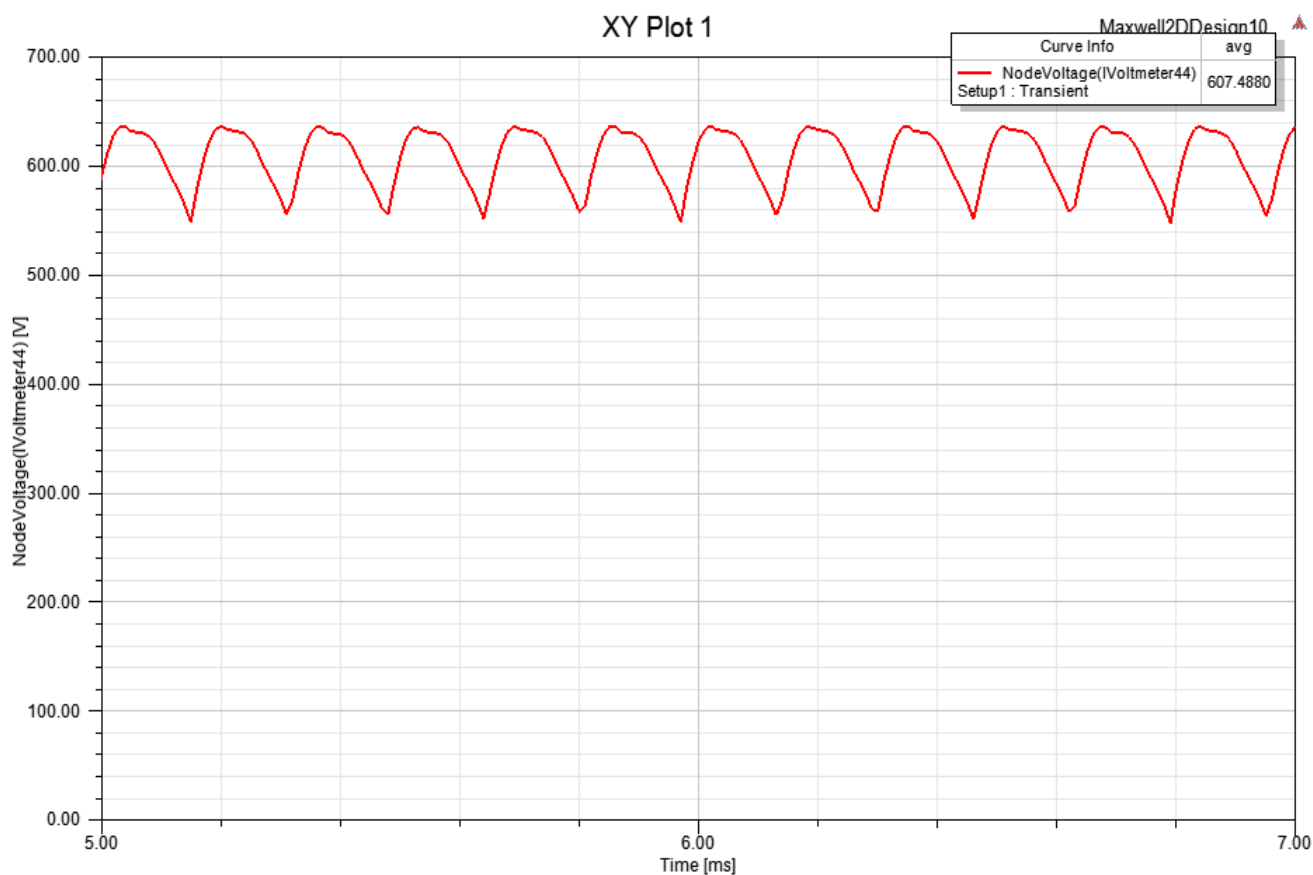


Рисунок 1.10 – Напряжение на нагрузке (среднее значение 607,5 В)

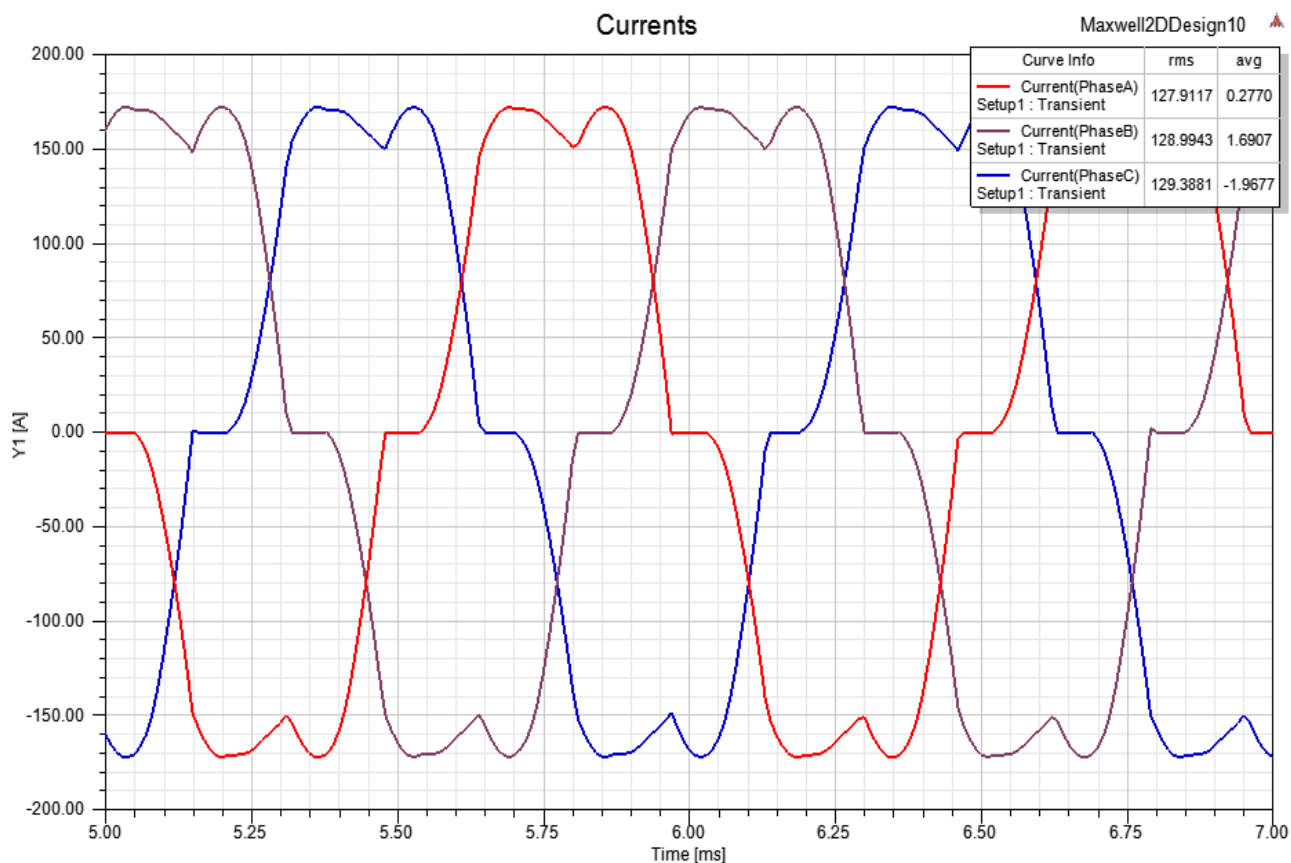


Рисунок 1.11 – Токи фаз стартер-генератора при работе в генераторном режиме (среднеквадратичное значение 129 А)

Таблица 3 – Потери в машине при работе в генераторном режиме (60000 об/мин, $R_H=3,7$ Ом, $T_M=T_{об}=170^\circ\text{C}$)

| Наименование показателя | Значение показателя |
|----------------------------------------------------|---------------------|
| Полезная мощность на нагрузке, кВт | 99,75 |
| Магнитные потери в статоре, кВт | 0,87 |
| Потери от вихревых токов в магнитах и бандаже, кВт | 1,29 |
| Электрические потери в обмотке якоря, кВт | 0,63 |
| Суммарные потери в машине, кВт | 2,79 |
| Кпд | 0,97 |

Электрические параметры машины:

- активное сопротивление фазы $R_\phi = 16$ мОм;
- индуктивность фазы $L_\phi = 156$ мкГн.

В результате моделирования стартер-генератора были определены основные параметры двигателя при работе микрогазотурбинной установки с номинальной частотой вращения вала. Среднее значение мощности на выходе генератора составило около 99...100 к Вт, среднее значение тока нагрузки 162,4 А, средне-квадратичное значение тока фаз стартер-генератора при работе в генераторном режиме 129 А, среднее значение напряжения на нагрузке 607,5 В.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

2.1 Исходные данные для проектирования

Дальнейшее исследование двигателя с характеристиками, представленными в таблице 3, проведем в программе Matlab.

Таблица 3 – Характеристики вентильного электродвигателя

| Параметр | Значение |
|-----------------------------------------------------|----------|
| Максимальная частота вращения n_{max} , об/мин | 65000 |
| Вращающий момент при n_{max} M , Н·м | 22,7 |
| Номинальный момент при $n=30000$ об/мин M_n , Н·м | 4,8 |
| Длительный момент при $n=60000$ M_o , Н·м | 19,3 |
| Номинальный ток фазы при $20C^0$ I_{do} , А | 100,82 |
| Сопротивление фазы при $20C^0$ R_{ϕ} , Ом | 0,016 |
| Индуктивность 2-х фаз последовательно L , мкГн | 156 |
| Момент инерции ротора J , кгм ² | 0.001213 |

Рассчитаем параметры элементов силовой цепи. Эквивалентное активное сопротивление двух фаз статора двигателя, включенных последовательно:

$$R_{\Sigma} = R_{дв} = 2 \cdot R_{\phi} = 2 \cdot 0,016 = 0,032 \text{ Ом.} \quad (27)$$

Индуктивность двух фаз статора двигателя:

$$L_{дв} = 2 \cdot L = 312 \text{ мкГн.} \quad (28)$$

Момент, создаваемый двигателем при номинальной частоте вращения будет равен 18,5 Н·м.

Электромагнитная постоянная времени якорной цепи:

$$T_{\varepsilon} = \frac{L_{\text{дв}}}{R_{\text{дв}}} = \frac{0,000312}{0,032} = 0,0098 \text{ с.} \quad (29)$$

Номинальная скорость вращения двигателя:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_{\text{н}}}{30} = 6280 \text{ рад/с.} \quad (30)$$

Суммарный момент инерции привода:

$$J = 1,3 \cdot J_{\text{дв}} = 0,001577 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (31)$$

Механическая постоянная времени:

$$T_{\text{м}} = 0,476 \text{ с.} \quad (32)$$

Коэффициент обратной связи по скорости:

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{зсн}}}{\omega_{\text{н}}} = \frac{10 \div 15}{6280} = 0,00159 - 0,00239. \quad (33)$$

Примем $K_{\text{ос}} = 0,002$.

$K_{\text{м}} \approx K_{\omega} = 6,25$ – коэффициенты пропорциональности между током и моментом, между угловой скоростью и ЭДС.

Коэффициент передачи преобразователя рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{м}} \approx \frac{U_{\text{дв}}}{\text{с}} = \frac{K_{\omega} \cdot \omega}{\text{с}} = \frac{6,25 \cdot 60000}{10} \approx 3925. \quad (36)$$

Зададимся условиями ограничения параметров системы и примем:

$$U_{зтmax} \leq 10 \text{ В} \rightarrow I_{ст} = (2 \div 3) I_{н}. \quad (34)$$

С учетом этих условий по выражению (35) примем коэффициент обратной связи по току:

$$K_T \leq \frac{U_{зтmax}}{I_{ст}} = \frac{U_{зтmax}}{(2 \div 3) I_{н}} = \frac{10}{(2 \div 3) \cdot 100,82} = 0,04959 - 0,03306. \quad (35)$$

Примем $K_T = 0,041$.

2.2 Краткое описание функциональной схемы

Для осуществления автоматического регулирования необходимо измерить сигнал обратной связи, затем этот результат в виде напряжения сравнить (произвести алгебраическое суммирование) с заданным в виде напряжения значением регулируемой величины и направить результат сравнения регулируемому объекту. Обычно энергии измерительного органа оказывается недостаточно для воздействия на объект регулирования, поэтому возникает необходимость в применении усилительного устройства.

Регулятор тока якоря получает на вход сигнал задания $U_{зт}$ с выхода регулятора скорости и сигнал обратной связи $U_{дт}$ с выхода датчика тока. На выходе он формирует напряжение управления U_y . Сигнал обратной связи по току снимается с датчика на основе трансформаторов тока, установленных на стороне переменного тока. Датчик тока осуществляет гальваническое разделение цепей управления от главных цепей и усиление по напряжению.

На регулятор тока (РТ) возлагаются также другие функции:

1) Установка задания на переключение соответствующих пар транзисторов в зависимости от разности сигналов задания тока и обратной связи по току;

2) Обеспечение режима торможения электродвигателя.

В системах подчиненного регулирования выходной сигнал регулятора скорости является сигналом задания тока $U_{зт}$ для регулятора тока.

На регулятор скорости и связанные с ним узлы возлагаются дополнительные задачи:

- 1) Ограничение сигнала $U_{зт}$ допустимым значением, которое может зависеть от значения потока двигателя Φ ;
- 2) Ограничение скорости изменения тока di/dt ;
- 3) Формирование требуемой жесткости механических характеристик электропривода;
- 4) Прием сигналов задания скорости двигателя;
- 5) Обеспечение изменения ЭД с определенным ускорением и др.

2.3 Синтез контура тока

Рассмотрим контур тока, представленный на рисунке 2.1:

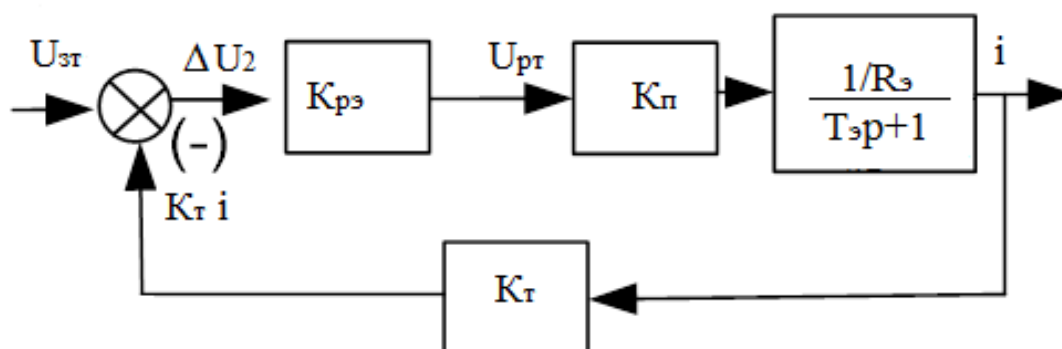


Рисунок 2.1 – Структурная схема контура тока

Структурная схема контура тока включает: $K_{рэ}$ – коэффициент передачи релейного элемента; $K_{п}$ – коэффициент передачи преобразователя; $R_{э}$ – эквивалентное сопротивление цепи статора; $T_{э}$ – электромагнитная постоянная времени статорной цепи.

Передаточная функция замкнутого контура тока имеет вид:

$$W_{зт}(p) = \frac{i(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot \frac{1}{T_э p + 1}}{1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T \cdot \frac{1}{T_э p + 1}}; \quad (36)$$

$$W_{зт}(p) = \frac{i(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э}{T_э p + (1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T)}. \quad (37)$$

Приведем ее к стандартному виду:

$$W_{зт}(p) = \frac{i(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{\frac{K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э}{1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T}}{\frac{T_э}{(1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T)} p + 1} = \frac{K}{T_{01} p + 1}, \quad (38)$$

где K – эквивалентный коэффициент усиления замкнутого контура тока;
 T_{01} – эквивалентная постоянная времени замкнутого контура тока.

$$K = \frac{K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э}{1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T} = \frac{12,74 \cdot 3925 \cdot 1/0,032}{1 + 12,74 \cdot 3925 \cdot 1/0,032 \cdot 0,041} \approx 24,4; \quad (39)$$

$$T_{01} = \frac{T_э}{1 + K_{пэ} \cdot K_n \cdot 1/R_э \cdot K_T} = \frac{0,0098}{1 + 12,74 \cdot 3925 \cdot 1/0,032 \cdot 0,041} \approx 1,53 \cdot 10^{-7} \text{ с}. \quad (40)$$

Постоянная времени T_{01} выбирается исходя из динамических свойств реле. Т.к. очень малое значение постоянной времени практически не влияет на динамические свойства системы. Примем $T_{01} = 0$ с, тогда замкнутый контур тока можно представить безынерционным звеном с коэффициентом передачи $K \approx \frac{1}{K_T} = 24,4$.

2.4 Синтез контура скорости

На рисунке 2.2 приведена структурная схема контура скорости.

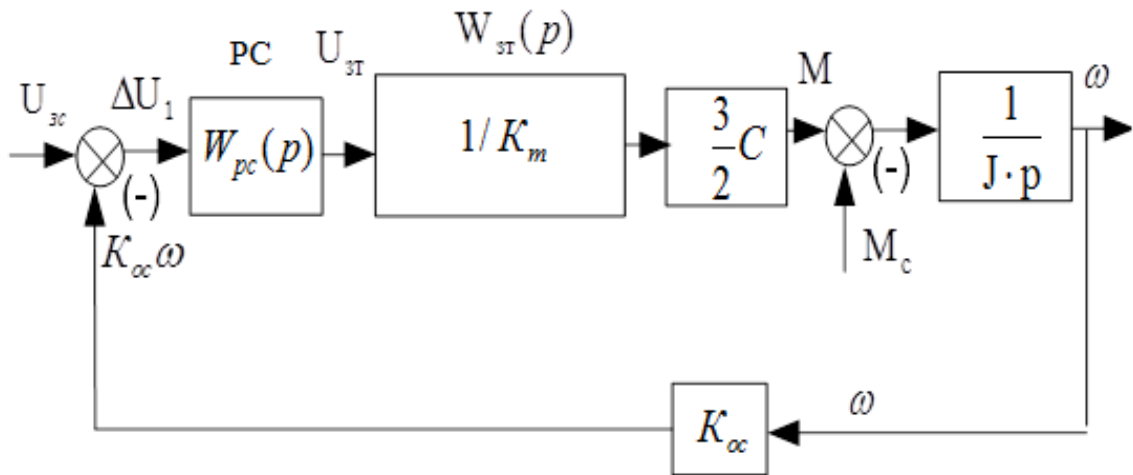


Рисунок 2.2 – Структурная схема контура скорости

Все передаточные функции (ПФ) контура скорости разобьем на 2 части: ПФ регулятора и ПФ объекта.

Под объектом будем понимать все звенья, исключая регулятор:

$$W_0(p) = \frac{K_{oc} \cdot \omega(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{3 \cdot C \cdot K_{oc}}{K_T \cdot 2Jp}; \quad (41)$$

$$W_0(p) = \frac{K_{oc} \cdot \omega(p)}{U_{зт}(p)} = \frac{1}{T_{uo}p}; \quad (42)$$

$$T_{uo} = \frac{K_T \cdot 2J}{3 \cdot C \cdot K_{oc}} = \frac{0,041 \cdot 2 \cdot 0,001577}{3 \cdot 1,37 \cdot 0,002} = 0,0157 \text{ с.} \quad (43)$$

Регулятор скорости (РС) примем пропорционально-интегральным («ПИ»), наш РЭП примет астатический характер.

Зададимся передаточной функцией разомкнутой системы типа «2-1»:

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{K_{\text{ос}} \cdot \omega(p)}{\Delta U_1(p)} = \frac{1}{T_{02}p} \cdot \frac{T_{03}p+1}{T_{03}p}. \quad (44)$$

Отсюда можно найти в общем виде передаточную функцию РС:

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{W_0(p)} = \frac{T_{\text{уо}}}{T_{02}} \cdot \frac{T_{03}p+1}{T_{03}p}. \quad (45)$$

Отсюда можно записать:

$$W_{\text{рс}}(p) = K_{\text{рс}} \cdot \frac{T_{03}p+1}{T_{03}p}. \quad (46)$$

Здесь введено обозначение:

$$K_{\text{рс}} = \frac{T_{\text{уо}}}{T_{02}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot 2J}{3 \cdot C \cdot K_{\text{ос}} \cdot T_{02}}. \quad (47)$$

Постоянная времени T_{02} определяется исходя из максимального быстрого действия системы. Обычно принимают $T_{02} \approx \frac{1}{\omega_{\text{ср}}}$, где $\omega_{\text{ср}}$ - частота коммутации силовых ключей. В физических системах частота коммутации ключей ограничивается условиями нагрева и не выходит их диапазона $\omega_{\text{ср}} \leq (1000 \div 2500) \text{ с}^{-1}$.

Примем $\omega_{\text{ср}} = 2000 \text{ с}^{-1}$, тогда $T_{02} = 0,0005 \text{ с}$.

Зададимся $a = \frac{T_{03}}{T_{02}}$, тогда $T_{03} = aT_{02} = 4 \cdot 0,0005 = 0,002 \text{ с}$.

Коэффициент усиления регулятора скорости:

$$K_{\text{рс}} = \frac{T_{\text{уо}}}{T_{02}} = \frac{K_{\text{т}} \cdot 2J}{3 \cdot C \cdot K_{\text{ос}} \cdot T_{01}} = \frac{0,041 \cdot 2 \cdot 0,001577}{3 \cdot 1,37 \cdot 0,002 \cdot 0,0005} = 31,46. \quad (48)$$

2.5 Анализ динамических свойств виртуальной модели вентильного двигателя в среде Matlab

На рисунке 2.3 приведена виртуальная модель вентильного электродвигателя, составленная в пакете Matlab, в которой учтены перекрестные связи в вентильном электродвигателе.

Для анализа динамических свойств виртуальной модели ВД, кривые скорости $\omega(t)$ и момента $M(t)$ сняты на одном экране осциллографа.

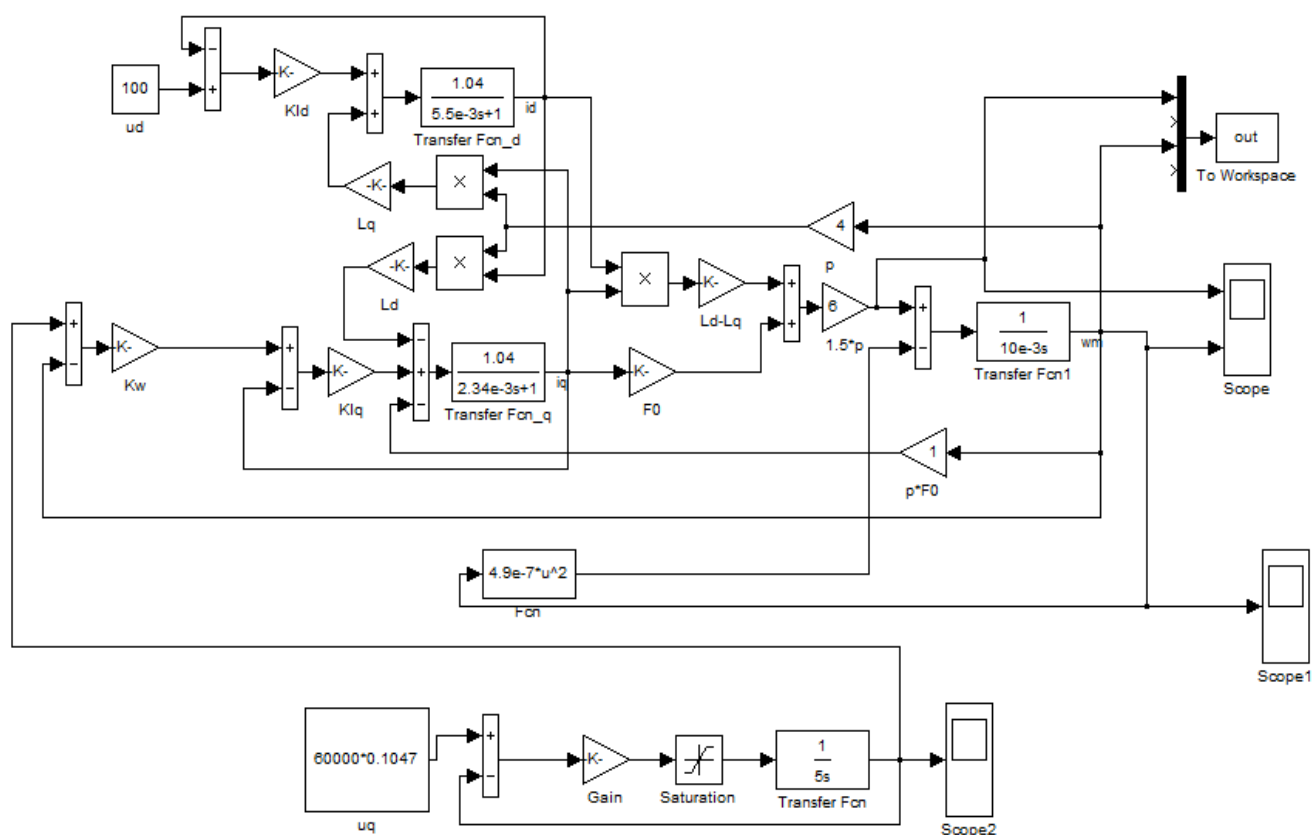


Рисунок 2.3 – Модель замкнутой двухконтурной синхронной системы с ВД

Для начала опишем сам процесс запуска. Для того, чтобы запустить микрогазотурбинную установку, стартер-генератор разгоняет вал газотурбинного двигателя до 30000 об/мин за 8 секунд. Далее стартер-генератор в течение 3 секунд сохраняет эту частоту вращения (режим малого газа), и одновременно запускается система питания газотурбинного двигателя, в которую входят система за-

жигания и система подачи топлива. По истечении этого времени стартер-генератор продолжает сопровождать разгон микрогазотурбинной установки до номинальной скорости вращения. Как только достигается номинальная скорость, стартер-генератор переходит в генераторный режим. Момент нагрузки, создаваемый валом газотурбинного двигателя, имеет квадратичную зависимость от частоты вращения.

Рассмотрим случай, когда запуск осуществляется в аварийном режиме, т.е. по какой-то причине в режиме малого газа не срабатывает система питания ГТД (пропадает подача топлива, исчезает искра), и стартер-генератор продолжает разгонять вал ГТД до номинальной скорости. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.4 и 2.5.

Проанализировав данные графики можно увидеть, что статический момент нагрузки при достижении номинальной частоты вращения установки равен 19,7 Н·м., а динамический момент составляет приблизительно 20% от момента статического. Учитывая, что на запуск МГТУ требуется порядка 30% мощности стартер-генератора, динамический момент относительно мал и его можно не принимать во внимание.

Так же такое малое значение динамического момента объясняется длительным временем разгона и малой инерционностью привода, так как крыльчатка компрессора и турбины имеют малый вес.

Так же можно увидеть, что стартер-генератор достигает заданной величины скорости за время, равное 19 секундам, просадки по скорости не наблюдается.

Учитывая то, что после режима малого газа микрогазотурбинная установка запускается, и стартер фактически продолжает сопровождать ускорение ГТД без момента нагрузки, запуск производится еще быстрее, что удовлетворяет требования к запуску микрогазотурбинной установки.

Следует отметить высокое быстродействие регулируемого привода, зависящего от настройки контура скорости. Высокие динамические свойства вентильного двигателя по сравнению ДПТ с тиристорным управлением достигаются за счет использования безынерционного контура тока.

3 ИСПЫТАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

3.1 Измерение ЭДС на холостом ходу

В процессе эксперимента осуществлялось принудительное вращение ротора СГ и измерялось действующее значение фазной ЭДС. Результаты измерения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний стартер-генератора на холостом ходу

| Частота тока, Гц | Фазное напряжение, В RMS | Частота вращения, об/мин |
|------------------|--------------------------|--------------------------|
| 83,6 | 24,8 | 5 016 |
| 166,0 | 49,3 | 9 960 |
| 260,0 | 74 | 15 600 |
| 559,8 | 165 | 33 589 |
| 664,7 | 192,8 | 39 882 |
| 742,8 | 218 | 44 565 |
| 872,8 | 250 | 52 366 |

Далее провели измерение напряжения под нагрузкой $3 \times 3,8$ Ом. При этом эксперименте обмотка статора СГ подключалась на постоянное активное сопротивление $3,8$ Ом и изменялась скорость принудительного вращения ротора. В процессе эксперимента измерялось фазное напряжение, ток мощность и скорость вращения ротора. Результаты эксперимента приведены в таблице 5.

Далее на основе результатов измерений характеристик стартер-генератор была построена зависимость ЭДС холостого хода от скорости (рисунок 3.1, кривая 1) и действующего значения фазного напряжения от скорости при постоянном нагрузочном сопротивлении фазной обмотки (рисунок 3.1, кривая 2).

Таблица 5 – Результаты испытания стартер-генератора под нагрузкой

| Частота тока, Гц | Фазное напряжение, В RMS | Ток фазы, А | Частота вра- щения, об/мин | Электрическая мощность, Вт |
|---------------------|--------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 83 | 24,5 | 5,8 | 4 980 | 426,3 |
| 166 | 48,2 | 12,68 | 9 960 | 1834,14 |
| 250 | 72,6 | 17,8 | 15 000 | 3876,84 |
| 333 | 96,1 | 25,29 | 19 980 | 7290,96 |
| 490 | 140 | 36,84 | 29 400 | 15473,68 |
| 586 | 170 | 44,74 | 35 160 | 22815,79 |

На основе анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы – результаты линейного экстраполирования характеристик на большие частоты вращения позволяют определить, что при 65 000 об/мин действующее значение ЭДС равняется 318 В. Таким образом, при 65 000 об/мин после соединения обмоток «звездой» и выпрямления можно получить ± 390 В постоянного тока, которые предполагается использовать для питания инвертора.

Сравнение зависимостей ЭДС холостого хода и напряжения на выходе генератора под нагрузкой позволяют предположить, что при подключении нагрузки, соответствующей выходной мощности 110 кВт падение напряжения на обмотках генератора составит порядка 1,6 В.

Однако следует иметь в виду, что ЭДС генератора при увеличении тока нагрузки под действием реакции якоря или тепловых изменений параметров магнитов будет падать, поэтому напряжение и отдаваемая мощность будут уменьшаться. Вполне вероятно, что фактическая максимальная мощность генератора окажется меньше 100 кВт. Это подтверждается также результатами моделирования электромагнитных процессов, представленных далее в следующих подпунктах дипломной работы. Ниже представлены результаты измерения характеристик стартер-генератора в генераторном режиме.

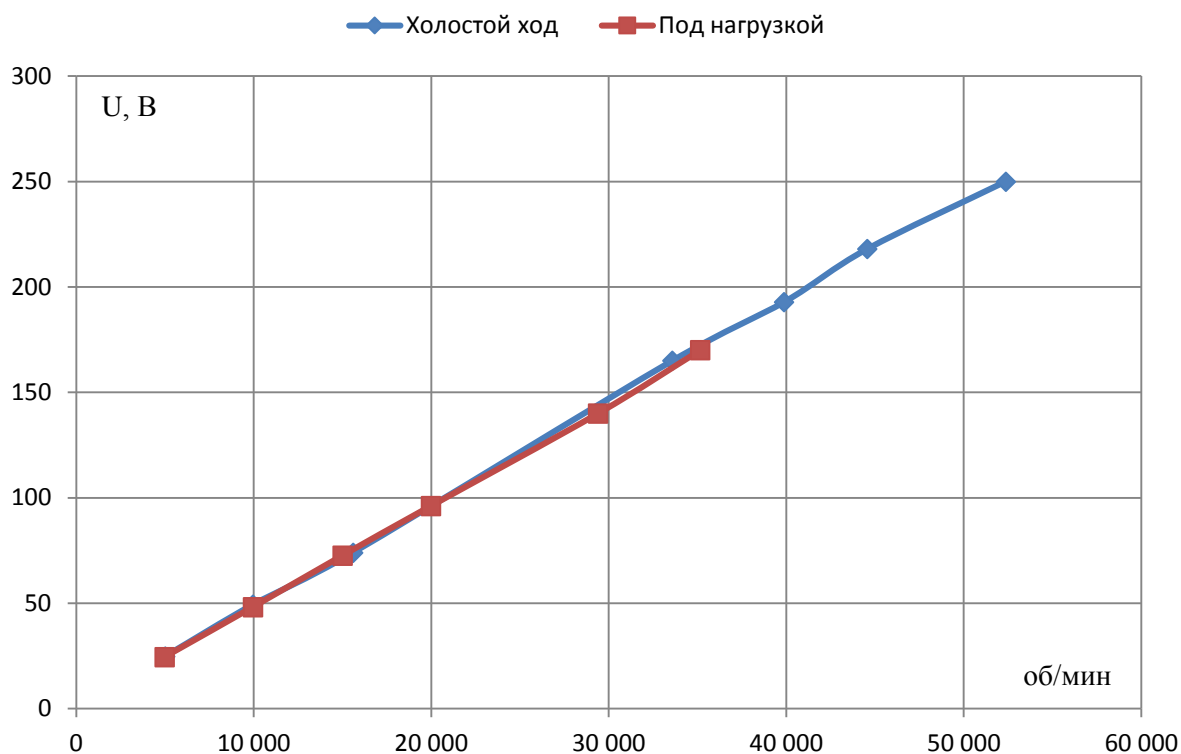


Рисунок 3.1 – Результаты измерения характеристик стартера - генератора в генераторном режиме

3.2 Испытания в режиме стартера

Первые испытания проводились в лабораторных условиях при комнатной температуре. Питание СГ осуществлялось от покупного преобразователя напряжения типа Unidrive с управлением по бездатчиковой схеме. Ротор СГ устанавливался на шарикоподшипниковых опорах и не был соединён с турбиной, т.е. СГ работал на холостом ходу. На пульте управления ПН устанавливалось заданное значение скорости и при этой скорости фиксировались значения фазных токов, фазного напряжения и потребляемой СГ ПН мощности. Измерения проводились при различных установках параметров преобразователя напряжения (ПН). Максимальное значение скорости вращения ротора СГ ограничено механическими вибрациями СГ опасными при работе на скорости более 18...20 тыс. об/мин. Результаты, полученные при следующей установке параметров ПН: $k_{рт}=5$, $k_{ит}=50$, $k_{рс}=0,1$, $k_{ис}=0$ представлены в таблице 6, по которой построены графики зависи-

мости фазных токов (рисунок 3.2), напряжения (рисунок 3.3) и мощности (рисунок 3.4) от скорости вращения ротора СГ.

Таблица 6 – Результаты испытаний в стартерном режиме в лаборатории института

| п, об/мин | I _a , А | I _b , А | I _c , А | U, В | P, Вт |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|------|-------|
| 2000 | 0,46 | 0,35 | 0,35 | 19 | 150 |
| 4000 | 1 | 0,78 | 0,8 | 38 | 330 |
| 6000 | 1,6 | 1,2 | 1,3 | 55,5 | 510 |
| 8000 | 2 | 1,4 | 1,5 | 79 | 690 |
| 10000 | 2,5 | 1,8 | 1,9 | 96 | 885 |
| 12000 | 2,85 | 2,12 | 2,3 | 114 | 1095 |
| 14000 | 3,25 | 2,5 | 2,85 | 132 | 1320 |
| 16000 | 3,6 | 2,75 | 3,2 | 149 | 1500 |
| 18000 | 5 | 4,25 | 3,85 | 196 | 1980 |
| 20000 | 6,4 | 6,2 | 5,5 | 200 | 2820 |

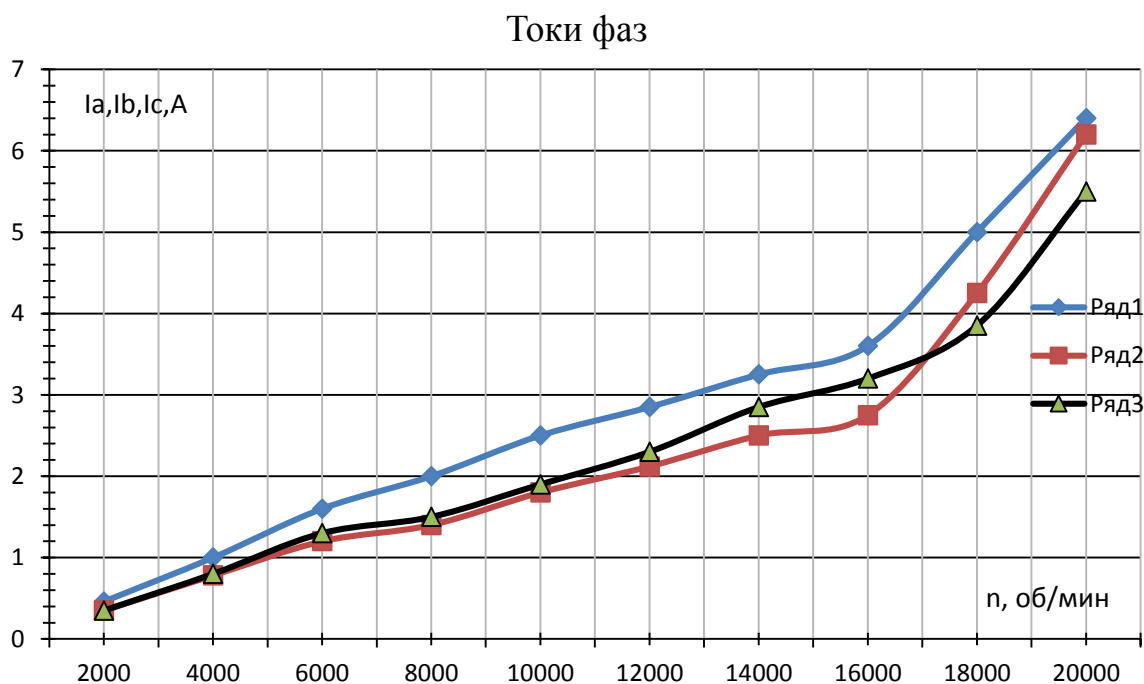


Рисунок 3.2 – Зависимость фазных токов от скорости вращения ротора СГ

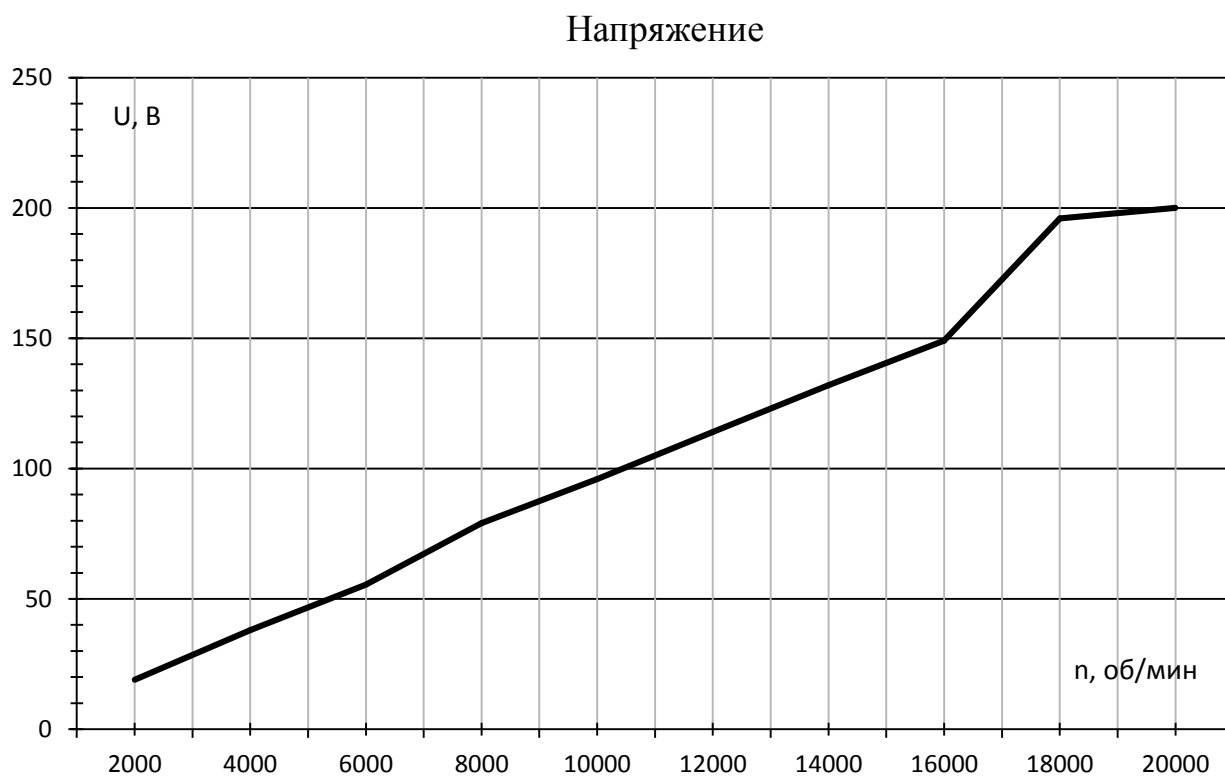


Рисунок 3.3 – Зависимость напряжения от скорости вращения ротора СГ

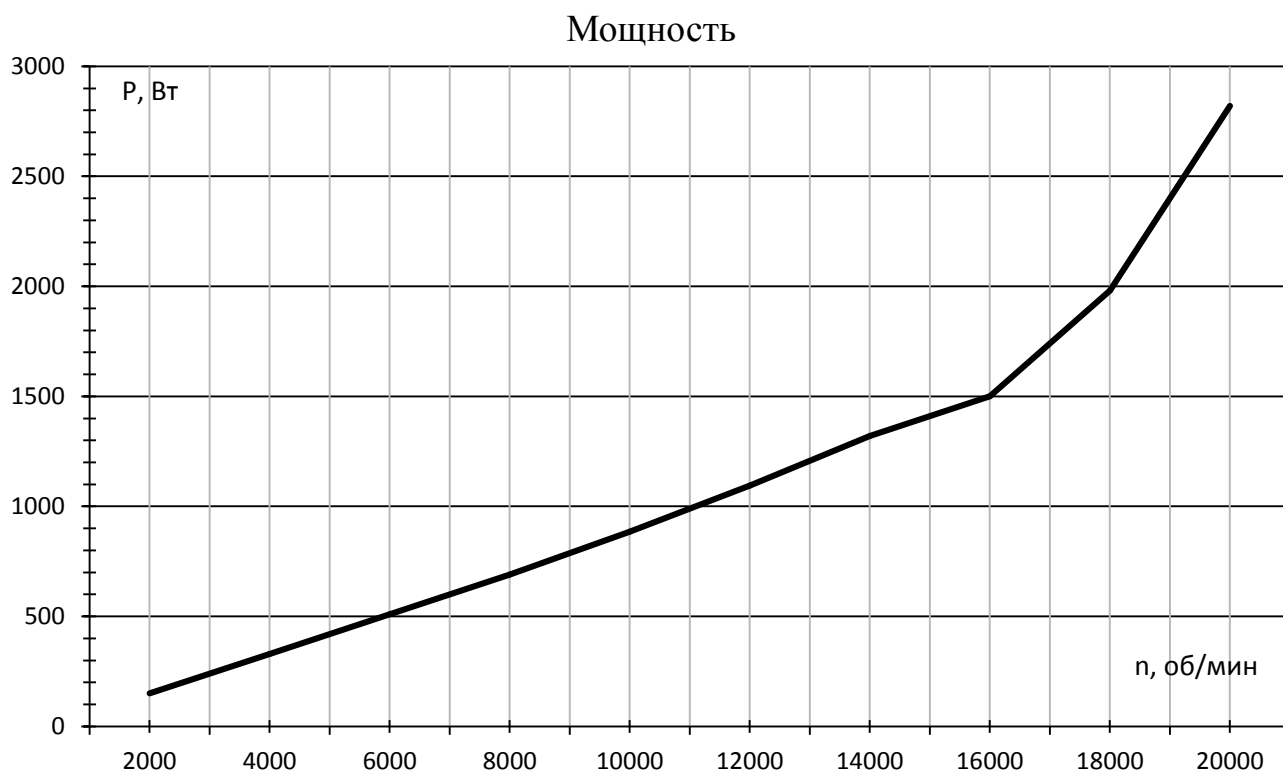


Рисунок 3.4 – Зависимость мощности от скорости вращения ротора СГ

В таблице 7. и рисунках 3.5...3.7 представлены результаты измерения, полученные при следующих установках: $k_{рт}=5$; $k_{ит}=300$; $k_{рс}=0,01$; $k_{ис}=0$.

Таблица 7 - Результаты испытаний в стартерном режиме в лаборатории института

| n, об/мин | Ia, A | Ib, A | Ic, A | U, В | P, Вт |
|-----------|-------|-------|-------|------|-------|
| 2000 | | | | | |
| 4000 | 0,78 | 0,77 | 0,6 | 37 | 288 |
| 6000 | 1,22 | 1,22 | 1 | 53 | 450 |
| 8000 | 1,55 | 1,6 | 1,37 | 70 | 645 |
| 10000 | 2,15 | 2,05 | 1,77 | 87 | 810 |
| 12000 | 2,4 | 2,3 | 2,07 | 102 | 960 |
| 14000 | 2,75 | 2,7 | 2,45 | 120 | 1140 |
| 16000 | 3,3 | 3,3 | 2,95 | 135 | 1410 |
| 17000 | 4,3 | 3,9 | 3,6 | 158 | 1710 |
| 18000 | 4,85 | 4,4 | 4,1 | 170 | 2550 |

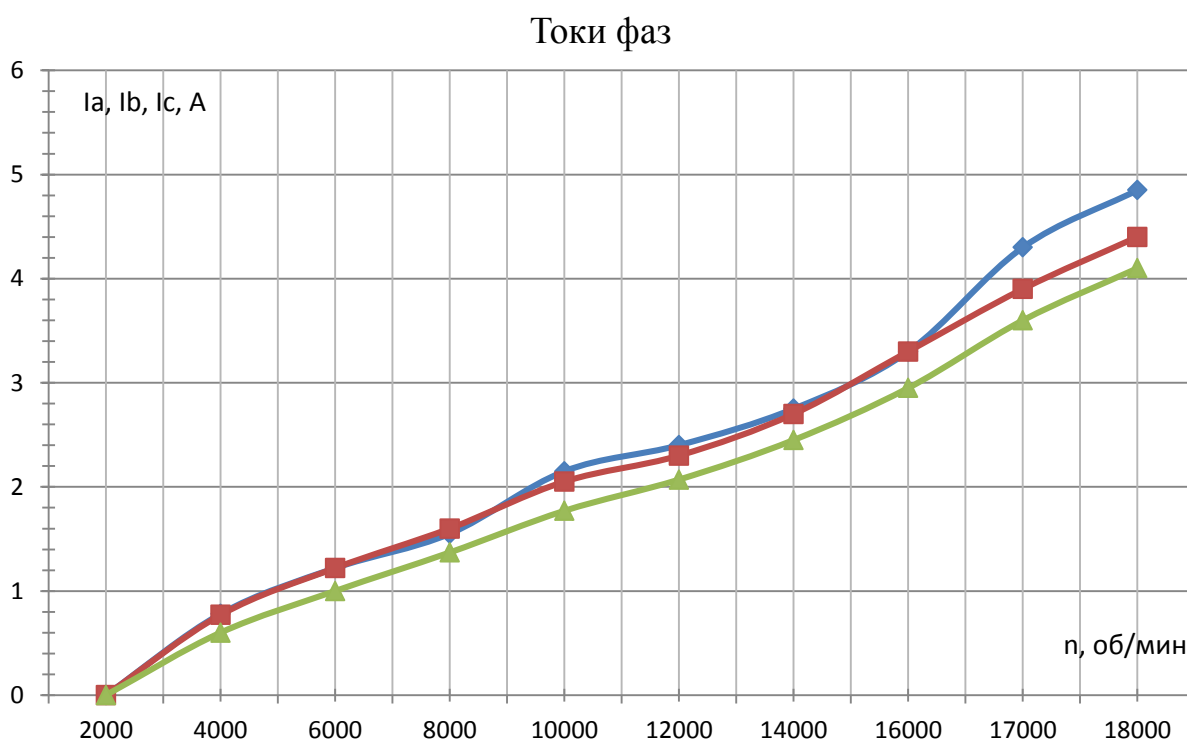


Рисунок 3.5 – Зависимость фазных токов от скорости вращения ротора СГ

Напряжение

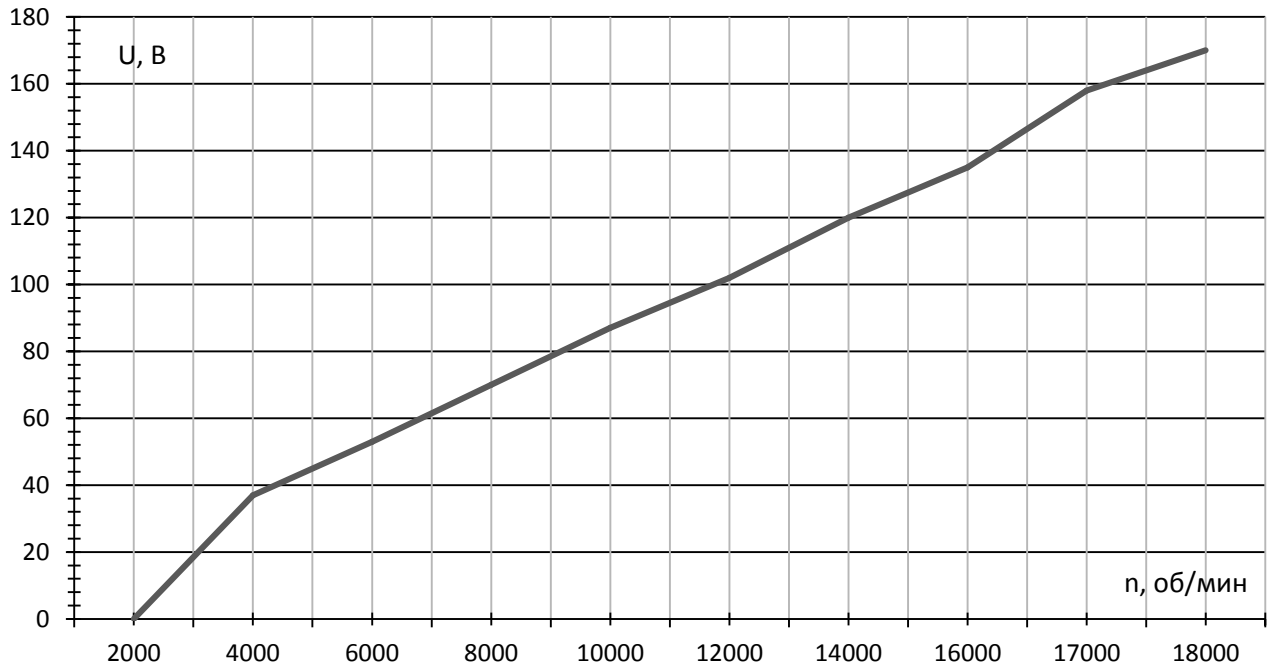


Рисунок 3.6- Зависимость напряжения от скорости вращения ротора СГ

Мощность

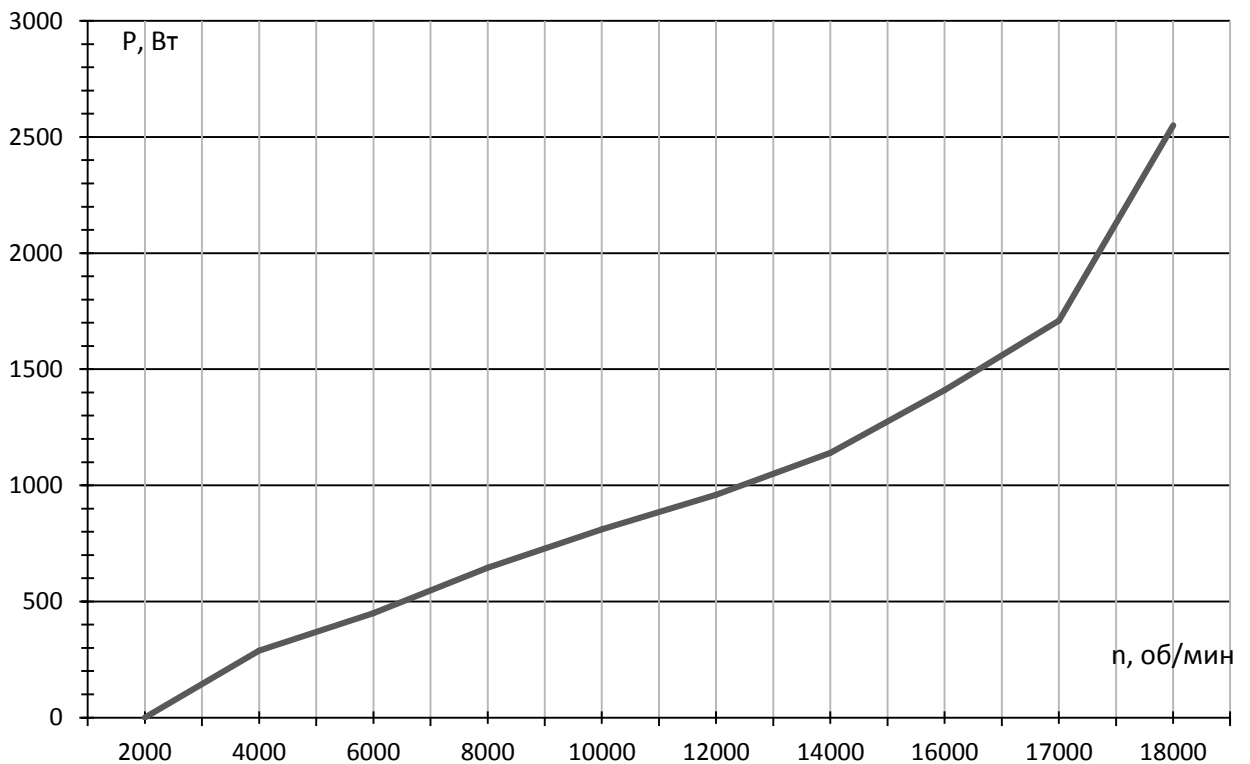


Рисунок 3.7- Зависимость мощности от скорости вращения ротора СГ

Результаты измерения показывают, что второй тип настройки ПН предпочтительней с точки зрения энергетических показателей привода, так как обеспечивает при максимальной скорости вращения меньшую потребляемую мощность. Кроме того, в лабораторных условиях ЮУрГУ по аналогичной методике проводились исследования характеристик СГ на холостом ходу при питании от ПН Schneider Electric номинальной мощностью 30 кВт. Результаты испытаний представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты испытаний в стартерном режиме в лаборатории института

| n, об/мин | I, А | U, В | P, Вт |
|-----------|------|------|-------|
| 3000 | 9,4 | 27 | 300 |
| 6000 | 10 | 56 | 600 |
| 9000 | 10 | 84 | 600 |
| 12000 | 12,5 | 112 | 1200 |
| 15000 | 13 | 139 | 2400 |
| 18000 | 11,7 | 168 | 3300 |

По результатам лабораторных испытаний СГ в двигательном режиме можно сделать следующие выводы:

1) По величине потребляемого тока, напряжения и мощности привод находится в ожидаемых пределах;

2) Величина потребляемой ПН мощности в двигательном режиме существенно зависит от настроек ПН, подбор которых в зависимости от выбранных критериев является самостоятельной достаточно сложной задачей;

3) При снятии характеристик СГ обнаружено три частотных диапазона механического резонанса СГ с шарикоподшипниковыми опорами: в диапазоне 3600...3730 об/мин; около 10800 об/мин; около 20400 об/мин.

Вторые испытания СГ проводились на экспериментальной установке СКБ «Турбина». При этом ротор СГ также устанавливался на шарикоподшипниковые

опоры и через соединительную муфту был подключён к турбине. Питание осуществлялось от ПН Unidrive при управлении по бездатчиковой схеме. Осуществлялось задание скорости вращения СГ и фиксировались токи напряжения и мощности, соответствующие этой скорости. Результаты измерения представлены в таблице 9 и на рисунках 3.8...3.10.

Таблица 9 - Результаты испытаний в стартерном режиме на МГТУ

| n, об/мин | I _a , А | I _b , А | I _c , А | U _л , В | P, Вт | I _m , А |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|
| 2000 | 0,032 | 0,048 | 0,042 | 20 | 162 | 5,5 |
| 4000 | 0,057 | 0,093 | 0,081 | 38 | 378 | 4,5 |
| 6000 | 0,12 | 0,177 | 0,172 | 55 | 675 | 6,5 |
| 8000 | 0,23 | 0,28 | 0,197 | 71 | 1170 | 9 |
| 10 000 | 0,3 | 0,37 | 0,395 | 87 | 1650 | 10,6 |
| 12000 | 0,47 | 0,505 | 0,5 | 105 | 2340 | 13,3 |
| 14000 | 5,8 | 6,6 | 6,6 | 119 | 3180 | 16 |
| 16000 | 8,6 | 8,7 | 9 | 135 | 4420 | 19,8 |
| 18000 | | | 12 | 150 | 6000 | 25 |
| 18500 | | | 15,7 | 160 | | 32 |

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) Резонансные частоты комплекса СГ-турбина находятся около 6500 об/мин и 9500 об/мин.

2) Потребляемая мощность при максимальной достигнутой скорости 18000 об/мин составила порядком 6 кВт. Это позволяет предположить, что требуемая мощность при максимальной скорости в стартерном режиме составит не более 30...40 кВт.

3) Испытания при скорости более 18000 об/мин не удалось провести, так как произошло короткое замыкание обмотки. Предположительно витковое замыкание произошло после достижения скорости 12000 об/мин.

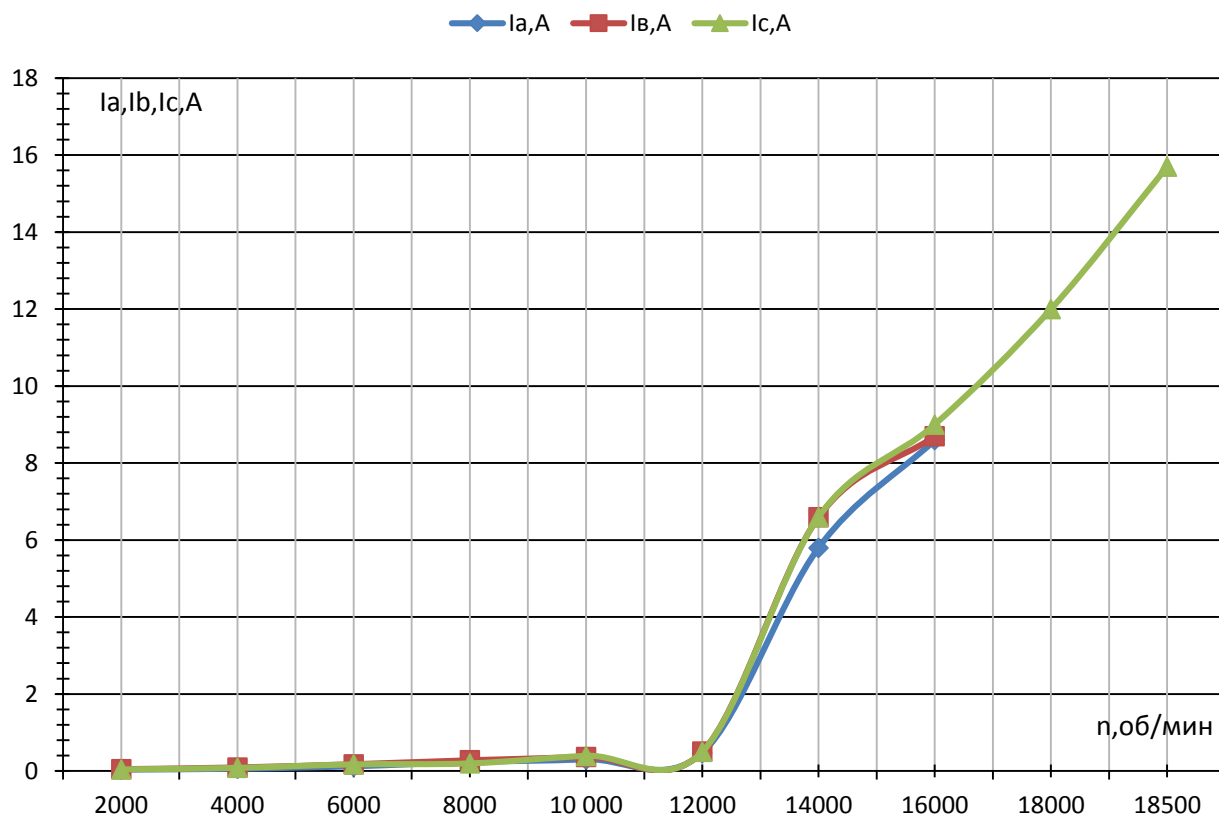


Рисунок 3.8 – Зависимость фазных токов от скорости вращения ротора СГ

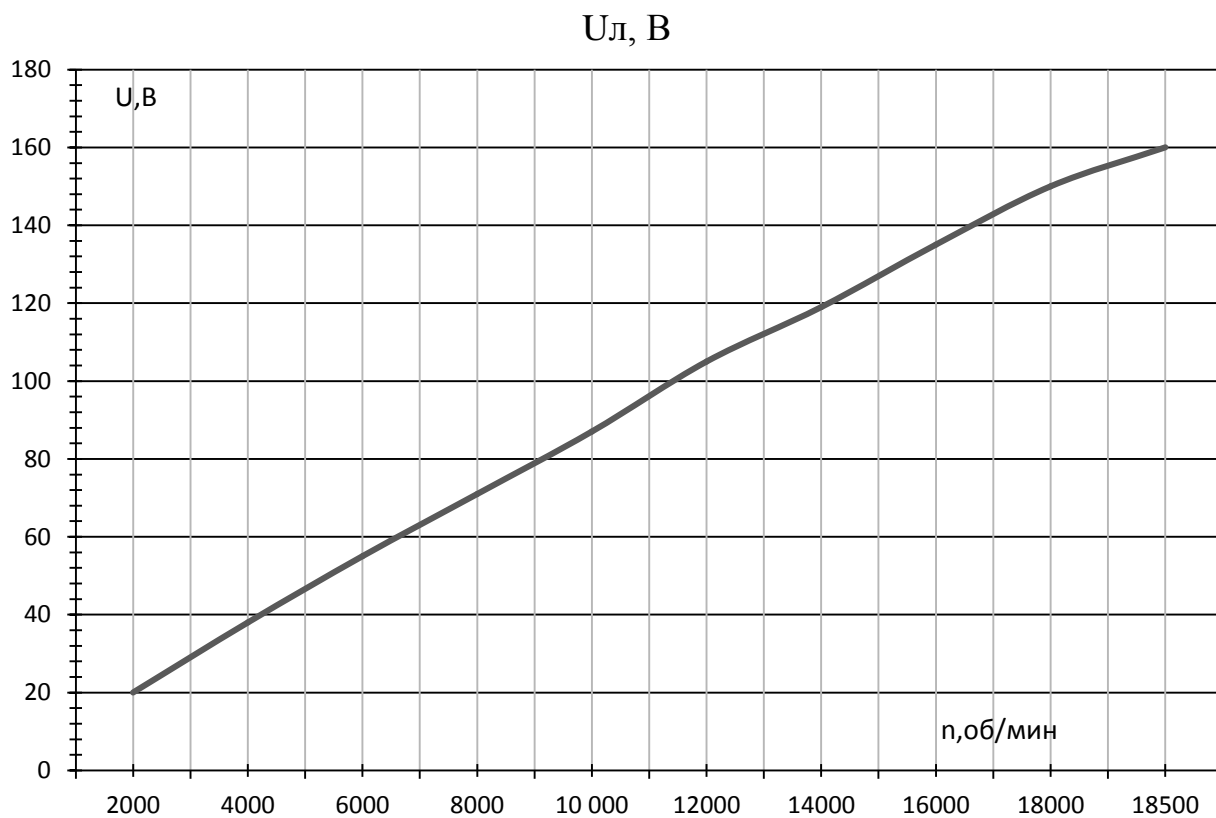


Рисунок 3.9 – Зависимость напряжения от скорости вращения ротора СГ

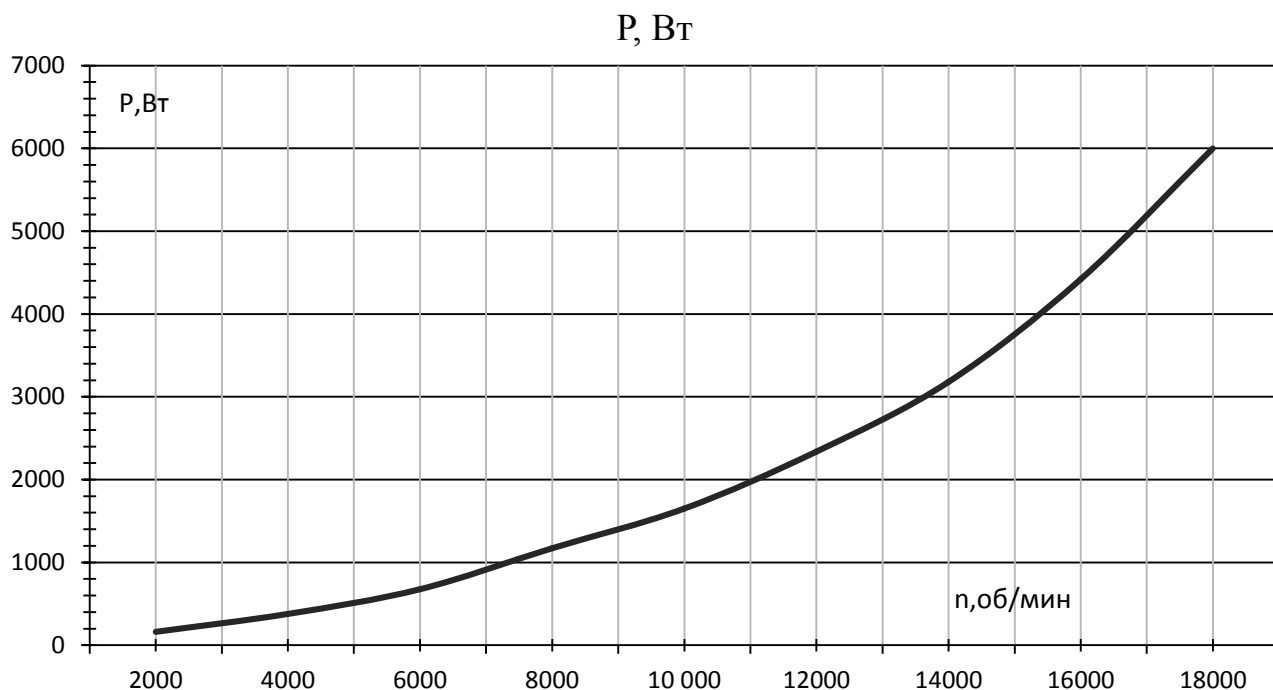


Рисунок 3.10 – Зависимость мощности от скорости вращения ротора СГ

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) Резонансные частоты комплекса СГ-турбина находятся около 6500 об/мин и 9500 об/мин.

2) Потребляемая мощность при максимальной достигнутой скорости 18000 об/мин составила 6 кВт. Это позволяет предположить, что требуемая мощность при максимальной скорости в стартерном режиме составит не более 30...40 кВт.

3) Испытания при скорости более 18000 об/мин не удалось провести, так как произошло короткое замыкание обмотки. Предположительно витковое замыкание произошло после достижения скорости 12000 об/мин.

Еще одно испытание СГ проводилось на той же экспериментальной установке СКБ «Турбина», но уже питание осуществлялось от ПН Schneider Electric при управлении по бездатчиковой схеме. Ротор СГ также устанавливался на шарикоподшипниковые опоры и через соединительную муфту был подключён к турбине. Осуществлялось задание скорости вращения СГ и фиксировались токи напряжения и мощности, соответствующие этой скорости. Результаты измерения представлены в таблице 10 и на рисунках 3.11...3.14.

Таблица 10 – Результаты испытаний в стартерном режиме на МГТУ

| н, об/мин | И _{потр} , А | Удв,В | Р _{дв} ,Вт |
|-----------|-----------------------|-------|---------------------|
| 3000 | 10 | 26 | 300 |
| 6000 | 14 | 53 | 600 |
| 12000 | 18 | 106 | 2100 |
| 18000 | 27 | 161 | 5400 |
| 24000 | 40 | 216 | 11400 |
| 30000 | 53 | 273 | 20100 |

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Резонансные частоты комплекса СГ-турбина находятся около 18000 об/мин и 22000 об/мин.
2. Достигнута скорость вращения 30000 об/мин мощность при этом составила 20,1 кВт.
3. Повысить скорость до значения выше 30000 об/мин не позволяет программное ограничение ПЧ Schneider Electric.

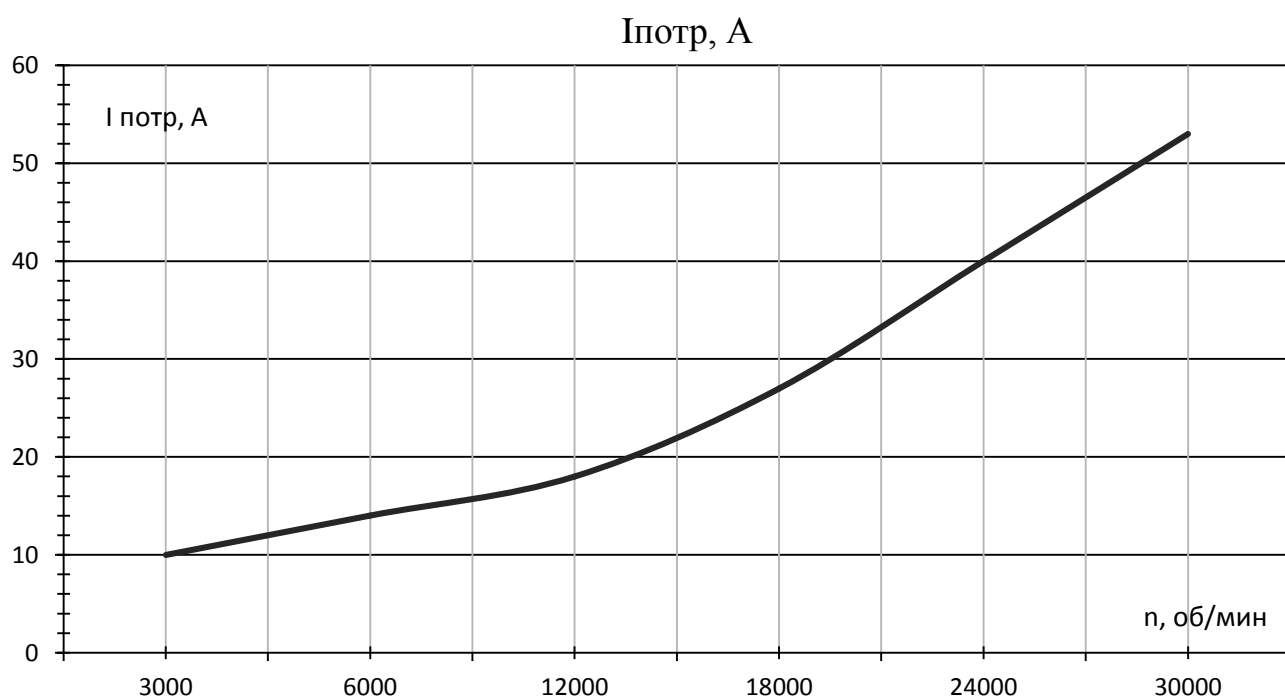


Рисунок 3.11 – Зависимость потребляемого тока от скорости вращения ротора СГ

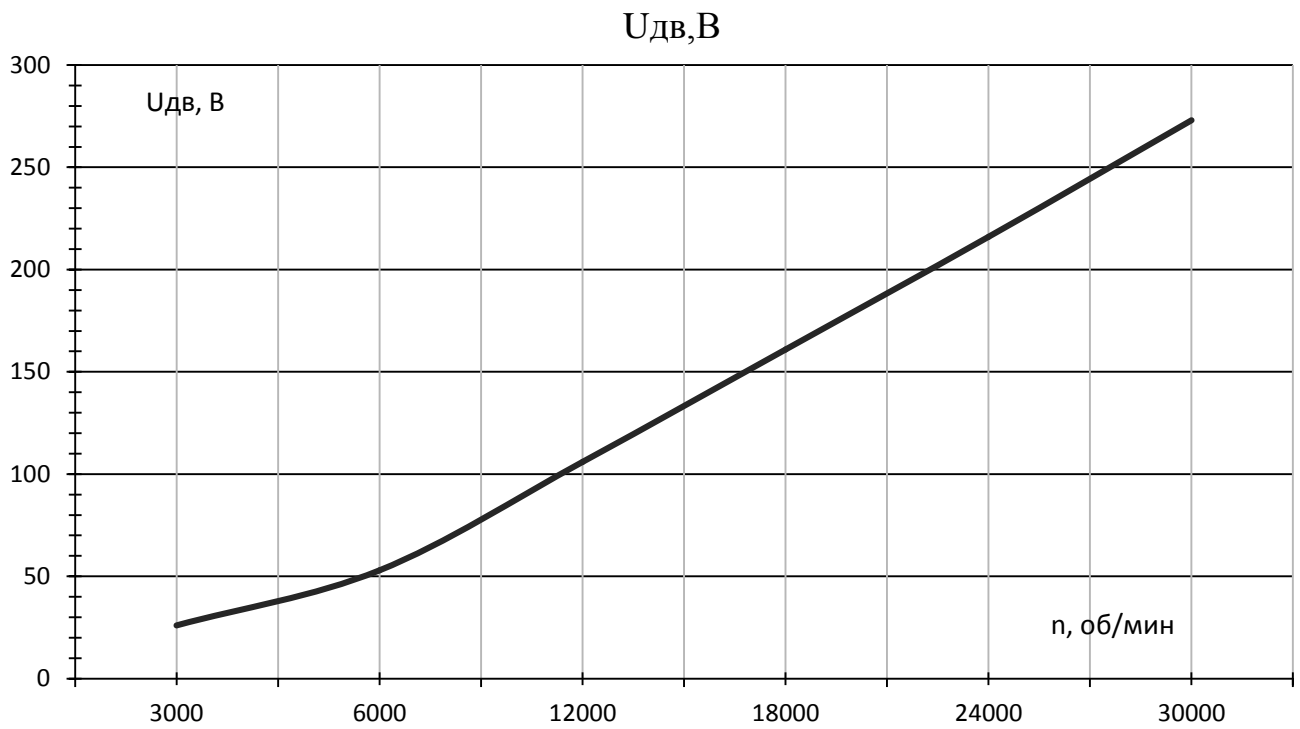


Рисунок 3.12 – Зависимость напряжения питания двигателя от скорости вращения ротора СГ

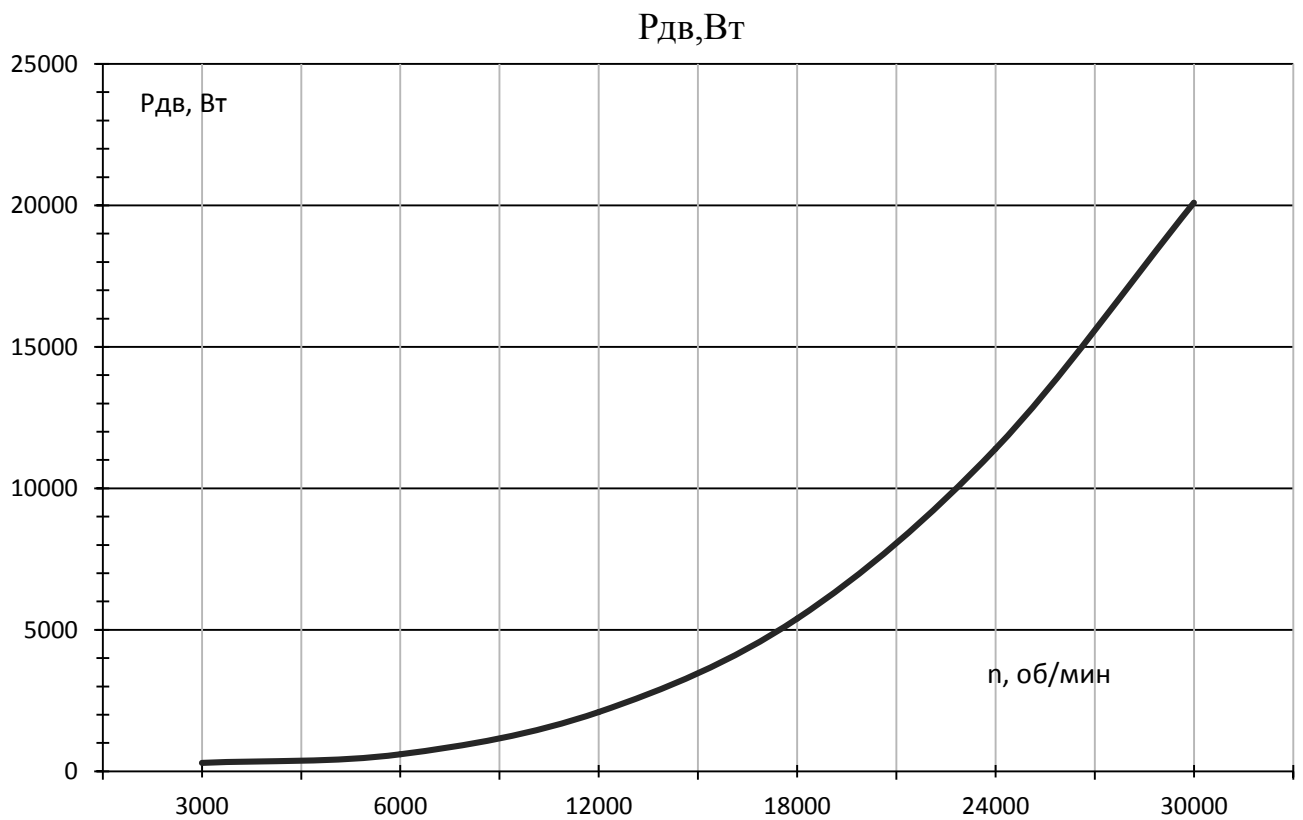


Рисунок 3.13 – Зависимость мощности от скорости вращения ротора СГ

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СГ В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ

4.1 Составляющие механической нагрузки. Схема замещения

Электрический стартер, запускающий газотурбинную энергоустановку, преодолевает момент механического сопротивления, который имеет несколько составляющих. Прежде всего, турбина – это устройство которое имеет крыльчатку и прокачивает газ/воздух. Момент, который создает такое устройство, пропорционален квадрату скорости. Т.е. в схеме замещения это нелинейное активное сопротивление. Турбина так же является маховиком, в котором можно запасти, а потом использовать кинетическую энергию. В схеме замещения маховик – конденсатор. В стартере, который запускает турбину, так же существуют потери увеличивающие потребление тока от частотного преобразователя. Часть этих потерь непосредственно механические – в подшипниках качения. Потери в стали можно привести к эквивалентным механическим.

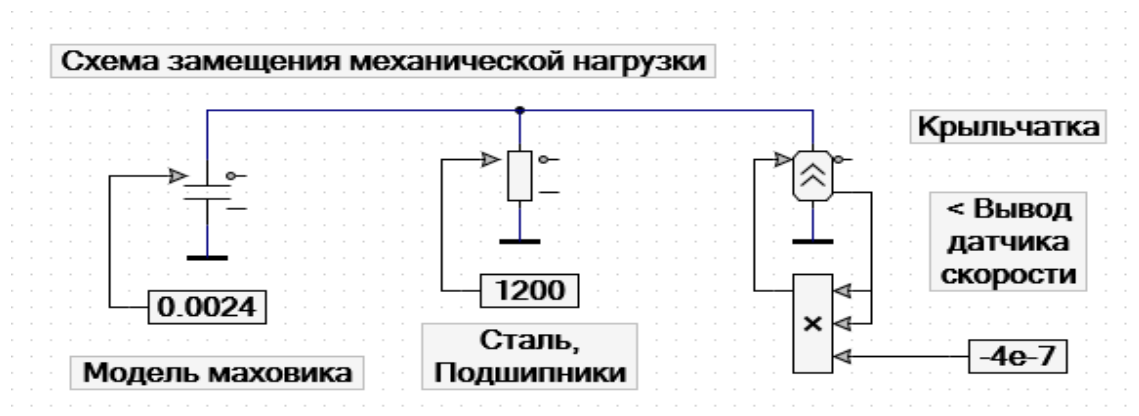


Рисунок 4.1 - Схема замещения механической нагрузки

В первом приближении, чем больше частота вращения вала, тем больше потери в стали, в конструктивных элементах разогреваемых токами Фуко, в подшипниках и втулке соединяющей двигатель и турбину. Всю эту совокупность потерь, а она создает меньшую нагрузку, чем крыльчатка и маховик, предлагается

учесть в схеме замещения активным сопротивлением. Есть еще потери в меди, но они и при 100 кВт у рассматриваемого стартера всего 500 Вт.

Напряжения эквивалентны скорости. Токи – моментам. Скорость крыльчатки в квадрате определяет момент

4.2 Исходные данные к уточнению параметров схемы замещения

Для уточнения параметров схемы замещения механической нагрузки (рисунок 4.1), были выполнены эксперименты. В ЮУрГУ, в аудитории 221/тк, с помощью частотного преобразователя Unidrive 11 кВт, был выполнен эксперимент холостого хода стартера. При частоте вращения 18000 об/мин машина потребляла чуть меньше 3 кВт. Это позволяет оценить потери в стали в подшипниках и определить коэффициент вязкого трения, который определяет номинал активного сопротивления на схеме замещения:

$$R=1/k_{вт}=\omega^2/P_{xx}=(18000\cdot6.28/60)^2/3000\approx1200 \quad (49)$$

Второй эксперимент проводился на заводе «Турбина», частотным преобразователем Schneider-electric на 30 кВт был запитан стартер, который крутил турбину. Частота вращения составила 30000 об/мин. Мощность на валу – 20 кВт. Измерения выполнялись при установившейся частоте вращения вала. В этом режиме турбина, как маховик, не оказывала влияния на результаты измерений. Поэтому при известной оценке потерь в стали и в подшипниках (5 кВт), можно оценить то, что осталось – мощность, которая затрачивалась на покачивание воздуха в турбине (15 кВт). И вычислить коэффициент пропорциональности между квадратом угловой скорости ((3140 рад/с)²) и моментом оказываемого сопротивления (4,8 Н·м).

$$K=M_{крыльчатки}/\omega^2=4.8/(3140^2)\approx4.9\cdot10^{-7}, \text{ Н}\cdot\text{м}/(\text{рад}/\text{с})^2 \quad (50)$$

4.3 Моделирование процесса разгона турбины стартером

С той целью, чтобы увидеть какой момент создает турбина в разных условиях при заданных частотах вращения, подключим модель механической нагрузки к программируемому источнику угловой скорости и выполним несколько виртуальных экспериментов. Примечание. Все частотные преобразователи хоть и имеют режим разгона с заданным темпом, но в своей основе являются источниками момента. Такой эксперимент проведем позже.

Эксперимент 1. Турбина находится в вакууме, нет потерь в подшипниках, в стали. Меняется темп разгона до 40000 об/мин (это 4200 рад/с).

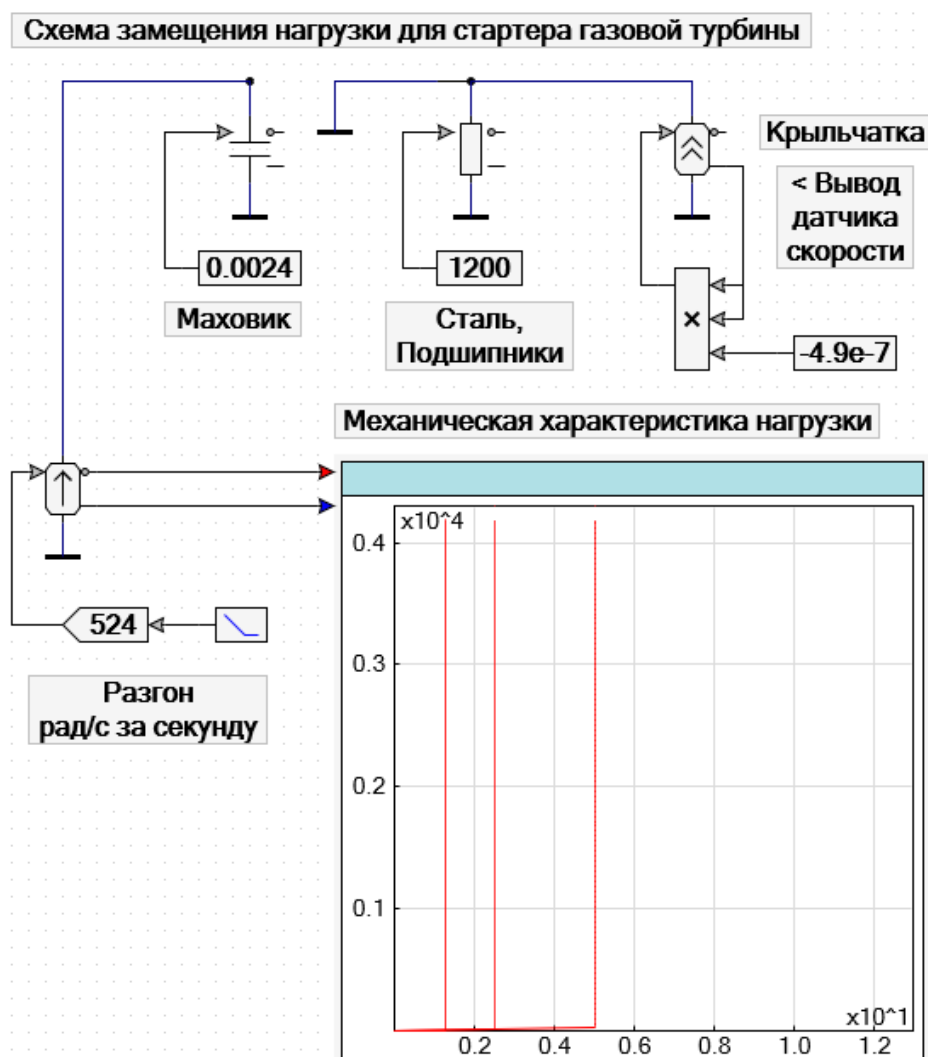


Рисунок 4.2 - Разгон маховика до 40000 об/мин без потерь за 8, 4, и 2 сек (по вертикали – угловая скорость, по горизонтали – момент)

Эксперимент 2. Турбина находится в вакууме, учитываются потери в подшипниках, в стали, в сцепляющей валы стартера и турбины втулке.

Схема замещения нагрузки для стартера газовой турбины

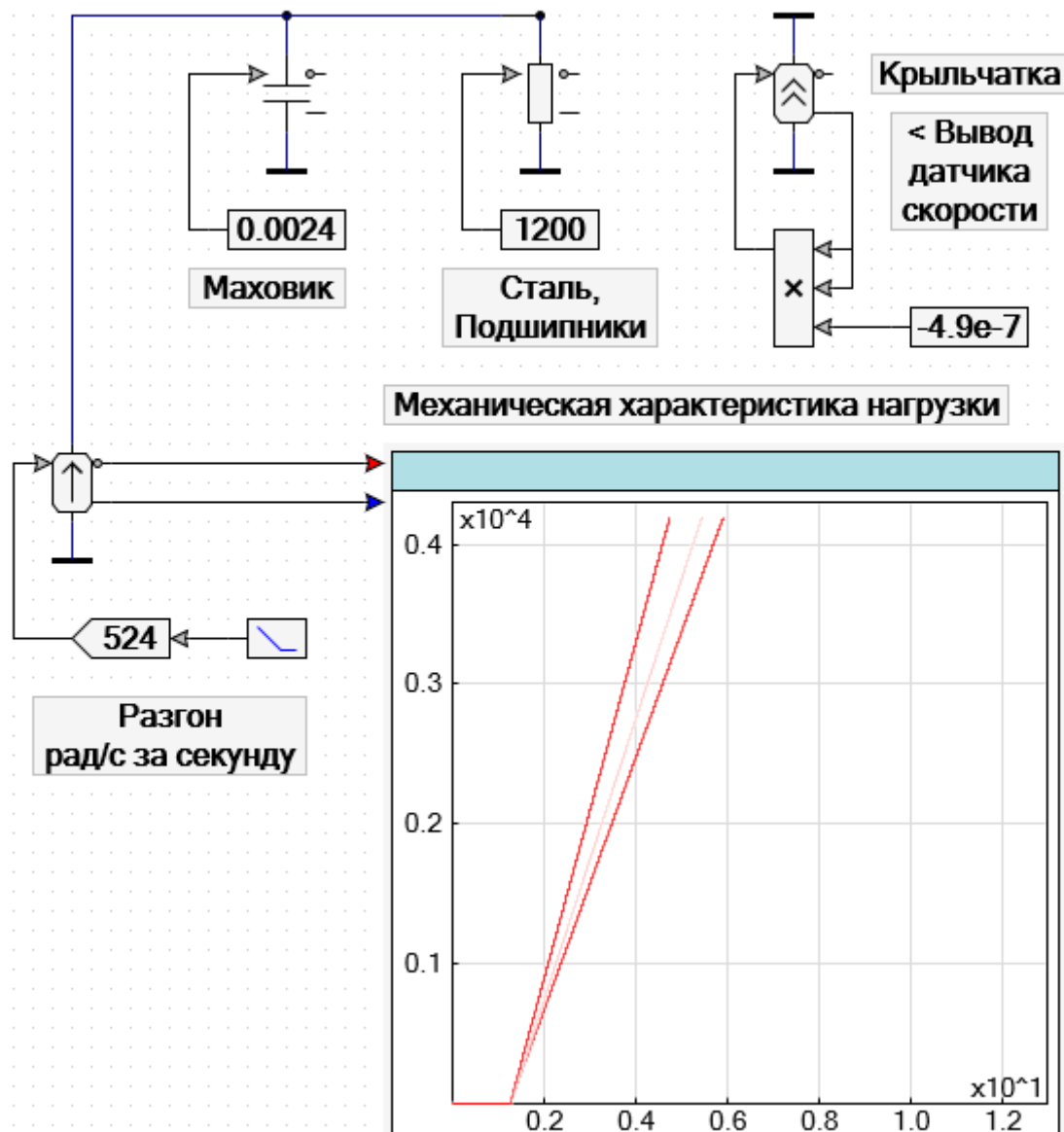


Рисунок 4.3 - Разгон турбины в вакууме до 40000 об/мин.

На 30 % меняются потери в стали и в подшипниках

Эксперимент 3. Турбина разгоняется до 40000 об/мин за 8 сек, учитываются все потери, прокачивается воздух.

Дан коридор погрешности, вызванный недостаточной достоверностью экспериментальных данных. Менялись машины, подшипники и пр.

Схема замещения нагрузки для стартера газовой турбины

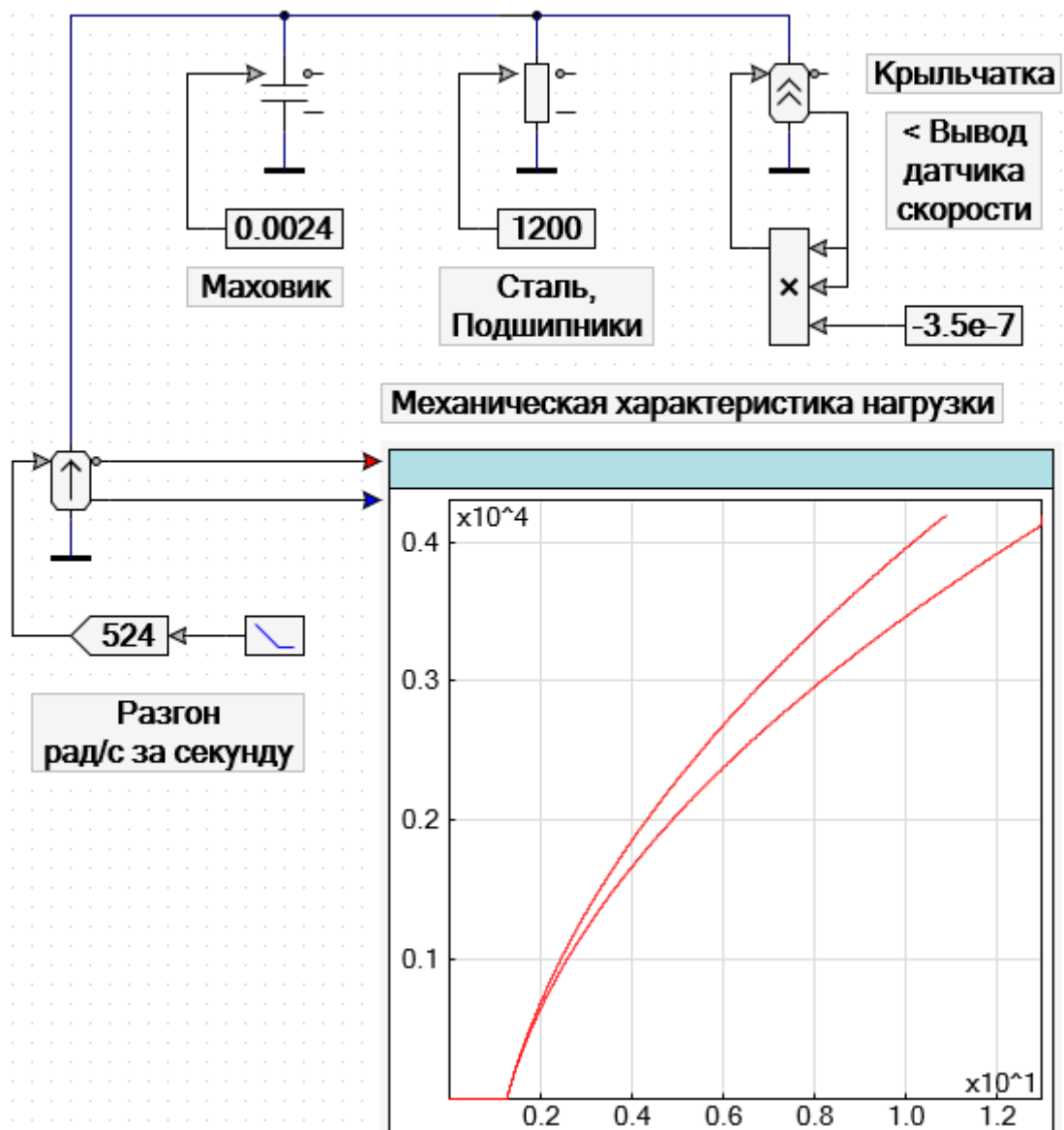


Рисунок 4.4 - Стартер разгоняет турбину в номинальном режиме до 40000 об/мин за 8 сек.

Проанализировав рисунки, можно сделать несколько выводов. В первом выводе следует, что по графику механической характеристики нагрузки стартера (рисунок 4.4) мощность требуемого частотного преобразователя должна быть не менее 30 кВт.

Во втором выводе получилось, что изменение динамики разгона турбины не позволит существенно снизить требования к мощности частотного преобразователя. Поскольку динамический момент составляет лишь 10 % от статического.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения магистерской диссертации был исследован стартер-генератор микрогазотурбинной установки. В рамках работы получены следующие результаты:

1) В первой главе в результате изучения литературного обзора и технической документации были подробно рассмотрены существующие методы запуска ГТД, их преимущества и недостатки, приведен способ улучшения запуска микрогазотурбинной установки, выявлены основные требования к приводу запуска ГТД и произведен расчет стартер-генератора на базе вентильного электродвигателя;

2) Во второй главе было выполнено моделирование и исследование системы электропривода запуска микрогазотурбины на базе ПЧ-ВД в среде Matlab. Были получены графики, проанализировав которые пришли к выводу, что привод полностью отрабатывает предъявляемые к нему требования;

3) В третьей главе приведены результаты испытаний стартер-генератора в лаборатории университета и на предприятии «Турбина». В итоге был сделан вывод, что привод полностью соответствует требованиям, стартер-генератор справлялся с запуском микрогазотурбинной установки и генерировал требуемое напряжение;

4) В четвертой главе проводилось моделирование механических переходных процессов, в результате чего пришли к выводу, что мощность, затрачиваемая ГТД при запуске, составляет примерно 30% от полной мощности, и динамический момент не превышает 10% от статического.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Изделие 37Ф2. Книга II. Конструкция. – М.: Оборонгиз, 1963, с. 65-67;
Изделие 37АФ2. Книга II. Техническое описание. – М.: Машиностроение, 1973, с. 65-69
2. Кац, Б.М. Пусковые системы авиационных газотурбинных двигателей / Б.М. Кац, Э.С. Жаров, В.К. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1976, с. 99
3. Исмагилов, Ф.Р. Основы проектирования высокооборотных электромеханических преобразователей энергии с высококоэрцитивными постоянными магнитами: монография / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 223 с.
4. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. – В 2-х кн.: Кн.2 / Б.К. Клоков; Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.
5. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины : Учебное пособие для вузов / Д.А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая шк., 1990. – 416 с.
6. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов по направлениям "Электротехника, электромеханика и электротехнологии" и "Электроэнергетика" / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб.: Питер, 2010. – 349 с.
7. Донской, Н.В. Регулируемые электроприводы переменного тока / Н.В. Донской. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2007. – 204 с.
8. Цыпкин, Я. З. Релейные автоматические системы. Главная редакция физико-математической литературы, изд-во «Наука»./ Я. З. Цыпкин. – М.: 1974. – 576 с.
9. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. Заведен / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272с.
10. Анхимюк, В. Проектирование систем автоматического управления

электроприводами: Учеб. пособие для вузов / В. Анхимюк, О.Ф. Опейко. – Магнитогорск: Высш. шк., 1986. – 143 с.

11. Башарин, А.В. Управление электроприводами: Учеб. пособие для вузов / А.В. Башарин В.А. Новиков. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ие, 1982г – 392 с.

12. Корельский, Д.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами / Научный журнал "Радиоэлектроника. Информатика. Управление", 2001. - с. 155-159.

13. Панкратов, В.В. Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники// Силовая интеллектуальная электроника. Специализированный информационно-аналитический журнал. 2005, №2, с. 27-31

14. Виноградов, А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, И.Ю. Колодин, А.Н. Сибирцев: // <http://www.vectorgroup.ru/articles/article12>

15. Микеров, А.Г. Управляемые вентильные двигатели малой мощности: Учеб. пособие/ГЭТУ. – СПб.: 1997г. -64с.

16. Армейский, Е.В. Электрические микромашины / Е.В. Армейский, Г.Б. Фалк. – М.: Высшая школа, 1985.

17. Волков, Н.И. Электромашинные устройства автоматики / Н.И. Волков, В.П. Миловзоров. – М.: Высшая школа, 1986.

18. Терехов, В.М. Система управления электроприводов / В.М. Терехов, О.Г. Осипов. – М.: издательский центр “Академия”, 2005. 296 с.

19. Микеров, А.Г. Электромеханические датчики и электронные компоненты управляемых вентильных двигателей. Учеб.пособие / СПбГЭТУ “ЛЭТИ”, 1999. – 60с.

20. Овчинников, И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. Курс лекций. – СПб.: “Корона” 2006. – 336 с.

21. Виноградов, А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУВПО. – Иваново: 2008г. – 298 с.

22. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
23. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электропривода переменного тока с полупроводниковым преобразователем частоты. УРО РАН, 2000г. – 654 с.
24. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: издательский центр “Академия”, 2007. – 272с.
25. Усольцев, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / Учебное пособие / А.А. Усольцев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.
26. Герман-Галкин, С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: “Корона”, 2008. – 368 с.
27. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учеб. Пособие / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: “Корона” 2001. – 320 с.
28. Ставровский, Б.А. Автоматизированный электропривод летательных аппаратов / Б.А.Ставровский, В.И.Панов. – Киев: 1974. – 392 с.
29. Сапиро, Д.Н. Электрооборудование самолетов / Д.Н. Сапиро. – М.: «Машиностроение», 1977. – 304 с.
30. Брускин, Д.Э. Электрооборудование самолетов / Д.Э. Брускин. – М.: «Государственное энергетическое издание», 1956. – 336 с.
31. Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1981. – 550 с.
32. Локай, В.И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет / М.К. Максимова, В.А. Стрункин. – М.: Машиностроение, 1991. – 512 с.