

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

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

А. Г. Гимадиев, А. Н. Крючков

**Автоматика и регулирование
авиационных двигателей**

Электронное учебное пособие

Самара

2010

УДК 621.452 (075)

ББК 39.65

Авторы: **Гимадиев Асгат Гатьятович,**
Крючков Александр Николаевич

Рецензент: заведующий кафедрой конструкция и проектирование двигателей
летательных аппаратов, д-р. техн. наук, проф. С. В. Фалалеев

Приведены схемы систем автоматического регулирования авиационных двигателей и описаны принципы их действия. Изложены требования к качеству переходных процессов в системах регулирования двигателей. Даны сведения по законам и программам регулирования ТРД, ТРДД, ТРДДФ и ТВД. Изложен вывод уравнений математической модели, входящих в состав САР агрегатов. Дана методика выбора параметров агрегатов, при которых обеспечивается устойчивость систем и показатели качества регулирования. Особое внимание уделено электронным цифровым САР двигателей.

Учебное пособие рекомендуется для магистрантов по курсу лекций «Автоматика и регулирование авиационных двигателей» в рамках магистерской программы «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов» и может быть полезно при выполнении курсовых работ, дипломных проектов и подготовке к экзаменам.

Подготовлено на кафедре автоматических систем энергетических установок.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

K - коэффициент передачи

L - акустическая индуктивность

G - массовый расход

M - масса

N - сила

$M(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика

P - давление

R - гидравлическое сопротивление

F - площадь

T - постоянная времени

$W(j\omega)$ - амплитудно-фазовая частотная характеристика

$W(s)$ - передаточная функция

d - диаметр

l - длина

γ - жесткость, угол тангажа

s - переменная в интегральном преобразовании Лапласа

t - время

v - скорость потока жидкости

ζ - коэффициент демпфирования

ν - кинематическая вязкость

μ - коэффициент расхода

ρ - плотность рабочей среды

ω - угловая частота колебаний

$j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица

ИНДЕКСЫ

гд - гидродинамическая

дв - двигатель

др - дроссельный кран

ж - жиклер

нб - наибольший

нм - наименьший

пр - приведенный, предварительный

прж - пружина

расч - расчетный

р - регулятор

тр - трение

min - минимальный

max - максимальный

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АД – Авиационный двигатель

ЛА - летательный аппарат

САР - система автоматического регулирования

ТРД – Турбореактивный двигатель

ТРДД - Турбореактивный двигатель двухконтурный

ТРДДФ - Турбореактивный двигатель двухконтурный с форсажной камерой

ТВД – Турбовинтовой двигатель

ЭПК – электропневмоклапан

СОДЕРЖАНИЕ

<u>Введение</u>	6
<u>1 Электронные аналоговые и цифровые системы регулирования двигателей</u>	8
1.1 <u>Техническое задание на разработку САР двухконтурного ГТД</u>	8
1.2 <u>Функциональная схема и принцип регулирования двигателя</u>	12
1.3 <u>Исследование устойчивости САР двигателя с насосами объемного типа</u>	14
1.4 <u>Исследование качества регулирования САР двигателя с топливными насосами объемного типа</u>	30
1.5 <u>Исследование устойчивости САР двигателя с центробежными топливными насосами</u>	34
1.6 <u>Оценка устойчивости и качества регулирования электронно-цифровых САР авиационных ГТД</u>	38
1.7 <u>Выбор основных узлов и элементов регуляторов САР</u>	57
<u>Список использованных источников</u>	77

Введение

Современный авиационный двигатель представляет собой сложную энергетическую установку, к которой предъявляются высокие требования по надежности, экономичности, удельной тяге и т.д. Удовлетворить эти требования только за счет совершенствования узлов двигателя становится все труднее. Перспективным является разработка и внедрение новых систем автоматического регулирования (САР) и управления (САУ), позволяющих более точно поддерживать регулируемые параметры, реализовывать наивыгоднейшие режимы работы двигателя.

Выбор параметров САР, обеспечивающих заданные характеристики, и анализ влияния отдельных параметров на динамические свойства САР сопровождается большим объемом вычислительных работ. Применяемые для этой цели традиционные методы расчета требуют значительных затрат времени и не позволяют проводить анализ множества вариантов САР.

Прогресс цифровой техники за последнее десятилетие совместно с миниатюризацией элементной базы привел к значительному увеличению быстродействия, объемов памяти и надежности бортовых цифровых вычислительных машин ЛА. Это позволяет вплотную перейти к построению систем управления, контроля и диагностики ГТД в полном диапазоне условий эксплуатации и боевого применения на принципиально новых алгоритмах, в которых в качестве управляющих сигналов используются прямые критериальные параметры (тяга, экономичность, запасы газодинамической устойчивости, ресурс и др.), обеспечивающие "адаптивное" планирование осмотров и ремонтов двигателя с учетом изменения его характеристик при выработке ресурса в процессе всего жизненного цикла.

Совершенствование авиационной техники делает все более актуальным оптимальное управление режимами работы силовых установок. Обеспечение эффективной эксплуатации по фактическому состоянию таких сложных функциональных систем летательных аппаратов как современные и

перспективные газотурбинные двигатели, повышение безопасности полетов в условиях непрерывного усложнения конструкции и роста тепловых и механических нагрузок на агрегаты и узлы ЛА в настоящее время невозможно без применения методов раннего обнаружения и, что не менее важно, прогнозирования возможных неисправностей и их причин.

Для решения указанных задач ведущие авиационные фирмы США и других зарубежных стран уже в 70-80 гг. начали активно применять цифровые системы с принципиально новыми алгоритмами и методами управления и диагностики ГТД. Так, в цифровой системе DEEC для двигателя F100, установленного на самолете F-15, используются алгоритмы расчета в реальном масштабе времени основных параметров ГТД (тяги, расхода воздуха и др.) и на их основе осуществляется управление и контроль двигателя. Подобный подход позволил существенно повысить летно-технические характеристики самолета и способствовал переходу к эксплуатации ГТД по техническому состоянию.

На отечественных двигателях четвертого поколения также начали применяться цифровые системы управления и диагностики, построенные на "гидромеханических" и "аналоговых" алгоритмах. Это связано с отсталостью элементной базы БЦВМ и отсутствием наработок по перспективным алгоритмам управления и диагностики. Проверенные в эксплуатации методы и алгоритмы управления и диагностики ГТД на первом этапе создания, внедрения и отработки цифровых систем облегчали решение возникающих аппаратных проблем. В результате реализация цифрового управления выявлен целый ряд проблем, и для надежной работы ГТД потребовалась дублирующая полноразмерная гидромеханическая система.

Важную роль в переходе к современным цифровым системам управления и контроля технического состояния ГТД играет разработка новых методов синтеза реализуемых в БЦВМ алгоритмов вычисления параметров двигателя.

1 Электронные аналоговые и цифровые системы регулирования двигателей

1.1 Техническое задание на разработку САР двухконтурного ГТД

1.1.1 Наименование: система автоматического регулирования (САР) двухконтурного ГТД.

1.1.2 Цель исследования: анализ устойчивости и качества регулирования САР двухконтурного ГТД.

1.1.3 Назначение САР:

1) для управления двигателем на установившихся и переменных режимах, на режиме запуска, а также на режиме реверса во всем диапазоне высотно-скоростных и температурных условий в ожидаемых условиях эксплуатации двигателя;

2) защиты ГТД и его систем при аварийных ситуациях;

3) контроля параметров ГТД и его систем, отклонений их от нормы и контроля положения исполнительных органов (ИО) систем ГТД;

4) передачи информации о параметрах ГТД и его систем в систему регистрации параметров работы двигателя (СРП);

5) диагностирования технического состояния двигателя.

1.1.4 Объект регулирования: трехвальный двухконтурный ГТД без регулируемых направляющих аппаратов компрессора, без системы отключения охлаждения турбины на крейсерском режиме, с двухконтурной камерой сгорания, включающий:

1) клапана системы перепуска воздуха из компрессора СД при запуске;

2) клапана системы перепуска воздуха из компрессора ВД на охлаждение

3) камеру сгорания с двумя контурами форсунок;

4) топливную систему с регулируемым электрическим приводом насосов;

5) систему зажигания;

6) масляную систему с регулируемым электрическим приводом насосов;

7) датчики газодинамических и механических параметров двигателя;

8) исполнительные органы двигателя и его систем.

1.1.5 Тактико-технические требования к САР:

1.1.5.1 Состав системы:

1) электронный цифровой блок управления двигателем с полной ответственностью типа FADEC, двухканальный (далее - ЭСУД), (см. [рисунок 1.1](#));

2) насосы-дозаторы топлива с регулируемыми электрическими приводами 1-го и 2-го контуров форсунок и двигательный подкачивающий насос с регулируемым электрическим приводом (далее - ЭНД) - 3 шт.;

3) автомат продувки 2-го контура форсунок КС (далее АПТ);

4) агрегаты управления перепуском воздуха КСД и КВД (далее АУП) - 2 шт.;

5) резервный электронный канал регулирования с автономными датчиками и исполнительными механизмами.

1.1.5.2. Общие требования к агрегатам САР содержатся в настоящем ТЗ на систему автоматического регулирования.

Требования к отдельным вновь разрабатываемым агрегатам - ЭСУД, ЭНД, АПРТ содержатся в ТЗ на соответствующий агрегат.

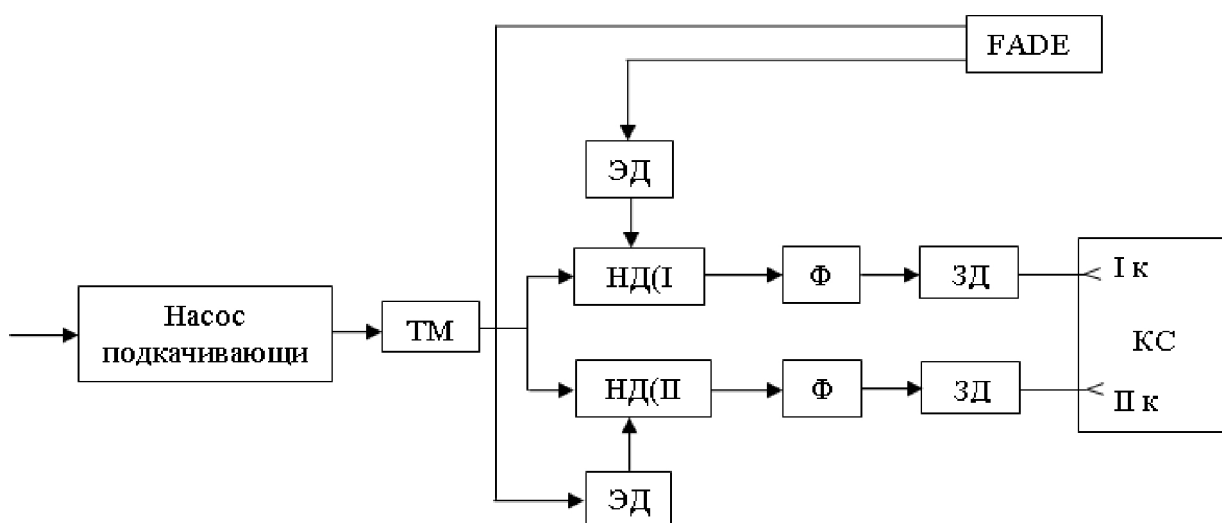


Рисунок 1.1 - Укрупненная функциональная схема системы регулирования двигателя: ТМР – топливно-масляный радиатор; ЭД – электродвигатель; ЗДК –

запорный дроссельный клапан; НД(І к) и НД(ІІ к) – насосы-дозаторы 1-го и 2-го контуров; Ф1 и Ф2 – форсунки 1-го и 2-го контуров; КС – камера сгорания; FADEC – электронная система управления.

1.1.5.3. Требования по назначению

1) САР выполняется электронно-электромеханической, управление двигателем осуществляется по командам от основного электронного регулятора, являющегося электронной частью САР;

2) электронная часть системы должна выполнять функции по управлению и регулированию двигателя на всех установившихся и переходных режимах, начиная от момента запуска во всем диапазоне высотно-скоростных и температурных условий в ожидаемых условиях эксплуатации двигателя;

3) электронная часть САР должна осуществлять защиту, контроль и диагностирование состояния двигателя;

4) в составе ЭСУД должна быть система встроенного контроля (СВК), осуществляющая контроль ЭСУД и элементов САР (датчиков, исполнительных механизмов, цепей связи);

5) электромеханическая часть системы должна выполнять функции по управлению двигателем по командам, поступающим от электронного регулятора, а в случае отказа или отключения электронного регулятора осуществлять управление двигателем по упрощенным законам и ограничение режимов работы двигателя по предельным значениям параметров от резервного канала управления;

6) требования к системе по контролю и диагностированию САР и двигателя – в соответствии с ТЗ на ЭСУД;

7) структурное построение системы:

– ЭЦСУД получает информацию, необходимую для выполнения функций управления от двухканальных датчиков, а дополнительную информацию, необходимую для диагностирования и оперативного контроля состояния двигателя от двухканальных и одноканальных датчиков и

сигнализаторов;

– насосы-дозаторы с управляемым электрическим приводом обеспечивают по командам электронного регулятора топливопитание камеры сгорания (КС) двигателя;

– АУП осуществляют, по командам электронного регулятора, управление клапанами перепуска воздуха (КПВ) компрессоров среднего и высокого давления;

– электропитание ЭСУД +27В постоянного тока.

8) характеристика САР и ее составных частей:

– САР должна надежно работать в течение установленного ресурса и обеспечивать устойчивое (в пределах допуска) поддержание заданных параметров в условиях эксплуатации, предусмотренных в ТЗ на САР;

– работоспособность САР обеспечивается путем замены отказавших агрегатов.

9) требования по математическому, программному и информационному обеспечению:

– на этапе опытных испытаний должна быть предусмотрена возможность изменения программ путем перепрограммирования ЭСУД в условиях предприятия-разработчика системы;

– объем функций, выполняемых САР, может быть расширен по отношению к настоящему ТЗ. Должен быть предусмотрен запас по увеличению аппаратуры, датчиков и вычислительных мощностей ЭСУД до 30 %;

– разработчик САР к моменту начала испытаний представляет разработчикам двигателя математическую модель контуров управления агрегатов ЭСУД, ЭНД, АПТ;

– воспламенение топлива.

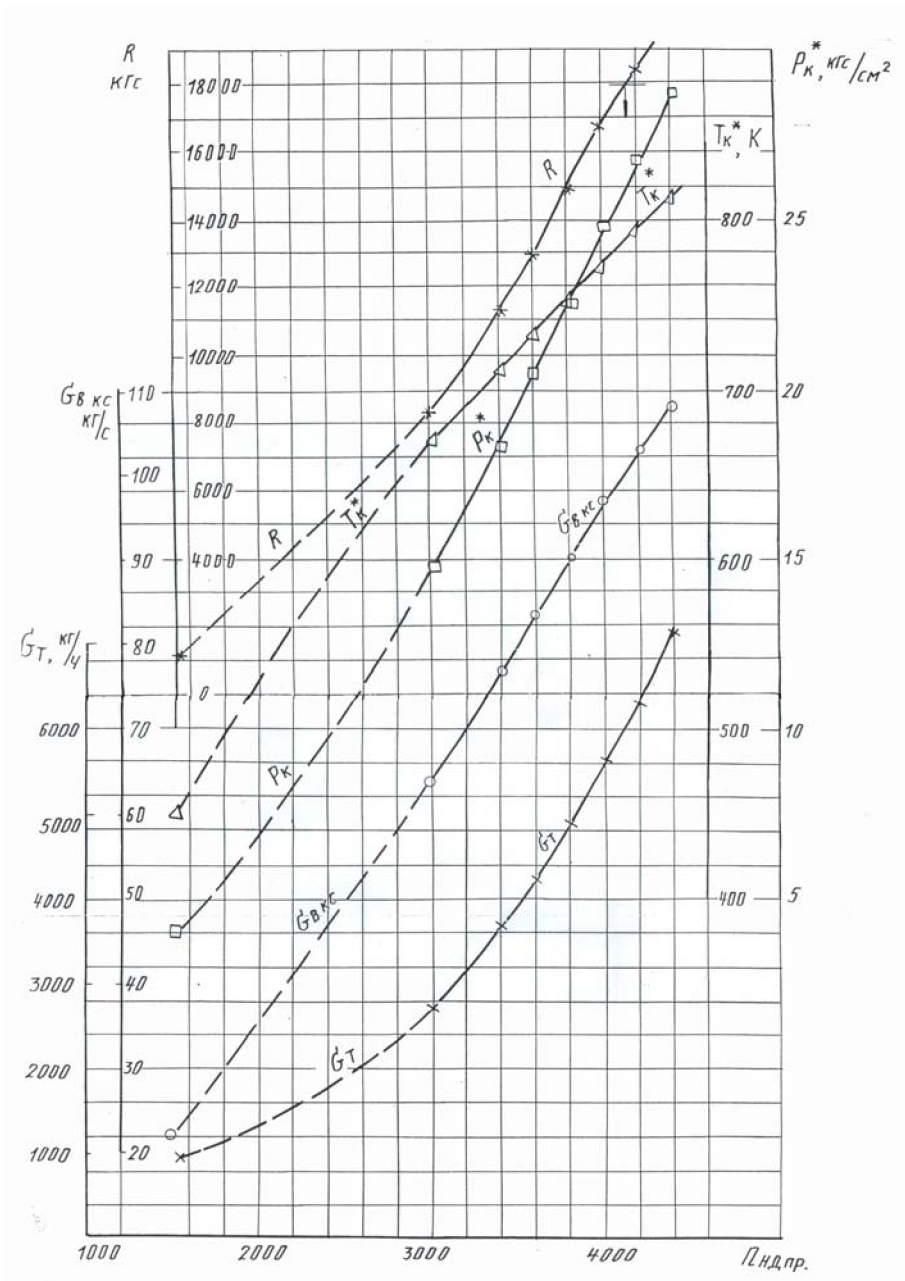


Рисунок 1.1.1 - Дроссельные характеристики двухконтурного ГТД

1.2 Функциональная схема и принцип регулирования двигателя

Объектом регулирования является ротор высокого давления ГТД. Электронно-электромеханическая система предназначена для изменения и поддержания заданной частоты вращения ротора ВД. За регулируемый параметр принимается частота вращения ротора ВД n_v , а за регулирующей фактор – расход топлива в двигателе G_T . Управляющим воздействием является изменение угла установки рычага управления двигателя $\alpha_{руд}$, а возмущающим воздействием – изменение давления и температуры воздуха на входе в двигатель P_0^* и T_0^* .

Система регулирования частоты вращения включает в себя 2 датчика частоты вращения вала двигателя ДЧВ-2500 (на роторе ВД и НД), датчик температуры газа на входе в турбину Т-112, электронный цифровой блок управления двигателем типа FADEC, два электродвигателя и два подкачивающих насоса (в первом и во втором контуре).

Рассмотрим работу САР при изменении внешней нагрузки. Пусть давление на входе в двигатель P_6^* увеличилось, что привело к уменьшению частоты вращения ротора ВД. Частота импульсов напряжения, снимаемая с датчика ДЧВ-2500, уменьшается, и этот сигнал поступает в электронный цифровой блок управления двигателем FADEC. ЭСУД преобразует входной сигнал и подает напряжение на увеличение частоты вращения электродвигателя. Следовательно, увеличивается частота вращения насосов, что приводит к увеличению расхода топлива G_T , и частота вращения ротора увеличивается.

Увеличение G_T приводит к увеличению частоты вращения n_v до исходного уровня. Это связано с тем, что в ЭСУД организован пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД-регулятор). Пропорциональное звено обеспечивает компенсацию отклонения регулируемого параметра, интегрирующее звено исключает статическую ошибку, а дифференцирующее звено повышает быстродействие регулятора.

Таким образом, в САР отсутствует статическая погрешность, что несомненно является ее достоинством.

Принципиальная схема САР представлена на [рисунке 1.2](#).

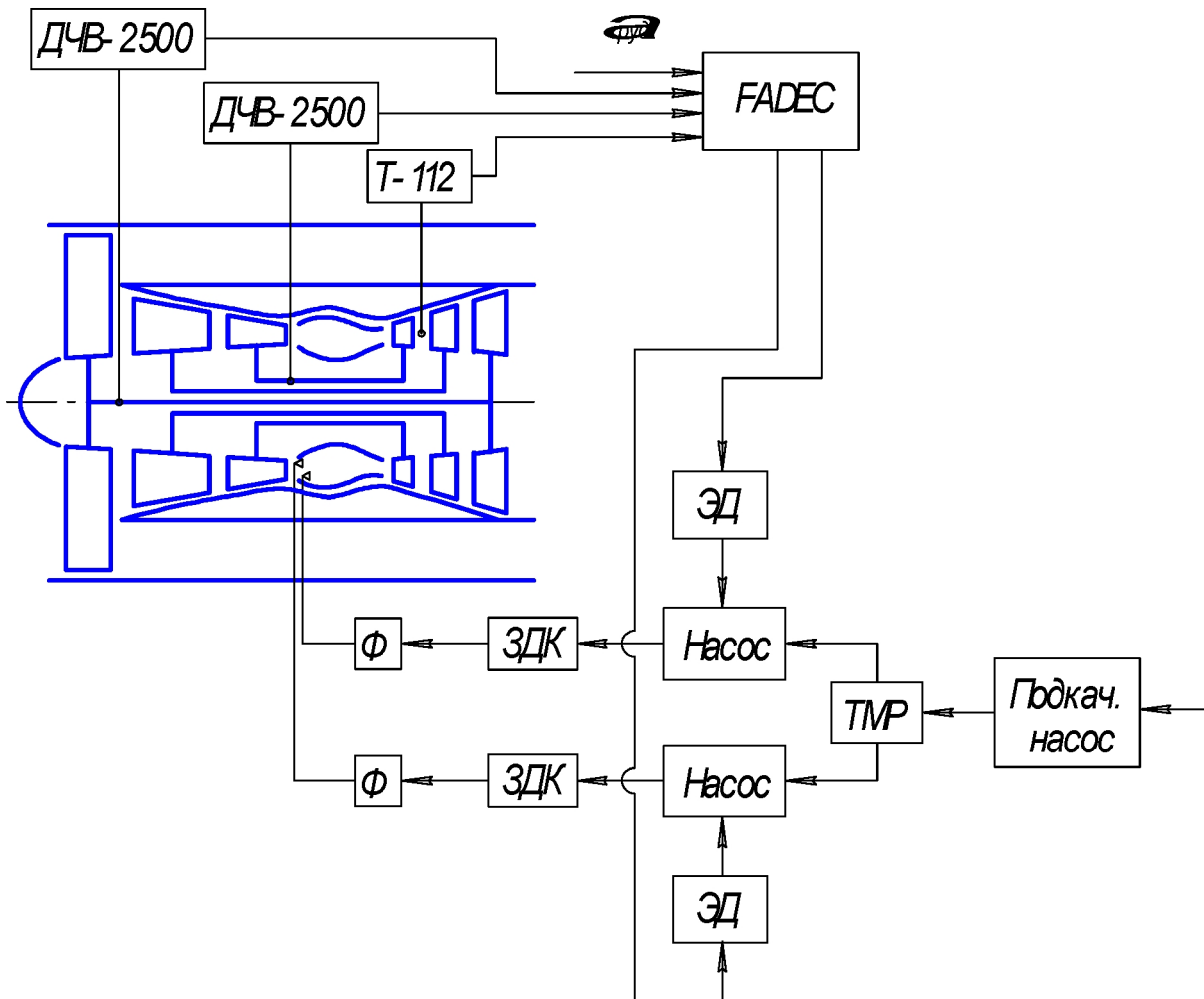


Рисунок 1.2 - Функциональная схема САР частоты вращения ГТД:

ТМР – топливно-масляный радиатор; ЭД – электродвигатель;

ЗДК – запорный дроссельный клапан; Ф – форсунки; ДЧВ-2500 – датчик частоты вращения;

Т-112 – датчик температуры газа

1.3 Исследование устойчивости САР двигателя с насосами объемного типа

1.3.1. Вывод дифференциальных уравнений звеньев

При выводе дифференциальных уравнений звеньев за положительные направления координат принимаем такие, которые соответствуют направлению движения элементов регулятора при увеличении частоты вращения ротора двигателя. Кроме того, принимается ряд допущений, исходя из низкочастотной расчетной модели элементов САР.

Уравнения роторов двигателя

При выводе уравнения ротора ВД как объекта регулирования принимаются следующие основные допущения: влияние объемов по воздушно-газовому тракту двигателя на его динамические свойства незначительно; преобразование энергии в процессе горения происходит мгновенно; изменение параметров установившегося режима – малое. В соответствии с принятыми допущениями уравнение движения ротора имеет вид:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{dn_e}{dt} = M_T(n_e, G_T) - M_K(n_e, n_c) - M_H(P_e^*, T_e^*), \quad (1.3.1)$$

где I – момент инерции ротора двигателя совместно с нагрузкой;

$M_T(n_e, G_T)$ – момент, развиваемый турбиной;

$M_K(n_e)$, $M_H(n_c, P_e^*, T_e^*)$ – моменты противодействия компрессора, обусловленные работой компрессора и влиянием внешних условий.

Уравнение (1) является нелинейным. При малых отклонениях параметров возможна линеаризация нелинейных зависимостей разложением их в ряд Тейлора и удержанием первых членов ряда:

$$\begin{aligned} M_T(n_e, G_T) &= (M_T)_0 + \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0 \Delta n_e + \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T; \\ M_K(n_e) &= (M_K)_0 + \left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 \Delta n_e + \left(\frac{\partial M_K}{\partial n_c} \right)_0 \Delta n_c; \\ M_H(n_c, P_e^*, T_e^*) &= (M_H)_0 + \left(\frac{\partial M_H}{\partial P_e^*} \right)_0 \Delta P_e^* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial T_e^*} \right)_0 \Delta T_e^*, \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

где $\Delta n_e = n_e - (n_e)_0$, $\Delta n_c = n_c - (n_c)_0$, $\Delta G_T = G_T - (G_T)_0$, $\Delta P_e^* = P_e^* - (P_e^*)_0$, $\Delta T_e^* = T_e^* - (T_e^*)_0$ – отклонения частот вращения роторов ВД и СД, расхода топлива, давления и температуры от установившихся значений. Частные производные, входящие в уравнения, определяются по углу наклона касательных к соответствующим моментным характеристикам в точках: $(n_e)_0$, $(M_T)_0$, $(M_K)_0$, $(M_H)_0$, $(G_T)_0$, $(n_c)_0$, $(P_e^*)_0$, $(T_e^*)_0$. Индекс “0” параметров указывает на их принадлежность к базисным значениям на установившихся режимах.

Имея в виду, что на установившемся режиме справедливо равенство $(M_T)_0 - (M_K)_0 - (M_H)_0 = 0$, запишем уравнение (1) с учетом равенств (2) в виде:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d\Delta n_e}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0 \right] \Delta n_e = \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T - \left(\frac{\partial M_K}{\partial n_c} \right)_0 \Delta n_c - \left(\frac{\partial M_H}{\partial P_e^*} \right)_0 \Delta P_e^* - \left(\frac{\partial M_H}{\partial T_e^*} \right)_0 \Delta T_e^* \quad (1.3.3)$$

Перепишем уравнение в стандартной форме:

$$T_e \frac{d\Delta n_e}{dt} + \Delta n_e = k_{неG} \Delta G_T + k_{св} \Delta n_c + k_{неP} \Delta P_e^* + k_{неT} \Delta T_e^*, \quad (1.3.4)$$

где

$$T_e = \frac{\frac{\pi}{30} I}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0} \text{ – постоянная времени ротора ВД;}$$

$$k_{неG} = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0} \text{ – коэффициент усиления ротора ВД по расходу топлива;}$$

$$k_{св} = - \frac{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_c} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0} \text{ – коэффициент усиления ротора ВД по частоте вращения ротора СД;}$$

$$k_{неP} = - \frac{\left(\frac{\partial M_H}{\partial P_e^*} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0} \text{ – коэффициент усиления ротора ВД по возмущающему воздействию – давлению заторможенного потока воздуха на входе в двигатель;}$$

$$k_{неT} = - \frac{\left(\frac{\partial M_H}{\partial T_e^*} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n_e} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n_e} \right)_0} \text{ – коэффициент усиления ротора ВД по возмущающему воздействию – температуре заторможенного потока воздуха на входе в двигатель.}$$

Выражение (1.1) является уравнением ротора ВД как объекта регулирования.

Аналогичным образом получают уравнения ротора СД и ротора НД:

уравнение ротора СД

$$T_c \frac{d\Delta n_c}{dt} + \Delta n_c = k_{нсG} \Delta G_T + k_{св} \Delta n_e + k_{нсн} \Delta n_n + k_{нсP} \Delta P_e^* + k_{нсT} \Delta T_e^* \quad (1.3.5)$$

уравнение ротора НД

$$T_n \frac{d\Delta n_n}{dt} + \Delta n_n = k_{mg} \Delta G_T + k_{cn} \Delta n_c + k_{mp} \Delta P_e^* + k_{mt} \Delta T_e^* \quad (1.3.6)$$

Уравнение датчиков частоты вращения роторов двигателя

В качестве датчика частоты вращения роторов двигателя использован ДЧВ-2500.

Датчик ДЧВ-2500 пропорционально преобразует скорость вращения вала в частоту электрических сигналов. При выводе уравнения принимаем допущение, что преобразование происходит мгновенно, т.е. без задержки по времени. Уравнение датчика можно записать в следующем виде:

$$\nu = k_n n_B,$$

где ν – частота электрических сигналов;

k_n – передаточный коэффициент, равный числу зубьев индуктора, находящегося на валу ВД;

n_B – частота вращения ротора ВД.

Сигнал с датчика преобразуется в электрическое напряжение. Уравнение преобразователя имеет вид:

$$U_n = k_U \nu,$$

где U_n – выходное напряжение; k_U – коэффициент преобразования.

Тогда уравнение датчика частоты вращения с преобразователем имеет следующий вид:

$$U_n = k_{Un} n_e,$$

где $k_{Un} = k_n k_U$.

Зависимость линейная, поэтому:

$$\Delta U_n = k_{Un} \Delta n_e. \quad (1.3.7)$$

Уравнение датчика положения рычага управления двигателя (РУД)

Датчик преобразует входной сигнал в виде отклонения рычага управления двигателя в выходное напряжение. При выводе уравнения принимаем допущение, что преобразование происходит также без задержки по

времени. Тогда уравнение датчика можно записать в следующем виде:

$$U_{\alpha} = k_{\alpha} \alpha_{\text{pyd}},$$

где U_{α} – выходное напряжение;

k_{α} – коэффициент преобразования;

α_{pyd} – угол отклонения ручки управления двигателя.

Зависимость линейная, поэтому:

$$\Delta U_{\alpha} = k_{\alpha} \Delta \alpha_{\text{pyd}}. \quad (1.3.8)$$

Уравнение элемента сравнения сигналов датчика частоты вращения и положения рычага управления двигателя

Сигналы от двух датчиков сравниваются, и выходной сигнал в виде разности напряжений подается в электронно-аналоговый регулятор:

$$\Delta U = U_{\alpha} - U_n.$$

Зависимость линейная, поэтому:

$$\Delta(\Delta U) = \Delta U_{\alpha} - \Delta U_n. \quad (1.3.9)$$

Уравнения электронно-аналогового регулятора

В регуляторе, как уже говорилось выше, организован пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования. Входной сигнал преобразуется также в напряжение, которое подается на 2 электродвигателя с усилителем. Уравнения регулятора, определяющие закон регулирования, имеют следующий вид:

$$\Delta U'_{\text{ЭД1}}(t) = k_{P1} \Delta(\Delta U) + T_{\text{оп1}} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} + \frac{1}{T_{\text{уп1}}} \int \Delta(\Delta U)(t) dt; \quad (1.3.10)$$

$$\Delta U'_{\text{ЭД2}}(t) = k_{P2} \Delta(\Delta U) + T_{\text{оп2}} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} + \frac{1}{T_{\text{уп2}}} \int \Delta(\Delta U)(t) dt. \quad (1.3.11)$$

Уравнения электродвигателей

Основным уравнением электродвигателя является уравнение движения:

$$\frac{\pi}{30} I_{\text{ЭД}} \frac{dn_{\text{ЭД1}}}{dt} = M_{\text{кр}} - M_c,$$

где $I_{\text{ЭД}}$ – полярный момент инерции электродвигателя;

$M_{\text{кр}}$ – крутящий момент, развиваемый электродвигателем;

M_c – момент противодействия.

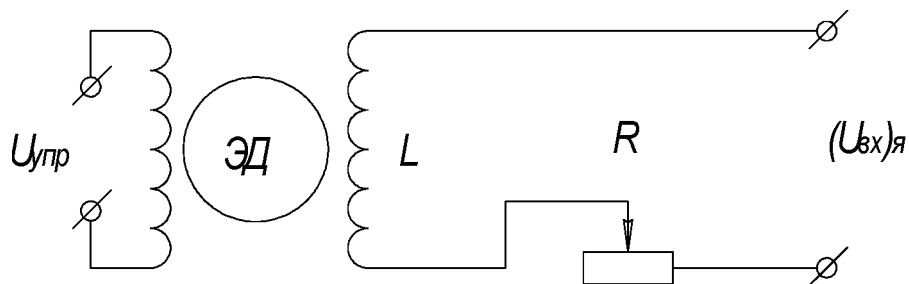


Рисунок 1.3.1 - Обмотка электродвигателя

Уравнение электрической цепи якорной обмотки имеет вид:

$$U_{\text{вх}} = U_R + U_L; U_R = IR; U_L = L \frac{dI}{dt}; U_{\text{вх}} = IR + L \frac{dI}{dt}. \quad (1.3.11)'$$

После преобразований уравнений (1.3.11) и (1.3.11)' получим:

$$\frac{\pi}{30} I_{\text{ЭД}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД1}}}{dt} = \Delta M_{\text{кр}} - \Delta M_c; \quad (1.3.11)''$$

$$\Delta M_{\text{кр}} = \alpha \Delta I;$$

$$\Delta M_c = \beta \Delta n_{\text{ЭД1}},$$

где α - коэффициент влияния силы тока на крутящий момент;

β - коэффициент влияния оборотов электродвигателя на момент противодействия.

$$T_{\text{ЭД1}} \Delta \tilde{n}_{\text{ЭД1}} s + \Delta \tilde{n}_{\text{ЭД1}} = \frac{k_{\text{нИ1}}}{(1 + T_{\text{об}} s)} \Delta \tilde{U}_{\text{вх}};$$

$$k_{\text{нИ1}} = \frac{\alpha R}{\beta} - \text{коэффициент усиления};$$

$$T_{\text{ЭД1}} = \frac{\pi}{30} \frac{I_{\text{ЭД}}}{\beta} - \text{постоянная времени электродвигателя};$$

$$L \frac{d\Delta I}{dt} + \Delta IR = \Delta U_{\text{вх}}; \quad (1.3.11)'''$$

Считаем, что постоянная времени обмотки близка к нулю по сравнению с постоянной времени двигателя. Тогда уравнение 1-го электродвигателя после преобразований принимает следующий вид:

$$T_{\text{ЭД1}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД1}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД1}} = k_{\text{нН1}} \Delta U'_{\text{ЭД1}}. \quad (1.3.12)$$

Уравнение 2-го электродвигателя получается аналогично:

$$T_{\text{ЭД2}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД2}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД2}} = k_{\text{нН2}} \Delta U'_{\text{ЭД2}}. \quad (1.3.13)$$

Уравнения топливных насосов

Расход шестеренных насосов линейно зависит от частоты вращения.

Поэтому уравнение насоса можно записать в следующем виде:

$$G_{\text{Н1}} = k_{\text{ГН1}} n_{\text{ЭД1}}$$

Зависимость линейная, поэтому:

$$\Delta G_{\text{Н1}} = k_{\text{ГН1}} \Delta n_{\text{ЭД1}}. \quad (1.3.14)$$

Аналогично получается уравнение для второго насоса:

$$\Delta G_{\text{Н2}} = k_{\text{ГН2}} \Delta n_{\text{ЭД2}}. \quad (1.3.15)$$

Уравнение расхода топлива в камере сгорания двигателя (через 1-ый и 2-ой контуры)

Общий расход топлива равен сумме расходов через первый и второй контуры. Следовательно, уравнение имеет вид:

$$G_T = G_{\text{Н1}} + G_{\text{Н2}}.$$

Зависимость линейная, поэтому:

$$\Delta G_T = \Delta G_{\text{Н1}} + \Delta G_{\text{Н2}}. \quad (1.3.16)$$

Уравнения звеньев САР (1.3.1)...(1.3.16) сводятся к системе уравнений:

$$T_{\text{Г}} \frac{d\Delta n_{\text{Г}}}{dt} + \Delta n_{\text{Г}} = k_{\text{нГ}} \Delta G_T + k_{\text{сГ}} \Delta n_{\text{С}} + k_{\text{нП}} \Delta P_{\text{Г}}^* + k_{\text{нТ}} \Delta T_{\text{Г}}^* - \text{для ротора ВД};$$

$$T_{\text{С}} \frac{d\Delta n_{\text{С}}}{dt} + \Delta n_{\text{С}} = k_{\text{нС}} \Delta G_T + k_{\text{сС}} \Delta n_{\text{Г}} + k_{\text{нС}} \Delta n_{\text{Н}} + k_{\text{нС}} \Delta P_{\text{С}}^* + k_{\text{нТ}} \Delta T_{\text{С}}^* - \text{для ротора СД};$$

$$T_{\text{Н}} \frac{d\Delta n_{\text{Н}}}{dt} + \Delta n_{\text{Н}} = k_{\text{нН}} \Delta G_T + k_{\text{сН}} \Delta n_{\text{С}} + k_{\text{нП}} \Delta P_{\text{Н}}^* + k_{\text{нТ}} \Delta T_{\text{Н}}^* - \text{для ротора НД};$$

$$\Delta U_n = k_{\text{Ун}} \Delta n_{\text{Г}} - \text{для датчика частоты вращения};$$

$$\Delta U_{\alpha} = k_{\alpha} \Delta \alpha_{\text{руд}} - \text{для датчика положения РУД};$$

$$\Delta(\Delta U) = \Delta U_{\alpha} - \Delta U_n - \text{сравнение сигналов};$$

$\Delta U'_{\text{ЭД1}}(t) = k_{P1}\Delta(\Delta U) + T_{\text{оп1}} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} + \frac{1}{T_{\text{уп1}}} \int \Delta(\Delta U)(t)dt$ - для электронно-аналогового регулятора 1-го электродвигателя;

$\Delta U'_{\text{ЭД2}}(t) = k_{P2}\Delta(\Delta U) + T_{\text{оп2}} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} + \frac{1}{T_{\text{уп2}}} \int \Delta(\Delta U)(t)dt$ - для электронно-аналогового регулятора 2-го электродвигателя;

$T_{\text{ЭД1}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД1}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД1}} = k_{\text{нН1}} \Delta U'_{\text{ЭД1}}$ - для 1-го электродвигателя;

$T_{\text{ЭД2}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД2}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД2}} = k_{\text{нН2}} \Delta U'_{\text{ЭД2}}$ - для 2-го электродвигателя;

$\Delta G_{\text{Н1}} = k_{\text{ГН1}} \Delta n_{\text{ЭД1}}$ - для 1-го топливного насоса;

$\Delta G_{\text{Н2}} = k_{\text{ГН2}} \Delta n_{\text{ЭД2}}$ - для 2-го топливного насоса;

$\Delta G_T = \Delta G_{\text{Н1}} + \Delta G_{\text{Н2}}$ - для расхода топлива в камере сгорания двигателя (через 1-й и 2-ой контуры).

Систему дифференциальных уравнений записываем в операторной форме и преобразуем к форме, удобной для построения структурной схемы САР.

В результате получаем следующую систему уравнений в операторной форме:

$$\Delta \tilde{n}_e = \frac{k_{\text{неГ}}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{\text{се}}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{n}_c + \frac{k_{\text{неР}}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{\text{неТ}}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{n}_c = \frac{k_{\text{нсГ}}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{\text{св}}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{n}_e + \frac{k_{\text{нс}}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{n}_n + \frac{k_{\text{нсР}}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{\text{нсТ}}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{n}_n = \frac{k_{\text{ннГ}}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{\text{сн}}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{n}_c + \frac{k_{\text{ннР}}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{\text{ннТ}}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{U}_n = k_{\text{Ун}} \Delta \tilde{n}_e ;$$

$$\Delta \tilde{U}_\alpha = k_\alpha \Delta \tilde{\alpha}_{\text{пов}} ;$$

$$\Delta(\Delta \tilde{U}) = \Delta \tilde{U}_\alpha - \Delta \tilde{U}_n ;$$

$$\Delta \tilde{U}'_{\text{ЭД1}}(t) = k_{P1} \Delta(\Delta \tilde{U}) + T_{\text{оп1}} s \Delta(\Delta \tilde{U}) + \frac{1}{T_{\text{уп1}} s} \Delta(\Delta \tilde{U}) ;$$

$$\Delta \tilde{U}'_{\text{ЭД2}}(t) = k_{P2} \Delta(\Delta \tilde{U}) + T_{\text{оп2}} s \Delta(\Delta \tilde{U}) + \frac{1}{T_{\text{уп2}} s} \Delta(\Delta \tilde{U}) ;$$

$$\Delta \tilde{n}_{\text{ЭД1}} = \frac{k_{\text{нН1}}}{T_{\text{ЭД1}} s + 1} \Delta \tilde{U}'_{\text{ЭД1}} ;$$

$$\Delta \tilde{n}_{\text{ЭД2}} = \frac{k_{\text{нН2}}}{T_{\text{ЭД2}} s + 1} \Delta \tilde{U}'_{\text{ЭД2}} ;$$

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{G}_{H1} &= k_{GH1}\Delta\tilde{n}_{\text{эд1}}; \\ \Delta\tilde{G}_{H2} &= k_{GH2}\Delta\tilde{n}_{\text{эд2}}; \\ \Delta\tilde{G}_T &= \Delta\tilde{G}_{H1} + \Delta\tilde{G}_{H2}.\end{aligned}$$

В дальнейшем влияние температуры заторможенного потока воздуха на входе в двигатель не рассматриваем, так как характер действия P_g^* и выводы по нему будут идентичны воздействию по T_g^* .

1.3.2 Построение структурной схемы и определение передаточных функций САР

Структурная схема САР, соответствующая системе преобразованных операторных уравнений включает контур с основной обратной связью по частоте вращения ротора ВД $\Delta\tilde{n}_g$. По структурной схеме легко прослеживается взаимодействие звеньев в системе регулирования двигателя.

Для того чтобы исследовать систему на устойчивость, упростим ее, приняв следующие допущения: 1) пренебрегаем взаимным влиянием роторов, 2) предполагаем, что двигатель работает в режиме малого газа, и в работе принимает участие только первый контур форсунок.

В результате система преобразованных операторных уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned}\Delta\tilde{n}_g &= \frac{k_{ngG}}{T_g s + 1} \Delta\tilde{G}_T + \frac{k_{ngP}}{T_g s + 1} \Delta\tilde{P}_g^*; \\ \Delta\tilde{U}_n &= k_{Un} \Delta\tilde{n}_g; \\ \Delta\tilde{U}_\alpha &= k_\alpha \Delta\tilde{\alpha}_{\text{pyd}}; \\ \Delta(\Delta\tilde{U}) &= \Delta\tilde{U}_\alpha - \Delta\tilde{U}_n; \\ \Delta\tilde{U}'_{\text{эд1}}(t) &= k_{P1} \Delta(\Delta\tilde{U}) + T_{op1} s \Delta(\Delta\tilde{U}) + \frac{1}{T_{up1} s} \Delta(\Delta\tilde{U}); \\ \Delta\tilde{n}_{\text{эд1}} &= \frac{k_{nH1}}{T_{\text{эд1}} s + 1} \Delta\tilde{U}'_{\text{эд1}}; \\ \Delta\tilde{G}_{H1} &= k_{GH1} \Delta\tilde{n}_{\text{эд1}}; \\ \Delta\tilde{G}_T &= \Delta\tilde{G}_{H1}.\end{aligned}$$

Определим передаточные функции замкнутой САР по управляющему и возмущающему воздействиям. Для этого выразим из системы уравнений

зависимость $\Delta\tilde{n}_e$ от $\Delta\tilde{\alpha}_{py\partial}$ и $\Delta\tilde{P}_e^*$. В результате несложных математических подстановок и преобразований получаем следующее уравнение:

$$\Delta\tilde{n}_e = W_1(s)\Delta\tilde{\alpha}_{py\partial} + W_2(s)\Delta\tilde{P}_e^*,$$

$$\text{где } W_1(s) = \frac{b_0s^2 + b_1s + b_2}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3}, \quad W_2(s) = \frac{d_0s^2 + d_1s}{a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3};$$

$$b_0 = k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{\alpha}T_{op1}T_{up1};$$

$$b_1 = k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{\alpha}k_{p1}T_{up1};$$

$$b_2 = k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{\alpha};$$

$$d_0 = T_{\partial D1}T_{up1}k_{neP};$$

$$d_1 = T_{up1}k_{neP};$$

$$a_0 = T_{\epsilon}T_{\partial D1}T_{up1};$$

$$a_1 = (T_{\epsilon} + T_{\partial D1})T_{up1} + k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un}T_{op1}T_{up1};$$

$$a_2 = T_{up1} + k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un}k_{p1}T_{up1};$$

$$a_3 = k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un}.$$

Здесь $W_1(s)$ – передаточная функция замкнутой САР по управляющему воздействию $\Delta\tilde{\alpha}_{py\partial}$, $W_2(s)$ – передаточная функция замкнутой САР по возмущающему воздействию $\Delta\tilde{P}_e^*$.

Собственный оператор замкнутой САР имеет вид:

$$D(s) = a_0s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3.$$

1.3.3 Анализ устойчивости САР

Вначале построим D-разбиение в плоскости параметра k_{nH1} , который входит в выражения a_1 , a_2 и a_3 собственного оператора и которым легко варьировать. Величинами остальных коэффициентов необходимо задаться.

Решаем уравнение $D(s)=0$ или

$$a_0s^3 + [(T_{\epsilon} + T_{\partial D1})T_{up1} + k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un}T_{op1}T_{up1}]s^2 + [T_{up1} + k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un}k_{p1}T_{up1}]s + k_{GH1}k_{nH1}k_{neG}k_{Un} = 0$$

относительно коэффициента $k_{нН1}$. Выражение для $k_{нН1}$ приводится к стандартной форме:

$$k_{нН1} = \frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s}{\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2},$$

где $\beta_0 = a_0$;

$$\beta_1 = (T_e + T_{\text{ЭД1}})T_{up1};$$

$$\beta_2 = T_{up1};$$

$$\alpha_0 = -k_{GH1}k_{нсG}k_{Un}T_{op1}T_{up1};$$

$$\alpha_1 = -k_{GH1}k_{нсG}k_{Un}k_{p1}T_{up1};$$

$$\alpha_2 = -k_{GH1}k_{нсG}k_{Un}.$$

Необходимо подставить численные значения параметров САР.

$T_e = 0,5$ с, $T_c = 1$ с, $T_n = 1,5$ с – постоянные времени роторов ввиду отсутствия данных о данном двигателе взяты по данным двигателя НК-56;

$T_{\text{ЭД1}} = 1,5$ с, $T_{\text{ЭД2}} = 1,5$ с – постоянные времени электродвигателей;

$T_{op1} = 0,2$ с, $T_{op2} = 0,2$ с – постоянные времени дифференцирующих звеньев электронно-аналогового регулятора;

$T_{up1} = 0,3$ с, $T_{up2} = 0,3$ с – постоянные времени интегрирующих звеньев электронно-аналогового регулятора;

$k_{p1} = 1$, $k_{p2} = 1$ – коэффициенты усиления пропорциональных звеньев электронно-аналогового регулятора;

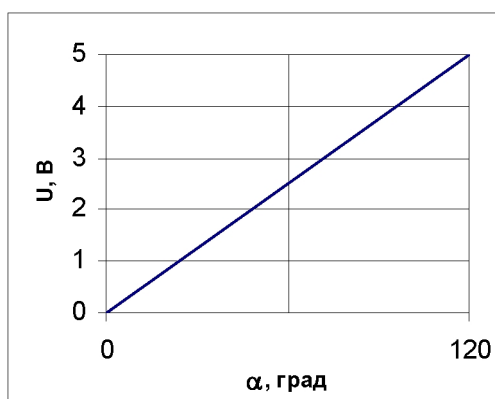


Рисунок 1.3.2 - Статическая характеристика датчика передачи сигнала от РУД

Коэффициентом усиления датчика передачи сигнала от РУД k_α задаемся следующим образом: входной сигнал в виде отклонения РУД изменяется от 0° до 120° , в то время как выходной сигнал в виде напряжения изменяется от 0 до 5 В. Считаем, что зависимость линейная (см. [рисунок 1.3.2](#)), тогда:

$$k_\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta \alpha} = \frac{5}{120} = 0,042 \frac{В}{град}.$$

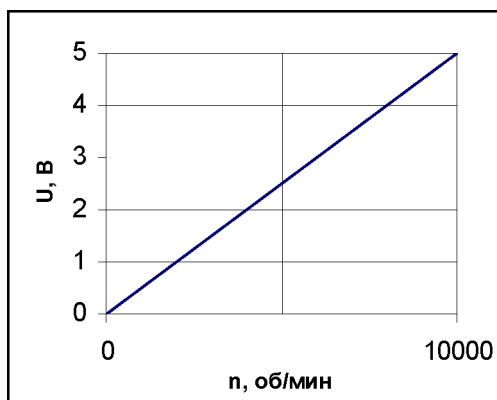


Рисунок 1.3.3 - Статическая характеристика датчика передачи сигнала от частоты вращения ротора ВД

Аналогичным образом задаемся коэффициентом усиления датчика частоты вращения k_{Un} : входной сигнал частоты вращения ротора ВД (изменяется от 0 до 10000 об/мин), выходной сигнал – напряжение (изменяется от 0 до 5 В). Считаем, что зависимость линейная (см. [рисунок 1.3.3](#)), тогда:

$$k_\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta n} = \frac{5}{10000} = 0,0005 \frac{В}{об / мин}.$$

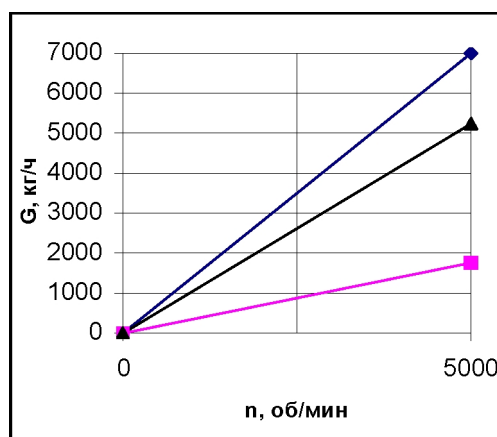


Рисунок 1.3.4 - Статическая характеристика насосов

Коэффициенты усиления насосов k_{GH1} и k_{GH2} определяем следующим образом: суммарный расход топлива изменяется от 0 до 7000 кг/ч, расход топлива через I контур форсунок изменяется от 0 до 25% от 7000 кг/ч, а расход топлива через II контур от 0 до 75% от 7000 кг/ч. Частоты вращения роторов двигателя изменяются от 0 до 5000 об/мин. Тогда, принимая зависимости линейными (см. рис. 1.3.6), находим искомые коэффициенты усиления:

$$k_{GH1} = \frac{\Delta G_1}{\Delta n} = \frac{0,25 \cdot 7000}{5000} = \frac{1750}{5000} = 0,35 \frac{\text{кг/ч}}{\text{об/мин}};$$

$$k_{GH2} = \frac{\Delta G_2}{\Delta n} = \frac{0,75 \cdot 7000}{5000} = \frac{5250}{5000} = 1,05 \frac{\text{кг/ч}}{\text{об/мин}}.$$

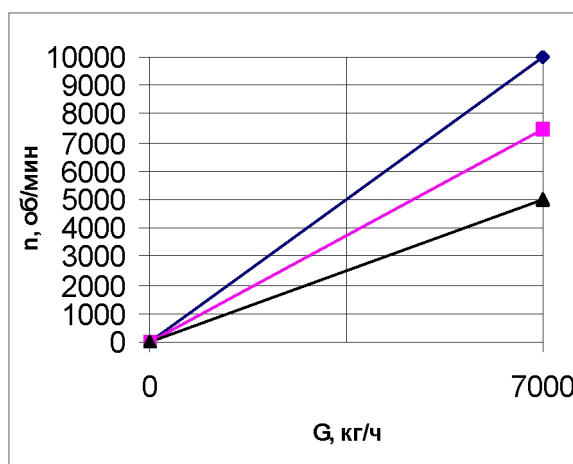


Рисунок 1.3.5 - Статическая характеристика роторов двигателя

Коэффициенты усиления роторов по расходу топлива k_{ng} , k_{ncg} и k_{nng} определяем следующим образом: частота вращения ротора ВД изменяются от 0 до 10000 об/мин, СД – от 0 до 7500 об/мин, НД – от 0 до 5000 об/мин. А расход топлива изменяется от 0 до 7000 кг/ч. Также принимаем зависимости линейными (см. [рисунок 1.3.5](#)). Тогда:

$$k_{ng} = \frac{\Delta n_g}{\Delta G_T} = \frac{10000}{7000} = 1,429 \frac{\text{об/мин}}{\text{кг/ч}};$$

$$k_{ncg} = \frac{\Delta n_c}{\Delta G_T} = \frac{7500}{7000} = 1,071 \frac{\text{об/мин}}{\text{кг/ч}};$$

$$k_{nng} = \frac{\Delta n_n}{\Delta G_T} = \frac{5000}{7000} = 0,714 \frac{\text{об/мин}}{\text{кг/ч}}.$$

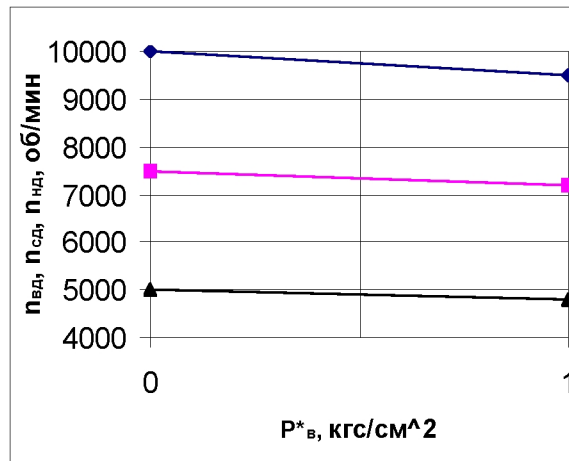


Рисунок 1.3.6 - Статическая характеристика роторов двигателя по давлению $P^*_в$

Предположим, что при увеличении давления на входе в двигатель на 1 кгс/см^2 частоты вращения ротора ВД уменьшаются на 500 об/мин , СД – на 300 об/мин , НД – на 200 об/мин . Принимая зависимости линейными (см. рис. 1.3.6), определяем искомые коэффициенты:

$$k_{нвP} = \frac{\Delta n_n}{\Delta P} = \frac{-500}{1} = -500 \frac{\text{об/мин}}{\text{атм}};$$

$$k_{нсP} = \frac{\Delta n_c}{\Delta P} = \frac{-300}{1} = -300 \frac{\text{об/мин}}{\text{атм}};$$

$$k_{нвP} = \frac{\Delta n_n}{\Delta P} = \frac{-200}{1} = -200 \frac{\text{об/мин}}{\text{атм}}.$$

Для определения коэффициента усиления ротора НД по частоте вращения ротора СД примем, что при увеличении частоты вращения ротора СД частота вращения ротора НД изменяются на 15% . Тогда:

$$k_{сн} = 0,15.$$

$$\text{Аналогично } k_{сс} = 0,15.$$

Обратное взаимное влияние роторов друг на друга определяем следующим образом:

$$k_{нс} = -0,15; k_{св} = -0,15.$$

D-разбиение будем строить с помощью программы Mathcad 2001 для положительных и отрицательных значений частот.

$\beta_0 := a_0$	$\beta_0 = 2.25$	$\alpha_0 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un} \cdot T_{др1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_0 = -0.00015$
$\beta_1 := (T_B + T_{ЭД1}) \cdot T_{ир1}$	$\beta_1 = 6$	$\alpha_1 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un} \cdot k_{р1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_1 = -0.00075$
$\beta_2 := T_{ир1}$	$\beta_2 = 3$	$\alpha_2 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un}$	$\alpha_2 = -0.00025$

$$k_{нН1_k} := \frac{\beta_0 \cdot (s_k)^3 + \beta_1 \cdot (s_k)^2 + \beta_2 \cdot s_k}{\alpha_0 \cdot (s_k)^2 + \alpha_1 \cdot s_k + \alpha_2}$$



Рисунок 1.3.7 - D-разбиение в плоскости коэффициента $k_{нН1}$: I – область устойчивой работы; II – область неустойчивой работы САР

Как видно из результатов построения САР будет устойчива при любых положительных значениях коэффициента. Далее строим D-разбиение, исключив дифференцирование в законе регулирования электронно-аналогового регулятора.

$$T_{др1} := C$$

$\beta_0 := a_0$	$\beta_0 = 2.25$	$\alpha_0 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un} \cdot T_{др1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_0 = 0$
$\beta_1 := (T_B + T_{ЭД1}) \cdot T_{ир1}$	$\beta_1 = 6$	$\alpha_1 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un} \cdot k_{р1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_1 = -0.00075$
$\beta_2 := T_{ир1}$	$\beta_2 = 3$	$\alpha_2 := -k_{GH1} \cdot k_{NBG} \cdot k_{Un}$	$\alpha_2 = -0.00025$

$$k_{нН1_k} := \frac{\beta_0 \cdot (s_k)^3 + \beta_1 \cdot (s_k)^2 + \beta_2 \cdot s_k}{\alpha_0 \cdot (s_k)^2 + \alpha_1 \cdot s_k + \alpha_2}$$

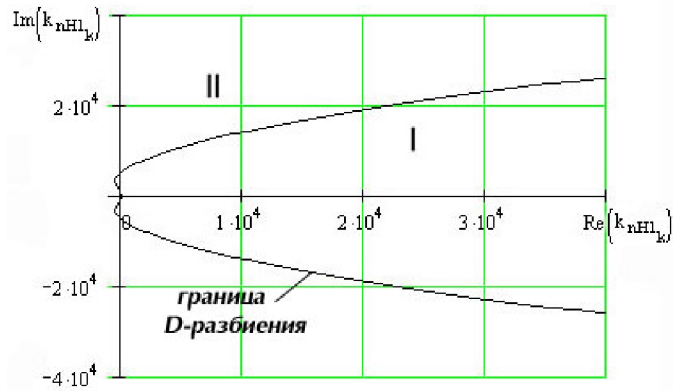


Рисунок 1.3.8 - D-разбиение в плоскости коэффициента k_{nH1} при $T_{оп1} = 0$: I – область устойчивой работы; II – область неустойчивой работы САР

Таким же образом можно построить область устойчивости регулятора с интегральным законом регулирования.

$$T_{др1} := 0 \quad k_{р1} := C$$

$\beta_0 := a_0$	$\beta_0 = 2.25$	$\alpha_0 := -k_{GH1} \cdot k_{мвG} \cdot k_{Un} \cdot T_{др1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_0 = 0$
$\beta_1 := (T_v + T_{ЭД1}) \cdot T_{ир1}$	$\beta_1 = 6$	$\alpha_1 := -k_{GH1} \cdot k_{мвG} \cdot k_{Un} \cdot k_{р1} \cdot T_{ир1}$	$\alpha_1 = 0$
$\beta_2 := T_{ир1}$	$\beta_2 = 3$	$\alpha_2 := -k_{GH1} \cdot k_{мвG} \cdot k_{Un}$	$\alpha_2 = -0.00025$

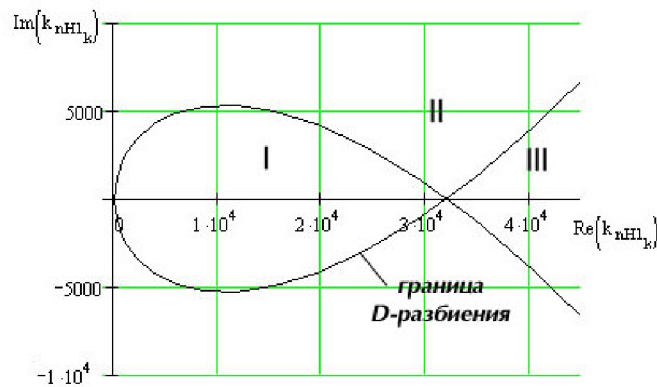


Рисунок 1.3.9 - D-разбиение в плоскости коэффициента k_{nH1} при $T_{оп1} = 0$ и $k_{р1} = 0$:

I – область устойчивой работы; II и III – области неустойчивой работы САР

По результатам построений можно сделать вывод, что введение в систему автоматического регулирования ПИД-регулятора существенно увеличивает область устойчивой работы системы. Для проверки устойчивости САР в области I ([рисунок 1.3.7](#)) зададимся величиной $\text{Re } k_{nH1}$, взятой из области устойчивой работы по [рисунку 1.3.9](#): $k_{nH1} = 10000$, и запишем

характеристический полином или собственный оператор замкнутой САР с числовыми значениями коэффициентов:

$$D_{зам}(S) = 2,25S^3 + 7,5S^2 + 10,5S + 2,5.$$

Для проверки устойчивости САР по критерию Рауса-Гурвица составим квадратную матрицу Гурвица из коэффициентов $a_0 \dots a_n$ и при $a_0 = 2,25 > 0$ проанализируем знаки диагональных миноров:

$$a_0 := T_B \cdot T_{ЭД1} \cdot T_{ир1} \qquad a_0 = 2.25$$

$$a_1 := (T_B + T_{ЭД1}) \cdot T_{ир1} + k_{GH1} \cdot k_{пН1} \cdot k_{пвG} \cdot k_{Un} \cdot T_{др1} \cdot T_{ир1} \qquad a_1 = 7.5$$

$$a_2 := T_{ир1} + k_{GH1} \cdot k_{пН1} \cdot k_{пвG} \cdot k_{Un} \cdot k_{р1} \cdot T_{ир1} \qquad a_2 = 10.5$$

$$a_3 := k_{GH1} \cdot k_{пН1} \cdot k_{пвG} \cdot k_{Un} \qquad a_3 = 2.5$$

$$a_1 = 7.5 > 0$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{pmatrix} \quad a_1 \cdot a_2 - a_3 \cdot a_0 = 73.125 > 0$$

$$\begin{pmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{pmatrix} \quad a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 - a_0 \cdot a_3^2 = 182.813 > 0$$

Все диагональные миноры положительны, следовательно, САР устойчива и область I D-разбиения ([рисунок 1.3.9](#)) является областью устойчивости САР.

1.4 Исследование качества регулирования САР двигателя с топливными насосами объемного типа

Качество регулирования САР определяется по показателям качества переходного процесса при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях. Переходные характеристики рассчитываются по алгоритму и программе МВТУ 2.0.

1.4.1 Общие сведения о программном комплексе «МВТУ»

Программный комплекс «Моделирование в технических устройствах» («МВТУ») – современная среда интеллектуального САПР, предназначенная для детального исследования и анализа динамических процессов в системах автоматического управления (САУ), в следящих приводах и роботах, в ядерных и тепловых энергоустановках, в любых технических системах, описание

динамики которых может быть реализовано методами структурного моделирования.

Может использоваться для моделирования нестационарных процессов в физике, электротехнике, динамике машин и т.д., а также для решения нестационарных краевых задач (теплопроводность, гидродинамика и др.).

Может функционировать в многокомпьютерных моделирующих комплексах, в том числе и в режиме удаленного доступа к технологическим и информационным ресурсам.

Является альтернативной программным продуктам MATRIX_x, Simulink, VisSim и др.

Программный комплекс «МВТУ» реализует режимы работы:

МОДЕЛИРОВАНИЕ, обеспечивающий:

- моделирование динамических процессов в непрерывных, дискретных и гибридных САУ, в том числе и в системах большой размерности;
 - рестарт задачи («безударное» продолжение расчета), архивацию и воспроизведение результатов моделирования;
 - редактирование параметров структурной схемы и расчета, в режиме «on-line»;
 - расчет в масштабе реального времени (если позволяют технические возможности компьютера) или при масштабировании модельного времени
- ОПТИМИЗАЦИЯ, позволяющий решать задачи:

- параметрической оптимизации САУ и идентификации опытных данных;
- синтеза оптимальных регуляторов и оптимального управления в многокритериальной постановке при наличии ограничений на значения динамических переменных, управляющих воздействий, параметров элементов системы автоматического управления, функционалов качества.

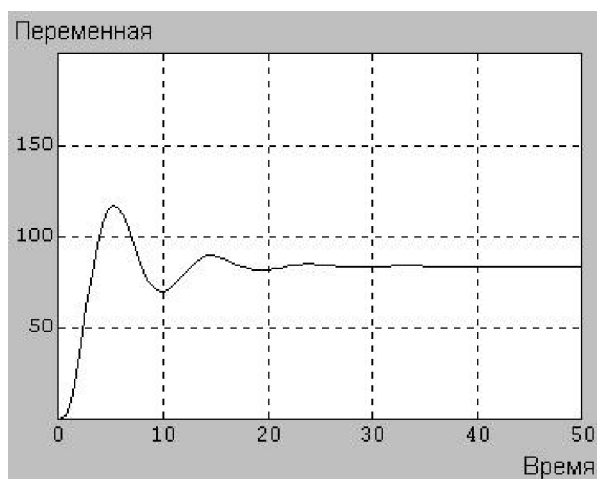
ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ, обеспечивающий расчет амплитудно-фазовых частотных характеристик для любой линейной и большинства нелинейных систем управления (годограф АФЧХ, ЛАХ, ФЧХ и др.).

Программный комплекс «МВТУ» имеет следующие достоинства:

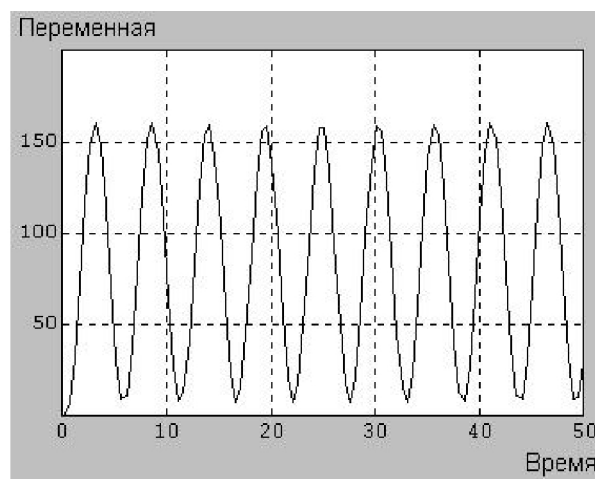
- открытость за счет реализации в ПК «МВТУ» нескольких механизмов обмена данными с внешними расчетными программами, а также за счет встроенного в ПК интерпретатора математических функций;
- принцип вложенности структур (глубина вложенности неограниченна), что особо актуально при моделировании сложных динамических систем;
- наличие наиболее полной Общетехнической и ряда Специализированных библиотек типовых блоков;
- наличие библиотеки Контроль и управление, что позволяет формировать в ПК «МВТУ» панели (щиты) приборов для отображения и оперативного управления моделируемой системой в процессе расчета;
- функционирование в любой версии WINDOWS, наличие справочной системы, эффективность в отраслевых разработках и учебном процессе.

1.4.2. Анализ качества переходного процесса при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях

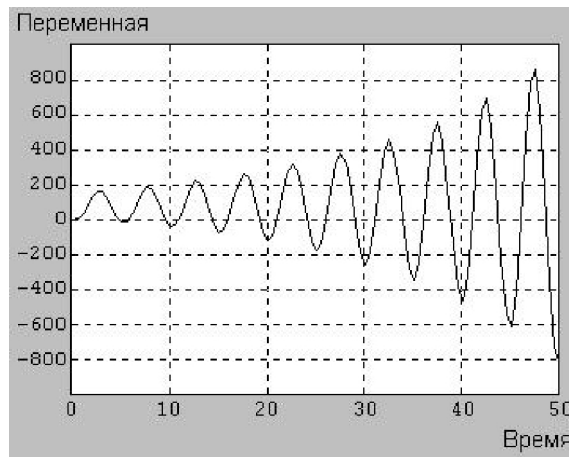
Сначала проанализируем качество переходного процесса упрощенной схемы без дифференцирующего и пропорционального звеньев электронно-аналогового регулятора.



а) устойчивая работа ($k_{нН1}=10000$)



б) граница устойчивости ($k_{нН1}=32000$)

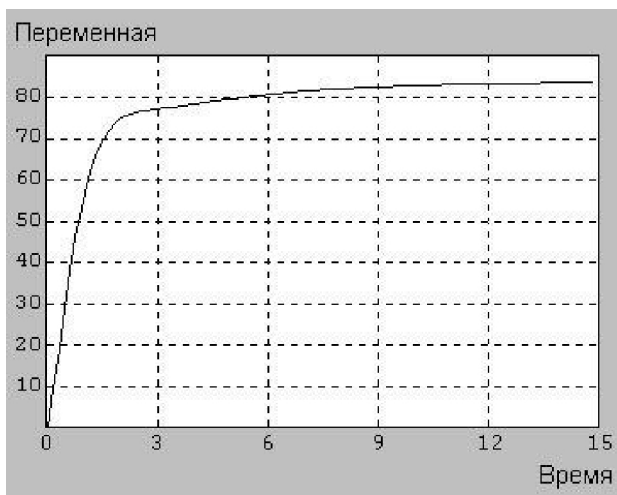


в) неустойчивая работа ($k_{нН1}=40000$)

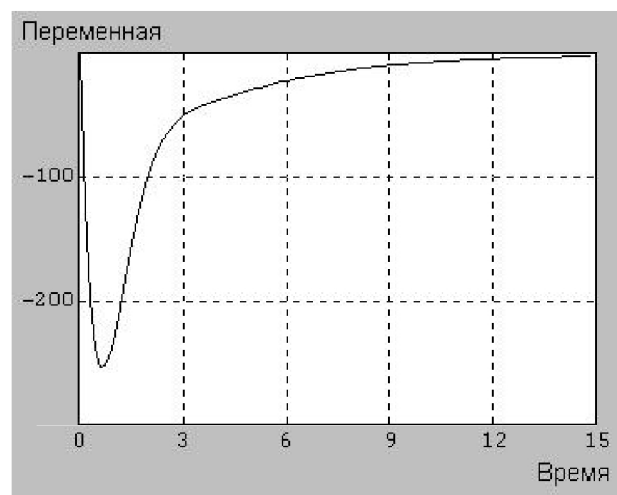
Рисунок 1.4.1 - Переходные характеристики САР при ступенчатом управляющем воздействии $\Delta\alpha_{pyo} = 1$ и различных значениях коэффициента $k_{нН1}$

Для этого зададимся тремя значениями коэффициента $k_{нН1}$ из разных областей D-разбиения ([рисунок 1.3.9](#)), например $k_{нН1}=10000$ – область устойчивости; ≈ 32000 – граница устойчивости; 40000 – область неустойчивой работы. В результате получаем переходные характеристики (см. [рисунок 1.4.1](#))

Результаты построения переходных характеристик подтверждают правильность построения D-разбиения ([рисунок 1.3.9](#)).



а) $\Delta\alpha_{pyo} = 1$ ($k_{нН1}=10000$)

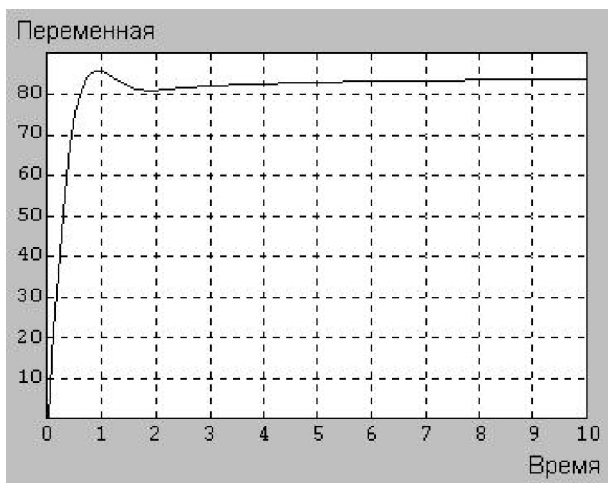


б) $\Delta P_e^* = 1$ ($k_{нН1}=10000$)

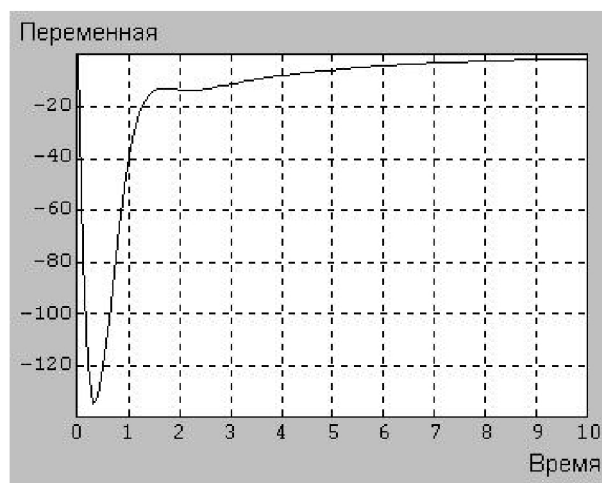
Рисунок 1.4.2 - Переходные характеристики упрощенной САР при ступенчатом управляющем воздействии $\Delta\alpha_{pyo} = 1$ и ступенчатом возмущающем $\Delta P_e^* = 1$ воздействии

Далее строим переходные характеристики упрощенной схемы с ПИД-регулятором при ступенчатом управляющем и ступенчатом возмущающем воздействиях при значении коэффициента $k_{нН1}=10000$.

И наконец строим переходные процессы сложной схемы с ПИД-регулятором при ступенчатом управляющем и ступенчатом возмущающем воздействиях при значении коэффициентов $k_{нН1}=k_{нН2}=10000$.



а) $\Delta\alpha_{пво} = 1$ ($k_{нН1}=10000$)



б) $\Delta P_{\epsilon}^* = 1$ ($k_{нН1}=10000$)

Рисунок 1.4.3 - Переходные характеристики САР при ступенчатом управляющем $\Delta\alpha_{пво} = 1$ и ступенчатом возмущающем $\Delta P_{\epsilon}^* = 1$ воздействиях

Из анализа графических зависимостей ([рисунок 1.4.3](#)) следует, что САР будет устойчива при принятых значениях коэффициентов.

1.5 Исследование устойчивости САР двигателя с центробежными топливными насосами

В отличие от насоса объемного типа, где расход топлива жестко зависит от частоты вращения ротора, в центробежных насосах он во многом определяется давлением топлива на выходе из насоса. Управление подачей топлива осуществляется дозирующими иглами 1-го и 2-го контуров, роль же центробежного насоса заключается в поддержании постоянного давления перед дозирующей иглой.

1.5.1 Уравнения звеньев САР

На основании уравнений (1.3.1)...(1.3.16) составим систему уравнений звеньев САР двигателя с центробежными топливными насосами:

$$T_{\epsilon} \frac{d\Delta n_{\epsilon}}{dt} + \Delta n_{\epsilon} = k_{ncG} \Delta G_T + k_{ce} \Delta n_c + k_{ncP} \Delta P_{\epsilon}^* + k_{ncT} \Delta T_{\epsilon}^* - \text{для ротора ВД};$$

$$T_c \frac{d\Delta n_c}{dt} + \Delta n_c = k_{ncG} \Delta G_T + k_{ec} \Delta n_{\epsilon} + k_{nc} \Delta n_n + k_{ncP} \Delta P_{\epsilon}^* + k_{ncT} \Delta T_{\epsilon}^* - \text{для ротора СД};$$

$$T_n \frac{d\Delta n_n}{dt} + \Delta n_n = k_{ncG} \Delta G_T + k_{cn} \Delta n_c + k_{ncP} \Delta P_{\epsilon}^* + k_{ncT} \Delta T_{\epsilon}^* - \text{для ротора НД};$$

$$\Delta U_n = k_{Un} \Delta n_{\epsilon} - \text{для датчика частоты вращения};$$

$$\Delta U_{\alpha} = k_{\alpha} \Delta \alpha_{pyd} - \text{для датчика положения РУД};$$

$$\Delta(\Delta U) = \Delta U_{\alpha} - \Delta U_n - \text{сравнение сигналов};$$

$$\Delta U'_{\text{ЭД1}}(t) = k_{P1} \Delta(\Delta U) + T_{op1} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} - \text{для электронно-аналогового}$$

регулятор 1-го электродвигателя;

$$\Delta U'_{\text{ЭД2}}(t) = k_{P2} \Delta(\Delta U) + T_{op2} \frac{d\Delta(\Delta U)}{dt} - \text{для электронно-аналогового}$$

регулятора 2-го электродвигателя;

$$T_{\text{ЭД1}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД1}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД1}} = k_{нн1} \Delta U'_{\text{ЭД1}} - \text{для 1-го электродвигателя};$$

$$T_{\text{ЭД2}} \frac{d\Delta n_{\text{ЭД2}}}{dt} + \Delta n_{\text{ЭД2}} = k_{нн2} \Delta U'_{\text{ЭД2}} - \text{для 2-го электродвигателя};$$

$$\Delta z_1 = k_1 \int \Delta n_{\text{ЭД1}} dt - \text{для механического редуктора привода дозирующей иглы 1-го контура};$$

$$\Delta z_2 = k_2 \int \Delta n_{\text{ЭД2}} dt - \text{для механического редуктора привода дозирующей иглы 2-го контура};$$

$$\Delta G_{H1} = k_{дн1} \Delta z_1 - \text{для дозирующей иглы 1};$$

$$\Delta G_{H2} = k_{дн2} \Delta z_2 - \text{для дозирующей иглы 2};$$

$$\Delta G_T = \Delta G_{H1} + \Delta G_{H2} - \text{для расхода топлива в камере сгорания (через 1-ый и 2-ой контуры)}.$$

Систему дифференциальных уравнений записываем в операторной форме и преобразуется к форме, удобной для построения структурной схемы САР.

В результате получаем следующую систему уравнений:

$$\Delta \tilde{n}_e = \frac{k_{neG}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{ce}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{n}_c + \frac{k_{neP}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{neT}}{T_e s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{n}_c = \frac{k_{ncG}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{cc}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{n}_e + \frac{k_{nc}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{n}_n + \frac{k_{ncP}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{ncT}}{T_c s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{n}_n = \frac{k_{nG}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{G}_T + \frac{k_{cn}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{n}_c + \frac{k_{nP}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{P}_e^* + \frac{k_{nT}}{T_n s + 1} \Delta \tilde{T}_e^* ;$$

$$\Delta \tilde{U}_n = k_{Un} \Delta \tilde{n}_e ;$$

$$\Delta \tilde{U}_\alpha = k_\alpha \Delta \tilde{\alpha}_{\text{pyd}} ;$$

$$\Delta(\Delta \tilde{U}) = \Delta \tilde{U}_\alpha - \Delta \tilde{U}_n ;$$

$$\Delta \tilde{U}'_{\text{эд1}}(t) = k_{P1} \Delta(\Delta \tilde{U}) + T_{\text{оп1}} s \Delta(\Delta \tilde{U}) + \frac{1}{T_{\text{уп1}} s} \Delta(\Delta \tilde{U}) ;$$

$$\Delta \tilde{U}'_{\text{эд2}}(t) = k_{P2} \Delta(\Delta \tilde{U}) + T_{\text{оп2}} s \Delta(\Delta \tilde{U}) + \frac{1}{T_{\text{уп2}} s} \Delta(\Delta \tilde{U}) ;$$

$$\Delta \tilde{n}'_{\text{эд1}} = \frac{k_{nH1}}{T_{\text{эд1}} s + 1} \Delta \tilde{U}'_{\text{эд1}} ;$$

$$\Delta \tilde{n}'_{\text{эд2}} = \frac{k_{nH2}}{T_{\text{эд2}} s + 1} \Delta \tilde{U}'_{\text{эд2}} ;$$

$$\Delta \tilde{z}_1 = \frac{k_1}{s} \Delta \tilde{n}'_{\text{эд1}} ;$$

$$\Delta \tilde{z}_2 = \frac{k_2}{s} \Delta \tilde{n}'_{\text{эд2}} ;$$

$$\Delta \tilde{G}_{H1} = k_{дн1} \Delta \tilde{z}_1 ;$$

$$\Delta \tilde{G}_{H2} = k_{дн2} \Delta \tilde{z}_2 ;$$

$$\Delta \tilde{G}_T = \Delta \tilde{G}_{H1} + \Delta \tilde{G}_{H2} .$$

1.5.2 Построение структурной схемы САР

Структурная схема САР, соответствующая системе преобразованных операторных уравнений включает контур с основной обратной связью по

частоте вращения ротора ВД $\Delta \tilde{n}_e$. По структурной схеме легко прослеживается взаимодействие звеньев в системе регулирования двигателя.

1.5.3 Анализ качества переходного процесса при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях

Для анализа качества переходного процесса построим переходные характеристики в программе МВТУ 2.0.

Но перед построением необходимо определить неизвестные коэффициенты: $k_{нН1}$, $k_{нН2}$, $T_{эд1}$, $T_{эд2}$, k_1 , k_2 , $k_{дИ1}$ и $k_{дИ2}$. Все остальные коэффициенты берем из предыдущих исследований.

$T_{эд1} = 0,2$ с, $T_{эд2} = 0,2$ с – постоянные времени электродвигателей;

Пусть входной сигнал на электродвигатели изменяется от 0 до 5 В, а выходной сигнал в виде оборотов изменяется от 0 до 1000 об/мин. Тогда:

$$k_{нН1} = k_{нН2} = \frac{1000}{5} = 200 \frac{\text{об / мин}}{\text{В}}.$$

Для червячных передач примем, что за 10 оборотов рейка перемещения дозирующей иглы смещается на 0,2 мм. Тогда:

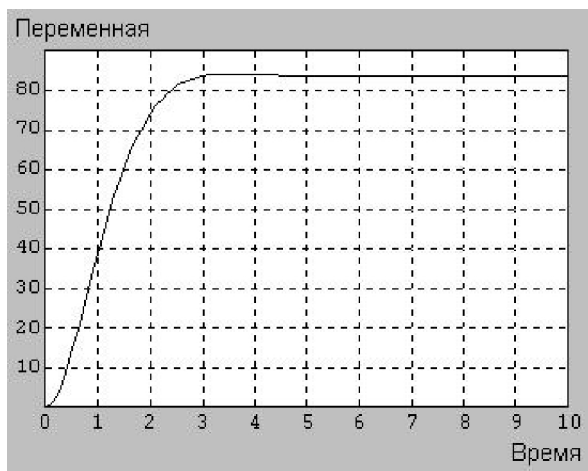
$$k_1 = k_2 = \frac{0,2}{10} = 0,02 \frac{\text{мм}}{\text{об / мин}} \text{с}^{-1}.$$

Коэффициенты усиления дозирующих игл будем определять следующим образом: предполагаем, что максимальное смещение обеих игл будет равно 20 мм, а расход топлива изменяется от 0 до 25% относительно 7000 кг/ч для 1-го контура, от 0 до 75% относительно 7000 кг/ч – для 2-го контура. Тогда:

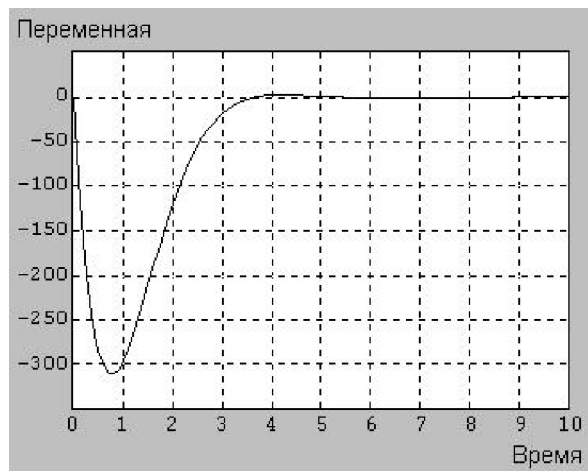
$$k_{дИ1} = \frac{0,25 \cdot 7000}{20} = 87,5 \frac{\text{кг / ч}}{\text{мм}};$$

$$k_{дИ2} = \frac{0,75 \cdot 7000}{20} = 262,5 \frac{\text{кг / ч}}{\text{мм}}.$$

С учетом всех подобранных коэффициентов построим переходные характеристики САР частоты вращения ГТД с подачей топлива центробежными насосами при ступенчатом управляющем и ступенчатом возмущающем воздействиях.



а) $\Delta\alpha_{руд} = 1$



б) $\Delta P_{г}^* = 1$

Рисунок 1.5.1 - Переходные характеристики САР при ступенчатом управляющем воздействии $\Delta\alpha_{руд} = 1$ и ступенчатом возмущающем $\Delta P_{г}^* = 1$ воздействиях

Из анализа графических зависимостей ([рисунок 1.5.1](#)) следует, что САР будет устойчива при принятых значениях коэффициентов.

1.6 Оценка устойчивости и качества регулирования электронно-цифровых САР авиационных ГТД

1.6.1. Функциональные схемы ЭСУ

При разработке и внедрении цифровых ЭСУ приходится решать две группы задач. К первой группе относятся задачи по изучению динамических процессов в цифровых ЭСУ, по оценке устойчивости системы и выбору параметров регулятора, при которых удовлетворяются заданные показатели качества регулирования.

Ко второй группе относятся задачи, связанные с проектированием и реализацией электронного регулятора, чувствительных и исполнительных элементов.

В данном разделе дипломного проекта рассматриваются задачи первой группы, решение которых неразрывно связано с составлением функциональных и структурных схем, с представлением разностных уравнений в виде собственного оператора системы и исследованием ее устойчивости и качества регулирования. В разделах 1.4, 1.5 дан анализ динамических характеристик САР двигателя при предположении аналогового электронного регулятора.

Однако при времени дискретизации сигналов, соизмеримых с постоянными времени звеньев, могут быть изменения в характере динамических процессов САР. Ниже рассмотрена методика оценки устойчивости и качества регулирования, которые могут быть применены при выборе параметров дискретной САР.

Принцип действия электронного регулятора заключается в том, что возложенные на него математические действия он производит в дискретные моменты времени $t=0; T; 2T; 3T; \dots$, где T - период квантования.

В эти моменты времени происходит преобразование аналоговых сигналов, поступающих с чувствительных элементов датчиков, сигналов управления в кодовый сигнал. Процесс аналогово-цифрового преобразования на схемах условно показывают так, как представлено на [рисунке 1.6.1](#).

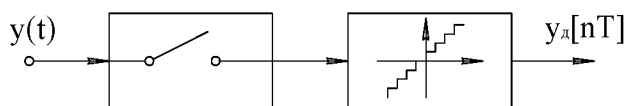


Рисунок 1.6.1 - Схема преобразования аналогового сигнала в кодовый или импульсный сигнал

Задержки во времени преобразования сигналов относят к процессору. Аналогично представляется на схеме цифро-аналоговое преобразование ([рисунком 1.6.2](#)) с тем отличием, что кодовый сигнал, преобразованный в импульсный, фиксируется в фиксаторе или экстраполяторе.

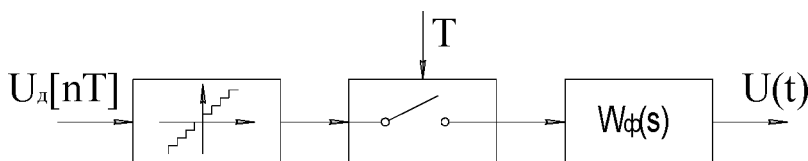


Рисунок 1.6.2 - Схема преобразования кодового или импульсного сигнала в аналоговый сигнал

Если к моменту поступления сигнала через период T сохраняется начальное значение предыдущего сигнала, то такой экстраполятор относят к нулевому порядку. Для более точного воспроизведения при необходимости может производиться экстраполяция ступенчатых выходных сигналов по

линейной, квадратной и другим зависимостям с учетом предыстории процесса регулирования.

Процесс преобразования сигналов в процессоре происходит с запаздыванием на величину вычислительного процесса. Поэтому на функциональной схеме вычислительный процесс представляется в виде соединения звеньев логических преобразований и звена чистого запаздывания (рисунок 1.6.3).

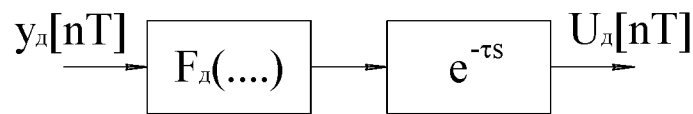


Рисунок 1.6.3 - Схема процесса преобразования кодированных сигналов в электронном регуляторе

Время запаздывания складывается из времени аналого-цифрового преобразования ($\tau_{АЦП}$), вычислительного процесса ($\tau_{в.пр}$) и времени цифроаналогового преобразования ($\tau_{ЦАП}$)

$$\tau = \tau_{АЦП} + \tau_{в.пр} + \tau_{ЦАП} . \tag{1.6.1}$$

Рассмотрим в качестве примера функциональную схему цифровой ЭСУ частоты вращения и степени понижения давления на турбине (рисунок 1.6.4).

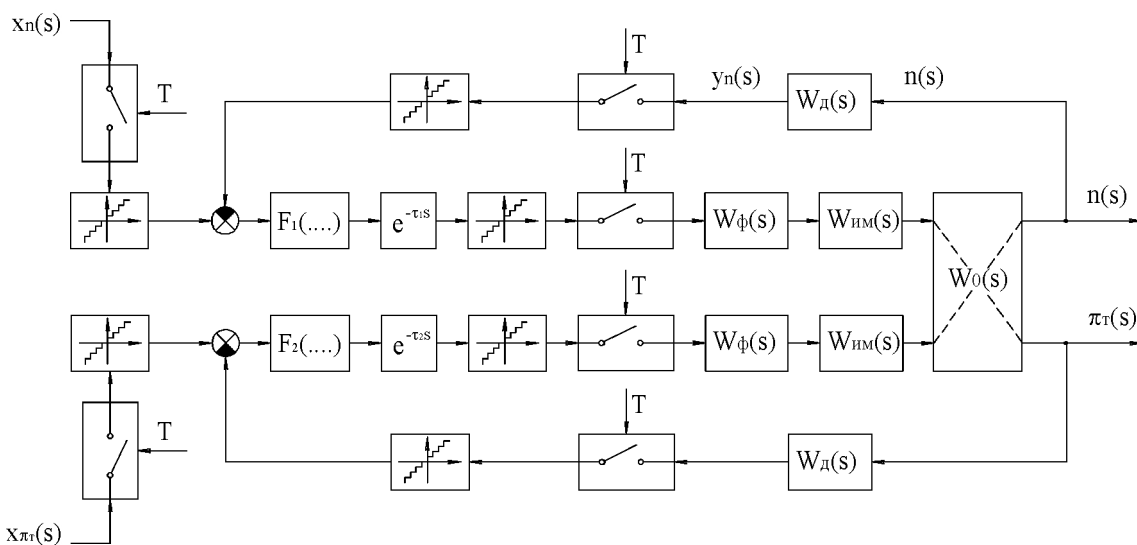


Рисунок 1.6.4 - Функциональная схема двухмерной САУ авиационного ГТД

При последовательном обслуживании ЭСУ двух каналов регулирования с циклом повторения T отсчёт входного сигнала в первом канале производится в дискретные моменты времени $t = nT$ ($n = 0; 1; 2; \dots$), а во втором канале в моменты времени $t = nT + \tau_1$, где τ_1 - время запаздывания процесса регулирования на первом канале ([рисунок 1.6.5](#)).

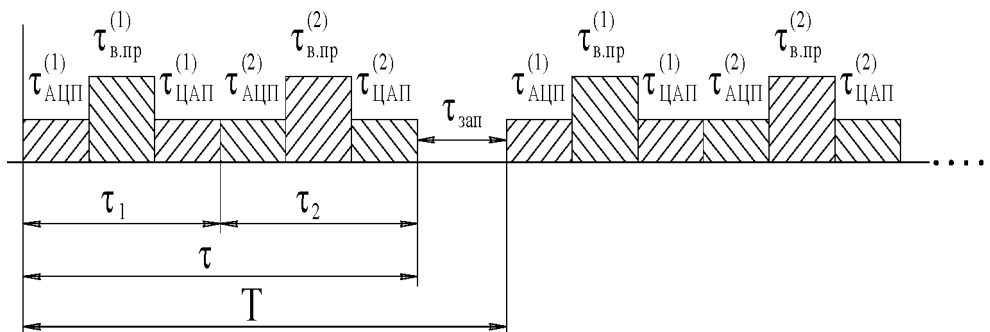


Рисунок 1.6.5 - Схема распределения времени по каналам управления при последовательной обработке сигналов в ЭСУ

Регулирующее воздействие может осуществляться также в дискретные моменты времени $\tau_{p.возд} = nT + \tau_1$ по первому каналу и $\tau_{p.возд} = nT + \tau$ - по второму каналу ([рисунок 1.6.6](#)).

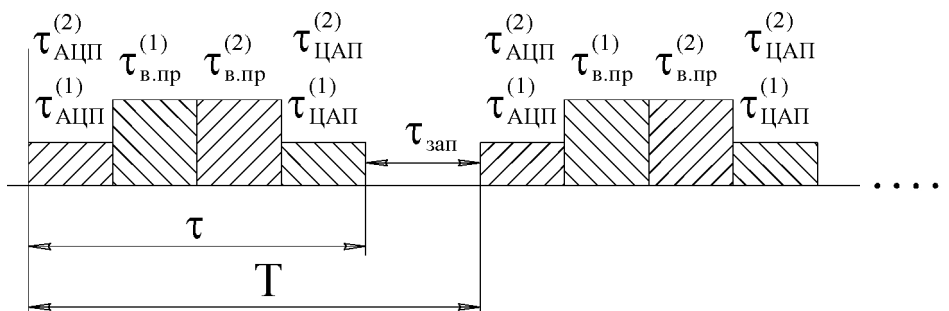


Рисунок 1.6.6 - Схема распределения времени по каналам управления при параллельном преобразовании сигналов в ЭСУ

После того, как скомпонована функциональная схема ЭСУ требуется определить период квантования сигналов T , параметры узлов и элементов, при которых обеспечивается устойчивость системы и удовлетворяются требуемые показатели качества переходного процесса. Эта задача может быть решена,

если воспользоваться методами теории импульсных систем. Известно, что в импульсных системах квантования сигналов происходит только во времени, а процесс формирования законов и программ регулирования происходит в результате сравнения величин импульсов. Следовательно, если в цифровых ЭСУ предполагать большое число уровней (разрядов), то приближенно цифровую систему можно отнести к импульсной системе и воспользоваться специальными методами их исследования.

1.6.2 Структурная схема и передаточные функции импульсной САР

Импульсная система может быть представлена в виде соединения импульсного элемента (ИЭ) и непрерывной части системы (НЧС) ([рисунок 1.6.7](#)). На [рисунке 1.6.7](#) приняты следующие обозначения: $x_{вх}^*(t)$, $x_{вых}^*(t)$, - входной и выходной дискретные (импульсные) сигналы; $\varepsilon^*(t)$ - отклонение регулируемого параметра.

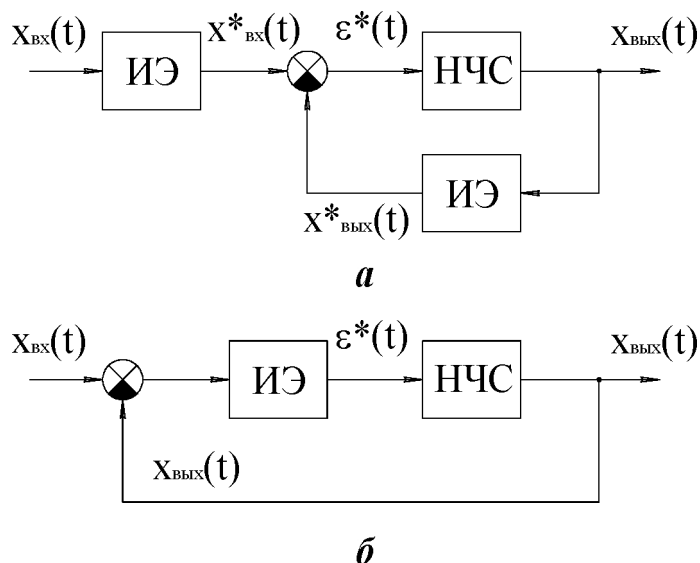


Рисунок 1.6.7 - Функциональные схемы замкнутых импульсных САР

В зависимости от того, какой из параметров импульса меняется, различают системы с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и фазо-импульсной модуляцией (ФИМ).

Зависимость между модулирующим параметром и величиной входного параметра называют статистической характеристикой ИЭ. Эта зависимость

может быть линейной или нелинейной. Последовательность импульсов во времени называют сигналом. Сигналы в импульсных системах описываются дискретными функциями во времени.

В практике имеют место все типы импульсных схем, но расчетные схемы обычно содержат эквивалентные ИЭ с АИМ.

По статической характеристике ([рисунок 1.6.8](#)) можно определить коэффициент передачи импульсного элемента.

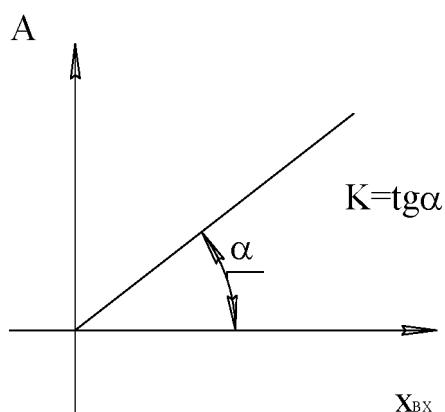


Рисунок 1.6.8 - Статическая характеристика ИЭ с амплитудно--импульсной модуляцией сигнала

При исследовании динамических характеристик САР реальный ИЭ представляют в виде последовательного соединения простейшего ПИЭ и формирующего элемента (ФЭ) ([рисунок 1.6.9](#)).

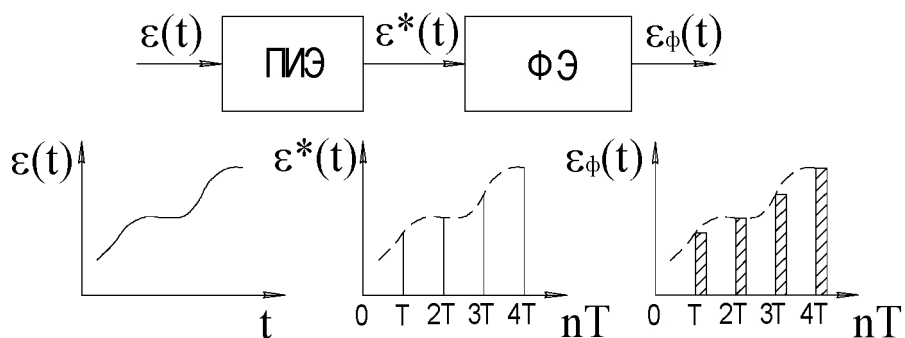


Рисунок 1.6.9 - Схема соединения простейшего импульсного элемента и формирующего элемента

Сигнал с выхода ПИЭ представляется в виде:

$$\varepsilon^*(t) = \sum_{n=0}^{n=\infty} \varepsilon(nT) \delta(t - nT),$$

где $\delta(t - nT)$ - δ - функция, $\varepsilon(nT) = \varepsilon(t)$ при $t = nT$. Функция $\delta(t - nT)$ имеет площадь пропорциональную величине импульса сигнала на входе.

Динамические свойства импульсного элемента определяют по его передаточной функции. При нахождении выражения для передаточной функции используют понятие импульсной переходной функции или функции веса $\omega(t)$, которая представляет собой реакцию звена или системы при входном воздействии в виде δ - функции: $x_{\text{ex}}(t) = \delta(t)$, $\int_0^{\infty} \delta(t) dt = 1$.

Известно, что передаточная функция звена или системы определяется как изображение по Лапласу импульсной переходной функции (функции веса) $W(s) = L[\omega(t)]$.

Передаточная функция формирующего элемента будет равна:

$$W_{\phi}(s) = L[\omega_{\phi}(t)].$$

Так как на выходе формирующего элемента реализуется прямоугольные импульсы, когда на его вход подается импульсный сигнал от простейшего импульсного элемента, то можно принять этот сигнал также за функцию веса. Для нахождения передаточной функции ФЭ представим прямоугольный сигнал в виде суммы двух ступенчатых функций с одинаковой ступенью ([рисунок 1.6.10](#)): $\omega_{\phi}(t) = x_1(t) - x_2(t) = 1(t) - 1(t - \gamma T)$

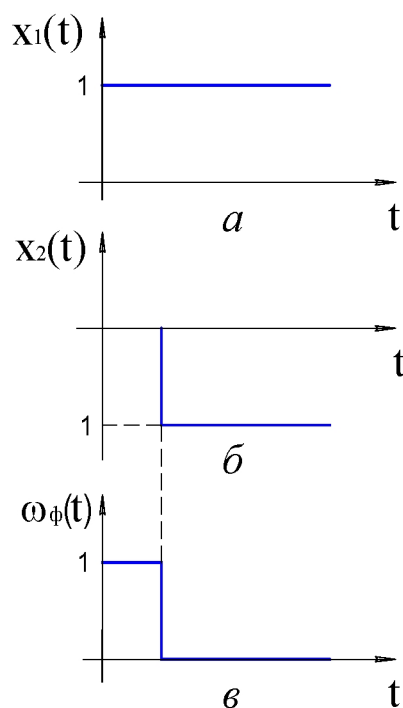


Рисунок 1.6.10 - Формирование весовой функции $\omega_\phi(t)$ импульсного элемента из двух единичных ступенчатых функций

Тогда передаточная функция формирующего элемента будет равна:

$$W_\phi(s) = L[1(t) - 1(t - \gamma T)] = \frac{1}{s} - \frac{e^{-\gamma Ts}}{s} = \frac{1 - e^{-\gamma Ts}}{s}.$$

Если $\gamma = 1$, то

$$W_\phi(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

- передаточная функция ФЭ или экстраполятора нулевого порядка.

При известной передаточной функции ФЭ структурную схему САР можно представить в виде соединения передаточных функций ПИЭ и приведенной непрерывной части системы (ПНЧ) ([рисунок 1.6.11](#)).

В этой структурной схеме имеются дискретные и непрерывные сигналы, выраженные в операторной форме.

Трудность исследования таких систем заключается в том, что в них передаются и преобразовываются дискретные и непрерывные сигналы, а передаточная функция является дискретно-непрерывной функцией аргумента s . Таблица дискретно-непрерывных преобразований, аналогичных преобразованиям Лапласа, пока не создана. Поэтому в инженерной практике

широкое распространение получил математический аппарат дискретных преобразований Лапласа и одна из его разновидностей z - преобразование.

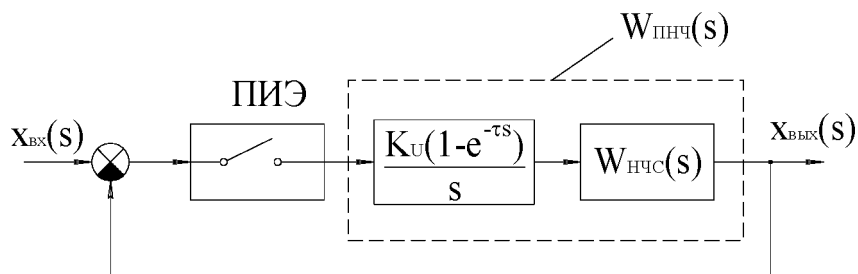


Рисунок 1.6.11 - Структурная схема импульсной САР, представленной в виде соединения ПИЭ и приведенной непрерывной части системы

При исследовании импульсных систем приходится решать также как и при изучении непрерывных систем уравнения, описывающие процессы в элементарных звеньях. Только в этом случае используются дискретные функции и разностные уравнения.

Функция, значения которой определены только для конкретных значений аргумента $t = nT$, называют дискретной и обозначают $x(nT)$, где T - период дискретизации:

$$x(nT) = x(t) \text{ при } t = nT$$

Скорость изменения непрерывной функции определяется её первой производной, а скорость изменения дискретной функции характеризуется её первой разностью:

$$\Delta x(nT) = x(nT + T) - x(nT).$$

Вторая разность, эквивалентная второй производной, равна:

$$\Delta^2 x(nT) = \Delta x(nT + T) - \Delta x(nT)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta^2 x(nT) &= x(nT + 2T) - x(nT + T) - x(nT + T) + x(nT) = \\ &= x(nT + 2T) - 2x(nT + T) + x(nT) \end{aligned}$$

Разность k -го порядка определяется по формуле:

$$\Delta^k x(nT) = \Delta^{k-1} x(nT + T) - \Delta^{k-1} x(nT)$$

Линейное неоднородное разностное уравнение k -го с постоянными

коэффициентами имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & a_0 \Delta^k x_{\text{вых}}(nT) + a_1 \Delta^{k-1} x_{\text{вых}}(nT) + \dots + a_{k-1} \Delta x_{\text{вых}}(nT) + a_k x_{\text{вых}}(nT) = \\ & = b_0 \Delta^m x_{\text{вх}}(nT) + b_1 \Delta^{m-1} x_{\text{вх}}(nT) + \dots + b_{m-1} \Delta x_{\text{вх}}(nT) + b_m x_{\text{вх}}(nT) \end{aligned}$$

где $x_{\text{вх}}(nT)$ - известная дискретная функция на входе; $x_{\text{вых}}(nT)$ - дискретная функция, определяемая из решения разностного уравнения, Δ^i - разности i -ых порядков $i = 1, 2, \dots, k$; a_j, b_j - постоянные коэффициенты, $j = 1, 2, \dots, k$; $j = 1, 2, \dots, m$.

Для решения разностных уравнений удобным является применение операционного метода, основанного на дискретном преобразовании Лапласа, которое является обобщением обычных преобразований Лапласа на дискретные функции.

Если изображение по Лапласу непрерывной функции определяется по формуле:

$$x(s) = L[x(t)] = \int_0^{\infty} x(t) e^{-st} dt,$$

то изображение дискретного сигнала $x^*(t)$ определяется по формуле:

$$x^*(s) = D[x^*(t)] = \sum_{n=0}^{n=\infty} x(nT) e^{-snT},$$

где $x^*(t)$ - оригинал дискретной функции; $x^*(s)$ - изображение в дискретных преобразованиях Лапласа.

Очень удобным в практике оказалось z - преобразование, которое получается из дискретного преобразования Лапласа путем подстановки $z = e^{sT}$:

$$x(z) = Z[x(nT)] = \sum_{n=0}^{n=\infty} x(nT) z^{-n}.$$

Пример 1: Требуется определить изображение дискретной функции $x(nT) = 1(nT)$:

$$x^*(s) = \sum_{n=0}^{n=\infty} 1(nT) e^{-snT} = 1 + e^{-sT} + e^{-2sT} + e^{-3sT} + \dots = \frac{1}{1 - e^{-sT}} = \frac{e^{sT}}{e^{sT} - 1}.$$

z -преобразование этой функции будет равно $x(z) = \frac{z}{z-1}$.

Пример 2. Пусть $x(t) = e^{\alpha t}$, тогда $x(nT) = e^{\alpha nT}$ и $x^*(s) = \sum_{n=0}^{n=\infty} e^{\alpha nT} \cdot e^{-nsT} = \frac{e^{sT}}{e^{sT} - e^{\alpha T}}$.

z - преобразование рассматриваемой функции будет определяться выражением:

$$x(z) = \frac{z}{z - e^{\alpha T}}$$

Рассчитаны и построены специальные таблицы прямых и обратных z - преобразований, с использованием которых можно определить передаточную функцию САР в z - преобразованиях, исследовать устойчивость и качество регулирования САР.

При определении передаточной функции импульсной САР основная задача заключается в преобразовании передаточной функции приведенной непрерывной части системы в изображениях по Лапласу $W_{\text{ПНЧ}}(s)$ к передаточной функции системы в z -преобразованиях $W_{\text{ПНЧ}}(z)$.

Таблица изображений по Лапласу и z -преобразований часто используемых функций:

$x(t)$	$x(s)$	$x(nT)$	$x(z)$
$\delta(t)$	1	$\delta(nT)$	1
$\delta(t - \kappa T)$	$e^{-\kappa Ts}$	$\delta(nT - \kappa T)$	$z^{-\kappa}$
1(t)	$\frac{1}{s}$	1(nT)	$\frac{z}{z-1}$
t	$\frac{1}{s^2}$	nT	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
$\frac{t^2}{2}$	$\frac{1}{s^3}$	$\frac{(nT)^2}{2}$	$\frac{T^2 z(z+1)}{2(z-1)^3}$
$e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{s+\alpha}$	$e^{-\alpha nT}$	$\frac{z}{z - e^{-\alpha T}}$
$e^{\alpha t}$	$\frac{1}{s-\alpha}$	$e^{\alpha nT}$	$\frac{z}{z - e^{\alpha T}}$
$1 - e^{-\alpha t}$	$\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}$	$1 - e^{-\alpha nT}$	$\frac{(1 - e^{\alpha T})z}{(z-1)(z - e^{-\alpha T})}$

Указанная задача решается в следующей последовательности.

1. По известной $W_{\text{ПНЧ}}(s)$, применив обратное преобразование Лапласа, находят функцию веса ПНЧ системы $\omega(t) = L^{-1}[W_{\text{ПНЧ}}(s)]$.
2. По весовой функции $\omega(t)$ определяют аналитическое выражение

соответствующей дискретной функции веса ПНЧ системы $\omega(nT)$.

3. Воспользовавшись таблицей z - преобразований находят передаточную функцию ПНЧ системы в z - преобразованиях $W_{ПНЧ}(z) = z[\omega(nT)]$.

В качестве примера рассмотрим расчет передаточной функции САР, представленной на [рисунке 1.6.12](#):

$$W_{раз}(s) = W_\phi(s)W_H(s) = \frac{\kappa(1 - e^{-sT})}{s^2}, \quad W_{раз}(z) = \kappa \frac{z-1}{z} z \left[\frac{1}{s^2} \right] = \frac{\kappa T}{z-1},$$

так как $z \left[\frac{1}{s^2} \right] = \frac{Tz}{(z-1)^2}$.

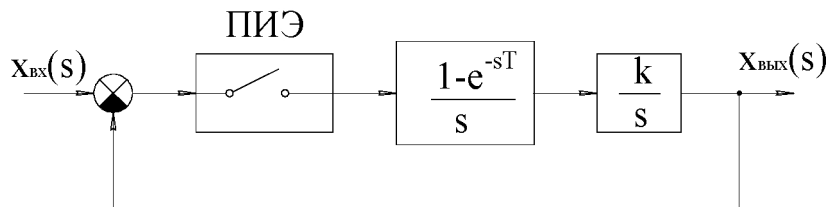


Рисунок 1.6.12 - Пример структурной схемы импульсной САР

Для замкнутой импульсной САР передаточная функция определяется также, как и при использовании обычных преобразований Лапласа:

$$W_з(z) = \frac{x_{вых} z}{x_{вх}(z)} = \frac{W_{раз}(z)}{1 + W_{раз}(z)}.$$

Передаточную функцию замкнутой импульсной САР можно представить в виде:

$$W_з(z) = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \dots + b_{m-1} z + b_m}{a_0 z^k + a_1 z^{k-1} + \dots + a_{k-1} z + a_k}.$$

В результате анализа собственного оператора передаточной функции САР $D(z) = a_0 z^k + \dots + a_k$ можно определить устойчивость САР и, построив переходную функцию САР, оценить ее качество регулирования.

1.6.3 Оценка устойчивости импульсной САР

Устойчивость является непременным условием работоспособности САР. Для оценки устойчивости импульсных систем применимы методы определения устойчивости непрерывных систем, но с учетом ряда особенностей этих САР.

Импульсная система устойчива, если её собственное движение с течением времени затухает. Это означает, что если решение системы уравнений в виде дискретной функции $x_{\text{внх}}(nT)$ выражено в виде:

$$x_{\text{внх}}(nT) = x_c(nT) + x_e(nT),$$

то для устойчивости САР необходимо, чтобы выполнялось равенство $\lim_{n \rightarrow \infty} x_c(nT) = 0$, где $x_c(nT)$ - свободное движение системы; $x_e(nT)$ - вынужденное движение системы.

Свободное движение системы определяется как решение характеристического уравнения замкнутой системы:

$$D(z) = a_0 z^k + a_1 z^{k-1} + \dots + a_{k-1} z + a_k.$$

Это алгебраическое уравнение имеет k корней на плоскости z . Однако, поскольку переменная z появилась в связи с подстановкой $z = e^{sT}$, то каждый корень z_i связан с корнями s_i в плоскости s зависимостью $z_i = e^{s_i T}$. Из последнего выражения следует, что нулевому корню $s_i = 0$, соответствует корень $z_i = 1$, а корнем s_i с отрицательной вещественной частью соответствуют корни $|z_i| < 1$.

Пусть $s_i = \alpha_i + j\beta_i$, тогда $z_i = e^{\alpha_i T} \cdot e^{j\beta_i T}$. Так как $|e^{j\beta_i T}| = |\cos \beta_i T + j \sin \beta_i T| = 1$, то знак α_i определяет, будет ли $|z_i|$ больше или меньше единицы. Для корней с положительной вещественностью - $e^{\alpha_i T} > 1$, для отрицательной $e^{\alpha_i T} < 1$ и при $\alpha_i = 0$ $e^{\alpha_i T} = 1$.

Известно, что для определения устойчивости САР необходимо и достаточно знать знак вещественной части корней характеристического уравнения. Если $\alpha_i < 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, то САР устойчива, если хотя бы один корень имеет положительную вещественную часть - САР неустойчива, а если, $\alpha_i = 0$, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

На основании изложенного можно дать формулировку условия устойчивости импульсной системы. САР устойчива, если все корни ее характеристического уравнения лежат внутри круга единичного радиуса, построенного вокруг начала координат на комплексной плоскости z (рисунки

1.6.13, 1.6.14).

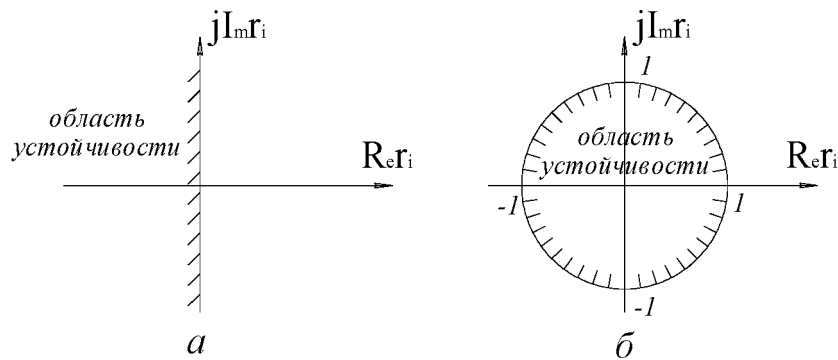


Рисунок 1.6.13 - Области устойчивости в плоскости корней характеристического уравнения для аналоговых (а) и импульсных (б) САР

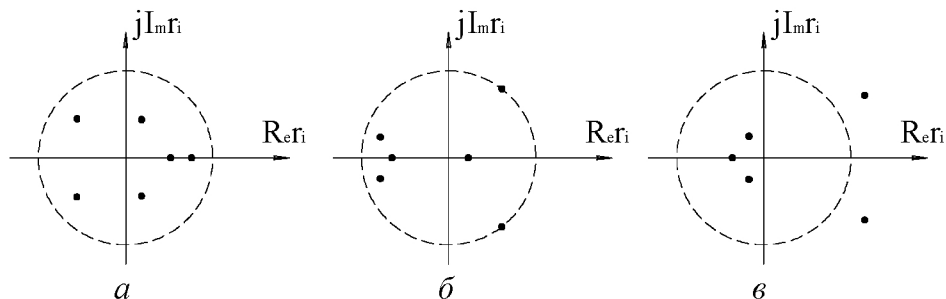


Рисунок 1.6.14 - Распределение корней характеристического уравнения импульсной САР: а – устойчивой; б – находящейся на границе устойчивости; в – неустойчивой

Для характеристического уравнения первого порядка $z + A = 0$ очевидное условие устойчивости будет $|A| < 1$. Для уравнения второго порядка: $z^2 + Az + B = 0$ путем вычисления его корней получаются следующие условия устойчивости:

$$\left. \begin{aligned} 1 + A + B > 0 \\ 1 - A + B > 0 \\ B - 1 > 0 \end{aligned} \right\}$$

Определение корней характеристического уравнения при $k > 3$ сопряжено с известными трудностями. Поэтому на практике находят применение критерии устойчивости, позволяющие определить устойчивость импульсных систем без определения корней характеристического уравнения.

К импульсным САР применим любой из известных критериев

устойчивости непрерывных систем. Однако для этого предварительно необходимо произвести билинейное преобразование полинома $D(z)$ в полином $D(\Omega)$ по формуле:

$$z = \frac{1+\Omega}{1-\Omega} \text{ или } \Omega = \frac{z-1}{z+1}.$$

Такое преобразование позволяет отобразить единичный круг плоскости корней z в левую часть комплексной плоскости корней Ω . Сделаем подстановку $s = j\omega$, тогда $z = e^{j\omega T}$ и $\Omega = \frac{e^{j\omega T} - 1}{e^{j\omega T} + 1}$. После преобразований последнего равенства получим:

$$\Omega = j \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2} = j\bar{\lambda},$$

где $\bar{\lambda} = \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2}$ - относительная псевдочастота.

Иногда вводится в рассмотрение абсолютная псевдочастота:

$$\lambda = \frac{2}{T} \operatorname{tg} \frac{\omega T}{2} = \frac{2\bar{\lambda}}{T} \text{ или } \bar{\lambda} = \frac{T}{2} \lambda.$$

При малых частотах $\operatorname{tg} \frac{\omega T}{2} \approx \frac{\omega T}{2}$ и псевдочастота приблизительно равна $\lambda \approx \omega$. Поэтому при выполнении условия $\omega T < 2$ можно заменить при расчетах псевдочастоту на действительную частоту.

При изменении частоты ω в пределах $-\frac{\pi}{T} \leq \omega \leq \frac{\pi}{T}$ псевдочастота пробегает все значения от $-\infty$ до $+\infty$. Комплексная величина Ω движется по мнимой оси от $-j\infty$ до $+j\infty$. Областью устойчивости в этом случае оказывается вся левая полуплоскость корней характеристического уравнения ([рисунок 1.6.15](#)). Поэтому для собственного оператора $D(\Omega)$ могут использоваться все критерии устойчивости для непрерывных систем.

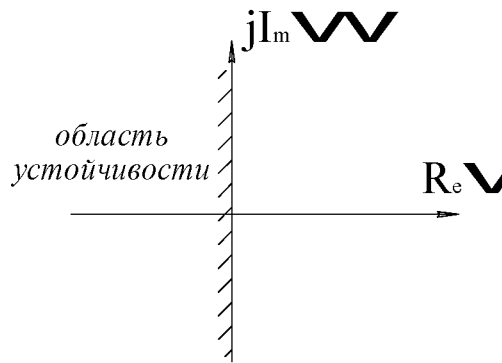


Рисунок 1.6.15 - Область устойчивости импульсной САР в плоскости Ω , полученной в результате билинейного преобразования $z = (1 + \Omega)/(1 - \Omega)$

Для рассмотренного ранее примера передаточная функция разомкнутой системы была $W_{раз}(z) = \frac{\kappa T}{z - 1}$, тогда передаточная функция замкнутой системы будет равна:

$$W_s(z) = \frac{W_{раз}(z)}{1 + W_{раз}(z)} = \frac{\kappa T}{z - 1 + \kappa T}.$$

Характеристический полином или собственный оператор системы будет равен: $D(z) = z + (\kappa T - 1)$. Для исследования устойчивости в последнем равенстве произведем замену $z = \frac{1 + \Omega}{1 - \Omega}$, тогда $D(\Omega) = \frac{1 + \Omega}{1 - \Omega} + (\kappa T - 1) = 0$ и после преобразований получим:

$$(2 - \kappa T) \Omega + \kappa T = 0$$

На основании алгебраического критерия устойчивости Рауса-Гурвица из последнего равенства получим два условия устойчивости импульсной САР: $\kappa T < 2$; $\kappa T > 0$. Первое условие раскрывает важное свойство импульсных систем. Устойчивость импульсной системы зависит не только от общего коэффициента передачи в разомкнутом состоянии κ , как это имеет место в непрерывных системах, но и от периода дискретизации T . Чем больше T , тем труднее обеспечить устойчивость системы при неизменном κ .

Рассмотрим второй пример. Пусть характеристическое уравнение импульсных САР имеет вид:

$$z^2 + Az + B = 0$$

Заменяя в последнем равенстве $z = \frac{1+\Omega}{1-\Omega}$, получим:

$$\frac{(1+\Omega)}{(1-\Omega)^2} + \frac{A(1+\Omega)}{1-\Omega} + B = 0 \text{ или } (1+\Omega)^2 + A(1+\Omega)(1-\Omega) + (1-\Omega)^2 B = 0.$$

После приведения последнего уравнения к стандартной форме относительно Ω будем иметь:

$$(1-A+B)\Omega^2 + 2(1-B)\Omega + 1+A+B = 0.$$

На основании алгебраического критерия Рауса-Гурвица условие устойчивости для уравнения второго порядка сводится к требованию положительности всех коэффициентов:

$$\left. \begin{aligned} 1+A+B > 0; \\ 1-A+B > 0; \\ 1-B > 0. \end{aligned} \right\}.$$

1.6.4 Построение и оценка качества переходного процесса в цифровых системах

Основные показатели качества переходного процесса в импульсных или цифровых ОСУ такие же, как и для непрерывных систем:

- 1) длительность переходного процесса; время регулирования τ_p , перерегулирование $(\Delta x_{\text{вых}})_{\text{max}}$;
- 2) колебательность переходного процесса определяется частотой и числом периодов колебаний за время переходного процесса;
- 3) статическая погрешность.

Оценку показателей качества переходного процесса производят по импульсной переходной функции системы $x_{\text{вых}}(nT)$ - реакции системы на единичную ступенчатую дискретную функцию $x_{\text{вх}}(nT) = 1(nT)$. При определении переходной функции системы можно воспользоваться методом обратных z -преобразований. Для этого вначале следует определить изображение в z -преобразования реакции системы $x_{\text{вых}}(z) = W(z)x_{\text{вх}}(z)$.

Изображение единичной дискретной переходной функции определяется по формуле:

$$x_{\text{ex}}(z) = Z[l(nT)] = \frac{z}{z-1}.$$

Тогда изображение дискретной переходной функции системы запишется в виде:

$$x_{\text{вых}}(z) = \frac{z}{z-1} W(z).$$

Далее необходимо найти оригинал $x_{\text{вых}}(nT)$, т.е. осуществить операцию обратного z - преобразования. Эта задача решается часто методом разложения функции в степенной ряд по отрицательным степеням z (делением полинома числителя на полином знаменателя). Коэффициенты полученного степенного ряда равны дискретным значениям импульсной переходной функции в моменты времени $t = nT$, $n = 0, 1, 2, \dots$, т.е. если в результате разложения по z с отрицательными степенями изображение выходного сигнала в z - преобразованиях имеет вид:

$$x_{\text{вых}}(z) = a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n},$$

то переходная функция будет определена из условия:

$$\left. \begin{array}{l} x_{\text{вых}}(0T) = a_0 \\ x_{\text{вых}}(T) = a_1 \\ x_{\text{вых}}(2T) = a_2 \\ \text{-----} \\ x_{\text{вых}}(nT) = a_n \end{array} \right\},$$

где $a_0 \dots a_n$ - значения выходного сигнала в моменты времени jT , $j = 0, 1, 2, \dots, n$.

Другой метод основан на разложении $x_{\text{вых}}(z)$ на простые дроби и определении $x_{\text{вых}}(nT)$ по таблице обратных z - преобразований.

Рассмотрим пример оценки качества переходного процесса, если z - преобразование выходного сигнала САР описывается зависимостью:

$$x_{\text{вых}}(z) = \frac{z}{z-1} W_3(z),$$

где $W_3(z) = \frac{\kappa T}{z + \kappa T - 1}$.

После преобразований получим: $x_{\text{вых}}(z) = \frac{\kappa T z}{z^2 + z(\kappa T - 2) + 1 - \kappa T}$.

Пусть $\kappa T = 1,5$, тогда будем иметь:

$$x_{\text{вых}}(z) = \frac{1,52}{z^2 - 0,5z - 0,5}$$

Разделив числитель на знаменатель, получим:

$$x_{\text{вых}}(z) = 1,52z^{-1} + 0,752z^{-2} + 1,125z^{-3} + 0,937z^{-4} + 1,032z^{-5} + \dots$$

Коэффициенты степенного ряда соответствуют следующим значениям дискретных функций оригинала по времени:

$$\begin{aligned} x_{\text{вых}}(0) = 0 \text{ при } n = 0; & \quad x_{\text{вых}}(3T) = 1,125 \text{ при } n = 3; \\ x_{\text{вых}}(T) = 1,52 \text{ при } n = 1; & \quad x_{\text{вых}}(4T) = 0,937 \text{ при } n = 4; \\ x_{\text{вых}}(2T) = 0,752 \text{ при } n = 2; & \quad x_{\text{вых}}(5T) = 1,032 \text{ при } n = 5; \dots \end{aligned}$$

Анализ графика переходной функции ([рисунок 1.6.16,а](#)) позволяет определить следующие показатели качества переходного процесса в САР: время регулирования $\tau_p = 5T$; перерегулирование $(\delta x_{\text{вых}})_{\max} = 50\%$; число колебаний за время переходного процесса - $N_{\text{кол}} = 2$.

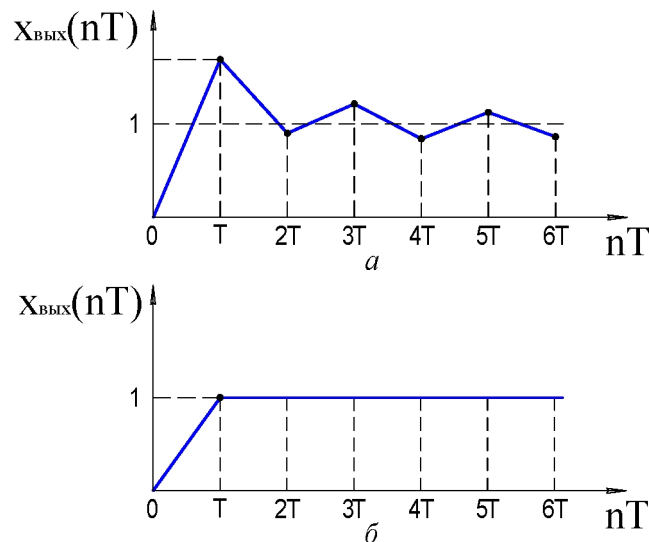


Рисунок 1.6.16 - Графики переходных функций импульсной САР (см. [рисунок 1.6.12](#)) при $kT=1,5$ (а) и $kT=1$ (б)

При $kT=1$ z -изображение выходного сигнала определяется зависимостью $x_{\text{вых}}(z) = \frac{1}{z-1} = z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5} + \dots$ и как следует из графика (см. [рисунок 1.6.16,б](#)) переходный процесс заканчивается за один период T квантования сигнала.

Таким образом, воспользовавшись изложенной методикой построения структурной схемы, оценки устойчивости и определения показателей качества регулирования импульсных систем, можно исследовать и выбрать параметры регулятора САР ГТД. При стремлении периода дискретизации к величинам $T=10^{-3}$ с, что возможно для быстродействующих контроллеров, результаты будут справедливы и для импульсной САР. Поэтому при предположении наличия таких контроллеров проведенные исследования будут достаточны для первоначальной оценки динамических свойств САР. Для более глубокого исследования динамики САР ГТД необходимо составить полные нелинейные дифференциальные уравнения, порядок которых может превысить $n=50 \dots 100$ и решать их численными методами.

1.7 Выбор основных узлов и элементов регуляторов САР

1.7.1 Основные чувствительные элементы

Датчики частоты вращения вала двигателя ДЧВ-2500

Схема и принцип действия датчика частоты вращения.

Датчики частоты вращения предназначены для пропорционального преобразования скорости вращения вала изделия в частоту электрических сигналов, подаваемых в систему управления. Наибольшее распространение из применяемых в настоящее время датчиков частоты вращения получили электроиндукционные как обладающие наибольшей надежностью и простотой. Поэтому в данной работе рассмотрен датчик ДЧВ-2500, собранный на постоянном магните ([рисунок 1.7.1](#)). Датчик работает следующим образом. При вращении индуктора, находящегося на валу изделия, каждый из его зубьев, проходя в непосредственной близости от торца датчика, изменяет магнитное поле, охватывающее витки катушки 1. При этом возникает э.д.с. индукции в катушке датчика. Частота импульсов напряжения, снимаемая с датчика, соответствует частоте прохождения зубьев мимо торца датчика и зависит от скорости вращения индуктора и, следовательно, вала изделия. Датчик имеет две

независимые обмотки для осуществления дублирования.

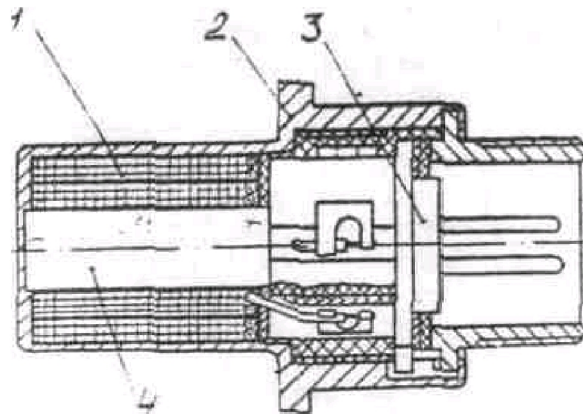


Рисунок 1.7.1 - Конструктивная схема датчика частоты вращения ДЧВ-2500:

1 – катушка; 2 – корпус; 3 – колодка; 4 – магнит

В процессе установки, монтажа и эксплуатации датчика не допускается попадание топлива, масла и других жидкостей на токоведущие детали штепсельного разъема.

Основные характеристики датчика

1. Амплитуда выходных импульсов датчиков должна быть не менее 180 мВ при частоте следования 250 Гц и не менее 1 В при частоте следования 2500 Гц при следующих параметрах индуктора и внешней нагрузке обмоток:

а) зазор между торцами зубьев индуктора, выполненного из стали 14X17H2, и торцом датчика – $1,3_{-0,1}$ мм;

б) число торцевых зубьев на индукторе с прямоугольными пазами шириной 6 мм при среднем диаметре 120 мм составляет $Z=32$;

в) активная нагрузка обмоток датчика $R_H=2$ кОм.

Частота следования выходных импульсов 2500 Гц соответствует 100% максимальной частоты вращения.

2. Датчик должен сохранять работоспособность при воздействии вибрационных нагрузок в диапазоне частот:

10-50 Гц с амплитудой 0,5-0,7 мм;

50-250 Гц с перегрузкой 10-15 g;

250-300 Гц с перегрузкой 15-18 g;

300-500 Гц с перегрузкой 18-30 g;

- 500-1000 Гц с перегрузкой 30 g;
- 1000-3500 Гц с перегрузкой 30-80 g;
- 3500-5000 Гц с перегрузкой 80 g.

Датчик должен сохранять работоспособность: при воздействии нагрузок с ускорением до 12 g с длительностью ударного импульса 20-50 мс и числом ударов 40-80 в минуту; при воздействии линейных нагрузок до 10 g, действующих в любом направлении; при воздействии акустических шумов в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц при уровне до 150 дБ; при изменении температуры от -60°C до 220°C длительно и до 300°C кратковременно (не более двух минут за цикл работы объекта – 1,5% за ресурс).

3. Масса датчика - не более 0,09 кг.

4. Надежность датчика характеризуется вероятностью его безотказной работы $P = 0,999$. Для проверки соответствия датчика предъявляемым к нему требованиям устанавливают три вида испытаний: контрольные, приемосдаточные, периодические.

Датчик температуры Т-112

Схема и принцип действия датчика температуры.

Датчик температуры (термопара) Т-112 предназначен для выдачи двух автономных сигналов, соответствующих температуре газов на входе в сопловой аппарат турбины. Принцип действия термопары Т-112 основан на том, что при нагревании рабочего спая на свободных концах возникает ТЭДС, величина и знак которой зависят от материала термоэлектродов и разности температур между рабочим спаем и свободными концами (контактными винтами).

Термопара Т-112 представляет собой неразборную конструкцию, в которой размещены два одинаковых автономных термоэлемента. Рабочий спай образуют два сваренных между собой термоэлектрода из сплавов хромель (Х) и алюмель (А). Термоэлектрод из сплава Х имеет положительную полярность, а из сплава А - отрицательную.

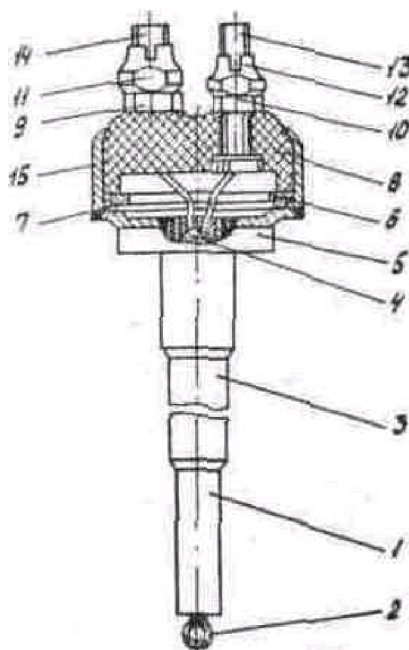


Рисунок 1.7.2 - Конструктивная схема термопары Т-112: 1 – втулка;
 2 – термоэлектроды; 3 – штуцер; 4 – керамическая трубка; 5 – корпус;
 6, 7 – шайба; 8 – изолятор; 9, 10 – гайка; 11, 12 – гайка самоконтрящаяся;
 13, 14 – винт; 15 – кожух

Изоляция термоэлектродов в штуцере осуществляется термоцементной массой и керамической трубкой 4 ([рисунок 1.7.2](#)). Втулка 1 с заармированными в нее термоэлектродами 2 связана со штуцером 3, который в свою очередь сварен с корпусом 5.

Термоэлектроды приварены к контактными винтам 13 и 14, которые установлены в керамический изолятор 8 и закреплены на нем при помощи гаек 9, 10 и термоцемента. Изолятор установлен в корпусе на шайбе 6 и закреплен при помощи завальцовки кромок корпуса. Для крепления к термопаре компенсационных проводов на контактных винтах имеются самоконтрящиеся гайки 11 и 12.

Основные технические данные

1. Диапазон измерения от 0 до 1200°C. Рабочий диапазон от 300 до 1000°C.

2. Теплоустойчивость головки термопары: рабочая - до 200°C, предельная

- до 300°C.

3. ТЭДС термоэлектродного материала датчика соответствует градуировочной характеристике X-A согласно ТУ 48-21-172-72.

4. Электрическое сопротивление изоляции термопары при нормальных климатических условиях не менее 0,5 МОм.

5. Электрическое сопротивление изоляции термопары при температуре рабочего спая 700°C - не менее 50 кОм. Для термопар, бывших в эксплуатации, электрическое сопротивление изоляции при нормальных климатических условиях должно быть не менее 20 кОм.

6. Термопара выдерживает вибрационные нагрузки с ускорением 10 g с частотой колебаний от 5 до 300 Гц и амплитудой вибраций не более 1 мм; ударные нагрузки с ускорением до 12 g.

7. Масса термопары не более 0,2 кг.

В таблице 1.7.1 приведены другие датчики, которые используются в электронных системах автоматического регулирования.

Таблица 1.7.1 - Некоторые датчики, используемые в электронных системах управления

Датчики	Наименование параметра	Диапазон измерения	Суммарная погрешность канала измерения	Кол-во каналов измерения	Применение	
					СУ	СК
ДБСК-220-1	Положение рычага АДТ	0-120°	± 30'	2	+	+
КТ-92	Полная температура газа в турбине	213...1053°K	± 5°K	2	+	+
ОПП-94	Максимальная температура лопатки	973...1443°K	± 26°K (при 700...800°K) ± 19°K (при 800...900°K) ± 12°K (при 900...1000°K) ± 7°K (при 1000...1170°K)	2	+	+
П-109М1	Температура топлива в баке	-60...200°С	± 1°С	2	+	
Т-152	Температура подшипника	-0...250°С	± 4°С	2		+

П-98АМ	Полная температура воздуха на входе в двигатель	-60...100 ⁰ С	± 1,4 ⁰ С	4	+	+
ДАТ-100М	Давление топлива перед форсунками	0...7845,3 кПА	± 1,4%	2		+
ДАТ-1,6АМ	Полное давление воздуха на входе в двигатель	19,6...137,3 кПА	± 1,4%	2		+
ДАТ-40АМ	Полное давление воздуха за КВД	0...3922,6 кПА	± 1,4%	2		+
ДРТ-1	Объемный расход топлива	300...6000 кг/ч		2		+
ДОЛ-32С	Датчик помпажа			2	+	
СНС-25Р	Стружка в масле			2		+
Плотномер	Плотность топлива в баке объекта			2		+

1.7.2 Исполнительные элементы

Шестеренные насосы (объемного типа)

Шестеренные насосы выполняют с шестернями внешнего и внутреннего зацепления, из которых наиболее распространенными являются насосы первого типа. Шестеренный насос состоит из пары сцепляющихся между собой шестерен, помещенных в плотно обхватывающий их корпус с каналами для подвода и отвода жидкости ([рисунок 1.7.3](#)).

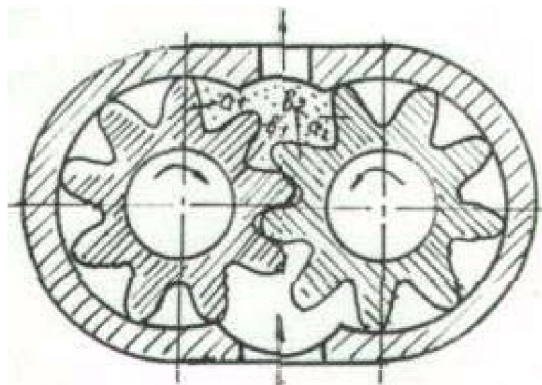


Рисунок 1.7.3 - Шестеренный насос

При вращении шестерен жидкость, заключенная во впадинах зубьев переносится в камеру нагнетания (отмечена точечной штриховкой), которая образована корпусом насоса и зубьями a_1, a_2, b_1, b_2 . Зубья a_1 и a_2 при вращении шестерен вытесняют больше жидкости, чем может поместиться в пространстве, освобождаемом зубьями b_1 и b_2 , находящимися в зацеплении. Разность объемов, описываемых этими двумя парами зубьев, вытесняется в нагнетательную линию насоса.

Эти накосы допускают относительно высокие частоты вращения шестерен (3000...6000 об/мин). Увеличение частоты вращения шестерен насоса ограничивается возможностью нарушения при этом заполнения жидкостью его рабочих камер (впадин между зубьями), что приводит к понижению производительности и возникновению высокоамплитудных пульсаций давления в гидромагистрали. Эти пульсации вызывается тем, что незаполненные в полости всасывания впадины переносятся при вращении шестерен в полость нагнетания насоса. При этом, как только впадины соединяются с полостью нагнетания, возникает обратный поток жидкости, сопровождающийся гидравлическим ударом. Для надежного заполнения впадин шестерен жидкостью, необходимо обеспечить соответствующее давление в полости всасывания насоса. Минимальное абсолютное давление в полости всасывания должно составлять примерно 300 кгс/см^2 , что достигается установкой подкачивающих насосов. С этой же целью в нереверсивных насосах камера всасывания выполняется более широкой, чем камера нагнетания.

Шестеренные насосы отличаются простотой изготовления и надежностью в эксплуатации. Максимальное давление, развиваемое этими насосами, обычно равно 10 МПа и реже (в авиационных ГИДС) 15...20 МПа. Объемный к.п.д. доведен до 0,95...0,96, а общий к.п.д. – до 0,87...0,9.

К недостаткам шестеренных насосов следует отнести пульсации потока и шум при работе в случае неточного изготовления шестерен. Эти недостатки частично устраняются при переходе от прямозубых к косозубым и шевронным зацеплениям, но применение последних ухудшает герметичность по линии

зацепления.

Технические данные насоса.

1. Привод насоса – от двигателя
2. Максимальное число оборотов – 4800 об/мин.
3. Максимальное давление нагнетания – 11,0 МПа.
4. Давление рабочей жидкости на входе в насос – 0,15-0,4 МПа.
5. Максимальная производительность насоса при давлении 9,0 МПа – не менее 46 л/мин.

Шестеренный топливный насос (в качестве примера взят 348-И) состоит из следующих основных деталей и узлов: корпуса, опорного фланца двух зубчатых колес, роликовых подшипников, уплотнительного узла приводной рессоры, подвижных подпятников и рессоры.

В корпусе 29 ([рисунок 1.7.4](#)) из специального чугуна марки 4М1, в двух смежных цилиндрических расточках расположены два насосных зубчатых колеса 9 и 18, бронзовые неподвижные 8 и 19 и подвижные 10 и 17 подпятники, две передние 7 и 20, и две задние 14 и 27 обоймы роликоподшипников, ролики 26 и сепараторы 15.

Корпус овальной формы с поперечными ребрами жесткости имеет фланец для присоединения опорного фланца 2, отлитого из алюминиевого сплава АЛ-3. С боковых сторон на корпусе расположены два прилива в виде патрубков, отверстия которых направлены в сторону дна корпуса. Патрубки предназначены для впуска и выпуска рабочей жидкости и соединены линейными каналами с рабочей полостью насоса. В патрубки ввернуты на резьбе штуцеры подвода 21 и отвода 22 топлива, к которым присоединяются трубопроводы. Для уплотнения между штуцерами и корпусом прокладываются уплотнительные шайбы из мягкого алюминия.

Для уменьшения перетекания топлива по образующим поверхностям колодцев и деталей насосного узла на неподвижных подпятниках 8 и 19 и задних обоймах роликоподшипников проточены прямоугольные канавки, в которые поставлены резиновые уплотнительные кольца 12. Просочившееся по

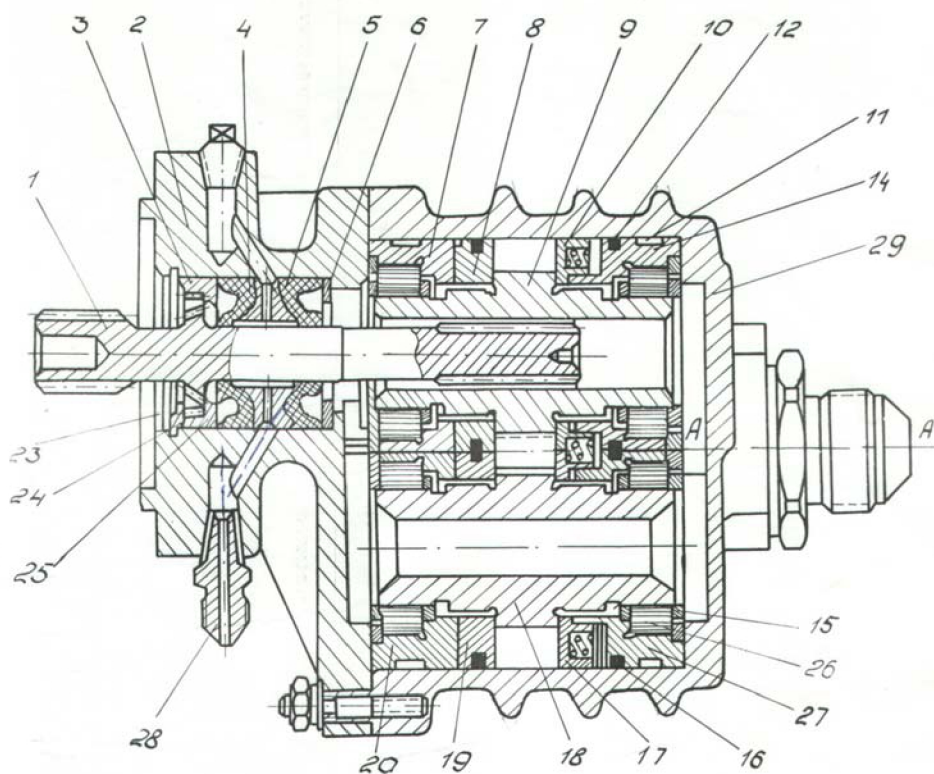
торцевым поверхностям качающего узла топливо попадает через каналы корпуса на линию входа.

Подвижные подпятники 10 и 17 имеют возможность перемещаться вдоль расточек корпуса насоса под воздействием пружин 16 и гидравлических сил, возникающих от давления жидкости на площадь торца подпятников во время работы.

Подпятники всегда поджимаются к торцу зубчатых колес, выбирая при этом зазоры между контактирующими торцевыми поверхностями зубчатых колес, подпятников и передних обойм. Подвижные подпятники на торцевых плоскостях имеют ряд канавок, при помощи которых полости впадин зубчатых колес сообщаются с полостью, образованной торцевыми плоскостями подпятников и задних обойм.

Для того чтобы давление жидкости в этой области уравнивалось с переменным давлением в полостях впадин между зубьями, полость между торцами подпятников и задних обойм разбита на несколько отсеков. Смежные отсеки отделяются друг от друга радиально расположенными латунными цилиндриками 11, а по лыскам подпятников – сухариком.

Уплотняющие цилиндрики и сухарик помещаются в прямоугольных пазах подвижных подпятников, в этих же пазах имеются отверстия, куда устанавливаются пружины 16.



Разрез по АА

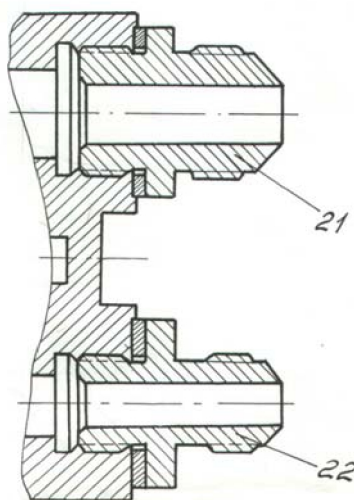


Рисунок 1.7.4 - Конструкция шестеренного насоса

Применение чугунного корпуса позволяет сохранить постоянство гидравлических параметров насоса при различных температурах окружающей среды и рабочей жидкости.

Стальные цементированные зубчатые колеса насосного узла изготовлены за одно целое с цапфами, которые опираются на однорядные роликовые

подшипники. Ведущее зубчатое колесо 9 имеет центральное сквозное отверстие с эвольвентными шлицами, которые сочленяются с приводной рессорой 1; другой конец рессоры сочленяется с приводом двигателя. От осевого перемещения рессора фиксируется шайбами 3 и 23, и разрезным стопорным кольцом 24, установленным в кольцевой проточке опорного фланца 2. Уплотнение рессоры состоит из двух манжет 4 с пружинными кольцами 25, прижимающими манжету к цилиндрической части рессоры, и дренажного кольца 5, по которому отводится просочившееся топливо (из насосной полости) и масло (из полости привода) в дренажную систему двигателя через штуцер 21. Шайбы 3 и 6 служат также упорами, предотвращающими осевое перемещение манжет вдоль рессоры 1. Кольцо 5 имеет с двух сторон поддерживающие конусы, на которые при монтаже садятся конусы манжет, чем обеспечивается предохранение последних от вывертывания под давлением топлива и масла, просочившихся из насосной полости и полости привода соответственно.

Опорный фланец 2 отлит из алюминиевого сплава АЛ-3 и крепится к корпусу насоса 14 шпильками; взаимная точная фиксация корпуса и опорного фланца осуществляется двумя контрольными втулками. Для уплотнения по стыку проложена прокладка из свинцовой фольги.

При вращении зубчатых колес зубья, выходящие из зацепления, освобождают объем впадин, который вместе со стенками колодца и торцами подпятников образуют рабочую камеру наполнения.

Входящая под небольшим давлением жидкость заполняет объем этой камеры и затем переносится зубчатыми колесами на сторону выхода, где вытесняется в нагнетающую магистраль зубьями, входящими в зацепление.

Центробежные насосы

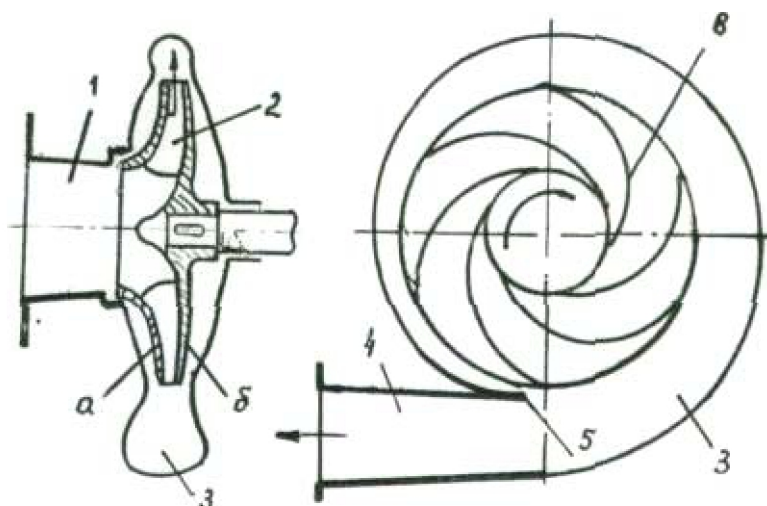


Рисунок 1.7.5 - Центробежный насос

На [рисунке 1.7.5](#) изображена простейшая схема центробежного насоса, являвшегося типичным представителем лопастных гидромашин. Его проточная часть состоит из подвода 1, рабочего колеса 2, отвода 3 и диффузора 4. Из всасывающего трубопровода жидкость по подводу подается в рабочее колесо, состоящее из ведомого (а) и ведущего (б) дисков, между которыми находятся лопатки (в). Передача энергии жидкости от рабочего колеса осуществляется следующим образом. Проходя по каналам, образованным лопатками колеса, и вращаясь вместе с ним, жидкость выходит из колеса, имея повышенное давление и значительно большую, чем на входе скорость. Увеличение давления и скорости происходит за счет работы, затрачиваемой на вращение колеса. По отводу жидкость проходит от рабочего колеса к диффузору, где ее скорость уменьшается, а давление возрастает. Кинетическая энергия жидкости, вышедшей из колеса, преобразуется в работу сжатия. Из диффузора жидкость отводится либо к напорному патрубку, либо, в многоступенчатых насосах, к следующему колесу.

Центробежные: насосы используются в гидравлических системах с большой подачей жидкости и небольшим напором (давлением). Для повышения напора применяют многоступенчатые насосы. Жидкость в них проходит последовательно через несколько колес, закрепленных на одном валу (см. [рисунке 1.7.6](#)), при этом пропорционально числу колес повышается напор

насоса.

В современных авиационных ГИТС центробежные насосы широко используются в качестве:

- основного узла турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей;
- подкачивающего (антикавитационного) насоса в самолетных гидравлических системах;
- основного насоса в системах противообледенительной защиты и т.д.

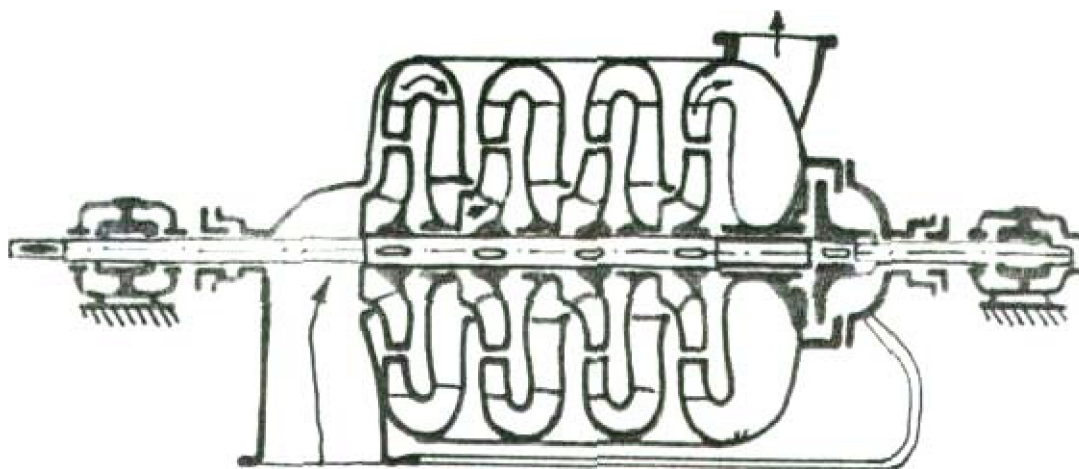


Рисунок 1.7.6 - Многоступенчатый центробежный насос

Изучение конструкции центробежных насосов проведем на примере центробежного подкачивающего топливного насоса ЦН-1А.

Топливный насос ЦН-1А предназначен для обеспечения постоянного избыточного давления топлива перед основным насосом двигателя.

Основные данные.

1. Привод агрегата – от двигателя
2. Допустимые температуры окружающей среды при эксплуатации агрегата в $^{\circ}\text{C}$ – от -60 до +60
3. Максимальное давление на выходе из агрегата в МПа – 0,24 ... 0,27.

Агрегат ЦН состоит из одноступенчатого центробежного насоса с механическим приводом от двигателя и дросселирующего автоматического клапана, сохраняющего давление рабочей жидкости на выходе из насоса в пределах 0,24...0,27 МПа.

Центробежный насос состоит из следующих основных деталей ([рисунок 1.7.7](#)): корпуса 8, крышки 14, вала 2, крыльчатки 13 и пропеллера 15.

Корпус и крышка отлиты из алюминиевого сплава АЛ-5. Корпус 8 насоса имеет полость для размещения крыльчатки, патрубков для выхода топлива и фланец для присоединения крышки 14; с противоположной стороны корпус снабжен фланцем для крепления насоса к двигателю.

В корпусе сделана центральная сквозная расточка для вала 2, шарикоподшипников 3 и 9 и уплотнительных резиновых манжет 7. Подшипник 3 закреплен в промежуточном корпусе 4, который вместе с ним крепится к корпусу 8 винтами 5. Подшипник 9 закреплен в корпусе крышкой 11, привернутой винтами 10.

Манжеты 7 запрессованы в расточку корпуса. Полость “а” между ними соединена дренажным штуцером с атмосферой. Для предохранения передней манжеты от воздействия горячего масла, поступающего из привода двигателя, в корпусе 4 шарикоподшипника сделаны масляные канавки для охлаждения вала 2.

Крышка корпуса 14 крепится к фланцу корпуса и образует с ним полость для расположения крыльчатки, а также сборник-улитку для выходящего топлива. В центре крышка имеет входное отверстие для подвода топлива и фланец для крепления топливопровода.

Вал 2 крыльчатки 13 со стороны привода имеет шлицы, на которых закреплена шлицевая муфта 1, служащая для соединения с приводом насоса. С другой стороны вал имеет шлицы для крепления крыльчатки и пропеллера 15 и резьбу для фиксации их гайкой на валу относительно подшипника 9 в осевом направлении.

Для подбора зазора между корпусом, крыльчаткой и крышкой служит регулировочное кольцо 12.

Для уменьшения износа вала от трения манжет на вал напрессована азотированная и термообработанная на высокую твердость стальная втулка 6.

Одновременно осуществлено охлаждение вала посредством циркуляции

топлива из полости улитки в полость входа. Для этой цели на валу проточены винтовые канавки, которые расположены под втулкой 6 и имеют соединение (через радиальное сверление) с центральным отверстием вала, сделанным со стороны крепления крыльчатки.

Крыльчатка 13 насоса закрытого типа с шестью загнутыми назад лопатками отлита из алюминиевого сплава АЛ-5. Диски крыльчатки имеют наружные бурты, которые входят в соответствующие проточки в крышке 14 насоса и крышке 11 подшипника с небольшими зазорами. Бурты служат для уменьшения перепуска топлива из области высокого давления на вход в крыльчатку. На ступице крыльчатки имеются три резьбовых отверстия “б”, которые служат для разгрузки манжеты от воздействия высокого давления и для установки съемника.

Пропеллер 15 имеет четыре лопасти и ступицу с центральным отверстием со шлицами. Пропеллер вместе с крыльчаткой жестко фиксируется на валу шлицами и закрепляется гайкой.

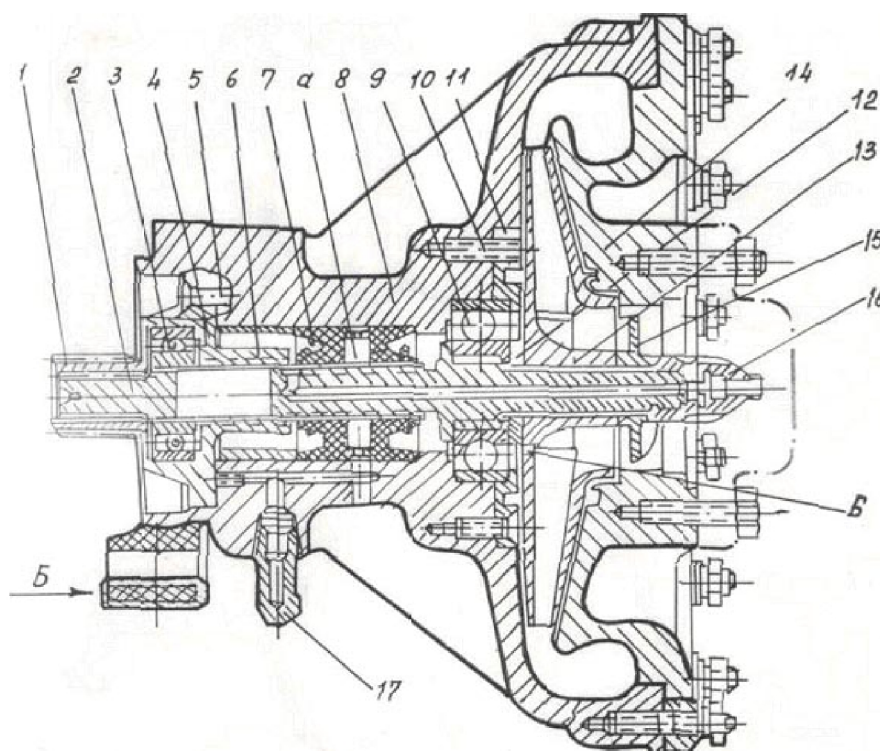


Рисунок 1.7.7 - Конструкция центробежного насоса

1.7.3 Назначение и структура двухканальных арифметических логических блоков типа FADEC

Программа по созданию системы FADEC (Future Advanced Digital Electronic Control) – перспективной цифровой электронной САР – была задумана еще в конце 70-х годов, поскольку среди специалистов ВМФ США существовало мнение, что гидромеханические САР достигли предела своих возможностей на двигателях с повышенными характеристиками.

Электронный регулятор двигателя типа FADEC

Современные ГТД военной и гражданской авиации регулируются гидромеханическими САР, которые в прошлом зарекомендовали себя как надежные, но оказываются неспособными удовлетворить всевозрастающим функциональным требованиям, обеспечить требуемую точность регулирования. На предназначенных для военной авиации опытных и внедряемых в эксплуатацию двигателях, характеристики которых форсированы по основным параметрам, используются гибридные САР: элементарные функции регулирования в них выполняет гидромеханический регулятор, а оптимизацию характеристик – аналоговое или цифровое электронное устройство. Эти системы имеют некоторые преимущества по точности регулирования и массе перед чисто гидромеханическими и сохраняют их недостатки – высокую стоимость, приходящуюся на одну функцию регулирования, невозможность создания перспективной логики в динамических компенсаций; кроме того, предъявляются высокие требования к обслуживанию таких систем.

Учитывая невозможность осуществления сложных законов регулирования с помощью гидромеханических САР, их повышенную стоимость и вес, необходимо искать новый вариант САР, способной обеспечить требования будущих двигателей.

Наилучшим решением будет полностью электронная цифровая САР. Она имеет практически неограниченную мощность счетно-решающей части, а ее

точность лимитируется только точностью характеристик датчиков и исполнительных механизмов. Ее легко перепрограммировать для приведения в соответствие с новыми законами регулирования и ограничениями, и она может работать при возникновении частичных дефектов без дублирования всех агрегатов и усложнения эксплуатации; задача значительно упрощается благодаря хорошей системе диагностики в сочетании с доступностью для обслуживания элементов электроники. Возможно, что одним из важнейших преимуществ системы является резкое уменьшение затрат времени на ее доводку, а также уменьшение эксплуатационных расходов.

Функционально система FADEC должна быть способна вести регулирование по 12 переменным, снабжать необходимыми данными диагностическое устройство с большим объемом информации, управлять воздухозаборником и режимами работы двигателя. Система должна сохранять работоспособность в тяжелых условиях эксплуатации при широком диапазоне изменения параметров окружающей среды, типичном для истребителей.

Общие технические требования к системе FADEC

Система обеспечивает:

- автоматическую компенсацию изменения характеристик двигателя по мере выработки им ресурса;
- повышение устойчивости работы двигателя за счет увеличения запасов по помпажу компрессора и вентилятора и уменьшение времени разгона благодаря регулированию геометрических параметров двигателя;
- уменьшение чувствительности двигателя и САР к изменению окружающих условий, загрязнению топлива, изменению характеристик узлов двигателя, отбору воздуха из компрессора и мощности на самолетные нужды;
- малую чувствительность к дефектам узлов САР.

Основные технические данные FADEC

Электронный регулятор представляет собой единый агрегат, в который входят следующие узлы: преобразователь и кондиционер сигналов на входе и выходе счетно-решающей части, процессор, память, регулятор электропитания.

Агрегат предназначен для установки непосредственно на двигатель и выполняется в виде, пригодном для летных испытаний. Его масса не должна превышать 9 кг, а объем – 6600 см³. Регулятор крепится на двигателе через демпферы и охлаждается топливом, отводящим тепло диссипации энергии и нагрева корпуса от внешних источников тепла в процессе эксплуатации. Конструкция процессора, памяти, узлов преобразования — модульная, что упрощает их монтаж и замену. Дополнительное повышение надежности дало внедрение прогрессивной технологии производства узлов, снижающей термические и механические напряжения в соединениях деталей электроники.

При конструировании узла памяти выполнена задача максимального снижения его стоимости и потребления энергии, простоты конструкции при сохранении ее гибкости, позволяющей изменять по ходу доводки логику контроля с минимальными затратами средств и времени. Память разделена на несколько секций, их конструктивные схемы будут различны, но должны обеспечивать достаточно легкий доступ.

Выявление и компенсация дефектов

Работоспособность системы FADEC при возникновении дефектов определяется путем анализа возможных дефектов и их влияния на ее работу.

Компенсация дефектов отдельных элементов системы (отказ отдельных датчиков, ложные сигналы, выход из строя генератора двигателя и т. п.) может быть выполнена без существенного ухудшения характеристик двигателя. Для измерения наиболее важных параметров предусмотрено дублирование датчиков, и автоматическое отключение датчика, дающего неправильный сигнал посредством логического устройства в ЭВМ системы. Отказ генератора блокируется автоматическим переходом на питание от самолетной системы.

Компенсация более серьезных дефектов (отказ нескольких датчиков, исполнительных механизмов т. и.) производится более сложными способами, позволяющими поддерживать качество характеристик двигателя на должном уровне, чтобы можно было продолжить выполнение задания. В случае полной потери входных сигналов важных параметров система автоматически

переходит на регулирование по расчетному сигналу, определяемому по характеристикам непрерывно функционирующей модели двигателя, предусмотренной в схеме ЭВМ. Величины некоторых параметров могут быть рассчитаны по косвенным параметрам: так, давление перед компрессором или за ним (P_1 или P_2) можно рассчитать по номинальной величине P_1/P_2 и приведенной частоте вращения компрессора. Компенсация выхода из строя исполнительного механизма выполняется путем перехода к другим способам регулирования при фиксированном положении отказавшего исполнительного механизма и перепрограммировании регулирования всех других переменных и ограничений. Такое решение позволяет в некоторых случаях поддерживать характеристики двигателя на приемлемом и безопасном для его надежности уровне.

Компенсация дефектов основных узлов, например отказа процессора или памяти, возможна только при дублировании каналов САР, которое позволяет продолжать полет без превышения предельных режимов работы двигателя.

Эксплуатационные качества

В конструкции предусмотрен ряд элементов, которые позволят уменьшить эксплуатационные расходы по САР. В первую очередь – это контур непрерывного самоконтроля электронных узлов, который выявляет дефекты, уточняет и локализует источники их возникновения, после чего переводит регулирование на резервный вариант и ведет запись результатов проверки или передает на систему индикации информацию о дефектах и мерах по их компенсации. Наиболее важные сведения передаются на панель пилота, а остальные, более подробные, записываются для использования обслуживающим персоналом.

Конструкция всех агрегатов предусматривает возможность их быстрого съема и замены. Электронные узлы выполнены по модульной схеме для облегчения ремонта или замены их в эксплуатации (на аэродроме). «Сползание» характеристик регулирования по мере выработки ресурса и вследствие износа деталей исключается благодаря регулированию по

замкнутым контурам и отсутствию в счетно-решающей части механических узлов.

На [рисунке 1.7.8](#) представлена блок-схема перспективной САР с электронными блоками управления типа FADEC.

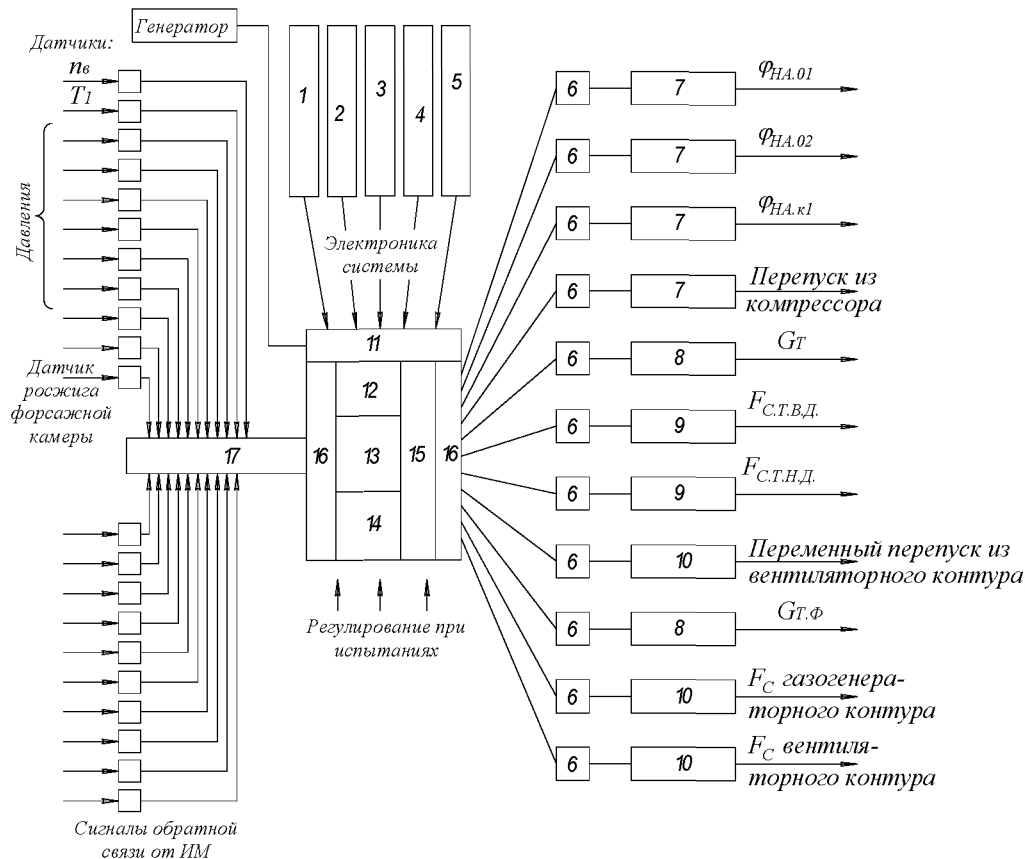


Рисунок 1.7.8 - Блок-схема САР с регулятором типа FADEC:

1 – команды от пилота, задающие тягу и режим работы; 2 – сигналы от БЦВМ по тяге и режиму; 3 – дублирование и проверка; 4 – сигналы от воздухозаборника; 5 – определение дефектов, данные для управления и диагностики по двигателю; 6 – электрогидравлический сервоклапан; 7 – сервопоршень, рабочая жидкость – топливо; 8 – дозирующий кран с цифровым управлением; 9 – воздушный двигатель с цифровым управлением; 10 – гидроцилиндр; 11 – преобразование сигналов от воздухозаборника и самолетных систем; 12 – процессор на БИС; 13 – память; 14 – изменяемая память; 15 – автоматическое выявление дефектов и самокоррекция; 16 – усилитель сигналов; 17 – обработка сигналов датчиков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиационный турбовинтовой двигатель ТВ2-117А и редуктор ВР-8А: техн. описание [Текст]. - М. : Машиностроение, 1977. - 100 с.
2. Анализ устойчивости и автоколебаний в нелинейных системах управления. Учеб. пособие [Текст] / А.Н. Крючков, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин, А.Г. Гимадиев.- Самара: СГАУ, 1998. - 81 с.
3. Анисимкин, Ю.С. Система автоматического управления трехвального ТРДД.: Учебное пособие [Текст] / Ю.С. Анисимкин. – Самара: СГАУ, 1992. – 44 с.
4. Ахмедзянов, Д.А. Информационная технология отладки динамических процессов в авиационных ГТД при приемо-сдаточных испытаниях [Текст] / Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника : науч.-техн. журн. - 2007. - N 3. - С. 26-31.
5. Ахмедзянов, Д.А. Совместная работа авиационных газотурбинных двигателей и топливной автоматики на режимах разгона и торможения [Текст] / Д.А. Ахмедзянов, И.А. Кривошеев, Н.А. Сунарчин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева. - 2006. - N 1. - С. 24-33.
6. Батенин, А.В. Автоматика и регулирование ВРД: тексты лекций [Текст] / А.В. Батенин; Моск. авиац. ин-т им. С. Орджоникидзе. - М.: Изд-во МАИ, 1989. - 48 с.
7. Воробьев, А.В. Применение стендов отладки программ и выявления в них ошибок для комплексов управления летательными аппаратами [Текст] / А. В. Воробьев // Авиакосмическое приборостроение. - 2006. - N 10. - С. 43-49
8. Гаевский, С.А. Автоматика авиационных газотурбинных силовых установок [Текст] / С.А. Гаевский, Ф.Н. Морозов, Ю.П. Тихомиров ; под общ. ред. А.В. Штоды. - М. : Воениздат, 1980. - 247 с.
9. Гимадиев, А.Г. Системы автоматического регулирования авиационных ГТД: учеб. пособие [Текст] / А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин ; Куйбышев. авиац. ин-т им. С. П. Королева. - Куйбышев: КуАИ, 1990. - 122 с.

10. Гусев, Ю.М. Анализ и синтез систем автоматического управления ГТД на неустановившихся режимах: учеб. пособие [Текст] / Ю.М. Гусев [и др.]; Уфим. авиац. ин-т им. С. Орджоникидзе. - Уфа: УАИ, 1977. - 88 с.
11. Гуревич, О.С. Интегрированное управление силовой установкой многорежимного самолета [Текст] / О.С. Гуревич, Ф.Д. Гольберг, О.Д. Селиванов; под ред. О.С. Гуревича. - М.: Машиностроение, 1994. - 304 с.
12. Добрянский, Г.В. Динамика авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / Г.В. Добрянский, Т.С. Мартыанова. - М.: Машиностроение, 1989. - 240 с.
13. Епифанов, С.В. Автоматика и регулирование авиационных газотурбинных двигателей: Учеб. пособие по лаб. работам [Текст] / С.В. Епифанов, Д.Ф. Симбирский; Харьков. авиац. ин-т им. Н. Е. Жуковского. - Харьков: ХАИ, 1986. - 94 с.
14. Жуковский, А.С. Применение электромеханических устройств в САУ ГТД [Текст] / А.С. Жуковский // Крылья Родины : ежемес. нац. авиац. журн. - 2008. - N4. - С. 32-33.
15. Залесский, С.Е. Применение стенда полунатурного моделирования для отработки цифровой комплексной системы управления летательным аппаратом 5-го поколения [Текст] / С.Е. Залесский // Авиакосмическое приборостроение. - 2006. - N 4. - С. 46-53
16. Зрелов, В.А. Отечественные газотурбинные двигатели: основные параметры и конструктив. схемы: [учеб. пособие по специальностям 160201 "Самолето- и вертолетостроение" и 160301 "Авиац. двигатели и энергет. установки"] [Текст] / В.А. Зрелов. - М.: Машиностроение, 2005. - 335 с.
17. Испытания авиационных двигателей: учеб. для вузов по специальности "Авиац. двигатели и энергет. установки" направления подгот. дипломир. специалистов "Двигатели летат. аппаратов" [Текст]: / В.А. Григорьев [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева, А.С. Гишварова. - М.: Машиностроение, 2009. - 502 с.
18. Исследование работоспособности алгоритмов идентификации момента свободной турбины в установившихся и переходных режимах ТВД на компьютерном имитаторе полунатурного стенда [Текст] / В.М. Суханов [и др.] // Вестник двигателестроения. - 2004. - N 2. - С. 177-183.

19. Кривошеев, И.А. Отладка автоматики форсажного контура газотурбинного двигателя при приемо-сдаточных испытаниях [Текст] / И.А. Кривошеев, Д.А. Ахмедзянов, А.Е. Кишалов // Мехатроника, автоматизация, управление : теор. и прикл. науч.-техн. журн. - 2006. - N 11. - С. 35-40 .
20. Лянцев, О.Д. Синтез цифровых нелинейных оптимальных многофункциональных многосвязных систем управления ГТД в реальном времени: диссертация ... доктора технических наук : 05.13.01 [Текст] / О.Д. Лянцев. – Уфа: УАИ, 2004.
21. Методика представления и использования многомерной характеристики винтовентилятора при полунатурном моделировании ГТД и его САУ [Текст] / И.А. Кривошеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника : науч.-техн. журн. - 2010. - N 1. - С. 37-40
22. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: [учеб. для вузов по машиностроит. и приборостроит. специальностям [Текст] / К.А. Пупков и др.]; под ред. Н.Д. Егупова. - Изд. 2-е. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 743 с.
23. Организация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов систем [Текст] / [А.А. Шевяков, Т.С. Мартьянова, В.Ю. Рутковский и др.]; под общ. ред. А.А. Шевякова, Т.С. Мартьяновой. - М.: Машиностроение, 1989. - 256 с.
24. Павленко, Г.В. Математическое моделирование авиационных ГТД при исследовании их эксплуатационных характеристик: учеб. пособие [Текст] / Г. В. Павленко ; Харьков. авиац. ин-т им. Н. Е. Жуковского. - Харьков : ХАИ, 1986. - 124 с.
25. Петунин, В. И. Помехоустойчивость систем автоматического управления ГТД с селектором на режимах переключения каналов [Текст] / В.И. Петунин, А.И. Фрид // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника : науч.-техн. журн. - 2007. - N 4. - С. 44-47.
26. Синяков, А.Н. Системы автоматического управления ЛА и их силовыми установками: учеб. для вузов [Текст] / А.Н. Синяков, Ф.А. Шаймарданов. - М. : Машиностроение, 1991. - 320 с.

27. Теоретические основы авиа- и ракетостроения в конспектах лекций : [учеб. пособие для вузов по специальности "Ракетостроение" направления подгот. дипломир. специалистов "Ракетостроение и космонавтика" и специальности "Самолето- и вертолетостроение" направления подгот. дипломир. специалистов "Авиастроение" [Текст] / А. С. Чумадин [и др.]. - М. : Дрофа, 2005. - 784 с.
28. Теория линейных систем автоматического регулирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие [Текст] / А.Г. Гимадиев, А.Н. Крючков, А.Б. Прокофьев, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин. - Самара : СГАУ, 2006. - 183 с.
29. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: [учеб. для вузов по специальности "Авиац. двигатели и энергет. установки" направления подгот. дипломир. специалистов "Двигатели летат. аппаратов" [Текст] / В.И. Бакулев и др.]; под ред. В.А. Сосунова, В.М. Чепкина. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во МАИ, 2003. - 688 с.
30. Черкасов, Б.А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей: [учеб. для вузов по специальности "Авиац. двигатели"] [Текст] / Б.А. Черкасов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1988. - 359 с.
31. Цыбуля, В. В. Системы управления авиационных силовых установок. Системы автоматического управления температурой газа авиационных ГТД: Учеб. пособие к практ. занятию [Текст] / В.В. Цыбуля, В.И. Черных, С.А. Шишмаков. - Рига, 1989. - 39 с.
32. Шевяков, А.А. Системы управления ракетных двигателей и энергетических установок: системы управления энерг. установок: [учеб. пособие для авиац. спец. вузов] [Текст] / А.А. Шевяков, В.М. Калнин, Т.С. Мартьянова. - М. : Машиностроение, 1985. - 184 с.
33. Штерeberg, Л. Особенности современных систем топливоподачи и автоматического регулирования ГТД в разработках ОАО "ОМКБ" [Текст] / Л. Штерeberg // Крылья Родины : ежемес. нац. авиац. журн. - 2010. - N 4. - С. 21-22 .