

Министерство науки и высшего образования 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

2018 г.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДАЧИ
ТОПЛИВА ГАЗОТУРБИННОГО ЭНЕРГОАГРЕГАТА
АО СКБ «ТУРБИНА»

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ – 150306.2018.533 ПЗ (ВКР)

Консультант
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Руководитель работы
Доцент, к.т.н.
С.Н. Басков

2018 г.

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Автор работы
студент группы П-456
Сергей Александрович Пасеев

2018 г.

Нормоконтролер
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2018 г.

АННОТАЦИЯ

Пасеев С.А. Разработка системы автоматического управления подачи топлива газотурбинного энергоагрегата АО СКБ «ТУРБИНА». – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2018, 70 с. ил. 33, библиогр. список – 25 наим.

Целью данной работы является разработка системы автоматического управления подачи топлива газотурбинного энергоагрегата.

После анализа технологического процесса были выдвинуты требования к приводу. На основе этих требований была разработана кинематическая схема механизма и выбран двигатель привода. Двигатель прошел проверки по перегреву и перегрузочной способности.

Были рассчитаны статические и динамические моменты для всего цикла работы, построена нагрузочная диаграмма. Для управления двигателя был выбран транзисторный преобразователь. Для защиты электропривода используется плавкие предохранители.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	7
1.1 Характеристика конструкторского бюро. Описание технологического процесса работы газотурбинного энергоагрегата.....	7
1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма.....	15
1.3 Требование к приводам и системе автоматизации	26
1.4 Расчёт и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы	28
1.5 Выбор системы привода	37
1.6 Выбор основного силового оборудования	38
1.7 Защиты привода. Расчёт установок защитных устройств	39
2 РАЗРАБОТКА САУ	40
2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации	40
2.2 Выбор контроллера и датчиков технологических координат	41
2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата.....	51
2.4 Разработка контура регулирования технологических координат.....	53
2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода.....	55
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ	57
3.1 Характеристика конструкторского бюро и выпускаемой продукции	57
3.2 Расчёт производственной программы.....	58
3.3 Расчёт сметы капитальных затрат	59
3.4 Расчёт РСЭО	61
3.5 Расчёт затрат на материалы и на оплату труда со страховыми отчислениями	64
3.6 Расчёт прибыли и показателей рентабельности.....	65
3.7 Сводная таблица технико-экономических расчётов	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	68

ВВЕДЕНИЕ

Подача топлива в газотурбинный энергоагрегат, является сложным процессом. Для правильной дозировки топлива нужно учесть множество факторов, таких как температура топлива, скорость вращения турбины, потребляемая электрическая мощность потребителем, давления подачи топлива и множество других факторов.

Без автоматизации системы нельзя точно контролировать подачу топлива в турбину. Если подавать топливо меньше требуемого, это может привести к затуханию горения топливно-воздушной смеси, от большого количества топлива турбина начнёт перегреваться и может привести к взрыву камеры сгорания от большого давления. Система должна быстро реагировать на потребляемую мощность потребителем. Нужно корректировать подачу топлива ещё до того как изменятся обороты двигателя или с задержкой не более 1 секунды. Иначе это может привести к уменьшению давления воздуха создаваемого компрессором и подаваемого в камеру сгорания, это так же может привести к затуханию топливно-воздушной смеси или это приведёт к увеличению скорости вращения турбины, что пагубно повлияет на элементы конструкции, такие как радиальные и упорные подшипники.

Поэтому использование автоматической системы подачи топлива является важным элементом для точного подачи топлива в газотурбинный энергоагрегат.

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика конструкторского бюро. Описание технологического процесса работы газотурбинного энергоагрегата

История создания ОАО СКБ «Турбина» берет начало в 1962 г., когда с целью создания аналогов авиационных газотурбинных двигателей для наземного транспорта на Челябинском Тракторном Заводе был создан новый конструкторский отдел «б». Была создана производственно-экспериментальная база, что позволило еще на Челябинском Тракторном Заводе произвести работы по созданию первых изделий.

В 1970 г. отдел «б» Челябинского Тракторного Завода объединился с Челябинским филиалом московского института ВНИИ транспортного машиностроения Миноборонпрома и по постановлению ЦК КПСС и СМ СССР от 12.05.1970г. №326-113 было создано специальное конструкторское бюро «Турбина».

Первыми разработками СКБ являлись транспортные газотурбинные двигатели с теплообменником, газотурбинный двигатель ГТД-400 и газотурбинный двигатель ГТД-700.

С 1970 по 1985 г.г. было подано 349 заявок на изобретения, получено 173 авторских свидетельств. В 1980 г. к 20-летнему юбилею ОАО СКБ «Турбина» был основан музей предприятия, в котором каждый из сотрудников может ознакомиться и историей развития предприятия и образцами продукции. Ключевыми моментами в истории развития предприятия стали 1989г. – создание ГТА-18А и 1984 г. – создание АП-18Д. Их серийный выпуск был начат в 1989 г. Агрегаты по настоящее время надежно эксплуатируются как в РФ, так и за её пределами. Другим ключевым моментом в истории предприятия стала работа по созданию агрегатов питания и кондиционирования АПК-40Т и АПК-40-ТМ.

На ОАО СКБ «Турбина» постоянно ведется работа по направлениям ТКР.

За время существования предприятия было разработано около 25 видов ТКР различных типов и размеров, из них доведены до серийного производства 4 вида. [3]

Сегодня АО СКБ «Турбина» - это специализированный научно-производственный комплекс, включающий в себя полноценный конструкторско-технологический и производственный коллектив, а также производственные мощности с уникальными технологиями и экспериментальной базой. На сегодняшний день предприятие занимает лидирующее положение в РФ в разработке и выпуске малогабаритных многофункциональных газотурбинных энергоагрегатов.

Гражданская продукция АО СКБ "Турбина" имеет огромный потенциал применения в нефтегазовой отрасли, сельском хозяйстве, медицине и строительстве, и не имеет аналогов или имеет импортозамещающее значение.

Все изделия АО СКБ «Турбина» отличает высокая эффективность, надежность работы в условиях экстремальных температур, экологичность, многотопливность и автономность. Вся выпускаемая продукция проходит жесткий контроль качества и сертифицирована в соответствии с российскими и международными стандартами.

Общая численность сотрудников АО СКБ «Турбина» составляет 1200 человек. Расположение предприятия в промышленном регионе позволяет оперативно удовлетворять потребности развивающегося производства в квалифицированных кадрах.

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.

АО СКБ «Турбина» обеспечивает практически замкнутый производственный цикл для всех выпускаемых видов продукции. Имеющиеся производственные мощности позволяют с высоким качеством обеспечивать технологические переделы.

Главной особенностью производственных изделий АО СКБ «Турбина» является наличие таких технологически сложных в производстве деталей как цельнолитые детали типа соплового аппарата, диффузора, колеса турбины, а также такие сложные детали как крыльчатка, ротор турбины, высокоточные шестерни, корпусные детали и прецизионные детали.

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 материала 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 резбошлифовки, электрохимической и электрохимической и электроэрозионной обработки, наружной, внутренней, бесцентровой и плоской шлифовки, доводки протягиванием, зубодолбежки, зубофрезерования и зубошлифования. Освоены практически все виды мехобработки с точностью по 5-6 качеству, 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, сернокислотное анодирование, хромовокислотное 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. [4]

Газовая турбина — это лопаточная машина, в ступенях которой энергия сжатого и/или нагретого газа преобразуется в механическую работу на валу. Основными элементами конструкции являются ротор (рабочие лопатки, закреплённые на дисках) и статор, именуемый сопловым аппаратом

(направляющие лопатки, закреплённые в корпусе).

Газ под высоким давлением поступает через сопловой аппарат турбины в область низкого давления, при этом расширяясь и ускоряясь. Далее, поток газа попадает на рабочие лопатки турбины, отдавая им часть своей кинетической энергии и сообщая лопаткам крутящий момент. Рабочие лопатки передают крутящий момент через диски турбины на вал.

Упорные подшипники и радиальные подшипники являются критическими элементами разработки. Традиционно — это были гидродинамические или охлаждаемые маслом шарикоподшипники. Их превосходили воздушные подшипники, которые успешно используются в микротурбинах и вспомогательных силовых установках.

Механически газовые турбины могут быть значительно проще, чем поршневые двигатели внутреннего сгорания.

Принципиальное отличие ДВС и ГТУ сводится к следующему. В ДВС процессы сжатия воздуха, сгорания топлива и расширения продуктов сгорания происходят в пределах одного конструктивного элемента, именуемого цилиндром двигателя. В ГТУ указанные процессы разнесены по отдельным конструктивным узлам: сжатие осуществляется в компрессоре, сгорание топлива в камере сгорания, расширение продуктов сгорания в газовой турбине.

Система автоматического управления обеспечивает подачу топлива в газотурбинный энергоагрегат для раскручивания турбины до номинальных, а в дальнейшем и для поддержания номинальных оборотов турбины для обеспечения работы в режиме максимального КПД.

АСУ обрабатывает данные с датчика угловой скорости, входного давления топлива, тока нагрузки, температуры газа на входе, давления газа компрессора и, с помощью заложенной в контроллере математической модели, генерирует ШИМ сигнал для управления клапаном подачи топлива и включает зажигание после разгона турбины стартером. Датчики температуры газа на выходе из турбины выполняет функцию защиты турбины от перегрева, если температура будет критической, то система перекроет подачу топлива.

На рисунке 1 представлена пневматическая схема подачи топлива газотурбинного энергоагрегата. На данной схеме подача топлива обеспечивается клапаном 3 – burkert 8626, он управляется ШИМ сигналом модулируемый контроллером. Через вход 1 подаётся топливо по трубке внутренним диаметром $D=16$ мм. Клапаны 2 и 6 открывают и закрывают подачу топлива, клапан 5 предназначен для сброса топлива в окружающую среду через выход 4. Впрыск топлива в камеру сгорания подается трубками 7 диаметром $d=4$ мм.

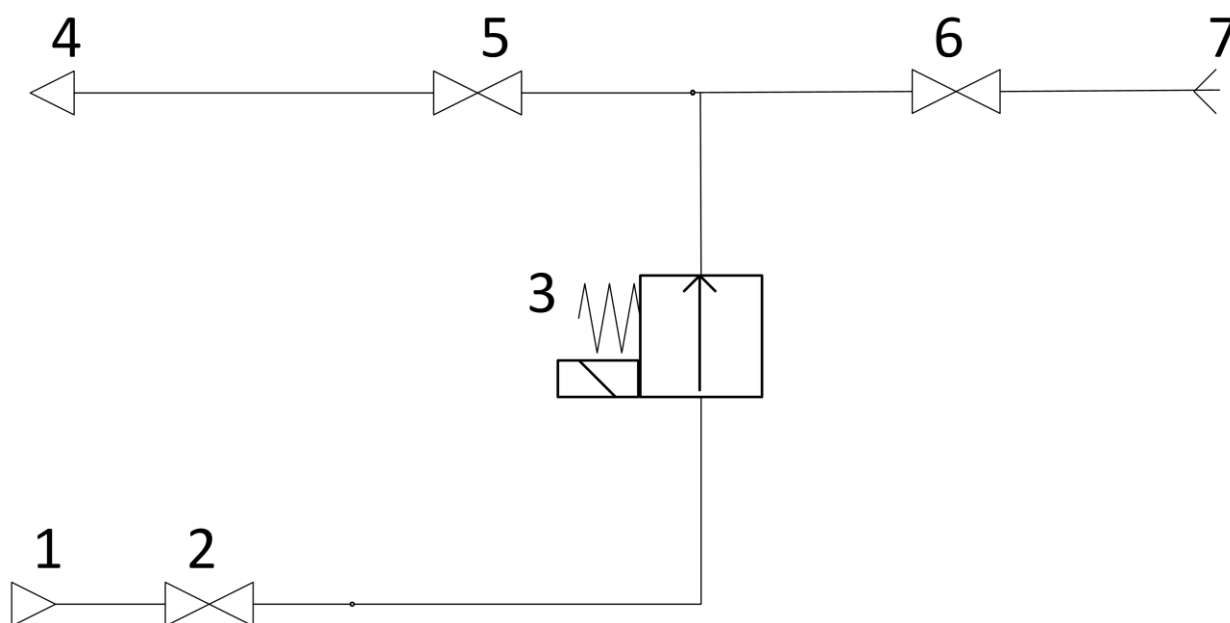


Рисунок 1 – Пневматическая схема подачи топлива

Регулятор массового расхода (MFC), тип 8626 подходит для регулирования массового расхода больших объемов газа. Термический датчик Inline, который находится непосредственно в газовом потоке, обеспечивает очень высокое время реакции. Пропорциональный клапан прямого действия фирмы Bürkert в качестве исполнительного органа обеспечивает высокую чувствительность при срабатывании. Интегрированный PI-регулятор обеспечивает великолепные регулирующие характеристики MFC. Калибровка регулятора типа 8626 выполняется для двух разных видов газа, которые переключает пользователь. В качестве электрических интерфейсов доступны как аналоговые стандартные сигналы, так и полевые шины. Благодаря низкой чувствительности к

загрязнениям и высокой степени защиты IP регулятор типа 8626 подходит для применения в жестких эксплуатационных условиях, например, в таких сферах как системы управления горелками, тепловая обработка, металлургия, пищевая промышленность, защита окружающей среды, нанесение покрытий на различные материалы, системы топливных элементов или испытательные стенды.

Внешний вид пропорционального клапана представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пропорциональный клапан burkert 8626

На рисунке 3 представлена фотография пневматической системы подачи топлива в газотурбинном энергоагрегате.

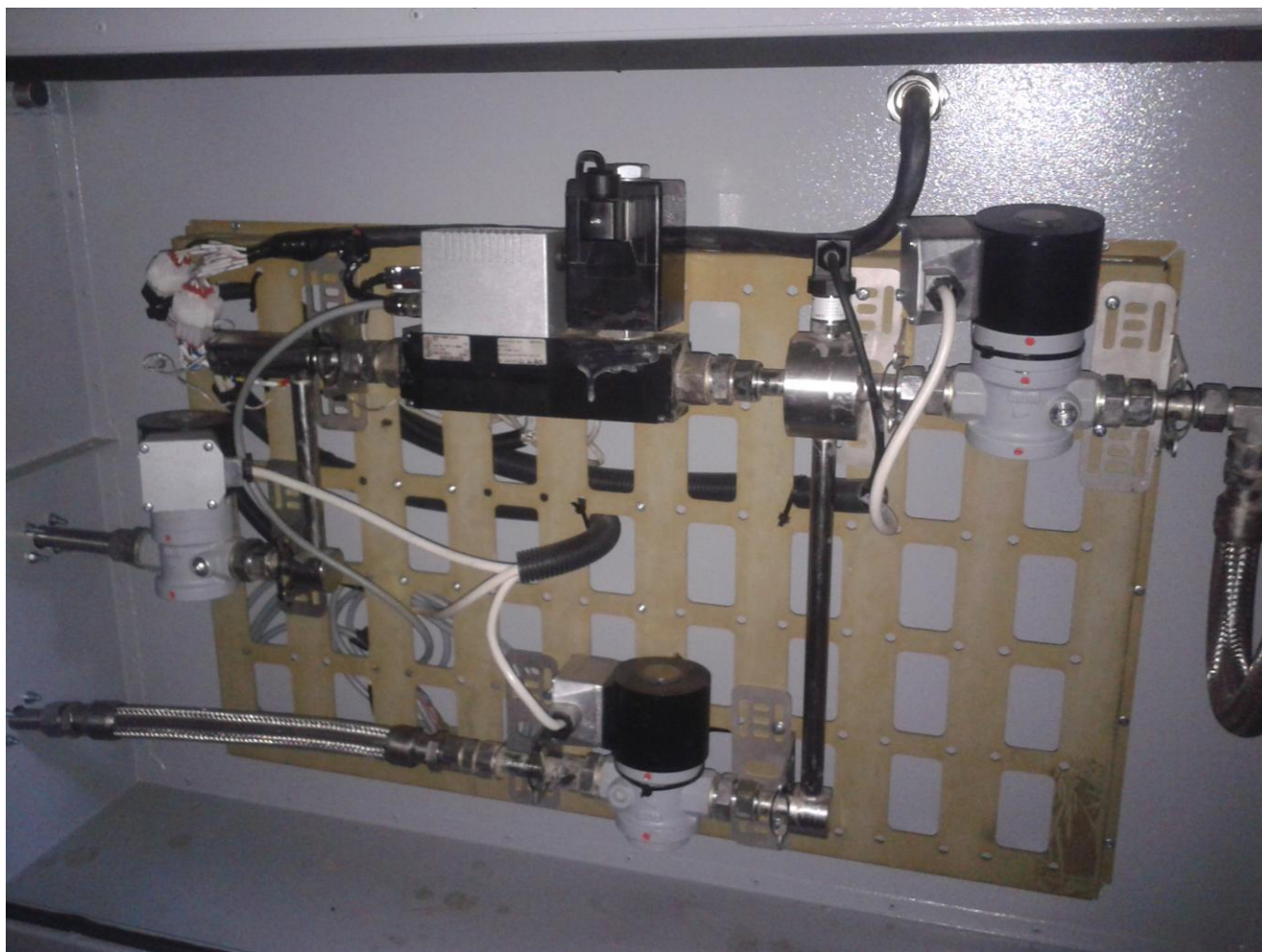


Рисунок 3 – Пневматическая схема подачи топлива

1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

Газотурбинный энергоагрегат включает в себя контейнер, размещенный в нем газотурбинный двигатель с силовой турбиной, трансмиссию, затурбинный диффузор, редуктор и агрегат полезной нагрузки, а также воздухозаборное и выхлопное устройства. Газотурбинный энергоагрегат также оснащен воздуховытяжным устройством и блоком шумоглушения. Указанные блок шумоглушения и агрегат полезной нагрузки соединены внутри контейнера гибкой оболочкой. Воздухозаборное устройство расположено между двигателем и

редуктором. Выходная часть воздухозаборного устройства размещена в контейнере и охватывает трансмиссию. Вход воздуховытяжного устройства расположен напротив затурбинного диффузора, на выходе которого установлен компенсаторный блок, включающий, по меньшей мере, два кольцевых фланца с эластичным уплотнением между ними, а также охватывающий его экран. Один кольцевой фланец скреплен с затурбинным диффузором и образует с эластичным уплотнением резонаторную камеру, выход из которой направлен в сторону потока продуктов сгорания. Другой кольцевой фланец образует с экраном и эластичным уплотнением тупиковую полость, выход из которой направлен в сторону двигателя. Изобретение повышает к.п.д., надежность и эффективность энергоагрегата, улучшает охлаждение корпуса двигателя.

Изобретение относится к газотурбостроению, в частности к стационарным газотурбинным установкам в составе передвижных и блочно-контейнерных электростанций.

Известна газотурбинная установка, содержащая раму, газотурбинный двигатель с силовой турбиной, затурбинным диффузором и агрегатами полезной нагрузки, а также воздухозаборное и выхлопное устройства.

Известная установка имеет низкий к.п.д. вследствие значительных потерь давления и турбулентности воздушного потока во входном устройстве, а также повышенный уровень шума в трактах всасывания и выхлопа.

Наиболее близкой к заявляемой является конструкция газотурбинного агрегата, содержащего контейнер и размещенные в нем газотурбинный двигатель с силовой турбиной, трансмиссию, затурбинный диффузор, редуктор и агрегат полезной нагрузки, а также воздухозаборное и выхлопное устройства. Агрегат содержит дополнительные отсеки для маслоагрегатов и размещения съемных емкостей, подсоединенных к общему распределительному устройству и связанных трубопроводами с коллекторами, поворотные жалюзи на входе короба воздухозаборного устройства с электроприводом, цилиндрический насадок на выходе трубы выхлопного устройства, перфорацию на газоприемном сопле обтекателя, дополнительную внутреннюю обшивку, теплоизоляционный

материал, заполняющий зазор между наружной и внутренней обшивками, причем трансмиссия размещена со стороны затурбинного диффузора, а агрегат полезной нагрузки - в отдельном смежном отсеке.

Однако известный агрегат имеет низкие к.п.д. и надежность из-за недостаточной эффективности охлаждения корпуса двигателя и агрегатов полезной нагрузки, преимущественно в жаркое время года, за счет эжекции газов в выхлопном тракте газотурбинного двигателя, а также высоких потерь давления во всасывающем и выхлопном трактах.

В известных установках невозможно использование газотурбинных двигателей, у которых выходной вал силовой турбины и трансмиссия расположены со стороны входного устройства компрессора.

В известном агрегате наблюдается достаточно высокий уровень шума во всасывающем и выхлопном трактах. И, кроме того, для контроля и осмотра лопаток силовой турбины требуется отстыковка секций затурбинного диффузора, поэтому известный агрегат сложен в обслуживании.

Техническая задача, решаемая изобретением, заключается в повышении к.п. д., надежности и эффективности энергоагрегата за счет уменьшения потерь давления во всасывающем и выхлопном трактах, улучшения охлаждения корпуса двигателя и агрегатов полезной нагрузки, а также достижения максимальной эффективности шумоглушения в различных частотных диапазонах.

Сущность изобретения заключается в том, что газотурбинный энергоагрегат, включающий контейнер, размещенный в нем газотурбинный двигатель с силовой турбиной, трансмиссию, затурбинный диффузор, редуктор и агрегат полезной нагрузки, а также воздухозаборное и выхлопное устройства, согласно изобретению, оснащен воздуховытяжным устройством и блоком шумоглушения, указанные блок шумоглушения и агрегат полезной нагрузки соединены внутри контейнера гибкой оболочкой (гибким воздуховодом), при этом воздухозаборное устройство расположено между двигателем и редуктором, выходная часть воздухозаборного устройства размещена в контейнере и охватывает трансмиссию, причем вход воздуховытяжного устройства расположен напротив затурбинного

диффузора, на выходе которого установлен компенсаторный блок, включающий по меньшей мере два кольцевых фланца с эластичным уплотнением между ними, а также охватывающий его экран, при этом один кольцевой фланец скреплен с затурбинным диффузором и образует с эластичным уплотнением резонаторную камеру, выход из которой направлен в сторону потока продуктов сгорания, а другой кольцевой фланец образует с экраном и эластичным уплотнением тупиковую полость, выход из которой направлен в сторону двигателя.

Кроме того, компенсаторный блок размещен ниже по потоку продуктов сгорания от входа воздуховытяжного устройства из контейнера, затурбинный диффузор выполнен составным по меньшей мере из двух телескопически соединенных между собой кольцевых насадков с упругим уплотнением. При этом по меньшей мере один из кольцевых насадков установлен внутри контейнера на траверсе с возможностью перемещения.

Размещением в газотурбинном энергоагрегате воздуховытяжного устройства и блока шумоглушения и соединением указанных блока и агрегата гибкой оболочкой внутри контейнера достигается повышение эффективности охлаждения агрегата полезной нагрузки, редуктора и газотурбинного двигателя, а также повышение эффективности шумоглушения за счет исключения открытого тракта всасывания с зоной обслуживания вне контейнера.

Размещение воздухозаборного устройства между двигателем и редуктором, а также размещение в контейнере выходной части воздухозаборного устройства, которая охватывает трансмиссию, позволяет использовать в заявляемом энергоагрегате газотурбинные двигатели с высоким к.п.д., у которых выходной вал силовой турбины и трансмиссия расположены со стороны входного устройства компрессора. Такая конструктивная особенность позволяет расширить номенклатуру газотурбинных двигателей, упрощает эксплуатацию и снижает стоимость обслуживания. Кроме того, исключается нагрев выходного вала или его кожуха, уменьшается нагрев редуктора и агрегата полезной нагрузки, снижается уровень шума за счет рассеивания звуковых волн в воздухозаборном устройстве. Это объясняется тем, что тракт всасывания, генерирующий источник

звука, "охвачен" секциями фильтров циклового воздуха с минимальными потерями давления и не имеет открытого тракта с зоной обслуживания вне контейнера.

Размещение на контейнере воздуховытяжного устройства воздуха, а также блока шумоглушения агрегата полезной нагрузки, выход которого соединен со входом агрегата полезной нагрузки, как и размещение входа вытяжного устройства напротив затурбинного диффузора, позволяют уменьшать турбулентность воздушного потока и потери давления при охлаждении горячих частей двигателя (турбины и затурбинного диффузора). При таком размещении достигается более эффективное охлаждение двигателя и затурбинного диффузора по сравнению с эжекторным методом охлаждения, использованным в известной конструкции, а также уменьшается потребляемая мощность для привода вытяжного вентилятора в вытяжном устройстве воздуха из контейнера вследствие более полного использования хладоресурса охлаждающего воздуха и его направленного течения от агрегата полезной нагрузки на обдув редуктора, а далее на охлаждение затурбинного диффузора.

Максимальная эффективность шумоглушения в разных частотных диапазонах может быть достигнута лишь в том случае, когда на выходе затурбинного диффузора установлен компенсаторный блок, включающий по меньшей мере два кольцевых фланца с эластичным уплотнением между ними, а также охватывающий его экран, при этом один кольцевой фланец скреплен с затурбинным диффузором и образует с эластичным уплотнением резонаторную камеру, выход из которой направлен в сторону потока продуктов сгорания, а другой кольцевой фланец образует с экраном и эластичным уплотнением тупиковую полость, выход из которой направлен в сторону двигателя.

Резонаторная камера позволяет эффективно снижать уровень шума на средних и высоких частотах, а тупиковая полость компенсаторного блока служит для поглощения звуковой энергии в области высоких частот и в меньшей степени - низких. Кроме того, эластичное уплотнение компенсаторного блока дополнительно демпфирует и поглощает звуковую энергию в области средних и

высоких частот. Компенсаторный блок позволяет снизить шум до нормативных значений в кабине управления и в жилых помещениях, расположенных вблизи энергоагрегата.

Следует отметить, что компенсаторный блок может быть размещен выше или ниже по потоку продуктов сгорания от входа вытяжного устройства воздуха из контейнера в зависимости от требований к частотному диапазону звуковой энергии (шума). В случае размещения компенсаторного блока ниже по потоку продуктов сгорания от входа вытяжного устройства воздуха от контейнера достигается наиболее эффективное шумоглушение без снижения к.п.д. в тракте выхлопа, что дает экономические преимущества при размещении энергоагрегата в жилой зоне.

Выполнение затурбинного диффузора составным по меньшей мере из двух телескопически соединенных между собой кольцевых насадков с упругим уплотнением, когда по меньшей мере один из кольцевых насадков установлен внутри контейнера на траверсе с возможностью перемещения, позволяет упростить и сократить время обслуживания, например, для осмотра и контроля лопаток силовой турбины вихретоковым методом, а также повысить эффективность шумоглушения внутри контейнера.

Система автоматической подачи топлива реализовано в нефтяном агрегате питания АПН-18

АПН-18 многофункциональный энергоагрегат мощностью 18 кВт, предназначен для организации энергоснабжения в автономном или параллельном режиме производственных, коммерческих и жилых объектов. Агрегат обеспечивает питанием потребителей постоянным током напряжением 27 В;

Режим работы:

- Параллельно с сетью
- Автономно
- Аварийно
- Комбинированный режим

Отличительная особенность установки – работа при температуре от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$ без значительных потерь мощности и ресурса работы.

Состав агрегата:

- двигатель газотурбинный с редуктором;
- стартер-генератор постоянного тока;
- топливно-масляный агрегат;
- блок запуска и регулирования;
- агрегат зажигания.

Агрегат устанавливается в любые объекты. Топливная и электрическая системы агрегата интегрированы в системы объекта.

Представленный на рисунке 4 энергоагрегат АПН-18 работает на природном газе (метане).



Рисунок 4 – Внешний вид АПН-18

Турбина входящего в состав данного энергоагрегата имеет внешний вид, представленный на рисунках 5-7.

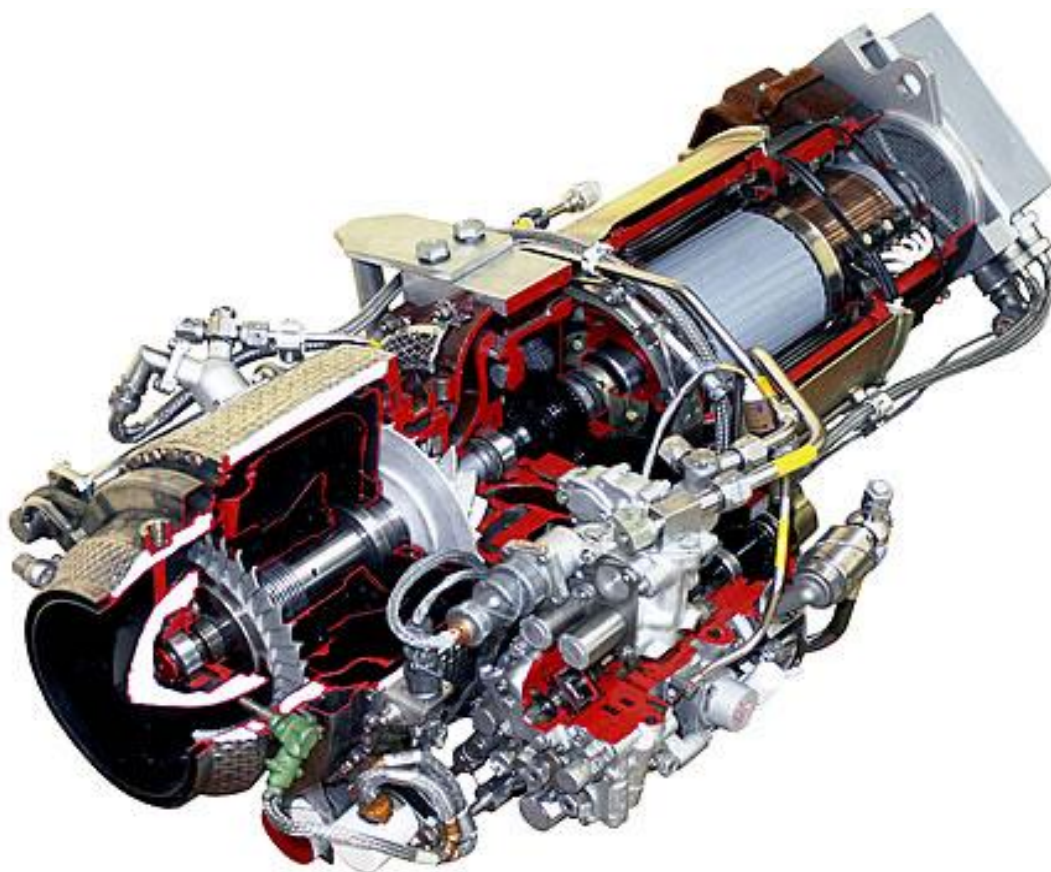


Рисунок 5 – Внешний вид турбины ГТА-18А



Рисунок 6 – Вид АПН-18 сбоку



Рисунок 7 – Вид АПН-18 со стороны выходного сопла

В энергоагрегате АПН-18 подача топлива контролируется автоматической системой управления (АСУ).

На рисунке 8 представлена кинематическая схема газотурбинного энергоагрегата АПН 18. На одном валу кинематической схемы расположен компрессор, турбина и редуктор. Компрессор нагнетает воздух из окружающей среды, давление на выходе компрессора достигает 3 атм. После компрессора воздух поступает в камеру сгорания, который смешивается с топливом и в процессе горения газ расширяется и под высоким давлением попадает на лопатки турбины. Вал турбины вращается со средней скоростью 63000 об/мин. Редуктор понижает скорость вращения, передаточное отношение вращения между валом турбины и валом стартер-генератора (СТГ) составляет $i_1=0,11$, передаточное отношение вращения между валом турбины и валом датчика скорости вращения составляет $i_2=0,234$.

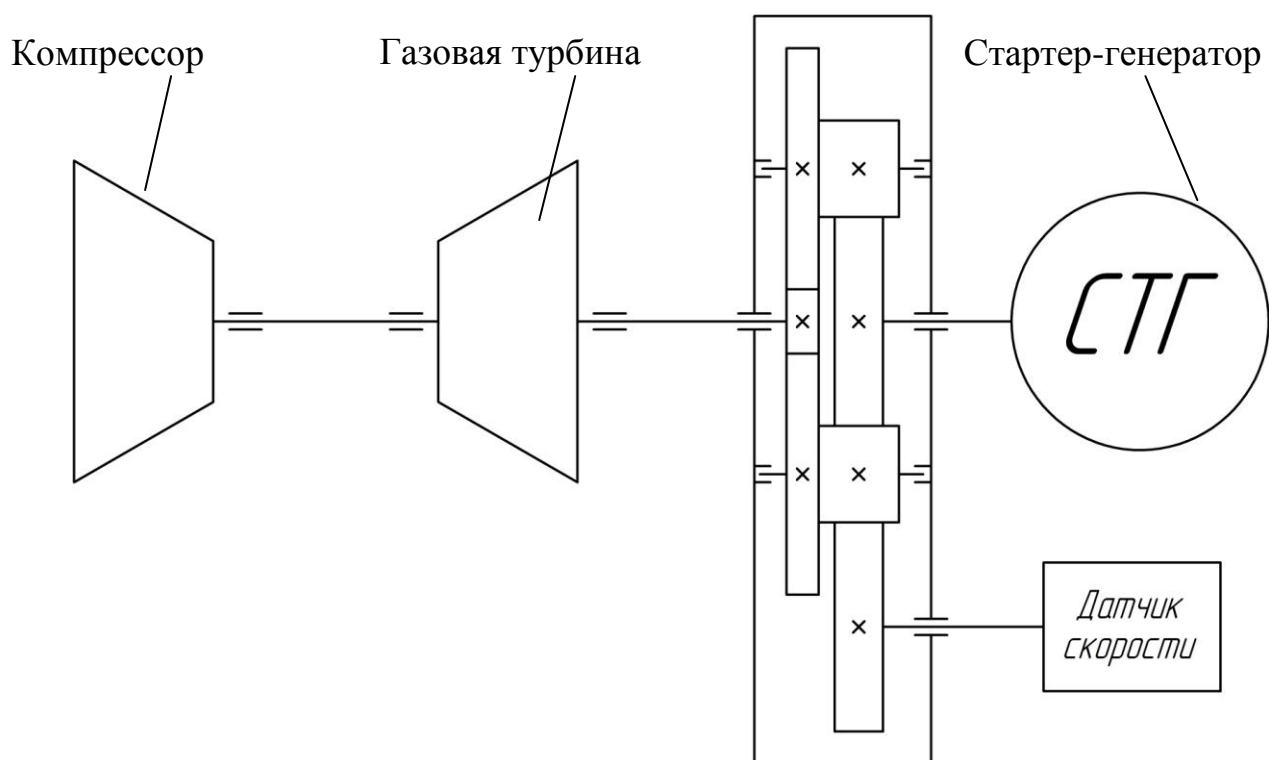


Рисунок 8 – Кинематическая схема АПН-18

На рисунке 9 представлен стартер-генератор ГС-18МО.

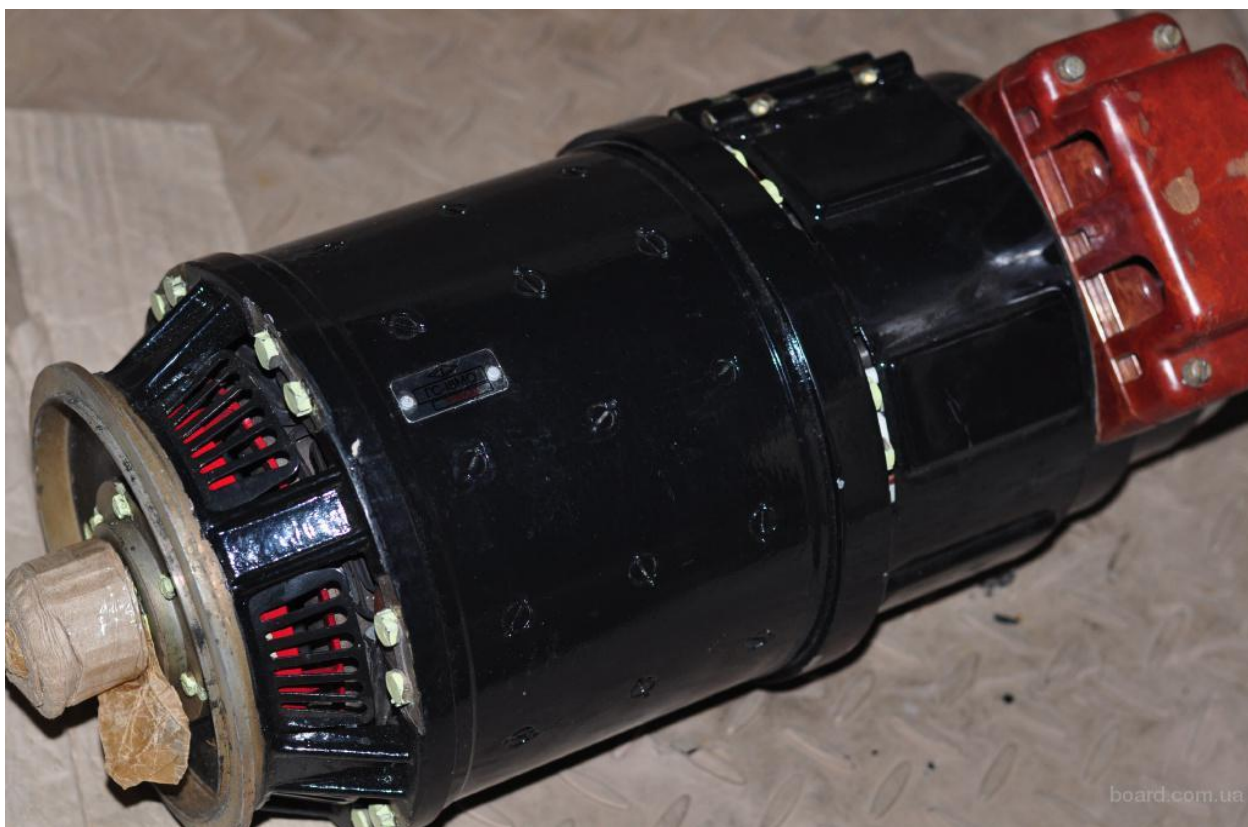


Рисунок 9 – Стартер-генератор ГС-18МО

Расход топлива представлен на рисунке 10. График с крестиками это задающая подача топлива, график с точками это данные снятые с расходометра.

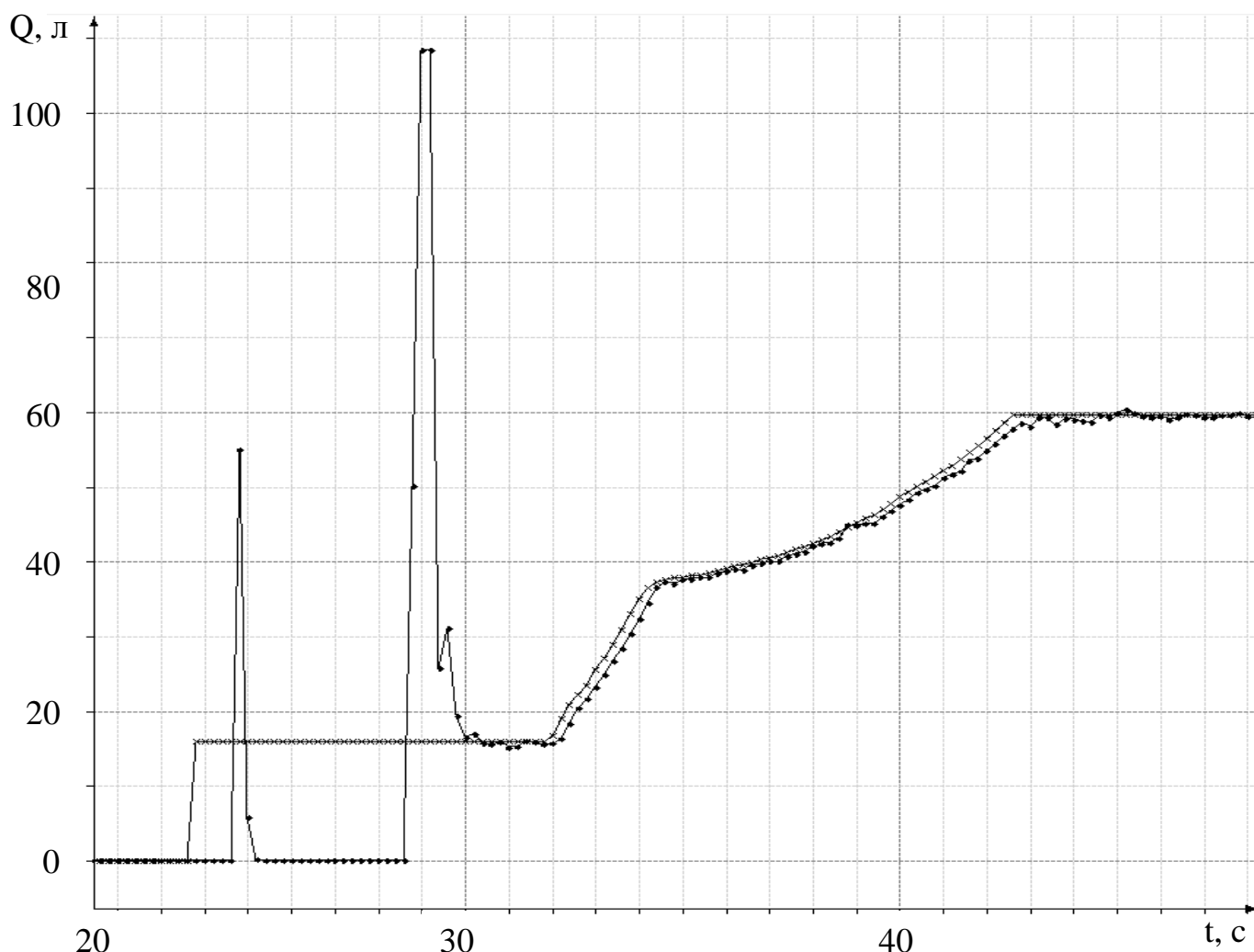


Рисунок 10 – Расход топлива

На рисунке 11 представлена зависимость тока, потребляемого двигателем, от времени, при запуске газотурбинного двигателя.

Запуск двигателя происходит в момент времени 29 с. В момент времени 30,5 с. отключается добавочное сопротивление. После этого ток начинает расти. С помощью ШИМ управления, подающего напряжение на базу транзистора Q , ток, потребляемый от АКБ, поддерживается на уровне 300 А. Электродвигатель выходит на требуемые обороты 2400 об/мин (≈ 22000 об/мин на валу турбины). В момент времени 40 с электродвигатель перестает потреблять ток и турбина начинает крутиться только за счет сгораемого топлива.

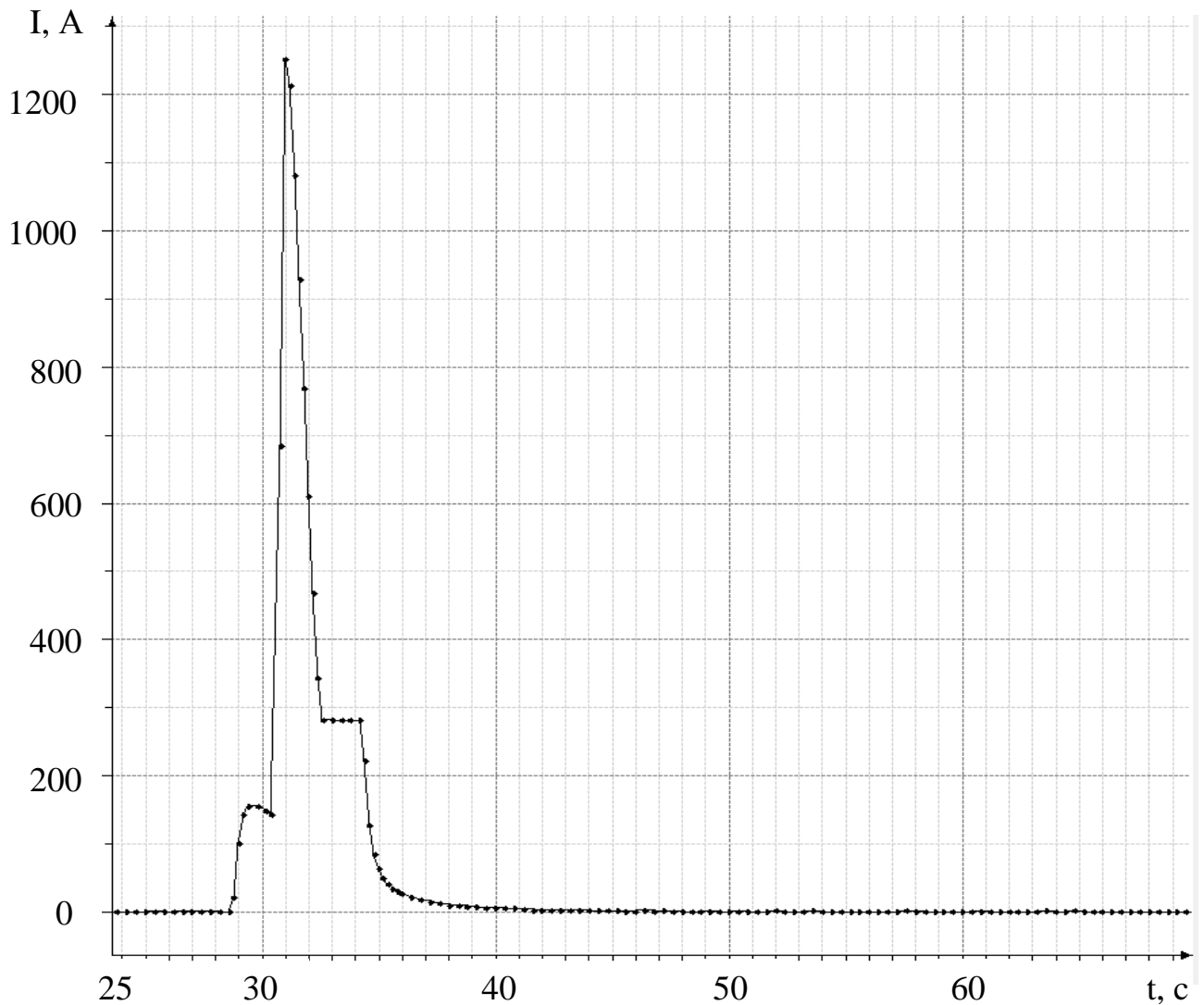


Рисунок 11 – Ток в обмотке якоря

1.3 Требование к приводам и системе автоматизации

К системам запуска предъявляют следующие основные требования:

1. Создание необходимого момента для преодоления статического и динамического момента сопротивления;
2. Обеспечение вывода газотурбинного энергоагрегата на заданный режим за достаточно короткое время. 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 температуры (здесь критичным является время разгона авиадвигателя от n_1 до n_2 , то есть время, когда одновременно работают стартер и турбина);

3. Экономичное и рациональное расходование электрической энергии. Это требование обуславливается ограниченной мощностью источника электрической энергии, в качестве которого для стартера используются бортовые аккумуляторные батареи;

4. Двигатель должен надежно запускаться во всех условиях эксплуатации газотурбинного энергоагрегата 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 и удовлетворять следующим условиям:

- система запуска должна включаться путем нажатия на пусковую кнопку;
- процесс запуска до выхода двигателя на заданный режим должен происходить автоматически, без выполнения дополнительных ручных операций после нажатия на пусковую кнопку;
- автоматика системы запуска должна обеспечивать устойчивую работу двигателя в процессе запуска и выход на режим малого газа за установленное время;
- система запуска должна автоматически отключаться и переключать двигатель в режим генератора после выведения вращения турбины до номинальных оборотов;

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

8. Система запуска должна иметь минимально возможные габариты и массу;

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

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

11. Потребляемый ток не должен превышать 600 А и не более 2000 А в течении 0,5 с;

12. Работа электродвигателя в режиме генератора должен выдавать мощность 18 кВт при напряжении около 30 В.

13. Запуск и работа в генераторном режиме:

- продолжительный 24 ч, не менее;

- циклами по 15 минут.

Перерыв между циклами 15 минут, не менее.

1.4 Расчёт и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы

Расчёт углового ускорения по формуле (1).

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t} = \frac{6635,6}{24,8} = 267,56 \text{ рад/с}^2, \quad (1)$$

где ε – угловое ускорение, рад/с²;

ω – максимальная угловая скорость, рад/с;

t – время ускорения, с.

На рисунке 12 представлен график оборотов турбины в минуту.

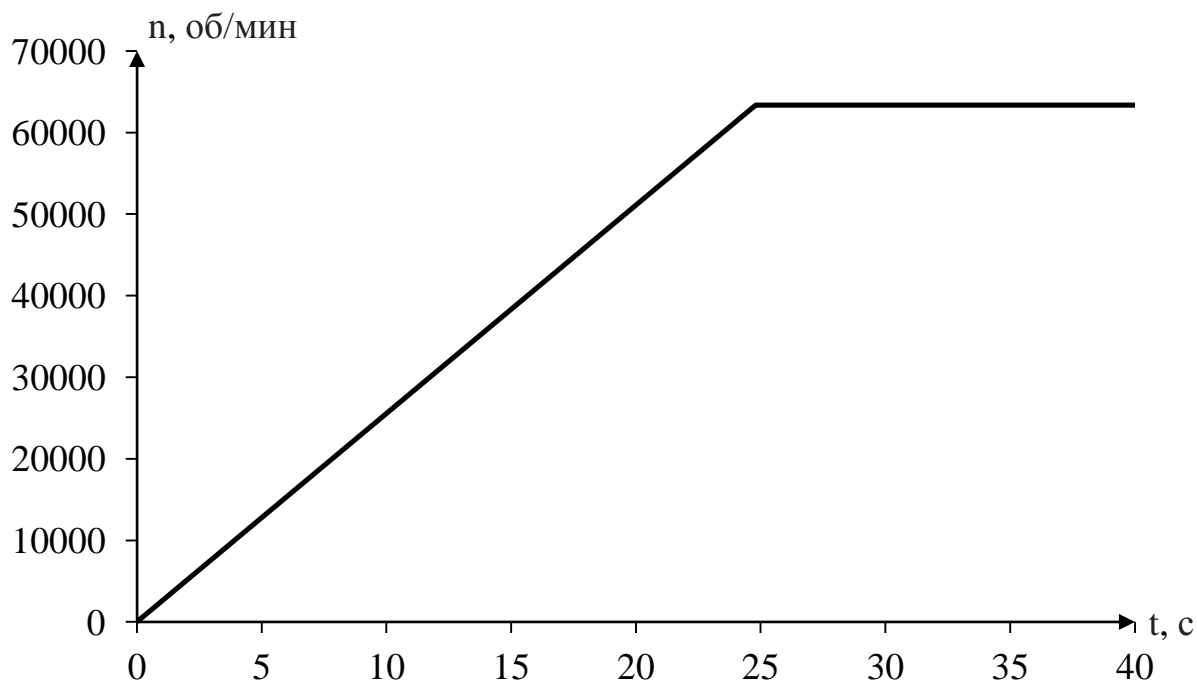


Рисунок 12 – Скорость турбины

Расчёт статического момента сопротивления в подшипниках:

$$M_{c1} = f \cdot m \cdot g \cdot R, \quad (2)$$

где $R=0,015$ – радиус подшипника, м;

$m=4,38$ – масса турбины, кг;

$g=9,8$ – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$f=0,008$ – коэффициент трения качения стали о сталь.

$$M_c=0,008 \cdot 4,38 \cdot 9,8 \cdot 0,015=0,005157301 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Расчёт статического момента сопротивления компрессора:

$$M_{c2}=K \cdot \omega^2, \quad (3)$$

где $K = 6,161 \cdot 10^{-9}$ – коэффициент сопротивления компрессора;

ω – угловая скорость турбины, рад/с.

В таблице 1 представлен результирующий статический момент компрессора.

Таблица 1 – Статический момент компрессора

t, с	0	3,9	7,8	11,7	15,6	19,6	23,5	24,8
n, об/мин	0	10000	20000	30000	40000	50000	60000	63365
ω , рад/с	0	1047,2	2094,4	3141,6	4188,8	5235,9	6283,2	6635,6
M_{c2} , мН·м	0	6,8	27	60,8	108,1	168,9	243,2	271,3

На рисунке 13 представлен график полного статического момента турбины.

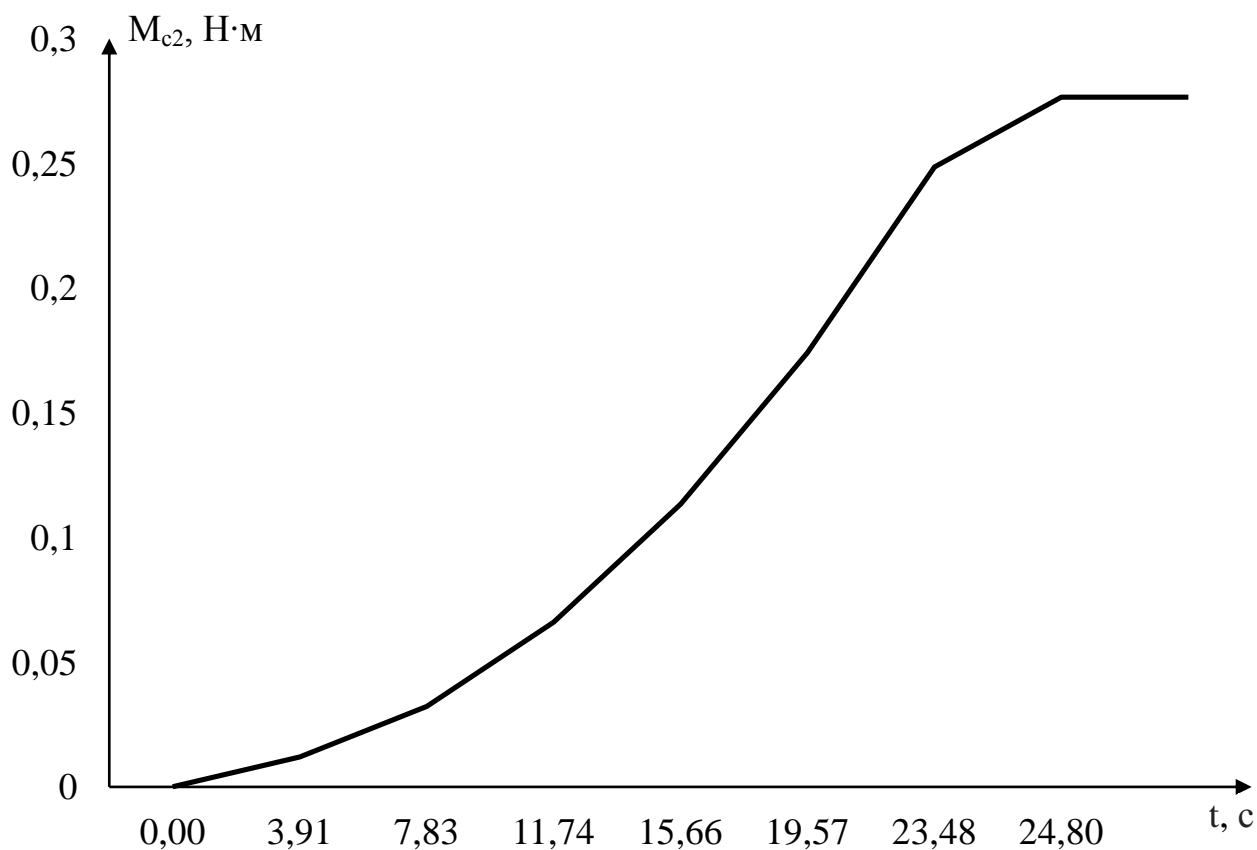


Рисунок 13 – Статический момент турбины

Для нахождения динамического момента, нужно рассчитать момент инерции механизма. Момент инерции рассчитывается по следующей формуле:

$$J = m \cdot R^2 / 2, \quad (4)$$

где m – масса детали, кг;

R – радиус деталей, м.

Приведённый момент инерции приводится к турбине, соединённая с первой шестернёй и находится по формуле:

$$J = J / i^2, \quad (5)$$

где J – момент инерции детали, кг·м²;

i – передаточное отношение.

Момент инерции редуктора представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Момент инерции редуктора

Позиция шестерён	Масса шестерён, m кг	Радиус, R м	Момент инерции, J кг·м ²	Передаточное число относительно 1 позиции, i	Приведённый момент инерции к позиции 1, J кг·м ²
1	0,05955	0,01350	0,00000543	1,000	0,00000543
2	0,32572	0,03600	0,00021107	2,667	0,00002968
3	0,06839	0,01125	0,00000433	2,667	0,00000061
4	0,47802	0,03825	0,00034969	9,067	0,00000425
5	0,50292	0,05775	0,00083863	13,689	0,00000448
6	0,03257	0,01800	0,00000528	4,267	0,00000029

Момент инерции турбины представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Момент инерции турбины

Наименование деталей	Масса, m кг	Радиус, R м	Момент инерции, J кг·м ²
Крыльчатка, 2 шт	1,78285	0,10000	0,01782854
Вал турбины	1,13097	0,01500	0,00012723

Момент инерции двигателя представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Момент инерции двигателя

Момент инерции, J кг·м ²	Передаточное число относительно 1 позиции, i	Приведённый момент инерции к позиции 1, J кг·м ²
0,0260	9,067	0,00031628

Полный момент инерции относительно позиции 1: $J=0,01831679$ кг·м².

Динамический момент возникает при изменении скорости механизма и может быть найден с помощью формулы:

$$M_d = J \cdot \varepsilon, \quad (6)$$

где $J=0,01831679$ – полный момент инерции, кг·м²;

$\varepsilon=267,56$ – угловая скорость турбины, рад/с.

$$M_d = 0,01831679 \cdot 267,56 = 4,9 \text{ Н·м}$$

На рисунке 14 представлен график динамического момента турбины.

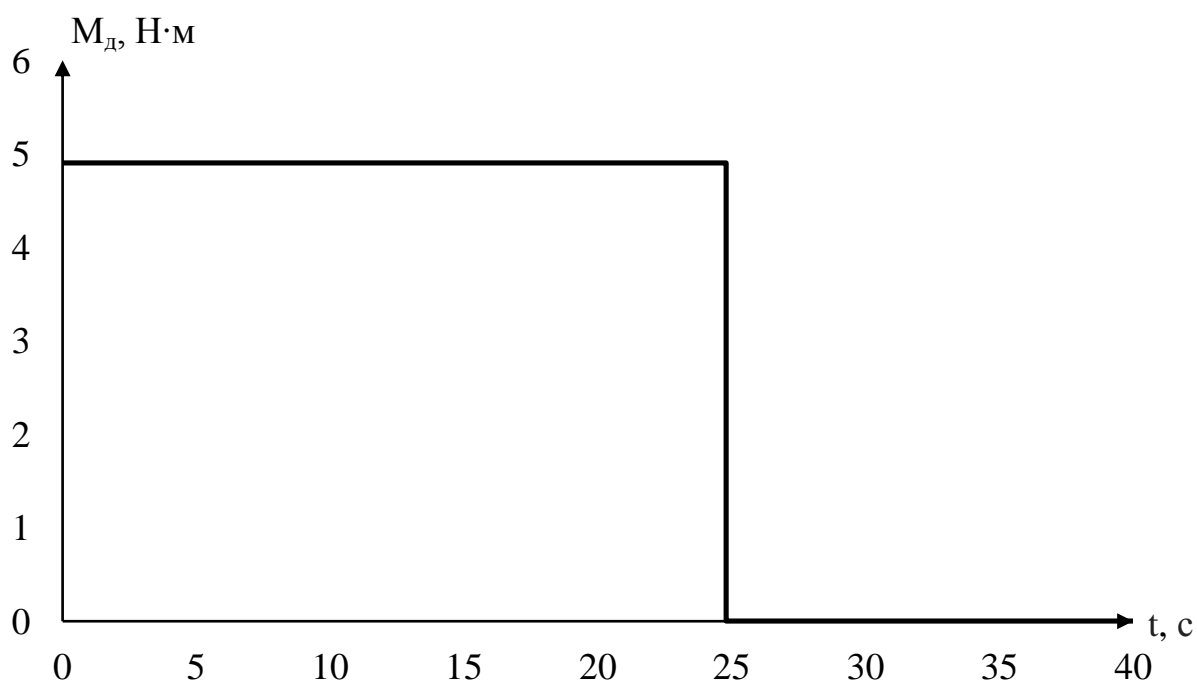


Рисунок 14 – Динамический момент турбины

На рисунке 15 представлен график полного момента турбины.

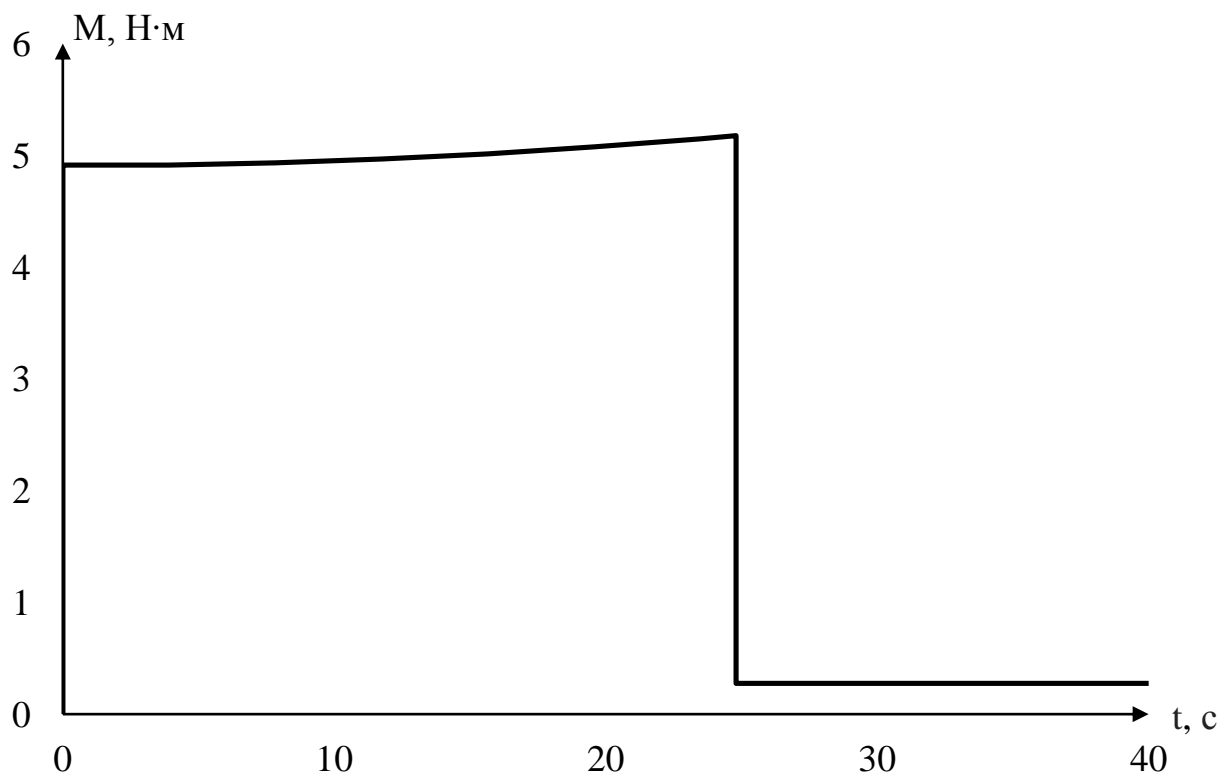


Рисунок 15 – Полный момент турбины

Для построения нагрузочной диаграммы для двигателя нужно вычесть момент создаваемый турбиной при сгорании топлива из полного момент вращения турбины.

Зависимость раскручивающего момента турбины от сгорания топлива представлена в таблицы 5.

Таблица 5 – Момент турбины

t, с	0	3,9	7,8	11,7	15,6	19,6	23,5	24,8
M _т , Н·м	0	0,131	1,214	3,114	5,136	5,172	5,208	5,244

На рисунке 16 представлен график момента турбины развиваемого от сгораемого топлива.

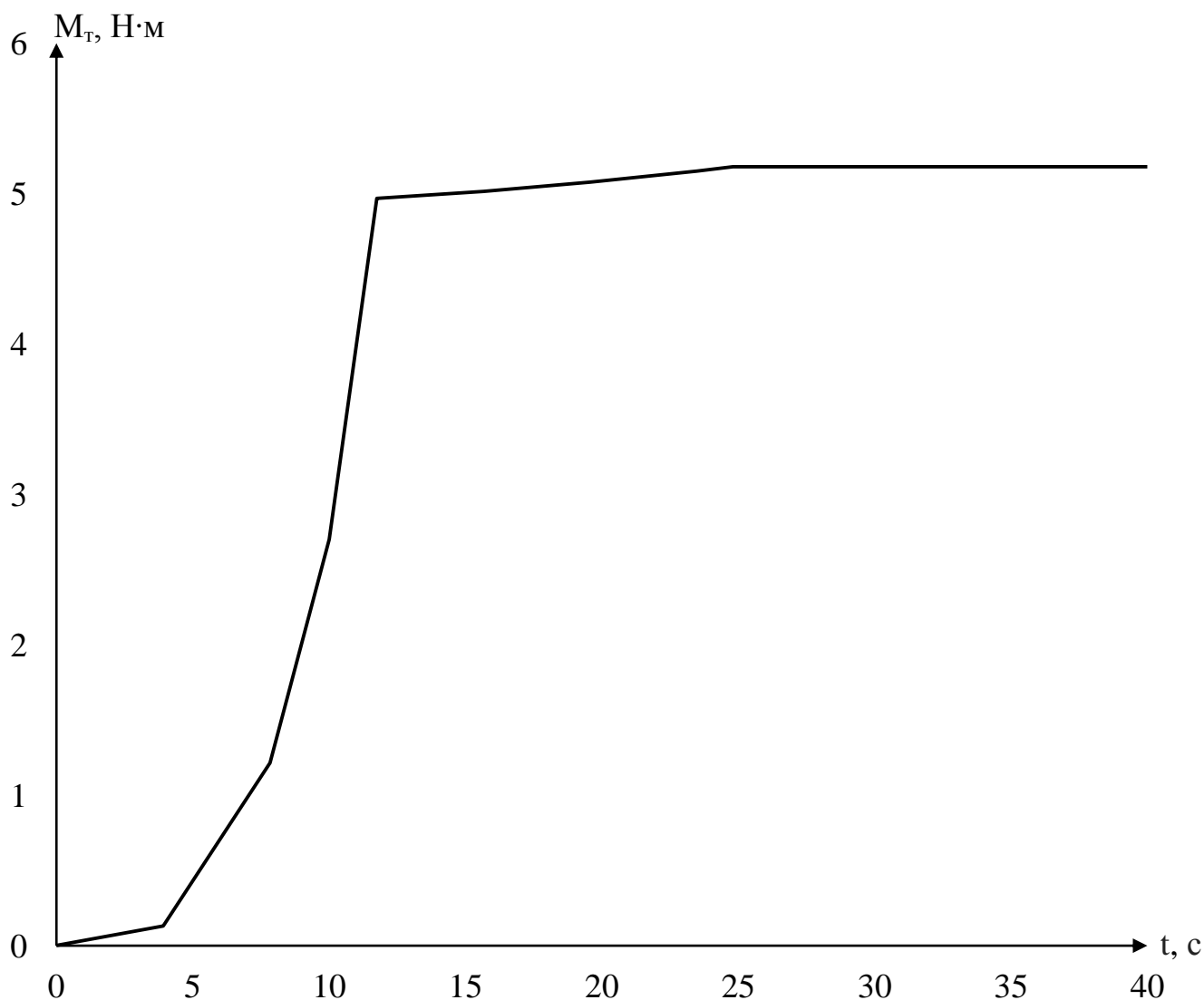


Рисунок 16 – Момент турбины

Момент двигателя можно найти по следующей формуле:

$$M_{\text{дв}} = (M - M_T) \cdot i / \eta, \quad (7)$$

где M – полный момент турбины, Н·м;

M_T – момент турбины, Н·м;

$i=9,067$ – передаточное число;

$\eta=0,9$ – КПД редуктора;

$M_{\text{дв}}$ – момент двигателя, Н·м.

В таблице 6 представлен результат момента двигателя.

Таблица 6 – Момент двигателя

t, c	0	3,9	7,8	11,7
$M_{дв}, Н·м$	0	48,176	37,471	18,662

Момент двигателя представлен на рисунке 17.

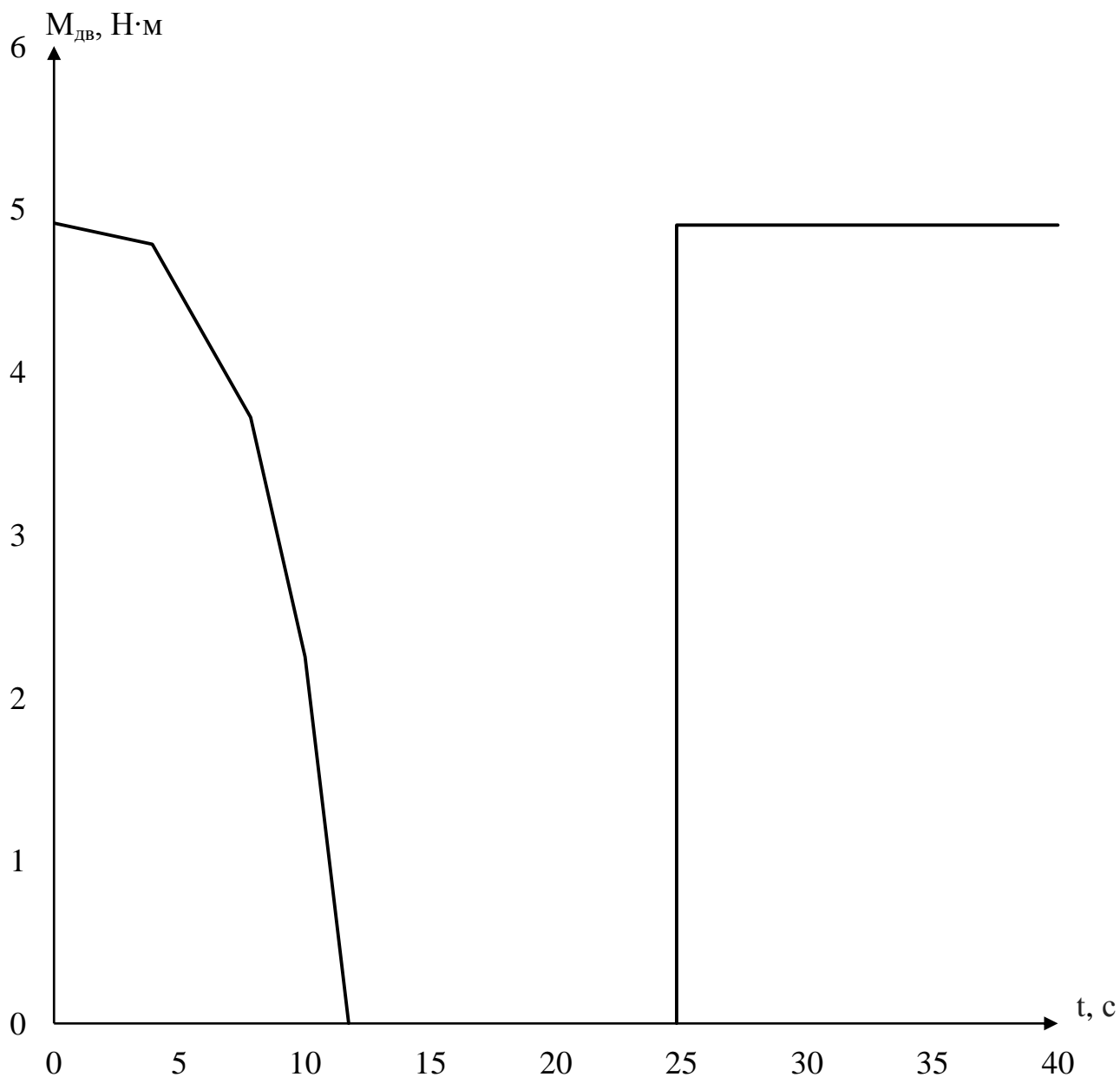


Рисунок 17 – Момент двигателя

На рисунке 18 представлены статический, динамический и полный моменты, а так же скорость вращения турбины в масштабе.

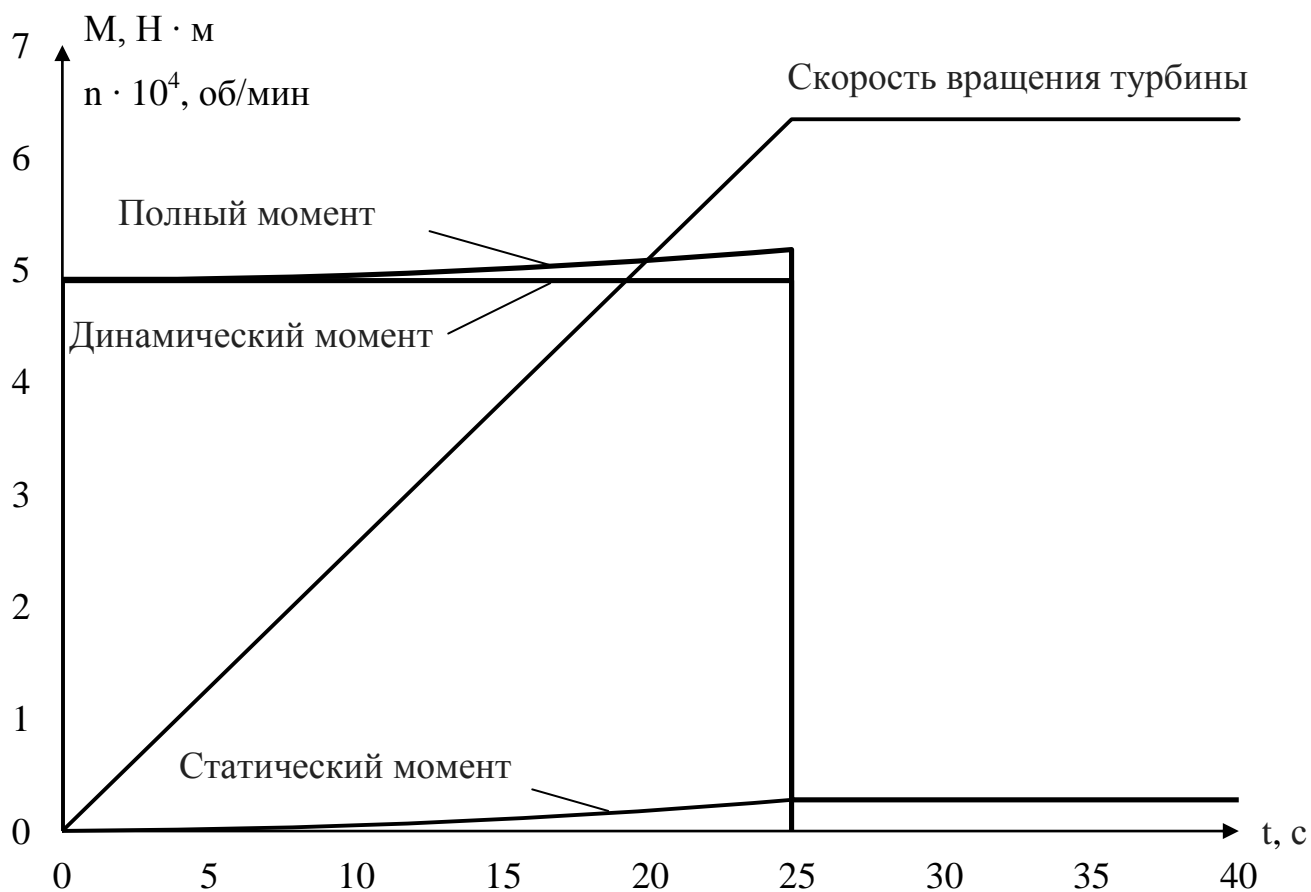


Рисунок 18 – Статический, динамический, полный моменты и скорость вращения турбины

На рисунке 19 представлены моменты электродвигателя, турбины и полный.

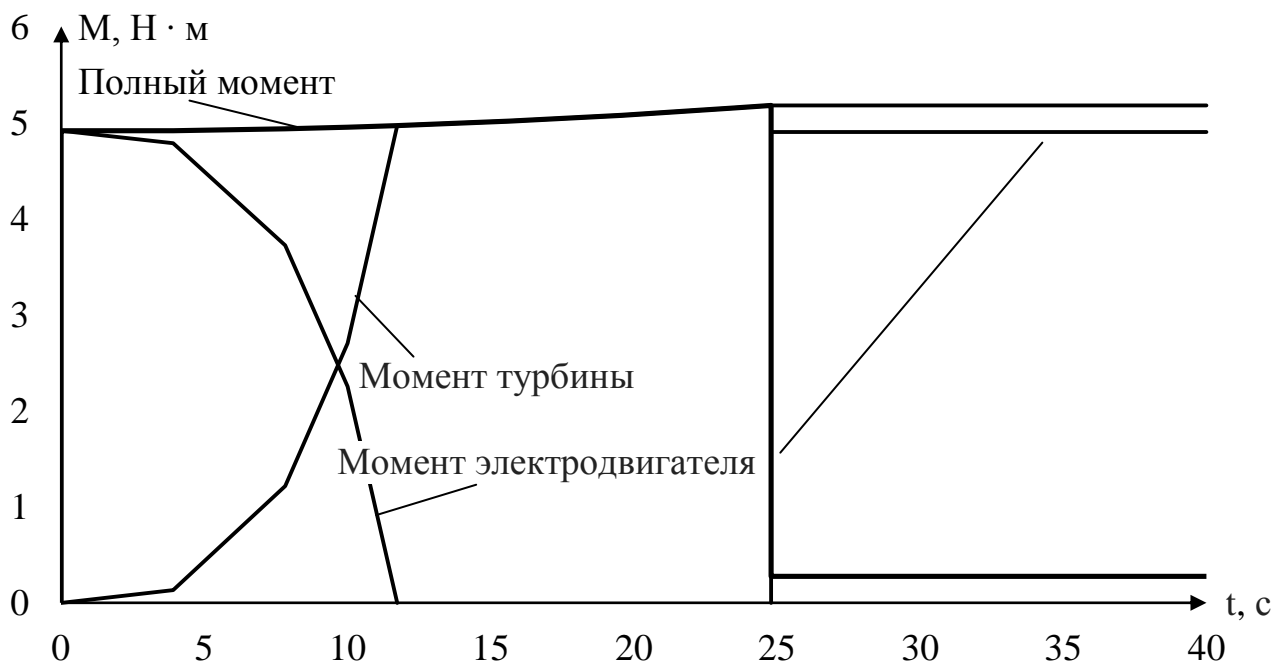


Рисунок 19 – Момент электродвигателя, турбины и полный

1.5 Выбор системы привода

Мощность двигателя можно найти по формуле:

$$P = M_{\text{дср}} \cdot \omega_{\text{ср}} / i, \quad (8)$$

где P – мощность двигателя, Вт;

$M_{\text{дср}} = 34,77$ – момент двигателя, Н·м;

$\omega_{\text{ср}} = 2094,4$, рад/с – угловая скорость турбины, рад/с;

$i = 9,067$ – передаточное число.

$$P = 34,77 \cdot 2094,4 / 9,067 = 8031,8 \text{ Вт.}$$

Заданным требованиям соответствует регулируемый электропривод стартер-генератором ГС-18МО (двигатель постоянного тока). Мощность данного двигателя 18кВт. Нагрузочная способность этого двигателя равна $M_{\text{д}}=50$ Н·м.

Проверим двигатель на перегрев методом эквивалентного момента. Для обеспечения необходимого запаса должно выполняться следующее неравенство:

$$M_{\text{э}} < (0,75..0,8) \cdot M_{\text{д}}, \quad (9)$$

Момент эквивалентный может быть найден по следующей формуле:

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_k M_k^2 \cdot t_k}{\sum_k t_k}}, \quad (10)$$

Подставим в формулу (10) все найденные значения моментов двигателя при разгоне.

$$M_3 = \sqrt{\frac{48,176^2 \cdot 3,9 + 37,471^2 \cdot 3,9 + 18,662^2 \cdot 3,9}{3 \cdot 3,9}} = 36,85 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Подставляя найденное значение эквивалентного момента в неравенство (9), получим:

$$36,85 < 0,8 \cdot 50 = 40$$

Неравенство выполняется, следовательно, двигатель проходит проверку на перегрев.

Также произведем проверку двигателя по перегрузочной способности:

$$M_{\max} < \lambda_m \cdot M_{\text{ном}}, \quad (11)$$

$$118 < 125$$

Неравенство выполняется, значит двигатель был выбран правильно.

1.6 Выбор основного силового оборудования

Был выбран блок запуска и регулирования БЗР5. На рисунке 20 транзисторное управление регулирует скорость вращения двигателя. Скорость вращения вала двигателя будет регулироваться посредством изменения магнитного потока создаваемые обмотками возбуждения, за счёт изменения тока подаваемого на обмотку возбуждения.

На рисунке 18, G – якорная обмотка возбуждения двигателя ГС-18МО. Ш – шунтовая обмотка возбуждения. VT – транзисторные ключи. R – добавочного сопротивления 0,12 Ом используется при пуске СТГ. KM1- KM5 – контакторы замыкающие цепь. RS – шунт. GB – аккумуляторные батареи.

ВИ – внешний источник. FU – плавкие предохранители. Q – выключатель предназначенный для подключения аккумуляторных батарей.

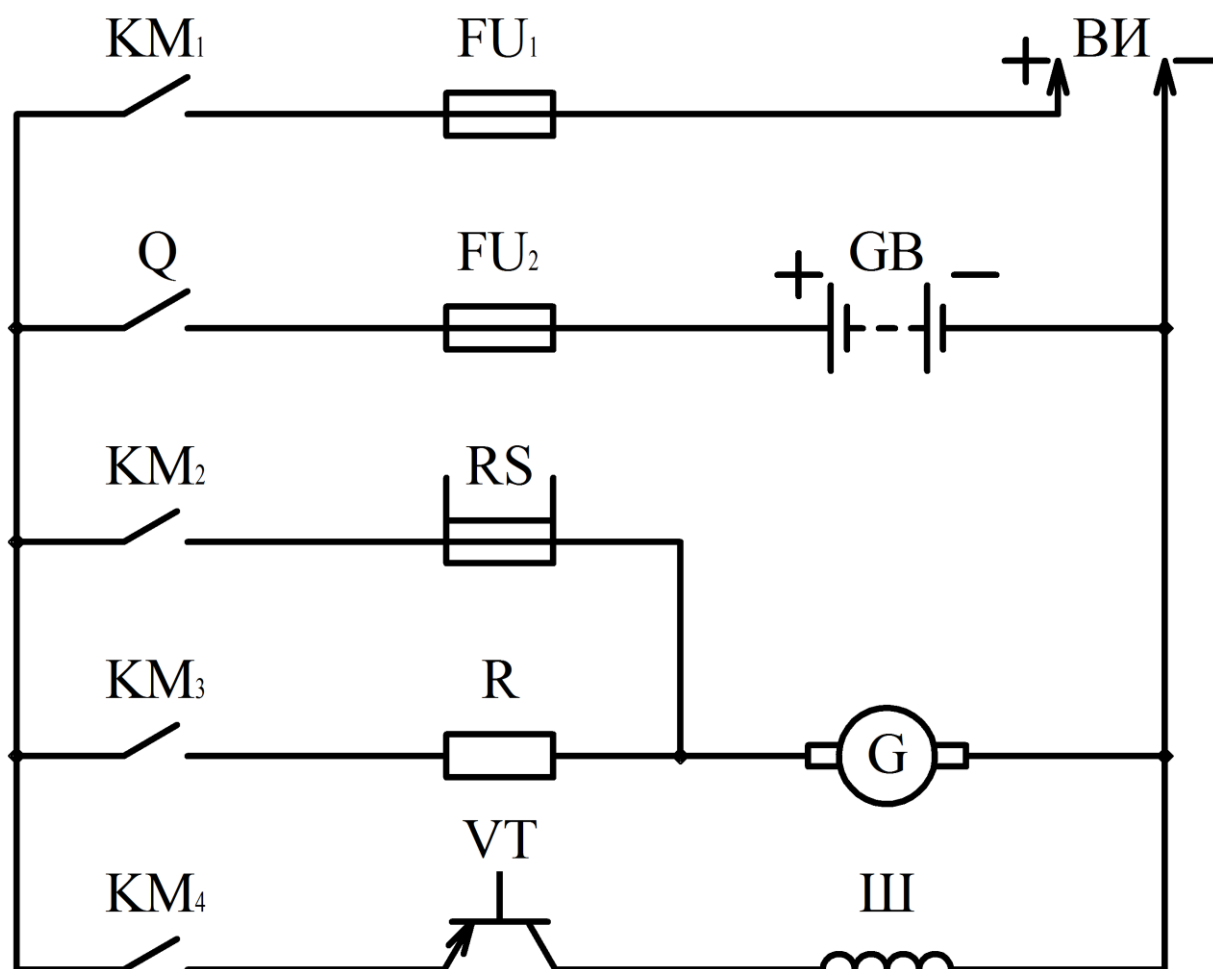


Рисунок 20 – Схема подключение СТГ

1.7 Защиты привода. Расчёт установок защитных устройств

В случаях возникновения в электрической цепи газотурбинного энергоагрегата токов короткого замыкания аппараты защиты должны оборвать цепь. Для обеспечения своевременного обрыва цепи установим в цепь газотурбинного энергоагрегата предохранитель.

Предохранитель должен обеспечивать защиту от превышения тока, потребляемого от аккумуляторов в стартерном режиме. Предохранитель подключается в цепь с постоянным напряжением 27 В, ток срабатывания предохранителя составляет 600 А.

2 РАЗРАБОТКА САУ

2.1 Разработка архитектуры системы автоматизации

На рисунке 21 представлена архитектура системы автоматизации. Контроллер обрабатывает получаемые сигналы от датчиков и контролирует подачу топлива с помощью клапана. В момент запуска контроллер управляет двигателем, который раскручивает турбину и в дальнейшем переводит его в генераторный режим.

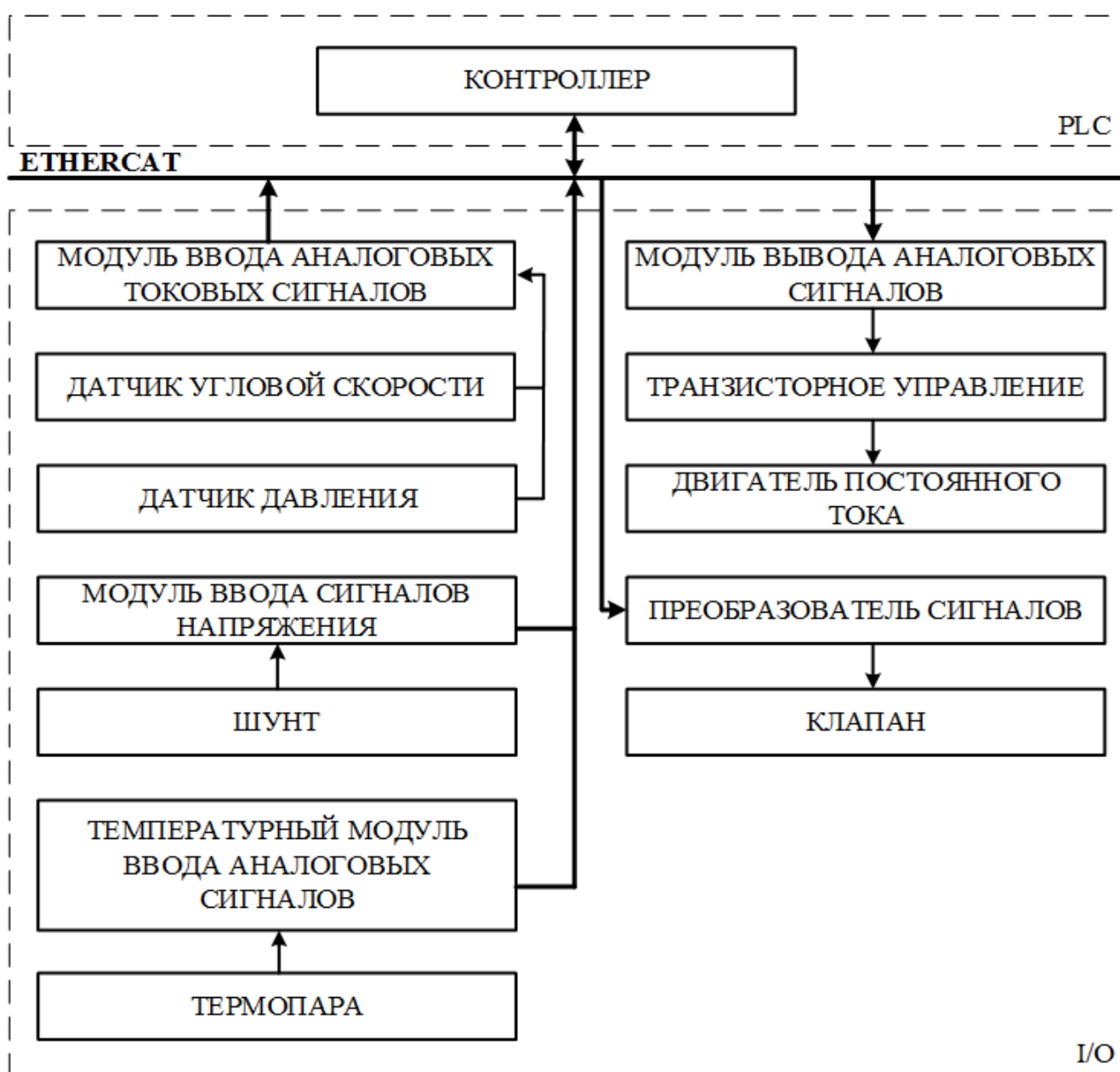


Рисунок 21 – Архитектура системы автоматизации

2.2 Выбор контроллера и датчиков технологических координат

В качестве программируемого логического контроллера используется BERGHOF EC1000. Он предназначен для построения относительно простых систем управления с высокими требованиями к скорости обработки информации и малым временам реакции.

Вместе с ним используются модули входных сигналов, такие как AI8-I и AI4-THERMO и выходных сигналов AO4-U/I для преобразования цифровых сигналов в аналоговые и аналоговых в цифровые.

Серия EC1000 – модульный контроллер. Отличительной особенностью данного контроллера является возможность подключения модулей расширения линейки Berghof E-I/O непосредственно к контроллеру без использования модуля-каплера.

Внешний вид BERGHOF EC1000 представлен на рисунке 22.



Рисунок 22 – BERGHOF EC1000

Технические характеристики данного контроллера представлены в таблице 7.

Таблица 7 — Технические характеристики контроллера

Напряжение питания	24 В (-20% / +25%)
Потребляемая мощность контроллера	7,2 Вт
Максимальная потребляемая мощность при подключении модулей	60 Вт
Среда программирования	CODESYS v3.5
Процессор	Freescale PowerPC, 400 МГц
Память для программы (Flash)	64 Мб
Память доступная пользователю (Flash)	40 Мб
Оперативная память (RAM)	128 Мб
Оперативная память доступная для программы (RAM)	90 Мб
Энергонезависимая память (Retain)	24 Кб
Коммуникационные порты	
1×Ethernet	10/100 Мбит/с, разъем RJ45
1×EtherCAT	правосторонняя шина (10 пин)
1×CAN	1 МБит/с, подключение через клеммник
1×RS-232	трехпроводное подключение через клеммник

Продолжение таблицы 7

1×SD-Card	максимальный объем SD-карты памяти 1 Гб
1×USB	USB-Host v1.1
1×Левосторонняя шина	подключение коммуникационных модулей расширения (RS-232, RS-485, Ethernet, CAN)
Максимальное количество модулей расширения по шине EtherCAT	10 (без использования модулей BUSKOPPLER и EXTENDER)
Дискретный вход	1×PNP, =24 В (-20% / +25%)
Рабочий диапазон температур	0...55 °С
Температура хранения и транспортировки	-20...70 °С
Относительная влажность	До 85%, без конденсации
Степень защиты	IP20
Габаритные размеры (Ш×В×Г)	25×120×90 мм
Вес	около 150 гр

Серия Е-I/O – модули расширения с фиксированным набором входных и выходных элементов. В зависимости от модификации модули могут содержать аналоговые или дискретные входные или выходные элементы.

Внешний вид модуля Е-I/O представлен на рисунке 23.

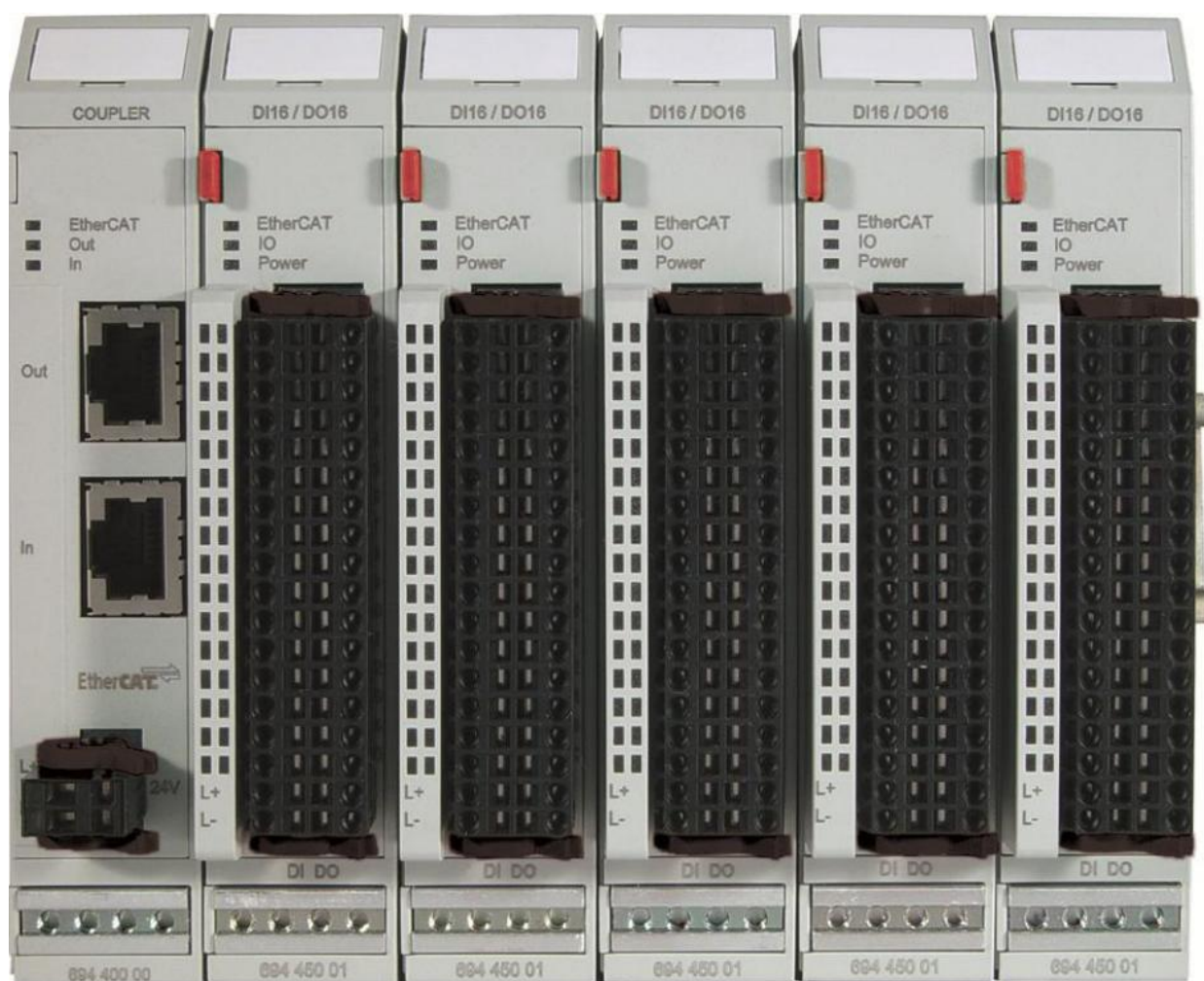


Рисунок 23 – Модули E-I/O

Технические характеристики данного модуля представлены в таблице 8.

Таблица 8 — Технические характеристики модуля

Модель	E-I/O AI8-I
Подключение к контроллеру	По внутренней шине EtherCAT
Напряжение питания	24 В (-20 / +25 %)
Потребляемая мощность	3,84 Вт
Габаритные размеры (Ш×В×Г)	25×120×90 мм

Продолжение таблицы 8

Количество аналоговых входов	8
Поддерживаемые датчики	ток 0...20 мА / 4...20 мА
Разрешение АЦП	12 бит (5,2 мкА)
Максимальная нагрузка	75 Ом
Время опроса одного входа	0,4 мс
Время опроса всех входов	1,32 мс

На рисунке 24 представлена фотография силовая часть электросхемы и блок управления газотурбинного энергоагрегата.



Рисунок 24 – Силовая часть электросхемы и блок управления

В газотурбинном энергоагрегате АПН 18 установлены:

- 1) датчик индуктивности;
- 2) датчик давления топлива;
- 3) датчик давления воздуха на выходе компрессора;
- 4) шунт.

– Используются аналоговые 2-х проводные датчики с токовым выходом 4–20 мА. Стандарт «4–20 мА» имеет следующие преимущества перед другими способами подключения датчиков:

- Допустимая длина линии связи датчик–регистратор до 500 м;
- Экономия за счет использования 2-х жильного кабеля вместо 3-х жильного;
- Высокая помехоустойчивость, вследствие этого для большинства применений возможно использование неэкранированного кабеля;
- Автоматическая диагностика состояния «Обрыв линии связи» и «Неисправность датчика» – по отсутствию тока в цепи датчика.

Для подключения датчика с выходом 4–20мА к контроллеру в разрыв общего провода его цепи питания необходимо включить сопротивление нагрузки. Измерительное напряжение, выделяемое относительно общей точки на сопротивлении нагрузки будет являться входным напряжением для контроллера. Выбор величины сопротивления нагрузки определяется входным диапазоном применяемого контроллера, напряжением блока питания и допустимым минимальным напряжением на клеммах датчика.

Величина напряжения блока питания и величина сопротивления нагрузки связаны следующим соотношением:

$$U_{\text{пит}} \geq 9\text{В} + 0,02\text{А} \cdot R_{\text{н}} + 0,02\text{А} \cdot R_{\text{л}}, \quad (12)$$

где $U_{\text{пит}}$ – напряжение блока питания, В;

$R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки, с которого снимается напряжение, Ом;

$R_{\text{л}}$ – сопротивление соединительных проводов датчик-контроллер, Ом;

В качестве индуктивного датчика скорости используется – ST420-LT представленный на рисунке 25.

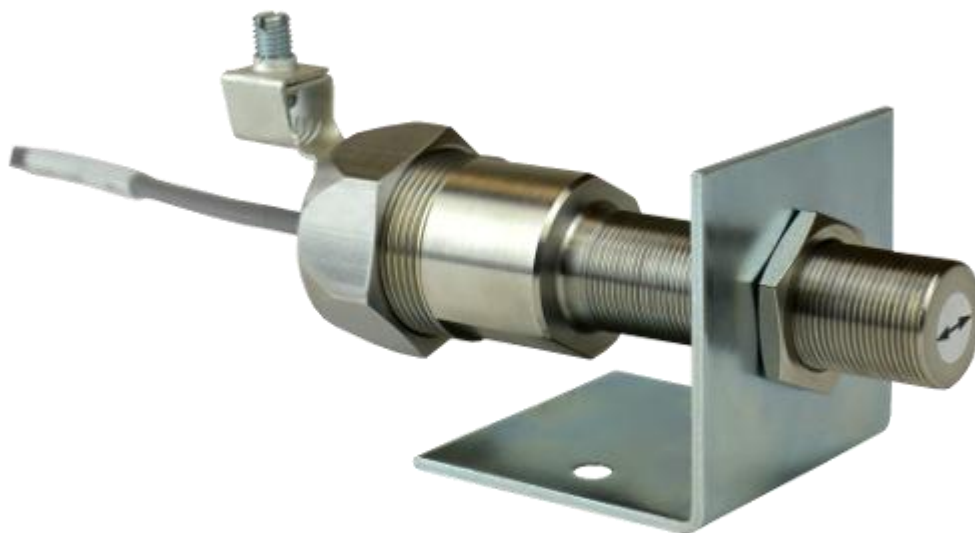


Рисунок 25 – ST420-LT

Датчик скорости вращения состоит из барабана, который находится на валу, и индуктивного датчика. Через редуктор скорость вращения с турбины понижается и приводит в движение вал с барабаном. Барабан состоит из 6 магнитных меток, когда одна из меток проходит рядом с индуктивным датчиком, то магнитное поле начинает изменяться и возникает ток в цепи. Количество импульсов тока, соответствует количеству пройденных меток за определенный интервал времени, пропорционально частоте вращения барабана. На рисунке 26 представлена тахограмма частоты вращения (Гц) определяемая индуктивным датчиком.

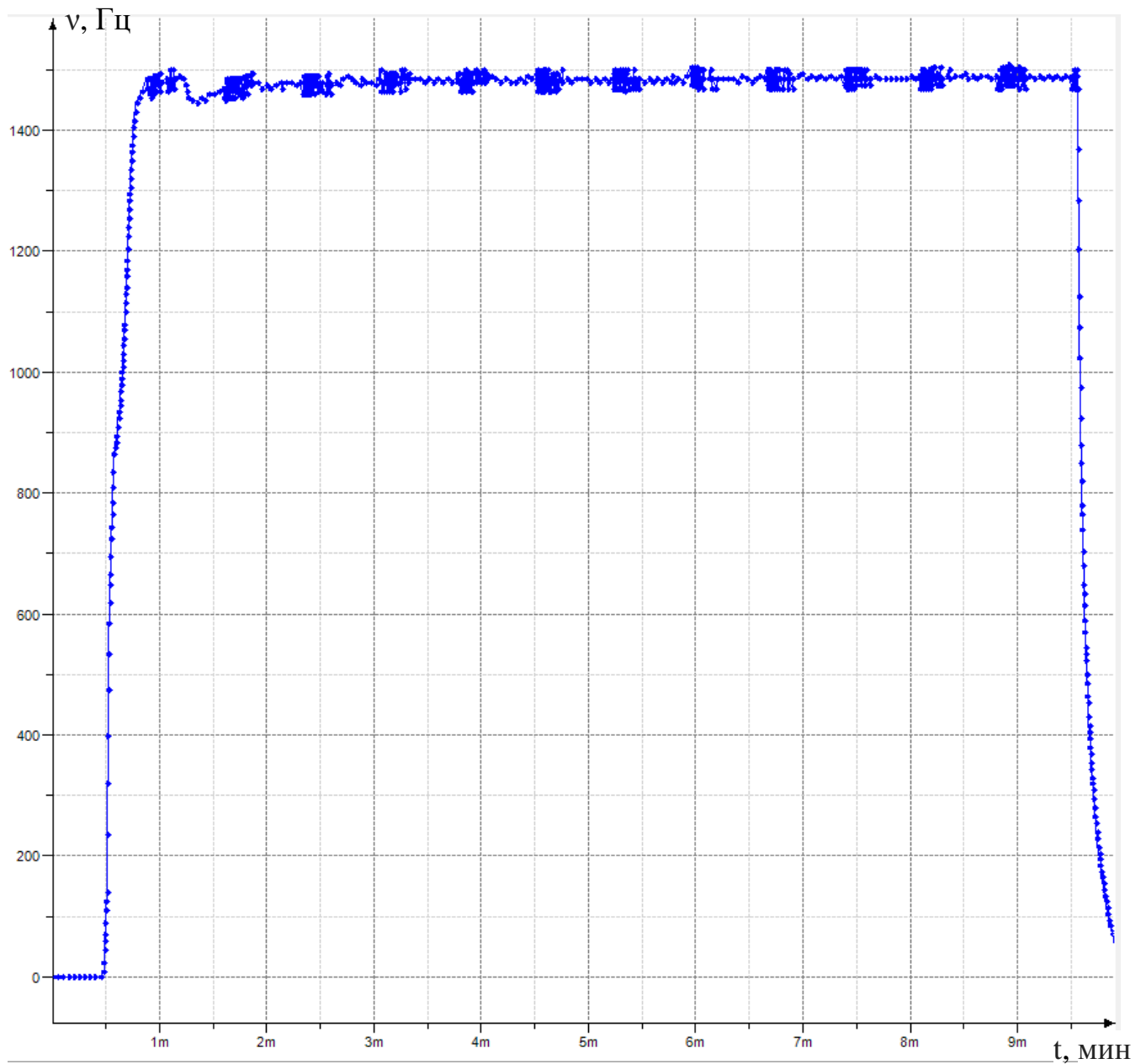


Рисунок 26 – Частота вращения измеренная датчиком

Для нахождения частоты вращения турбины нужно частоту вращения разделить на количество меток и передаточное число.

$$\nu_T = \nu / (n \cdot i_2), \quad (13)$$

где $n=6$ – число меток;

ν_T – частота вращения турбины;

ν – частота датчика;

i_2 – передаточное отношение турбины и барабана.

Скорость вращения турбины представлена на рисунке 27.

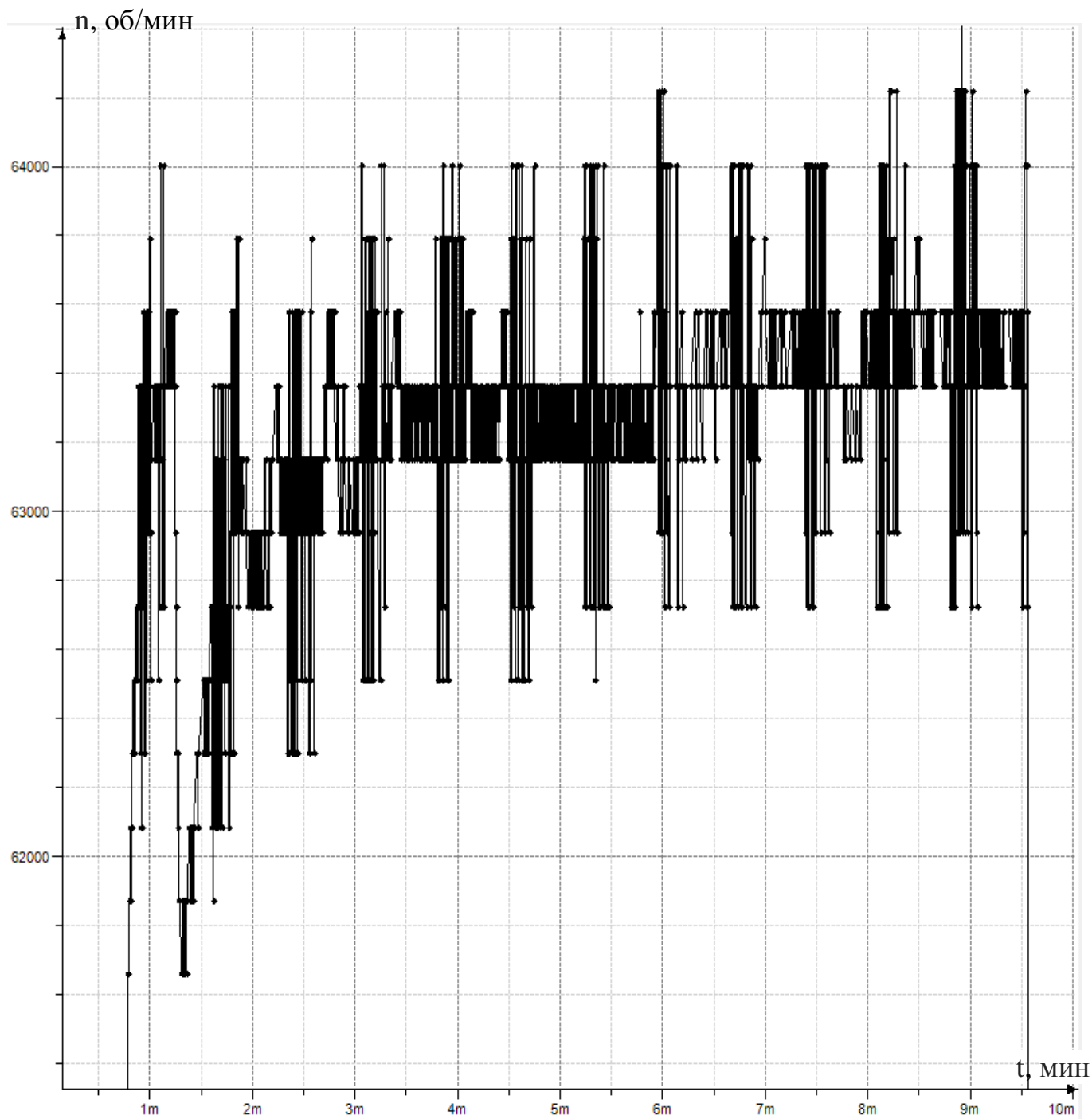


Рисунок 27 – Скорость вращения турбины

Датчик давления – ПД-100 на рисунке 28, производит измерение давления топлива перед клапаном.



Рисунок 28 – Датчик давления ПД-100

Для измерения потребляемой мощности потребителем используется шунт на 600 А представленный на рисунке 29. В момент запуска пусковой ток не должен превышать 600 А.

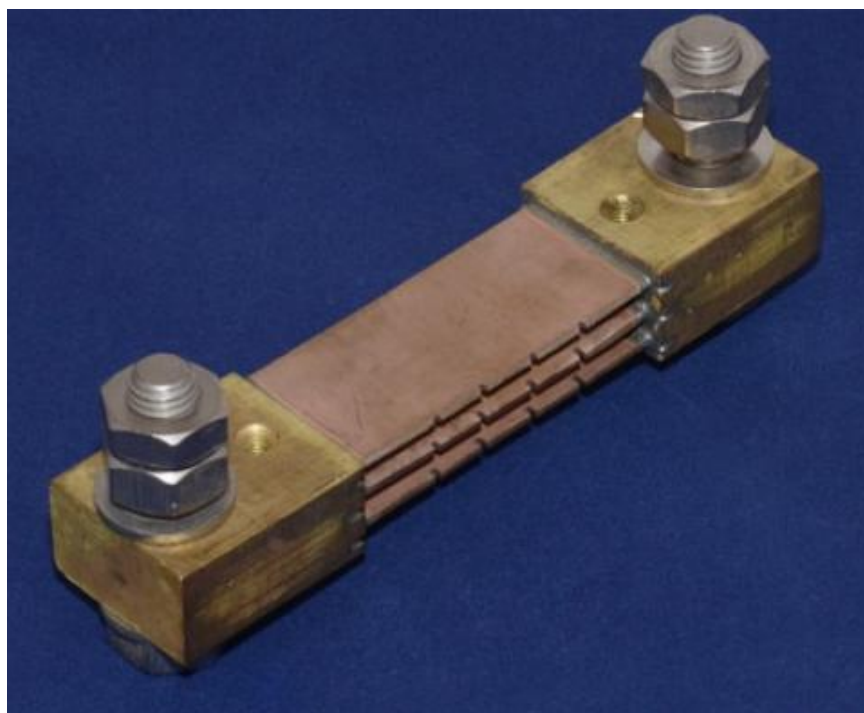


Рисунок 29 – Шунт на 600 А

2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР привода проектируемого агрегата

Система регулирования ГТД содержит два канала управления: канал управления по частоте вращения ротора и канал ограничения температуры газа, алгебраический селектор минимума и исполнительное устройство. Система управления служит для повышения динамической точности регулирования при селективном устранении выброса температуры, скачков по температуре и зоны совместной работы каналов.

САР ГТД содержит последовательно соединенные измеритель частоты вращения ротора, первый элемент сравнения и алгебраический селектор минимума, последовательно соединенные корректирующее звено канала частоты вращения ротора и суммирующее устройство, последовательно соединенные разностное корректирующее звено и ключ, причем выход ключа соединен со вторым входом суммирующего устройства, последовательно соединенные газотурбинный двигатель, измеритель температуры газа, второй элемент сравнения, компаратор, дифференциатор и запоминающее устройство, причем второй выход газотурбинного двигателя соединен с измерителем частоты вращения ротора, выход второго элемента сравнения соединен со вторым входом алгебраического селектора минимума, второй вход компаратора подключен к выходу первого элемента сравнения, а выход соединен со вторым входом ключа, выход разностного корректирующего звена соединен со вторым входом запоминающего устройства, выход запоминающего устройства подключен к третьему входу суммирующего устройства, ко второму входу первого элемента сравнения подключен задатчик частоты вращения ротора, а ко второму входу второго элемента сравнения подключен задатчик температуры газа.

На рисунке 30 представлена система автоматического регулирования частоты вращения газотурбинного двигателя (ГТД) включает в себя ГТД как объект регулирования, измерительное устройство (ИУ) в цепи отрицательной обратной связи, элемент сравнения (ЭС), усилитель (У) и дозирующий орган (ДО).

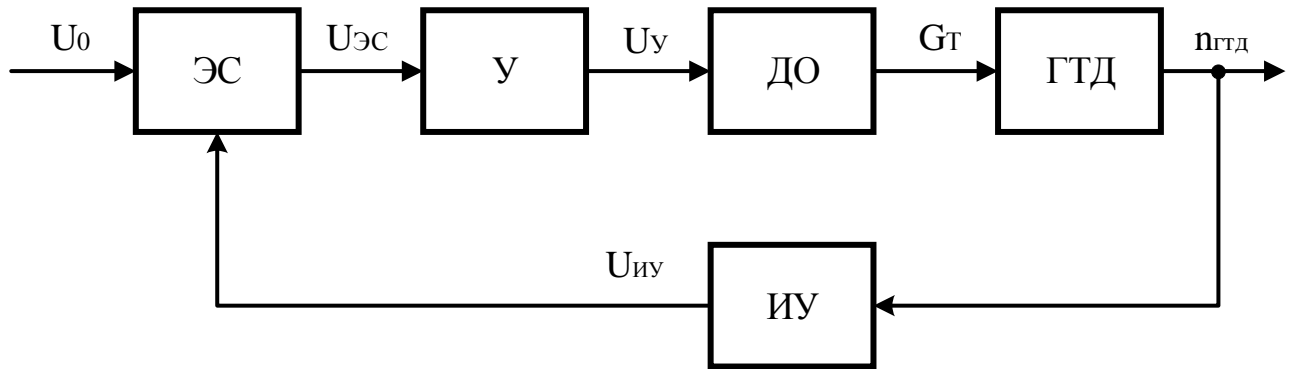


Рисунок 30 – Функциональная схема системы

Система описывается следующими уравнениями:

– элемент сравнения

$$U_{эс} = U_0 - U_{иу}, \quad (14)$$

– усилитель

$$U_y = K_y \cdot U_{эс}, \quad (15)$$

– дозирующий орган

$$dG_T / dt = K_{до} \cdot U_y, \quad (16)$$

– газотурбинный двигатель

$$T_2^2 \cdot d^2 n_{ГТД} / dt^2 + T_1 \cdot dn_{ГТД} / dt + n_{ГТД} = K_{ГТД} (t_1 \cdot dG_T / dt + G_T), \quad (17)$$

– измерительное устройство

$$T_{иу} \cdot dU_{иу} / dt + U_{иу} = K_{иу} \cdot n_{ГТД}, \quad (18)$$

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

В качестве управляющих воздействий используется расход топлива в камере сгорания Q_t . Изменяя расход, можно воздействовать на частоту вращения.

Произведём расчёт передаточной функции турбины.

$$W_{\text{трд}} = K_{\text{трд}} / (T_{\text{трд}} \cdot p + 1), \quad (19)$$

где $K_{\text{трд}}$ – коэффициент турбо-реактивного двигателя.

Коэффициент турбо-реактивного двигателя находится как отношением скорости вращения к расходу топлива.

$$K_{\text{трд}} = n / Q, \quad (20)$$

где n – скорость вращения турбины, об/мин;

Q – объёмный расход топлива, м³/с.

$$K_{\text{трд}} = 63365 / 0,1675 = 378298,5.$$

Постоянная времени турбо-реактивного двигателя $T_{\text{трд}} = 0,912$ сек.

$$W_{\text{трд}} = 378298,5 / (0,912 \cdot p + 1).$$

Произведём расчёт пропорционального клапана. Клапан описывается апериодическим звеном.

$$W_{\text{трд}} = K_{\text{кл}} / (T_{\text{кл}} \cdot p + 1), \quad (21)$$

где $K_{\text{кл}}$ – коэффициент пропорционального клапана;

$T_{\text{кл}}$ – постоянная времени клапана.

Найдём коэффициент клапана.

$$K_{\text{кл}} = Q / U_{\text{зс}}, \quad (22)$$

где Q – объёмный расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$.

$U_{\text{зс}}$ – напряжение сигнала задания на скорость, В.

$$K_{\text{кл}} = 0,025 / 10 = 0,0025.$$

Постоянная времени клапана определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{кл}} = t_{\text{рег}} / 4, \quad (23)$$

где $t_{\text{рег}}$ – время регулирования клапана, с.

$$T_{\text{кл}} = 0,5 / 4 = 0,125.$$

$$W_{\text{трд}} = 0,0025 / (0,125 \cdot p + 1).$$

Настроим регулятор скорости на модульный оптимум.

Для этого преобразуем нашу схему.

$$W = (T_{\text{кл}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{трд}} \cdot p + 1) / (K_{\text{кл}} \cdot K_{\text{трд}} \cdot K_{\text{ос}}). \quad (24)$$

Нам неизвестен коэффициент обратной связи $K_{\text{ос}}$ найдём его по следующей формуле:

$$K_{\text{ос}} = U / n. \quad (25)$$

$$K_{\text{ос}} = 10 / 63365 = 1,58 \cdot 10^{-4}.$$

Регулятор скорости будет выглядеть следующим образом:

$$W_{\text{рег}} = (T_{\text{кл}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{трд}} \cdot p + 1) / (K_{\text{кл}} \cdot K_{\text{трд}} \cdot K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\text{кл}} \cdot p \cdot (T_{\text{кл}} \cdot p + 1)). \quad (26)$$

После упрощения регулятор скорости примет вид:

$$W_{\text{рег}} = (T_{\text{трд}} \cdot p + 1) / (K_{\text{кл}} \cdot K_{\text{трд}} \cdot K_{\text{ос}} \cdot 2 \cdot T_{\text{кл}} \cdot p). \quad (27)$$

Подставим численные значения в формулу регулятора скорости:

$$W_{\text{рег}} = (0,912 \cdot p + 1) / (0,0025 \cdot 378298,5 \cdot 1,58 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 0,125 \cdot p)$$

После преобразования регулятор скорости примет вид:

$$W_{\text{рег}} = 3,648 + 0,25 \cdot 1 / p.$$

2.5 Разработка структурной схемы САУ и моделирование типовых режимов работы привода

Структурная схема регулятора скорости газотурбинного энергоагрегата представлена на рисунке 31.

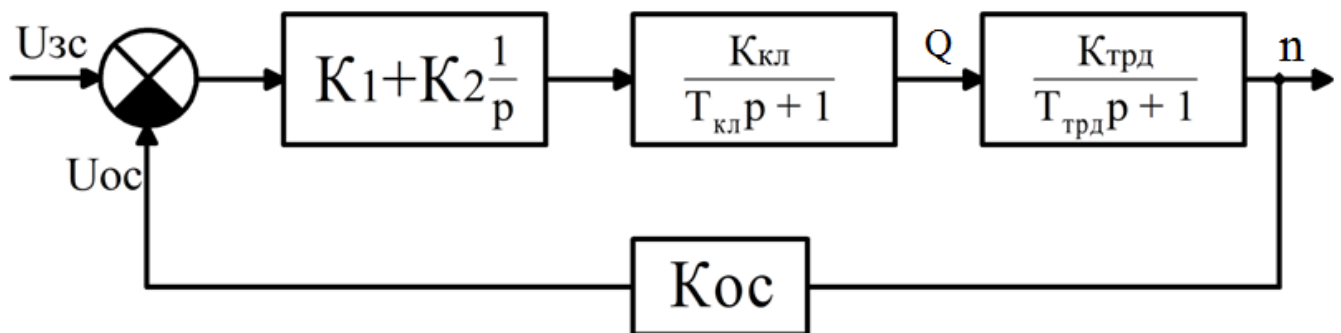


Рисунок 31 – Структурная схема регулятора скорости

Соберём математическую модель в матлабе представленную на рисунке 32.

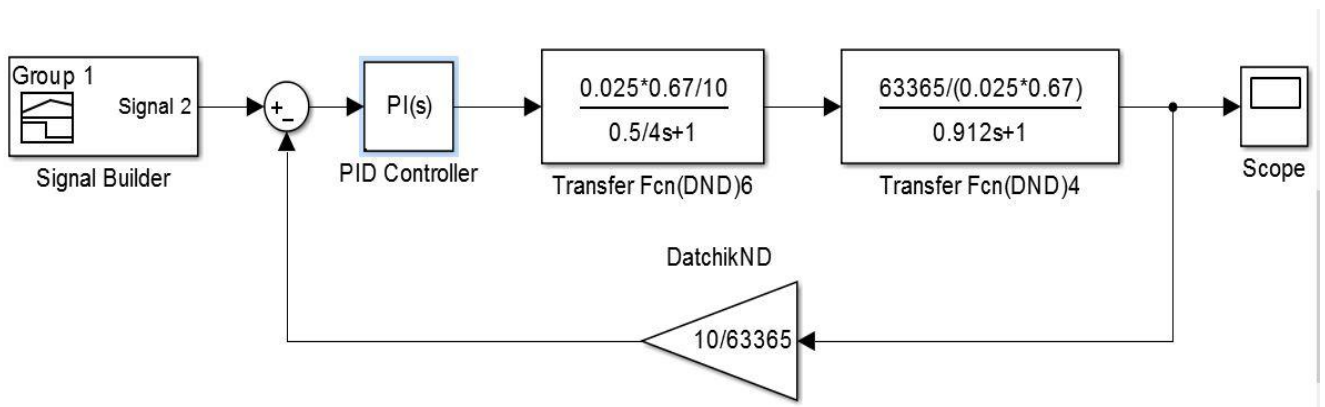


Рисунок 32 – Математическая модель в матлабе

Результат моделирования представлен на рисунке 33.

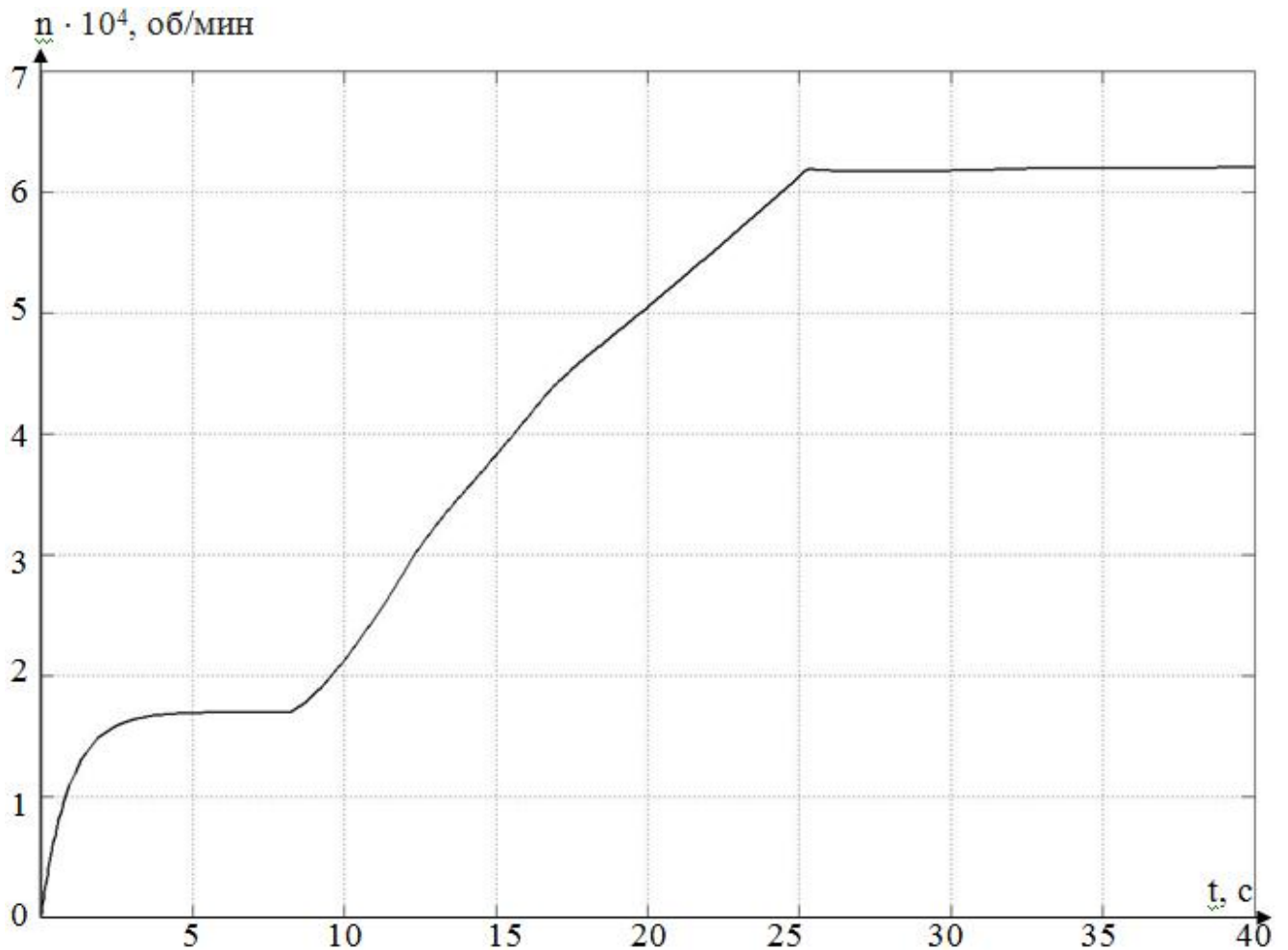


Рисунок 33 – Результат моделирования в матлабе

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ

3.1 Характеристика конструкторского бюро и выпускаемой продукции

История создания ОАО СКБ «Турбина» берет начало в 1962 г., когда с целью создания аналогов авиационных газотурбинных двигателей для наземного транспорта на Челябинском Тракторном Заводе был создан новый конструкторский отдел «б». Была создана производственно-экспериментальная база, что позволило еще на Челябинском Тракторном Заводе произвести работы по созданию первых изделий.

В 1970 г. отдел «б» Челябинского Тракторного Завода объединился с Челябинским филиалом московского института ВНИИ транспортного машиностроения Миноборонпрома и по постановлению ЦК КПСС и СМ СССР от 12.05.1970г. №326-113 было создано специальное конструкторское бюро «Турбина».

Первыми разработками СКБ являлись транспортные газотурбинные двигатели с теплообменником, газотурбинный двигатель ГТД-400 и газотурбинный двигатель ГТД-700.

С 1970 по 1985 г.г. было подано 349 заявок на изобретения, получено 173 авторских свидетельств. В 1980 г. к 20-летнему юбилею ОАО СКБ «Турбина» был основан музей предприятия, в котором каждый из сотрудников может ознакомиться с историей развития предприятия и образцами продукции. Ключевыми моментами в истории развития предприятия стали 1989г. – создание ГТА-18А и 1984 г. – создание АП-18Д. Их серийный выпуск был начат в 1989 г. Агрегаты по настоящее время надежно эксплуатируются как в РФ, так и за её пределами. Другим ключевым моментом в истории предприятия стала работа по созданию агрегатов питания и кондиционирования АПК-40Т и АПК-40-ТМ. На ОАО СКБ «Турбина» постоянно ведется работа по направлениям ТКР. За время существования предприятия было разработано около 25 видов ТКР различных типов и размеров, из них доведены до серийного производства 4 вида.

Основная продукция АО СКБ «Турбина» – газотурбинные энергоагрегаты – относятся к высоко сложным изделиям, конструкция агрегата предъявляет производству повышенные требования.

Газовая турбина — это лопаточная машина, в ступенях которой энергия сжатого и/или нагретого газа преобразуется в механическую работу на валу. Основными элементами конструкции являются ротор (рабочие лопатки, закреплённые на дисках) и статор, именуемый сопловым аппаратом (направляющие лопатки, закреплённые в корпусе).

3.2 Расчёт производственной программы

Исходя из технологических требований, газотурбинный энергоагрегат должен работать круглосуточно в автоматическом режиме, не исключая праздничные и выходные дни.

Годовой объем производства электроэнергии определяется производительностью рассматриваемой системы в единицу рабочего времени и фондом времени работы:

$$W_{\Gamma} = P \cdot T_{\Phi}, \quad (28)$$

где W_{Γ} – годовой объем производства электроэнергии, кВт/год;

P – производительность энергоагрегата, кВт/час;

T_{Φ} – фактический годовой фонд времени работы энергоагрегата, часы.

Из формулы видно, что для расчета производственной программы цеха необходимо знать фактическое время работы агрегата за год. Методика этих расчетов приведена ниже.

$$T_{\Phi} = T_{\text{кал}} - T_{\text{п.р.}}, \quad (29)$$

где T_{Φ} – фактический годовой фонд рабочего времени энергоагрегата за год, часы;

$T_{\text{кал}}$ – календарное время работы равно режимному времени за год, часы;

$T_{\text{п.р.}}$ – время простоев за год, часы.

$$T_{\phi} = 8760 - 4380 = 4380 \text{ часов.}$$

Производительность энергоагрегата 18 кВт в час.

$$W_{\Gamma} = 18 \cdot 4380 = 78840 \text{ кВт/год.}$$

3.3 Расчёт сметы капитальных затрат

Общая величина капитальных вложений включает суммарные затраты на приобретение, транспортировку и монтаж оборудования:

$$K = C_{\text{об}} + T_{\text{р}} + Z_{\text{мр}} + Z_{\text{нр}}, \quad (30)$$

где $C_{\text{об}}$ – стоимость оборудования;

$T_{\text{р}}$ – транспортные расходы;

$Z_{\text{мр}}$ – затраты на монтажные работы;

$Z_{\text{нр}}$ – непредвиденные расходы.

Сведем расчет стоимости приобретенного оборудования $C_{\text{об}}$ к таблице 9. Прочее неучтенное оборудование (кабели, проводка и прочее мелкое оборудование) примем в размере 20% от стоимости учтенного оборудования.

Таблица 9 – Расчет стоимости приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Количество, шт.	Цена за единицу продукции, тыс. руб.	Общая стоимость, тыс. руб.
Газотурбинный двигатель ГТА-18М	1	2 000	3 000

Продолжение таблицы 9

Генератор ГС-18МО	1	600	600
Аккумуляторная батарея 12СТ-85Р	12	15	180
Система подачи масла	1	200	200
Пропорциональный клапан burkert 8626	1	100	100
Датчик давления ОВЕН ПД100-ДИ1,0-111-0,25-EXIA	1	7	7
Контроллер ЕС1000	1	45	45
Итого учтенное оборудование			4 132
Прочее неучтенное оборудование			826,4
Итого стоимость оборудования			4 958,4

Затраты на монтаж $З_{\text{мр}}$ определим в размере 15% от стоимости оборудования, транспортные расходы T_p – 10%, резерв на непредвиденные расходы – 5 %:

$$З_{\text{мр}} = Ц_{\text{об}} \cdot 0,15. \quad (31)$$

$$З_{\text{мр}} = 4\,958\,400 \cdot 0,15 = 743\,760 \text{ руб.}$$

$$T_p = Ц_{\text{об}} \cdot 0,1. \quad (32)$$

$$T_p = 4\,958\,400 \cdot 0,1 = 495\,840 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{нр}} = Ц_{\text{об}} \cdot 0,05. \quad (33)$$

$$З_{\text{нр}} = 4\,958\,400 \cdot 0,05 = 247\,920 \text{ руб.}$$

Согласно формуле 2, общая величина капитальных вложений определена:

$$K = 4\,958\,400 + 743\,760 + 495\,840 + 247\,920 = 6\,445\,920 \text{ руб.}$$

3.4 Расчёт РСЭО

Расходы на эксплуатацию системы электропривода могут быть найдены по следующей формуле:

$$C_{\text{зат}} = Э + А + C_{\text{тр}}, \quad (34)$$

где $C_{\text{зат}}$ – затраты на эксплуатацию электропривода;

$Э$ – затраты на потерю электроэнергии;

$А$ – амортизационные отчисления;

$C_{\text{тр}}$ – затраты на ремонт и обслуживание электрооборудования.

Расчет потерь на электроэнергию определяется умножением себестоимости 1 кВт·ч энергии на количество теряемой энергии в течении года.

Стоимость затрат на электроэнергию рассчитывается по формуле:

$$Э = P \cdot T_{\text{п}} \cdot Ц_{\text{з}}, \quad (35)$$

где $Э$ – стоимость потерь электроэнергии;

P – мощность на входе установки;

$T_{\text{п}}$ – общее время пуска за год;

Π_3 – себестоимость 1 кВт·ч.

Стоимость 1 кВт·ч примем равной 3,5 руб/кВт·ч. Тогда стоимость затрат будет равняться:

$$\Xi = 18 \cdot 12 / 3600 \cdot 365 \cdot 3,5 = 76,65 \text{ руб.}$$

Расчет годовой суммы амортизационных отчислений производится на основе капитальных затрат на оборудование и нормы амортизации для него.

Норму амортизации по оборудованию можно рассчитать по следующей формуле:

$$N_{\text{ai}} = \frac{100}{T_a}, \quad (36)$$

где N_{ai} – норма амортизации оборудования, %;

T_a – нормативный срок службы оборудования, 5 лет.

$$N_{\text{ai}} = \frac{100}{5} = 20 \text{ \%}.$$

Сумма амортизации определится как:

$$A = \frac{K \cdot N}{100}, \quad (37)$$

где A – величина амортизационных отчислений;

K – капитальные затраты на оборудование.

$$A = 6\,445\,920 \cdot 20 / 100 = 1\,289\,184 \text{ руб.}$$

Расчёт затрат на ремонты и обслуживание электрооборудования.

Величина затрат на ремонты и обслуживание складывается из большого количества элементов, а именно:

- стоимость энергии всех видов;
- материалов;
- запасных частей;
- инструмента и инвентаря;
- заработной платы ремонтного и дежурного персонала.

Из множества этих элементов прямому счёту в рамках дипломного проекта поддаётся только заработная плата. Доля затрат на содержание основных средств, принимается равной $k = 0,2$. Тогда величина затрат на ремонты и обслуживание с учётом этого коэффициента и суммы амортизации определится следующим образом:

$$C_{\text{тр}} = k \cdot A, \quad (38)$$

где $C_{\text{тр}}$ – сумма затрат на ремонты и обслуживание;

k – доля затрат на содержание основных средств.

$$C_{\text{тр}} = 0,2 \cdot 1\,289\,184 = 257\,836,8 \text{ руб.}$$

Таким образом, сумма годовых затрат на эксплуатацию системы электропривода составит:

$$C_{\text{зат}} = \mathcal{E} + A + C_{\text{тр}}, \quad (39)$$

где $C_{\text{зат}}$ – величина годовых затрат на эксплуатацию системы электропривода.

$$C_{\text{зат}} = 76,65 + 1\,289\,184 + 257\,836,8 = 1\,547\,097,45 \text{ руб.}$$

3.5 Расчёт затрат на материалы и на оплату труда со страховыми отчислениями

Произведем расчет среднемесячной заработной платы инженера и слесаря-ремонтника. Система оплаты сдельно-премиальная.

В таблице 10 представлен расчет фонда оплаты труда.

Таблица 10 — Расчет фонда оплаты труда

Наименование профессии	Кол-во работников	Часовая ставка, руб	Средние месячные часы, ч/мес	Сумма заработной платы, руб/мес
Инженер электрик	1	255	176	44 880
Слесарь-ремонтник	5	175	180	157 500
Инженер конструктор	2	255	176	89 760
Инженер сборщик	1	255	176	44 880
Сборщик	6	175	180	189 000
Технолог	1	220	176	38 720
Итого заработная плата без страховых отчислений, руб				564 740

Сумма страховых отчислений от заработной платы персонала рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{стр.взн}} = ЗП \cdot 30 \% . \quad (40)$$

$$C_{\text{стр.взн}} = 564\,740 \cdot 30 = 169\,422 \text{ руб.}$$

3.6 Расчёт прибыли и показателей рентабельности

Прибыль является важнейшим показателем эффективности работы предприятия.

Выручка от реализации продукции $V = 9\,000\,000$ рублей.

Себестоимость продукции равняется капитальным затратам $C = 6\,445\,920$ руб.

Выручка от реализации продукции без НДС:

$$V^* = V \cdot 100 / 118. \quad (41)$$

$$V^* = 9\,000\,000 \cdot 100 / 118 = 7\,627\,119 \text{ руб.}$$

Прибыль от реализации продукции:

$$\Pi_p = V^* - C. \quad (42)$$

$$\Pi_p = 7\,627\,119 - 6\,445\,920 = 1\,181\,199 \text{ руб.}$$

Налог на прибыль будет равен:

$$H_{\text{пр}} = 0,2 \cdot \Pi_p. \quad (43)$$

$$H_{\text{пр}} = 0,2 \cdot 1\,181\,199 = 236\,240 \text{ руб.}$$

Чистая прибыль составит:

$$\Pi_{\text{рч}} = \Pi_p - H_{\text{пр}}, \quad (44)$$

$$\Pi_{рч} = 1\,181\,199 - 236\,240 = 944\,959 \text{ руб.}$$

Показатель рентабельности рассчитывается как отношение прибыли от реализации к себестоимости продукции, выраженный в процентах:

$$R = \Pi_p / C \cdot 100. \quad (45)$$

$$R = 1\,181\,199 / 6\,445\,920 \cdot 100 = 18,3 \, \%$$

3.7 Сводная таблица технико-экономических расчётов

Таблица 11 – Сводная таблица технико-экономических расчетов

Наименование показателя	Величина показателя
Капитальные затраты, руб.	6 445 920
Затраты на электроэнергию, руб.	76,65
Фонд заработной платы, руб.	202 380
Страховые взносы, руб.	169 422
Производительность оборудования, кВт/год	78 840
Численность работников, чел.	16
Рентабельность, %.	18,3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе разработана система автоматического управления подачи топлива в газотурбинном энергоагрегате.

При проведении анализа технологического процесса сформулированы основные требования, предъявляемые к энергоагрегату.

В ходе работы был рассчитан двигатель (выбран ГС-18МО с мощностью 18 кВт), который удовлетворяет выдвинутым требованиям к системе привода. Для оценки правильности выбора двигателя была выполнена проверка по перегреву двигателя. Управление двигателем будет осуществляться при помощи транзисторного усилителя.

Для всего времени работы рассчитаны статические и динамические моменты, построена нагрузочная диаграмма. Также приведены: кинематическая схема проектируемого механизма и силовая схема системы привода.

Разработана структурная схема системы автоматического управления подачи топлива.

Полученные экономические показатели говорят об эффективности внедрения данной установки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев – Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Зеленев А.Б. Выбор мощности электропривода механизмов прокатных станов / А.Б. Зеленев – Киев: Изд-во Укрвузполиграф, 1990. – 200 с.
3. <http://www.skb-turbina.com/o-kompanii/istorija-predprijatija/>
4. <http://www.skb-turbina.com/proizvodstvennye-vozmozhnosti/>
5. Кучина, Е.В. Экономика организации: учебное пособие / Е.В. Кучина. - Челябинск, 2017. - 52 с.
6. Попп, Т.В. Определение экономической эффективности технических решений в дипломных проектах: методические указания к выполнению экономической части дипломного проектирования / Т.В. Попп. - Екатеринбург: УрГУПС, 2014.-32 с.
7. Нормы амортизационных отчислений по основным фондам народного хозяйства СССР, утверждены Постановлением Совета Министров СССР от 14.03.74 N 183, введении в действие с 01.01.75.
8. Богодухов С.И. Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов. / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов. - М.: Машиностроение, 2009. - 640 с.
9. Рег Д. Промышленная электроника. Электрон. дан. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 1136 с.
10. Петраков Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие для студентов вузов. / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. – М.: Машиностроение, 2009. - 336 с.
11. Бигеев В.А. Основы металлургического производства. / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольцев, В.М. Салганик. - СПб.: Лань, 2017. - 616 с.
12. Акулович Л.М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. / Л.М. Акулович, В.К. Шелег. - Минск: Новое знание, 2012. - 488 с.

13. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учебное пособие: учеб. пособие - М.: Машиностроение, 2007. - 380 с.
14. Стегаличев Ю.Г. Автоматизация технологических процессов и производств. / Ю.Г. Стегаличев, В.Н. Замарашкина. - СПб.: НИУ ИТМО, 2003. - 30 с.
15. Фельдштейн Е.Э. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. пособие - Минск: Новое знание, 2011. - 265 с.
16. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учеб. пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский. - СПб.: Лань, 2016. - 160 с.
17. Беленький А.М. Автоматическое управление металлургическими процессами Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев, О.М. Блинов, В.Ю. Каганов. - М.: Металлургия, 1989. - 384 с.
18. Бигеев В.А. Основы металлургического производства. / В.А. Бигеев, К.Н. Вдовин, В.М. Колокольников, В.М. Салганик. - СПб.: Лань, 2017. - 616 с.
19. Богодухов С.И. Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов. / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов. - М.: Машиностроение, 2009. - 640 с.
20. Акулович Л.М. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. / Л.М. Акулович, В.К. Шелег. - Минск: Новое знание, 2012. - 488 с.
21. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов: Учебное пособие: учеб. пособие - М.: Машиностроение, 2007. - 380 с.
22. Стегаличев Ю.Г. Автоматизация технологических процессов и производств. / Ю.Г. Стегаличев, В.Н. Замарашкина. - СПб.: НИУ ИТМО, 2003. - 30 с.
23. Фельдштейн Е.Э. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учеб. пособие - Минск : Новое знание, 2011. - 265 с.

24. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений в машиностроении: учеб. пособие / Ю.М. Зубарев, С.В. Косаревский. - СПб.: Лань, 2016. - 160 с.

25. Беленький А.М. Автоматическое управление металлургическими процессами Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев, О.М. Блинов, В.Ю. Каганов. - М.: Металлургия, 1989. - 384 с.