

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Изучение режимов работы двигателя НК-12СТ с использованием виртуальной модели САУ

Электронные методические указания
к лабораторным работам

САМАРА

2010

УДК 681.5.01

Составители: **Илюхин Владимир Николаевич,
Крючков Александр Николаевич,
Родионов Леонид Валерьевич,
Шахматов Евгений Владимирович**

Рецензент: д-р техн. наук, профессор В. И. Санчугов

Представлены основные сведения о двигателе и рассмотрена его система регулирования. Описаны программируемый логический контроллер и среда программирования, используемые при моделировании системы автоматического регулирования двигателя.

Рассматривается возможность реализации системы автоматического управления газотурбинного двигателя НК-12СТ на основе программируемого логического контроллера ОВЕН-150. Показана работа такой системы на основных режимах работы двигателя НК-12СТ. Особое внимание уделено запуску двигателя.

Методические рекомендации предназначены для студентов, обучающихся по магистерской программе «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Подготовлены на кафедре автоматических систем энергетических установок.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

<u>Введение</u>	4
1 <u>Основные сведения о двигателе</u>	5
1.1 <u>Краткое описание конструкции двигателя</u>	5
1.2 <u>Принцип работы двигателя</u>	7
2 <u>Система регулирования двигателя</u>	8
2.1 <u>Агрегаты топливотрегулирующей системы</u>	9
2.2 <u>Агрегаты механизации компрессора системы регулирования двигателя</u>	20
3 <u>Уравнения передаточных функций звеньев САР</u>	28
4 <u>Описание Овен ПЛК-150</u>	39
5 <u>Описание среды программирования CoDeSys</u>	42
6 <u>Краткое описание агрегатов</u>	43
7 <u>Описание режимов работы САР</u>	45
8 <u>Порядок проведения работы</u>	47
<u>Контрольные вопросы</u>	49
<u>Список использованных источников</u>	50

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наряду с применением газотурбинных двигателей (ГТД) в качестве авиационных силовых установок их используют и в наземной энергоемкой технике. Перечень таких наземных установок обширен: энергетические и газоперекачивающие агрегаты; силовые установки морских и речных судов; газоструйные установки для очистки взлетно-посадочных полос аэродромов и другие. Наибольшее распространение получили газоперекачивающие комплексы на основе ГТД.

Одной из основных отличительных особенностей наземных и авиационных ГТД является монорежимность работы и инерционность приводных объектов. Эти отличия обуславливают необходимость разработки специальных устройств автоматики наземных ГТД. Система автоматического управления (САУ) наземных ГТД должна обеспечить функции управления, контроля и защиты в течение длительного времени безаварийной работы.

Значительно повысить качество регулирования наземных ГТУ удалось вследствие применения цифровых электронных регуляторов на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК). С внедрением ПЛК возможна реализация алгоритмов управления любой сложности при малых габаритах и массе аппаратуры.

Изучение режимов работы двигателя проведено на основе виртуальной модели его САУ. Виртуальная модель САУ двигателя НК-12СТ реализована на ПЛК «ОВЕН-150» в среде программирования CoDeSys.

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ДВИГАТЕЛЕ

1.1 Краткое описание конструкции двигателя

Двигатель НК-12СТ является турбовальным газотурбинным двигателем, предназначенным для привода нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций магистральных газопроводов большой протяженности. Компоновка двигателя в разрезе дана на [рисунке 1](#).

Двигатель НК-12СТ обладает автоматическим запуском, при котором раскрутка ротора обеспечивается воздушным стартером, для привода которого используется газ, транспортируемый по газопроводу. При запуске стартер раскручивает ротор турбокомпрессора, а от него через соответствующие приводы вращение передается на агрегаты топливной и масляной систем, а также агрегаты управления механизацией компрессора.

Двигатель состоит из двух основных частей: турбокомпрессора (газогенератора) и свободной (силовой) турбины, включающих в себя узловые элементы: переднюю опору, осевой четырнадцати-ступенчатый компрессор, камеру сгорания кольцевого типа, трехступенчатую реактивную турбину, промежуточную опору (заднюю опору турбокомпрессора), цилиндрические проставки, служащие для выравнивания поля температур и давлений на входе в свободную (силовую) турбину, опору свободной (силовой) турбины, коробки приводов агрегатов двигателя, масляные насосы, обслуживающие двигатель и ГПА.

Кроме того, двигатель имеет агрегаты питания топливом, агрегаты системы смазки, агрегаты регулирования и управления двигателем, агрегаты запуска двигателя, агрегаты параметрического контроля и защиты, предупреждающие возникновение аварийных ситуаций.

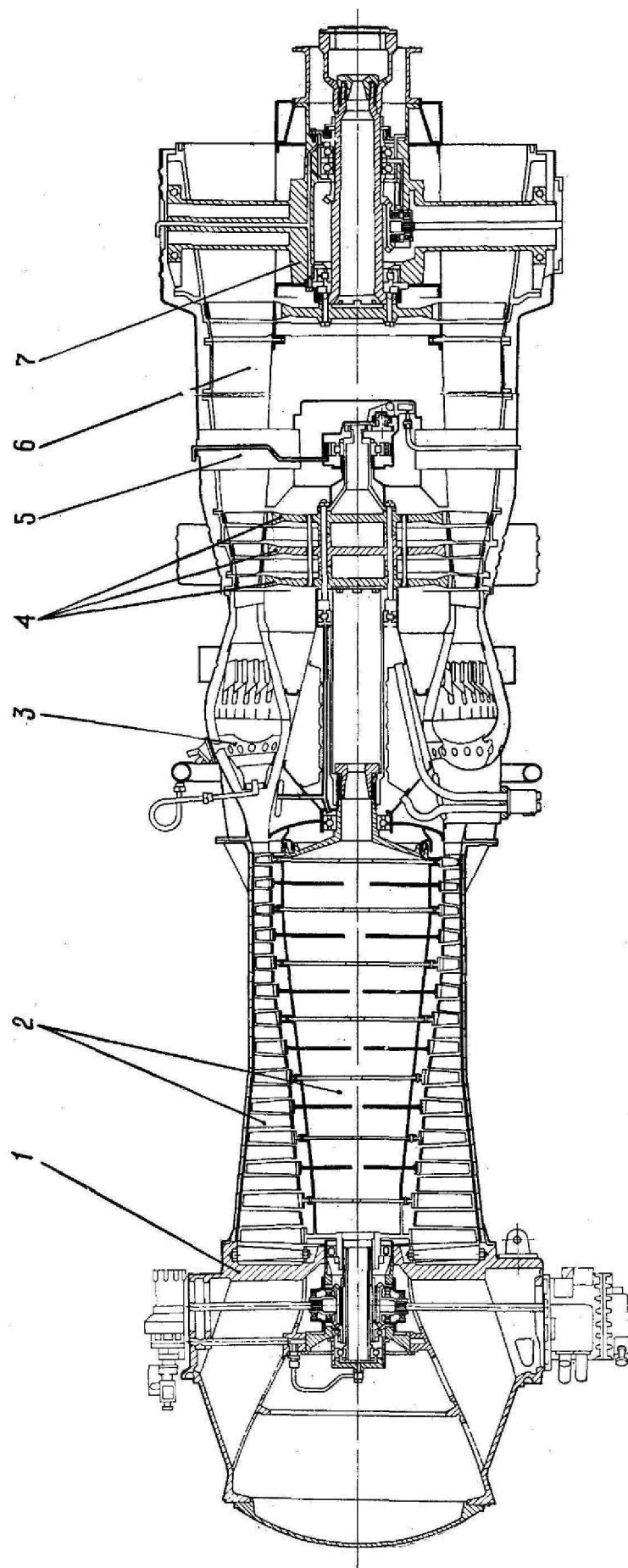


Рисунок 1 - Продольный разрез двигателя

1 – передняя опора; 2 – компрессор (статор и ротор); 3 – картер турбины с камерой сгорания; 4 – турбина ТК;
5 – промежуточная опора; 6 – проставка; 7 – свободная турбина.

1.2 Принцип работы двигателя

Воздух из атмосферы через входное очистительное устройство (ВОУ) газоперекачивающего агрегата и входной клапан передней опоры поступает на вход в компрессор, проходит через регулируемый входной направляющий аппарат компрессора, сжимается в осевом компрессоре и поступает в кольцевую камеру сгорания.

В камере сгорания воздушный поток делится на два: первичный поток (25%) и вторичный поток (75%).

Воздух первичного потока, перемешиваясь с топливным газом, поступающим через форсунки, участвует в процессе горения. Воздух вторичного потока, охлаждая стенки камеры сгорания, постоянно подмешивается к продуктам сгорания для получения необходимой температуры газа перед турбиной. Часть вторичного воздуха используется для охлаждения турбины компрессора.

Процесс сгорания идет при практически постоянном давлении в камере. Падение давления за счет гидравлических потерь в конце камеры сгорания составляет не более 3% от полного давления за компрессором.

Воспламенение смеси топливного газа и воздуха при запуске двигателя происходит от двух воспламенителей, состоящих из пусковой форсунки и запальной свечи.

Продукты сгорания, имеющие высокую температуру и давление при выходе из камеры сгорания, обладают большой потенциальной энергией.

Продукты сгорания из камеры поступают последовательно на три ступени турбины компрессора и одну ступень свободной турбины, где потенциальная энергия преобразуется в механическую работу на валу.

Мощность, потребляемая компрессором и агрегатами, соответствует мощности, развиваемой трехступенчатой турбиной. Избыток потенциальной энергии газа преобразуется в работу с помощью свободной турбины и передается на вал для привода центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата.

За турбиной продукты сгорания выпускаются в атмосферу через выходную улитку ГПА.

2 СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Система автоматического регулирования двигателя НК-12СТ предназначена для подачи топливного газа в камеру сгорания и для получения требуемых параметров в заданных диапазонах изменения внешних факторов и рабочих характеристик двигателя.

К внешним факторам относятся условия окружающей среды (температура и давление воздуха), количество и параметры топливного газа и масла, загрузка свободной турбины и т.д. Диапазоны изменения рабочих характеристик (частоты вращения турбокомпрессора и свободной турбины, температуры газов перед турбиной и др.) установлены, исходя из условия оптимизации газодинамических и тепловых режимов, обеспечения прочности и безопасной эксплуатации.

Основным регулируемым параметром системы является частота вращения турбокомпрессора, величина которой устанавливается в зависимости от потребной производительности газового нагнетателя и автоматически поддерживается постоянной при изменении внешних условий за счет изменения частоты вращения свободной турбины.

Для расширения диапазона изменения мощностной характеристики двигателя предусмотрено регулирование угла установки лопаток ВНА турбокомпрессора в зависимости от приведенной частоты вращения (приведенные обороты).

Система регулирования выполняет следующие функции:

- 1) автоматическое изменение подачи топлива по времени при запуске и выводе двигателя на режим;
- 2) автоматическое поддержание минимальной частоты вращения турбокомпрессора — режим малого газа;
- 3) управление механизацией компрессора — клапанами перепуска воздуха и входным направляющим аппаратом;
- 4) ограничение максимальной частоты вращения турбокомпрессора и свободной турбины;
- 5) ограничение статического давления воздуха за компрессором (мощности двигателя);

6) ограничение температуры газов перед свободной турбиной на запуске и режиме;

7) прекращение подачи топлива по командам от агрегатов системы защиты двигателя и с пульта управления агрегатом.

Рабочим телом системы регулирования является масло, подаваемое из масляной системы двигателя насосом агрегатов регулирования.

Систему регулирования структурно можно разделить на топливную систему и систему управления механизацией компрессора.

Схема системы регулирования представлена на [рисунке 2](#).

2.1 Агрегаты топливорегулирующей системы

К топливорегулирующим агрегатам относятся:

- дозатор газа ДГ-12;
- регулятор оборотов ОГ-12;
- ограничитель оборотов ОГ-8-4;
- стопорный клапан.

2.1.1 Дозатор газа ДГ-12

Дозатор газа ДГ-12 является основным исполнительным органом топливной системы двигателя. Дозатор газа установлен справа снизу под углом 30 град, к горизонтальной оси (направление по полету) на картере компрессора. Совместно с регулятором оборотов турбокомпрессора ОГ-12, ограничителем оборотов свободной турбины ОГ-8-4 и агрегатами системы защиты дозатор газа обеспечивает:

- 1) включение и выключение подачи топливного газа в камеру сгорания;

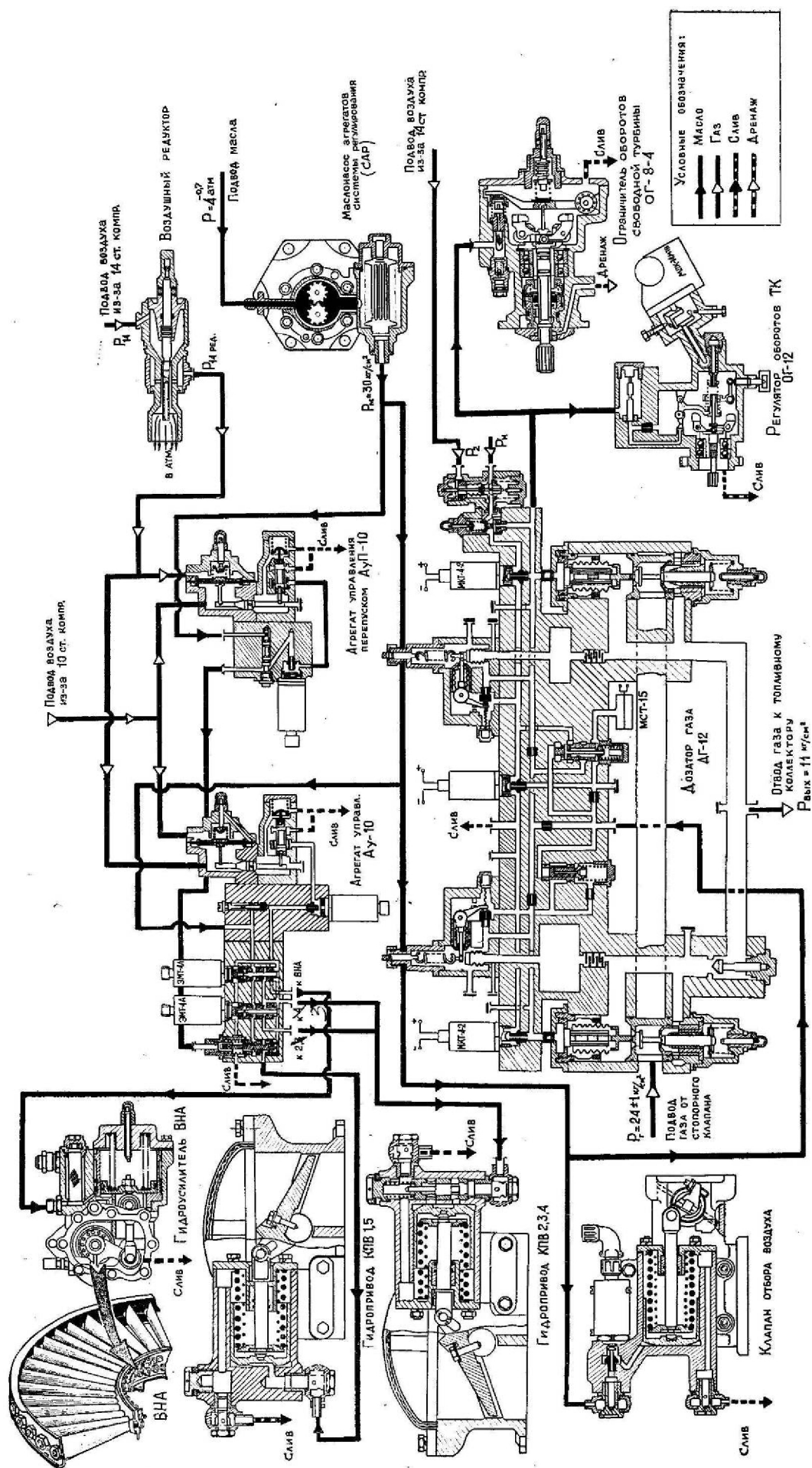


Рисунок 2 - Схема системы регулирования

- 2) поддержание постоянного давления масла в агрегатах системы регулирования;
- 3) автоматическое изменение подачи топливного газа по времени при запуске и приемистости;
- 4) ограничение расхода топлива в случае превышения допустимой температуры газов перед свободной турбиной;
- 5) поддержание постоянного весового расхода топлива при изменении его температуры;
- 6) ограничение расхода топлива в случае превышения допустимой максимальной частоты вращения турбокомпрессора ($n_{\text{тк}} = 8500$ об/мин) и свободной турбины ($n_{\text{ст}} = 8500$ об/мин);
- 7) ограничение расхода топлива в случае превышения допустимой мощности статического давления воздуха за компрессором $P_2 - P_{\text{н}}$.

Дозатор газа состоит из следующих основных узлов: корпуса, переходного фланца, дозатора автомата запуска, дозатора основного топлива, управляющих клапанов дозатора автомата запуска и дозатора основного топлива, дроссельных пакетов (замедлителей), редукционного клапана, ограничителя статического давления, клапана гидроостанова, электромагнитного клапана (МКТ-361).

Для подвода и отвода топливного газа на корпусе установлены два фланца. Соединение фланцев с трубопроводами подвода и отвода газа осуществлено хомутами, состоящими из двух половин, стянутых болтами. Уплотнение стыка обеспечивают металлические прокладки, расположенные в проточках фланцев дозатора. Корпус служит для размещения узлов и деталей агрегата.

Дозаторы автомата запуска и основного топлива предназначены для программного увеличения расхода топлива в процессе запуска двигателя (дозатор автомата запуска) и в процессе перехода с минимальных оборотов двигателя до рабочих (дозатор основного топлива). Изменение расхода топливного газа на режиме осуществляется через дозатор основного топлива.

Конструкция дозаторов полностью идентична. Каждый из них состоит из:

- дозатора;

- сильфонного узла;
- электромагнитного клапана.

Сильфонный узел является силовым приводным элементом, с помощью которого при изменении командного давления масла изменяется положение дозирующей иглы.

Электромагнитные клапаны МКТ-4-2 ($\mathcal{E}_{\text{ср}}$ и $\mathcal{E}_{\text{пт}}$) 8 и 21 (см. [рисунок 3](#)) предназначены для дистанционного открытия и закрытия соответственно клапана слива масла из сильфона автомата запуска и клапана слива масла из сильфона дозатора основного топлива.

Электромагнитный клапан МКТ-4-2 состоит из корпуса, якоря с запорным устройством, пружины якоря и обмотки.

Управляющие клапаны дозаторов 11 и 18 (см. [рисунок 3](#)) предназначены для обеспечения изменения расхода топлива по времени.

Дроссельные пакеты Д1 и Д2 в совокупности с полостями Б и В (см. [рисунок 3](#)) корпуса обеспечивают программное замедление нарастания давления газа в сильфонах управляющих клапанов автомата запуска и дозаторов основного типа.

Редукционный клапан служит для поддержания постоянного давления масла в агрегатах систем регулирования двигателя. Клапан смонтирован в корпусе дозатора газа и состоит из золотника, пружины, втулки и пробки.

Ограничитель статического давления воздуха за компрессором служит для ограничения мощности двигателя при низких температурах окружающей среды. Он состоит из корпуса, узла сильфона с входящими деталями, рычага, клапана и регулировочного винта.

Электромагнитный клапан МКТ-361 предназначен для дистанционного управления клапаном останова путем открытия или закрытия канала слива масла из пружинной полости клапана останова.

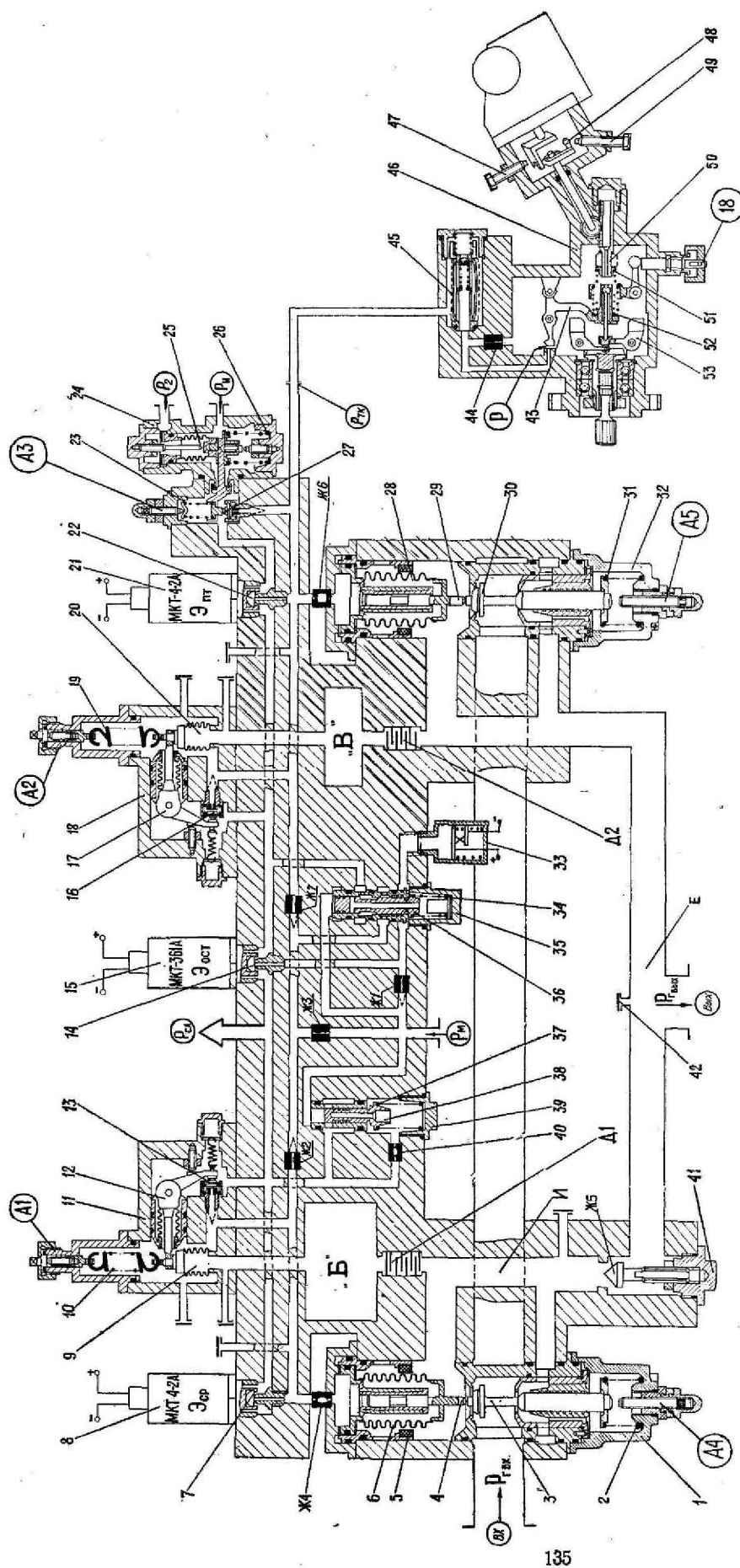


Рисунок 3 - Дозатор газа ДГ-12 и регулятор оборотов ОГ-12 (принципиальная схема работы)

1 - дозатор автомата запуска; 2, 31 - пружины дозаторов; 3 - игла автомата запуска; 4, 29 - опоры сильфонов; 5 - защитная втулка; 6 - сильфон автомата запуска; 7, 13, 14, 16, 22, 27 - клапаны; 8, 15, 21 - электромагнитные клапаны ($\Sigma_{\text{сп}}$; $\Sigma_{\text{ост}}$; $\Sigma_{\text{пр}}$); 9, 20 - сильфоны управляющих клапанов; 10, 19, 23, 26, 34, 37, 51, 52 - пружины; 11 - управляющий клапан дозатора автозапуска; 12, 17 - рычаги; 18 - управляющий клапан дозатора основного топлива; 24 - ограничитель статического давления; 25 - сильфон; 28 - сильфон дозатора основного топлива; 30 - игла дозатора основного топлива; 32 - дозатор основного топлива; 33 - сигнализатор МСТ-15; 35 - клапан гидроостанова; 36 - золотник клапана гидроостанова; 38 - золотник редукционного клапана; 39 - редукционный клапан; 40 - жиклер; 41 - пробка; 42 - штуцер подвода газа к ССК; 43 - маятник; 44 - жиклер; 45 - фильтр с обратным клапаном; 46 - регулятор оборотов ОГ-12; 47 - регулировочный винт «Н» минимальной частоты вращения (нижний упор); 48 - регулировочный винт максимальной частоты вращения (верхний упор); 50 - рейка с термокомпенсатором; 53 - грузики; А1, А2, А3, А4, А5 - регулировочные винты дозатора газа; Д1, Д2 - дроссельные пакеты; Б, В - полости; Е, И - клапаны дозатора; Ж1, Ж2, Ж3, Ж4, Ж5, Ж6, Ж7 - жиклеры; Р - кромка маятника.

Конструкция и принцип работы электромагнитного клапана аналогичны конструкции электромагнитного клапана МКТ-4-2 автомата запуска и дозатора основного топлива.

2.1.2 Регулятор оборотов ОГ-12

Регулятор оборотов ОГ-12 предназначен для поддержания заданной частоты вращения на режиме малого газа, рабочих режимах и для ограничения максимальной частоты вращения турбокомпрессора.

Работа регулятора оборотов ОГ-12 (см. [рисунок 3](#)).

Регулятор оборотов предназначен для:

- поддержания заданной частоты вращения турбокомпрессора на режиме малого газа двигателя, при этом поводок 48 привода электромеханизма находится на нижнем упоре 47;
- поддержания заданной частоты вращения турбокомпрессора на рабочих режимах двигателя, при этом поводок 48 привода электромеханизма находится в промежуточном положении между упорами 47 и 49;
- ограничения максимальной частоты вращения турбокомпрессора, при этом поводок 48 привода электромеханизма находится на верхнем упоре 49.

Режим работы регулятора оборотов определяется положением рейки 50 с термокомпенсатором.

Перемещение рейки, то есть изменение режима работы двигателя, производится за счет поворота поводка 48 с валиком при подаче напряжения на электромеханизм МПК-14МТВ от системы автоматики агрегата ГПА-Ц-6,3.

На заданном режиме работы двигателя усилие от центробежных грузиков 53 уравнивается силой затяжки пружин 51 и 52. При этом положение кромки «Р» маятника 43 относительно клапана подвода масла обеспечивает слив масла, соответствующий заданной величине командного давления масла в сильфоне дозирующей иглы 30 дозатора основного топлива 32 в агрегате ДГ-12.

В случае отклонения частоты вращения ротора турбокомпрессора от заданной меняется усилие от центробежных грузиков, действующих на иглу. Под действием пружин маятник 43 кромкой «Р» прикрывает слив из полости командного давления

в сильфон дозатора основного топлива, вызывая увеличение расхода топливного газа, поступающего в газовый коллектор камеры сгорания.

При отклонении частоты вращения в сторону увеличения регулятор снижает расход топливного газа.

2.1.3 Ограничитель оборотов ОГ-8-4

Ограничитель оборотов ОГ-8-4 предназначен для (ограничения расхода топливного газа при повышении допустимого значения максимальной частоты вращения свободной турбины, то есть при $n_{ст} \geq 8500 \pm 50$ об/мин.

Ограничитель оборотов ОГ-8-4 работает совместно с дозатором газа ДГ-12.

Агрегат установлен на коробке приводов свободной турбины. Ограничитель оборотов состоит из:

- корпуса;
- датчика частоты вращения;
- рычажного механизма;
- термокомпенсатора с регулировочным винтом;
- золотникового клапана;
- механизма изменения настройки;
- шарикового клапана.

На агрегате установлены штуцеры подвода масла от дозатора газа, слива масла из агрегата и дренажа. Корпус агрегата литой, с системой каналов для подвода масла, слива и дренажа. В корпусе размещен датчик частоты вращения.

2.1.4 Сигнализатор давления МСТ-15С

Малогабаритный сигнализатор давления МСТ-15С выдает электрический сигнал при достижении давления масла 1,5 МПа на входе в ДГ-12 в процессе автоматического запуска (размыкание цепи 27В) и при падении давления масла на входе в ДГ-12 ниже 1,5 МПа на режиме (замыкание цепи 27В). Замыкание цепи на режиме приводит к срабатыванию системы защиты и аварийному останову двигателя.

Принцип работы сигнализатора основан на способности чувствительного элемента - мембраны прогибаться на определенную величину в зависимости от

величины давления. Прогибаясь, мембрана перемещает пружину с подвижным контактом, и контакты замыкаются или размыкаются.

Сигнализатор 33 (см. [рисунок 3](#)) установлен в корпусе дозатора газа в канале подвода масла к клапану останова за жиклером Ж1 на резьбе с уплотнением металлическим кольцом.

2.1.5 Стопорный клапан

Стопорный клапан предназначен для:

- надежного запираания канала подвода топливного газа к двигателю в период предпусковой подготовки и при запуске до подачи электрической команды на открытие клапана;
- открытия подвода топливного газа при запуске (при подаче напряжения на электромагнит ЭМТ-243);
- прекращения подвода топливного газа и запираания клапана при аварийном и нормальном остановках;
- автоматического останова работающего двигателя при исчезновении электропитания 27В в системе управления агрегата.

Стопорный клапан установлен в газоперекачивающем агрегате в магистрали подачи топливного газа к дозатору газа ДГ-12.

2.1.6 Работа агрегатов топливорегулирующей системы

Дозатор газа (см. [рисунок 3](#)) двигателя вступает в работу с момента подачи топливного газа на вход двигателя. В исходном положении дозирующие иглы обеспечивают перекрытие подачи топливного газа в камеру сгорания.

Перекрытие топливного тракта в процессе запуска осуществляется подачей напряжения на электромагнитные клапаны МКТ-4-2 (Ξ_{cp} и $\Xi_{шт}$), которые соединяют полости сильфонов 6, 28 дозирующих игл 3, 30 автомата запуска и дозатора основного топлива 32 со сливом.

Из-за разности площадей седел игл под действием давления топливного газа создается усилие, прижимающее иглы 3 и 30 к втулкам дозаторов, и тем самым отсекается подвод топливного газа к камере сгорания.

Давление масла P_m , подаваемого на вход агрегата от маслососа системы регулирования, нарастает при раскрутке компрессора стартером ВС-12 до давления настройки редуционного клапана 39. Через жиклеры Ж3, Ж4 и Ж7, Ж6 масло поступает в сильфоны автомата запуска и дозатора основного топлива, а через жиклер Ж1 — к золотнику 36 клапана останова 35.

Жиклеры-демпферы Ж1 и Ж6 служат для предотвращения передачи пульсаций давления в маслосистеме на исполнительные узлы автомата запуска и дозатора основного топлива.

При снятии напряжения с электромагнита МКТ-4-2 ($\mathcal{E}_{cp}$) в момент достижения ротором компрессора оборотов $n_{TK} = 1600 \dots 1800$ об/мин вступает в работу автомат запуска. При этом закрывается клапан 7 и начинается рост давления масла за жиклером Ж2.

По мере роста давления масла сильфон дозатора, преодолевая сопротивление пружины 2, а также усилие от воздействия топливного газа на дозирующую иглу 3, начинает перемещать опору сильфона 4 и открывает подачу топливного газа к рабочим форсункам камеры сгорания.

Давление масла в сильфоне 6 возрастает до момента открытия управляющего клапана 11 автомата запуска, который открывает слив масла, тем самым прекращая дальнейший рост давления в сильфоне 6. Раскрытие иглы при этом соответствует минимальному расходу топливного газа через автомат запуска. Топливный газ через дроссельный пакет Д1 и полость «Б» заполняет полость сильфона 9 управляющего клапана автомата запуска, что приводит к повышению давления газа в нем, закрытию управляющего клапана 11 и дальнейшему открытию дозирующей иглы.

В канале «И» установлен регулируемый жиклер Ж5. Жиклер Ж5 повышает давление газа в канале «И» относительно давления на рабочих форсунках и тем самым создает возможность увеличения перестановочного усилия, действующего на дозирующую иглу 3.

Предварительная настройка замедлителя, состоящего из дроссельного пакета Д1 и полости «Б», определяет характер увеличения расхода топливного газа по времени в процессе запуска.

Максимальный расход топливного газа через автомат запуска соответствует положению дозирующей иглы «на упор» в регулировочный винт *A4*. Корректировка величины максимального расхода топливного газа, проходящего через автомат запуска, может быть произведена изменением положения регулировочного винта *A4*.

Максимальный расход через автомат запуска обеспечивает достижение турбокомпрессором двигателя оборотов $n_{\text{тк}}=4500...5000$ об/мин, при этом снимается напряжение с электромагнита малого газа $\Xi_{\text{мг}}$.

Дальнейшее увеличение расхода топливного газа производится через дозатор основного топлива (ДОТ). До вступления в работу регулятора оборотов малого газа ОГ-12 на оборотах $n_{\text{тк}} = 6600 \pm 200$ об/мин работа ДОТ аналогична работе автомата запуска.

При достижении расхода топливного газа, необходимого для поддержания режима малого газа, рост давления в сильфоне 28 ДОТ прекращается перепуском масла за жиклером *Ж7* через маятниковый узел регулятора оборотов ОГ-12. Время изменения расхода топливного газа с режима малого газа на рабочий определяется характеристикой замедлителя, состоящего из дроссельного пакета *Д2* и полости «В» и работающего аналогично замедлителю автомата запуска. Задание требуемого режима работы двигателя осуществляется оператором настройкой регулятора оборотов турбокомпрессора ОГ-12 с помощью электромеханизма МПК-14МТВ.

При достижении расхода топливного газа, соответствующего настройке ограничителя оборотов ОГ-8-4, рост давления за жиклером *Ж7* прекращается перепуском масла через его маятниковый узел (см. [рисунк 2](#)).

Величина максимального расхода топливного газа через ДОТ соответствует упору дозирующей иглы *30* в регулировочный винт *A5*. Корректировка величины максимального расхода топлива через ДОТ, при необходимости, производится изменением положения регулировочного винта *A5*.

В случае превышения допустимой температуры газов T_5 перед свободной турбиной по команде усилителя регулятора температуры УРТ-19А-3У на обмотку электромагнита « $\Xi_{\text{ср}}$ » автомата запуска ДГ-12 подается напряжение в виде

импульсов определенной последовательности. При подаче напряжения электромагнит открывает слив масла через клапан 7 из сильфона дозирующей иглы автомата запуска.

Периодическое открытие слива масла приводит к уменьшению подачи («частичная срезка») топливного газа и соответственно ограничивает рост температуры газов перед турбиной как на запуске, так и при работе на режиме.

Одновременно с периодическим включением магнита «Э_{ср}» подается напряжение на электромеханизм регулятора оборотов ОГ-12 на снижение режима работы двигателя.

При низких температурах воздуха, поступающего в компрессор, двигатель может развивать мощность, превышающую максимальную. Пропорционально увеличению мощности растет и статическое давление воздуха на выходе из компрессора ($P_{2ст}$).

При превышении статического давления воздуха за компрессором относительно заданного срабатывает ограничитель статического давления воздуха 24 дозатора газа. Он настроен на перепад между давлением за компрессором и давлением на входе в компрессор ($P = P_{2ст} - P_n$). При срабатывании ограничителя открывается клапан 16 слива масла за жиклером Ж7, что приводит к уменьшению расхода топливного газа.

Регулирование величины перепада давления, при котором происходит срабатывание ограничителя статического давления 24, производится винтом А3 дозатора газа ДГ-12.

Редукционный клапан 39 дозатора газа поддерживает на входе в агрегаты системы регулирования давление масла, равное $P_m = P_{вх} - P_{сл} = 3 \text{ МПа}$, где $P_{вх}$ - давление масла на входе в дозатор газа; $P_{сл}$ - давление масла слива в дозаторе газа.

При возрастании давления масла на входе в дозатор газа золотник 38 клапана, преодолевая усилие затяжки пружины 37, перемещается, увеличивая слив (перепуск) масла, и давление масла восстанавливается. При уменьшении давления масла на входе слив (перепуск) уменьшается и давление в системе также остается постоянным. Усилие затяжки пружины 37, а соответственно и величина

настроечного давления, регулируется с помощью регулировочных шайб. Для устранения влияния пульсаций давления масла за насосом на работу клапана полость пружины 37 соединена со сливом через жиклер-демпфер 40.

При необходимости останова двигателя подается напряжение на электромагнитный клапан МКТ-361, который открывает слив масла за жиклером Ж1 через клапан 14. Давление масла в полости пружины 34 клапана гидроостанова 35 снижается, и золотник 36 под давлением масла, действующим на торец золотника, преодолевая усилие затяжки пружины, перемещается, открывая перепуск масла за жиклером Ж3 на слив. Падение давления за жиклером Ж3 приводит к резкому снижению давления масла в сильфонах дозирующих игл дозаторов автомата запуска и основного топлива. Под действием давления топливного газа иглы перемещаются и перекрывают доступ топливного газа в камеру сгорания — двигатель останавливается. Клапан гидроостанова срабатывает при разности давлений под золотником и в полости пружины, равной 0,3 МПа.

2.2 Агрегаты механизации компрессора системы регулирования двигателя

Механизация компрессора предназначена для оптимизации газодинамических и прочностных характеристик компрессора на различных режимах его работы путем перепуска части воздуха через специальные клапаны перепуска воздуха (КПВ) в процессе запуска, а также для обеспечения регулирования по мощности за счет изменения положения лопаток регулируемого входного направляющего аппарата (ВНА).

Для осуществления указанных функций в системе регулирования и управления двигателем, представленной на [рисунке 2](#), предусмотрены следующие агрегаты:

- агрегат управления АУ-10;
- агрегат управления перепуском АУП-10;
- воздушный редуктор;
- клапаны перепуска воздуха (гидроприводы);
- гидроусилитель ВНА.

2.2.1 Агрегат управления АУ-10

Агрегат управления АУ-10 предназначен для управления механизацией компрессора: поворотом лопаток ВНА, закрытием и открытием КПВ.

Агрегат управления работает совместно с АУП-10, воздушным редуктором, гидроприводами КПВ и гидроусилителем ВНА. Агрегат установлен на нижней половине картера компрессора.

2.2.2 Агрегат управления перепуском АУП-10

Агрегат управления перепуском АУП-10 предназначен для выдачи гидравлической команды на управление КПВ 1 и 5 на определенной приведенной частоте вращения ротора турбокомпрессора. Агрегат установлен на передней опоре.

2.2.3 Воздушный редуктор

Воздушный редуктор установлен на верхней половине картера компрессора и предназначен для понижения давления воздуха, поступающего к синхронизатору мощности СО-40 агрегатов АУ-10 и АУП-10 из-за четырнадцатой ступени компрессора, на заданную величину для управления положением лопаток ВНА и КПВ.

2.2.4 Клапаны перепуска воздуха

Для обеспечения устойчивой работы компрессора на переходных режимах и снижения мощности, потребной на запуск двигателя, в компрессоре предусмотрено устройство для перепуска воздуха.

Перепуск воздуха осуществлен с помощью пяти клапанов, смонтированных на фланцах 5 воздухосборников картера компрессора и закрепленных на них при помощи болтов 2 с шайбами 3, 4 ([рисунок 4](#)). Управление клапанами осуществляется агрегатами управления АУ-10 и АУП-10 системы регулирования двигателя.

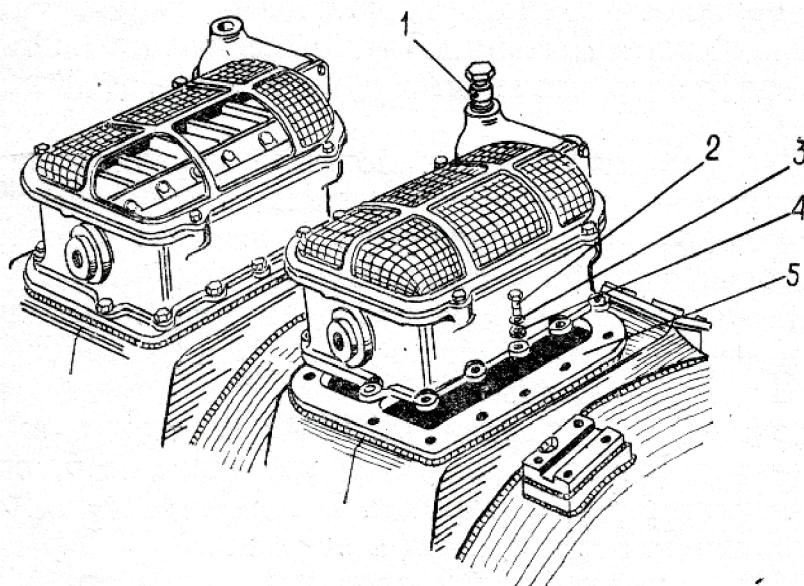


Рисунок 4 - Установка КПВ на картере компрессора

1 – полный болт подвода масла к гидроприводу КПВ; 2 – болт; 3,4 – шайбы;
5 – фланец.

На верхней половине картера смонтированы два клапана, осуществляющие перепуск воздуха в атмосферу из пятой и шестой ступеней, из восьмой и девятой ступеней (каждый клапан перепускает воздух одновременно из двух ступеней).

На нижней половине картера смонтированы три клапана, из которых два осуществляют перепуск из пятой и шестой ступеней и один — из восьмой и девятой ступеней.

КПВ по конструкции делятся на две группы: одну группу составляют первый и пятый КПВ, другую — второй, третий и четвертый КПВ.

2.2.5 Гидроусилитель входного направляющего аппарата

Регулируемый ВНА предназначен для обеспечения устойчивой работы компрессора в процессе запуска и расширения диапазона рабочих режимов двигателя за счет изменения угла установки всех лопаток на входе в компрессор позволяет обеспечить оптимальные условия для работы первой ступени компрессора. Положением лопаток ВНА в зависимости от режима работы двигателя управляет агрегат управления АУ-10 системы регулирования двигателя.

Гидроусилитель ВНА установлен на передней опоре и предназначен для изменения угла установки лопаток входного управляющего аппарата двигателя по командам агрегата управления АУ-10.

2.2.6 Работа агрегатов механизации компрессора в системе регулирования и управления двигателе

Рабочее масло P_m к агрегатам механизации компрессора поступает от насоса САР (см. [рисунок 2](#)) под постоянным давлением 3МПа, которое поддерживается редукционным клапаном дозатора газа ДГ-12.

Рабочее масло, поступающее к агрегату АУП-10, проходит через систему из двух последовательно расположенных жиклеров к синхронизатору мощности, формирующему командное масло для управления клапанами перепуска воздуха КПВ 1 и 5. Командное масло поступает от агрегата АУП-10 к золотниковому механизму управления КПВ 1 и 5 агрегата АУ-10.

Рабочее масло, поступающее к агрегату АУ-10, разделяется: одна часть подводится к электрогидравлическому узлу управления КПВ, а другая — через жиклер к синхронизатору мощности системы управления ВНА.

Подвод воздуха к обоим синхронизаторам мощности осуществляется из-за десятой (P_{10}) и четырнадцатой (P_{14}) ступеней компрессора.

Воздух из-за четырнадцатой ступени компрессора перед подачей к синхронизаторам мощности редуцируется воздушным редуктором ($P_{14\text{ред}}$). Мембранные полости синхронизаторов мощности объединены трубопроводами: полость *А* одного — с полостью *Б* другого. Это позволяет для отладки систем управления КПВ 1 и 5 и ВНА пользоваться одним регулировочным элементом — воздушным редуктором.

Во время проведения отладки интервал по приведенной частоте вращения между командами на управление КПВ 1 и 5 и ВНА остается неизменным, так как он задан затяжкой пружин синхронизаторов мощности регулировочными винтами.

Регулировка затяжки пружин синхронизаторов мощности производится при отладке агрегатов АУ-10 и АУП-10. Поэтому регулировка системы управления КПВ

и ВНА в составе двигателя заключается в отладке только оборотов открытия КПВ 1 и 5 на приведенной частоте $n_{отк}=(7600+50 \text{ об/мин})$.

Управление КПВ 2, 3, 4 (рисунк 5). При отсутствии напряжения на электромагнитах 2 и 3 золотники 10 и 13 усилием пружин 11 и 12 смещаются в верхнее (по схеме) положение, открывая при этом каналы подвода рабочего масла P_m к гидроприводам клапанов перепуска — КПВ 2, 3, 4 открываются. Для закрытия клапанов необходимо подать напряжение на электромагниты 2 и 3 (ЭМТ-4А).

Штоки электромагнитов, преодолевая усилие пружин 11 и 12, перемещают золотники 10 и 13 (по схеме на [рисунке 5](#)) в нижнее положение, перекрывая подвод рабочего масла к гидроприводам клапанов перепуска — КПВ 2, 3, 4 закрываются.

Напряжение на электромагниты агрегата АУ-10 подается по командам от системы автоматики газоперекачивающего агрегата.

Управление КПВ 1 и 5 (рисунк 5). Управление открытием и закрытием КПВ 1 и 5 производится на определенной приведенной частоте вращения компрессора, в зависимости от соотношения давлений воздуха за десятой и четырнадцатой ступенями компрессора. Датчиком командного давления масла является синхронизатор мощности 16 агрегата АУП-10.

При превышении усилия от давления воздуха в полости А (P_{10}) над усилием затяжки пружины 17 и давлением воздуха в полости В ($P_{14ред}$)

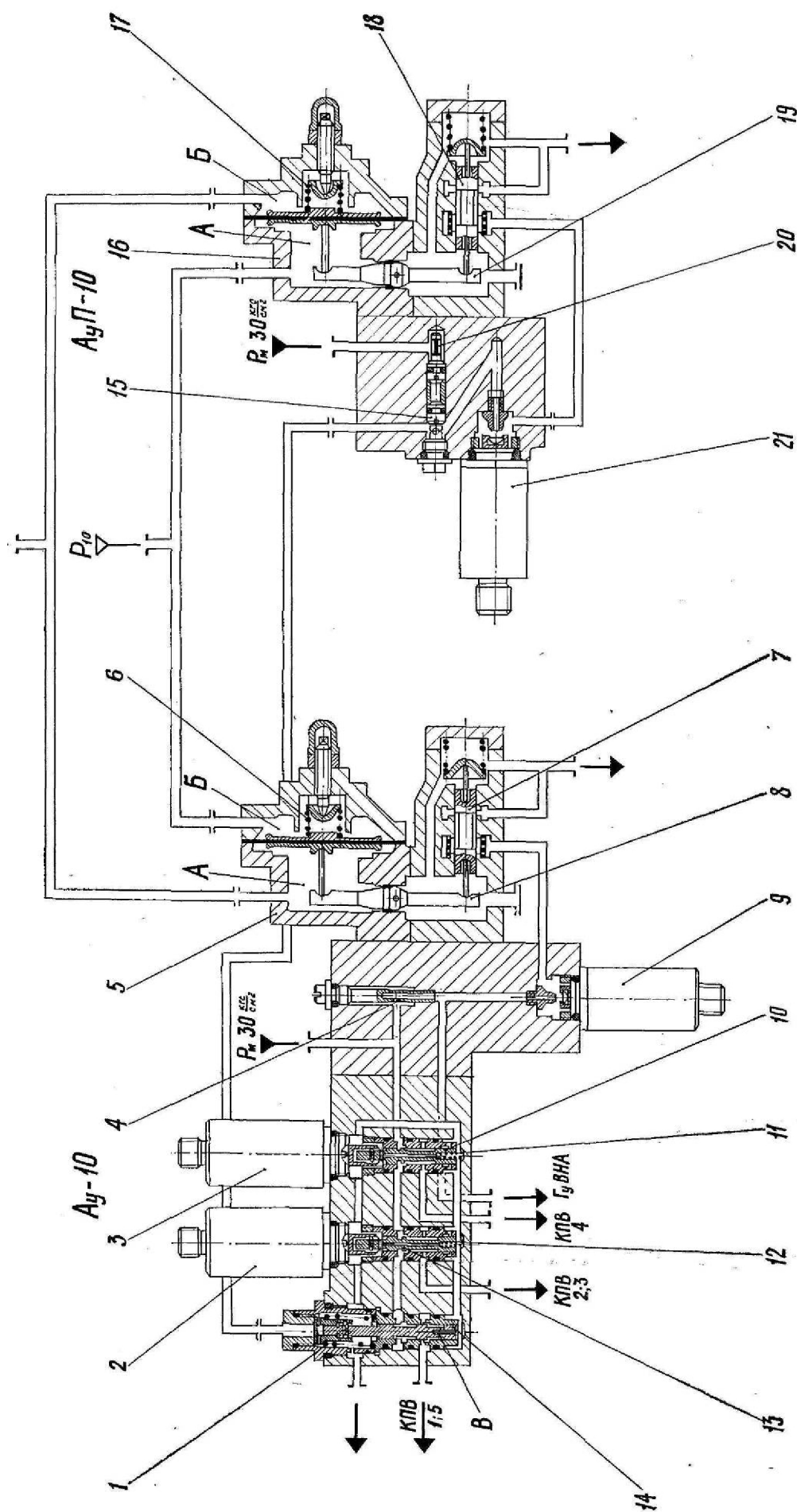


Рисунок 5 - Схема управления КПВ и ВНА

1, 6, 11, 12, 17 – пружина; 2, 3 – электромагнит ЭМТ-4А; 4, 15, 20 – жиклер; 5, 16 – синхронизатор мощности; 7, 10, 13, 14, 18 – золотник; 8, 19 – рычаг; 9, 21 – электромагнит ЭКТ-14; А, Б – воздушные полости синхронизатора мощности; В – отверстия дросселирующие слив масла из гидроприводов КПВ 1 и 5, P_{10} – подвод статического давления за 10 ступенью компрессора; P_{14} – подвод редукционного давления за 14 ступенью компрессора; P_M – подвод масла от системы регулирования двигателя; КПВ →, 5 – отвод масла к КПВ 1 и 5; КПВ2 →, 3 – отвод масла к КПВ 2 и 3, ГувНА – отвод масла к гидроусилителю ВНА; КПВ4 – отвод масла к КПВ4.

мембрана синхронизатора прогибается и перемещает золотник 18 с помощью рычага 19 (по схеме на [рисунке 5](#)) влево. Золотник 18 своей кромкой перекрывает слив масла из канала за жиклерами 15 и 20 — канала, в котором формируется командное давление масла, отводимое к агрегату АУ-10, для управления КПВ 1 и 5. Уменьшение слива приводит к увеличению командного давления. Под действием возросшего командного давления происходит перемещение вниз золотника 14 агрегата АУ-10.

Золотник 14 своими кромками закрывает слив из полости над поршнями гидроприводов КПВ 1 и 5 через отверстия «В» золотника 14 и открывает подвод к ним рабочего масла — КПВ 1 и 5 открываются.

При повышении режима работы двигателя давление воздуха в полости В ($P_{14\text{ред.}}$) возрастает более интенсивно, чем в полости А (P_{10}). Это приводит к перемещению золотника 18 (по схеме на [рисунке 5](#)) вправо. Золотник своей кромкой увеличивает слив масла за жиклерами 15 и 20. Командное давление масла уменьшается до величины давления слива. Золотник 14 агрегата АУП-10 под действием пружины 1 перемещается (по схеме) вверх, отсекая подвод рабочего масла к поршням гидроприводов КПВ 1 и 5 и подсоединяя их к сливу через отверстия В золотника 14. КПВ 1 и 5 закрываются.

Время закрытия КПВ 1 и 5 увеличено до 2...3 секунд за счет дросселирования масла через сечения отверстий В.

Во время запуска двигателя с управлением КПВ 1 и 5 по приведенной частоте компрессора перестройка регулятора частоты вращения турбокомпрессора ОГ-12 заканчивается после полного закрытия КПВ 1 и 5 — по сигналу концевиков «закрытого» положения. В результате этого увеличение времени закрытия КПВ 1 и 5 позволяет после окончания запуска двигателя получить более высокую приведенную частоту вращения компрессора, чем та, на которой происходит открытие КПВ 1 и 5.

Агрегатом предусмотрено принудительное открытие КПВ 1 и 5 и в случае возникновения аварийной ситуации. Для этого на агрегате АУП-10 установлен электромагнитный клапан 21 (МКТ-14). При подаче на него напряжения клапан

отсекает слив масла через золотник 18 синхронизатора мощности 16. Командное давление масла возрастает до величины давления рабочего масла, и КПВ 1 и 5 открываются.

Управление ВНА ([рисунок 5](#)). Изменение угла установки лопаток ВНА компрессора в заданном диапазоне производится по приведенным оборотам ротора турбокомпрессора. В качестве сигнала приведенных оборотов используется соотношение давлений воздуха десятой и четырнадцатой ступеней компрессора. Датчиком командного давления масла, пропорционального отношению давлений воздуха, является синхронизатор мощности СО-40 агрегатов АУ-10 и АУП-10.

Перепад давления воздуха на мембране синхронизатора СО-40 определяет величину командного давления масла и соответственно угол установки лопаток ВНА.

При превышении давления редуцированного воздуха в полости «А» над давлением в полости «Б» мембрана синхронизатора СО-40 прогибается и перемещает золотник 7 через рычаг 8 (по схеме на [рисунке 5](#) влево). Это приводит к увеличению давления масла, подводимого к гидроусилителю ВНА, за счет уменьшения слива через отверстия во втулке 16 синхронизатора мощности СО-40.

Повышение величины давления масла приводит к перемещению поршня гидроусилителя ВНА, а через привод — к изменению угла установки лопаток ВНА.

При снижении режима работы двигателя давление воздуха в полости «А» синхронизатора уменьшается. Это приводит к перемещению золотника 7 на увеличение слива масла, а поршня гидроусилителя ВНА — на увеличение угла установки лопаток ВНА.

Перекладку лопаток ВНА в диапазоне от угла 28 град, («закрыт») до угла 16 град, («открыт») в процессе работы двигателя обеспечивает синхронизатор мощности СО-40.

Для обеспечения угла установки лопаток ВНА в положение «открыт» (угол 16 град.) при запуске и остановке в агрегате предусмотрен электромагнитный клапан 9 (МКТ-14).

При подаче напряжения на электромагнит якорь магнита перемещает запорное устройство и перекрывает подвод масла через седло к золотнику 7 синхронизатора. В результате этого прекращается слив масла и нарастает давление масла, подводимого к гидроусилителю ВНА, поршень которого перемещается до упора.

После выхода двигателя на режим малого газа (и после полного останова) напряжение с электромагнита снимается, и полость гидроусилителя сообщается со сливом через золотник СО-40. Лопатки ВНА устанавливаются на угол 28 град.

Агрегаты механизации управления ВНА настраиваются на обеспечение начала перекладки лопаток ВНА (с угла 28 град.) при частоте вращения ротора турбокомпрессора $n_{\text{ТК}}=7700$ об/мин. Заканчивается перекладка (до угла 16 град.) при $n_{\text{ТК}}=8000$ об/мин. Обратная перекладка (с 16 град, на 28 град.) должна заканчиваться при $n_{\text{ТК}}=7700$ об/мин.

3 УРАВНЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ЗВЕНЬЕВ САР

3.1 Уравнение ротора свободной турбины.

При выводе этого уравнения принимаем следующие основные допущения: влияние объемов по воздушно-газовому тракту незначительно, потери мощности на трение и привод агрегатов пренебрежимо малы по сравнению с мощностью, снимаемой со свободной турбины на привод нагнетателя, изменение параметров на установившемся режиме очень малое. В соответствии с вышеперечисленными допущениями уравнение движения ротора свободной турбины примет вид:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{dn}{dt} = M_{\text{СТ}}(p_{\text{T}}; T_{\text{T}}; n_{\text{СТ}}) - M_{\text{Н}}(p_{\text{ТР}}; Q_{\text{ТР}}; n_{\text{Н}}) \quad (3.1)$$

где: I - момент инерции ротора свободной турбины совместно с нагнетателем; $M_{\text{СТ}}(p_{\text{T}}; T_{\text{T}}; n_{\text{СТ}})$ - момент, развиваемый свободной турбиной; $M_{\text{Н}}(p_{\text{ТР}}; Q_{\text{ТР}}; n_{\text{Н}})$ - момент, потребляемый нагнетателем.

Уравнение (3.1) нелинейно, однако при малых отклонениях параметров возможна линеаризация путем разложения нелинейных зависимостей в ряд Тейлора и удержания первых членов ряда.

$$M_{CT}(p_T; T_T; n_{CT}) = M_{CTO} + \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial p_T} \right)_0 \Delta p_T + \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial T_T} \right)_0 \Delta T_T + \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}} \right)_0 \Delta n_{CT}. \quad (3.2)$$

$$M_{CT}(p_T; Q_{TP}; n_H) = M_{HO} + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_{TP}} \right)_0 \Delta p_{TP} + \left(\frac{\partial M_H}{\partial Q_{TP}} \right)_0 \Delta Q_{TP} + \left(\frac{\partial M_H}{\partial n_H} \right)_0 \Delta n_H$$

Из конструкции привода нагнетателя можно заметить, что частота вращения нагнетателя и свободной турбины одна и та же, т.к. привод не осуществляется прямой механической связью без посредства редуктора, то есть $n_{CT} = n_H$.

В уравнениях (3.2) имеем:

$$\Delta n_{CT} = \Delta n_H = n_{CT} - (n_{CT})_0; \quad \Delta p_T = p_T - (p_T)_0; \quad \Delta T_T = T_T - (T_T)_0;$$

$$\Delta p_{TP} = p_{TP} - (p_{TP})_0; \quad \Delta Q_{TP} = Q_{TP} - (Q_{TP})_0;$$

отклонения частоты вращения, давления и температуры за турбиной, а также давления и расхода в магистральном трубопроводе за нагнетателем.

Имея в виду, что на установившемся режиме справедливо равенство

$$(M_T)_0 + (M_H)_0 = 0$$

можно записать уравнение (3.1) с учетом системы (3.2) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{30} I \frac{d\Delta n_{CT}}{dt} = & \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial p_T} \right)_0 \Delta p_T + \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial T_T} \right)_0 \Delta T_T - \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_{TP}} \right)_0 \Delta p_{TP} - \\ & - \left(\frac{\partial M_H}{\partial Q_{TP}} \right)_0 \Delta Q_{TP} + \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}} \right)_0 \Delta n_{CT} - \left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}} \right)_0 \Delta n_{CT} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для общности анализа вводим безразмерные параметры:

$$\delta n_{CT} = \delta n_H = \Delta n_{CT} / (n_{CT})_0; \quad \delta p_T = \Delta p_T / (p_T)_0; \quad \delta T_T = \Delta T_T / (T_T)_0;$$

$$\delta p_{TP} = \Delta p_{TP} / (p_{TP})_0; \quad \delta Q_{TP} = \Delta Q_{TP} / (Q_{TP})_0;$$

с учетом введенных безразмерных параметров уравнение (3.3) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\pi}{30} I \frac{d\delta n_{CT}}{dt} = & \left[\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}} \right)_0 \right] \delta n_{CT} = \frac{(p_T)_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial p_T} \right)_0 \delta p_T + \\ & \frac{(T_T)_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial T_T} \right)_0 \delta T_T - \frac{(p_{TP})_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_{TP}} \right)_0 \delta p_{TP} - \frac{(Q_{TP})_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_H}{\partial Q_{TP}} \right)_0 \delta Q_{TP} \end{aligned}$$

или в стандартной форме:

$$T_4 \frac{d\delta n_{CT}}{\delta t} + \delta n_{CT} = K_5 \times \delta p_T + K_4 \times \delta T_T - K_8 \times \delta p_{TP} - K_7 \times \delta Q_{TP},$$

где:

$$T_4 = \frac{\pi/30 \times I}{\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}}\right)_0} - \text{постоянная времени турбоагнетателя};$$

$$K_5 = \frac{\frac{(p_T)_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial p_T}\right)_0}{\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}}\right)_0} - \text{коэффициент усиления по давлению за турбиной}$$

турбокомпрессора;

$$K_4 = \frac{\frac{(T_T)_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial T_T}\right)_0}{\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}}\right)_0} - \text{коэффициент усиления по температуре за турбиной}$$

турбокомпрессора;

$$K_8 = \frac{\frac{(p_{TP})_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_{TP}}\right)_0}{\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}}\right)_0} - \text{коэффициент усиления по давлению в магистральном}$$

трубопроводе;

$$K_7 = \frac{\frac{(Q_{TP})_0}{(n_{CT})_0} \times \left(\frac{\partial M_H}{\partial Q_{TP}}\right)_0}{\left(\frac{\partial M_H}{\partial n_{CT}}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{CT}}{\partial n_{CT}}\right)_0} - \text{коэффициент усиления по расходу в магистральном}$$

трубопроводе.

Все коэффициенты рассчитываем по моментным характеристикам двигателя [5].

3.2 Уравнение турбокомпрессора

При выводе уравнения турбокомпрессора принимаем те же допущения, что и при выводе уравнения свободной турбины, за тем исключением, что с турбокомпрессора не снимается мощность на привод нагнетателя, а мощность, снимаемая на привод агрегатов пренебрежимо мала.

Уравнение движения ротора турбокомпрессора имеет вид:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{dn}{dt} = M_T(p_T; G_T; n_{TK}) - M_K(p_{TP}; p_B; T_B) \quad (3.4)$$

где I - момент инерции ротора турбокомпрессора, M_T - момент, развиваемый турбиной, M_K - момент, потребляемый компрессором.

Уравнение (3.4) нелинейно. При малых отклонениях линеаризуем его путем разложения нелинейных зависимостей в ряд Тейлора и удержанием первых членов.

$$M_T(p_T; G_T; n_{TK}) = M_{T0} + \left(\frac{\partial M_T}{\partial p_T} \right)_0 \Delta p_T + \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T + \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_{TK}} \right)_0 \Delta n_{TK} \quad (3.5)$$

$$M_K(p_B; T_B; n_{TK}) = M_{K0} + \left(\frac{\partial M_K}{\partial p_B} \right)_0 \Delta p_B + \left(\frac{\partial M_K}{\partial T_B} \right)_0 \Delta T_B + \left(\frac{\partial M_K}{\partial n_{TK}} \right)_0 \Delta n_{TK}$$

где: $\Delta n_{TK} = n_{TK} - (n_{TK})_0$; $\Delta p_T = p_T - (p_T)_0$; $\Delta G_T = G_T - (G_T)_0$;

$\Delta p_B = p_B - (p_B)_0$; $\Delta T_B = T_B - (T_B)_0$; - отклонения частоты вращения

турбокомпрессора, температуры и давления газа перед турбиной и температура и давление наружного воздуха.

Индекс "0" указывает на принадлежность значений параметров к базисным (установившимся).

На установившемся режиме справедливо следующее:

$M_{T0} - M_{K0} = 0$, приращения p_B и T_B ничтожно малы, значит можно переписать

уравнение (3.4) с учетом равенств (3.5) в виде:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d\Delta n_{CT}}{dt} = \left(\frac{\partial M_T}{\partial p_T} \right)_0 \Delta p_T + \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_{TK}} \right)_0 \Delta n_{TK} - \left(\frac{\partial M_K}{\partial n_{TK}} \right)_0 \Delta n_{TK} \quad (3.6)$$

Для общности анализа вводим безразмерные параметры:

$$\partial n_{TK} = \Delta n_{TK} / (n_{TK})_0; \quad \partial p_T = \Delta p_T / (p_T)_0; \quad \partial G_T = \Delta G_T / (G_T)_0;$$

с учетом этих параметров уравнение (3.6) примет вид:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{\partial \delta_{TK}}{\partial t} + \left[\left(\frac{\partial M_k}{\partial n_{TK}} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_{TK}} \right)_0 \right] \partial n_{TK} = \frac{(P_T)_0}{(n_{TK})_0} \times \left(\frac{\partial M_T}{\partial P_T} \right)_0 \delta P_T + \frac{(G_T)_0}{(n_{TK})_0} \times \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \delta G_T$$

Или в стандартной форме:

$$T_3 \frac{d\partial n_{TK}}{\partial t} + \partial n_{TK} = K_3 \times \delta p_T + K_4 + \delta G_T \quad (3.7)$$

где:

$$K_3 = \frac{\frac{(P_T)_0}{(n_{TK})_0} \times \left(\frac{\partial M_T}{\partial P_T} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_k}{\partial n_{TK}} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_{TK}} \right)_0} - \text{коэффициент усиления по давлению.}$$

$$K_4 = \frac{\frac{(G_T)_0}{(n_{TK})_0} \times \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_k}{\partial n_{TK}} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_{TK}} \right)_0} - \text{коэффициент усиления по расходу топлива.}$$

Коэффициент σ постоянную времени находим из моментных характеристик двигателя [5].

3.3 Уравнение дозатора газа

При выводе уравнения предполагается, что течение жидкости через жиклеры ламинарное, и силы трения во всех парах пренебрежимо малы. Тогда дозатор газа можно описать уравнениями баланса расходов и сил.

$$\begin{cases} Q_{Ж} = \mu \times F_{Ж} \sqrt{2/\rho \times (P_{КОМ} - P_C)} \\ Q_{ДВ} = F_C \frac{dh_{ДВ}}{dt} \\ Q_{Ж} = Q_{ДВ} F_C P_C = R_{ДВ} + h_T \end{cases} \quad (3.8)$$

где:

$Q_{Ж}$ - расход рабочей жидкости через жиклер;

$Q_{ДВ}$ - расход рабочей жидкости, обусловленный движением дозирующей иглы, приводимой от сильфона;

μ - коэффициент расхода жиклера на входе в сиффон;

$F_{\text{ж}}$ - площадь проходного сечения жиклера;

ρ - плотность рабочей жидкости;

$P_{\text{с}}$ - давление в сиффонной полости;

$R_{\text{пр}}$ - усилие предварительной затяжки пружины, установленной в сиффоне;

γ - суммарная жесткость сиффона и пружины.

Решая систему (3.8) и переводя ее в приращения, получаем следующую систему:

$$\begin{cases} \Delta Q_{\text{ж}} = K_1 \Delta P_{\text{ком}} - K_2 \Delta P_{\text{с}} \\ \Delta Q_{\text{дв}} = K_3 S \Delta h \\ \Delta P_{\text{с}} = K_4 \Delta h \end{cases} \quad (3.9)$$

Подставив члены одного уравнения в другое, получаем:

$$K_3 S \Delta h = K_2 K_4 \Delta h$$

или:

$$\frac{K_3}{K_2 K_4} S \Delta h + \Delta h = \frac{K_1}{K_2 K_4} \Delta P_{\text{ком}} \quad (3.10)$$

Переходя к безразмерным параметрам вводим: $\delta h = \Delta h / (h)_0$; $\delta P = \Delta P_{\text{ком}} / (P_{\text{ком}})_0$ и получаем:

$$T \frac{d\delta h}{dt} + \delta h = K_1 \delta P_{\text{ком}} \quad (3.11)$$

где:

K_1 - коэффициент усиления дозатора газа. Рассчитываемый по конструктивным параметрам узла привода ДГ 12 13.

3.4 Уравнение нагнетателя

При выводе уравнения нагнетателя принимаем, что потери на трение малы и что вся энергия, подведенная к нагнетателю идет на повышение давления в газопроводе. Зависимость давления на выходе из нагнетателя от оборотов его вала имеет форму кривой и зависит от многих факторов, в частности от степени

загруженности крыльчатки, которая в свою очередь тоже зависит от оборотов входного вала.

В условиях установившегося режима можно считать, что частота вращения вала привода нагнетателя и давление на его выходе постоянны. При малых приращениях имеем линейную зависимость:

$$\Delta P = K \Delta n_{CT} \quad (3.12)$$

Переходя к безразмерным параметрам:

$$\delta P = \Delta P / (P)_0, \quad \delta n_{CT} = \Delta n_{CT} / (n_{CT})_0$$

С учетом этого уравнение (3.12) примет следующий вид:

$$\delta P = \frac{K_0 P_0}{(n_{CT})_0} \delta n_{CT}$$

или в стандартной форме:

$$\delta P = K_0 \delta n_{CT} \quad (3.13)$$

где K - коэффициент усиления по частоте вращения. Он рассчитан по расходным характеристикам нагнетателя [5].

3.5 Уравнение дозирующей иглы

Уравнение дозирующей иглы, связывающее массовый расход топлива с перемещением дозирующей иглы определяется зависимостью:

$$Q_T = \mu_{ди} S_{ди}$$

Где $\mu_{ди}$ - коэффициент, $S_{ди}$ - площадь проходного сечения.

Линеаризуя методом разложением в ряд Тейлора получим:

$$\delta Q_T = \delta S_{ди} \quad (3.14)$$

где: $\delta S_{ди} = \Delta S_{ди} / (S_{ди})_0$

Относительное приращение площади проходного сечения, связано с относительным перемещением дозирующей иглы следующей зависимостью:

$$\delta S_{ди} = \frac{dS_{ди}}{dh_{ди0}} \times \frac{(h_{ди})_0}{(S_{ди})_0} \delta h_{ди} \quad (3.15)$$

Из совместного решения уравнений (3.14) и (3.15) можно определить линеаризованное уравнение дозирующей иглы:

$$\delta Q_T = K_2 \delta h_{\text{ДП}} \quad (3.16)$$

где $K_2 = \frac{dS_{\text{ДП}}}{dh_{\text{ДП}}} \times \frac{(h_{\text{ДП}})_2}{(S_{\text{ДП}})_0}$ – коэффициент передачи дозирующей иглы.

Этот коэффициент находим из характеристик дозатора газа [5].

3.6 Уравнение сервопоршня привода золотника

Движение сервопоршня можно описать следующим уравнением.

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{движ}} + Q_{\text{сл}} \quad (3.17)$$

где: $Q_{\text{вх}}$ – расход рабочей жидкости на входе гидроцилиндра

$Q_{\text{движ}}$ – расход рабочей жидкости, обусловленный движением сервопоршня в цилиндре

$Q_{\text{сл}}$ – расход рабочей жидкости, уходящей на слив через жиклер в поршне.

Распишем эти уравнения:

$$\begin{aligned} Q_{\text{движ}} &= F_n \times \frac{dh_n}{dt} \\ Q_{\text{вх}} &= \mu \times F_{\text{жс}} \sqrt{2 / \rho \times (P_{\text{кпд}} - P_{\text{П}})} \\ Q_{\text{сл}} &= \mu_{\text{жс}} \times F_{\text{жс}} \sqrt{2 / \rho \times (P_{\text{П}} - P_{\text{сл}})} \end{aligned} \quad (3.18)$$

где μ – коэффициент расхода жиклера на входе в сильфон;

$F_{\text{жс}}$ – площадь проходного сечения жиклера;

ρ – плотность рабочей жидкости;

$P_{\text{П}}$ – давление в поршневой полости;

$P_{\text{кпд}}$ – давление за клапаном постоянного давления;

$P_{\text{сл}}$ – давление в сливной магистрали.

Решая систему (3.18) и переводя ее в приращения, получаем следующую систему:

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{сл}} &= K_1 \cdot \Delta P_{\text{П}} \\ \Delta Q_{\text{движ}} &= K_2 \cdot S \Delta h \\ \Delta Q_{\text{вх}} &= K_3 \cdot \Delta P_{\text{П}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Подставив члены одного уравнения в другое, получаем:

$$K_2 \cdot S \Delta h = (K_1 - K_3) \Delta P_{\text{П}}$$

или:

$$\frac{K_2}{K_1 - K_3} \cdot S \Delta h = \Delta P_{II} \quad (3.20)$$

Переходя к безразмерным параметрам вводим: $\delta h = \Delta h / (h)_0$; $\delta P_{II} = \Delta P_{II} / (P_{II})_0$ и получаем:

$$T_I \frac{d\delta h}{dt} = \delta P_{II} \quad (3.21)$$

где $T_I = \frac{K_2}{K_1 - K_3}$ постоянная времени гидроцилиндра.

Получили уравнение интегрирующего звена, которым и является сервопоршень. Постоянную времени T_I вычисляем с помощью результатов предыдущих расчетов.

3.7 Уравнение газопровода

Давление в газопроводе можно описать уравнением следующего вида:

$$P = Q \times Z \quad (3.22)$$

где: Z - комплексное входное сопротивление трубопровода. Его величину можно определить из уравнения:

$$Z = R + 1 / (c_{\Gamma} \cdot S) \quad (3.23)$$

где: R - активная составляющая;

$1 / (c_{\Gamma} \cdot S)$ - реактивная составляющая входного сопротивления трубопровода, обусловленная его емкостью.

$$R = 2 \Delta P_0 / Q_0 \quad (3.24)$$

где: $\Delta P = 26 \text{ кгс/см}^2$ - падение давления на протяженности ветки газопровода.

$$Q_0 = 10 \text{ млн м}^3 / \text{сут} = 116 \text{ м}^3 / \text{сек} \quad R = 52 / 116 = 0,4483.$$

Акустическая емкость трубопровода:

$$c_{\Gamma} = V_{TP} / \rho c^2 \quad (3.25)$$

где: $c^2 = P / \rho$ скорость звука в среде газа, $V_{TP} = 39270 \text{ м}^3$ - объем трубопровода при его длине 50 км. Тогда, зная что номинальная величина давления в трубопроводе $P = 56 \text{ кгс/см}^2$ получаем:

$$c_{\Gamma} = 39270 / 56 = 701$$

Приращение расхода через нагнетатель равно:

$$\Delta Q_1 = (c_r \frac{dP}{dt} + \Delta P / R) \quad (3.26)$$

Решая совместно (3.22) и (3.26) в безразмерных параметрах получаем:

$$\delta P = K_g / (T_s S + 1) \delta Q \quad (3.27)$$

где $K_g = R = 0,4483$ - коэффициент усиления трубопровода,

$T_s = R c_2 = 314 \text{ с} = 5,2 \text{ мин}$ - постоянная времени трубопровода.

Но кроме того давление в трубопроводе зависит от частоты вращения входного вала:

$$\Delta Q_2 = K_{10} \Delta n \quad (3.28)$$

Переходя к малым отклонениям получаем:

$\delta Q = \Delta Q / Q_0$; $\delta n = \Delta n / n_0$; и тогда уравнение (3.28) примет вид:

$$\delta Q_2 = K_{10} \delta n$$

Коэффициент усиления K_{10} берем из напорных характеристик нагнетателя [6].

3.8 Моделирование переходных процессов в САР

Структурная схема САР представлена на [рисунке 6](#). Принцип ее построения заключается в том, что каждый элемент представлен в виде блока, который имеет вход и выход и описывается своей передаточной функцией так, что если входной сигнал $X_{вх}$ умножить на эту функцию, то получается сигнал выхода $X_{вых}$. Последовательность звеньев на схеме совпадает с последовательностью звеньев реальной САР.

Значения коэффициентов и постоянных времени для различных режимов работы приведены в [таблице 3.1](#). Блок 3 имитирует ограничение перемещения поршня привода золотника. Подавая ступенчатый сигнал на вход блока 2 мы тем самым, имитируем подачу напряжения на МКТ задатчика, находящийся на входе в гидроцилиндр.

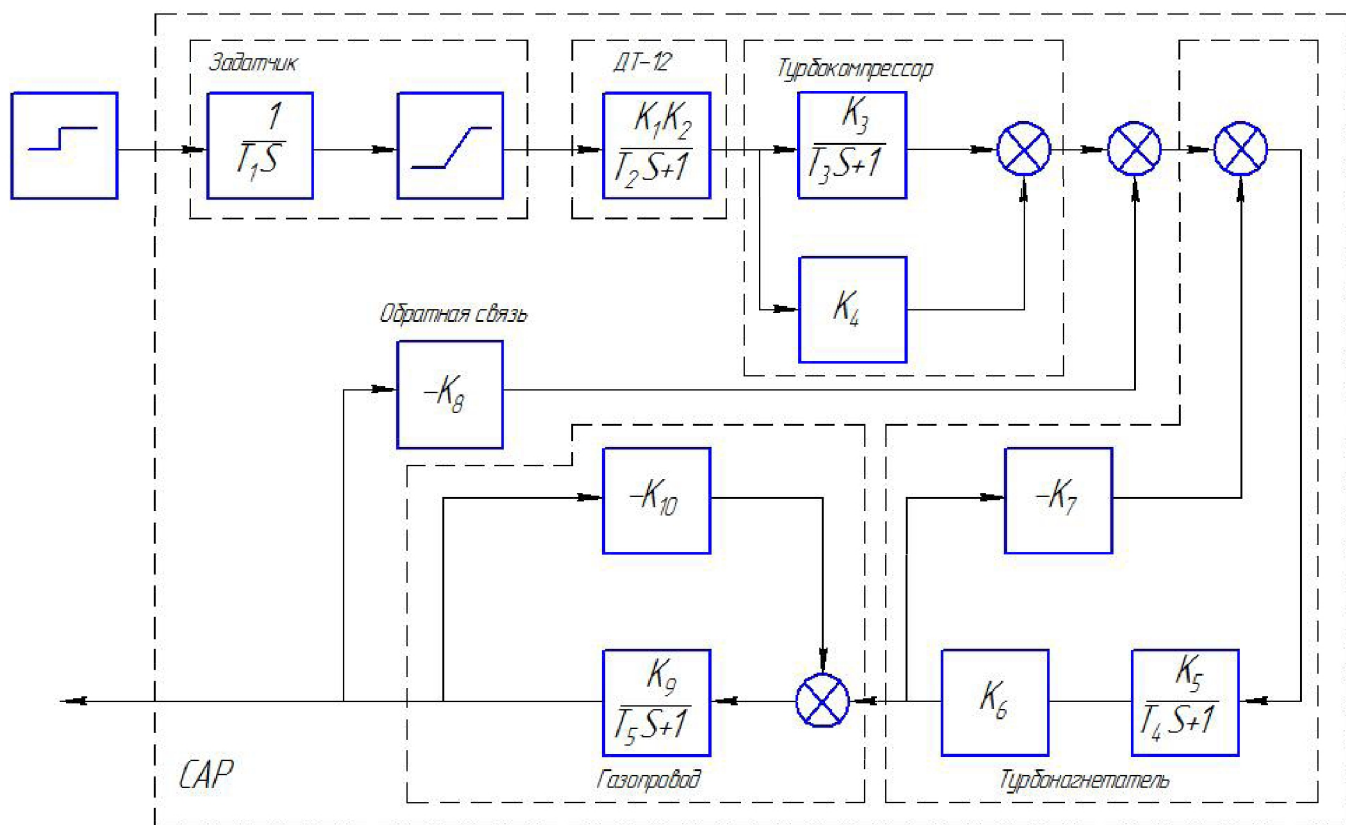


Рисунок 6 - Структурная схема системы автоматического регулирования

Таблица 3.1 - Значение коэффициентов и постоянных времени звеньев САР в зависимости от режима регулирования.

Коэф.	Режим					
	Наполн.	Раб.	Авар.	Мг.	Ном.	Макс.
K1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K2	1	1	1	1	1	1
K3	10	10	10	10	10	10
K4	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
K5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
K6	1	1	1	1	1	1
K7	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
K8	-1	-1	-1	-1	-1	-1
K9	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
K10	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3
T1	4	4	-	4	4	4
T2	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
T3	2	2	2	6	4	2
T4	2	2	2	8	5	2
T5	314	314	314	314	314	314

4 ОПИСАНИЕ ОВЕН ПЛК-150

Программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК-150 предназначен для создания систем автоматизированного управления ([рисунок 7](#)).

Логика работы ПЛК-150 определяется потребителем в процессе программирования контроллера.



Рисунок 7 – Программируемый логический контроллер ОВЕН - 150

Контроллер ОВЕН ПЛК-150 эксплуатируется при следующих условиях:

- закрытые взрывобезопасные помещения или шкафы электрооборудования без агрессивных паров и газов;
- температура окружающего воздуха от минус 20°C до +70°C;
- верхний предел относительной влажности воздуха – 80 % при 25°C и более низких температурах без конденсации влаги;

По устойчивости к климатическим воздействиям при эксплуатации ПЛК-150 соответствует группе исполнения В4 по ГОСТ 12997&84.

По устойчивости к механическим воздействиям при эксплуатации ПЛК150 соответствует группе исполнения N2 по ГОСТ 12997.

ОВЕН ПЛК-150 - современный контроллер, обладающий большими вычислительными ресурсами и развитой структурой интерфейсов (RS-232, RS-485, Ethernet 100 и USB), что позволило бы применять его во многих областях промышленности, а также обеспечивало лёгкую интеграцию контроллера в различные сети, возможность подключения к нему оборудования, расширение количества входов/выходов и многое другое.

Вторым важным аспектом были простота и удобство программирования контроллера. Для достижения этого компания ОВЕН заключила партнёрские соглашения с немецкой компанией 3S-Software и приобрела среду программирования CoDeSys – лучшую на сегодня в мире среду программирования ПЛК.

И, в-третьих, контроллер ОВЕН соответствует российским и мировым стандартам, имеет расширенный температурный диапазон, высокую степень помехозащищённости.

Программирование осуществляется с помощью системы программирования CoDeSys.

Контроллеры спроектированы в соответствии с требованиями стандартов IEC 6'1131'2 и ГОСТ Р 51840'2001 и прошли комплекс испытаний в отделе тестирования компании ОВЕН на климатические, вибрационные, ударные воздействия, а также в условиях различных электромагнитных и импульсных помех по портам питания и ввода-вывода. Результаты исследований внесены в протоколы испытаний и подтверждают соответствие заявленным стандартам. В настоящее время контроллеры проходят испытания и сертификацию в независимых экспертных организациях. Диапазон рабочих температур составляет от -20 до $+70$ °С, что обеспечивает возможность установки вне отапливаемых помещений без ухудшения технических характеристик. Сохранность подключенного к контроллеру оборудования обеспечивается наличием гальванической изоляции (четыре развязки на 1500 В между узлами). Если, к примеру, из-за ошибки монтажа на дискретный вход будет подано напряжение 380 В, то выйдет из строя только этот порт. Остальные узлы контроллера останутся невредимыми, также будет сохранено и прочее оборудование, подключенное к ПЛК.

Программируемые логические контроллеры ОВЕН построены на базе высокопроизводительного RISC процессора архитектуры семейства ARM. Используемый процессор работает на тактовой частоте 200 МГц. Учитывая, что в приборах ОВЕН ПЛК нет операционной системы, которая может потреблять до 30% вычислительных ресурсов, то с уверенностью можно сказать, что программируемым логическим контроллерам компании ОВЕН посильно решение сложных вычислительных задач в минимальное время. Для оценки: цикл типовой программы по обработке 100 дискретных точек ввода/вывода ПЛК выполняет за 1 мс. Кроме того отсутствие операционной системы, которая часто грешит зависаниями, обеспечивает высокую надёжность работы программной части ОВЕН ПЛК

5 ОПИСАНИЕ СРЕДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ CoDeSys

CoDeSys - это современный инструмент для программирования контроллеров (CoDeSys образуется от слов Controllers Development System).

CoDeSys предоставляет программисту удобную среду для программирования контроллеров на языках стандарта МЭК 61131-3. Используемые редакторы и отладочные средства базируются на широко известных и хорошо себя зарекомендовавших принципах, знакомых по другим популярным средам профессионального программирования (такие, как Visual C++).

Первый программный компонент (POU – Program Organization Unit) помещается в новый проект автоматически и получает название PLC_PRG. Именно с него и начинается выполнение процесса (по аналогии с функцией main в языке C), из него будут вызываться другие программные блоки (программы, функции и функциональные блоки). Нет необходимости писать вручную текст для PLC_PRG, поскольку конфигурация задачи определяется на вкладке проекта Task Configuration.

Проект содержит ряд разнородных объектов POU, данных разных типов, элементов визуализации и ресурсов. Можно наблюдать значения переменных в программных компонентах. Используя менеджер просмотра и заказа значений переменных (короче, менеджер рецептов) Watch and Receipt Manager, вы сможете задать список переменных, значения которых необходимо наблюдать.

Отладка.

В случае ошибок в работе кода вы можете задать точки останова. Когда процесс остановлен в определенной точке, вы можете просмотреть значения переменных проекта в данный момент времени. Выполняя проект в пошаговом режиме (single step), вы можете проверить логическую корректность своих программ.

Дополнительные возможности режима Online.

В процессе отладки вы можете устанавливать значения переменных программ, задавать фиксированные значения на входы и выходы контроллера, контролировать последовательность исполнения процесса и определить место в программе, которое сейчас выполняется. Используя трассировку (Sampling Trace), отслеживать в

графическом представлении изменения значений переменных за определенный промежуток времени.

Когда проект закончен и отлажен, переходите к окончательной доводке в рабочих условиях на реальном "железе". Естественно, при этом полностью доступны все отладочные функции.

Дополнительные возможности CoDeSys

Весь проект может быть экспортирован в текстовый файл и сохранен в печатном виде. Средства коммуникации CoDeSys включают символьный и DDE интерфейсы. Коммуникационный сервер, OPC и DDE серверы входят в стандартный пакет поставки. Путем выбора целевой платформы CoDeSys позволяет использовать один проект в различных системах. Сетевые переменные общего доступа и Менеджер параметров обеспечивают средства сетевого взаимодействия контроллеров. ENI: инжиниринговый интерфейс применяется совместно с любыми системами управления версиями через автономный ENI сервер. Программные компоненты CoDeSys сохраняются в единой базе данных, доступной другим пользователям. ENI сервер служит хранилищем конструкторских данных не только для CoDeSys, но и для сторонних программных инструментов.

CoDeSys позволяет задействовать «фирменные» программные инструменты. Файлы, включающие исполняемый код, могут быть скомпонованы с кодом проекта и загружены в контроллер.

Созданная в CoDeSys визуализация может выполняться не только в среде программирования, но и в целевой платформе или в Web. Это позволяет контролировать процесс и управлять им через Интернет.

6 КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АГРЕГАТОВ

Агрегаты запуска.

Стартер воздушный ВС-12. Турбина, работающая на энергии сжатого газа. Используется для раскрутки ротора газогенератора. Связь с ротором через обгонную муфту.

Заслонка стартера. Управляемая механизмом МПК-17 заслонка служит для включения подачи газа на ВС-12. После подачи напряжения на электромеханизм заслонка поворачивается до полного открытия. В МПК-17 находится концевой выключатель открытого положения заслонки. После снятия напряжения заслонка закрывается под действием пружины.

Система зажигания. В камере сгорания установлены запальники подвода пускового газа с эрозионными полупроводниковыми свечами. По сигналу включения зажигания подается напряжение на агрегаты зажигания и э. магниты включения пускового газа.

Механизация компрессора

Клапана перепуска воздуха. При работе компрессора на нерасчетных режимах используются КПВ (противопомпажная защита). На оборотах до 4500 нужно открывать КВП 2,3,4 для чего подать напряжение на электромагниты агрегата АУ-10. На оборотах выше 4500 необходимо подать напряжение на электромагнит агрегата АУП-10 для перевода 1 и 5 КПВ под управление гидропневматической системы. Все КПВ снабжены концевыми выключателями открытого и закрытого положения.

Датчики

Сигнализатор помпажа ПС-2-7. При помпажном срыве потока воздуха в компрессоре выдает электрический сигнал.

Центробежный выключатель ВЦ-22. Выдает электрические сигналы (отключает от «земли» - нормально замкнутая схема) при достижении турбокомпрессором 1900 (ступень «3») и 4500 (ступень «ТС») об/мин.

Агрегаты регулирования подачи топлива

Дозатор газа ДГ-12 включает:

Автомат запуска. Гидромеханическое устройство плавного увеличения расхода топлива на запуске. Для выключения подачи газа через узел нужно подать напряжение на электромагнит «А3» дозатора.

Дозатор основного топлива. Аналогичный АЗ узел, но с большим расходом. Расход топлива через этот узел может быть уменьшен по гидравлической команде от

агрегата ОГ-12. Также для выключения подачи газа через узел нужно подать напряжение на э. магнит «ОТ» дозатора.

Ограничитель оборотов ОГ-12. Выдает гидравлический сигнал на перекрытие подачи основного топлива в камеру сгорания при достижении турбокомпрессором установленных оборотов. Перестройка оборотов срабатывания производится электромеханизмом МПК-14. О минимальном и максимальном положении регулятора сигнализирует концевой выключатель механизма (МПК на упоре).

Стопорный клапан. Электропневматическое устройство предназначено для быстрого перекрытия топлива в КС двигателя.

7 ОПИСАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ САР ДВИГАТЕЛЯ

7.1 Холодная прокрутка (ХП)

1. Снять напряжение с электромагнита АУП-10 управления клапанами 1, 5. (Для открытия КПВ 1 и 5).
2. Подать напряжение на электромагниты АУ-10 управления клапанами 2, 3 и 4. (Для открытия КПВ 2, 3 и 4).
3. Подать напряжение на электромагнит смазки воздушного стартера. Подать напряжение на электромеханизм МПК-17 для открытия заслонки подвода газа к воздушному стартеру. (Кнопка «Стартер»).
4. Задержка 120 секунд.
5. Снять напряжение с электромеханизма МПК-17 заслонки ВС. Снять напряжение с электромагнита подачи смазки в ВС. (Кнопка «Стартер»).
6. Подать напряжение на электромагнит АУП-10 управления клапанами 1, 5. (Для закрытия КПВ 1 и 5).
7. Снять напряжение с электромагнитов АУ-10 управления клапанами 2, 3 и 4. (Для закрытия КПВ 2, 3 и 4).

7.2 Горячий запуск (ГЗ)

1. Перевести настройку регулятора ОГ-12 в минимальное положение.

2. Снять напряжение с электромагнита АУП-10 управления клапанами 1, 5.
3. Подать напряжение на электромагниты АУ-10 управления клапанами 2, 3 и
4. Подать напряжение на электромагнит смазки воздушного стартера. Подать напряжение на электромеханизм МПК-17 для открытия заслонки подвода газа к воздушному стартеру. (Кнопка «Стартер»).
5. При достижении турбокомпрессором частоты вращения **1900 об/мин** (срабатывание ВЦ-22 «З»):
 - a. Снять напряжение с электромагнита автомата запуска ДГ-12. (Включить дозатор запуска);
 - b. Подать напряжение на электромагнит стоп клапана. (Открыть стоп клапан).
 - c. Включить агрегат зажигания и электромагнит пускового газа на **10 сек.** (Кнопка «Зажигание»).
6. При достижении турбокомпрессором частоты вращения **4500 об/мин** (срабатывание ВЦ-22 «ТС»):
 - a. Снять напряжение с электромагнита АУ-10 управления клапанами 2, 3 и 4.
 - b. Снять напряжение с электромагнита основного топлива ДГ-12. (Включить подачу основного топлива);
 - c. Снять напряжение с электромеханизма МПК-17 заслонки ВС. Снять напряжение с электромагнита подачи смазки в ВС. (Кнопка «Стартер»).
 - d. Через 15 сек. подать напряжение на электромагнит АУП-10 управления клапанами 1, 5 (клапана вкл. под управление гидромеханической системы).
7. Прогрев двигателя в течении 5 минут.
8. Варьировать режим работы двигателя. (Кнопки «Режим больше» и «Режим меньше»).

7.3 Нормальный останов (НО)

1. Перевести настройку регулятора ОГ-12 в минимальное положение (двигатель перейдет на обороты малого газа).
2. Задержка 5 минут (охлаждение двигателя).
3. Подать напряжение на электромагнит АУП-10 управления клапанами 1, 5.
4. Снять напряжение с электромагнитов АУ-10 управления клапанами 2, 3 и 4.
5. Снять напряжение с электромагнита стоп клапана.
6. Подать напряжение на электромагнит автомата запуска ДГ-12.
7. Подать напряжение на электромагнит основного топлива ДГ-12.

7.4 Аварийный останов (АО)

1. Снять напряжение с электромагнита стоп клапана.
2. Подать напряжение на электромагнит автомата запуска ДГ-12.
3. Подать напряжение на электромагнит основного топлива ДГ-12.
4. Подать напряжение на электромагнит АУП-10 управления клапанами 1, 5.
5. Снять напряжение с электромагнитов АУ-10 управления клапанами 2, 3 и 4.
6. Снять напряжение с электромеханизма МПК-17 заслонки ВС.
7. Выключить агрегат зажигания, перекрыть электромагнита пускового газа. (Кнопки «Зажигание» и «Стартер»).

8 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

Для выполнения экспериментальной части лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия.

1. Подать напряжение на контроллер путем нажатия зеленой кнопки «Пуск» на приборной панели.
2. Запустить файл EMU_НК_12СТ.
3. После загрузки программы в меню «Онлайн» выбрать «Подключение». Загрузить программу в контроллер.
4. Затем в меню «Онлайн» выбрать «Старт».
5. Перейти к визуализации работы САР (в меню «Окно» выбрать «Engine»).

6. Выполнить холодную прокрутку (ХП), горячий запуск (ГЗ) и нормальный останов (НО) двигателя в **автоматическом режиме** (для этого нажать кнопку «РУ/АВТО» в рабочем окне ([рисунок 8](#))).
7. Выполнить описанные в п.6 операции используя **ручное управление**. Избегать превышения температуры выходных газов. (Описание ручного управления режимами работы двигателя приведено в **разделе 6**).
8. После завершения изучения режимов работы САУ двигателя в меню «Онлайн» выбрать «Стоп».
9. Затем в меню «Онлайн» выбрать «Отключение».

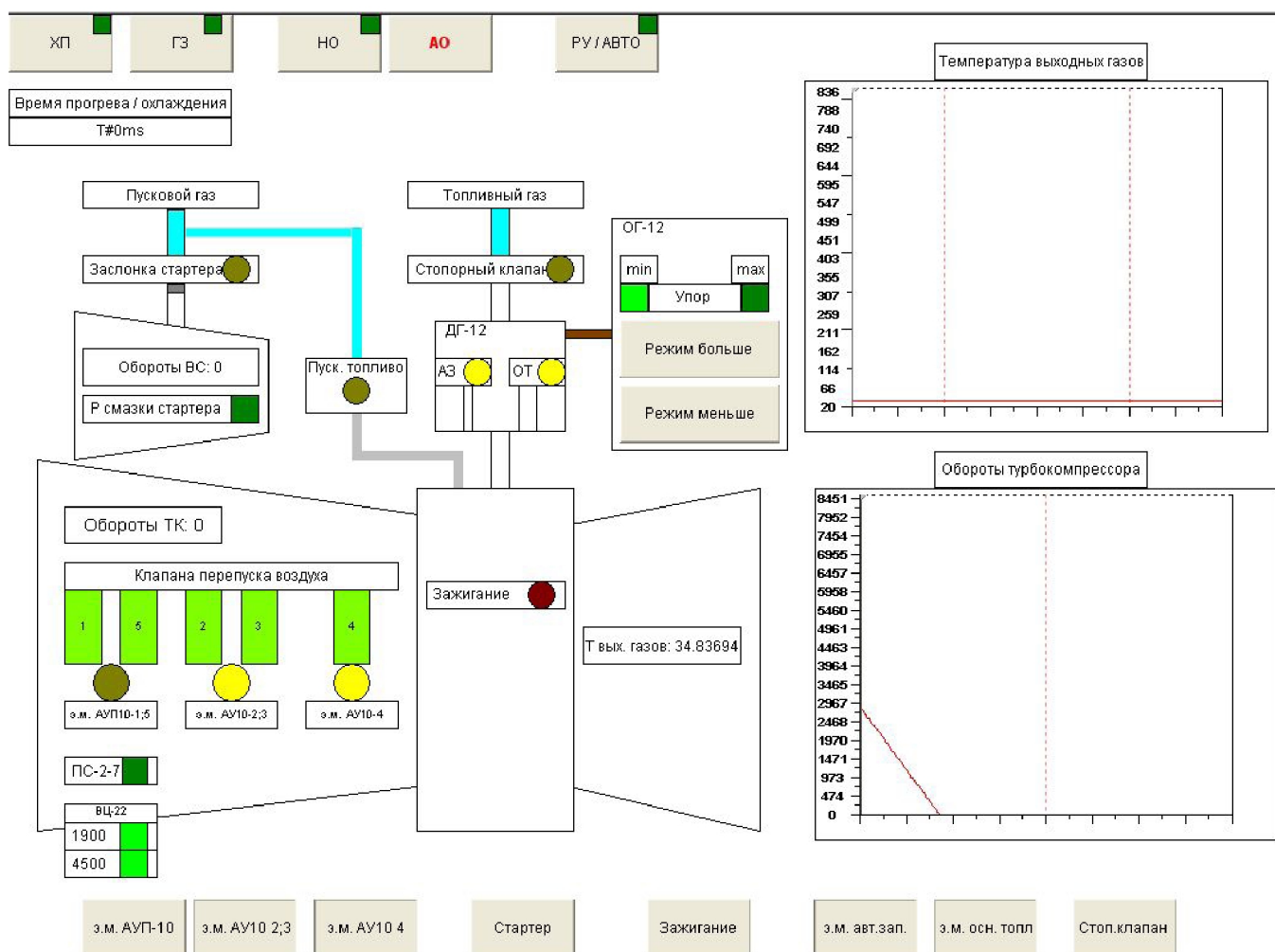


Рисунок 8 – Рабочее окно программы

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие основные функции системы регулирования двигателя?
2. Какие агрегаты входят в состав топливорегулирующей системы?
3. Из чего состоит дозатор?
4. Для чего предназначен электромагнитный клапан МКТ-361?
5. Для чего предназначен регулятор оборотов?
6. Из чего состоит ограничитель оборотов?
7. Для чего предназначен программируемый логический контроллер ОВЕН ПЛК-150?
8. Какие агрегаты относятся к агрегатам запуска?
9. Какие агрегаты относятся к агрегатам регулирования подачи топлива?
10. Зачем нужна механизация компрессора?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.И. Мельников Двигатель НК-12СТ серии 02 / Техническое описание турбовального двигателя со свободной турбиной 1985 г. – 191 с.
2. А.Г. Гимадиев, А.Н. Крючков, А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок / Часть 1. Теория автоматического управления. Линейные системы. Учебное пособие – Самарский государственный аэрокосмический университет. – Самара, 2002, 139 с.
3. Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. проф. В.П. Дьяконова.-М.:СОЛОН-Пресс, 2004. - 256с.
4. Петров И.В., Вагнер Р., Долл В. Отладка прикладных ПЛК программ в CoDeSys. Промышленные АСУ и контроллеры. - 2006/2007г.
5. Загаров Г.З., Прошунин В.А. Газотурбинный двигатель НК-12СТ: техническое описание – Куйбышев, 1985, - 192 с.
6. Бергер И.А., Шорр Е.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин:Справочник / 3-е изд.. перереаб и доп. – М.:Машиностроение, 1973, 352 с.