

МИНИСТЕРСТВО АГРАРНОЙ ПОЛИТИКИ УКРАИНЫ

ТАВРИЧЕСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АГРОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

ПОСТОЛ Юлия Александровна

УДК 621.43

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХМЕРНОЙ
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 05.05.03 – тепловые двигатели

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Долганов Кинт Евгеньевич,

доктор технических наук, профессор

Мелитополь – 2003

СОДЕРЖАНИЕ

Список основных сокращений	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА В УКРАИНЕ И ЗАДАЧИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ	13
1.1. Анализ состояния энергообеспечения сельскохозяйст- венного производства Украины	13
1.2. Особенности двигателя Стирлинга	21
1.3. Двигатели Стирлинга как регулируемый объект	25
1.4. Требования к системе автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя и системе автоматического регулирования температуры нагревателя экспериментального двигателя Стирлинга	32
1.5. Система автоматического управления автомобильного двигателя Стирлинга	34
1.6. Регулирование мощности двигателя Стирлинга изменением “мертвого” объема	39
1.7. Перспективы применения двигателя Стирлинга	43
Выводы по первому разделу	48
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МАЛОМОЩНОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА	50
2.1. Регулируемый объект	50
2.2. Принципиальная схема двухмерной системы автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга	56

2.3. Функциональная схема двухмерной системы автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга	61
2.4. Конструкции звеньев экспериментальной двухмерной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга небольшой мощности	66
Выводы по второму разделу	67
РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДВУХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ МИНИ-СТИРЛИНГ–ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АГРЕГАТА	
3.1. Выбор вида математической модели	69
3.2. Уравнения звеньев математической модели двухмерной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1	71
3.3. Алгоритм и программа для расчета на ПЭВМ переходных процессов и статических характеристик разработанной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга	79
3.4. Главная программа (головной модуль)	81
3.5. Подпрограмма UDS (T, Y, YP)	83
3.6. Программа расчетов переходных процессов на ПЭВМ ..	84
3.7. Расчет статических характеристик системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1	84
3.8. Оценка устойчивости системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1	85
Выводы по третьему разделу	86

РАЗДЕЛ 4. ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.	
ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ	88
4.1. Цели и задачи экспериментальных исследований	88
4.2. Объекты экспериментальных исследований	89
4.3. Установка для экспериментальных исследований	89
4.4. Экспериментальная система автоматического регулирования температуры стенки нагревателя	103
4.5. Экспериментальная система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя Стирлинга	103
4.6. Методики экспериментальных исследований	105
4.7. Оценка погрешностей измерений	109
РАЗДЕЛ 5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	112
5.1. Оценка возможности регулирования мощности двигателя Стирлинга модели УДС-1 с помощью дополнительного “мертвого” объёма	112
5.2. Статические характеристики двигателя УДС-1	122
5.3. Определение коэффициентов аппроксимирующего уравнения скоростных характеристик двигателя УДС-1 ..	130
5.4. Характеристики дозатора горючего газа и температура продуктов сгорания	137
5.5. Скоростные характеристики электрогенератора постоянного тока	139
5.6. Приемистость двигателя УДС-1	144
5.7. Определение коэффициентов дифференциального уравнения двигателя Стирлинга модели УДС-1 в агрегате с электрогенератором	149

5.8. Определение параметров, входящих в уравнение теплопередачи в двигателе Стирлинга модели УДС-1	154
5.9. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1	158
5.10. Влияние конструктивных и регулировочных параметров системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1 на показатели переходных процессов	172
5.11. Направления дальнейших исследований	187
Выводы по пятому разделу	190
ВЫВОДЫ	193
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	196
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Блок-схема алгоритма расчета в программе SUB routine (T,Y,YP)	205
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Программа расчетов переходных процессов	213
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Список идентификаторов и исходных данных к программе расчета переходных процессов в системе автоматического регулирования двигателя Стирлинга мод. УДС-1	220
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Фрагменты расчета переходного процесса в системе автоматического регулирования температуры нагревателя и системе автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя	228
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акты об использовании диссертационной работы	230

Список основных сокращений

ДВС	– двигатель внутреннего сгорания;
ДВПТ	– двигатель с внешним подводом теплоты;
ДС	– двигатель Стирлинга;
УДС	– учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга;
САРТ	– система автоматического регулирования температуры;
САРЧ	– система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя;
САРА	– система автоматического регулирования коэффициента избытка воздуха;
САР	– система автоматического регулирования;
САУ	– система автоматического управления;
КАДИ	– Киевский автомобильно - дорожный институт;
НТУ	– Национальный транспортный университет;
ТГАТА	– Таврическая государственная агротехническая академия;
МАДИ	- Московский автомобильно-дорожный институт;
ЭБУ	– электронный блок управления;
ПИД	– пропорционально, интегрально, дифференциальный сигнал;
ПЭВМ	– персональная электронно-вычислительная машина;
ВМТ	– верхняя мертвая точка;
НМТ	– нижняя мертвая точка;
ТРМ12	– измеритель – регулятор микропроцессорный;
СИ-8	– счетчик импульсов;
АС-2	– адаптер сети;
СЭА	– мини Стирлинг – электрический агрегат;
ОКБ	– конструкторское бюро;
ВУЗ	– высшее учебное заведение;
СНГ	– сообщество независимых государств;

ТЦ	– цифровой электронный агрегат;
КПД	– коэффициент полезного действия;
ХА	– хромель-алюмелиевый датчик;
ГОСТ	– Государственный стандарт;
ЭГ	– электрический генератор;
ЗНГ	– задатчик нагрузки;
ДТ	– датчик температуры;
ДГ	– дозатор горючего газа;
ДЧ	– датчик частоты вращения;
УсТ	– усилитель напряжения тока;
УсЧ	– усилитель напряжения частоты вращения;
ФСУТ	– формирователь пропорционального и дифференциального сигналов регулирования температуры нагревателя;
ФСУЧ	– формирователь пропорционального и дифференциального сигналов управления частотой вращения;
ЗТ	– задатчик температуры;
БСТ	– блок сравнения текущих значений температуры;
БСЧ	– блок сравнения текущих значений частоты вращения;
ИМТ	– исполнительный механизм в контуре САРТ;
ИМЧ	– исполнительный механизм в контуре САРЧ;
КС	– камера сгорания;
МО	– дополнительный “мертвый” объем;
VM	– текущая величина дополнительного “мертвого” объема

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

Проблема исчерпания запасов нефти вынуждает искать альтернативные топлива. Такими топливами могут быть: каменный уголь, природный и другие газы, а также газы и жидкости, получаемые из сельскохозяйственной продукции и различных отходов и др. [1,2,3,4]. Но возникает проблема их использования, потому что многие топлива неудобны или не пригодны для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [5]. С этой точки зрения заслуживают внимания двигатели Стирлинга (ДС), в которых можно использовать любой источник теплоты. Эти двигатели были известны и применялись задолго до появления ДВС, а в настоящее время разработаны и опробованы ДС нового поколения, созданные на основе современных металлов и технологий [6,7,8].

Новые ДС создавались в первую очередь для замены бензиновых двигателей и дизелей на мобильных машинах. Чтобы обеспечить необходимые мощностные и экономические показатели, пришлось усложнить ДС, особенно систему автоматического регулирования (САР), без которой применять ДС нельзя, удорожать их производство. Поэтому они пока не получили распространения [9-17].

Но ДС можно успешно применять в качестве первичных двигателей в электрогенераторных агрегатах, особенно в автономных агрегатах небольшой мощности 0,5...10 кВт, которые начали все шире распространяться в небольших сельскохозяйственных и других предприятиях и объектах как источники электроснабжения. ДС можно рассматривать как реальную альтернативу ДВС, которые сейчас применяются на этих установках. Требования к двигателям таких агрегатов менее жесткие, чем к двигателям мобильных машин, поэтому конструкция ДС может быть упрощена.

К важным достоинствам относятся: возможность использования разнообразных видов топлива, в том числе твердых, низкие шумность и

токсичность, сравнительно простая конструкция и техническое обслуживание, такая же топливная экономичность, как у поршневых ДВС.

Но для ДС требуется сложная система автоматического регулирования мощности и частоты вращения коленчатого вала ДС и температуры входящего в него нагревателя. Поэтому одной из актуальных задач является создание для маломощных ДС простой и дешевой двухмерной системы автоматического регулирования.

Решению этой задачи посвящена настоящая диссертация.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа связана с выполнением подпрограммы №1.4 “Совершенствование и разработка научных основ повышения эксплуатационной эффективности мобильной сельскохозяйственной техники”, № государственной регистрации 0102U000678, которая выполняется кафедрой “Тракторы и автомобили” по тематике научных исследований Таврической государственной агротехнической академии (ТГАТА), и договора о научно-техническом сотрудничестве между Национальным транспортным университетом (НТУ, г. Киев) и ТГАТА “Разработка и исследования системы автоматического регулирования температуры двигателя Стирлинга” от 15.05.02г.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы являются разработка принципиальной и конструктивных схем двухмерной САР частоты вращения коленчатого вала ДС небольшой мощности, температуры его нагревателя и определение параметров, которыми можно воздействовать на показатели качества регулирования.

Для достижения этой цели решались такие задачи:

1. Анализ способов регулирования мощности ДС и выбор рационального для ДС небольшой мощности.

2. Усовершенствование ДС мод. УДС-1 для использования его в качестве регулируемого объекта при исследованиях экспериментальной САР ДС в агрегате с электрогенератором.
3. Разработка принципиальной и функциональной схем двухмерной САР, частоты вращения коленчатого вала и температуры нагревателя ДС.
4. Разработка конструкции экспериментальной САР ДС мод. УДС-1. Изготовление экспериментального образца.
5. Разработка динамической математической модели САР двухмерной САР ДС, алгоритмов и программ для проведения расчетно-теоретических исследований на ЭВМ.
6. Разработка методик экспериментальных исследований, подготовка оборудования и проведение исследований.
7. Определение параметров, оказывающих существенное влияние на качество работы САР, и их рациональных значений.
8. Разработка рекомендаций по использованию результатов исследования.

Объект исследования. Рабочие процессы в двухмерной САР температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала ДС небольшой мощности.

Предмет исследования. Методы и способы получения заданных статических и динамических показателей САР.

Методы исследования. Экспериментально-расчетные. Экспериментальным методом определены статические и динамические характеристики САР ДС и ее элементов, получены исходные данные для математической модели. Расчетный метод использовался для анализа влияния конструктивных и регулировочных параметров на статические и динамические показатели САР.

Научную новизну полученных результатов составляют:

1. Новые данные о возможности регулирования мощности небольших ДС с помощью изменяемого “мертвого” объема.
2. Математическая модель двухмерной САР частоты вращения коленчатого вала и температуры стенки нагревателя ДС небольшой мощности.
3. Данные о влиянии конструктивных и регулировочных параметров САР ДС мод. УДС-1 на ее статические и динамические характеристики.

Практическое значение имеют:

1. Конструкция экспериментальной двухмерной САР ДС.
2. Алгоритмы и программы для расчетов на ЭВМ статических и динамических характеристик двухмерной САР ДС.
3. Рекомендации по выбору параметров двухмерной САР ДС.

Лично автором выполнено:

Разработана принципиальная схема и конструкция экспериментальной САР для ДС мод. УДС-1 с регулируемым “мертвым” объемом. Разработана динамическая математическая модель САР ДС. Разработана установка для проведения экспериментальных исследований и методики их проведения. Выполнены экспериментальные исследования. Выполнен анализ влияния конструктивных и регулировочных параметров САР ДС на ее статистические и динамические показатели. Разработаны рекомендации по использованию результатов исследования.

Апробация результатов диссертации

Результаты диссертации докладывались на научно-технических конференциях ТГАТА в 1997-2003 г.г. и на 5 заседаниях республиканского семинара по тепловым двигателям и ресурсосбережению в г. Мелитополе в 1997...2001 г.г., на конференциях профессионально - преподавательского состава и студентов НТУ в г. Киеве в 2001...2003 г.г., на VI и VII

Международных конгрессах двигателестроителей Украины в пос. Рыбачье (Украина) в 2001 и 2002 г.г.

Публикации

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 16 статьях и тезисах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, выводов, списка использованных источников, в который входят 87 наименований, в том числе 14 на иностранных языках, объем диссертации составляет 132 стр. основного машинописного текста, 83 рисунка, 8 таблиц, 5 приложений.

РАЗДЕЛ 1

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА В УКРАИНЕ И ЗАДАЧИ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

1.1. Анализ состояния энергообеспечения сельскохозяйственного производства Украины

Анализ экономических показателей бывших социалистических стран, приведенных ОБСЕ [18], показывает, что во всех этих странах изменение политической системы сопровождалось ухудшением экономических показателей (рис.1.1). За последние годы значительно упал и жизненный уровень жителей Украины, что связано со снижением производства важнейших видов промышленной и сельскохозяйственной продукции.

С 1985 года по 2000 год на Украине снизилось производство основных видов энергоносителей (табл.1.1):

- производство электроэнергии на 63%;
- добыча каменного угля на 42,9%;
- добыча природного газа на 41,7%;
- добыча нефти на 63,8%.

Данное явление совпадает с динамикой изменения объема производства в Украине в целом.

Это подтверждает тезис о тесной связи между общим объемом производства и энергопотреблением. Связь становится более отчетливой, если сопоставлять кривые в относительных единицах – по отношению к 1990 году, когда все рассмотренные показатели начали падать. Такая зависимость показана на рис.1.2. Видно, что если не принимать во внимание нефть, которую пришлось в больших объемах закупать за рубежом, сходство между зависимостями динамики энергообеспечения и выпуска продукции

Таблица 1.1

**Производство важнейших видов энергоресурсов в
Украине [19]**

Годы	1985	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Электроэнергия, млрд. кВт ч	272	298,5	194,0	183,0	178,0	172,8	172,1	171,4
Уголь, млн. т	189,0	164,8	83,8	70,5	76,9	77,2	81,8	81,0
Газ, млрд. м ³	42,9	28,1	18,2	18,4	18,1	18,0	18,1	17,9
Нефть, млн. т	5,8	5,3	4,1	4,1	4,1	3,9	3,8	3,7

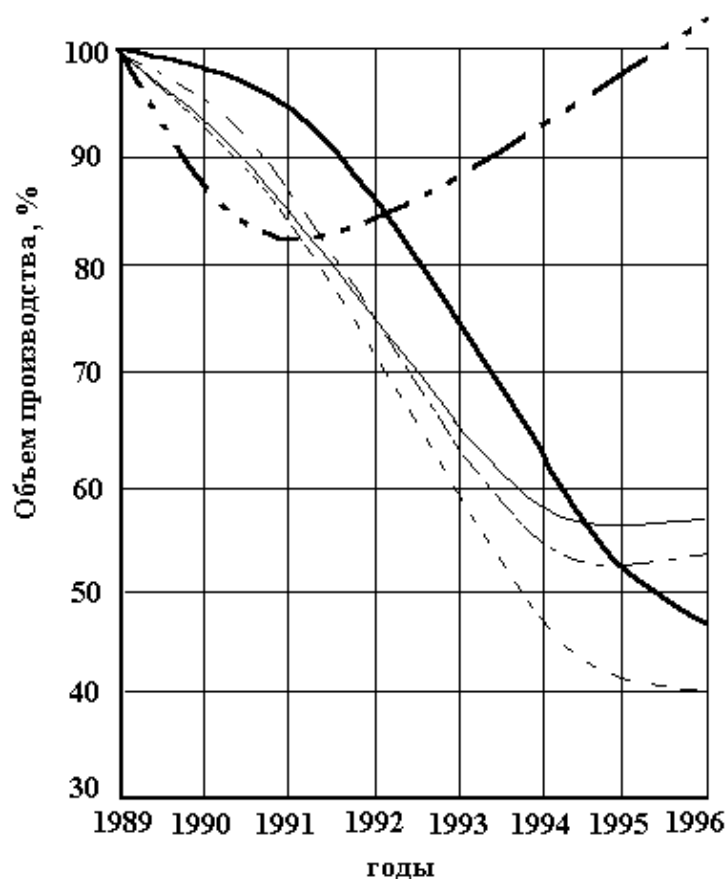


Рис. 1.1. Динамика изменения объема производства в нескольких странах Восточной Европы:

— · — · — СНГ
 — — — — — Россия
 - - - - - Украина
 — · · — Республика Беларусь
 - . . - - Польша

очень значительное. Поэтому можно утверждать, что улучшение энергообеспечения является одним из условий подъема экономики Украины. Другим условием этого подъема является более рациональная организация производства, что особенно хорошо видно на примере производства сельскохозяйственной продукции.

В сельскохозяйственном производстве имело место примерно такое же падение, как и в промышленном. Из рис.1.3, характеризующих его темп падения, видно, что производство сельскохозяйственной продукции на крупных сельскохозяйственных предприятиях со 100% в 1990 году упало до 53,3% в 2000 году. Это побудило наиболее инициативную часть населения интенсивно заниматься выращиванием сельскохозяйственной продукции в

частных хозяйствах и на небольших фермах. В итоге общий уровень сельскохозяйственного производства снизился в 2000 году не до 27%, как на сельскохозяйственных предприятиях, а лишь до 53,3% по отношению к 1990 году.

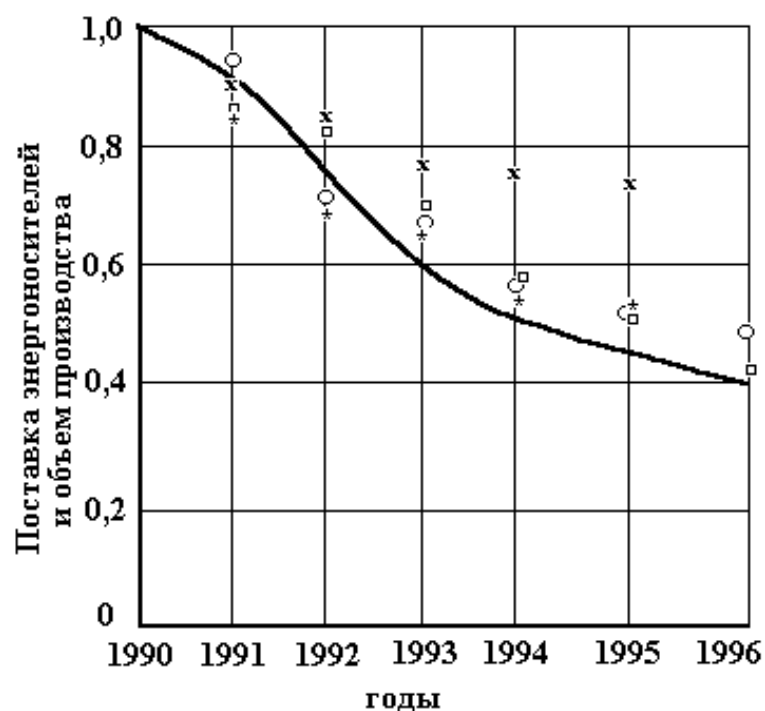


Рис. 1.2. Сходство между характером изменения поставок энергоносителей и объемом производства на Украине:

○ — электроэнергия; □ — уголь;
 x — нефть; * — газ;
 — — объем производства.

Здесь нельзя не подчеркнуть того факта, что в то время как крупные сельскохозяйственные предприятия уменьшили объем производства примерно в 3,5 раза, мелкие сельскохозяйственные производители нарастили объем производства примерно на 20%, и это в условиях дефицита топлива, отсутствия техники и т.д. Такая тенденция, несомненно, побудит государство способствовать развитию небольших сельскохозяйственных предприятий, пунктов переработки сельхозпродукции и т.п., что повлияет и на способ их энергообеспечения.



Рис. 1.3. Индекс продукции сельского хозяйства

Сельское хозяйство является одним из самых крупных потребителей топливных ресурсов и энергии. Это подтверждается табл.1.2 [19].

Таблица 1.2

Доля потребления сельским хозяйством основной энергии по отношению к общему количеству по Украине (в процентах)

Годы	Электроэнергия	Автомобильный бензин	Дизельное топливо
1995	12,27	37,3	44,0
1996	11,15	35,6	48,9
1998	9,09	27,8	42,3
2000	6,83	17,2	37,3

Эти данные показывают, что снижение энергопотребления в сельском хозяйстве может быть экономически очень выгодно. Уменьшение потребления электрической энергии имеет не меньшее экономическое значение, чем уменьшение потребления нефтяных топлив. При этом нужно учесть, что возможности для экономии нефтяных топлив и электроэнергии существенно различны. Нефтяные топлива потребляются почти исключительно двигателями мобильных машин (тракторы, комбайны,

автомобили и др.). Перевод таких двигателей на другие топлива (например, на газообразное) без ущерба для их эксплуатационных качеств очень затруднителен [5]. Что же касается установок, потребляющих электроэнергию, то они являются стационарными. В стационарных установках теплота и электрическая энергия могут производиться за счет использования нетрадиционных и даже возобновляемых топлив. Таким топливом в сельском хозяйстве могут быть отходы сельскохозяйственного производства.

В работах [1, 20, 21] были проведены расчеты количества отходов при производстве зерновых и отходов в животноводстве Украины в 1990...2000 гг. и подсчитаны топливные эквиваленты этих отходов [22] (табл. 1.3 и 1.4).

Нефтяной топливный эквивалент для отходов растениеводства определялся из расчета 3,7 МДж на 1 кг этих отходов, а для отходов животноводства, исходя из минимального энергетического выхода биотоплива, около 10 МДж/кг.

По данным Государственного комитета нефтяной, газовой и нефтеперерабатывающей промышленности Украины в стране потребление нефти в 2000 г. составило 9,4 млн. т, из них 3,7 млн. т добыто на Украине, а 5,7 млн. т импортировано. Если цена нефти составляет 104 доллара за 1 тонну, то для Украины импорт нефти обошелся в 2000 году в 593 млн. долларов США.

В результате проведенного выше анализа и расчетов на Украине в год воспроизводится в сельском хозяйстве такое количество нетрадиционного топлива, которое по растениеводству эквивалентно 9,7 млн. т нефти, а по животноводству 22,12 млн. т (для сравнения импорт нефти за 2000 г. составил 5,7 млн. т). Использование этих нетрадиционных топлив в народном хозяйстве дало бы огромную экономию валюты, причем в первую очередь такое топливо следует применять в стационарных сельскохозяйственных установках.

Таблица 1.4

Поголовье продуктивных животных по категориям хозяйств (тыс. голов)

Животные	1985	1990	1995	2000
<i>Хозяйства всех категорий</i>				
Крупный рогатый скот	26638	24623	17557	9424
в том числе:				
коровы	8851	8378	7531	4958
Свиньи	20088	19427	13144	7652
Овцы и козы	9222	8419	4099	1875
<i>Коллективные, межхозяйственные, государственные производственные сельскохозяйственные организации</i>				
Крупный рогатый скот	22797	21083	13701	5037
в том числе:				
коровы	6550	6191	4595	1851
Свиньи	15655	14071	7152	2414
Овцы и козы	8336	7166	2424	413
<i>Хозяйства населения</i>				
Крупный рогатый скот	3841	3540	3856	4387
в том числе:				
коровы	2301	2187	2936	3107
Свиньи	4433	5356	5992	5238
Овцы и козы	886	1256	1675	1462

Широкое использование отходов и даже части продукции сельскохозяйственного производства может не только полностью покрыть потребности сельского хозяйства в электрической и тепловой энергии, но в перспективе даже создать избыток электроэнергии и поставляться другим потребителям.

Однако использовать непосредственно отходы сельскохозяйственного производства в качестве топлива в двигателях внутреннего сгорания невозможно. Для этого необходим двигатель с внешним подводом теплоты, который должен иметь хорошую топливную экономичность при наименьшей требовательности к качеству топлива и хорошие экологические показатели.

Если говорить о близкой перспективе, то таким двигателем, очевидно, будет двигатель Стирлинга [6,7,23]. Это двигатель с внешним подводом теплоты, работающий по замкнутому циклу. В качестве рабочего тела можно использовать воздух, гелий, водород и другие газы, которые имеют большую теплоемкость, хорошую теплопроводность, малую вязкость и низкую плотность, влияющую на к.п.д. двигателя.

В качестве топлива можно использовать жидкие, газовые и твердые топлива.

1.2. Особенности двигателя Стирлинга

Изобрел двигатель шотландский священник Роберт Стирлинг, получивший на него патент в 1816 г. По фамилии изобретателя и был назван новый двигатель. Двигатели Стирлинга выпускались в значительном количестве до первой мировой войны, но были недостаточно экономичны из-за несовершенства конструкции и отсутствия в то время наиболее подходящих для их изготовления материалов.

В настоящее время положение резко изменилось в связи с появлением высокопрочных жаростойких материалов, электронных систем управления и

новых технологий производства. К тому же теоретические расчеты показывают, что ДС экономичнее двигателя внутреннего сгорания. Но сегодня особенно ценно то, что он на несколько порядков менее токсичен и менее шумен, так как сгорание топлива в нем происходит в более благоприятных условиях при атмосферном давлении. И к тому же двигатель многотопливный.

Устройство и принцип работы двигателя Стирлинга широко освещены в специальной литературе и в учебниках по тепловым двигателям [6,7,8,23,24 и т.д.], поэтому останавливаться на них нет смысла.

Рассмотрим только особенности ДС, связанные с его практическим применением.

Разработано довольно много различных схем ДС.

В настоящее время известные ДС можно разделить, как и поршневые двигатели внутреннего сгорания, на два вида:

1. Двигатели простого действия, в которых рабочий цикл совершается с одной стороны поршнем.

2. Двигатели двойного действия, в которых рабочие циклы совершаются с двух сторон поршнем.

Первые проще по конструкции и для применения в автономных агрегатах небольшой мощности представляют больший интерес. Поэтому в диссертации в качестве регулируемого объекта рассматривается ДС простого действия.

Практическое применение получили три схемы ДС простого действия, показанные на рис.1.4. Их обозначают буквами α , β и γ .

На рис.1.4 показаны основные конструктивные элементы ДС: рабочий поршень 1; вытеснительный поршень (или вытеснитель) 5 (только для схем β и γ); нагреватель 4, регенератор 3, охладитель 2, а также объемы горячей полости V_g , холодной полости V_x , буферной полости V_b , подвод теплоты Q_1 из камеры сгорания, отвод неиспользованной теплоты Q_2 в систему охлаждения.

Рабочей полостью двигателя являются объемы V_r и V_x , а также заполненные рабочим телом объемы нагревателя, регенератора, охладителя и соединительных каналов. Рабочим объемом называется объем, освобождаемый рабочим поршнем при движении от верхней мертвой точки до нижней мертвой точки. Объем всех полостей ДС, когда рабочий поршень находится в ВМТ, называется “мертвым” объемом.

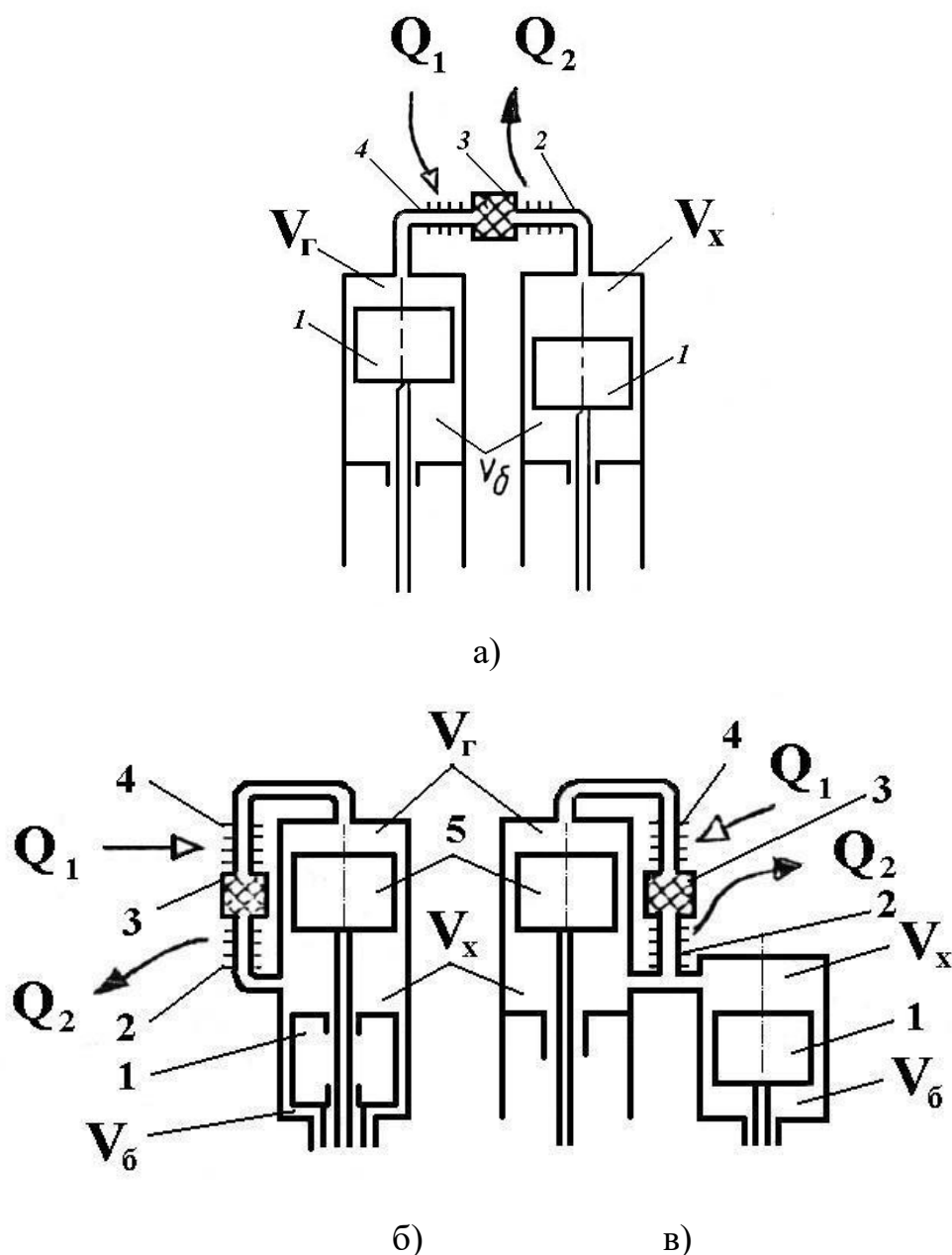


Рис.1.4. Принципиальные схемы двигателя Стирлинга простого действия:

а – модификации α ; б – модификации β ; в – модификации γ

Сжатие и расширение происходят в результате перемещения рабочего поршня (поршней в модификации α). При перемещении вытеснительного поршня объем рабочей полости двигателя не изменяется.

В двигателе, модификации α вытеснительного поршня нет, каждый поршень попеременно выполняет функции рабочего и вытеснительного поршня. В процессе работы ДС рабочее тело перемещается из горячей полости в холодную и наоборот. При сжатии основное количество рабочего тела находится в холодной полости, а при расширении – в горячей.

В основе рабочего процесса ДС лежит принцип получения полезной работы за счет сжатия газа при низкой температуре T_x и расширения его при более высокой температуре $T_{гор}$. Идеальный цикл Стирлинга представляет собой термодинамический цикл, состоящий из двух изотермических процессов расширения и сжатия, сопровождающихся соответственно подводом теплоты, и двух изохорных процессов нагрева и охлаждения. Полезная работа цикла определяется разностью работ расширения и сжатия газа в горячей и холодной полостях.

Мощность ДС, зависит от массы и среднего давления рабочего тела, которое находится в его рабочей полости. Поэтому ДС делают герметичными и рабочее тело в них накачивают под давлением. Максимальная мощность ДС изменяется практически прямопропорционально этому давлению рабочего тела. У современных ДС среднее давление достигает 10,0...15,0 МПа и выше. Это значительно выше кратковременного давления сгорания в поршневых ДВС.

Высокое среднее давление в ДС передается на кривошипно-шатунный механизм и действует на него в течение полного оборота коленчатого вала. Это приводит к увеличению нагрузок на его детали и подшипники. Требуется увеличивать их размеры и применять особо прочные материалы. Кроме того, значительно возрастает работа в процессе сжатия, она в 25...30 раз больше, чем в дизелях с таким же рабочим объемом цилиндра. Поэтому в ДС

обязательно делают так называемую буферную полость, которая располагается под рабочим поршнем. Объем буферной полости в несколько раз больше рабочего объема цилиндра, он сообщен капиллярной трубкой или через специальный канал с рабочей полостью ДС, чтобы быстрое изменение давления в рабочей полости ДС при осуществлении рабочего хода поршня не передавалось в буферную полость.

Когда рабочий поршень совершает рабочий ход, объем буферной полости уменьшается, а давление в ней увеличивается и часть энергии вырабатываемой в ДС аккумулируется в этой полости. Затем эта энергия расходуется при совершении процесса сжатия.

В буферной полости поддерживается среднее давление немного меньше, чем в рабочей полости ДС. Благодаря большому объему буферной полости размах колебаний давления в ней меньше, чем в полости ДС.

Обязательными элементами современного ДС являются: камера сгорания, системы подачи топлива и воздуха в камеру, система предварительного подогрева воздуха, поступающего в камеру сгорания, система охлаждения и очень важная для ДС система автоматического управления. В системе подачи воздуха обычно применяется дутьевой вентилятор.

1.3. Двигатели Стирлинга как регулируемый объект

Двигатель Стирлинга как регулируемый объект сложнее, чем поршневой ДВС. Это вызвано особенностями регулирования мощности ДС и необходимостью автоматического поддержания постоянной температуры нагревателя и определенного состава топливовоздушной смеси в камере сгорания на всех режимах работы.

Рассмотрим ДС с рабочим и вытеснительным поршнями, расположенными в одном общем цилиндре (модификация β) или в двух

отдельных цилиндрах (модификация γ). Полезная работа в таких ДС совершается под действием давления газа на рабочий поршень на участке его рабочего хода от ВМТ до НМТ. Эффективная мощность выражается таким же уравнением, как для двухтактного поршневого ДВС:

$$N_e = p_e \cdot V_h \cdot i \cdot n_\partial / 60, \quad (1.1)$$

где p_e – среднее эффективное давление;

V_h – рабочий (вытеснительный) объем рабочего цилиндра – это объем между НМТ и ВМТ в цилиндре сжатия (холодном цилиндре);

i – число цилиндров;

n_∂ – частота вращения вала ДС.

Из уравнения (1.1) видно, что мощность двигателя можно регулировать изменением среднего эффективного давления p_e . Это давление равно:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m = p_t \cdot \eta_0 \cdot \eta_m, \quad (1.2)$$

где p_i – среднее индикаторное давление;

η_m – механический к.п.д. двигателя;

p_t – среднее давление термодинамического цикла;

η_0 – относительный к.п.д.

В работе [8] показано, что среднее давление термодинамического цикла Стирлинга можно выразить уравнением:

$$p_t = p_a (T_g / T_x - 1) \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \ln \varepsilon, \quad (1.3)$$

где p_a – давление в начале такта сжатия;

T_g – температура рабочего тела в горячей полости ДС;

T_x – температура рабочего тела в холодной полости ДС;

ε – степень сжатия.

Степень сжатия равна:

$$\varepsilon = V_a / V_c, \quad (1.4)$$

где V_a – объем всех полостей ДС, когда рабочий поршень находится в НМТ;

V_c – объем всех полостей ДС, когда рабочий поршень находится в ВМТ.

Из уравнений (1.1)... (1.3) следует, что мощность ДС можно регулировать путем изменения давления p_a , отношения температур T_r/T_x и степени сжатия ε . Последние два параметра влияют на термический к.п.д. цикла Стирлинга, что видно из приведенного ниже уравнения для цикла Стирлинга с регенератором [8].

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_z/T_x)(1-\eta_p) - [(1-\eta_p) - (k-1)\ln \varepsilon]}{(T_z/T_x)[(1-\eta_p) + (k-1)\ln \varepsilon] - (1-\eta_p)}, \quad (1.5)$$

где η_p – к.п.д. регенератора.

Анализ уравнения (1.5) показывает, что с уменьшением отношения T_r/T_x и степени сжатия ε термический к.п.д. цикла уменьшается. Это значит, что если регулировать мощность ДС воздействием на эти параметры, то с уменьшением мощности экономичность ДС будет ухудшаться, что нежелательно для двигателей, которые значительную часть времени работают с неполной нагрузкой.

Поэтому рациональный способ регулирования мощности ДС – изменением давления p_a , т.е. среднего давления рабочего тела в ДС. Практически такое регулирование можно осуществлять двумя способами: изменением массы рабочего тела в двигателе или изменением “мертвого” объема. В первом случае ДС надо оборудовать баллонами со сжатым рабочим телом и компрессом для откачки рабочего тела из ДС и нагнетания его в баллоны, что заметно усложняет ДС. Во втором случае требуются дополнительные полости для регулирования “мертвого” объема, делающие ДС громоздким.

Приведенные выше рассуждения справедливы и для ДС с двумя поршнями в двух отдельных цилиндрах (модификация α) и для ДС двойного действия, только аналитические зависимости для них имеют более сложный вид. В современных ДС применяется регулирование мощности изменением среднего давления рабочего тела.

Отметим еще два способа регулирования мощности ДС. Один из них вытекает из уравнения (1.1), из которого видно, что мощность N_e зависит от рабочего объема V_h . Изменять V_h можно в ДС с изменяемым рабочим ходом. Этот способ весьма эффективен, но требует существенного усложнения конструкции двигателя, поэтому имеются только единичные экспериментальные образцы [7].

Другой способ, это изменение фазового угла между положениями рабочего и вытеснительного поршней, а в многоцилиндровых двигателях – смещение циклов в отдельных цилиндрах. Однако это приводит к ухудшению к.п.д. двигателя на частичных нагрузках, и тоже связано с усложнением конструкции двигателя.

Из уравнения (1.5) вытекает и второе условие, необходимое для обеспечения наилучшей экономичности ДС – это поддержание возможно большего отношения температур T_g/T_x . В идеале оно должно быть одинаковым на всех режимах работы ДС. Ограничением является жаропрочность нагревателя. Поэтому важное значение имеет точное поддержание на заданном уровне температуры стенок нагревателя, чтобы не произошло его разрушение.

Изменение среднего давления рабочего тела в ДС влияет на теплосъем с внутренних стенок нагревателя. Поэтому, если тепловой поток, поступающий к нагревателю, будет оставаться неизменным во всем диапазоне нагрузок, то температура нагревателя будет изменяться обратнопропорционально среднему давлению рабочего тела. Это приведет либо к снижению эффективности и мощности двигателя, либо к перегреву стенок нагревателя и его разрушению.

В ДС подвод теплоты осуществляется путем сжигания газо-воздушной или топливовоздушной смеси в камере сгорания. Поддержание температуры нагревателя на требуемом уровне может быть осуществлено путем изменения расходов топлива и воздуха, поступающих для сгорания. При этом надо

учитывать, что количественное соотношение между воздухом и топливом оказывает значительное влияние на процесс горения и состав продуктов сгорания. Поэтому при изменении расходов топлива и воздуха в камере сгорания необходимо обеспечивать поддержание оптимального коэффициента избытка воздуха.

Скоростные характеристики двигателя Стирлинга подобны скоростным характеристикам бензиновых двигателей внутреннего сгорания, т.е. с ростом частоты вращения коленчатого вала эффективный крутящий момент двигателя, при постоянном положении органа управления его мощностью, уменьшается. Это видно из показанных на рис.1.5 опытных характеристик ДС [6].

На рис.1.5,а показаны характеристики при разных постоянных значениях максимального давления $p_{\max}$ в цикле, а на рис.1.5,б при разных значениях среднего давления $p_{\text{ср}}$. Но оба давления зависят от давления p_a .

Благодаря такой форме кривой крутящего момента ДС работает устойчиво без регулятора частоты вращения и на автомобилях может применяться без этого регулятора. Если же ДС использовать для привода электрогенераторов, водяных насосов и других агрегатов в стационарных условиях, то должна поддерживаться постоянная частота вращения вала ДС в заданных границах независимо от нагрузки.

При оценки возможностей работы ДС в стационарных условиях рассмотрим взаимное влияние гипотетических характеристик двигателя и потребителя на поле взаимных режимов (рис.1.6). Если принять, что точка А на характеристике I двигателя представляет собой номинальный режим его работы, то незначительное уменьшение нагрузки (переход с характеристики I на характеристику II) повлечет за собой уменьшение частоты вращения (новый режим работы устанавливается в точке С). Для обеспечения заданного значения частоты вращения следует при изменении сопротивления перейти на новую частичную характеристику 2, тогда новый режим установится в точке

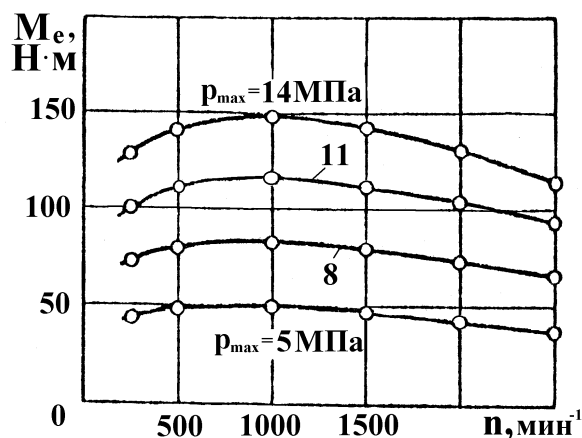


Рис.1.5,а. Зависимость крутящего момента M_e одноцилиндрового с ромбическим приводом ДС фирмы “Филипс” от частоты вращения вала при различных максимальных давлениях [6]

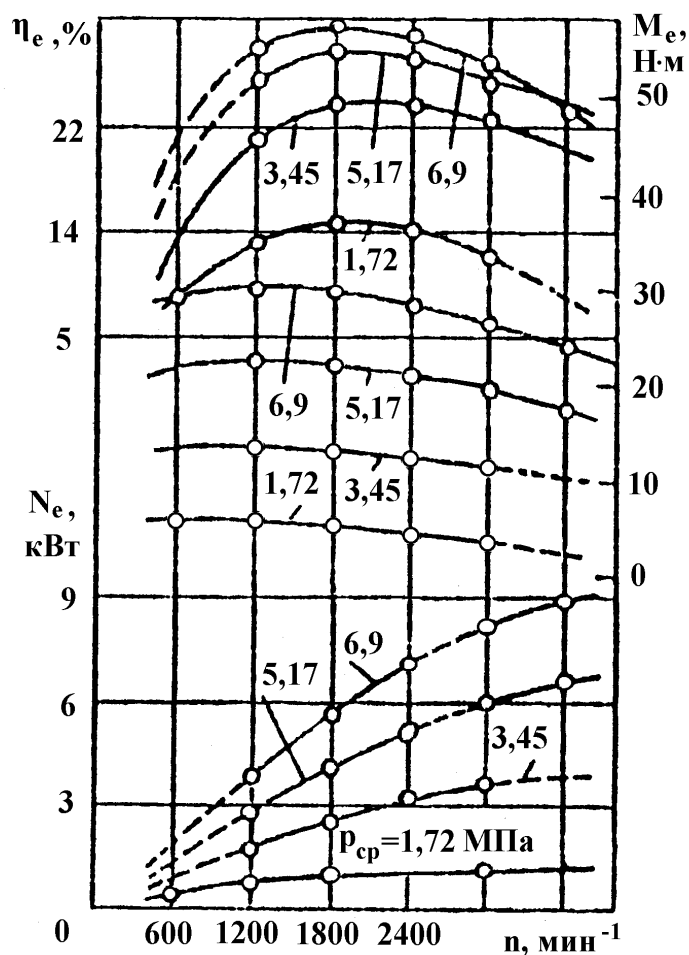


Рис.1.5,б. Характеристики двигателя GPU-3. Зависимости эффективной мощности N_e , крутящего момента M_e и эффективного к.п.д. η_e от частоты вращения n вала двигателя при различных значениях среднего давления рабочего тела p_{cp} [6]

В. Переход на новый мощный режим в современных ДС производится изменением среднего давления рабочего тела в двигателе. Таким образом, для перехода на частичную характеристику 2 следует по мере увеличения частоты вращения коленчатого вала воздействовать на орган управления двигателя, уменьшая среднее давление рабочего тела. Наоборот, при увеличении сопротивления и понижении частоты вращения среднее давление рабочего тела в двигателе должно увеличиваться. Процесс поддержания постоянного значения частоты вращения вала двигателя должен выполняться системой автоматического регулирования частоты вращения.

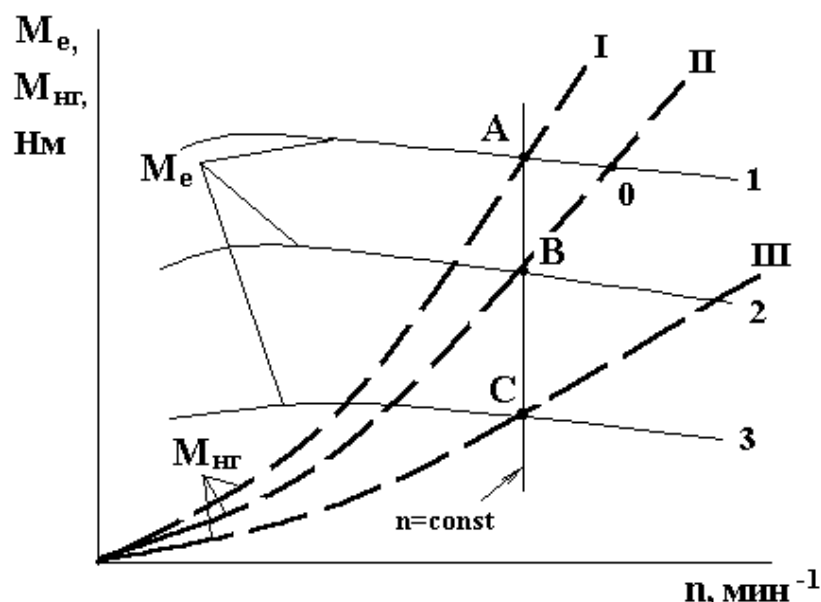


Рис.1.6. Гипотетические характеристики двигателя Стирлинга и потребителя энергии:

————— - двигатель Стирлинга; ----- - потребитель энергии

Регулятор частоты вращения должен воздействовать на систему, управляющую мощностью ДС.

В литературе имеются сведения о том, что для обеспечения устойчивой работы ДС на минимальном холостом ходу необходимо оборудовать его специальной системой автоматического регулирования минимальной частоты вращения холостого хода [25, 26]. Такая система имеется, например, на автомобильном ДС японской фирмы “Аисин Сейки” [14].

Пуск и остановка двигателя Стирлинга связаны с выполнением ряда операций, которые целесообразно осуществлять автоматически. Поэтому двигатель должен быть оборудован системами автоматического пуска и остановки.

Кроме того, на ДС должна быть автоматическая система безопасности, предохраняющая его от повреждений в случае нарушения нормального функционирования каких-либо систем двигателя.

Из сказанного выше следует, что для эффективной эксплуатации двигателя Стирлинга его необходимо оборудовать автоматическими системами:

- а) пуска и остановки двигателя;
- б) регулирования мощности;
- в) регулирования частоты вращения вала двигателя (САРЧ);
- г) регулирования температуры нагревателя (САРТ);
- д) регулирования коэффициента избытка воздуха (САРА);
- е) безопасности на случай появления неисправностей в двигателе.

Совокупность перечисленных систем автоматического регулирования (САР) различных параметров работы ДС представляет собой систему автоматического управления (САУ) двигателя Стирлинга.

1.4. Требования к системе автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала и системе автоматического регулирования температуры нагревателя экспериментального двигателя Стирлинга

Система автоматического регулирования частоты вращения ДС должна быть рассчитана на то, что он будет использоваться в качестве первичного двигателя электрического агрегата с генератором переменного тока с первой (минимальной) степенью автоматизации по ГОСТ 14228-80 [27]. В этом случае номинальный наклон регуляторной ветви характеристики двигателя по

ГОСТ 13822-82 [28] должен быть 3%, а показатели САРЧ удовлетворять требованиям ГОСТ 10511-83 [29] к системам регулирования частоты вращения не ниже 3-го класса точности. Эти требования следующие:

- нестабильность частоты вращения на установившихся режимах ($\nu, \%$), не более:

- 3 – при относительной нагрузки до 25%;

- 2 – при относительной нагрузки от 25% до 100%;

- заброс частоты вращения после мгновенного сброса или наброса номинальной нагрузки (δ_d) не более 10,0%, а длительность переходного процесса (τ) не более 5,0 с.

В настоящее время нет стандартов на качество регулирования температуры нагревателя и коэффициента избытка воздуха ДС. Поэтому можно принять требования, рекомендуемые в работе [30]:

- для обеспечения высокой экономичности двигателя и исключения возможности его перегрева температура нагревателя должна быть на максимально допустимом для применяемых в настоящее время материалов уровне $T_{н. \max} = 970-1020$ К на всех режимах;

- на установившихся режимах температура $T_{н. \max}$ должна поддерживаться в пределах заданной зоны нечувствительности, которую можно принять равной $2\delta = 20^\circ \text{К}$;

- максимальный динамический заброс T_n не должен превышать 6% от ее номинальной поддерживаемой величины;

- на всех установившихся режимах должен поддерживаться оптимальный для двигателя коэффициент избытка воздуха ($\alpha_{\text{опт}}$) в камере сгорания;

- в переходных процессах допускается кратковременное отклонение α от оптимального значения, но при этом не должно быть срыва пламени в камере сгорания и повышенной дымности продуктов сгорания;

- наиболее предпочтительным является астатический закон регулирования T_n ;
- переходный процесс должен быть периодическим, либо иметь вид затухающих колебаний;
- длительность переходного процесса, по возможности должна быть минимальной.

Наиболее перспективно разрабатывать САРТ и САРА на элементах электроники.

1.5. Системы автоматического управления автомобильного двигателя Стирлинга

На современных автомобильных ДС применяются сложные многоконтурные САУ, в которые входят несколько САР отдельных режимных параметров двигателя и его систем, представляющих собой связанные между собой и несвязанные контуры регулирования. Основные регулируемые параметры: среднее давление рабочего тела в ДС, от которого зависит развиваемая мощность; температура стенок нагревателя; отношение расходов воздух / топливо; частота вращения вала ДС. Кроме того, имеются контуры регулирования частоты вращения дутьевого вентилятора, давления топлива, температуры охлаждающей жидкости и др.

Основой САУ является электронный блок управления с микропроцессором или мини-ЭВМ. Оператор с помощью органа управления задает требуемый режим работы ДС (например, для поддержания заданной скорости движения автомобиля), а электронный блок управления выполняет это задание в соответствии с введенной в его память программой.

Рассмотрим для примера особенности системы управления автомобильного ДС Mod II, разработанного в 1980-х годах совместно тремя фирмами: “Мэкэникл Технолоджи Инкарпорейтед” (МТИ, США), “Юнайтед

Стирлинг” (USAB, Швеция) и “Америкэн Моторс Инкорпорейшин” (AMG, США) [31...35].

Двигатель Стирлинга Mod II 4-цилиндровый, двойного действия, V-образный, с одним коленчатым валом и уравнивающим механизмом. Максимальное среднее давление рабочего тела 15 МПа, максимальная мощность 60 кВт при 4000 мин⁻¹.

Схема системы управления ДС Mod II показана на рис.1.7 [33]. Ее основными элементами являются электронный блок управления (ЭБУ), САР среднего давления рабочего тела (мощности ДС) и САР процесса сгорания. Общее управление осуществляется ЭБУ так, чтобы характеристики ДС были такими же, как у обычного бензинового ДВС с искровым зажиганием. ЭБУ осуществляется связь между всеми системами, хранение и обработка информации, взаимодействие между системами двигателя, диагностика, управление пуском и остановкой ДС.

Схема САР среднего давления рабочего тела (мощности двигателя) показана на рис.1.8. Это давление регулируется добавлением в ДС водорода из баллонов или откачкой его из ДС с помощью компрессора. Для этого служит многопозиционный электромагнитный клапан, управляемый из ЭБУ. Для увеличения мощности клапан открывается и водород подается в ДС из баллонов, давление в которых выше, чем давление во внутреннем контуре. Причем подача водорода синхронизирована с рабочим циклом в ДС так, чтобы водород вводился во внутренний контур ДС в период, когда давление цикла минимальное. Величина мощности задается педалью управления, сигнал от которой поступает в ЭБУ. В ЭБУ учитываются также сигналы от датчиков частоты вращения, среднего давления рабочего тела и температуры нагревателя. Когда заданный педалью уровень мощности достигается, клапан устанавливается в нейтральное положение и внутренний контур ДС изолируется от баллонов и водородного компрессора. Для снижения мощности клапан сообщает ДС с компрессором и часть водорода

откачивается из него в баллоны. Если требуется быстрое снижение мощности, то по сигналу из ЭБУ клапан устанавливается в положение, при котором, кроме откачки водорода компрессором, происходит прямое сообщение между собой циклов с максимальным и минимальным давлением. В САР имеется два баллона емкостью по 4 литра с давлением в одном 10 МПа, а во втором 20 МПа.

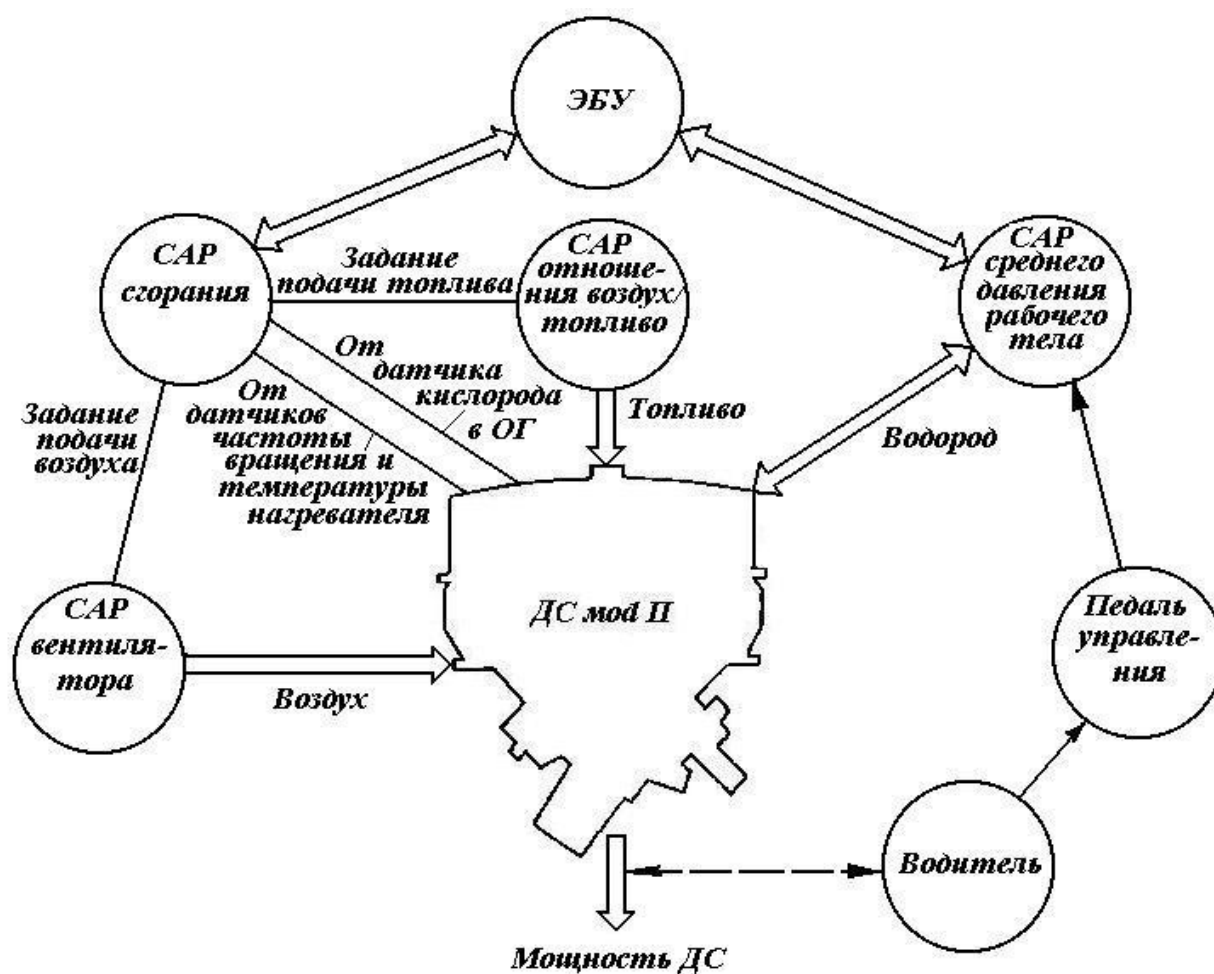


Рис. 1.7. Схема управления двигателя Стирлинга Mod II

На рис.1.9 показана САР процесса сгорания, которая имеет двойное назначение: поддерживать заданную температуру нагревателя и заданное отношение расходов воздух / топливо. Для этого в ней имеется две подсистемы, управляемые ЭБУ.

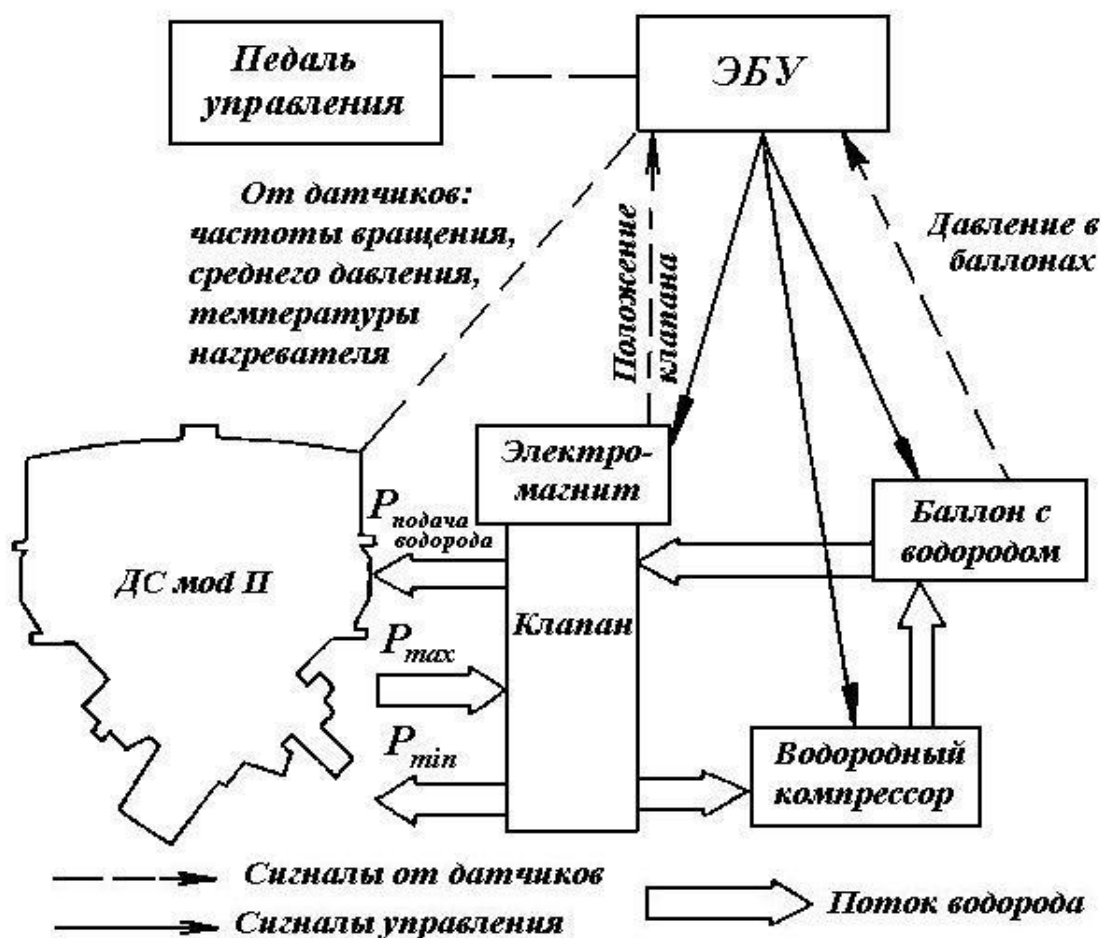


Рис. 1.8. Схема системы автоматического регулирования среднего давления рабочего тела двигателя Стирлинга Mod II

Первая подсистема служит для стабилизации температуры трубок нагревателя (рис.1.10). Она поддерживает температуру заднего (внешнего) ряда трубок нагревателя в пределах 1083-1103 К на всех режимах работы ДС. Этим обеспечивается получение максимального к.п.д. цикла. Для измерения температуры служат восемь термопар, закрепленных на нагревательных трубках.

Изменение температуры нагревателя происходит во время переходных процессов, когда изменяется количество теплоты, передаваемой через нагреватель к рабочему телу. Для регулирования используются пропорциональный, интегральный и дифференциальный сигналы (ПИД-

регулятор). Для увеличения мощности ДС в него добавляется водород. При этом температура нагрева рабочего тела начинает снижаться, так как в рабочем цикле используется больше теплоты. Система регулирования реагирует на это увеличением частоты вращения воздушного вентилятора, т.е. увеличением подачи воздуха, что приводит к интенсификации подвода теплоты к нагревательным трубкам.



Рис. 1.9. Схема организации процесса сгорания в двигателе Стирлинга

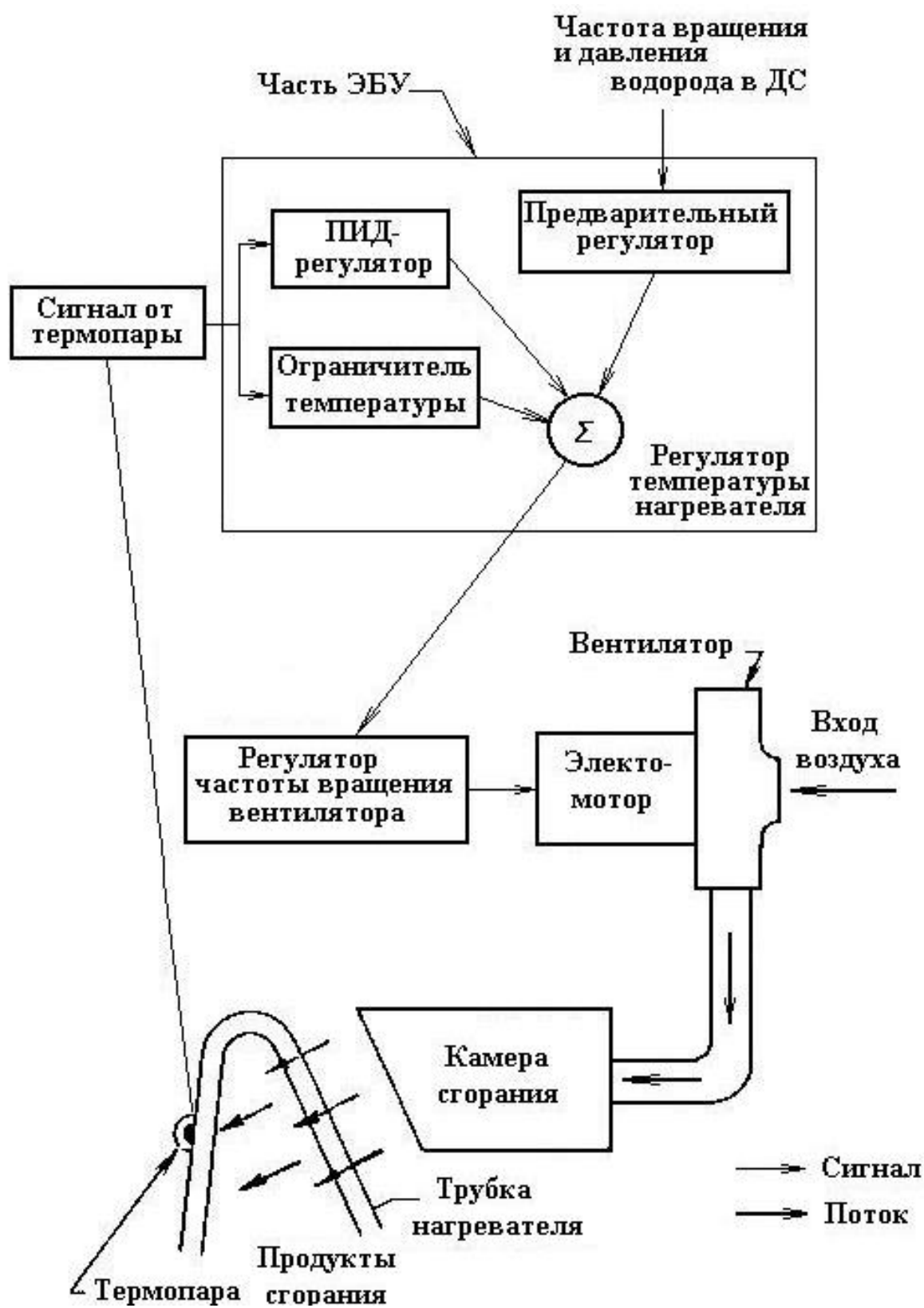


Рис. 1.10. Схема подсистемы стабилизации температуры трубок нагревателя (двигателя Стирлинга Mod II)

Одновременно увеличивается подача топлива, чтобы сохранилось постоянное отношение расходов воздух / топливо. При уменьшении мощности все происходит в обратном порядке.

Вторая подсистема регулирует отношение расходов воздух / топливо (рис.1.11). В диапазоне расходов топлива от 0,17 до 5,2 г/с коэффициент избытка воздуха поддерживается в диапазоне $\alpha=1,18 - 1,31$. Расход воздуха измеряется проволочным (термоанемометрическим) датчиком. Пропорционально расходу воздуха изменяется и расход топлива, который обеспечивается электромагнитными форсунками с широкоимпульсной модуляцией управляющих сигналов.

Как видно из приведенного описания, автомобильный ДС должен быть оборудованным весьма сложной системой автоматического управления. Для маломощного стационарного ДС ее необходимо максимально упростить.

1.6. Регулирование мощности двигателя Стирлинга изменением “мертвого” объема

В доступных литературных источниках имеется очень мало сведений о разработках ДС с регулированием мощности изменением “мертвого” объема.

В ДС фирмы “Юнайтед Стирлинг” (рис.1.12) изменяемый “мертвый” объем выполнен в виде камер А, Б, В, Г с управляемыми электромагнитными клапанами 1, 2, 3, 4 [9]. Камеры имеют разные размеры и включаются в разных сочетаниях. В результате получается много ступенчатое достаточно плавное изменение мощности. Были испытаны опытные образцы, но о проведении дальнейших работ данных нет.

В ДС по авторскому свидетельству СССР №1160087 [36] в изменяемом “мертвом” объеме 1 (рис.1.13) помещен сильфон 2, заполненный маслом. Он через распределитель 3 сообщен с пневмогидравлическим аккумулятором (ПГА) 5 и масляным насосом 6. Когда золотник 4 распределителя 3 находится

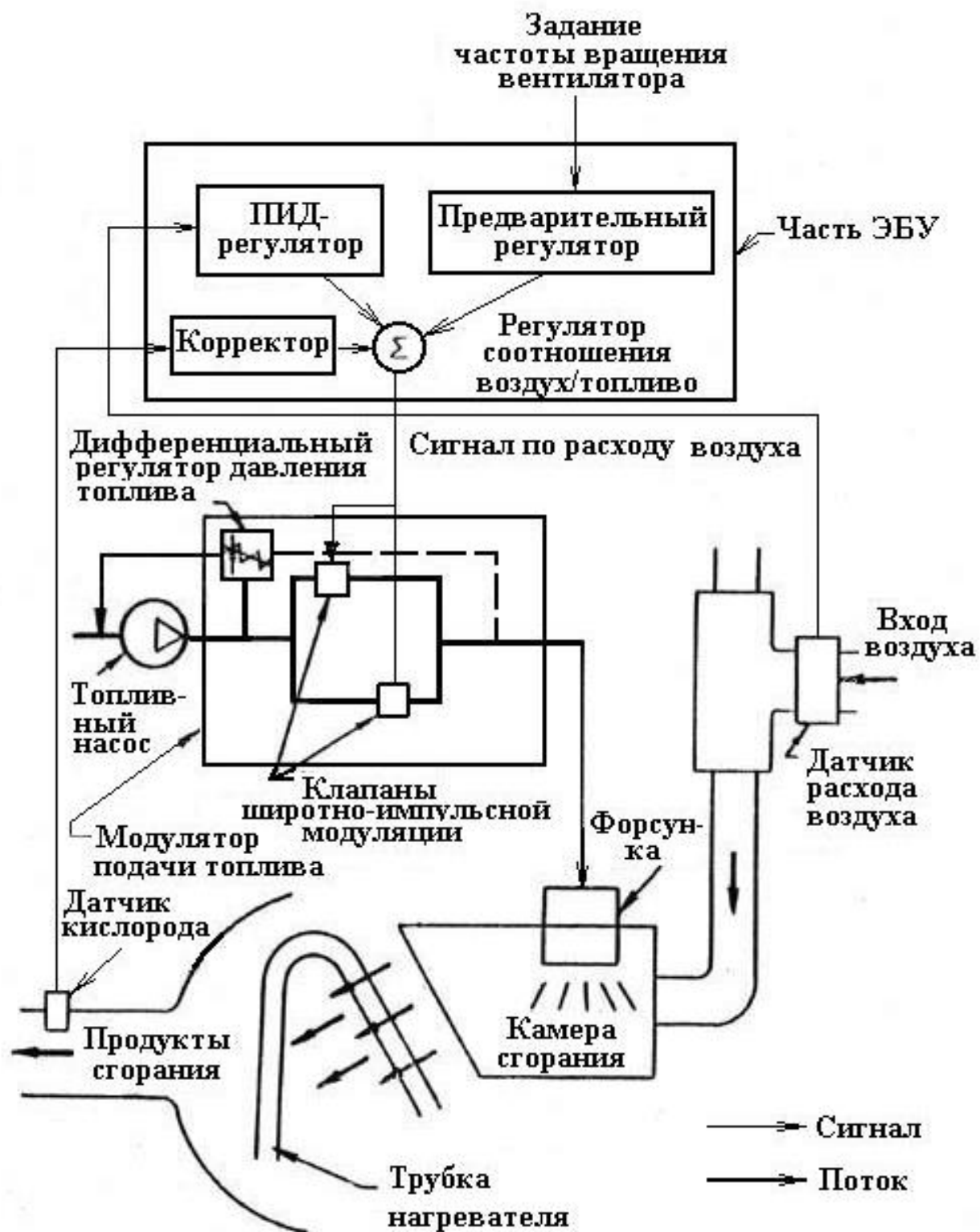


Рис. 1.11. Схема подсистемы регулирования отношения расходов воздух / топливо в двигателе Стирлинга Mod II

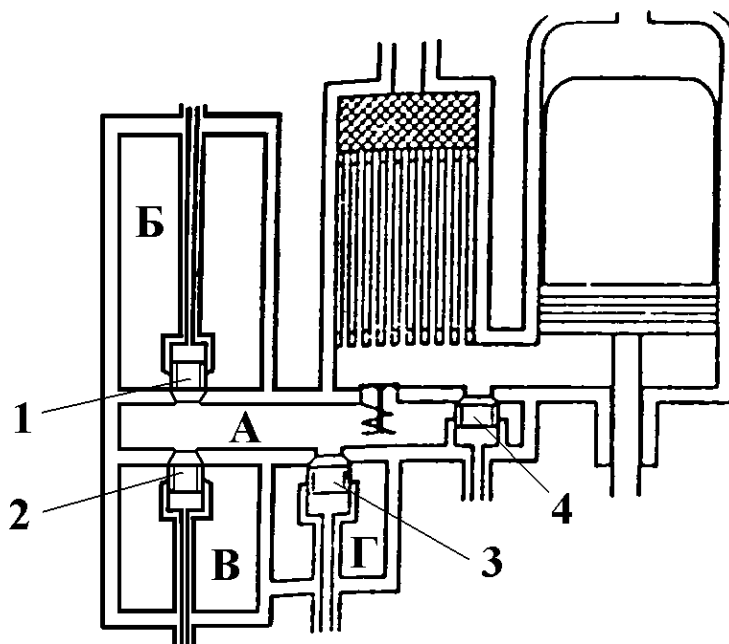


Рис. 1.12. Схема регулирования мощности двигателя Стирлинга изменением “мертвого” объема фирмы “Юнайтед Стирлинг”

в нейтральном положении, насос 6 прокачивает масло из ПГА через распределитель 3 обратно в ПГА. Система находится в равновесии. Когда золотник 4 смещен влево, масло из ПГА под давлением нагнетается в сильфон 2, последний расширяется, “мертвый” объем 1 уменьшается и мощность ДС возрастает. Когда золотник 4 смещен вправо, сильфон 2 под действием давления в ДС сжимается, вытесняя масло в ПГА, т.к. давление в ПГА меньше, чем давление в ДС. Насос 6 продолжает перекачивать масло из ПГА через распределитель 3 обратно в ПГА. “Мертвый” объем увеличивается, мощность ДС уменьшается.

Этот регулятор исследовали в МАДИ [26]. Экспериментально подтверждена возможность бесступенчатого регулирования мощности ДС изменением дополнительного “мертвого” объема, что может служить основанием для создания таких систем для маломощных ДС.

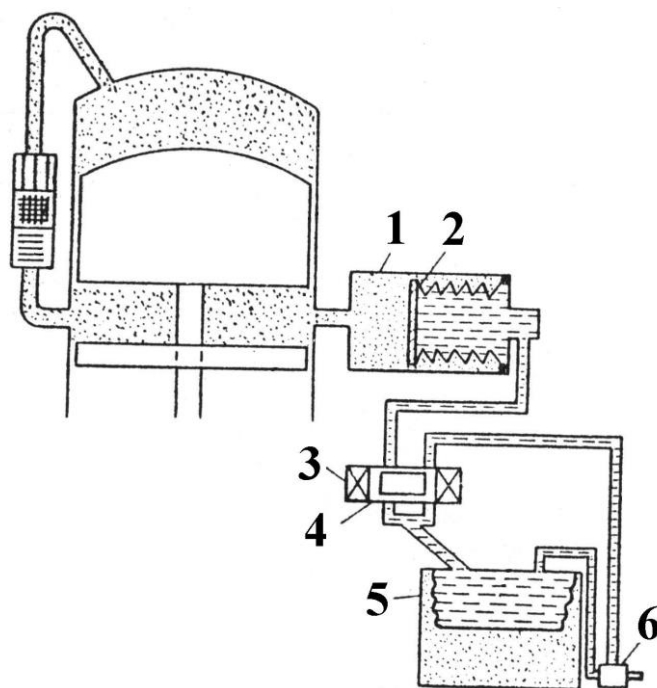


Рис. 1.13. Схема регулирования мощности ДС изменением “мертвого” объема по А.С. СССР № 1160087

1.7. Перспективы применения двигателя Стирлинга

Многие всемирно известные крупные компании, такие как “Philips” (Нидерланды), “American Motors General”, “Ford Motor” (США), “United Stirling” (Швеция), “MAN-MWM” (ФРГ), “Ricardo” (Великобритания) проводили интенсивные научно-исследовательские, конструктивные и экспериментальные работы по ДС. В результате длительных разработок ими были созданы и исследованы двигатели широкого диапазона мощностей и различного значения. Техничко-экономические показатели лучших из них приведены в табл.1.5 [6].

Как видно из таблицы, к.п.д. отдельных двигателей достигают 37% при достаточно большой мощности. По последним данным достигнуты к.п.д. равный 40% и удельная масса снижена до 2,2 кг/кВт [37].

Таблица 1.5

Уровень технико-экономических показателей некоторых зарубежных образцов двигателей Стирлинга

Модель ДС	4-95"USS"	МОД-1 "USS"	P-75"USS"	LL 23	2W17A	4-215ДА	4S1216
Номинальная мощность, кВт	45	54,4	75	95	102	127	280
Частота вращения, мин ⁻¹	4000	2000	2400	2100	1800	4000	1500
Температура стенки нагревателя, К	993	993	-	1033	868	-	923
Эффективный к.п.д., %	28	34	37	35	28,4	-	35
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	307	249	-	263	-	-	-
Число цилиндров	4	4	4	4	2	4	4
Рабочее тело	водород	водород	водород	водород	водород	водород	водород
Среднее давление во внутреннем контуре, МПа	15	15	15	10,3	7,6	20	10,35

С учетом сказанного в настоящее время будущее ДС представляется весьма перспективным. Двигатель Стирлинга рассматривается как двигатель, обладающий перспективами для дальнейшей разработки. Низкий уровень шума, малая токсичность отработавших газов, возможность работы на различных топливах, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики в режимах частичных нагрузок и благоприятные характеристики крутящего момента – все это дает возможность “бросить вызов” поршневым ДВС. При этом область применения ДС во многом совпадает с областью применения ДВС, в частности дизелей (в различных энергосистемах, транспорте, на подводных средствах и т.д.) [6,7].

Стационарные ДС, соединенные с электрическими генераторами, работают с постоянной частотой вращения при изменении мощности от холостого хода до номинальной. В других случаях (относящихся к транспортным двигателям) режимы работы характеризуются широким диапазоном изменения как нагрузки, так и частоты вращения вала. Вместе с тем, необходимо заметить, что специфические особенности организации рабочего процесса этого типа двигателей для обеспечения нужного режима работы требуют сугубо специальных способов управления, которые без применения систем автоматизации реализовать невозможно. Неавтоматизированный ДС не может быть применен в реальных условиях эксплуатации.

Анализируя опубликованные материалы о ДС, легко убедиться, что большинство работ в этой области было направлено на разработку двигателей, способных заменить бензиновые ДВС и дизели на мобильных машинах. При такой постановке проблемы от ДС требовались лучшие или, по крайней мере, не худшие мощностные, экономические и массогабаритные показатели, чем у поршневых ДВС, используемых на соответствующих объектах. Чтобы достичь этого, необходимо было сообщать рабочему телу ДС приблизительно такое же количество теплоты, а для этого пришлось создавать очень сложные

трубчатые нагреватели с развитыми поверхностями теплообмена, применять в рабочем контуре термодинамические высокоэффективные рабочие тела (водород, гелий), а для обеспечения быстрого сгорания создавать камеры сгорания, работающие на нефтяных топливах. В итоге получались довольно сложные конструкции. Тем не менее, в 1986 г. американская фирма “Диер” заявила о подготовке серийного производства ДС для грузовых автомобилей. По расчетам фирмы для подготовки завода к выпуску 1500 ДС в год потребуется 36,6 млн. долл. США (по ценам тех лет), а стоимость одного ДС составит 4425 долл. с перспективой ее снижения. Начало промышленного производства ДС предполагалось в 1990...1991 гг. Но планы эти не были реализованы. Видимо, для реконструкции завода потребовались слишком большие капиталовложения, не обещавшие быстрой окупаемости. К тому же для таких узлов как камера сгорания, нагреватель, регенератор, охладитель требуются высококачественные дорогие высокопрочные и жаростойкие материалы сложные для механической обработки.

Но работы по совершенствованию ДС упорно продолжаются, причем область возможного применения ДС расширяется. Значительно больше внимание уделяется использованию ДС в качестве первичного двигателя в стационарных условиях, когда ДС можно максимально упростить, удешевить их производство и применить дешевые альтернативные топлива [37, 38]. Таким топливом могут быть и отходы сельскохозяйственного производства.

Для сельского хозяйства Украины, переходящего на мелкотоварные фермерские хозяйства, представляют интерес маломощные Стирлинг - электрические агрегаты мощностью 2...5 кВт, как источники электроэнергии в сельской местности, которые могут работать на различных топливах, в том числе на твердом топливе (дрова, щепки, опилки, шелуха и стебли зерновых и т.д.). На первичных двигателях таких агрегатов можно применять упрощенные САУ, которые осуществляют автоматическое регулирование температуры стенок нагревателя, мощности и частоты вращения двигателя.

Особенно привлекательным для сельского хозяйства представляется использование Стирлинг – электрических агрегатов в составе когенерационных установок, комплексно вырабатывающих электрическую энергию и теплоту. Общий к.п.д. таких установок может достигать 80...85% [37].

Однако в Украине полноценные ДС никогда не выпускались. Известны попытки разработать и изготовить ДС мощностью 1,0...2,0 кВт в Киевском автомобильно – дорожном институте (КАДИ), ныне это Национальный транспортный университет (НТУ), и в ОКБ “Фотон” при Днепропетровском государственном университете (г. Днепропетровск) в конце 1980-х начале 1990-х годов, но в связи с развалом СССР они были прекращены.

Единственный практический результат - это выпуск в 1987 году большой партии (около 200 шт.) учебно-демонстрационных ДС модели УДС-1 Киевским кооперативом по производству товаров народного потребления “Плазмотрон” [39]. В основу конструкции этого ДС положена схема действующей модели ДС, изготовленной в г. Москве инж. Э.Н. Скурьятом [40]. Максимальная мощность ДС модели УДС-1 составила – 6...8 Вт при 400...450 мин⁻¹.

В связи с тяжелым экономическим положением в Украине, рассчитывать на изготовление даже маломощного опытного ДС в настоящее время не реально. Однако до прихода лучших времен следует проводить теоретические исследования и опытно-конструкторские разработки по САУ маломощных ДС, используя в качестве регулируемого объекта упрощенные действующие модели ДС и моделирование работы ДС на ЭВМ. Учитывая большой интерес к ДС во всем мире, проведение таких разработок в Украине следует считать весьма актуальной задачей.

Решению этой задачи посвящена настоящая диссертация.

Цели и задачи диссертационной работы изложены во введении.

Выводы по первому разделу

1. Двигатель Стирлинга продолжает привлекать внимание специалистов и высокотехнологических фирм в разных странах, как конкурент и реальная альтернатива поршневым двигателям внутреннего сгорания. Особенно привлекают такие качества ДС как многотопливность, низкая токсичность отработавших газов, малошумность при такой же и даже лучшей топливной экономичности, как у двигателей внутреннего сгорания.

Современные опытные образцы ДС доведены до высокой степени совершенства. У лучших из них эффективный к.п.д. достигает 40%, удельная масса – 2,2 кг/кВт.

2. Двигатели Стирлинга разрабатывают для широкой сферы применения, в том числе в сельскохозяйственном производстве как на мобильных машинах, так и на стационарных установках различного назначения. Особый интерес в последнее время вызывают маломощные Стирлинг – электрические агрегаты, как автономные источники, электроэнергии в сельской местности для небольших фермерских хозяйствах, предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции, коттеджей и т.п. Первичные двигатели этих агрегатов могут работать на низкосортном жидком, а также на газовом и твердом топливах, в том числе на отходах сельскохозяйственного производства, что особенно важно в связи с дороговизной и дефицитом моторных топлив нефтяного происхождения. Для Украины, практически не имеющей природных ресурсов нефти, топливная проблема является особо актуальной.

3. Сегодня в Украине нет ДС и в связи с тяжелым экономическим положением в ней нереально рассчитывать на изготовление отечественных ДС в скором времени. Однако проведение научно-исследовательских работ в этой области возможно и целесообразно.

4. В связи с особенностями рабочего процесса ДС на них нужно применять специальную систему автоматического управления. Разработки такой системы для маломощных ДС и проведение исследований для определения ее рациональных параметров является самостоятельной научной задачей, которую можно предварительно решать используя упрощенные действующие модели ДС или моделируя работу ДС на ЭВМ.

РАЗДЕЛ 2

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МАЛОМОЩНОГО ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

2.1. Регулируемый объект

Полноценных даже маломощных ДС в странах СНГ нет, а имеющиеся в дальнем зарубежье опытные экземпляры, нам недоступны. Но для предварительных исследований САР маломощного ДС, в которую входят системы регулирования температуры нагревателя и частоты вращения коленчатого вала двигателя, в качестве регулируемого объекта можно использовать небольшие упрощенные действующие модели ДС.

Использование маломощного ДС для таких исследований становится возможным если в системах регулирования двигателя применить электронные микропроцессорные регуляторы, которые во время экспериментов могут питаться от автономного источника электрического тока, т.е. энергия, вырабатываемая ДС, для целей регулирования не расходуется.

На многих специализированных кафедрах ВУЗов в странах СНГ имеется маломощный ДС модели УДС-1, описанный в работах [39, 41].

Этот двигатель и принят в качестве регулируемого объекта в настоящем исследовании.

Однако УДС-1 предназначен только для демонстрации работы ДС. Он имеет упрощенную систему управления: теплота к нагревателю подводится от открытой горелки, холодная полость двигателя охлаждается воздухом, нагрузочного (тормозного) устройства двигатель не имеет, мощность и частоту вращения коленчатого вала двигателя можно регулировать только изменением

температуры нагревателя (расхода топлива через горелку), полноценного регенератора нет.

Чтобы использовать этот двигатель в качестве регулируемого объекта в него внесены следующие усовершенствования:

1. Подвод теплоты осуществляется от закрытой газовой горелки с регулируемым подводом горючего газа.
2. Для регулирования мощности двигателя применен специальный цилиндр с изменяемым “мертвым” объемом, присоединенный к рабочему цилиндру двигателя.
3. Создано водяное охлаждение холодной полости дополнительного цилиндра.
4. К двигателю присоединен электрический генератор, в результате чего получен Стирлинг – электрический агрегат, генератор которого можно использовать в качестве электрического тормоза.

Усовершенствованный двигатель УДС-1 с присоединенным электрическим генератором показан на рис.2.1.

Двигатель УДС-1 представляет собой V-образный Стирлинг γ - модификации вытеснительного типа с двумя цилиндрами, расположенными под углом 90° [42, 43, 44, 45]. Один из них рабочий 7, а второй дополнительный 14. В рабочем цилиндре 7 перемещается поршень 8, а в дополнительном цилиндре 14 - вытеснитель 18. Поршень и вытеснитель соединены с кривошипом коленчатого вала 23 шатунами 13 и 22. Направляющей для вытеснителя служит шток 19. Вытеснитель разделяет дополнительный цилиндр на две полости: горячую 15 и холодную 20. Обе полости сообщены между собой по зазору между вытеснителем и стенками дополнительного цилиндра. Холодная полость сообщена с рабочим цилиндром трубкой 12.

Дополнительный цилиндр выполняет роль нагревателя и охладителя рабочего тела, которым в УДС-1 служит воздух. Теплота подводится к рабочему телу снаружи через стенки цилиндра от продуктов сгорания топлива, которые

образуются в камере сгорания 16 с горелкой 17. В качестве топлива используется сжиженный нефтяной пропан-бутановый газ. Температура продуктов сгорания регулируется изменением количества сжигаемого газа, которое определяется положением крана 24.

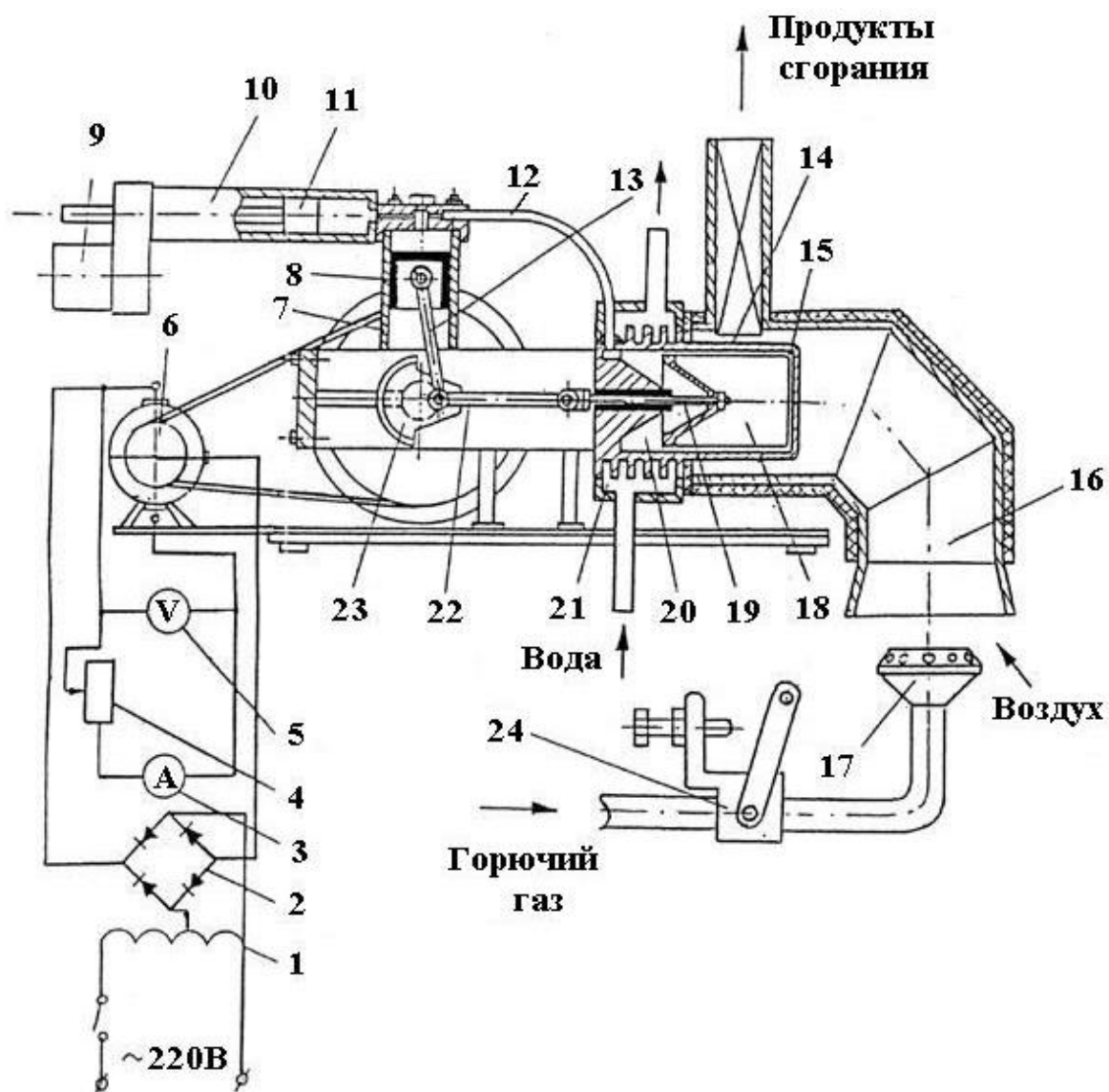


Рис.2.1. Принципиальная схема усовершенствованного двигателя УДС-1

Из холодной полости 20 теплота отводится в систему жидкостного охлаждения 21. Для интенсификации процесса отвода теплоты из холодной полости на дополнительном цилиндре выполнены кольцевые ребра. Теплоносителем в системе охлаждения служит вода.

В двигателе УДС-1 нет характерного для ДС регенератора теплоты, его роль частично выполняет вытеснитель 18. Когда воздух проходит через зазор из горячей полости в холодную, вытеснитель поглощает часть теплоты, а при обратном движении воздуха из холодной полости в горячую теплота передается от вытеснителя воздуху.

Внутренний контур двигателя УДС-1 негерметичен. При неработающем двигателе давление воздуха в нем равно атмосферному давлению. К рабочему цилиндру присоединен цилиндр 10 с поршнем 11, который можно перемещать с помощью винтовой передачи с приводом от реверсивного электродвигателя 9. Этот цилиндр выполняет роль дополнительного регулируемого “мертвого” объема.

Диаметры цилиндров: рабочего – 40 мм, дополнительного – 65 мм. Ход поршня и вытеснителя – 30 мм. Диаметр вытеснителя 63,4 мм.

Общий объем всех заполненных воздухом полостей двигателя (без учета объема цилиндра 10 при положении поршня 8 в НМТ) составляет $195,2 \text{ см}^3$, рабочий объем рабочего цилиндра (объем между ВМТ и НМТ) равен $37,7 \text{ см}^3$, “мертвый” объем при положении поршня в ВМТ – $157,5 \text{ см}^3$. Степень сжатия 1,24, отношение “мертвого” объема к рабочему объему – 4,18. Максимальный объем цилиндра 10 – 60 см^3 . Степень сжатия с учетом полного объема цилиндра 10 равна 1,17, а отношение “мертвого” объема к рабочему объему 5,77.

Электрогенератор 6 постоянного тока соединен с двигателем УДС-1 ременной передачей. Обмотка возбуждения генератора питается током из бытовой электрической сети через автотрансформатор 1 и выпрямитель 2. Вырабатываемый генератором ток регулируется реостатом 4 переменного сопротивления. Напряжение тока измеряется вольтметром 5, а сила тока – амперметром 3.

Наибольшая эффективная мощность двигателя УДС-1 – 8 Вт при частоте вращения коленчатого вала $400 \dots 450 \text{ мин}^{-1}$ и температуре наружной стенки горячей части дополнительного цилиндра $930 \dots 950 \text{ К}$.

Работает двигатель следующим образом.

При движении поршня 8 к ВМТ происходит сжатие воздуха во всех полостях двигателя и давление рабочего тела повышается. Одновременно с этим вытеснитель 18 перемещается в направлении холодной полости, основная масса воздуха вытесняется через зазор в горячую полость 15 и нагревается в ней. В результате повышения температуры воздуха давление в горячей полости и во всех сообщенных с ней полостях двигателя повышается. Под действием этого давления поршень 8 перемещается к НМТ, совершая рабочий ход. Температура в разных полостях двигателя не одинаковая: в горячей полости она наибольшая, а в рабочем цилиндре наименьшая.

При движении поршня 8 к НМТ вытеснитель перемещается в сторону горячей полости и основная масса воздуха перемещается в холодную полость, где охлаждается. В результате снижения температуры воздуха давление в двигателе уменьшается. Затем цикл повторяется.

Так как двигатель УДС-1 негерметичен, то при повышении давления в нем происходит утечка части воздуха в атмосферу через зазоры, поэтому при охлаждении воздуха в конце такта расширения давление в двигателе становится ниже атмосферного и воздух подсасывается в него из атмосферы.

Как было показано в разделе 1, в герметичных ДС распространено регулирование мощности изменением среднего давления рабочего тела в нем путем изменения находящейся в двигателе массы рабочего тела. В этом случае ДС оборудуют компрессором и ресивером для сжатия рабочего тела. Для негерметичного ДС такой способ регулирования неприемлем. Поэтому в двигателе УДС-1 применено регулирование мощности изменением “мертвого” объема двигателя с помощью уже упомянутого цилиндра 10 с поршнем 11. С увеличением этого объема становится меньше размах колебаний давления в рабочем цилиндре, а следовательно уменьшается среднее индикаторное давление, мощность двигателя снижается.

Как было отмечено, двигатель УДС-1 не герметичный, поэтому при увеличении “мертвого” объема в него подсасывается из атмосферы воздух и общее количество рабочего тела в двигателе становится больше. Поэтому исходное давление в нем остается равным атмосферному.

В системе подвода теплоты нет дутьевого вентилятора и подогревателя воздуха. Горючий газ поступает под небольшим избыточным давлением через сопла в камеру сгорания, а воздух подсасывается за счет естественной тяги и эжекции, создаваемой вытекающими из сопла струями газа. Благодаря одинаковому агрегатному состоянию газового топлива и воздуха обеспечивается их хорошее перемешивание и образование гомогенной горючей смеси. Сгорание является стационарным, как в камерах сгорания газотурбинных и паровых двигателей при достаточно хорошем смесеобразовании. В маломощном двигателе УДС-1 этого достаточно, чтобы обеспечить необходимый подвод теплоты при температуре стенки нагревателя на уровне 930...950 К без наддува воздуха.

В связи с этим система автоматического управления двигателем УДС-1 упрощается, в нее входят две системы автоматического регулирования: температуры стенки нагревателя, т.е. стенки горячей части дополнительного цилиндра (САРТ), и частоты вращения коленчатого вала двигателя (САРЧ).

В состав Стирлинг – электрического агрегата может входить генератор постоянного или переменного тока. В первом случае параметры тока изменяются электрическим регулятором независимо от частоты вращения. Поэтому САРЧ приводного двигателя нужно только для ограничения максимальной частоты вращения.

Во втором случае требуется строгое поддержание заданной частоты вращения в соответствии с ГОСТ 10511-83 [29].

Таким образом, в модернизированном ДС модели УДС-1 нужно автоматически регулировать два основных параметра: температуру стенки нагревателя и частоту вращения коленчатого вала двигателя. Для этого ДС необходи-

мо оборудовать двухмерной системой автоматического регулирования, т.е. САУ такого ДС фактически представляет собою двухмерную САР, состоящую из САРТ и САРЧ. Система автоматического регулирования температуры нагревателя должна автоматически поддерживать заданную номинальную температуру $T_{н. ном}$ стенки нагревателя для получения наибольшего к.п.д. ДС, а САРЧ – поддерживать с заданной точностью номинальную (или максимальную) частоту вращения коленчатого вала ДС.

2.2 Принципиальная схема двухмерной системы автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга

Принципиальная схема двухмерной САР маломощного ДС может быть составлена без учета системы пуска и остановки, а также аварийной системы, которые имеют вспомогательное значение по сравнению с регулированием основных параметров: температуры стенки нагревателя T_n и частоты вращения n коленчатого вала ДС [46].

Поэтому в САР исследуемого ДС имеются два контура регулирования: контур САРТ и контур САРЧ. В контуре САРТ регулируемой величиной является температура T_n , а в контуре САРЧ – частота вращения коленчатого вала n .

Теплота в ДС подводится из камеры сгорания, в которой непрерывно сжигается топливовоздушная смесь. Часть выделившейся теплоты при сгорании передается рабочему телу через стенки нагревателя, а остальная часть рассеивается через стенки камеры сгорания и жаровой трубы в атмосферу, а так же выбрасывается в нее с продуктами сгорания.

Температура T_r рабочего тела в нагревателе должна поддерживаться на возможно большем уровне, так как от нее зависит к.п.д. ДС. Температура рабочего тела T_r , в свою очередь, зависит от температуры T_n стенок нагревателя, которая ограничивается термической прочностью его материала.

Допустимый уровень температуры стенок нагревателя как на установившихся режимах работы, так и во время переходных процессов должна поддерживать САРТ.

Температура стенок нагревателя зависит от баланса между количеством подведенной к нему снаружи теплоты от продуктов сгорания и количеством отведенной от его внутренней поверхности теплоты к рабочему телу ДС.

Количество подведенной теплоты регулируется изменением расхода топлива.

Количество теплоты, передаваемой от стенок нагревателя рабочему телу, зависит от среднего (массового) расхода последнего через нагреватель, в котором рабочее тело совершает возвратно-поступательное движение. В ДС с изменением “мертвого” объема изменяется плотность рабочего тела, а следовательно, и массовый расход его через нагреватель. Кроме того, этот расход зависит от частоты вращения вала ДС. Указанные изменения приводят к изменению температуры стенок нагревателя. Система автоматического регулирования температуры нагревателя должна автоматически демпфировать эти изменения температуры путем корректирования расхода топлива.

Частота вращения коленчатого вала ДС при постоянном положении органа управления его мощностью изменяется при изменении нагрузки на ДС. Поддерживать постоянную частоту вращения можно соответствующим изменением величины “мертвого” объема с помощью САРЧ. Но частота вращения изменяется и при изменении температуры T_r в горячей полости нагревателя. Это изменение частоты вращения тоже должно устранять САРЧ.

Из изложенного вытекает, что регулируемые величины T_n и p являются взаимно зависимыми [47, 48]. В таких системах регулирования рекомендуется применять связанное регулирование, при котором каждый из регуляторов воздействует на все регулируемые величины. Но это усложняет САР.

Учитывая то, что в исследуемой двухмерной САР изменение температуры T_n происходит значительно медленнее, чем изменение частоты вращения n , в настоящей работе принята несвязанная схема САР.

Так как САР несвязанная, рассмотрим отдельно принципиальные схемы контуров САРТ и САРЧ.

Принципиальная схема контура САРТ показана на рис.2.2.

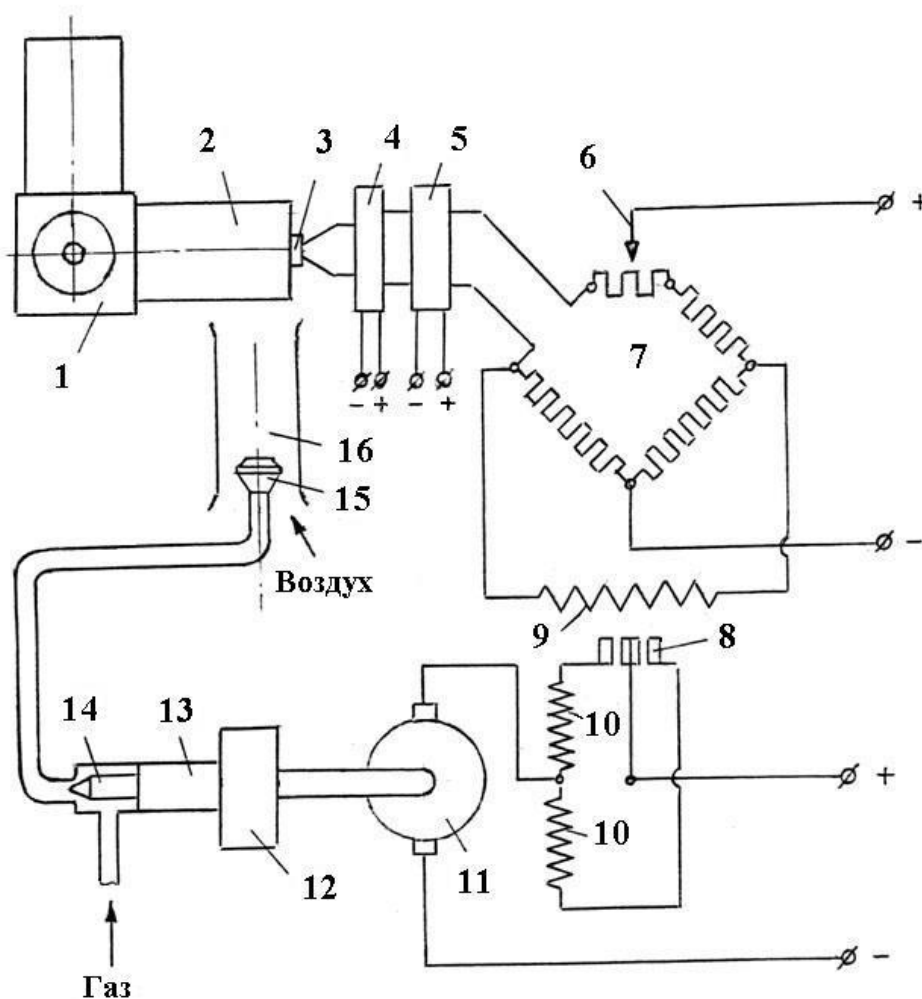


Рис. 2.2. Принципиальная схема контура САРТ:

1 – ДС УДС-1; 2 – нагреватель; 3 – термопара; 4 – электронный усилитель напряжения, создаваемого в термопаре; 5 – формирователь пропорционального и дифференциального сигналов управления; 6 – задатчик регулируемой температуры; 7 – электрический измерительный мост; 8 – контакты трехпозиционного реле; 10 – обмотки возбуждения реверсивного электродвигателя; 11 – реверсивный электродвигатель постоянного тока; 12 – планетарный редуктор; 13 – винтовая передача между редуктором и затвором дозатора газа; 14 – дозатор газа; 15 – газовая горелка; 16 – камера сгорания.

Измерительное устройство регулятора температуры состоит из термопары 3, включенной в качестве одного из плеч моста 7, и управляющей обмотки 9 трехпозиционного реле, включенной в диагонали моста. Мост 7 с помощью задатчика 6 регулируемой температуры настраивается так, чтобы при заданном значении температуры, которое надо поддерживать приблизительно постоянным, тока в обмотке 9 (т.е. в диагонали моста) не было. При этом контакты 8 реле разомкнуты. При отклонении температуры T_n стенки нагревателя за допустимые верхний или нижний пределы в обмотке 9 появляется ток, направление которого зависит от того, в какую сторону отклонилась температура T_n . В результате замыкаются правый или левый контакты 8 и ротор электродвигателя начинает вращаться в соответствующую сторону.

Таким образом, мост 7 и задатчик 6 выполняют функцию устройства сравнения текущего значения температуры T_n с заданным. Кроме того, реле выполняет и роль усилителя сигнала рассогласования, так как питание электродвигателя осуществляется от независимого источника постоянного тока.

Напряжение, создаваемое термопарой 3, весьма небольшое, поэтому оно усиливается в электронном усилителе 4. В формирователе сигналов управления 5 выделяется пропорциональный и дифференциальный сигналы, которые поступают на плечо моста 7. Интегральный сигнал создается в электродвигателе постоянного тока, который является по принципу действия интегрирующим звеном.

Принципиальная схема контура САРЧ показана на рис.2.3. Частота вращения коленчатого вала двигателя измеряется с помощью зубчатого колеса 2, на котором имеются 60 равномерно расположенных зубьев, и индуктивный датчик 3. Импульсы напряжения, создаваемого в датчике 3, усиливаются в электронном усилителе 8. В формирователе сигналов управления 9 образуются пропорциональный и дифференциальные сигналы управления.

Измерительное устройство регулятора частоты вращения состоит из датчика 3 и управляющей обмотки 13 пропорционального реле, включенной в

диагональ моста 11. С помощью задатчика 10 мост настраивается так, чтобы при заданной регулируемой частоте вращения в управляющей обмотке 13 тока не было и контакты 12 находились в незамкнутом состоянии. Когда частота

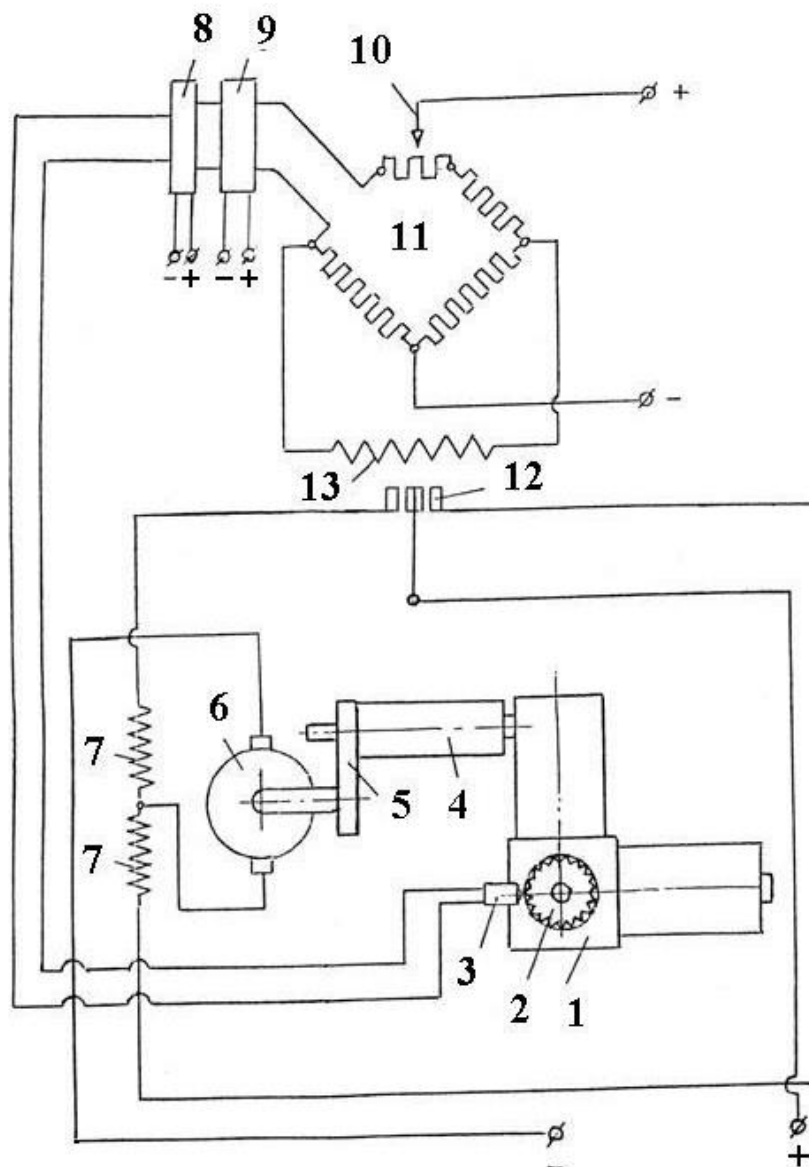


Рис. 2.3. Принципиальная схема контура САРЧ:

1 – ДС УДС-1; 2 – зубчатое колесо; 3 – индуктивный датчик частоты вращения; 4 – цилиндр с изменяемым дополнительным “мертвым” объемом; 5 – шестеренчатый редуктор с винтовой передачей к штоку поршня в цилиндре с дополнительным “мертвым” объемом; 6 – реверсивный электродвигатель постоянного тока; 7 – обмотки возбуждения реверсивного электродвигателя; 8 – электронный усилитель напряжения, создаваемого в датчике частоты вращения; 9 – формирователь пропорционального и дифференциального сигналов управления; 10 – задатчик регулируемой частоты вращения; 11 – электрический измерительный мост; 12 – контакты трехпозиционного реле; 13 – управляющая обмотка реле.

вращения отклоняется от заданной в сторону уменьшения или увеличения замыкаются левый или правый контакты 12 реле и электродвигатель 6 начинает вращаться в соответствующую сторону. При этом поршень в цилиндре 4 перемещается в сторону уменьшения или увеличения “мертвого” объема и мощность двигателя изменяется.

Как видно из изложенного, и в этом регуляторе реле совместно с мостом 11 и электродвигателем 6 выполняет роль блока сравнения текущего значения регулируемого параметра (частоты вращения) с заданным и усилителем сигнала рассогласования.

2.3. Функциональная схема двухмерной системы автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга

Функциональная схема разработанной САР Стирлинг – электрического агрегата показана на рис.2.4. На ней обозначено:

ДС – двигатель Стирлинга как объект регулирования температуры нагревателя и частоты вращения коленчатого вала двигателя;

ЭГ – электрический генератор, создающий нагрузку на ДС;

ЗНГ – задатчик нагрузки, создаваемой электрическим генератором;

Св – кинематическая связь между коленчатым валом ДС и валом электрогенератора (ременная передача);

n , n_r – частоты вращения коленчатого вала ДС и вала ротора электрогенератора;

$M_{нт}$ – момент нагрузки;

$h_{нт}$ – координата органа задания нагрузки.

На схеме показаны два не связанных контура регулирования: САРТ и САРЧ.

В контур САРТ входят следующие звенья:

ДТ – датчик температуры T_n стенки нагревателя;

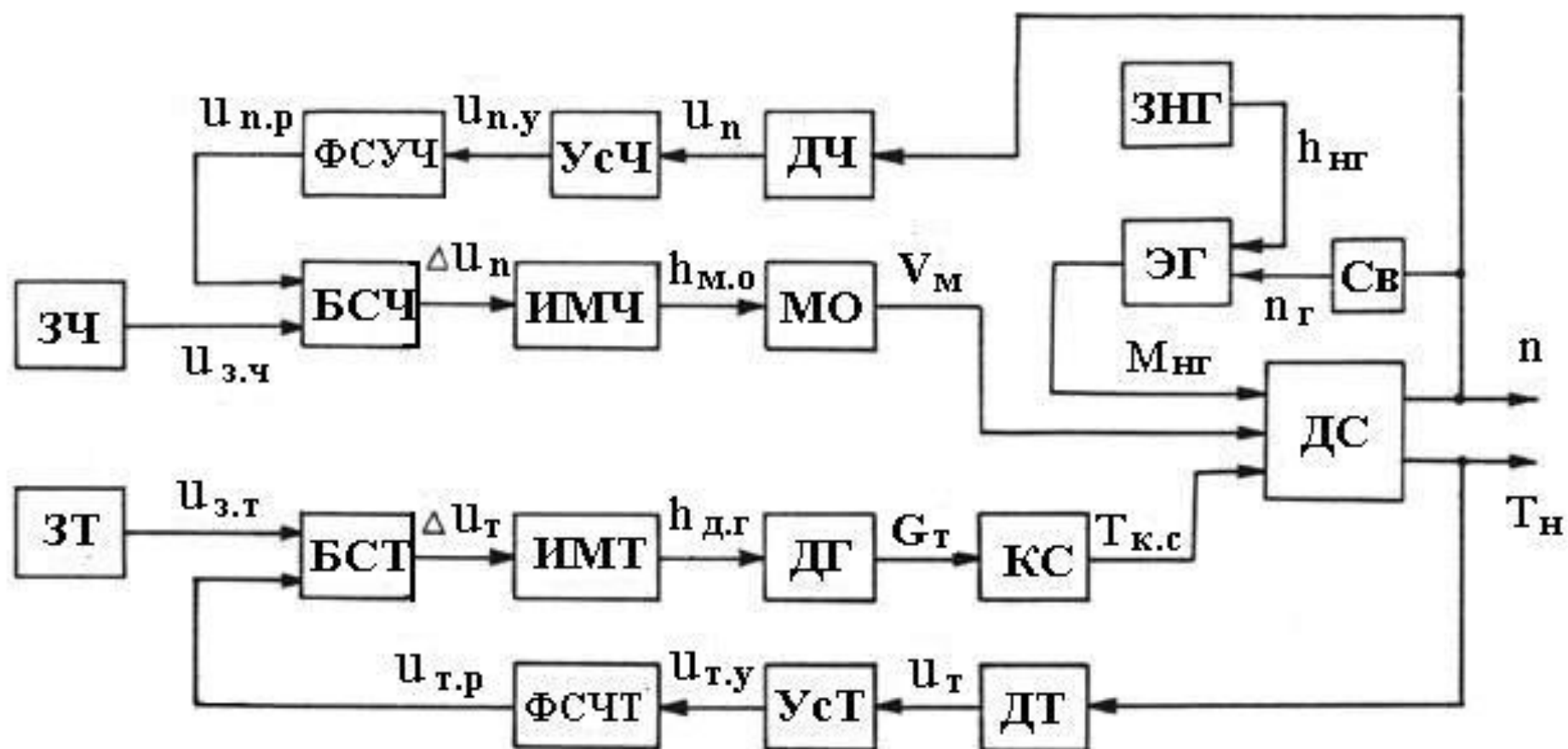


Рис.2.4. Функциональная схема двухмерной САР ДС мод. УДС-1

УсТ – усилитель напряжения тока, создаваемого в датчике температуры;
 ФСУТ – формирователь пропорционального и дифференциального сигналов регулирования температуры нагревателя;

ЗТ – задатчик температуры T_n ;

БСТ – блок сравнения текущих значений температуры T_n с заданным значением;

ИМТ – исполнительный механизм, выполняющий функции усилителя сигнала рассогласования и интегрирующего звена в контуре САРТ;

ДГ – дозатор горючего газа;

КС – камера сгорания;

u_T – напряжение, создаваемое в датчике температуры T_n ;

$u_{T,y}$ – усиленное напряжение датчика температуры T_n ;

$u_{T,p}$ – регулирующее напряжение по температуре T_n ;

$u_{z,T}$ – напряжение задатчика температуры;

Δu_T – напряжение сигнала рассогласования;

$h_{д.г}$ – осевая координата конического затвора дозатора горючего газа;

G_T – часовой расход горючего газа;

$T_{к.с.}$ – температура продуктов сгорания возле стенки нагревателя.

Регулируемый параметр – температура T_n .

Регулирующий параметр – напряжение $u_{z,T}$ задатчика регулируемой температуры T_n .

Возмущающее воздействие – изменение момента нагрузки $M_{нг}$ электрогенератора, передаваемое на коленчатый вал ДС.

В контур САРЧ входят:

ДЧ – датчик частоты вращения;

УсЧ – усилитель напряжения, создаваемого в индуктивном датчике частоты вращения;

ФСУЧ – формирователь пропорционального и дифференциального сигналов управления частотой вращения;

БСЧ – блок сравнения текущих значений частоты вращения с заданным значением;

ИМЧ – исполнительный механизм в контуре САРЧ, выполняющий функции усилителя сигнала рассогласования и интегрирующего звена;

МО – дополнительный “мертвый” объем;

u_n – напряжение, создаваемое в датчике частоты вращения;

$u_{п.у}$ – усиленное напряжение датчика частоты вращения;

$u_{п.р}$ – регулирующее напряжение по частоте вращения;

$u_{з.ч}$ – напряжение задатчика частоты вращения;

Δu_n – напряжение сигнала рассогласования;

$h_{м.о}$ – осевая координата поршня дополнительного “мертвого” объема;

VM – текущая величина дополнительного “мертвого” объема.

Регулируемый параметр – частота вращения коленчатого вала n .

Регулирующий параметр – напряжение $u_{з.ч}$ задатчика регулируемой частоты вращения.

Возмущающее воздействие – изменения момента нагрузки $M_{нг}$ электромотора.

В табл. 2.1 приведен перечень звеньев и связей САР и даны обозначения входных и выходных параметров.

Таблица 2.1

**Перечень звеньев и связей двухмерной САР ДС модели УДС-1
и обозначения входных и выходных параметров**

Звено или связь	П а р а м е т р ы	
	входные	выходные
Двигатель Стирлинга (ДС)	Температура продуктов сгорания возле стенки нагревателя, $T_{к.с}$ Величина дополнительного “мертвого” объема, V_m Момент нагрузки, $M_{нг}$	Температура стенки нагревателя, T_n Частота вращения коленчатого вала, n
Электрический генератор (ЭГ)	Координата управляющего органа задатчика нагрузки, $h_{нг}$ Частота вращения генератора, n_g	Моменты нагрузки, $M_{нг}$

Продолжение таблицы 2.1

Звено или связь	П а р а м е т р ы	
	входные	выходные
Связь между ДС и ЭГ	Частота вращения коленчатого вала ДС, n	Частота вращения вала ЭГ, n_{Γ}
<i>Контур САРТ</i>		
Датчик температуры (ДТ)	Температура стенки нагревателя, T_n	Напряжение тока, u_T
Усилитель напряжения, (УсТ)	Напряжение тока, u_T	Усиление напряжения тока, $u_{T,y}$
Формирователь сигналов управления температурой (ФСУТ)	Усиление напряжения тока, $u_{T,y}$	Напряжение регулирования температуры стенки нагревателя, $u_{T,p}$
Блок сравнения температур (БСТ)	Напряжение регулирования температуры стенки нагревателя, $u_{T,y}$ Напряжение задатчика температуры, $u_{z,T}$	Рассогласование температур, Δu_T
Исполнительный механизм в контуре САРТ (ИМТ)	Рассогласование температур, Δu_T	Координата затвора дозатора горючего газа, $h_{д,г}$
Камера сгорания (КС)	Часовой расхода газового топлива, G_T	Температура продуктов сгорания возле стенки нагревателя, $T_{к,с}$
<i>Контур САРЧ</i>		
Датчик частоты вращения (ДЧ)	Частота вращения коленчатого вала ДС, n	Напряжение тока, u_n
Усилитель напряжения, (УсЧ)	Напряжение тока, u_n	Усиление напряжения тока, $u_{n,y}$
Формирователь сигналов управления частотой вращения (ФСУЧ)	Усиление напряжения тока, $u_{n,y}$	Напряжение регулирования частоты вращения коленчатого вала ДС, $u_{n,p}$
Блок сравнения частоты вращения (БСЧ)	Напряжение регулирования частоты вращения, $u_{n,p}$ Напряжение задатчика частоты, $u_{z,n}$	Рассогласование частоты вращения коленчатого вала ДС, Δu_n

	ты вращения, $u_{з.ч}$	
--	------------------------	--

Продолжение таблицы 2.1

Звено или связь	П а р а м е т р ы	
	входные	выходные
Исполнительный механизм в контуре САРЧ (ИМЧ)	Рассогласование частот вращения, Δu_n	Координата поршня дополнительного “мертвого” объема, $h_{м.о}$
Дополнительный “мертвый” объем (МО)	Координата поршня дополнительного “мертвого” объема, $h_{м.о}$	Текущая величина дополнительного “мертвого” объема, V_m

2.4. Конструкции звеньев экспериментальной двухмерной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга небольшой мощности

Звенья двухмерной САР маломощного ДС состоит из электронных и механических устройств. При разработке электронных систем управления и регулирования широко применяется использование готовых, выпускаемых промышленностью электронных устройств и отдельных элементов и узлов.

Показателен пример канадской фирмы AFS Интернейшинэл Инкорпорейтэд (AFS – системы питания для альтернативных топлив) [49]. Фирма разрабатывает электронные системы питания и регулирования для газодизелей, но сама элементы этих систем не изготавливает, а использует готовые узлы, которые выпускают и продают другие фирмы: микропроцессоры, быстродействующие электромагнитные клапаны и др.

В разработанной экспериментальной САР ДС большой мощности использованы следующие выпускаемые промышленностью стран СНГ электронные и электрические приборы:

- Измеритель – регулятор микропроцессорный программируемый типа ТРМ12-РiС, предназначенный для измерения входного параметра и импульсного управления электроприводом запорно-регулирующих и трехходо-

вых клапанов по пропорционально – интегрально - дифференциальному (ПИД) закону.

- Универсальный программируемый восьмиразрядный счетчик импульсов СИ-8, предназначенный для подсчета: поступающих на его входы импульсов как в прямом, так и в обратном направлениях и перевода их в физическую величину путем умножения на заданный множитель; частоты и длительности подаваемых на его входы импульсов; среднего и суммарного расходов (совместно с импульсным или частотными датчиками).

- Реверсивный электродвигатель постоянного тока с шестеренным редуктором с шестернями внутреннего зацепления.

- Реверсивный электродвигатель постоянного тока с планетарным шестеренным редуктором.

- Индуктивный датчик частоты вращения.

Специально спроектированы и изготовлены следующие механические устройства:

- Дополнительный “мертвый” объем в виде цилиндра с поршнем.
- Дозатор горючего газа (топлива) с коническим затвором.

Выводы по второму разделу

1. Для отработки параметров системы автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга в качестве регулируемого объекта можно использовать действующую модель такого двигателя, в частности, ДС мод. УДС-1.

2. Для упрощения системы автоматического регулирования маломощного ДС, предназначенного для использования в качестве приводного двигателя в мини Стирлинг – электрических агрегатах, целесообразно применить в нем подачу воздуха в камеру сгорания за счет естественной тяги и эжекции. В

этом случае отпадает необходимость в дутьевом вентиляторе и автоматическом регулировании подачи воздуха.

3. Маломощный ДС нужно оборудовать двухмерной САР, в которой должны быть два контура автоматического регулирования: температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала двигателя.

4. Для перемещения поршня в цилиндре дополнительного “мертвого” объема и затвора дозатора горючего газа в экспериментальной САР маломощного ДС можно использовать реверсивные электродвигатели постоянного тока, управляемые релейными регуляторами.

РАЗДЕЛ 3
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ДВУХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА
НЕБОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ МИНИ СТИРЛИНГ –
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АГРЕГАТА

3.1. Выбор вида математической модели

Математические модели САУ и САР предназначаются для расчетно - теоретических исследований статических и динамических свойств систем автоматического управления и регулирования. Математическая модель теплового двигателя представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений, неравенств и ограничений и является динамической моделью. Входящими в эту систему уравнениями описываются характеристики звеньев и связей САУ или САР. В числе этих звеньев и связей имеются линейные и нелинейные, причем как несущественно, так и существенно нелинейные. Динамические характеристики САУ и САР рассчитываются путем интегрирования этой системы уравнений.

До появления электронной вычислительной техники интегрирование таких систем уравнений было трудновыполнимой, а при большом числе уравнений и вообще невыполнимой задачей. Поэтому были разработаны методы решений, основанные на линеаризации уравнений звеньев и линейная теория автоматического управления и регулирования, которая применялась и для исследования тепловых двигателей. Существенный ее недостаток – большая неточность применительно к тепловым двигателям, работающим в широких диапазонах изменения частот вращения коленчатого вала и нагрузки.

Применение ЭВМ позволяет непосредственно интегрировать системы дифференциальных уравнений численными методами, т.е. исследовать САУ и САР в первоначальном существенно нелинейном виде.

Важными достоинствами таких моделей являются [50]:

- возможность учета всех существенных и несущественных нелинейностей;
- охват практически всей области скоростных и нагрузочных режимов работы теплового двигателя.

В правые части дифференциальных уравнений, которыми описывается движение инерционных звеньев, входят уравнения статических характеристик звеньев, которые в большинстве случаев нелинейные. При составлении математических моделей используются опытные характеристики таких звеньев, которые аппроксимируются (описываются) соответствующими алгебраическими уравнениями, чаще всего полиномами первой, второй и третьей степени с одним или несколькими аргументами [51]. При этом предполагается, что статические характеристики звеньев, снятые на установившихся режимах работы, остаются справедливыми и для переходных процессов. Накоплен достаточно большой опыт, подтверждающий допустимость такого предположения. Этот метод называется квазистатистическим.

Квазистатистический метод использован и для составления математической модели САР ДС мод. УДС-1. При этом использовалась методика, описанная в трудах проф. В.И. Крутова [52, 53] и учтен многолетний опыт составления и применения таких моделей на кафедре “Двигатели и теплотехника” НТУ под руководством проф. К.Е. Долганова [50, 54-59].

3.2. Уравнения звеньев математической модели двухмерной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1

При составлении уравнений звеньев САР ДС модели УДС-1 приняты следующие допущения:

- в звеньях САР нет сухого трения, так как они хорошо смазываются и во время работы ДС совершают небольшое осциллирующее движение;
- пробуксовка ременной передачи от двигателя к электрогенератору принимается равной нулю;
- все функциональные элементы САР имеют сосредоточенные параметры.

Часть уравнений, входящих в математическую модель, составлена аналитическим методом, а часть получена путем аппроксимации опытных характеристик звеньев методами математического планирования экспериментов, описанными в специальной литературе [60, 61].

Двигатель Стирлинга и электрогенератор. Коленчатый вал ДС соединен с валом электрогенератора ременной передачей. Пробуксовку ремня не учитываем и момент нагрузки (сопротивления) M_{Γ} электрогенератора рассматриваем в функции частоты вращения коленчатого вала ДС. Момент инерции вращающихся масс электрогенератора относим к моменту инерции I_d двигателя. Поэтому для ДС и электрогенератора составляем общее уравнение динамического равновесия.

На установившихся режимах работы имеет место равенство моментов

$$M_i = M_m + M_{p.n} + M_{\Gamma}, \quad (3.1)$$

где M_i – индикаторный крутящий момент ДС;

M_m – момент условных механических потерь в ДС;

$M_{p.n}$ – часть индикаторного крутящего момента, расходуемая в ременной передаче;

M_{Γ} – момент нагрузки (сопротивления), создаваемый электрогенератором.

В ДС с изменяемым “мертвый” объемом индикаторный крутящий момент M_i является функцией температуры $T_{гор}$ в горячей полости нагревателя, частоты вращения n коленчатого вала и величины дополнительного “мертвого” объема V_m . Предварительные эксперименты показали, что эта функция может быть аппроксимирована полиномом вида

$$M_i = a_1 + a_2 \cdot T_{гор} + a_3 \cdot n + a_4 \cdot V_m + a_5 \cdot T_{гор}^2 + a_6 \cdot n^2 + a_7 \cdot V_m^2 + a_8 \cdot T_{гор} \cdot n + a_9 \cdot T_{гор} \cdot V_m + a_{10} \cdot n \cdot V_m, \quad (3.2)$$

где $a_1, \dots, a_{10}$ – коэффициенты аппроксимации.

В момент условных механических потерь M_m входят потери на трение в ДС и генераторе, гидравлические потери при перемещении рабочего тела в ДС, расход энергии на привод вспомогательных механизмов. Рассчитать эти потери сложно, поэтому их определяют экспериментальным путем. В ДС характеристику момента M_m можно выразить как функцию частоты вращения и аппроксимировать полиномом вида

$$M_m = a_{m1} + a_{m2} \cdot n + a_{m3} \cdot n^2, \quad (3.3)$$

где a_{m1}, a_{m2}, a_{m3} – коэффициенты аппроксимации.

Предварительные опыты показали, что расход энергии в ременной передаче можно выразить уравнением вида

$$M_{p.n} = a_{p.n1} + a_{p.n2} \cdot n^x, \quad (3.4)$$

где $a_{p.n1}, a_{p.n2}$ – коэффициенты аппроксимации;

x – показатель степени.

Опыты также показали, что момент M_r , создаваемый электрогенератором, хорошо аппроксимируется полиномом вида

$$M_r = a_{r1} + a_{r2} \cdot n + a_{r3} \cdot R + a_{r4} \cdot n^2 + a_{r5} \cdot R^2 + a_{r6} \cdot n \cdot R, \quad (3.5)$$

где $a_{r1}, \dots, a_{r6}$ – коэффициент аппроксимации;

Эксперименты (см. разд. 5) показали, что ДС мод. УДС-1 с присоединенным к нему электрогенератором является инерционным апериодическим звеном второго порядка. Поэтому движение ДС описано дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$I_{DD} \frac{d^2 n}{dt^2} + I_D \frac{dn}{dt} = \frac{30}{\pi} (M_i - M_m - M_{p.n} - M_c), \quad (3.6)$$

где I_D и I_{DD} – постоянные коэффициенты, определяемые по опытным кривым переходных процессов двигателя в агрегате с электрогенератором.

Нагреватель и охладитель. В состав регулируемого объема в ДС модели УДС-1 входят нагреватель и охладитель, совмещенные с дополнительным цилиндром, в котором перемещается вытеснитель и который с одного конца нагревается, а с другого охлаждается.

Дополнительный цилиндр, пользуясь терминологией из теории автоматического регулирования, можно рассматривать как тепловую емкость, в которую извне поступает тепловой поток [62, 63, 64, 65]. Этот тепловой поток частично преобразуется в механическую работу, совершаемую газом в рабочем цилиндре, и частично отводится в охлаждаемую часть дополнительного цилиндра и далее в систему охлаждения двигателя.

На установившемся режиме эти тепловые потоки взаимно уравновешиваются и уравнение теплового баланса нагревателя имеет вид

$$Q_{под} = Q_i + Q_{отв}, \quad (3.7)$$

где $Q_{под}$ – подводимый тепловой поток;

Q_i – тепловой поток, преобразуемый в индикаторную мощность;

$Q_{отв}$ – тепловой поток, отводимый в охладитель.

Теплоту, поглощаемую и отдаваемую телом вытеснителя в каждом цикле не учитываем, так как она незначительная и поэтому ее принципиального значения для работы САР не имеет.

В случае нарушения этого равновесия появляется избыток или недостаток теплового потока ΔQ_n , который вызывает изменение температуры рабочего тела в нагревателе

$$\Delta Q_n = Q_{nod} - Q_i - Q_{omv} . \quad (3.8)$$

На основании известных законов теплопередачи для элементарного отрезка времени можно записать

$$dQ_{nod} = k_1 \cdot F_1 \cdot (T_{к.с} - T_{гор}) \cdot dt , \quad (3.9)$$

где k_1 – коэффициент теплопередачи через стенки нагревателя от продуктов сгорания, омывающих нагреватель снаружи, к рабочему телу внутри нагревателя;

F_1 – площадь наружной поверхности стенки нагревателя;

$T_{гор}$ – средняя за цикл температура рабочего тела в нагревателе;

t – время.

Нагреватель имеет цилиндрическую форму. Для цилиндрической стенки коэффициент теплопередачи выражается уравнением [66]

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{нар}}} , \quad (3.10)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно наружной и внутренней поверхности стенки нагревателя;

$d_{нар}$, $d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры стенки нагревателя;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки нагревателя.

Аналогично для отводимого потока теплоты

$$dQ_{omv} = k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{гор} - T_{хол}) \cdot dt , \quad (3.11)$$

где k_2 – коэффициент теплопередачи от горячего к холодному рабочему телу;

$T_{хол}$ – температура рабочего тела в холодной части дополнительного цилиндра;

F_2 – условная площадь поверхности, через которую осуществляется теплопередача.

Для мощности,

$$dQ_i = dN_i, \quad (3.12)$$

где N_i – индикаторная мощность двигателя.

Элементарное изменение теплового потока в нагревателе

$$dQ_n = c_{pm} \cdot M_{p.T} \cdot dT_{zop}, \quad (3.13)$$

где c_{pm} – удельная изобарная теплоемкость рабочего тела;

$M_{p.T}$ – масса рабочего тела в нагревателе.

Поставив уравнения (3.9) ... (3.13) в уравнение (3.8), получаем

$$c_{pm} \cdot M_{p.T} \cdot dT_{zop} = k_1 \cdot F_1 \cdot (T_{\kappa.c} - T_{zop}) \cdot dt - N_i \cdot dt - k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{zop} - T_{хол}) \cdot dt, \quad (3.14)$$

или

$$\frac{dT_{zop}}{dt} = \frac{1}{c_{pm} \cdot M_{p.T}} \cdot [k_1 \cdot F_1 \cdot (T_{\kappa.c} - T_{zop}) - N_i - k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{zop} - T_{хол})]. \quad (3.15)$$

Температуру стенки нагревателя вычисляем по методике, приведенной в работе [67].

Удельный тепловой поток q_t через стенку нагревателя

$$q_m = k_1 \cdot (T_{\kappa.c} - T_{zop}) \quad (3.16)$$

Температура T_n наружной поверхности стенки нагревателя

$$T_n = T_{\kappa.c} - \frac{q_m}{\alpha_1}, \quad (3.17)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке нагревателя.

Из внутренней полости охладителя теплота отводится в систему охлаждения.

Уравнение теплового баланса охладителя на установившемся режиме работы имеет вид

$$Q_{отв} = Q_{охл}, \quad (3.18)$$

где $Q_{охл}$ – тепловой поток, отводимый в систему охлаждения.

При нарушении равновесия тепловых потоков появляется избыток или недостаток теплового потока $\Delta Q_{хол}$

$$\Delta Q_{хол} = Q_{отв} - Q_{охл}. \quad (3.19)$$

Для элементарного отрезка времени

$$dQ_{охл} = k_3 \cdot F_3 \cdot (T_{хол} - T_{охл}) \cdot dt, \quad (3.20)$$

где k_3 – коэффициент теплопередачи через стенку охладителя от рабочего тела в охладитель к жидкости в системе охладителя;

F_3 – площадь наружной поверхности стенки охладителя;

$T_{охл}$ – средняя за цикл температура жидкости в системе охлаждения.

Коэффициент теплопередачи определяется по уравнению (3.10).

Элементарное изменение теплового потока в охладителе

$$dQ_{хол} = c_{pm} \cdot M_{P.T.хол} \cdot dT_{хол}, \quad (3.21)$$

где $M_{P.T.хол}$ – масса рабочего тела в охладителе.

Подставив уравнения (3.14), (3.20) и (3.21) в уравнение (3.19) получаем после преобразований дифференциальное уравнение охладителя

$$\frac{dT_{хол}}{dt} = \frac{1}{c_{pm} \cdot M_{P.T.хол}} \cdot [k_2 \cdot F_2 \cdot (T_{гор} - T_{хол}) - k_3 \cdot F_3 \cdot (T_{хол} - T_{охл})]. \quad (3.22)$$

Датчик температуры наружной стенки нагревателя. Используется хромельальюмеливая термопара имеющая практически линейную характеристику [59], которую можно выразить уравнением

$$u_T = k_T \cdot T_n, \quad (3.23)$$

где k_T – размерный коэффициент.

Усилитель напряжения датчика температуры T_n электронный, имеет линейную характеристику

$$u_{T.y} = k_{T.y} \cdot u_T, \quad (3.24)$$

где $k_{T.y}$ – безразмерный коэффициент усиления.

Формирователь сигналов управления в контуре САРТ. Формируются пропорциональный и дифференциальный сигналы управления по ПД закону по уравнению

$$u_{T.P} = k_{T.П} \cdot u_{T.y} + k_{T.Д} \cdot \frac{du_{T.y}}{dt}, \quad (3.25)$$

где $k_{T.П}$, $k_{T.Д}$ – коэффициенты усиления пропорционального и дифференциального сигналов управления.

Блок сравнения температуры стенки нагревателя

$$\Delta u_T = u_{T.P} - u_{з.Т}, \quad (3.26)$$

где $u_{T.P}$ – регулирующее напряжение по температуре T_n ;

$u_{з.Т}$ – напряжение задатчика температуры T_n .

Исполнительный механизм в контуре САРТ представляет собой реверсивный электродвигатель постоянного тока. Он является релейным звеном, работа которого описывается уравнениями

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = k_{ИМТ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{если } \Delta u_T < -\varepsilon_T \quad (3.27)$$

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = -k_{ИМТ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{если } \Delta u_T > -\varepsilon_T \quad (3.28)$$

$$\frac{dh_{Д.Г}}{dt} = 0 \quad \text{если } -\varepsilon_T < \Delta u_T < \varepsilon_T \quad (3.29)$$

где ε_T – допустимое отклонение температуры T_n от заданного значения;

$k_{ИМТ}$ – коэффициент усиления интегрирующего звена в контуре САРТ;

$u_{ПИТ}$ – напряжение источника питания.

Дозатор газа с коническим затвором на рабочем участке имеет линейную характеристику

$$G_T = k_{Д.Г} \cdot h_{Д.Г}, \quad (3.30)$$

где $k_{Д.Г}$ – коэффициент усиления дозатора горючего газа;

$h_{Д.Г}$ – осевая координата затвора дозатора горючего газа.

Камера сгорания. В этом звене рассматривается температура продуктов сгорания топлива в камере сгорания поступивших к наружной стенке нагревателя. По данным опытов она линейно зависит от часового расхода G_T газового топлива и может быть аппроксимирована зависимостью

$$T_{K.C} = A_{П.З} + B_{П.З} \cdot G_T, \quad (3.31)$$

где $A_{П.З}$, $B_{П.З}$ – размерные коэффициенты аппроксимации.

Датчик частоты вращения. В нем создается импульсный электрический ток, который преобразуется в напряжение u_n , пропорциональное частоте вращения n вала двигателя. Можно принять, что эта зависимость линейная и выразить ее уравнением

$$u_n = k_n \cdot n, \quad (3.32)$$

где k_n – размерный коэффициент.

Усилитель напряжения датчика частоты вращения

$$u_{n.y} = k_{n.y} \cdot u_n, \quad (3.33)$$

где $u_{n.y}$ – усиленное напряжение датчика частоты вращения;

$k_{n.y}$ – безразмерный коэффициент усиления.

Формирователь сигналов управления. В нем формируются пропорциональный и дифференциальный сигналы управления по ПД закону. Этот закон выражается уравнением

$$u_{n.p} = k_{n.n} \cdot u_{n.y} + k_{n.d} \cdot \frac{du_{n.y}}{dt}, \quad (3.34)$$

где $k_{n.n}$, $k_{n.d}$ – коэффициенты усиления по пропорциональному и дифференциальному сигналам управления.

Блок сравнения частоты вращения

$$\Delta u_n = u_{n.p} - u_{з.ч}, \quad (3.35)$$

где $u_{n.p}$ – регулирующее напряжение по частоте вращения;

$u_{з.ч}$ – напряжение задатчика частоты вращения.

Исполнительный механизм в контуре САРЧ в виде реверсивного электродвигателя постоянного тока является релейным звеном.

Он описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dh_{м.о}}{dt} = k_{ИМЧ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{если } \Delta u_n < -\varepsilon_n, \quad (3.36)$$

$$\frac{dh_{м.о}}{dt} = -k_{ИМЧ} \cdot u_{ПИТ} \quad \text{если } \Delta u_n > \varepsilon_n, \quad (3.37)$$

$$\frac{dh_{м.о}}{dt} = 0 \quad \text{если } -\varepsilon_n < \Delta u_n < \varepsilon_n, \quad (3.38)$$

где ε_n - допустимое отклонение частоты вращения n от заданного значения;

$k_{ИМЧ}$ – коэффициент усиления интегрирующего звена в контуре САРЧ.

Дополнительный “мертвый” объем зависит от положения поршня в цилиндре дополнительного “мертвого” объема.

Описывается уравнением

$$V_m = k_{м.о} \cdot h_{м.о}, \quad (3.39)$$

где $k_{м.о}$ – размерный коэффициент.

Кроме приведенных выше уравнений, в математическую модель введены следующие зависимости, характеризующие параметры рабочего ДС:

Эффективный крутящий момент,

$$M_e = M_i - M_m - M_{р.п}. \quad (3.40)$$

Эффективная мощность

$$N_e = M_e \cdot \pi \cdot n / 30, \text{ Вт} \quad (3.41)$$

Система уравнений (3.2)... (3.6), (3.9) ... (3.41) является замкнутой и представляет собой математическую модель двухмерной САР ДС модели УДС-1 в составе Стирлинг – электрического агрегата.

3.3. Алгоритм и программа для расчета на персональной электронно-вычислительной машине переходных процессов и статических характеристик разработанной системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга

Для определения переходных процессов в САР ДС необходимо интегрировать систему дифференциальных уравнений, входящих в ее математическую модель. В разработанной САР содержатся пять обыкновенных дифференциальных уравнений: одно второго порядка (уравнение движения ДС) и четыре первого порядка (уравнения теплопереноса в нагревателе и охладителе и уравнения движения поршня дополнительного “мертвого” объема и затвора дозатора газового топлива). Для интегрирования использован численный метод Рунге-Кутты-Фельдберга [68].

Алгоритм и программа разработаны для расчета переходных процессов, вызванных изменением координаты $h_{з.нг}(t)$ задатчика нагрузки или координаты $u_{з.ч}(t)$ задатчика частоты вращения или координаты $u_{з.т}(t)$ задатчика температуры стенки нагревателя. Все эти задающие воздействия могут изменяться по отдельности или одновременно.

Начальные условия перед возбуждением переходного процесса:

t_0 – момент времени, от которого начинает изменяться параметр, возбуждающий переходной процесс (координаты $h_{з.нг}$, $u_{з.ч}$ или $u_{з.т}$);

n_0 , $T_{гор.о}$, $T_{хол.о}$, $h_{м.о.о}$, $h_{д.г.о}$ – значения частоты вращения, температуры рабочего тела в нагревателе, температуры в охладителе, координаты поршня в дополнительном “мертвом” объеме и координаты затвора дозатора газа на установленном режиме, предшествующие началу переходного процесса.

Программа расчета переходных процессов составлена на языке программирования Фортран. Она состоит из главной программы (головного модуля), модулей подпрограмм RKF45, RKFS и FEHL для численного интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты

Фельдберга и модуля – подпрограммы UDS (T, Y, YP), в которой вычисляются правые части дифференциальных уравнений.

Подпрограммы RKF45, RKFS и FEHL вместе представляют стандартную подпрограмму, описанную в работе [68] и дальше эти три модуля будем называть подпрограммой RKF45.

В подпрограмме интегрирования дифференциальных уравнений интегрируемые величины и производные от них обозначаются буквами Y и YP. В связи с этим приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} n &= Y(1); & dn/dt &= YP(1); \\ T_{\text{гор}} &= Y(2); & dT_{\text{гор}}/dt &= YP(2); \\ T_{\text{хол}} &= Y(3); & dT_{\text{хол}}/dt &= YP(3); \\ h_{\text{м.о}} &= Y(4); & dh_{\text{м.о}}/dt &= YP(4); \\ h_{\text{д.г}} &= Y(5); & dh_{\text{д.г}}/dt &= YP(5). \end{aligned}$$

В разработанной программе расчета переходных процессов в САП ДС использованы стандартные подпрограммы RKF45, рассматривать которые подробно нет необходимости.

Детально рассмотрим только главную программу и подпрограмму UDS (T, Y, YP).

3.4. Главная программа (головной модуль)

Блок-схема алгоритма расчетов в главной программе (головном модуле) показана на рис.3.1.

В блоке 1 объявляется оператор EXTERNAL UDS, который показывает, что наименование подпрограммы UDS будет указываться как фактический параметр при обращении к подпрограмме RKF45 [69], а также задается размерность массива производных DIMENSION YP(5) (число производных в программе) и размерности массивов DIMENSION Y (NEQN), WORK (3+6

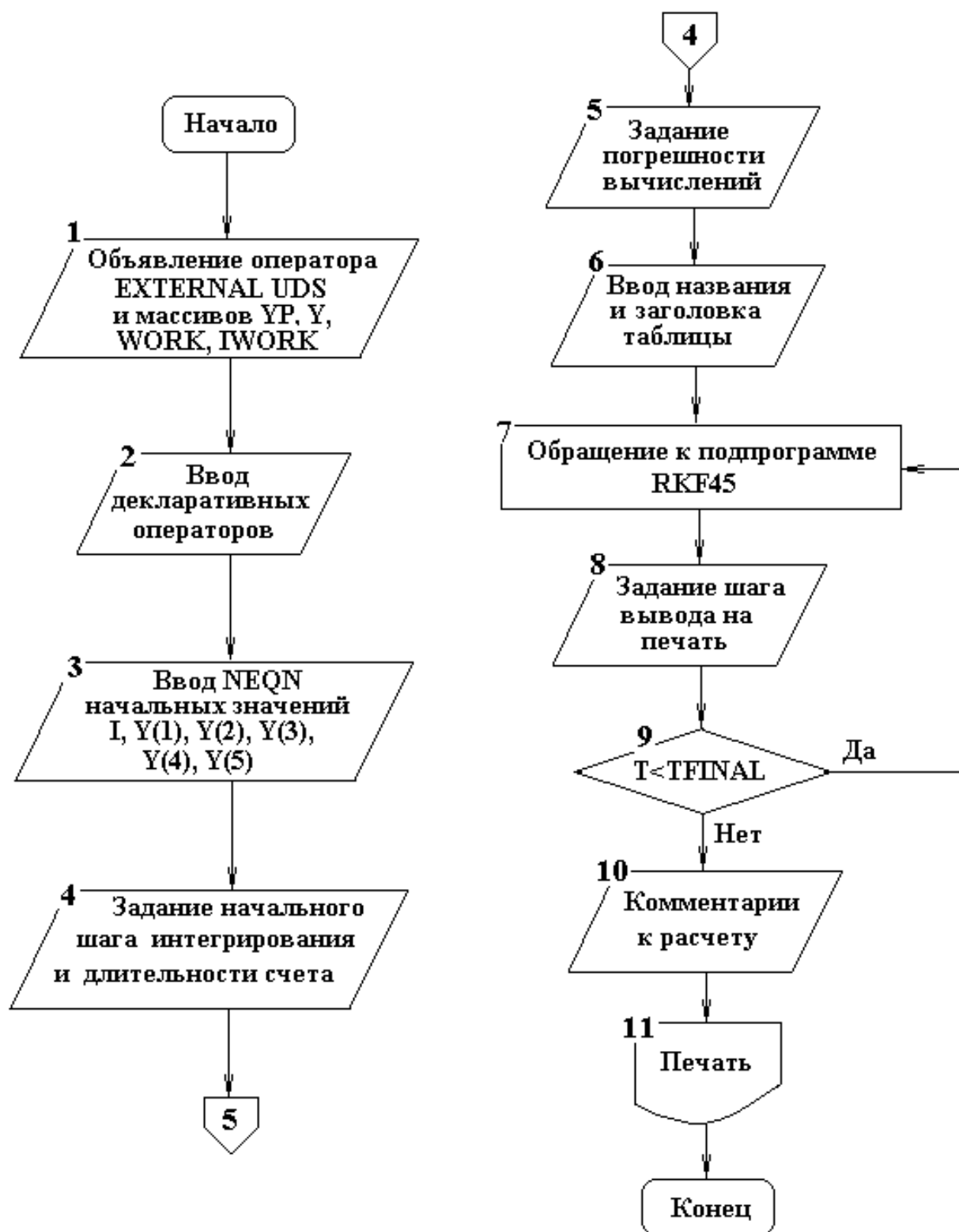


Рис. 3.1. Блок – схема главной программы (головного модуля)

NEQN), IWORK (5), фигурирующие в списке вызова в обращении к подпрограмме RKF45.

В блоке 2 вводятся декларативные операторы описания типа константа и переменных (REAL) и операторы общих блоков памяти (COMMON).

В блоке 3 указывается число интегрируемых дифференциальных уравнений NEQN=5, вводятся начальные значения (векторы начальных условий) Y(1), Y(2), Y(3), Y(4), Y(5), полученные предварительно путем расчета установившихся режимов перед началом переходного процесса, и начальное время T.

В блоке 4 задаются: начальный шаг интегрирования TPRINT и длительность расчета TFINAL. Затем шаг интегрирования в подпрограмме RKF45 автоматически уменьшается до получения заданной погрешности результата.

В блоке 5 задаются границы относительной RELERR и абсолютной ABSERR локальных погрешностей. Эти границы должны быть неотрицательны, относительная погрешность должна быть переменной, а абсолютная может быть переменной или константой.

В блок 6 вводятся операторы PRINT и FORMAT, указывающие в каком виде выводятся на печать результаты расчета: название таблицы, содержание ее головки, расположения чисел в таблице, количество знаков в них.

В блоке 7 осуществляется обращение к подпрограмме RKF45. Подпрограмма RKF45 интегрирует систему из NEQN=5 обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

В блоке 8 задается шаг вывода результатов расчета на печать. Этот шаг может быть равен начальному шагу интегрирования TPRINT или может быть больше его, чтобы при малых значениях шага таблица не была слишком длинной.

В блоке 9 сравнивается текущее значение времени с заданной длительностью TFINAL счета и дается команда или на продолжение счета, или на его остановку.

В блоке 10 содержатся комментарии к ходу расчета, которые выводятся на печать: “Увеличена относительная ошибка”; “Интегрирование не закончено, много шагов”; “Ошибка в вызове RF45” и др.

В блоке 11 дается команда на вывод результатов расчета на печать.

3.5. Подпрограмма UDS (T, Y, YP)

Блок-схема алгоритма расчетов в подпрограмме UDS (T, Y, YP) с пояснениями к ней приведены в приложении А.

3.6. Программа расчетов переходных процессов на персональной электронно вычислительной машине

По приведенным выше алгоритмам расчетов в головном модуле и в подпрограмме UDS (T, Y, YP) составлена программа расчетов переходных процессов в САР ДС на ЭВМ. В нее входит также подпрограмма RKF45.

В приложении Б приведена распечатка программы, в приложении В – список идентификаторов с числовыми значениями параметров, а в приложении Г – фрагмент расчета.

3.7. Расчет статических характеристик системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1

Для расчета статических характеристик (скоростных и др.) собственно ДС без регуляторов температуры и частоты вращения в двухмерной САР этого ДС используется та же динамическая математическая модель САР, которая разработана для расчета переходных процессов в ней. Например, для расчета скоростной характеристики САР ДС нужно задать постоянные значения $u_{з,т}$ и $u_{з,и}$ датчиков температуры $T_{гор}$ и частоты вращения n и дискретно изменять

значения задатчика нагрузки $h_{з.нг}$. При каждом значении $h_{з.нг}$ делать выдержку до выхода САР на равновесный режим и регистрировать значения интересующих рабочих параметров САР. По полученным точкам построить скоростную характеристику.

Аналогично можно рассчитать другие статические характеристики (нагрузочную, регулировочные).

3.8. Оценка устойчивости системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга модели УДС-1

Наиболее достоверную оценку устойчивости САР можно дать по виду переходных процессов в ней. Однако при расчетно–теоретических исследованиях сложных САР расчет переходных процессов представляет существенные трудности. Поэтому в теории автоматического регулирования и управления разработано много приближенных косвенных методов оценки устойчивости САР как линеаризованных, так и существенно нелинейных. Применять эти методы в разработанной двухмерной САР ДС модели УДС-1, которая является существенно нелинейной, нет необходимости, так как эта модель позволяет легко рассчитать переходные процессы в САР на ПЭВМ.

По виду переходных процессов можно оценить качество САР, применяя прямые показатели качества, и запас устойчивости САР. К показателям качества относятся: величина заброса регулирования параметра в переходном процессе, число его колебаний и длительность переходного процесса [70, 71]. Эти показатели для САРЧ дизеля нормированы и приведены в ГОСТ 10511-83 [29].

Об устойчивости САР можно судить по сходимости или несходимости переходных процессов. Если переходной процесс сходящийся, то САР устойчивая, если нет – неустойчивая.

Для количественной оценки устойчивости САР применяется такой показатель, как запас устойчивости.

Запас устойчивости САР характеризуется перерегулированием после сброса или наброса 100% нагрузки, который показывает степень удаления САР от колебательной границы устойчивости

$$\sigma = \frac{|n_{\max} - n_{уст}|}{n_{уст}} \cdot 100\%, \quad (3.42)$$

где $n_{\max}$ — максимальное значение частоты вращения вала двигателя в переходном процессе;

$n_{уст}$ — установившаяся частота вращения после завершения переходного процесса.

САР считается достаточно устойчивой если σ составляет 10...30% [70, 71].

Иногда задается также допустимое в период переходного процесса число колебаний регулируемой величины относительно установившегося значения. Оно может составлять 2...3 колебания.

Выводы по третьему разделу

1. В двухмерную САР ДС модели УДС-1 входят такие существенно нелинейные звенья как релейные регуляторы температуры нагревателя и частоты вращения вала двигателя. Поэтому для проведения расчетно – теоретических исследований в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов принята нелинейная динамическая математическая модель, в которой система входящих в нее обыкновенных дифференциальных уравнений решается на ПЭВМ численным методом интегрирования Рунге-Кутты-Фельдберга.

2. В разработанную математическую модель входят пять обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, алгебраические уравнения, неравенства, ограничения, исходные данные. Часть алгебраических

уравнений можно получить аналитическим путем, а часть путем аппроксимации опытных статических характеристик звеньев САР.

3. Составлена программа для расчетно – теоретических исследований на ПЭВМ с использованием математической модели статических характеристик САР ДС модели УДС-1 и переходных процессов в ней, в которую входят три модели: головной модуль, модуль – подпрограмма RKF45 для численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка и модуль – подпрограмма для решения уравнений, входящих в правые части дифференциальных уравнений. Программа составлена на алгоритмическом языке Фортран.

4. По разработанной динамической математической модели САР ДС модели УДС-1 и программе расчетов переходных процессов на ПЭВМ можно достаточно просто рассчитывать и изображать графически переходные процессы в САР. По этим переходным процессам можно прямым методом оценивать устойчивость САР и определять запас устойчивости.

РАЗДЕЛ 4

ЦЕЛИ, ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

4.1. Цели и задачи экспериментальных исследований

Цели экспериментальных исследований: определить исходные данные для использования в уравнениях математической модели САУ Стирлинг-электрического агрегата (СЭА); проверить адекватность математических моделей; подтвердить правильность теоретических выводов и расчетов, выполненных на ПЭВМ.

Для достижения этих целей следовало решить следующие задачи:

1. Определить внешнюю и частичные скоростные характеристики опытного ДС, использованного в качестве регулируемого объекта.
2. Оценить возможности (пределы) регулирования мощности опытного ДС изменением “мертвого” объема.
3. Определить момент инерции СЭА по опытным кривым переходных процессов.
4. Определить характеристики электронных регуляторов температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала ДС.
5. Проверить адекватность математических моделей опытного ДС как регулируемого объекта и СЭА в целом.
6. Снять индикаторные диаграммы ДС.

Исследования проводили на опытном СЭА с двигателем УДС-1.

Для каждого вида исследований были составлены программы и разработаны частные методики.

Эксперименты проводились в научно-исследовательской лаборатории кафедры “Тракторы и автомобили” ТГАТА и экспериментальном цехе Мелитопольского моторного завода.

4.2. Объекты экспериментальных исследований

Объектами экспериментальных исследований служили:

1. Мини Стирлинг – электрический агрегат (СЭА) постоянного тока с приводом от опытного ДС модели УДС-1, описанный в разделе 2.
2. Система автоматического регулирования температуры стенки нагревателя двигателя УДС-1.
3. Система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя УДС-1.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен мини Стирлинг – электрический агрегат на базе двигателя УДС-1, выпущенного Киевским кооперативом “Плазмотрон” в 1988г. Стирлинг – электрический агрегат был оборудован электронными САРТ и САРЧ и измерительными приборами.

4.3. Установка для экспериментальных исследований

Схема установки показаны на рис. 4.1 [72].

Дополнительный цилиндр нагревается продуктами сгорания газа, которые подводятся к нему по теплоизолированной жаровой трубке.

Электрический генератор – тормоз развивает мощность 6...8 Вт при частоте вращения якоря 1600 мин^{-1} . Он соединен с ДС УДС-1 ременной передачей с передаточным числом от вала двигателя к валу генератора равным 1:2,3. Ремень резиновый, круглого сечения, диаметром 4,5 мм. В качестве реостата используются два параллельно включенные сопротивления 0...10 Ом каждый, марки СП5-30-11-15 Е 8801.

Мощность, развиваемая двигателем, определялась по замеренным значениям напряжения и силы тока, а по мощности вычислялся крутящий момент.

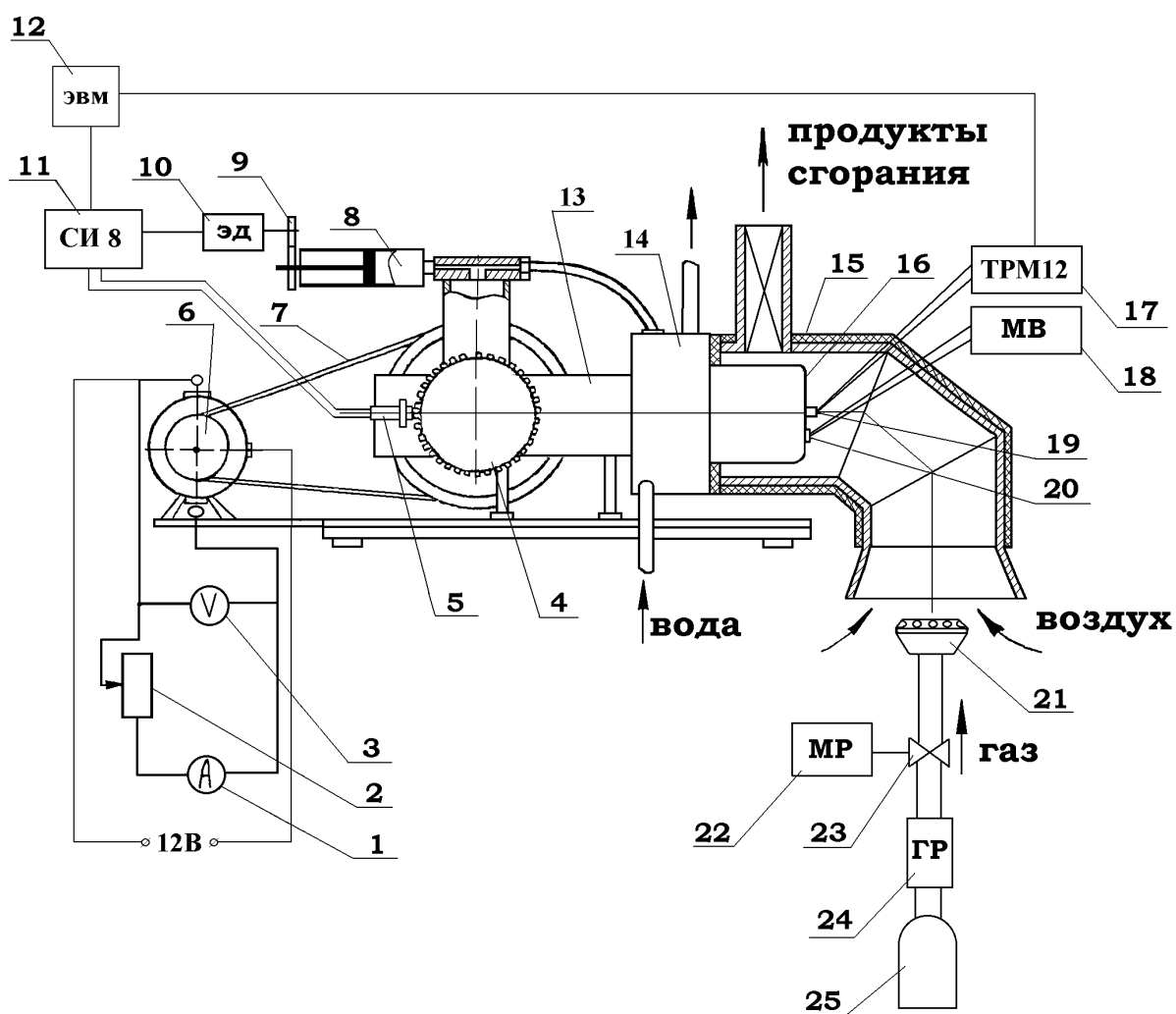


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:

1 – амперметр; 2 – реостат для регулирования нагрузки электрического генератора и поглощения вырабатываемой в нем энергии; 3 – вольтметр; 4 – диск с прорезями, установленный на коленчатом валу двигателя; 5 – индуктивный датчик частоты вращения; 6 – электрический генератор постоянного тока, полученный путем переоборудования электродвигателя марки ДВ-3; 7 – ременная передача; 8 – цилиндр с изменяемым “мертвым” объемом; 9 – шестеренчатая передача; 10 – электродвигатель; 11 – счетчик импульсов СИ-8; 12 – электронно-вычислительная машина; 13 – двигатель УДС-1; 14 – рубашка охлаждения для отвода теплоты от холодной полости дополнительного цилиндра; 15 – камера сгорания; 16 – дополнительный цилиндр; 17 – измеритель-регулятор микропроцессорный для регулирования температуры в горячей полости дополнительного цилиндра; 18 – милливольтметр марки Ш 4541 для регистрации температуры торцевой стенки дополнительного цилиндра; 19, 20 – термопары типа ХА; 21 – газовая горелка; 22 – механический планетарный редуктор марки УТ-15; 23 – дозатор газа; 24 – газовый редуктор; 25 – баллон со сжиженным газом.

Датчик измерителя – регулятора микропроцессорного 17, установлен в сквозное отверстие, выполненное в середине торца дополнительного цилиндра 16, теплоизолирован от стенки цилиндра и соприкасается непосредственно с нагретым воздухом, находящимся в цилиндре. Датчик милливольтметра 18 установлен снаружи на поверхности торца дополнительного цилиндра для измерения температуры стенки цилиндра. Провода, проходящие через жаровую трубу к датчикам 19 и 20, теплоизолированы асбестовой тканью и керамическими чашечками.

Дозатор газа 23 выполнен в виде жиклера, перекрываемого конической иглой с резьбой. Жиклер открывается на максимальную величину при повороте иглы на 720° . Иглу поворачивает реверсивный электродвигатель марки АДУ-1 постоянного тока напряжением 12 В.

Электродвигатель связан с иглой через планетарный редуктор 22 марки УТ-15 с кулачковым механизмом, управляющим микровыключателями. Редуктор делает один оборот за 60 с.

Электродвигателем управляет электронный блок управления (ЭБУ) по сигналам, поступающим от датчика измеритель – регулятора микропроцессорного 17 (на рис. 4.1 ЭБУ не показан). ЭБУ автоматически поддерживает заданный уровень температуры стенки дополнительного цилиндра 16 изменением расхода газа через горелку 21.

В качестве топлива использовали сжиженный нефтяной газ, содержащий 40% пропана C_3H_8 и 60% бутана C_4H_{10} . Он хранится в баллоне 25 под избыточным давлением, которое при температуре $15-30^\circ C$ составляет 0,4-0,6 МПа. Газ поступает к дозатору 23 через газовый редуктор, в котором давление газа снижается приблизительно до 0,02 МПа.

На рис. 4.2 показан общий вид установки с двигателем без цилиндра с регулируемым “мертвым” объемом. На коленчатом валу двигателя установлено зубчатое колесо, напротив зубьев которого расположен датчик измерителя частоты вращения. В левой части фотографии виден

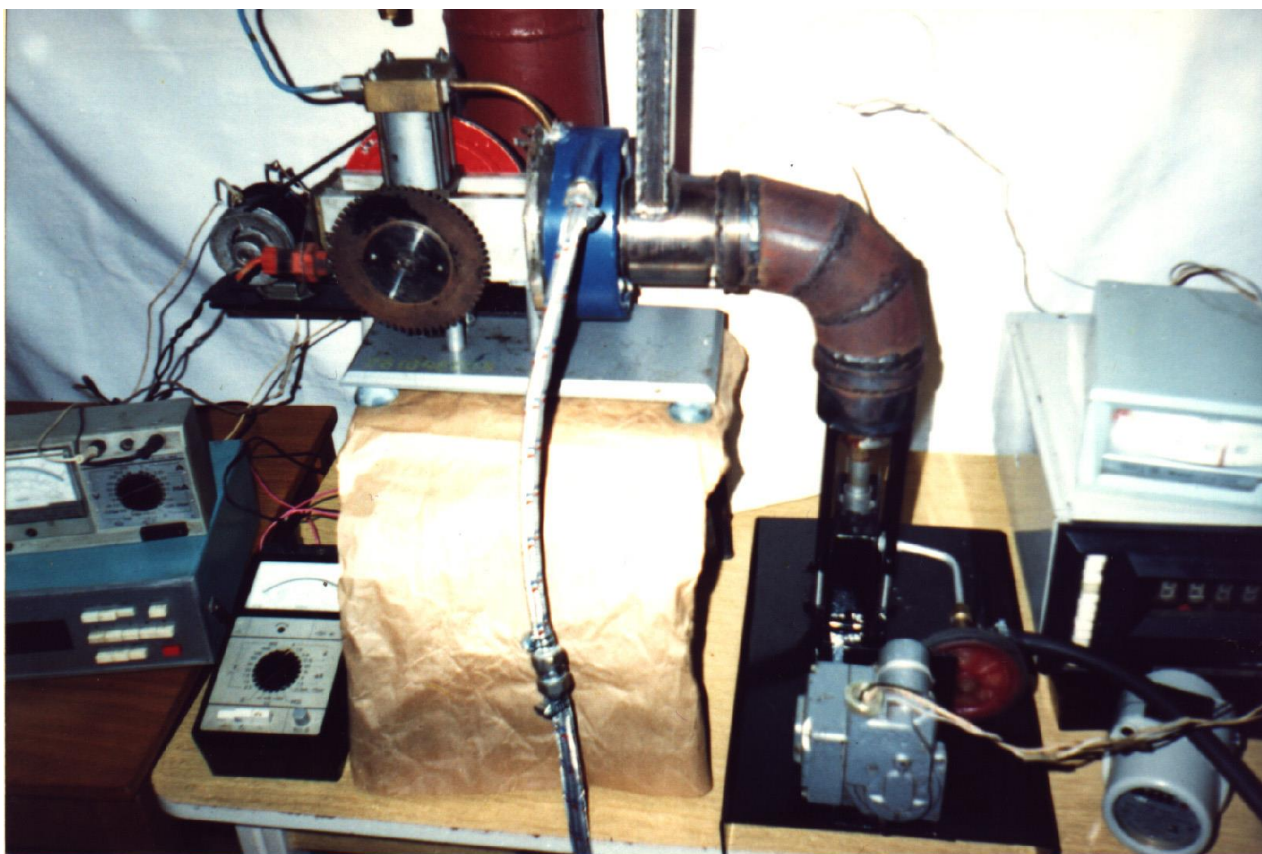


Рис. 4.2. Стирлинг – электрическая установка без цилиндра для изменения “мертвого” объема

электрогенератор с приводным ремнем, а в правой – рубашка охлаждения дополнительного цилиндра, камера сгорания с жаровой трубой и регулятором подачи горючего газа в горелку. На жаровой трубе сверху расположен патрубок для отвода продуктов сгорания.

На рис. 4.3 – та же установка, но с цилиндром с регулируемым “мертвым” объемом. В правой части цилиндра виден электромотор с редуктором для перемещения поршня в этом цилиндре для изменения “мертвого” объема.

На рис. 4.4 показан электрогенератор постоянного тока, полученный переоборудованием серийного электродвигателя марки ДВ-3. Генератор двухщеточный, с независимой обмоткой возбуждения. Электрический ток в нее подается из бытовой сети переменного тока напряжением 220 В через автотрансформатор, в котором напряжение тока понижается до 12,5 В.

На рис. 4.5 показана конструкция цилиндра с изменяемым “мертвым” объемом, на рис. 4.6 – элементы этой конструкции; на рис. 4.7 – конструкция деталей этого цилиндра, а на рис. 4.8 – общий вид цилиндра с электродвигателем и редуктором.

На рис. 4.9 показан общий вид камеры сгорания с горелкой, а на рис. 4.10 – дозатор горючего газа с приводом от реверсивного электродвигателя УТ-15.

Для индицирования двигателя УДС-1 был использован комплект оборудования австрийской фирмы AVL марки AVL 657, выпущенного в 1994 году (рис. 4.11). В него входят: цифровой анализатор AVL Digital Analyzes 657 HSP 6501; Inductive Valve Lift Transducer AVL 426 (индификационный №АТ0227Е); Carrier Amplifier 3076-А01 (индификационный №АТ0024Е).

Для записи переходных процессов использовали ПЭВМ марки AMD-K6 3D processor с оперативной памятью 64,0 МБ, подключенную к электронному регулятору через адаптер сети АС-2.



Рис. 4.3. Стирлинг – электрическая установка с изменяемым “мертвым” объемом

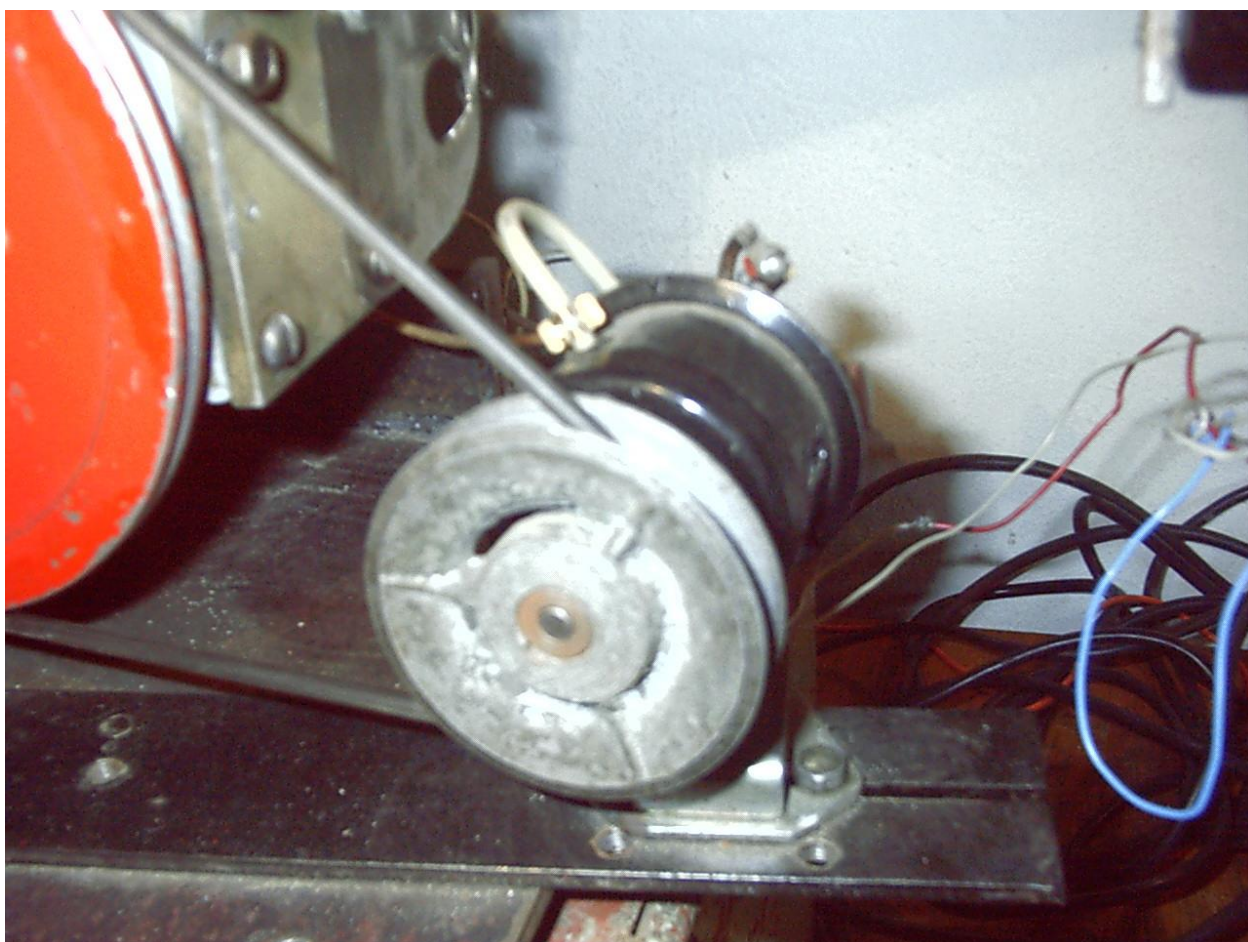


Рис. 4.4. Электродгенератор постоянного тока

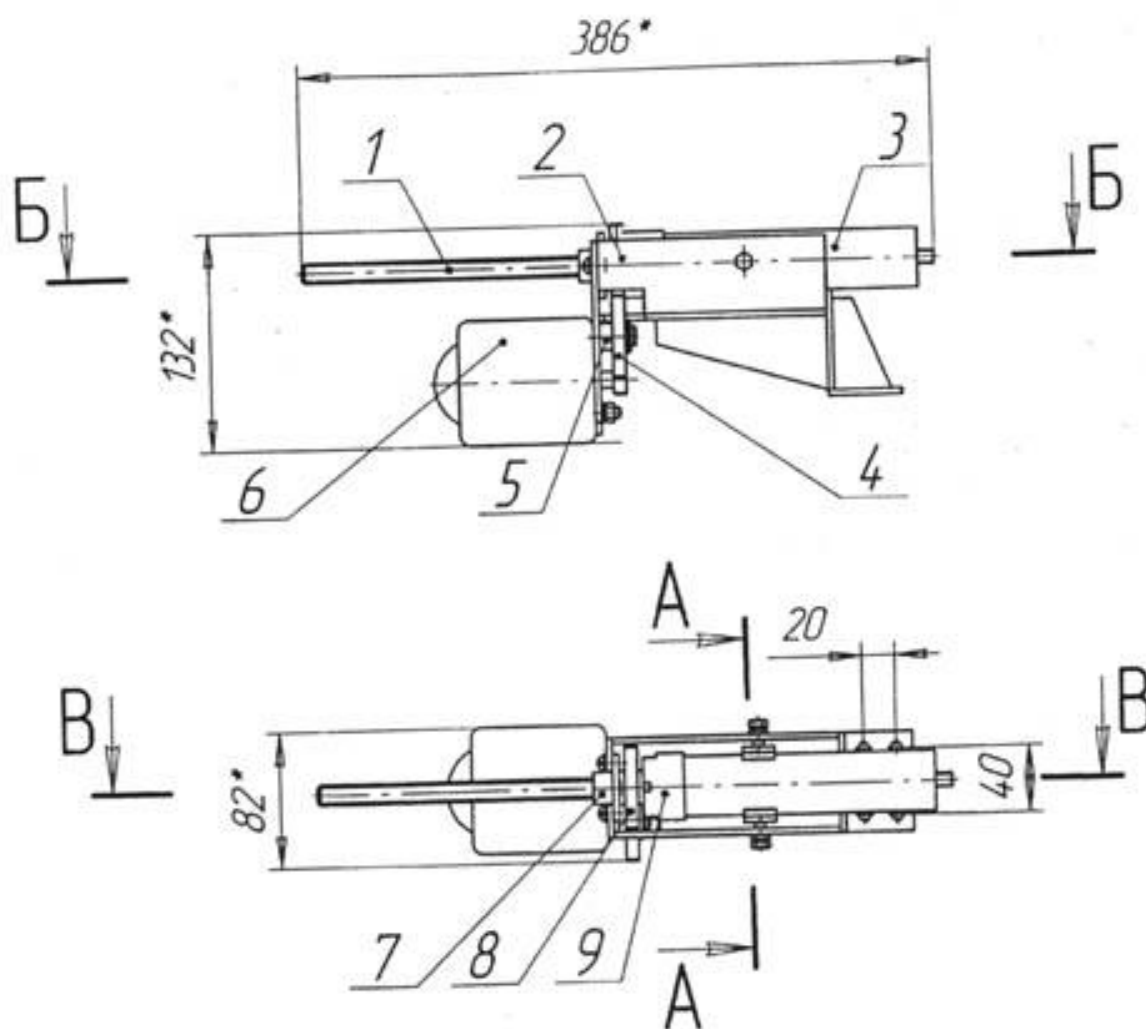


Рис. 4.5. Конструкция цилиндра с изменяемым “мертвым” объемом

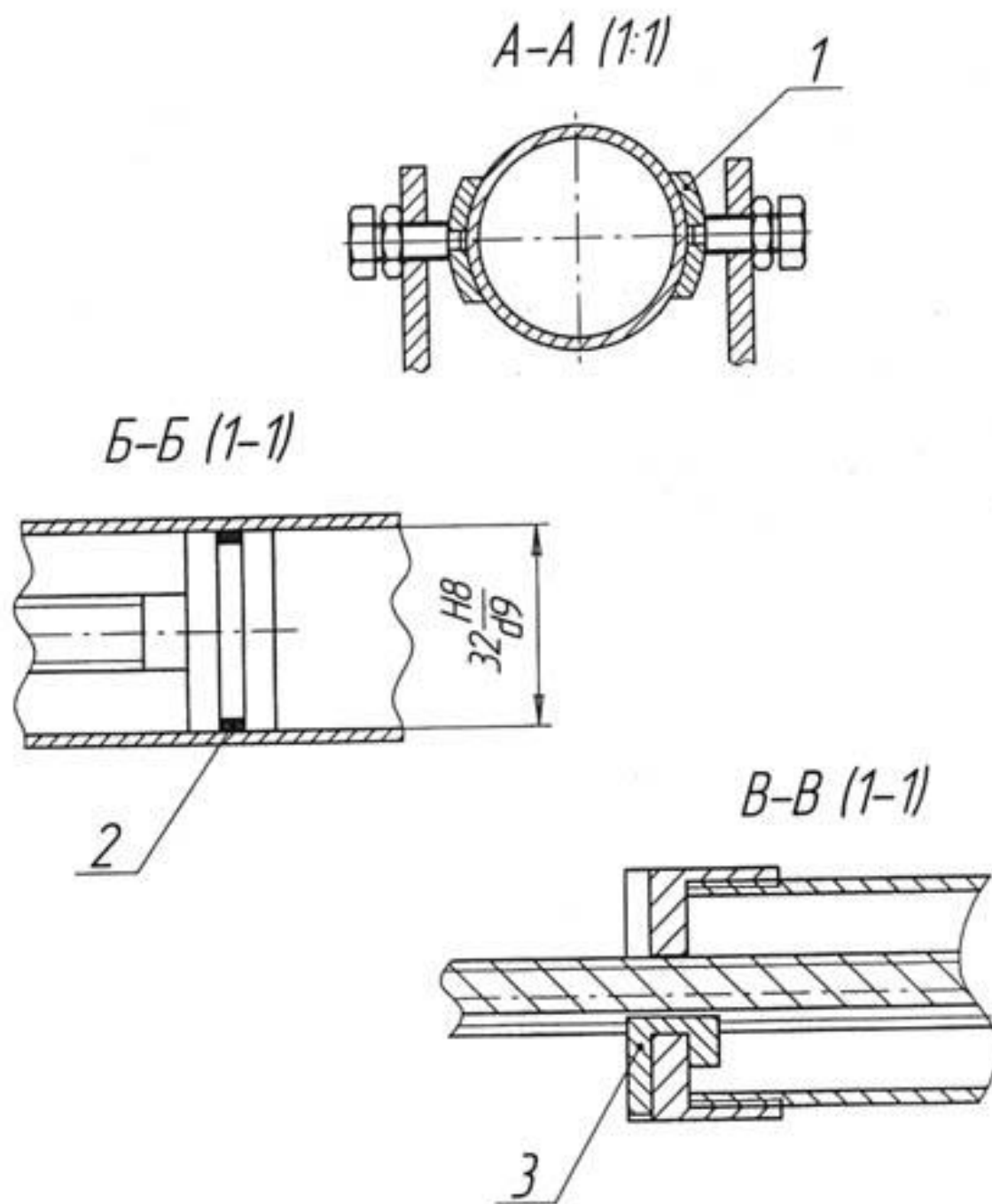


Рис. 4.6. Элементы конструкции цилиндра с изменяемым “мертвым” объемом

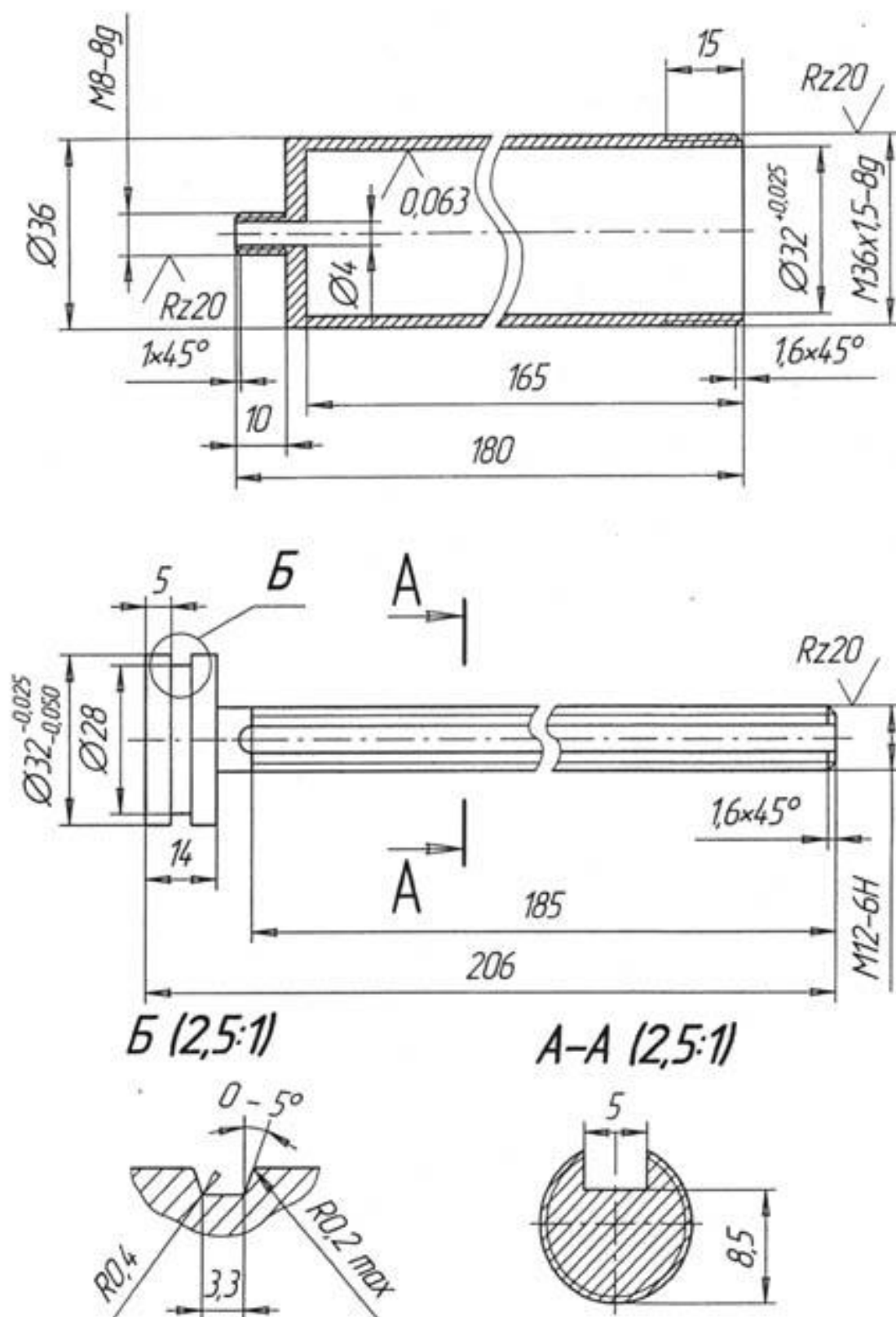


Рис. 4.7. Конструкция деталей цилиндра с изменяемым "мертвым" объемом

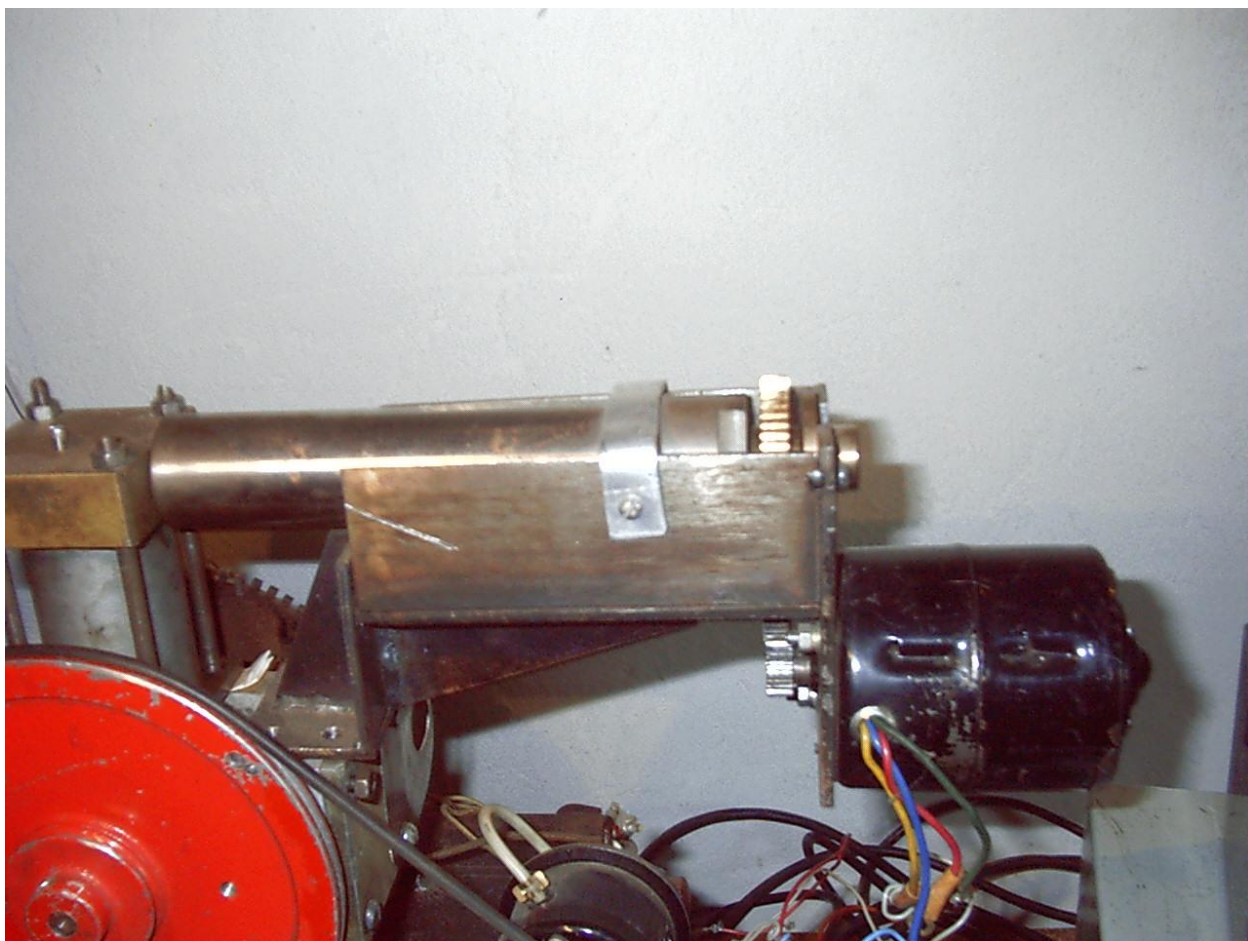


Рис. 4.8. Общий вид дополнительного цилиндра с электродвигателем

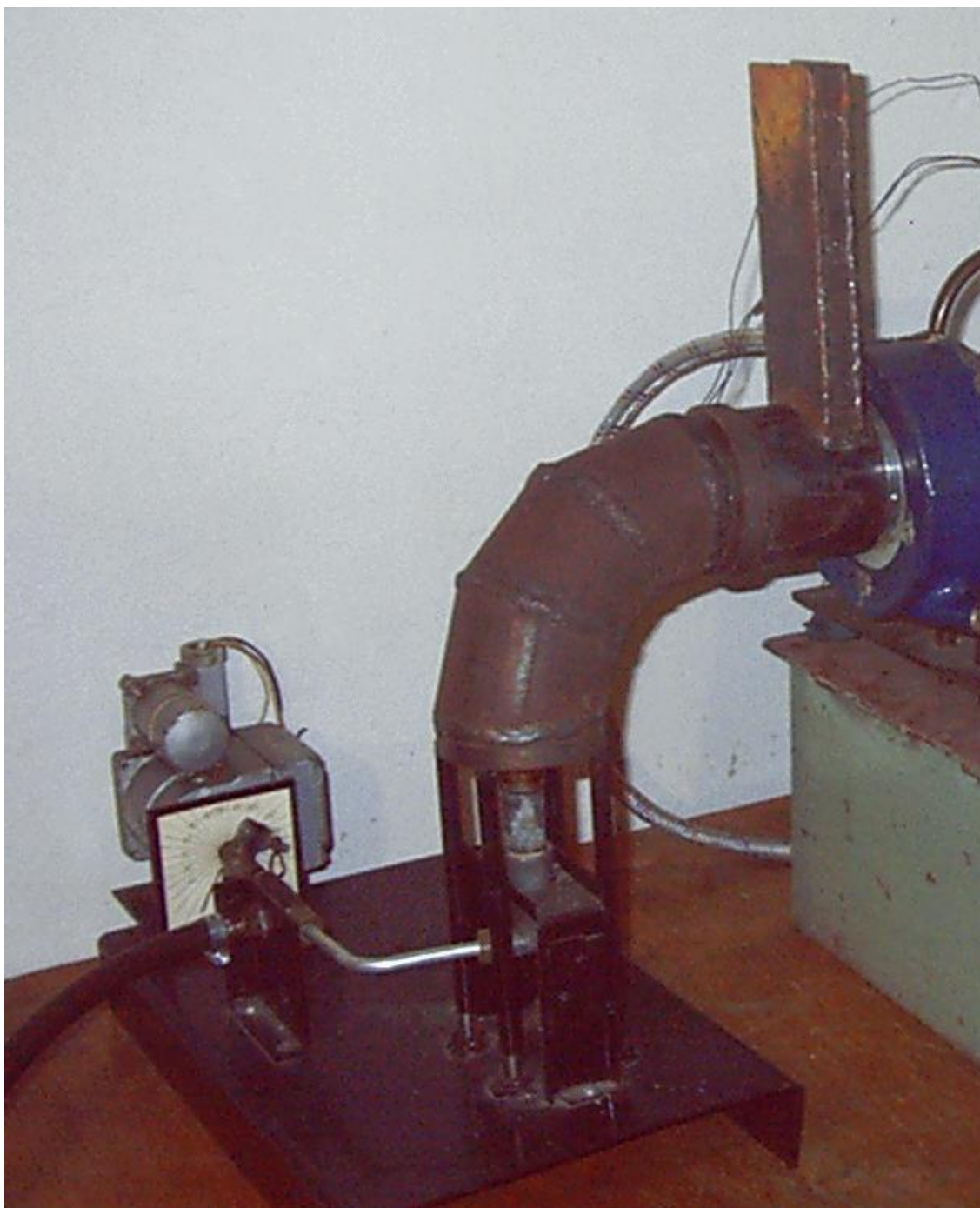


Рис. 4.9. Общий вид камеры сгорания с горелкой

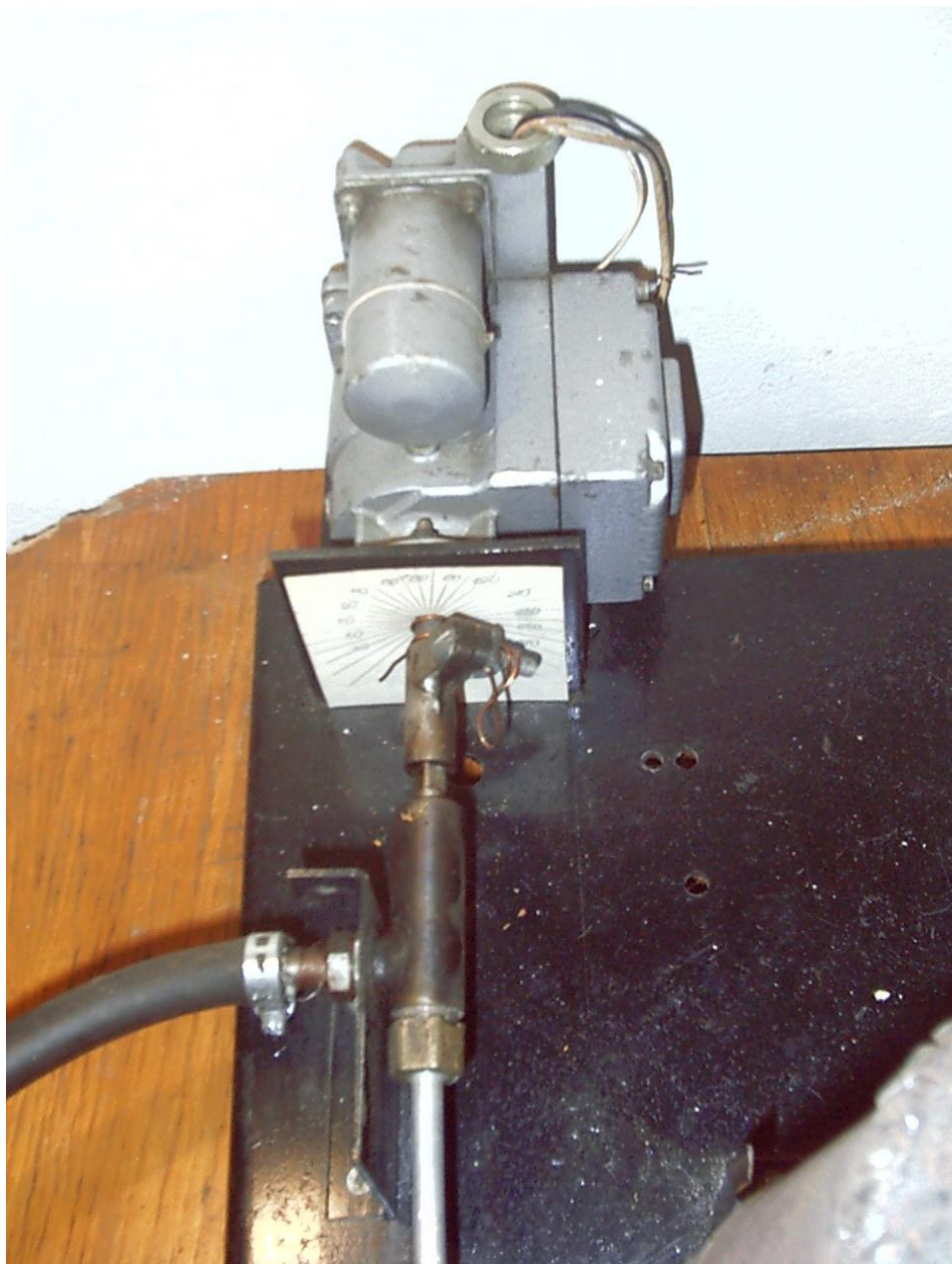


Рис. 4.10. Дозатор горючего газа с приводным реверсивным электродвигателем



Ри. 4.11. Приборы фирмы AVL, использованные для индицирования ДС модели УДС-1

4.4. Экспериментальная система автоматического регулирования температуры стенки нагревателя

Система автоматического регулирования стенки нагревателя собрана в основном из узлов и деталей выпускаемых промышленностью Украины и стран СНГ. Основу САРТ составляет микропроцессорный программируемый измеритель-регулятор типа ТРМ12-Ріс с хромель-алюмелиевым датчиком температуры наружной стенки горячей части дополнительного цилиндра (нагревателя) двигателя УДС-1.

Схема экспериментальной САРТ показана на рис. 4.12. От термопары 3 сигнал поступает в цифровой фильтр 4, где сглаживаются случайные импульсные помехи, сигнал фильтруется в единицах измеряемой величины и передается на логическое устройство – ПД-регулятор. Текущий сигнал сравнивается с заданными верхним и нижним пределами регулирования температуры. При отклонении текущего значения от заданных пределов подается сигнал на выходное устройство 6, которое с помощью двух реле Р1 и Р2 управляет исполнительным механизмом 7, а тот в свою очередь электродвигателем 8. Электродвигатель с помощью планетарного редуктора 9 перемещает иглу дозатора газа 10, уменьшая или увеличивая подачу газа через газовую горелку 11 в камеру сгорания 12. К ПД-регулятору через адаптер сети модели АС-2 подключается ПЭВМ, на которой записываются результаты измерений.

4.5. Экспериментальная система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя Стирлинга

Система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала ДС смонтирована на базе счетчика импульсов СИ-8

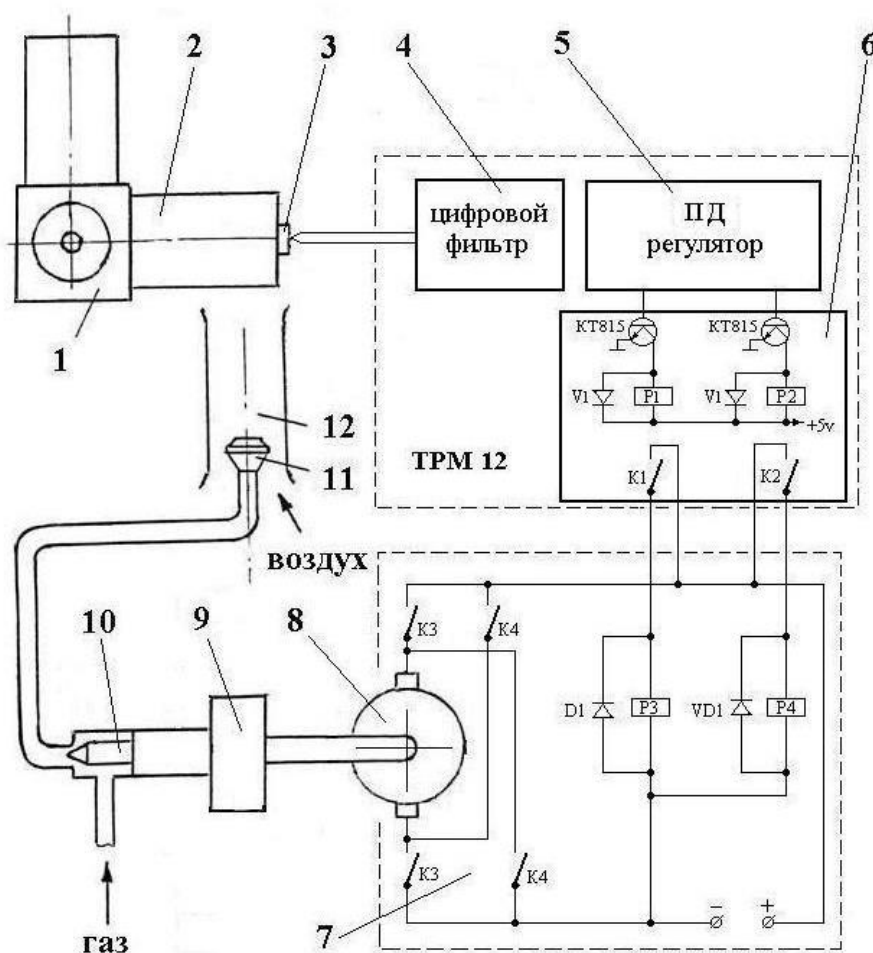


Рис. 4.12. Схема экспериментально САРТ ДС:

1 – ДС УДС-1; 2 – нагреватель; 3 – термопара; 4 – цифровой фильтр; 5 – ПД-регулятор; 6 – выходное устройство; 7 – исполнительный механизм; 8 – реверсивный электродвигатель постоянного тока; 9 – планетарный редуктор; 10 – дозатор газа; 11 – газовая горелка; 12 – камера сгорания.

программируемого измерителя – регулятора типа TRM12-Pic), в схему которого внесены изменения, необходимые для регулирования частоты вращения ДС с использованием индуктивного датчика частоты вращения. Индуктивный датчик был закреплен напротив зубчатого колеса, специально установленного на коленчатом валу ДС с противоположной маховику стороны.

Схема экспериментальной САРЧ ДС показана на рис. 4.13. Счетчик импульсов 9 с помощью генератора временных интервалов 7 преобразует сигнал в частоту вращения коленчатого вала двигателя и передает его в устройство сравнения 10, где задаются пределы регулирования, сравнивается текущее значение с заданным и формируется сигнал управления выходными устройствами 11, 12.

Если частота вращения отклоняется от заданных пределов, то сигнал из выходных устройств 11, 12 поступает на исполнительный механизм 13, который с помощью реверсивного электродвигателя 6 и редуктора 5 перемещает поршень в цилиндре с дополнительным “мертвым” объемом в нужном направлении до тех пор пока не станет соблюдаться неравенство $P_{\min} < P < P_{\max}$.

4.6. Методики экспериментальных исследований

Скоростные характеристики двигателя УДС-1 определяли непосредственно на Стирлинг – электрическом агрегате, электрогенератор которого использовался в качестве электрического тормоза. Вырабатываемая электрогенератором энергия поглощалась реостатами и рассеивалась в окружающую атмосферу. Во время снятия характеристик без САРТ и САРЧ вручную поддерживалась постоянная температура T_n нагревателя путем подстройки расхода горючего газа, и постоянная температура $T_{хол}$ воздуха в холодной полости, путем подрегулировки расхода охлаждающей воды через рубашку охлаждения двигателя.

Изменением сопротивления реостатов задавались различные значения нагрузки так, чтобы частота вращения коленчатого вала изменялась с равным интервалом или другими интервалами.

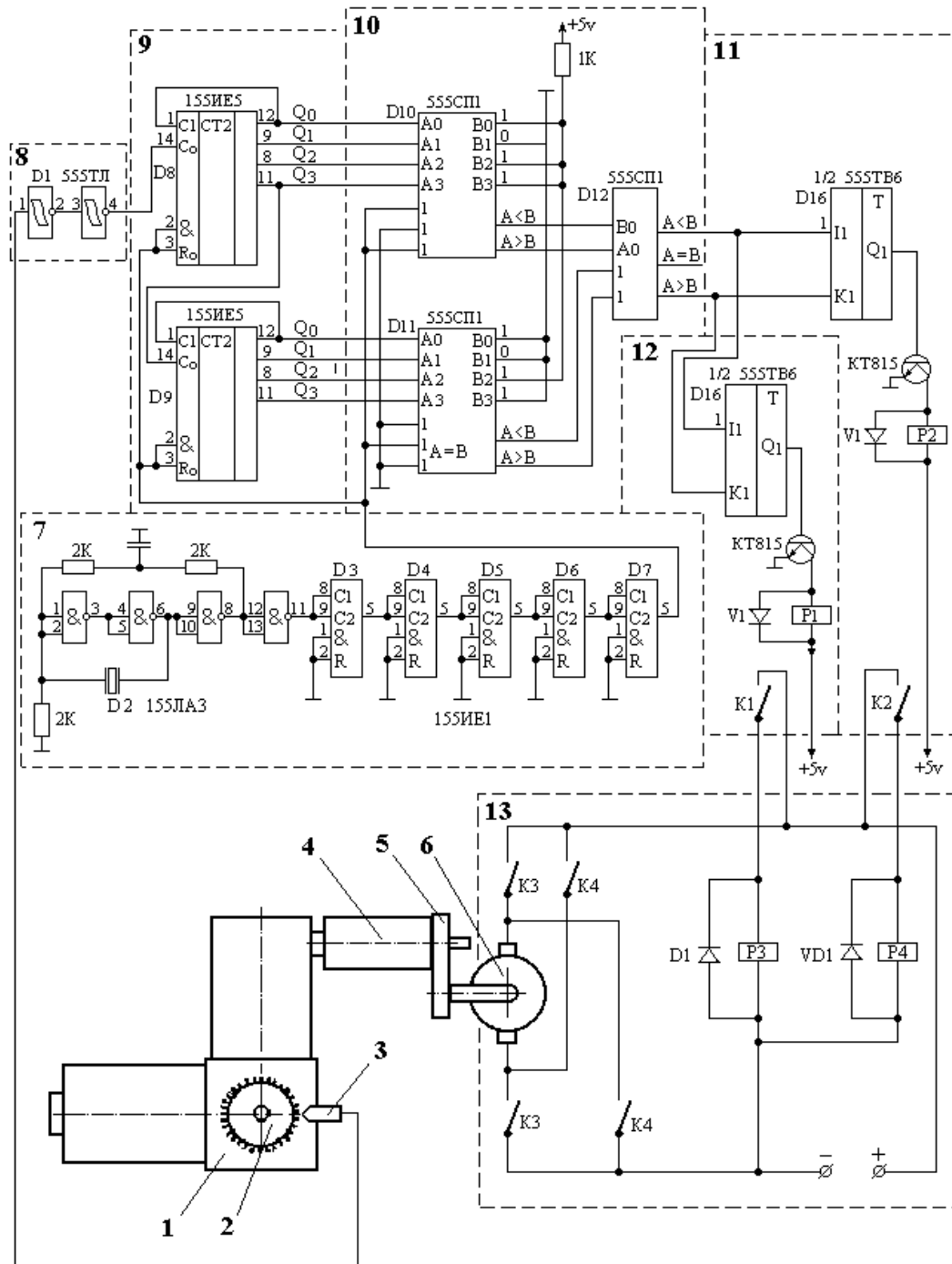


Рис. 4.13. Схема экспериментальной САРЧ ДС:

1 – ДС УДС-1; 2 – зубчатое колесо; 3 – индуктивный бесконтактный датчик частоты; 4 – цилиндр с изменяемым дополнительным “мертвым” объемом; 5 – шестеренчатый редуктор с винтовой передачей к штоку поршня в цилиндре с дополнительным “мертвым” объемом; 6 – реверсивный электродвигатель постоянного тока; 7 – генератор временных интервалов; 8 – усилитель – формирователь импульсов; 9 – счетчик импульсов; 10 – устройство сравнения (задатчик $\max$ и $\min$ значения); 11,12 – выходные устройства управляющие исполнительным механизмом; 13 – исполнительный механизм.

Максимальную температуру нагревателя ограничивали 920 К из соображения обеспечения достаточной термической надежности стенки нагревателя. Полученная при этой температуре скоростная характеристика принималась за внешнюю. Частичные скоростные характеристики получали при постоянных температурах нагревателя в пределах от 580 до 920 К по возможности с равными интервалами.

По такой же методике снимали скоростные характеристики с включенной САРТ, только в этом случае заданная температура T_n поддерживалась автоматически.

При определении скоростных характеристик с включенными САРТ и САРЧ задатчиком температуры T_n задавались желаемая максимальная температура T_n , а задатчиком частоты вращения n – ее значение, при котором начинает формироваться регуляторная ветвь. Характеристика снималась путем ступенчатого изменения сопротивления реостатов с принятыми интервалами.

Для определения влияния изменения “мертвого” объема на энергетические показатели двигателя снимали скоростные характеристики при постоянной температуре T_n и разных величинах “мертвого” объема. По полученным данным строили зависимости N_e и M_e от величины “мертвого” объема V_m при постоянных значениях температуры T_n и частоты вращения n .

При снятии характеристик измеряли: частоту вращения n , напряжение u и силу тока I , вырабатываемого генератором, температуры T_n стенки нагревателя, $T_{гор}$ и $T_{хол}$ в горячей и холодной полостях дополнительного цилиндра. Эффективную мощность двигателя вычисляли по формуле

$$N_e = u \cdot I / \eta_{p.n.} \quad (4.1)$$

где $\eta_{p.n.}$ – к.п.д. ременной передачи от двигателя к электрогенератору.

К.п.д. ременной передачи определялся путем прокручивания этой передачи без нагрузки от электродвигателя.

Условные механические потери в агрегате определяли следующим способом.

Известно, что мощность условных механических потерь в тепловых двигателях равна:

$$N_m = N_i - N_e, \quad (4.2)$$

где N_i , N_e – индикаторная и эффективная мощности, соответственно.

На электрическом агрегате при постоянной температуре стенки горячей части дополнительного цилиндра снимали скоростную характеристику двигателя путем изменения нагрузки электрического генератора, как описано выше. При снятии характеристики на разных установившихся скоростных режимах работы производили индицирование давления в рабочем цилиндре, изменялись эффективная мощность и частота вращения вала двигателя. По индицированным диаграммам вычисляли индикаторную мощность и по уравнению (4.2) определяли мощность N_m .

Естественно, что в полученные значения мощности N_m входят потери в электрогенераторе и ременном приводе, т.е. это мощность механических потерь не только двигателя, а всего Стирлинг – электрического агрегата вместе с двигателем. Как раз это и необходимо для математической модели.

По результатам экспериментов строили графическую зависимость момента механических потерь M_m от частоты вращения n , которую аппроксимировали подходящим полиномом.

Для определения скоростных характеристик электрогенератора, используемого в качестве электротормоза, движок реостатов устанавливали в различные постоянные положения и при каждом положении движка задавали разные значения температуры T_n путем соответствующей настройки подачи горючего газа. При каждом постоянном значении T_n устанавливался равновесный режим работы с определенной частотой вращения коленчатого вала двигателя равной частоте вращения вала электрогенератора.

Совокупность этих режимов представляет скоростную характеристику электрогенератора – тормоза.

Для оценки динамических показателей САРТ и САРЧ снимали переходные процессы после мгновенного сброса и наброса нагрузки, которые задавали выключением или включением реостатов. Перед началом переходного процесса СЭА работал 2...3 мин на исходном установившемся режиме. На ПЭВМ записывались: отметка времени, частота вращения вала двигателя, температура T_n , осевая координата x_m поршня в цилиндре с “мертвым” объемом.

4.7. Оценка погрешностей измерений

Применявшиеся для исследований приборы были аттестованы, класс точности не превышал 0,5, а ошибки измерений на этих приборах не превышали допускаемых величин по ГОСТ 18509-80 [73]. Данные о применявшихся во время экспериментальных исследований приборах даны в табл. 4.1. Из таблицы видно, что точность всех приборов соответствует требованиям ГОСТ 18509-80.

При однократных прямых измерениях ошибка оценивалась точностью измерительных приборов. При косвенных однократных измерениях ошибки подсчитывались по известным методикам [74], учитывающим ошибки прямых измерений. При проведении прямых и косвенных многократных измерений результаты измерений оценивались по ГОСТ 8.207-76 [75] и ГОСТ 11.004-74 [76]. Оценка резко выделяющихся величин проводилась по ГОСТ 11.002-73 [77]. Согласно ГОСТ 11.004-74 значение каждой измеренной величины принимали равным среднему арифметическому значению. При этом вычисляли среднее квадратическое отклонение, нижняя и верхняя границы доверительного интервала (при односторонней доверительной вероятности – 0,95) и коэффициент вариации.

Таблица 4.1

Данные о средствах измерительной техники, применявшихся при экспериментах и ошибках измерений

Наименование и тип прибора	Единица измерений	Цена деления шкалы	Максимальн. показание прибора	Класс точности	Ошибка измерений	
					Фактическая	По ГОСТ 18509-80
Вольтметр	В	0,5	900	0,5	0,5	1
Амперметр	А	0,05	5	0,5	0,5	1
Цифровой электронный тахометр ТЦ-5	мин ⁻¹	1	99999	0,5	4	10
Кварцевый датчик для осцилографирования давления QC 32C	бар	0,001	200		0,0015	0,005
Милливольтметр Ш4541 регулирующийся	°С	10	1300	1,5	1,5	10
Измеритель – регулятор микропроцессорный ТРМ12-РiС	°С	0,1	1200	0,5	0,25	3

Расхождение между опытными и расчетными кривыми на графиках оценивали с помощью коэффициентов вариации согласно известной методике, описанной в работах [78, 79] и др.

По этой методике совпадение опытных и расчетных кривых оценивается по основной (среднеквадратичной) ошибке σ_0 , которая вычисляется по формуле

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum (x_{oni} - x_{расчi})^2}{n - 1}}, \quad (4.3)$$

где x_{oni} и $x_{расчi}$ — значения рассматриваемого параметра по опытной и расчетной кривым в ряде равномерно расположенных на них точек (вдоль оси абсцисс).

n — число точек на кривых, в которых производится сравнение.

Совпадение считается удовлетворительным если выполняется условие

$$\sigma_0 < 0,1 \cdot x_{cp}, \quad (4.4)$$

где x_{cp} — средняя величина опытных значений

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{oni}. \quad (4.5)$$

В уравнении (4.4) коэффициент 0,1 есть допустимое значение коэффициента вариации W . Фактическое значение его вычисляется по формуле

$$W = \frac{\sigma_0}{x_{cp}} \cdot 100\%. \quad (4.6)$$

РАЗДЕЛ 5

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Оценка возможности регулирования мощности двигателя Стирлинга модели УДС-1 с помощью дополнительного “мертвого” объема

Для оценки возможности регулирования мощности двигателя УДС-1 путем изменения величины дополнительного “мертвого” объема V_m определены экспериментальные зависимости эффективного крутящего момента M_e от дополнительного объема V_m при увеличении этого объема от 0 до 60 см³ при четырех значениях температуры наружной стенки нагревателя $T_n = 665, 745, 830$ и 910 К и постоянной частоте вращения $n=400$ мин⁻¹ [80]. Эти зависимости построены на рис. 5.1. Там же нанесена зависимость степени сжатия ε от V_m .

Для полученных на рис. 5.1 зависимостей $M_e = M_e(V_m)$ дополнительный “мертвый” объем последовательно увеличивали на 10 см³, при каждом новом значении этого объема восстанавливали принятую постоянную температуру T_n , путем подрегулировки подачи газового топлива и принятую частоту вращения $n=400$ мин⁻¹, путем подрегулировки сопротивления реостатов.

Из рис. 5.1 видно, что с увеличением V_m крутящий момент и степень сжатия монотонно уменьшаются, причем крутящий момент изменяется интенсивнее, чем степень сжатия. Так при $T_n=910$ К крутящий момент уменьшился в 1,85 раза, при $T_n = 830$ К в 1,87 раза, при $T_n = 745$ К в 2,09 раза, при $T_n = 665$ К в 2,28 раза. В то же время в пределах рассмотренного увеличения объема V_m степень сжатия уменьшилась от 1,24 до 1,17 или в 1,06 раза.

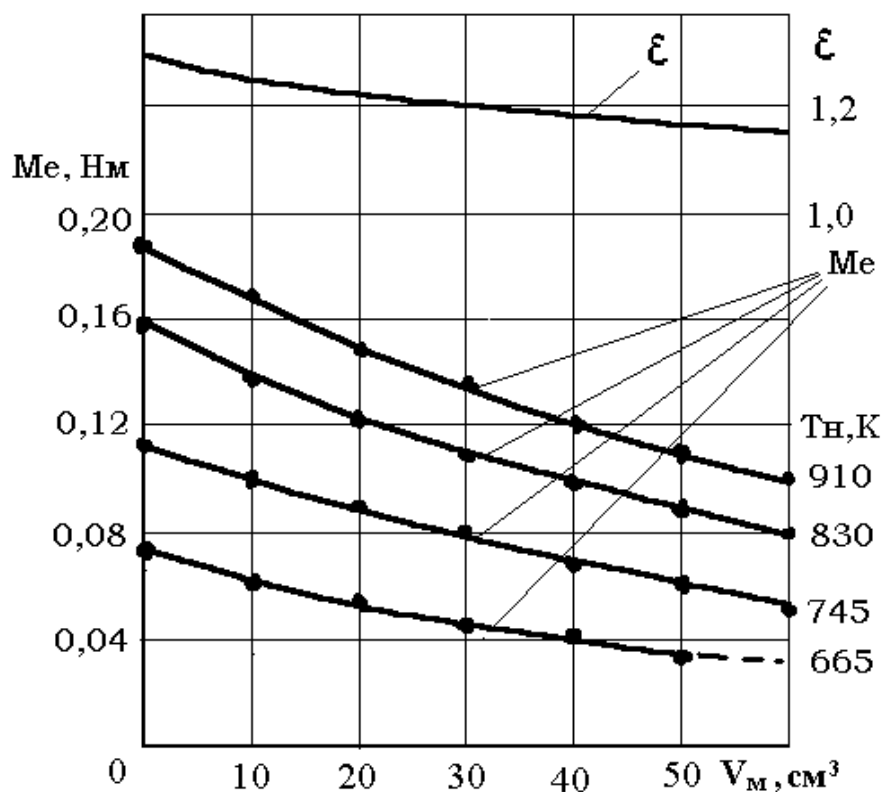


Рис. 5.1. Влияние дополнительного “мертвого” объема на эффективный крутящий момент и степень сжатия двигателя УДС-1 при разных значениях температуры нагревателя и постоянной частоте вращения $n = 400 \text{ мин}^{-1}$

По характеру кривых $M_e = M_e(V_m)$ видно, что при дальнейшем увеличении V_m крутящий момент будет продолжать уменьшаться.

На рис. 5.2 по этим же данным построены зависимости M_e от степени сжатия ϵ . Видно, что в пределах изменения ϵ от 1,24 до 1,17 крутящий момент резко падает, причем зависимости $M_e = M_e(\epsilon)$ при всех рассмотренных температурах T_n линейные. Дальнейшим уменьшением ϵ , получаемым увеличением V_m , можно еще больше уменьшить M_e .

В подразделе 5.8 показано, что при $n=400 \text{ мин}^{-1}$ и $V_m=100 \text{ см}^3$ M_e уменьшается до нуля. У ДС мод. УДС-1 при $V_m=0$ “мертвый” объем равен $157,5 \text{ см}^3$, а при $V_m=100 \text{ см}^3$ он равен $257,5 \text{ см}^3$, что в 1,63 раза больше.

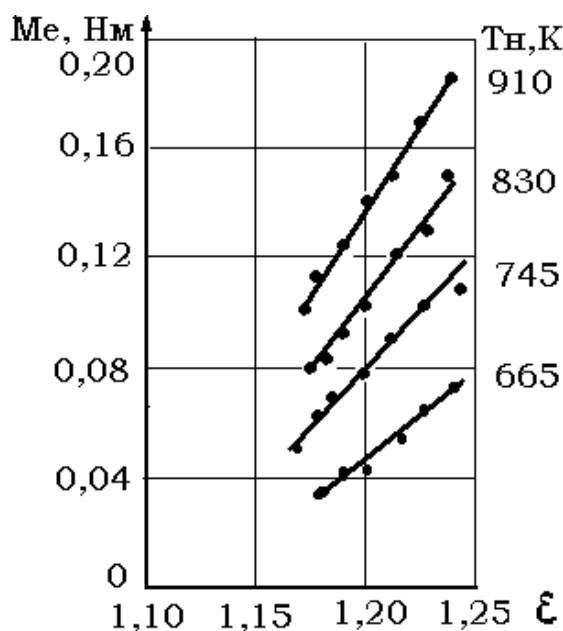


Рис. 5.2. Влияние степени сжатия на эффективный крутящий момент двигателя УДС-1 при разных значениях температуры нагревателя

Однако для исследования САРТ и САРЧ ДС полученных пределов измерения M_e достаточно. Поэтому дальнейшие эксперименты с увеличением дополнительного “мертвого” объема не проводились.

Для определения влияния величины дополнительного объема V_m на основные показатели работы двигателя УДС-1 настройкой подачи газа через горелку и момента сопротивления M_r электрогенератора задавали четыре начальные значения температуры $T_n=918; 833; 748$ и 663 К при $V_m=0$ и частоте вращения $n=400 \text{ мин}^{-1}$. При каждом из этих значений температуры T_n постепенно увеличивали объем V_m и регистрировали изменение T_n , $T_{гор}$, N_e , M_e , n не изменяя расход горючего газа и настройку электрогенератора.

Опыты показали, что с увеличением V_m все перечисленные показатели уменьшаются (рис. 5.3 и 5.4). Уменьшение мощности Ne и крутящего момента Me приводит к уменьшению частоты вращения n (см. рис.5.3). Так как расход топлива сохраняется постоянным, уменьшается эффективный к.п.д., а из-за снижения к.п.д. возросли потери теплоты в цикле, что вызвало снижение температуры $T_{гор}$. Из-за этого снизилась и температура T_n , так как подвод теплоты не изменился. Это дополнительно снижает Me и частоту вращения n .

Уменьшение мощности Ne и крутящего момента Me при постоянном расходе газа приводит к снижению к.п.д. и повышению удельного расхода газа.

На рис. 5.5 по этим же данным построена зависимость рассматриваемых параметров от частоты вращения n при начальной величине температуры $T_n=918K$ при $V_m=0$. На этом графике все отмеченные выше особенности проявляются еще более наглядно.

Графики при других начальных значениях T_n имеют аналогичный характер.

Чтобы определить влияние V_m на среднее индикаторное давление p_i была снята серия индикаторных диаграмм давления $p_{ц}$ в рабочем цилиндре при $V_m=0, 5, 10, 15$ и 20 см^3 . При снятии этих диаграмм подача горючего газа и настройка сопротивления электрогенератора оставались постоянными, изменялся только объем V_m . Индикаторные диаграммы показаны на рис. 5.6.

Видно, что при увеличении V_m площадь индикаторной диаграммы и давление p_i уменьшаются, при этом уменьшается и частота вращения n .

На рис. 5.7 совмещены индикаторные диаграммы, снятые при $V_m=0$ и 20 см^3 . Видно, что уменьшение площади диаграммы происходит в результате уменьшения максимального и увеличения минимального значений давления $p_{ц}$ и диаграмма при $V_m=20 \text{ см}^3$ размещается внутри диаграммы при $V_m=0$, т. е. при увеличении V_m уменьшается размах колебаний давления $p_{ц}$, но колебания происходят около линии атмосферного давления.

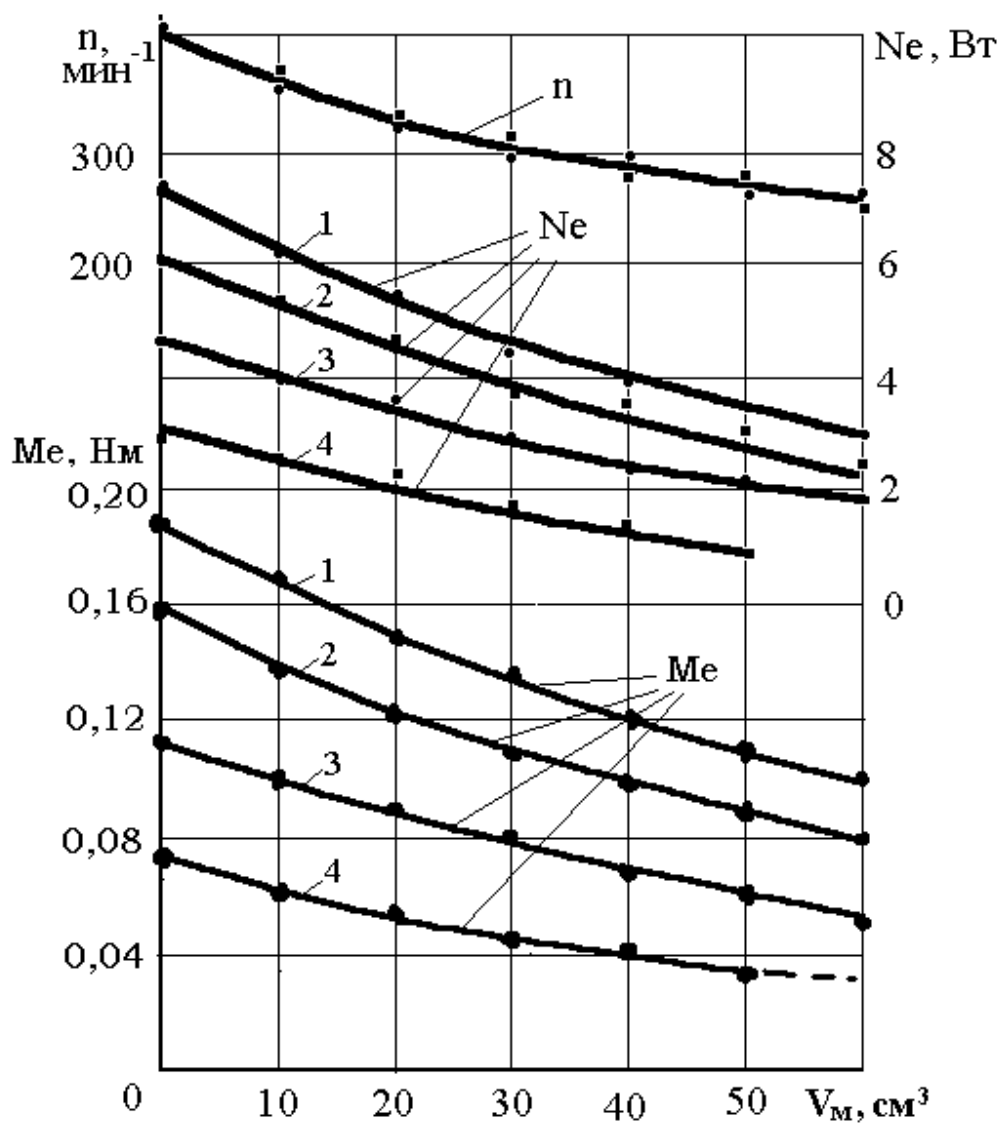


Рис. 5.3. Влияние дополнительного объема на крутящий момент и частоту вращения коленчатого вала ДС модели УДС-1:

1 – $T_H=918$ К; 2 – $T_H=833$ К; 3 – $T_H=748$ К; 4 – $T_H=663$ К

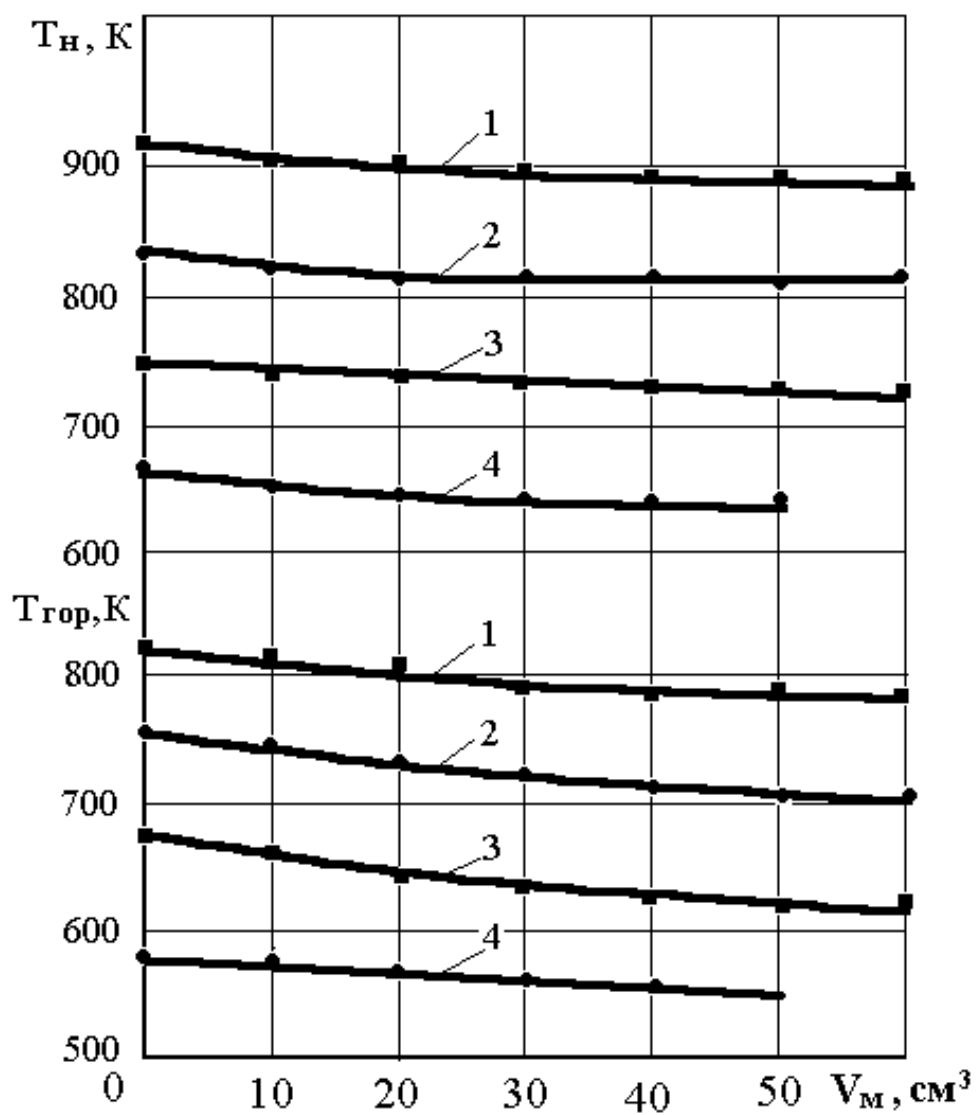


Рис. 5.4. Влияние дополнительного объема на температуры T_H и T_{Top} ДС модели УДС-1:

1 – $T_H=918$ К; 2 – $T_H=833$ К; 3 – $T_H=748$ К; 4 – $T_H=663$ К

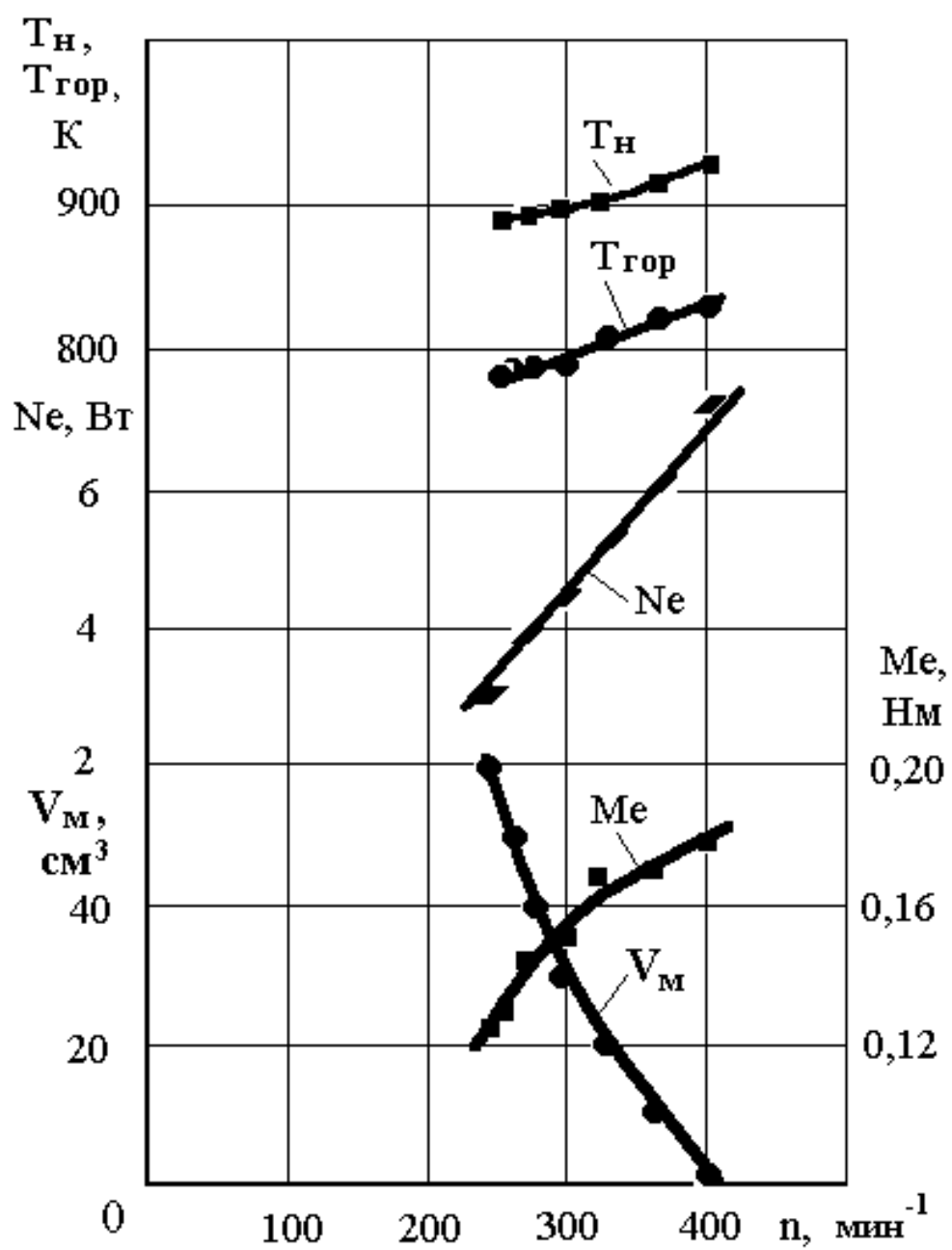
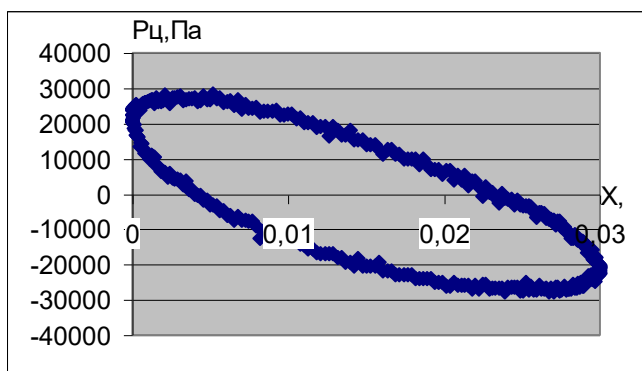
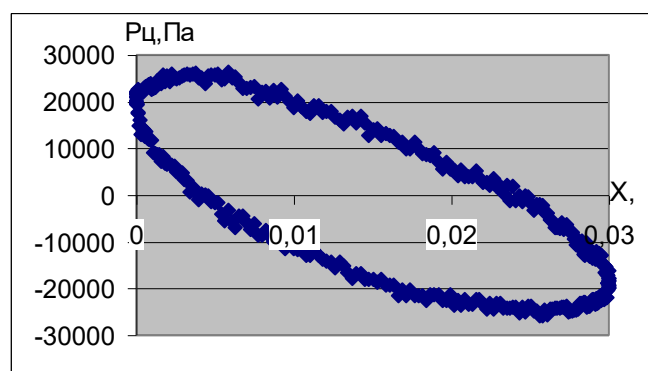


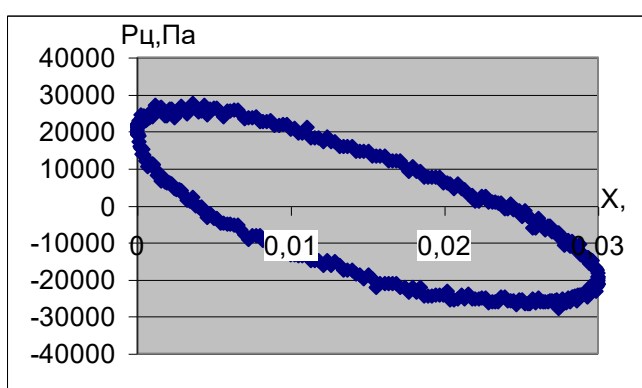
Рис. 5.5. Зависимость параметров работы ДС модели УДС-1 от частоты вращения коленчатого вала при изменении дополнительного объема:
(начальная температура $T_n=918\text{K}$ при $V_m=0$)



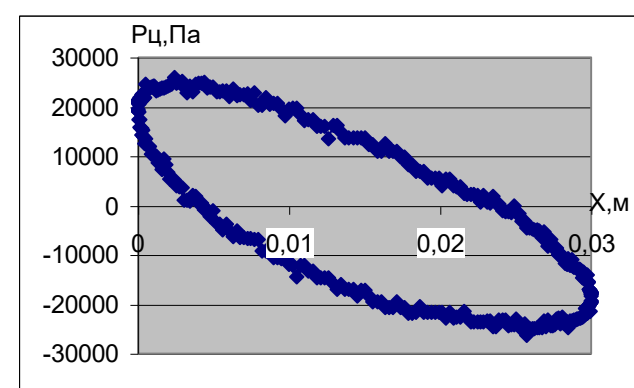
$V_m = 0 \text{ см}^3$; $n = 372 \text{ мин}^{-1}$;
 $P_i = 0,027480 \text{ МПа}$



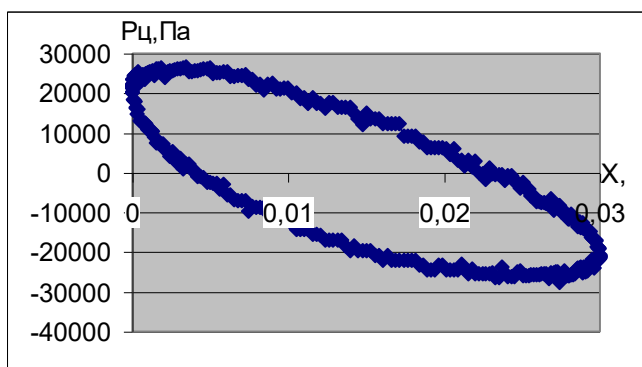
$V_m = 15 \text{ см}^3$; $n = 351 \text{ мин}^{-1}$;
 $P_i = 0,025311 \text{ МПа}$



$V_m = 5 \text{ см}^3$; $n = 364 \text{ мин}^{-1}$;
 $P_i = 0,026709 \text{ МПа}$



$V_m = 20 \text{ см}^3$; $n = 345 \text{ мин}^{-1}$;
 $P_i = 0,024540 \text{ МПа}$



$V_m = 10 \text{ см}^3$; $n = 357 \text{ мин}^{-1}$;
 $P_i = 0,026062 \text{ МПа}$

Рис. 5.6. Индикаторные диаграммы двигателя УДС-1 при разных значениях дополнительного “мертвого” объема

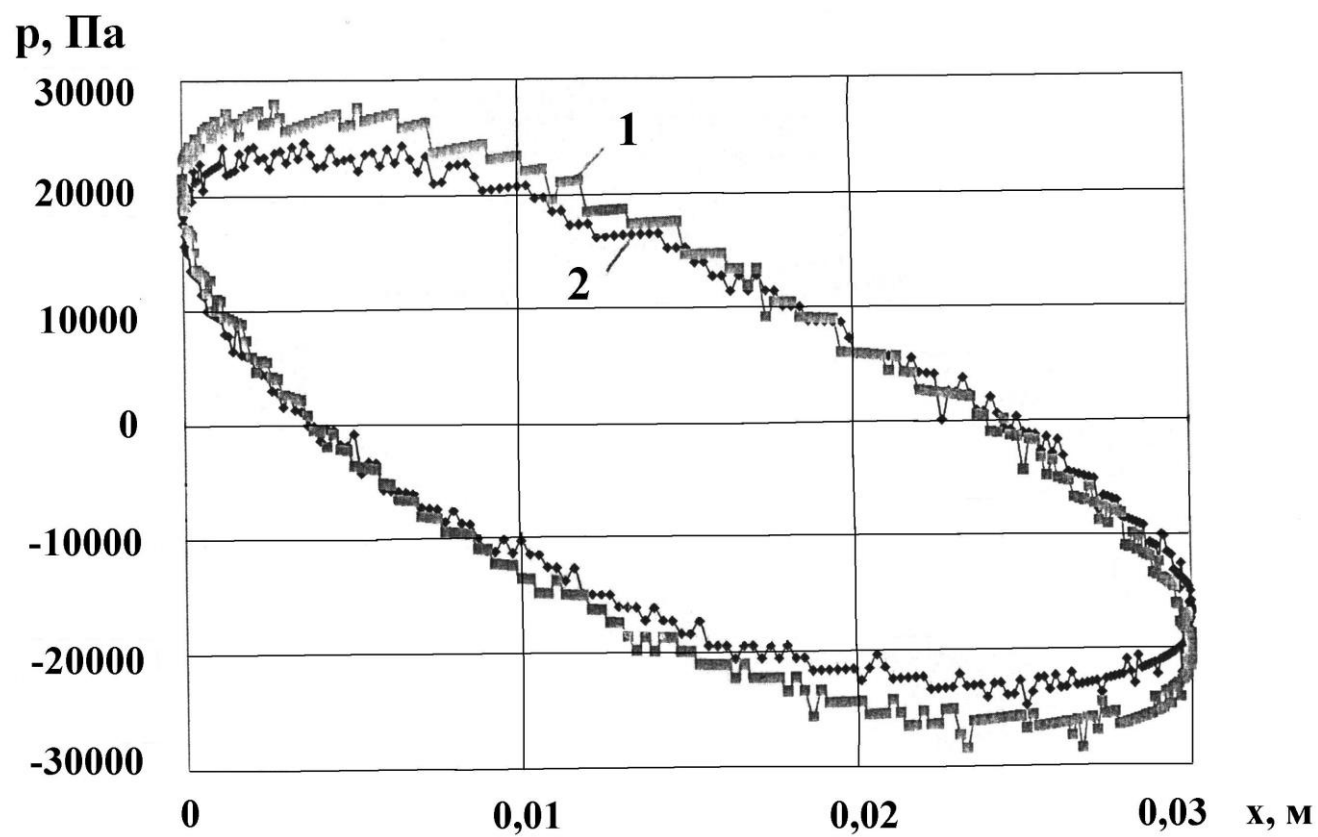


Рис. 5.7. Индикаторные диаграммы двигателя УДС-1:

	$V_m, \text{см}^3$	$p_i, \text{МПа}$	$n, \text{мин}^{-1}$	$N_i, \text{Вт}$	$M_i, \text{Н} \cdot \text{м}$
1.	0	0,0280	378	6,64	0,168
2.	20	0,0252	330	5,22	0,151

На рис. 5.8 построены определенные по индикаторным диаграммам зависимости среднего индикаторного давления p_i и рассчитанные по данным с графика на рис.5.3 среднего эффективного давления p_e от V_m . Видно, что p_i и p_e уменьшаются с увеличением V_m , а так как параметр p_i является первичным, то причиной уменьшения параметров M_e , N_e , η является снижение давления p_i .

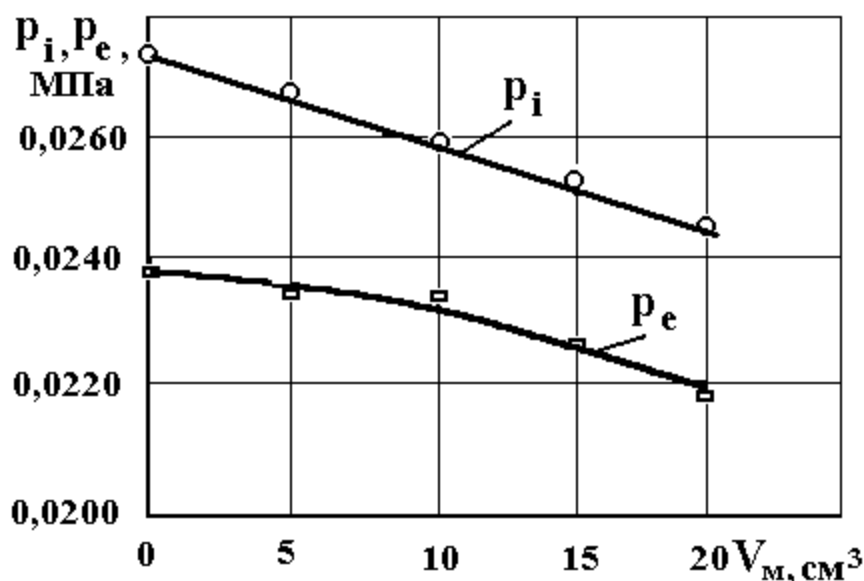


Рис. 5.8. Влияние дополнительного “мертвого” объема на средние индикаторное и эффективное давление в ДС УДС-1

Двигатель УДС-1 не герметичен. Поэтому на значительной части рабочего хода поршня давление в рабочем цилиндре ниже атмосферного (рис. 5.6). Если в это время сообщить рабочий цилиндр с атмосферой, то в него будет поступать воздух, что может привести к повышению мощности двигателя. Для этого в рабочем цилиндре был установлен пластинчатый обратный воздушный клапан, который пропускал воздух снаружи в цилиндр [42]. Индикаторная диаграмма сместилась выше линии атмосферного давления (рис. 5.9, кривая 2), повысилось максимальное давление в цикле, но среднее индикаторное давление не изменилось. Зато возросли механические потери и максимальная эффективная мощность уменьшилась с 3,3 ... 3,4 Вт при $n=380 \dots 400 \text{ мин}^{-1}$ без воздушного клапана до 2,9 Вт при $n=350 \text{ мин}^{-1}$ с

воздушным клапаном, а максимальное значение к.п.д. снизилось с 0,54 ... 0,5% до 0,48%. Таким образом, установка воздушного клапана положительного эффекта не дала. Но этот эксперимент наглядно демонстрирует влияние негерметичности УДС-1 на его индикаторные характеристики.

Описанные опыты свидетельствуют о том, что изменением дополнительного объема V_m можно регулировать мощность двигателя УДС-1. Однако увеличение V_m приводит к снижению к.п.д. двигателя, что, в общем-то, является известным фактом. Но указанное обстоятельство не имеет значения при доводке системы управления ДС на этой модели.

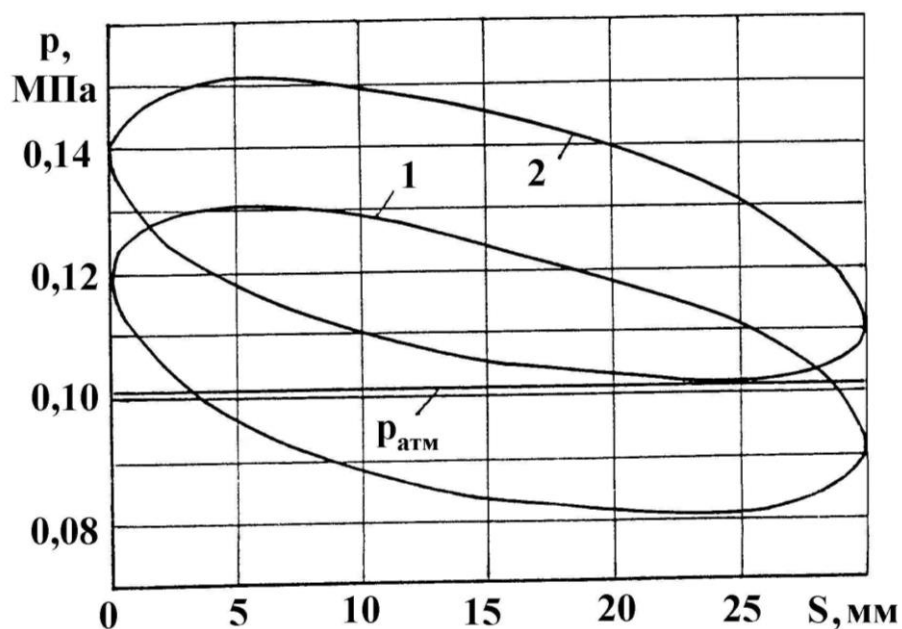


Рис. 5.9. Индикаторные диаграммы двигателя УДС-1:

1 – без воздушного клапана; $n = 409 \text{ мин}^{-1}$; $p_i = 0,0237 \text{ МПа}$;

2 – с воздушным клапаном; $n = 415 \text{ мин}^{-1}$; $p_i = 0,0241 \text{ МПа}$

5.2. Статические характеристики двигателя УДС-1

Для исследования двигателя УДС-1 как регулируемого объекта представляют интерес его внешняя и частичные скоростные статические характеристики и зависимости показателей двигателя от входных параметров:

температуры T_n , величины дополнительного “мертвого” объема, а также скоростная характеристика условных механических потерь двигателя.

Скоростная характеристика двигателя УДС-1 при максимальной или близкой к ней $T_{n \max}$ является внешней скоростной характеристикой. Такая характеристика показана на рис. 5.10 [81, 82]. Она снята при отключенном дополнительном “мертвом” объеме в интервале частот вращения вала от минимальной устойчивой $n_{\min}=200 \text{ мин}^{-1}$ до максимальной на холостом ходу $n_{xx \max}=785 \text{ мин}^{-1}$. Температура $T_{n \max}=915 \text{ К}$ поддерживалась постоянной путем изменения вручную расхода нефтяного газа через горелку.

На рис. 5.10 видно, что зависимости N_e и M_e от частоты вращения коленчатого вала подобны аналогичным зависимостям на скоростных характеристиках бензиновых ДВС с искровым зажиганием. Максимальная мощность $N_{e \max}=7,7 \text{ Вт}$ достигается при $n=400 \text{ мин}^{-1}$. Температуры $T_{\text{гор}}$ и $T_{\text{хол}}$ в пределах скоростной характеристики изменяются незначительно. Рабочей зоной характеристики можно считать интервал частот вращения от 200 до 400...450 мин^{-1} . При дальнейшем повышении частоты вращения N_e снижается, так как все большая доля индикаторной мощности расходуется на преодоление потерь энергии в самом двигателе, а при $n=785 \text{ мин}^{-1}$ на это уходит уже вся индикаторная мощность.

На рис. 5.11 показаны внешняя и частичные скоростные характеристики, полученные при разных постоянных значениях температуры T_n . По мере снижения T_n кривые эффективной мощности и крутящего момента смещаются в сторону уменьшения этих параметров, максимальная частота вращения становится меньше.

На рис. 5.12 показаны зависимости крутящего момента M_e от температуры T_n при постоянных значениях частоты вращения коленчатого вала. При каждом значении n крутящий момент практически линейно возрастает с увеличением температуры T_n , которая зависит от подачи топлива в камеру сгорания двигателя.

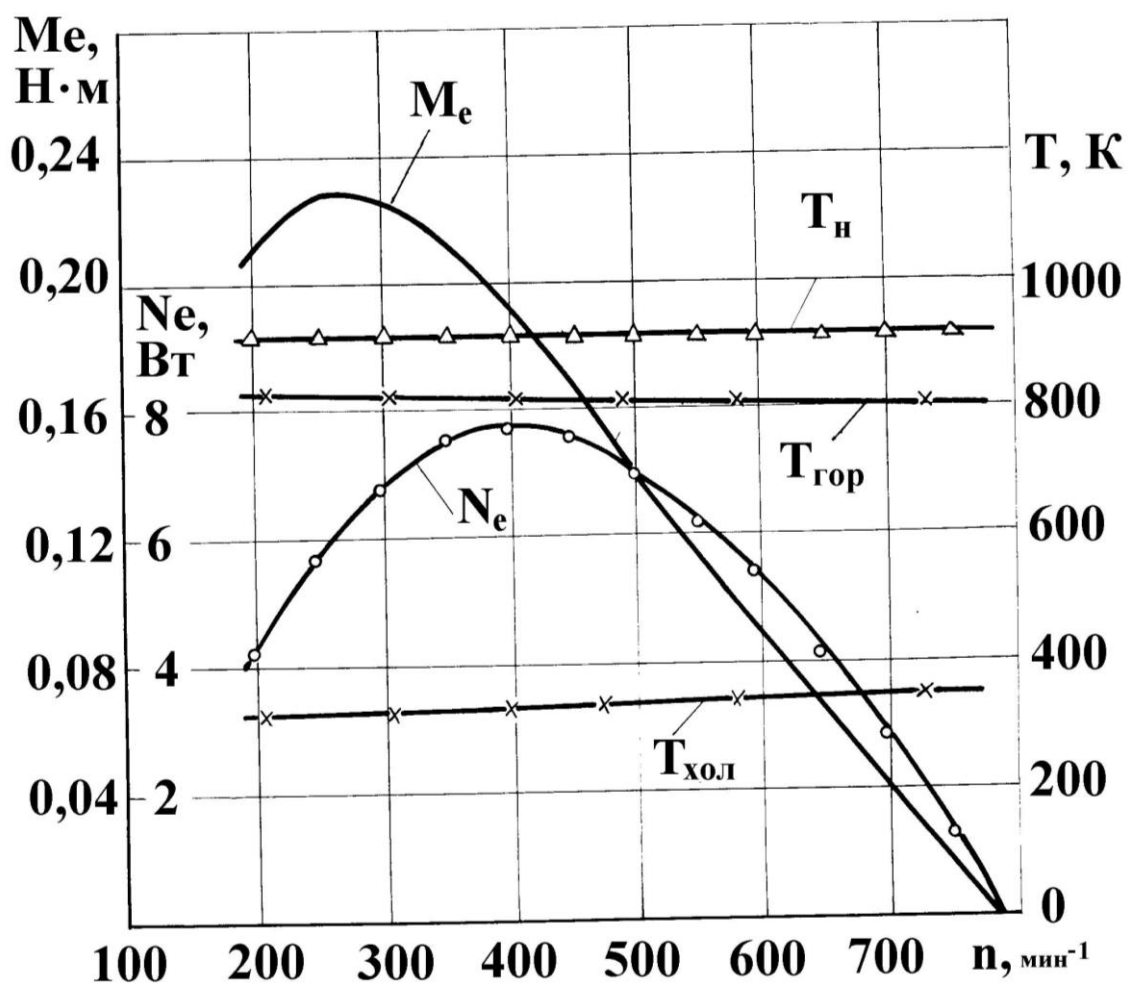


Рис. 5.10. Внешняя скоростная характеристика двигателя УДС-1

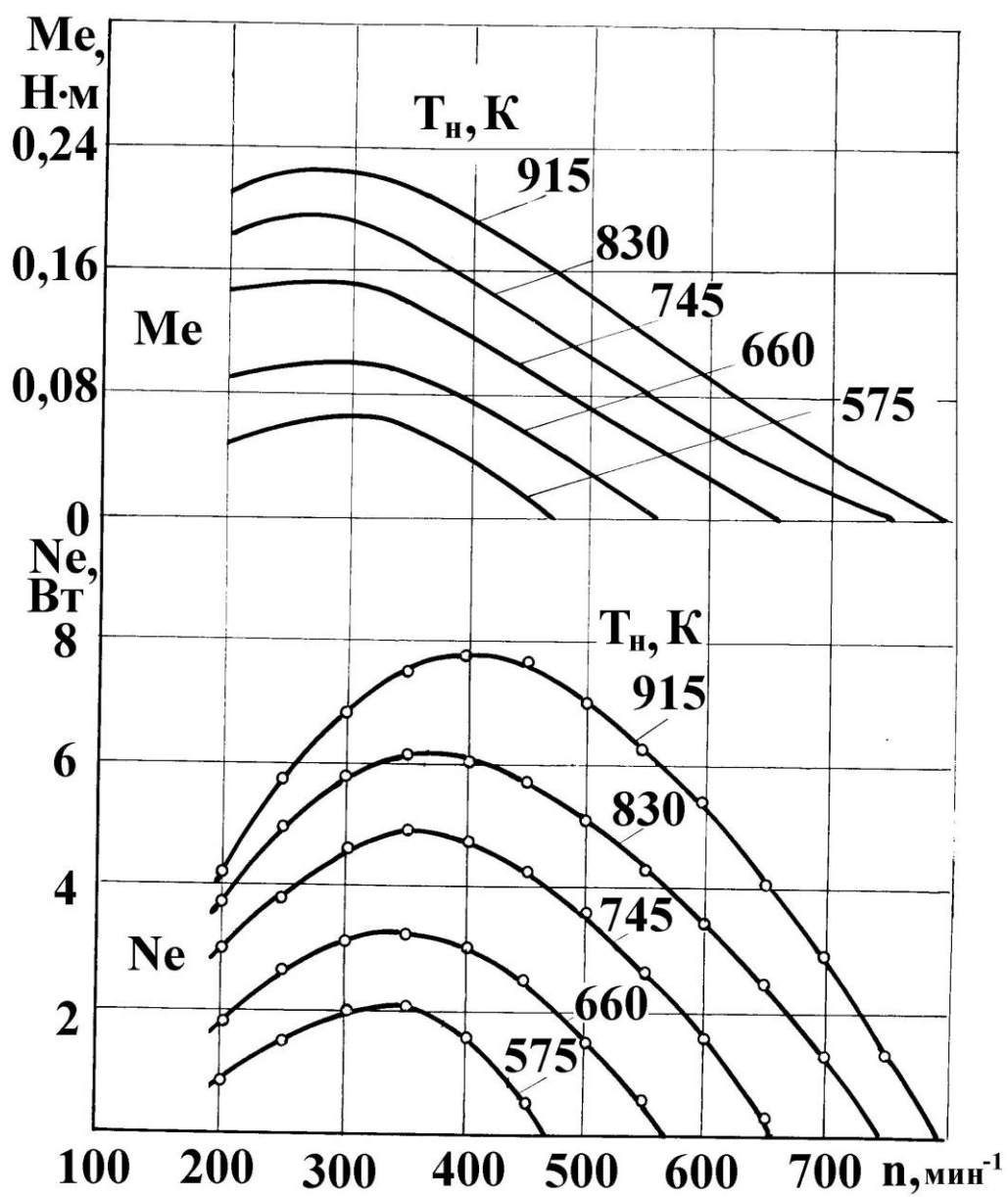


Рис. 5.11. Скоростные характеристики двигателя УДС-1

На рис. 5.13 построены зависимости крутящего момента M_e от температуры T_n при трех постоянных значениях дополнительного “мертвого” объема и постоянной частоте вращения $n=400 \text{ мин}^{-1}$. Как видно при каждом значении V_m крутящий момент линейно увеличивается с ростом температуры T_n .

Скоростные характеристики условных механических потерь поршневых ДВС получают опытным путем, например, прокручиванием их коленчатого вала с помощью электрического двигателя. Для ДС такой метод не подходит, так как при вращении его вала от электродвигателя ДС начинает работать как холодильная машина.

Поэтому условные механические потери в двигателе УДС-1 определялись следующим способом [83].

Известно, что мощность условных механических потерь в тепловых двигателях равна:

$$N_m = N_i - N_e, \quad (5.1)$$

где N_i , N_e – индикаторная и эффективная мощности, соответственно.

На СЭА при постоянной температуре стенки дополнительного цилиндра снималась скоростная характеристика двигателя путем изменения нагрузки на электрический генератор. При снятии характеристики на разных установившихся скоростных режимах работы производилось индицирование давления в рабочем цилиндре, изменялись эффективная мощность и частота вращения вала двигателя УДС-1.

По индикаторным диаграммам вычисляли индикаторную мощность и по уравнению (5.1) – мощность N_m .

Естественно, что в полученные значения N_m входят потери в генераторе и ременном приводе, т.е. это мощность механических потерь не двигателя, а всего СЭА вместе с первичным двигателем. Как раз это и необходимо для математической модели.

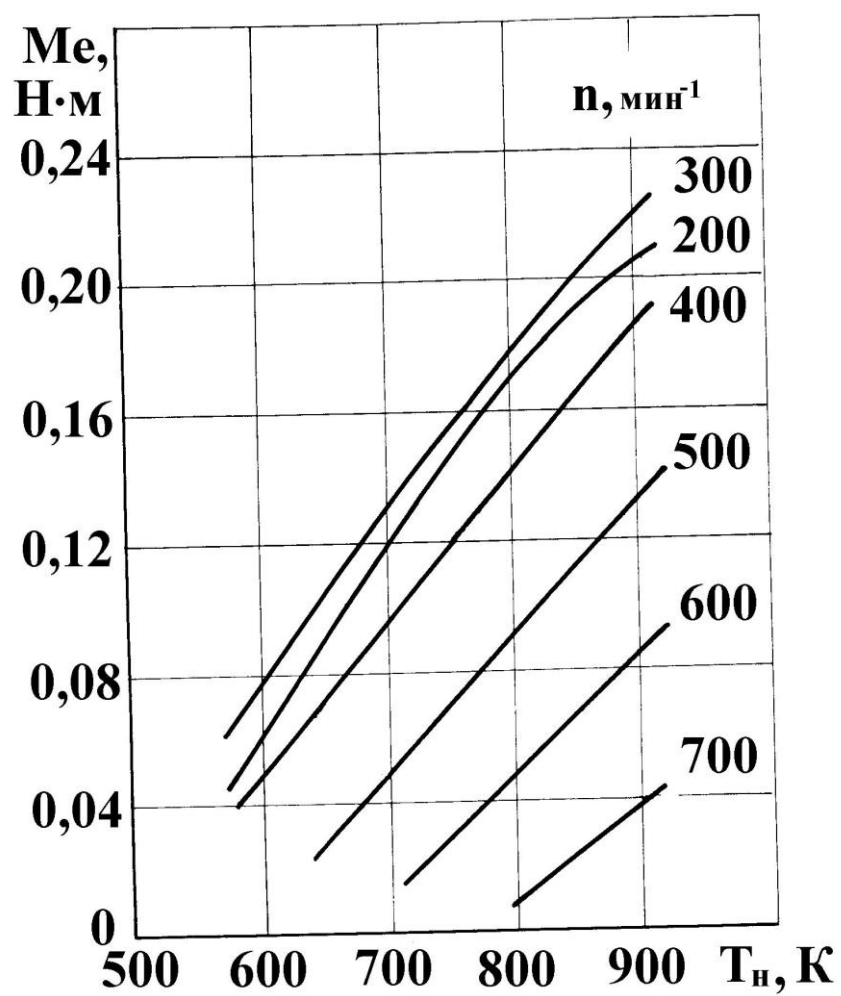


Рис. 5.12. Зависимости крутящего момента от температуры T_n и частоты вращения коленчатого вала двигателя УДС-1

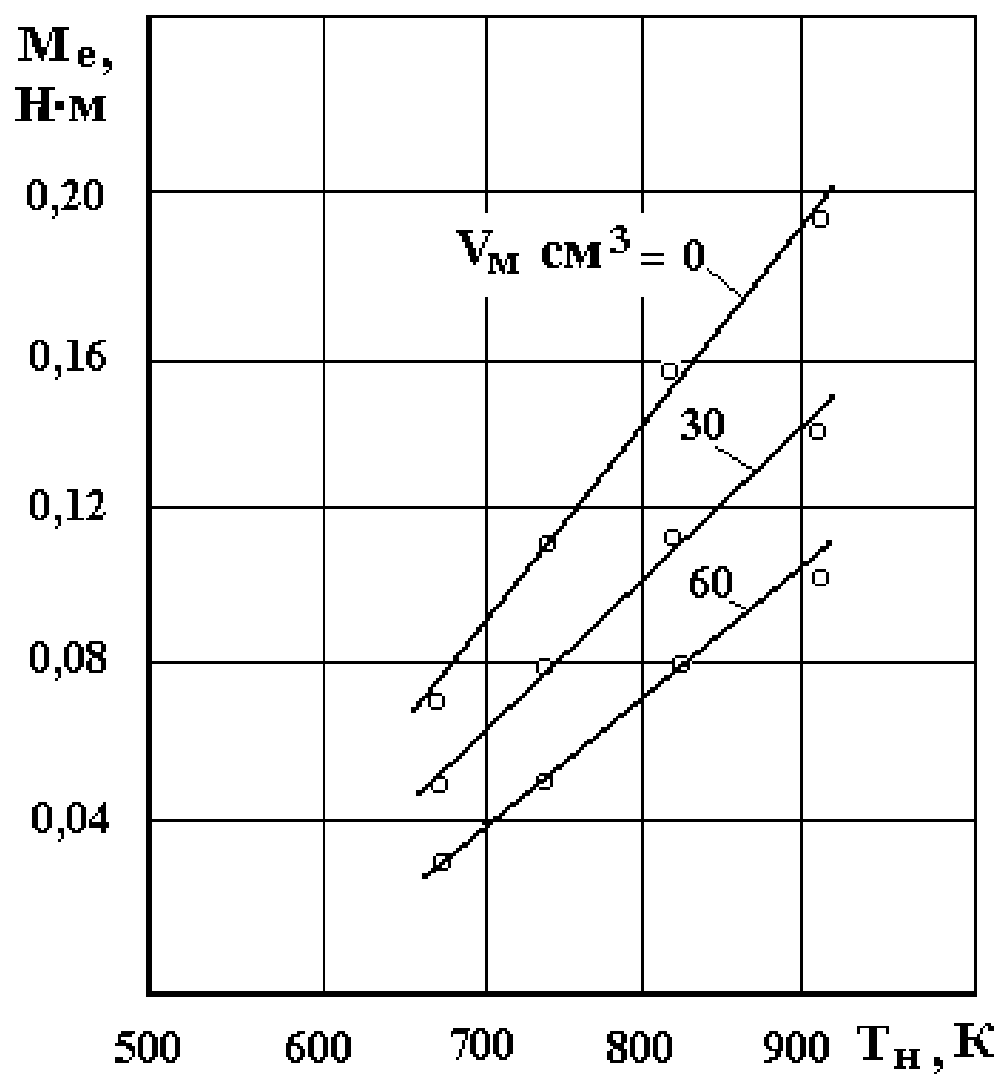


Рис. 5.13. Зависимости крутящего момента от температуры T_n и дополнительного объема при $n=400 \text{ мин}^{-1}$

На рис. 5.14 показана полученная таким методом скоростная характеристика двигателя УДС-1, на которой построены зависимости индикаторной и эффективной мощностей и мощности условных механических потерь от частоты вращения коленчатого вала двигателя [84]. Характеристика снята при температуре $T_H=920$ К.

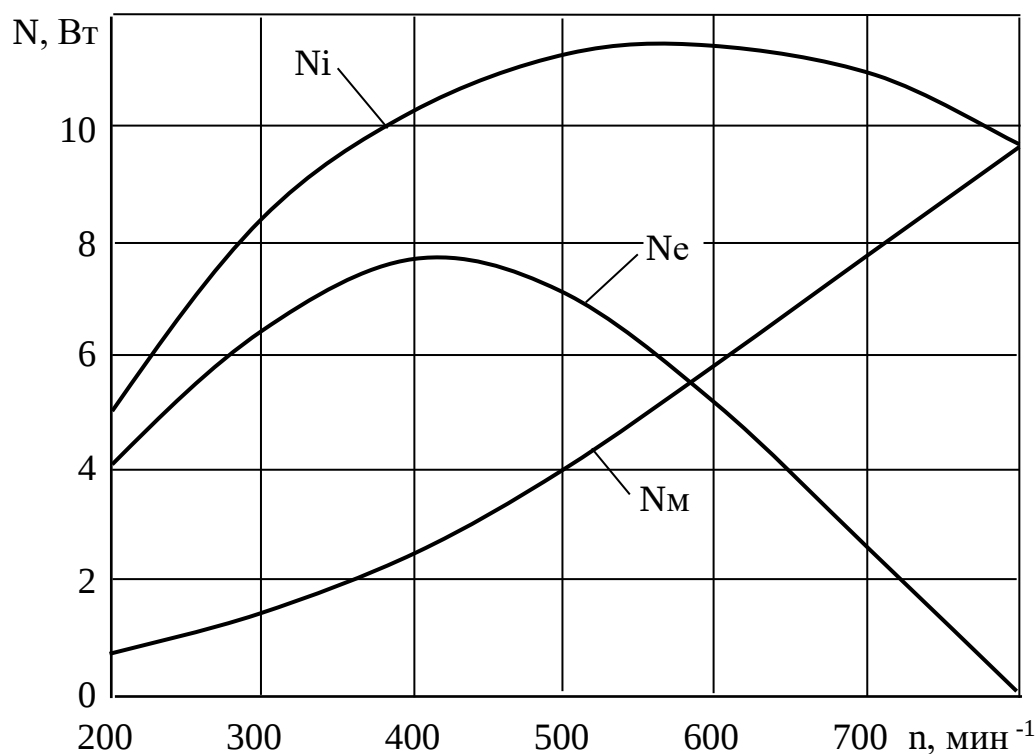


Рис. 5.14. Скоростная характеристика двигателя УДС-1

Мощность N_i быстро возрастает до частоты вращения $n=550$ мин⁻¹, а затем постепенно уменьшается. Мощность N_m параболически возрастает с ростом частоты вращения, а мощность N_e достигает максимума при $n=450$ мин⁻¹, а затем уменьшается до нуля при $n=785$ мин⁻¹. При этой частоте вращения $N_m=N_i$.

На рис. 5.15 построена посчитанная по данным взятым с рис. 5.14, зависимость момента M_m условных механических потерь от частоты вращения

коленчатого вала n . Видно, что эта зависимость имеет параболический характер. Для математической модели она аппроксимирована полиномом

$$M_{\text{м}} = 0,0504 - 5,5607 \cdot 10^{-5} \cdot n + 2,0178 \cdot 10^{-7} \cdot n^2. \quad (5.2)$$

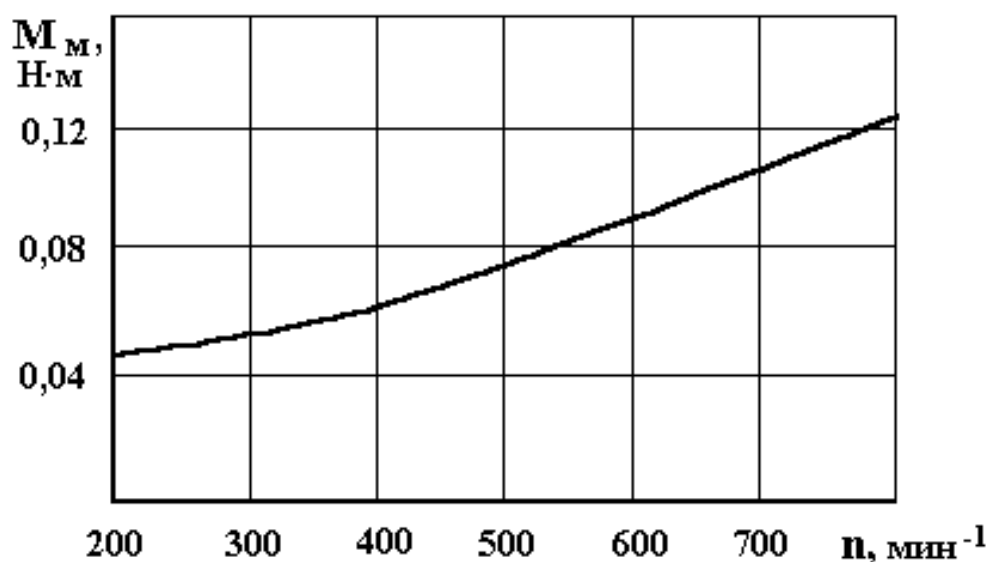


Рис. 5.15. Скоростная характеристика условных механических потерь двигателя УДС-1 при $T_n=920\text{K}$

5.3. Определение коэффициентов аппроксимирующего уравнения скоростных характеристик двигателя УДС-1

Как было показано в предыдущих разделах основной статической характеристикой двигателя УДС-1 как регулируемого объекта является зависимость индикаторного крутящего момента от трех независимых параметров: частоты вращения коленчатого вала, температуры рабочего тела в горячей полости и дополнительного “мертвого” объема. Эксперименты показывают, что опытная зависимость $M_i=M_i(n, T_{\text{гор}}, V_m)$ может быть аппроксимирована полиномом 2-ой степени с тремя аргументами.

В соответствии с известными методиками планирования многофакторных экспериментов использован равномерный план трехфакторного эксперимента на 15 точках [60, 85].

Границы исследуемой области приняты из условия охвата всего поля возможных скоростных и нагрузочных режимов работы двигателя. Этим условиям соответствуют:

$$T_{гор\ min}=513K$$

$$T_{гор\ max}=833K$$

$$n_{min}=0$$

$$n_{max}=600\ \text{мин}^{-1}$$

$$V_{м\ min}=60\ \text{см}^3$$

$$V_{м\ max}=0$$

Принято $V_{м\ min}=60\ \text{см}^3$, а $V_{м\ max}=0$ потому что с увеличением $V_{м}$ крутящий момент M_i уменьшается.

Начальные параметры:

$$T_{гор.нач} = \frac{513 + 833}{2} = 673K;$$

$$n = \frac{0 + 600}{2} = 300\ \text{мин}^{-1};$$

$$V_{м} = \frac{60 + 0}{2} = 30\ \text{см}^3.$$

Шаги нормирования:

$$\Delta T_{гор} = \frac{833 - 513}{4} = 80K;$$

$$\Delta n = \frac{600 - 0}{4} = 150\ \text{мин}^{-1};$$

$$\Delta V_{м} = \frac{0 - 60}{4} = -15\ \text{см}^3.$$

В табл. 5.1 приведены безразмерные и размерные значения перечисленных факторов в опытных точках и соответствующие им опытные значения индикаторного крутящего момента.

С использованием этих данных по методике, описанной, например, в работе [60], получено аппроксимирующее уравнение:

$$\begin{aligned}
M_i = & -0,31109 + 0,68912 \cdot 10^{-3} T_{\text{гор}} + 0,70121 \cdot 10^{-3} n + \\
& + 0,15462 \cdot 10^{-2} V_m - 0,13238 \cdot 10^{-6} T_{\text{гор}}^2 - 0,98765 \cdot 10^{-6} n^2 + \\
& + 0,1345 \cdot 10^{-6} V_m^2 - 0,11979 \cdot 10^{-6} T_{\text{гор}} n - 0,36458 \cdot 10^{-5} T_{\text{гор}} V_m + \\
& + 0,10348 \cdot 10^{-12} n V_m
\end{aligned} \quad (5.3)$$

В табл. 5.1 приведены расчетные значения M_{ip} , вычисленные по уравнению (5.3) и расхождения δ между $M_{i \text{ оп}}$ и M_{ip} . Как видно, расхождение между $M_{i \text{ оп}}$ и M_{ip} в каждой опытной точке не превышает точности измерений крутящего момента $M_{i \text{ оп}}$. Это говорит об адекватности математической модели двигателя УДС-1 как регулируемого объекта.

По уравнению (5.3) рассчитаны показанные на рис. 5.16 скоростные характеристики двигателя УДС-1 в виде зависимостей индикаторного крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала ДС при разных значениях температуры $T_{\text{гор}}$. На скоростные характеристики нанесены контрольные опытные точки, которые близко совпадают с расчетными кривыми.

На рис. 5.17 построены рассчитанные по уравнению (5.3) скоростные характеристики двигателя УДС-1 при разных значениях дополнительного “мертвого” объема и постоянном расходе газового топлива $G_T=0,5$ кг/ч.

Температура стенки нагревателя оставалась постоянной и равнялась $T_n=913\text{K}$. Объем V_m увеличивали до 120 см^3 , т.е. выходили за пределы принятой при факторных опытах исследуемой области $V_{m \text{ max}}=60 \text{ см}^3$. Однако результаты расчетов говорят о том, что и в этом случае математическая модель является справедливой. Сравнение этих характеристик с характеристиками, показанными на рис. 5.11, свидетельствует о том, что уменьшение V_m оказывает на них качественно аналогичное влияние.

Аналогично влияет на скоростные характеристики при увеличенном “мертвом” объеме уменьшение температуры T_n , что видно из рис. 5.18. На нем показаны скоростные характеристики двигателя УДС-1 при разных значениях V_m при расходе горючего газа $G_T=0,25$ кг/ч, которому соответствует

температура $T_H=785\text{K}$. Все характеристики сместились в сторону уменьшения M_e и N_e .

Таблица 5.1

Безразмерные и размерные значения факторов $T_{гор}$, n , V_M
и соответствующие им опытные $M_{i\text{ оп}}$ и расчетные $M_{i\text{ расч}}$
значения индикаторного крутящего момента

№ опыта	Z1	Z2	Z3	$T_{гор}$, К	n , мин^{-1}	V_M , см^3	$M_{i\text{ оп}}$, Нм	$M_{i\text{ р}}$, Нм	$\delta=M_{i\text{ оп}}-M_{i\text{ р}}$, Нм
1	1	1	1	833	600	0	0,175	0,1764	-0,0014
2	1	1	-1	833	600	60	0,085	0,0874	-0,0024
3	1	-1	1	833	0	0	0,170	0,1711	-0,0011
4	1	-1	-1	833	0	60	0,080	0,0821	-0,0021
5	-1	1	1	513	600	0	0,038	0,0359	0,0021
6	-1	1	-1	513	600	60	0,018	0,0169	0,0011
7	-1	-1	1	513	0	0	0,010	0,0076	0,0024
8	-1	-1	-1	513	0	60	-0,010	-0,0114	0,0014
9	0	0	0	673	300	30	0,163	0,1629	0,0001
10	1	0	0	833	300	30	0,225	0,2180	0,007
11	-1	0	0	513	300	30	0,094	0,1010	0,007
12	0	1	0	673	600	30	0,083	0,0824	0,0006
13	0	-1	0	673	0	30	0,065	0,0656	-0,0006
14	0	0	1	673	300	0	0,188	0,1900	-0,002
15	0	0	-1	673	300	60	0,138	0,1360	0,002

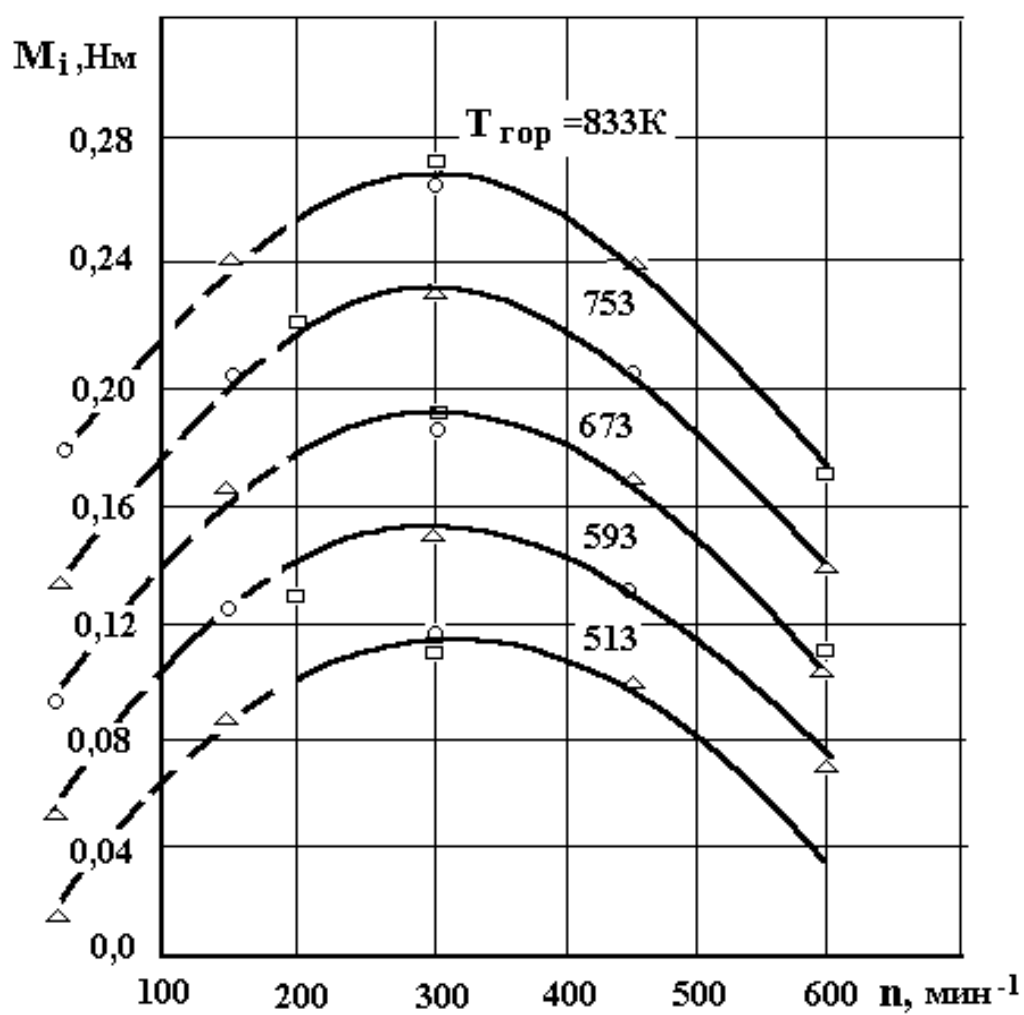


Рис. 5.16. Расчетные скоростные характеристики двигателя УДС-1:
 о, Δ - расчет по уравнению (5.3); $\square$ - контрольные опыты

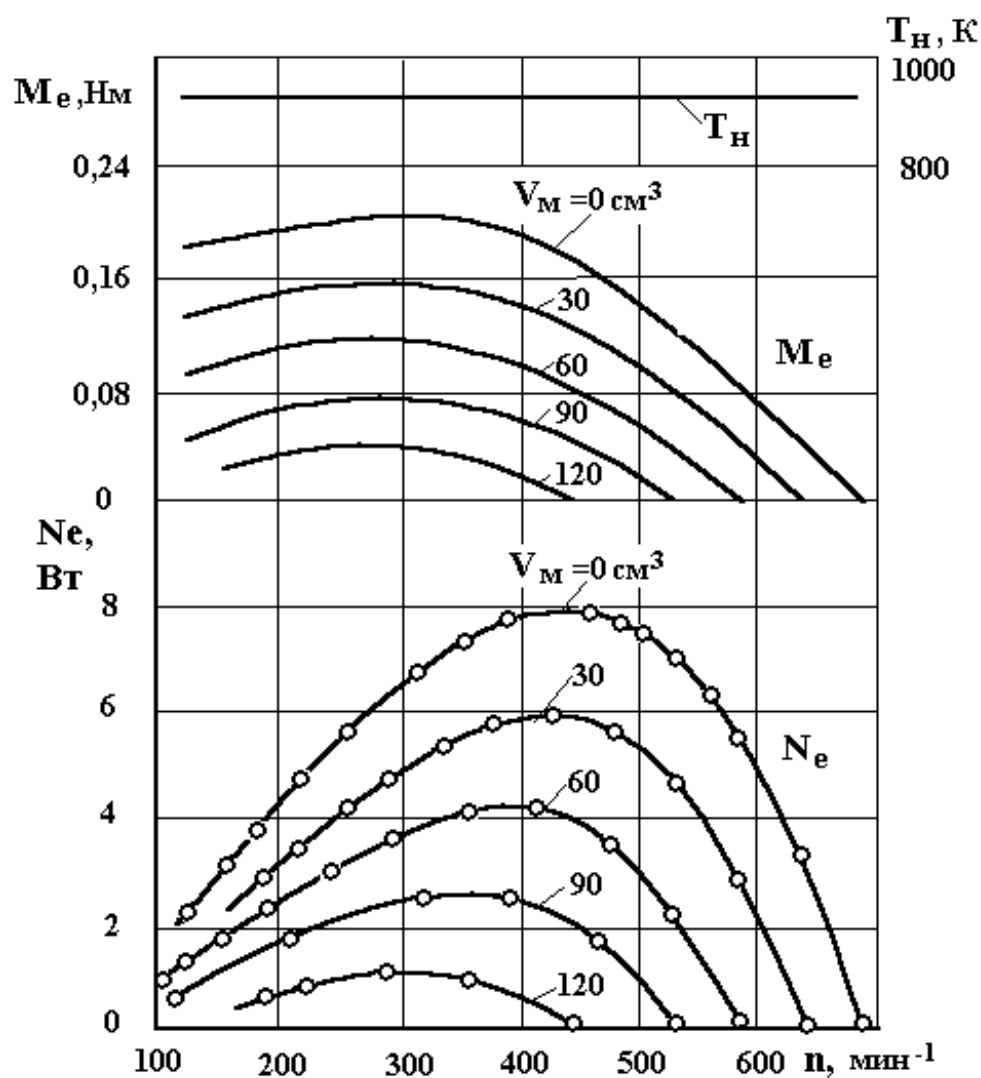


Рис. 5.17. Расчетные скоростные характеристики двигателя УДС-1 при $G_T=0,5 \text{ кг/ч}$ и $V_M=\text{var}$

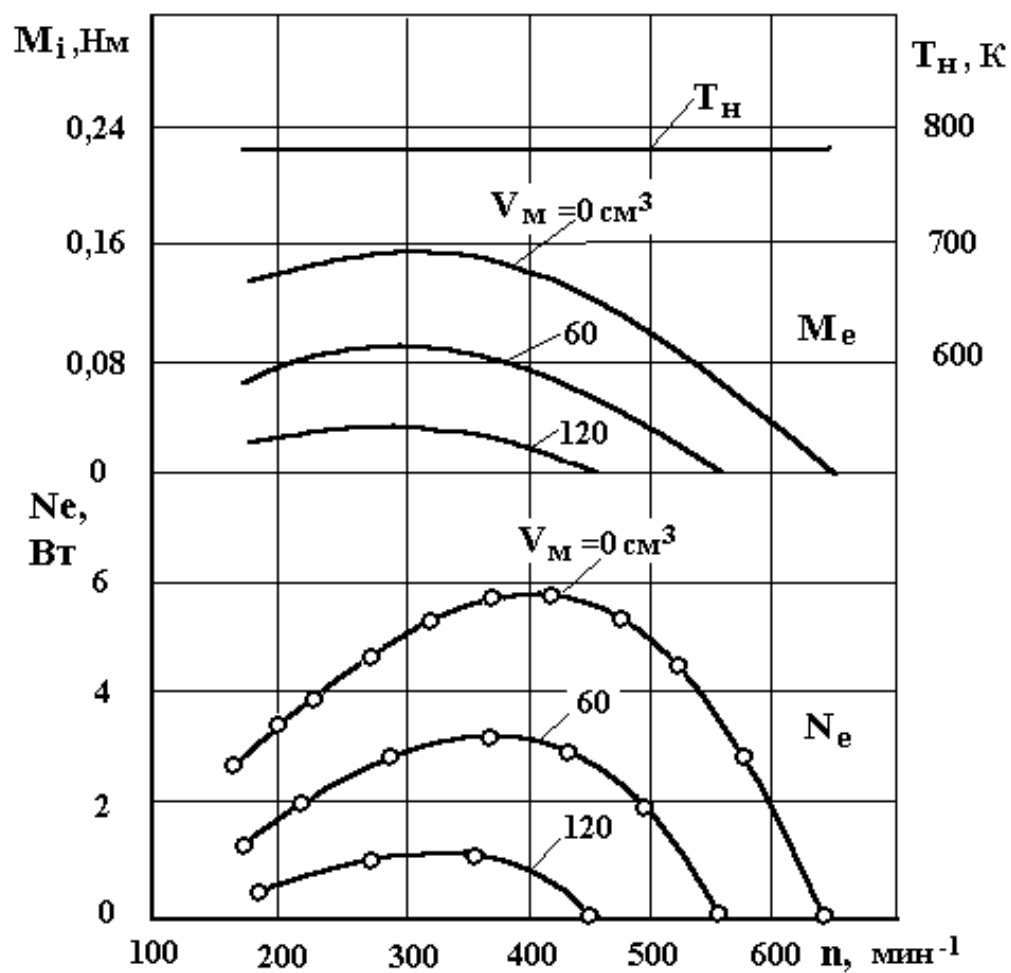


Рис. 5.18. Расчетные скоростные характеристики двигателя УДС-1 при $G_T=0,25 \text{ кг/ч}$ и $V_M=\text{var}$

5.4. Характеристики дозатора горючего газа и температуры продуктов сгорания

Конический затвор дозатора горючего газа имеет шток с винтовой резьбой М10. При вращении штока затвор перемещается в осевом направлении. Шток соединен с выходным валом планетарного редуктора. От полного выключения подачи газа до подачи 0,6 кг/ч затвор перемещается на 3 мм, при этом выходной вал редуктора совершает 2 оборота, т.е. поворачивается на 720 град.

Давление газа на выходе из газового редуктора (перед дозатором газа) 104 кПа. Опытная характеристика дозатора газа в виде зависимости расхода G_T газа от углового положения штока его конического затвора показана на рис. 5.19.

В интервале расходов газа от 0,1 до 0,5 кг/ч характеристика практически линейная. При $G_T < 0,1$ кг/ч и $G_T > 0,5$ кг/ч появляются существенные нелинейности. Но при $G_T < 0,1$ кг/ч двигатель перестает работать, а значение $G_T = 0,5$ кг/ч соответствует, как показали измерения, предельно допустимой температуре стенки нагревателя $T_H = 930...950$ К. Поэтому рабочий участок характеристики находится в интервале от 0,1 до 0,5 кг/ч, которому соответствует угол поворота штока затвора $\varphi_T = 200...520$ град.

Этот участок аппроксимирован уравнением:

$$G_n = 0,1 + 0,0153(\varphi_z - 200). \quad (5.4)$$

Температура $T_{к.с.}$ в потоке продуктов сгорания, омывающих горячую часть дополнительного цилиндра, измерялась с помощью хромель-алюмелиевого датчика ХА68, установленного на расстоянии 20 мм от торца дополнительного цилиндра и на расстоянии 10 мм от его боковой поверхности. В обоих случаях показания температуры были практически одинаковые.

В камеру сгорания двигателя УДС-1 воздух поступает под действием естественной тяги, расход его не регулируется. Поэтому температура продуктов сгорания зависит только от часового расхода горючего газа через горелку.

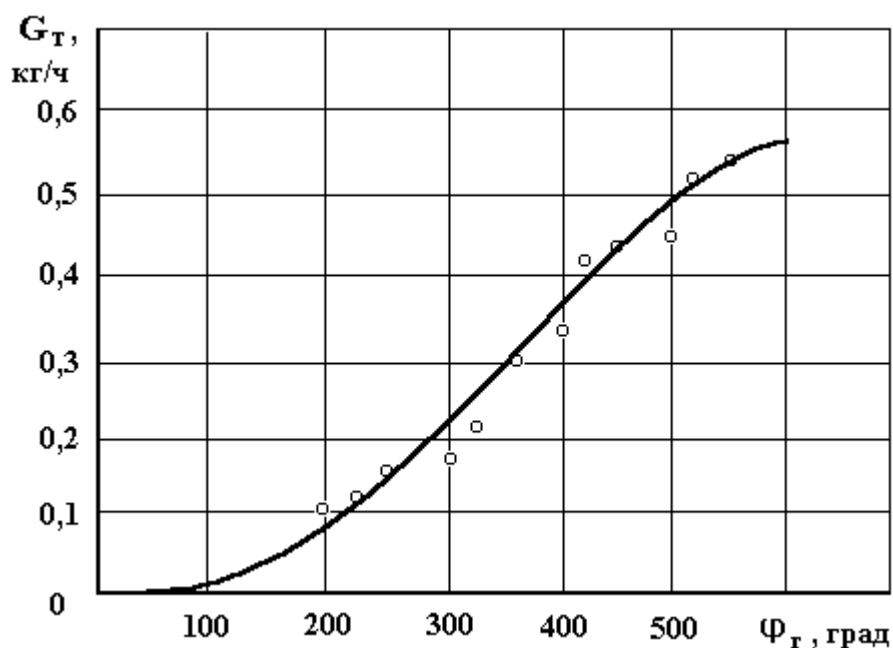


Рис. 5.19. Характеристика дозатора горючего газа двигателя УДС-1

На рис. 5.20 показана опытная зависимость температуры $T_{к.с.}$ от расхода газового топлива при разных значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя УДС-1. В интервале $G_T=0,1\dots0,6$ кг/ч эта зависимость линейная и частота вращения n на нее практически не влияет.

Эта зависимость аппроксимирована уравнением:

$$T_{к.с.} = 740 + 640 \cdot G_T. \quad (5.5)$$

Это уравнение использовалось в математической модели САУ УДС-1.

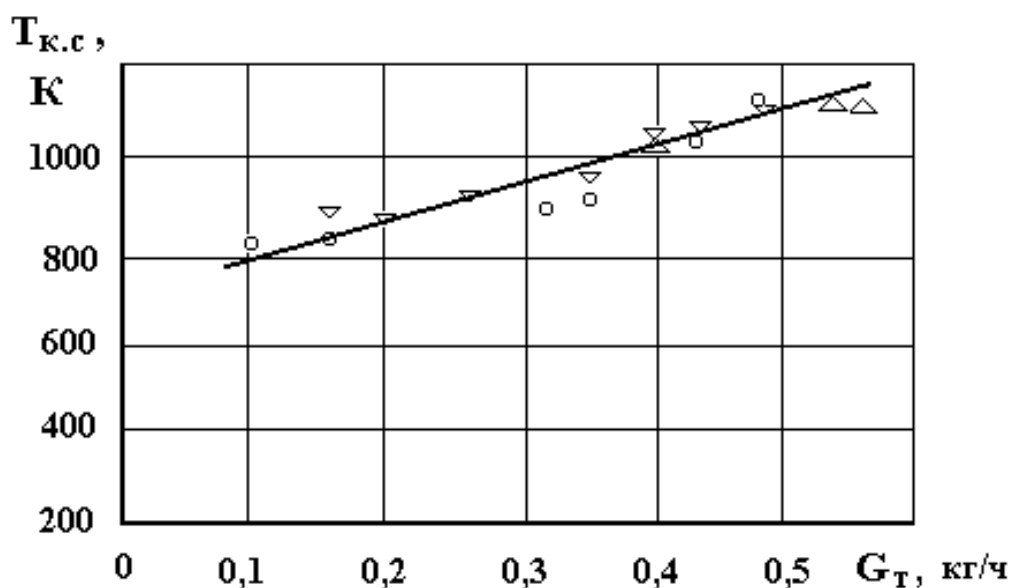


Рис. 5.20. Зависимость температуры продуктов сгорания в двигателе УДС-1 от расхода топлива G_T при n , мин $^{-1}$:
 о – 200...220; Δ - 290...305; ∇ - 385...405

5.5. Скоростные характеристики электрогенератора постоянного тока

На рис. 5.21 построены полученные экспериментально скоростные характеристики генератора постоянного тока, который входит в состав мини Стирлинг - электрического агрегата с ДС модели УДС-1. На нем изображены зависимости напряжения u , силы тока I и момента нагрузки (сопротивления) M_T генератора от частоты вращения n при разных постоянных значениях омического сопротивления нагрузочного реостата $R=5, 20, 35, 50$ и 65 Ом.

Видно, что напряжение возрастает с ростом частоты вращения и практически не зависит от величины сопротивления R . Сила тока I линейно зависит от частоты вращения коленчатого вала и уменьшается с ростом сопротивления. Момент M_T тоже зависит и от n , и от R , причем зависимости u и M_T от n слегка нелинейные.

На рис. 5.22 построены зависимости M_r и силы тока I от сопротивления R при постоянных значениях частоты вращения $n=200, 300, 400, 500$ и 600 мин⁻¹. Видно, что эти зависимости имеют гиперболический характер. Поэтому для задания момента M_r близкого к нулю требуется сопротивление реостата порядка 1200 Ом.

При нагрузке от $M_r=0,17$ до $M_r=0,045$ Нм генератор хорошо реагирует на изменение сопротивления R реостата в пределах от 5 до 65 Ом. При дальнейшем снижении нагрузки чувствительность генератора к изменению R резко уменьшается.

На рис. 5.23 показаны зависимости ω , I и M_r от частоты вращения коленчатого вала (скоростная характеристика), полученные с реостатом, имеющим максимальное сопротивление 250 Ом. Они являются продолжением характеристик, полученных с реостатом с максимальным сопротивлением 65 Ом. Видно, что с увеличением сопротивления R момент генератора M_r стал меньше, т.е., чем больше R , тем меньше M_r .

Показанные на рис. 5.21 зависимости $M_r=M_r(n,R)$ аппроксимируются полиномом:

$$M_r = 0,12573 + 0,18490 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,52700 \cdot 10^{-2} \cdot R + 0,23539 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 0,74906 \cdot 10^{-4} \cdot R^2 - 0,62549 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot R \quad (5.6)$$

А зависимости $M_r=M_r(n,R)$ показанные на рис.5.22, аппроксимируются полиномом:

$$M_r = 0,052322 + 0,35177 \cdot 10^{-4} \cdot n - 0,27437 \cdot 10^{-3} \cdot R + 0,18101 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,92240 \cdot 10^{-6} \cdot R^2 - 0,26471 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot R \quad (5.7)$$

Оба полинома использованы в математической модели САПР двигателя УДС-1.

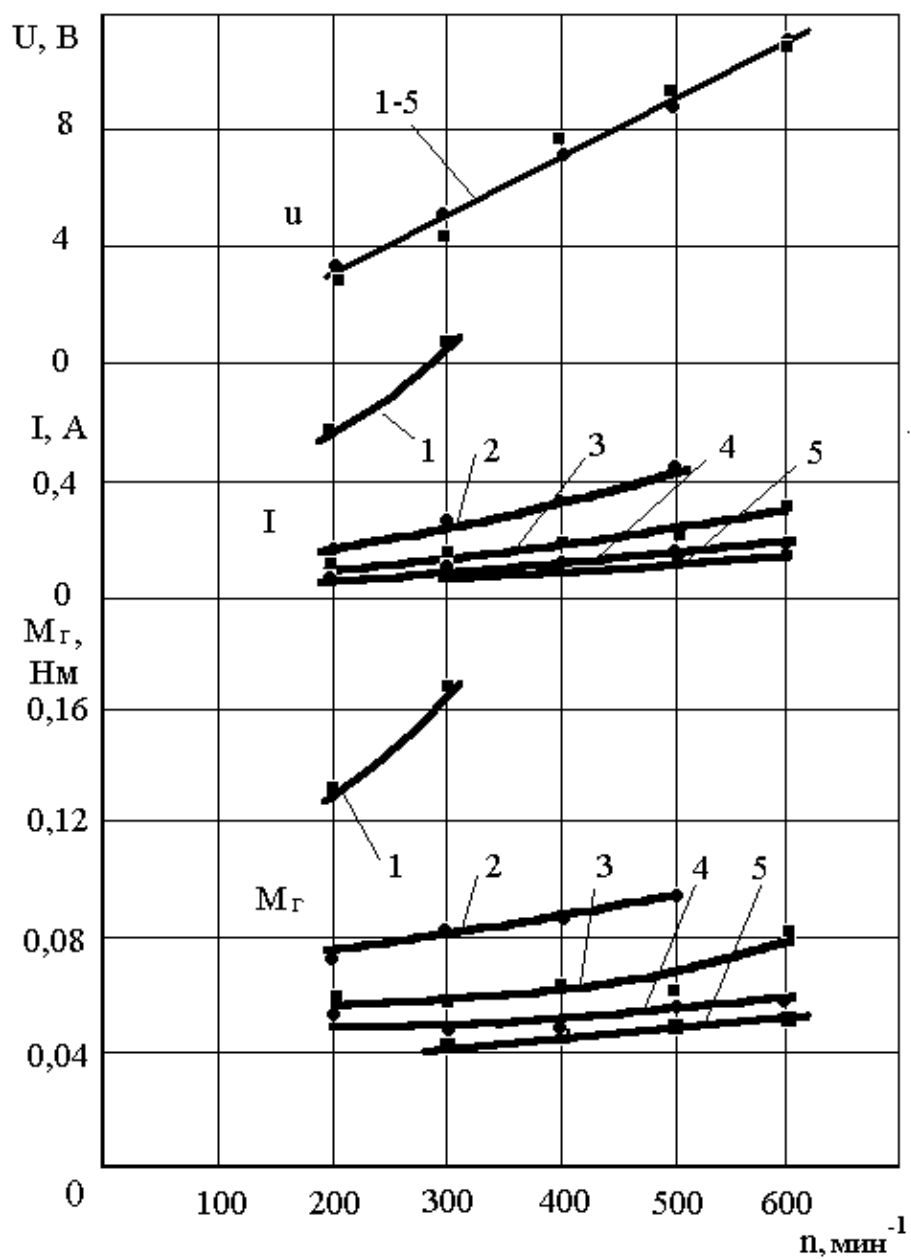


Рис. 5.21. Скоростные характеристики электрогенератора мини СЭА:
сопротивление реостата, Ом: 1 – 5; 2 – 20; 3 – 35; 4 – 50; 5 – 65

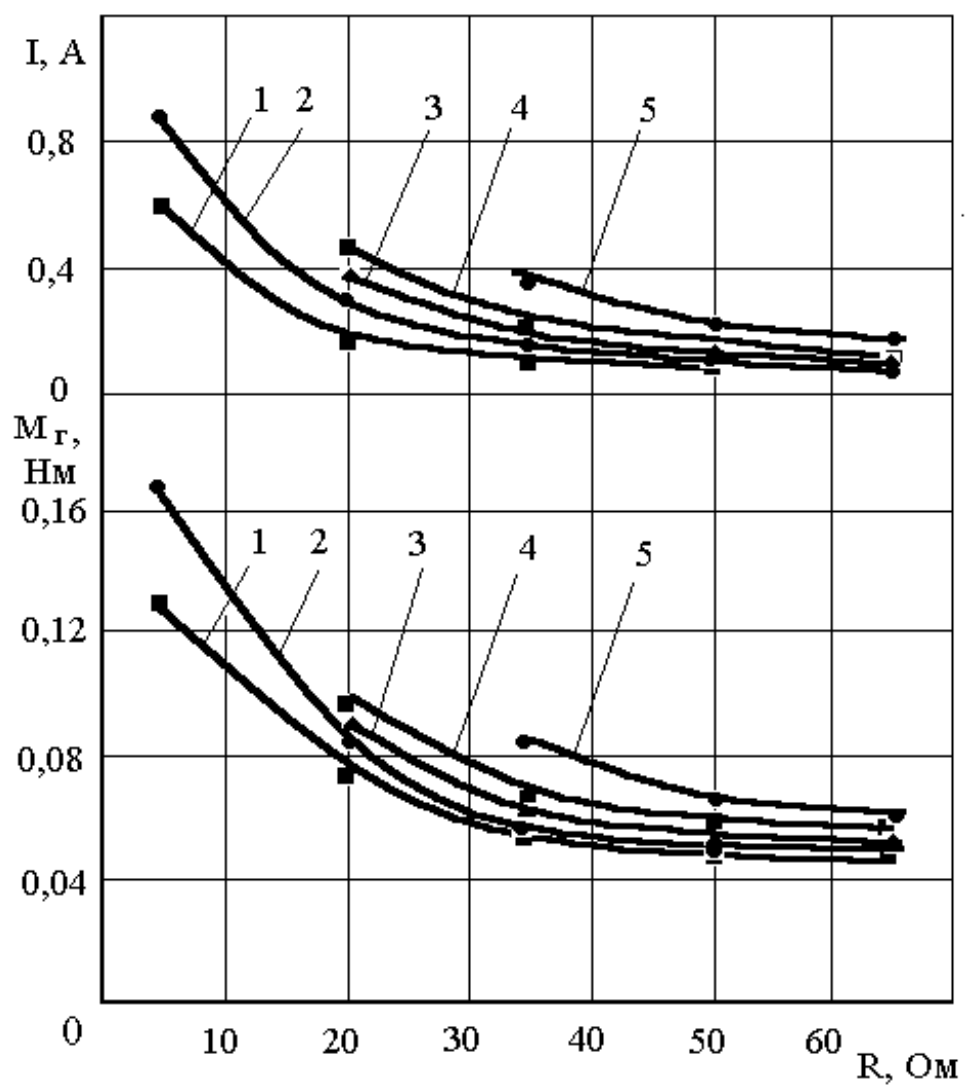


Рис. 5.22. Характеристики генератора мини СЭА с первичным двигателем УДС-1:

частота вращения, мин^{-1} : 1 – 200; 2 – 300; 3 – 400; 4 – 500; 5 – 600

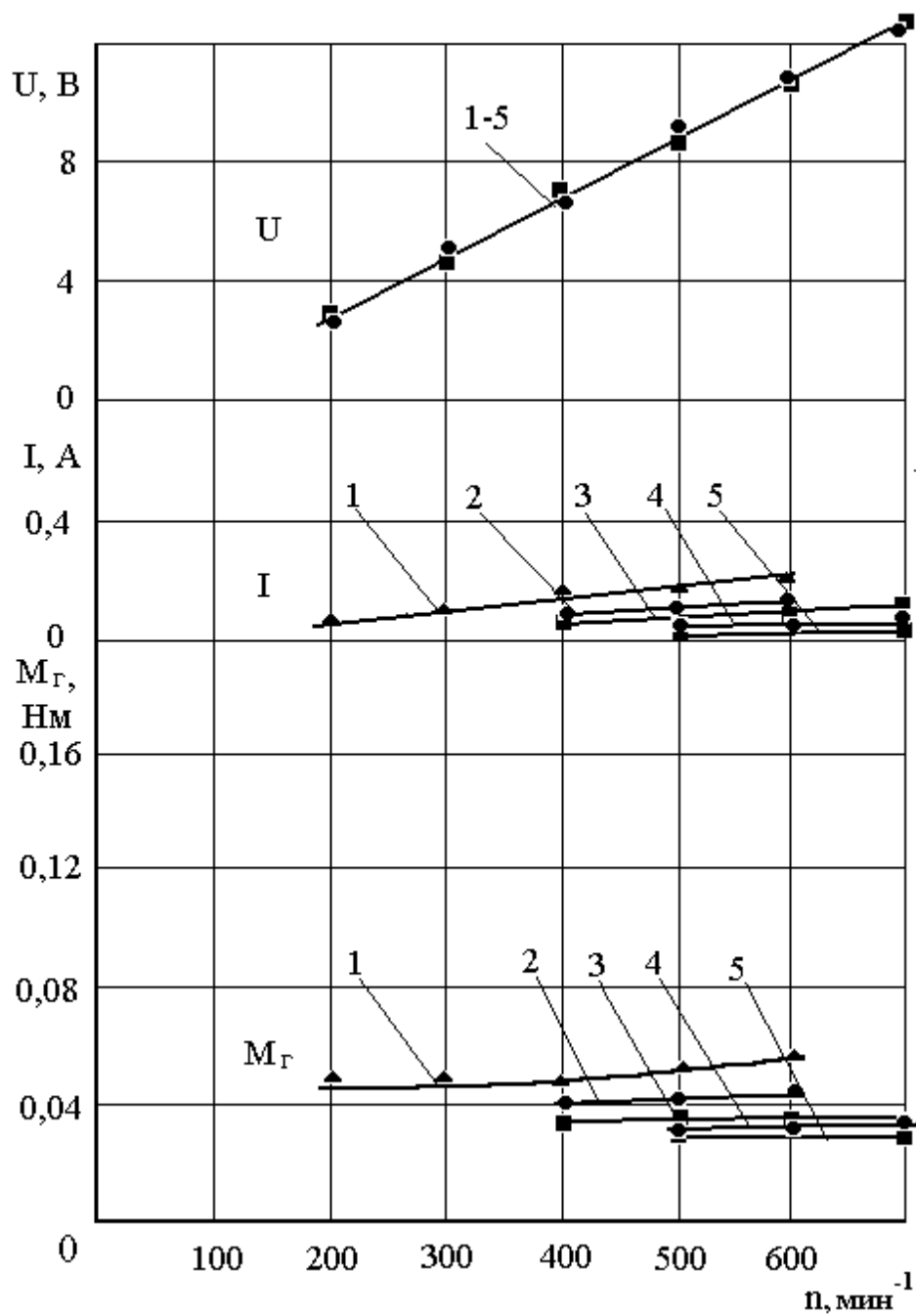


Рис.5.23. Скоростная характеристика электрогенератора мини СЭА:
сопротивление реостата, Ом: 1– 50; 2– 100; 3– 150; 4– 200; 5– 250

5.6. Приемистость двигателя УДС-1

Важное значение имеют динамические характеристики двигателя, которые показывают, как быстро изменяется его эффективная мощность во время резкого изменения величины “мертвого” объема. От этого зависит так называемая “приемистость” двигателя, т.е. способность двигателя быстро увеличивать мощность.

Исследования этого вопроса было произведено в экспериментальном цехе Мелитопольского моторного завода с использованием цифрового анализатора AVL Digital Analyzer 657 SAD-E/E австрийской фирмы AVL. Для этого двигатель УДС-1 был оборудован кварцевым датчиком давления QC 32C фирмы AVL и индуктивным датчиком частоты вращения коленчатого вала. Цифровой анализатор позволяет определять индикаторные диаграммы рабочих циклов двигателя, которые чередуются один за другим.

Индикаторные диаграммы записывали во время внезапного увеличения и уменьшения “мертвого” объема на 20 см³. Поршень “мертвого” объема перемещали вручную.

По индикаторным диаграммам вычисляли значения среднего индикаторного давления p_i и далее с учетом частоты вращения, за которой получены индикаторные диаграммы - индикаторную мощность N_i

$$N_i = p_i \cdot V_h \cdot n / 30 \cdot \tau, \quad (5.8)$$

где τ - тактность двигателя, которая для двигателя УДС-1 равна 2.

На рис. 5.24 показаны, как пример, индикаторные диаграммы, полученные во время резкого увеличения “мертвого” объема от 0 до 20 см³. Каждая диаграмма построена относительно хода поршня $S=3$ см в рабочем цилиндре, а по оси абсцисс отложена сумма $\sum_{0}^{i=m} S_m$ ходов поршня всех индикаторных диаграмм, где m – число индикаторных диаграмм.

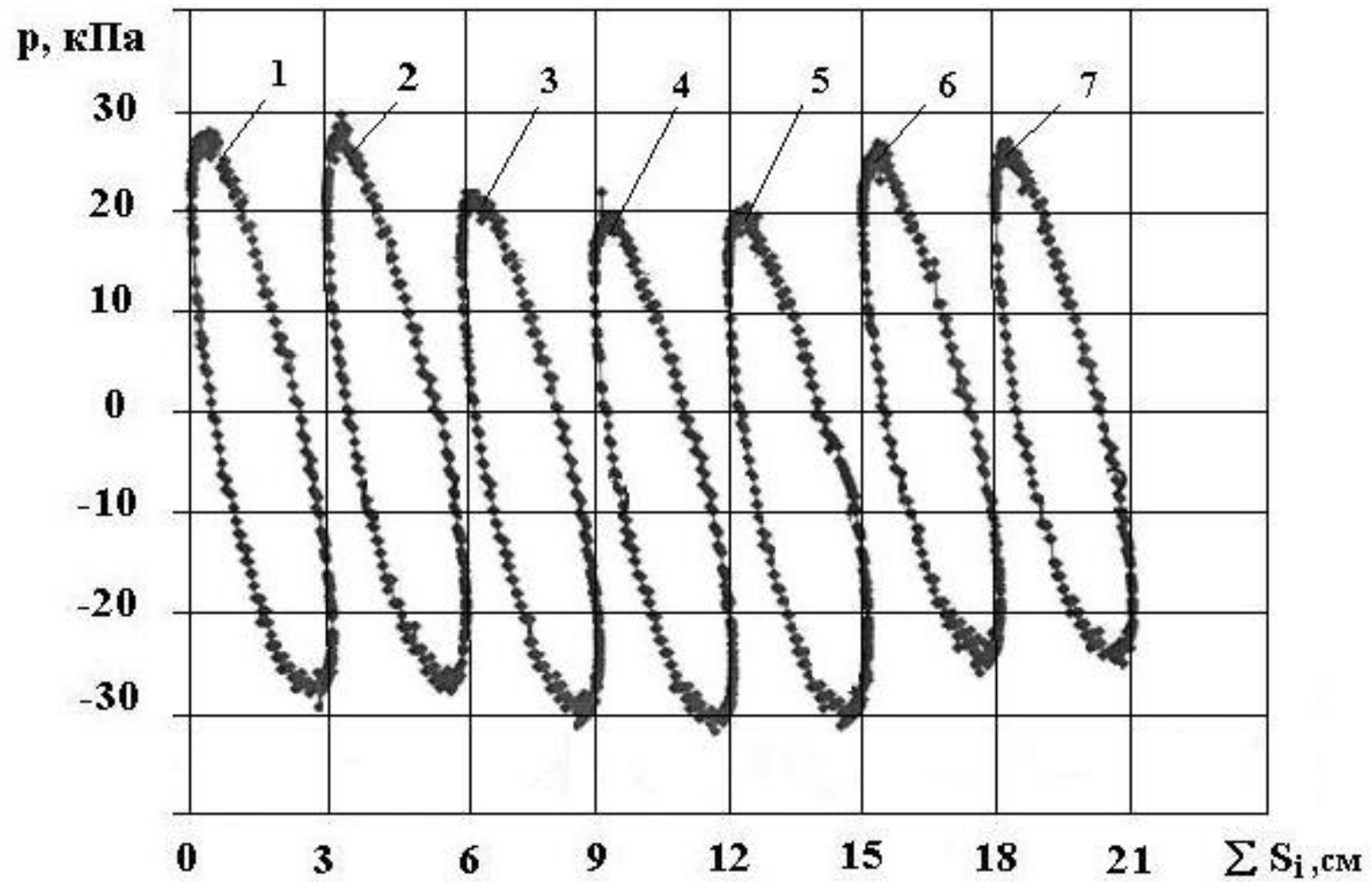


Рис. 5.24. Индикаторные диаграммы, полученные после резкого увеличения “мертвого” объема от 0 до 20 см^3

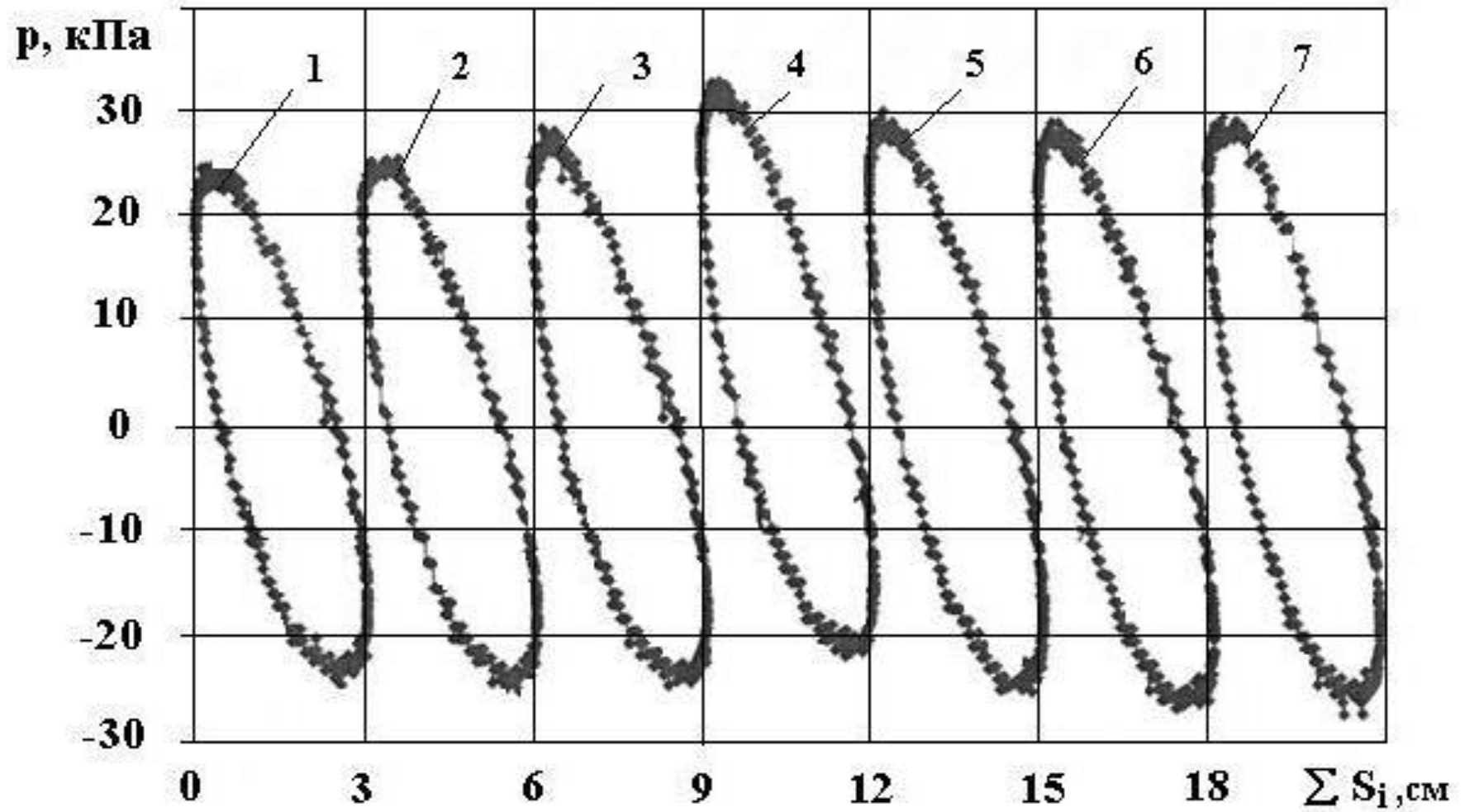


Рис. 5.25. Индикаторные диаграммы, полученные после резкого уменьшения “мертвого” объема от 20 до 0 см³

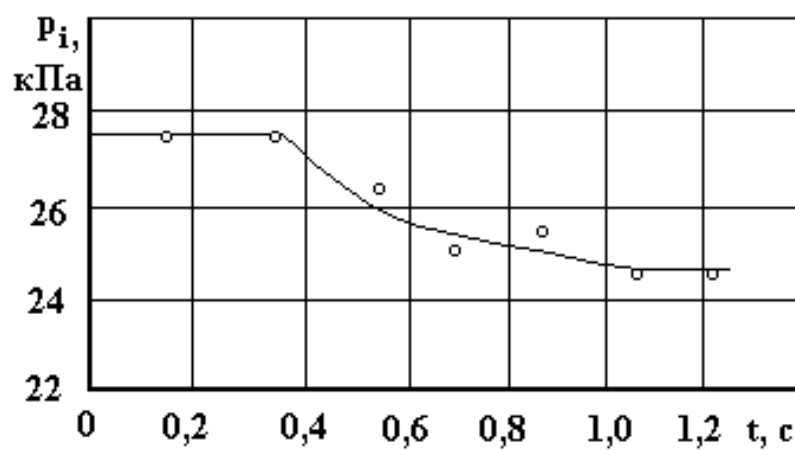
Температура $T_n=840\text{K}$, температура в холодной полости дополнительного цилиндра $T_{\text{хол}}=390\text{K}$.

Переходной процесс начался от диаграммы 2 и закончился на диаграмме 6. Перед началом увеличения “мертвого” объема индикаторная мощность двигателя равнялась $N_i=6,50$ Вт при частоте вращения коленчатого вала $n=378$ мин⁻¹, а в конце $N_i=5,47$ Вт при $n=335$ мин⁻¹. Переходной процесс осуществляется на протяжении 3-х рабочих циклов. Длительность рабочего цикла в начале переходного процесса равняется 0,158 с, в конце – 0,179 с, в среднем 0,168 с. Длительность трех циклов, приблизительно 0,50с.

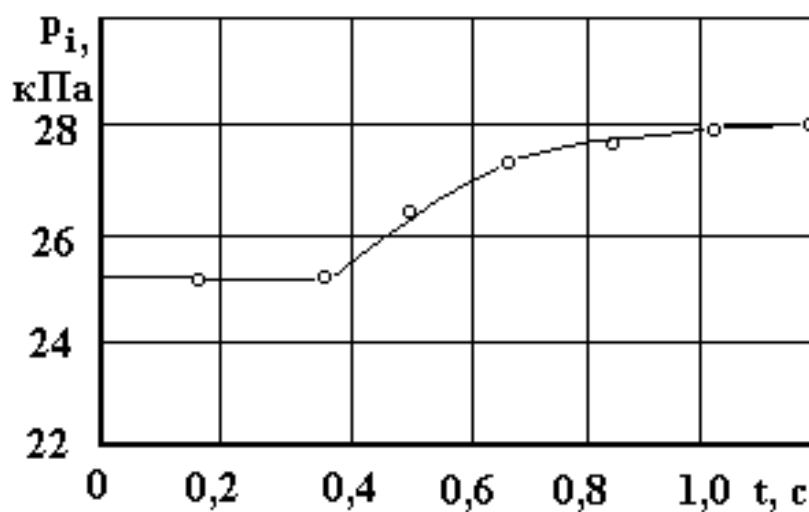
Индикаторные диаграммы при внезапном уменьшении “мертвого” объема показаны на рис. 5.25. Переходной процесс и в этом случае завершается на протяжении трех рабочих циклов. Мощность двигателя в начале уменьшения “мертвого” объема $N_i=5,23$ Вт при $n=330$ мин⁻¹, длительность цикла 0,182 с. В конце переходного процесса $N_i=6,36$ Вт при $n=362$ мин⁻¹, длительность цикла 0,165 с. В среднем длительность цикла 0,174 с, а длительность трех циклов 0,52 с.

На рис. 5.26, а,б по этим же данным построены кривые изменения среднего индикаторного давления p_i в функции времени t после резкого увеличения или уменьшения “мертвого” объема, т.е. переходные процессы, вызванные этими изменениями. Видно, что в обоих случаях давление p_i изменяется аperiодически – возрастает или уменьшается.

Эти эксперименты показывают, что двигатель достаточно быстро реагирует на изменение величины “мертвого” объема и, как видно из рис. 5.26, являясь аperiодическим звеном первого порядка.



а) увеличение “мертвого” объема



б) уменьшение “мертвого” объема

Рис. 5.26. Переходные процессы в ДС мод. УДС-1 после быстрого изменения “мертвого” объема

5.7. Определение коэффициентов дифференциального уравнения двигателя Стирлинга модели УДС-1 в агрегате с электрогенератором

Двигатель УДС-1 в составе СЭА постоянно кинематически соединен с электрическим генератором, поэтому движение их можно описать одним дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами.

На рис. 5.27,а,б показаны примеры записи на приборе счетчика импульсов типа СИ8 переходных процессов после мгновенного сброса нагрузки $N_{нт}$ от 6,3 до 4,9 Вт (на 19,7%) при $G_T=0,55$ кг/ч и от 4,71 до 3,54 Вт (на 25%) при $G_T=0,46$ кг/ч при частоте вращения перед сбросом нагрузки равной в обоих случаях $n=450$ мин⁻¹ [86, 87]. Сброс нагрузки задавался быстрым изменением сопротивления реостата нагрузки. Температура T_n торцевой стенки горячей части дополнительного цилиндра равнялась в первом примере 920 К а во втором 835 К, и за время переходных процессов не изменялась. На графике две шкалы времени: в часах и в секундах.

По виду переходных процессов, показанных на рис. 5.27,а,б, а также полученных на других режимах работы, можно заключить, что двигатель УДС-1 в агрегате с электрическим генератором является апериодическим звеном второго порядка, движения которого можно описать дифференциальным уравнением второго порядка вида

$$I_{\partial\partial} \frac{\pi}{30} \cdot \frac{d^2 n}{dt^2} + I_{\partial} \frac{\pi}{30} \cdot \frac{dn}{dt} = (M_i - M_m - M_{nc}),$$

где I_{∂} и $I_{\partial\partial}$ - постоянные коэффициенты.

Наиболее удобным и надежным способом определения коэффициентов $I_{\partial\partial}$ и I_{∂} при наличии нелинейной математической модели динамики САР ДС и программы расчетов переходных процессов на ПЭВМ является сравнение опытных и расчетных кривых переходных процессов после мгновенного сброса и наброса нагрузки и подбор таких значений $\dot{I}_{\partial\partial}$ и $\dot{I}_{\partial}$, при которых

обеспечивается достаточно хорошее совпадение этих кривых. При этом двигатель должен быть без САРТ и САРЧ.

Для этого из математической модели САР двигателя УДС-1 были исключены САРТ и САРЧ и выполнены расчеты переходных процессов после сброса нагрузки от 6,1 до 0 Вт и набросе нагрузки от 0 до 6,1 Вт, которые сравнивались с переходными процессами, полученным опытным путем в пределах тех же значений нагрузки. Варьированием значений $I_{\partial\partial}$ и I_{∂} было достигнуто хорошее совпадение расчетных и опытных кривых, что видно из рис. 5.28 и 5.29. Такое совпадение получено при $I_{\partial\partial}=0,008 \text{ кг}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^3$ и $I_{\partial}=0,012 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Среднеквадратическая ошибка σ_{no} при сбросе нагрузки равна 13,6, а при набросе 8,7, что значительно меньше допустимого значения $\sigma_{no} < 0,1 \cdot n_{\text{ср}}$, чем подтверждается адекватность математической модели динамики двигателя УДС-1 без регуляторов. Эти значения $I_{\partial\partial}$ и I_{∂} приняты для дальнейших расчетов на математической модели САР.

Отметим, что за время переходного процесса температура T_n наружной стенки нагревателя не изменяется, что объясняется скоротечностью этого процесса и большой термической инерционностью стенки.

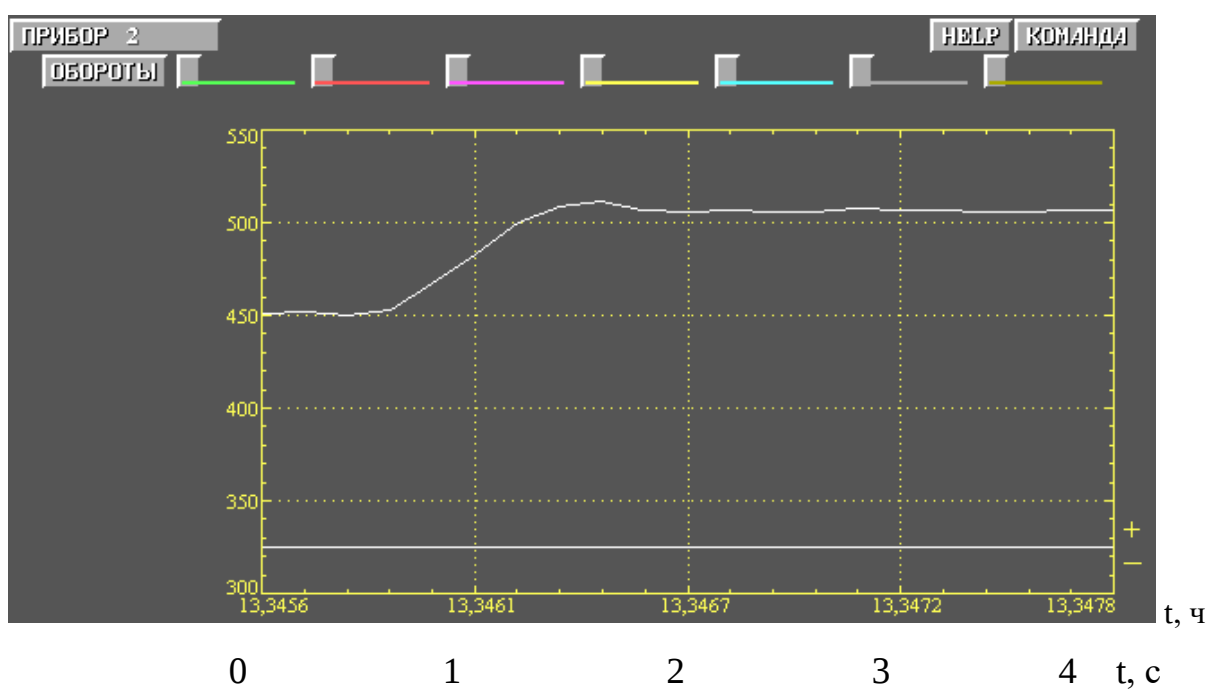
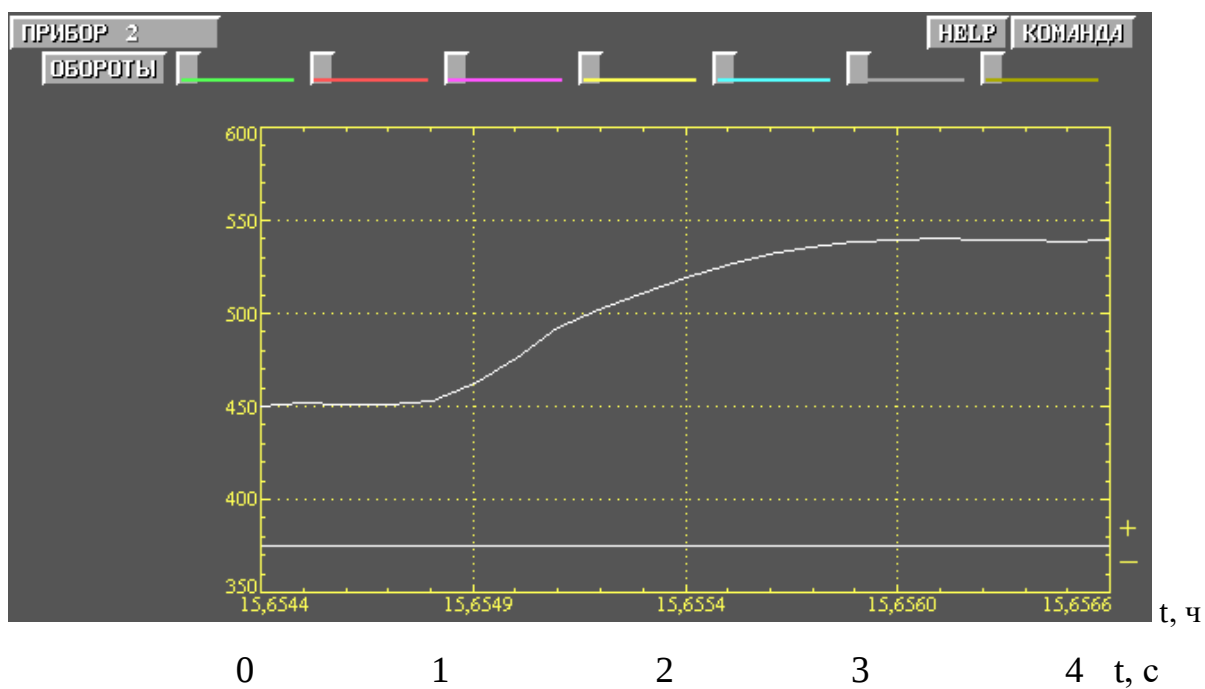


Рис. 5.27. Переходные процессы в двигателе УДС-1 после мгновенного сброса нагрузки

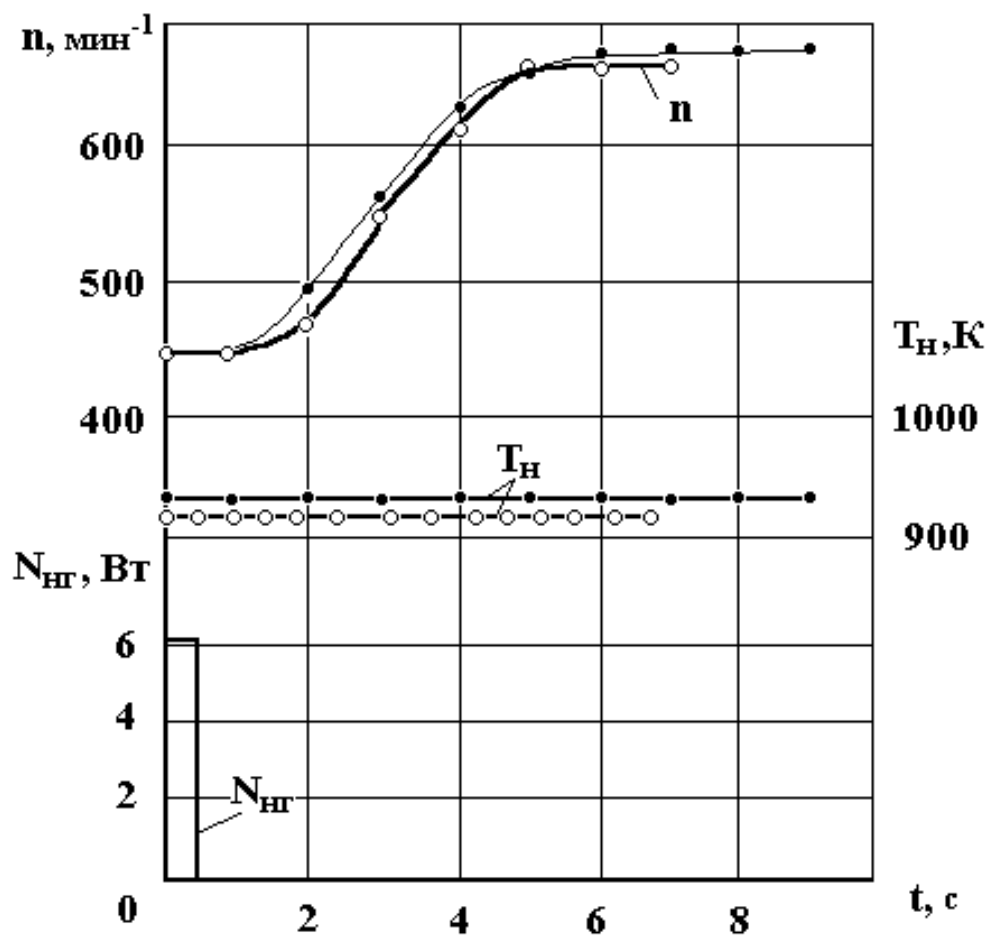


Рис. 5.28. Переходные процессы в двигателе УДС-1 без САР после мгновенного сброса нагрузки от 6,1 до 0 Вт:

- — расчетные;
- — опытные

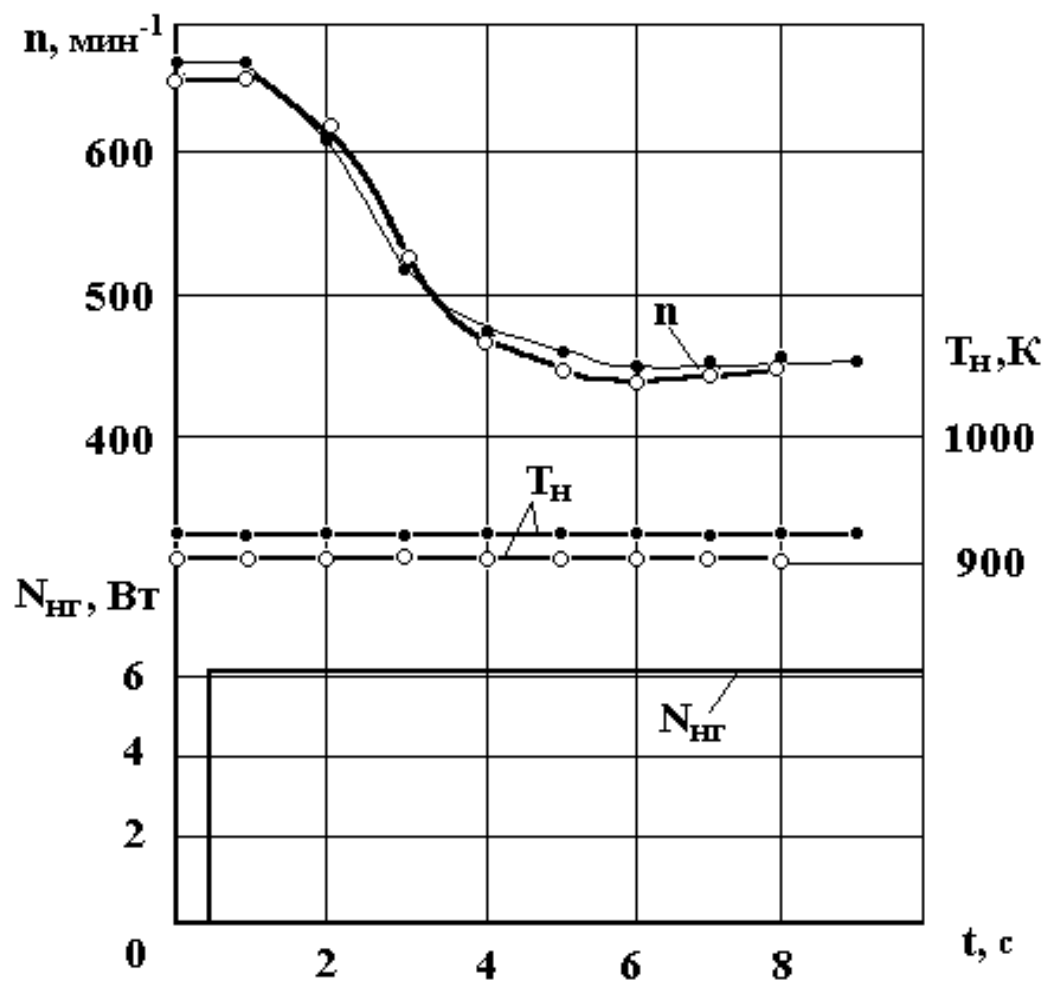


Рис. 5.29. Переходные процессы в двигателе УДС-1 без САР после мгновенного наброса нагрузки от 0 до 6,1 Вт:

- — расчетные;
- — опытные

5.8. Определение параметров, входящих в уравнение теплопередачи в двигателе Стирлинга мод. УДС-1

На рис. 5.30 показана схема основных тепловых потоков в ДС мод. УДС-1:

$Q_{гор}$ – от горячих продуктов сгорания в горячую полость 6 дополнительного цилиндра 7 через его стенки;

$Q_{хол}$ – из горячей полости 6 в холодную полость 4 при перемещении рабочего тела по зазорам между вытеснителем 5 и внутренней стенкой цилиндра 7;

Q_i – на совершение индикаторной работы в рабочем цилиндре 1, который сообщен с холодной полостью 4 трубкой 2;

$Q_{охл}$ – в систему охлаждения 3 двигателя через ребренные стенки дополнительного цилиндра.

В разделе 3 приведены уравнения (3.7) ... (3.22), которыми описываются эти потоки. Причем рассматриваются усредненные потоки, в которых не учитываются их циклические изменения при работе ДС, в том числе и циклические поглощения и отдача части теплоты телом вытеснителя.

В уравнения тепловых потоков входят усредненные коэффициенты теплопередачи k_i и площади F_i через которые проходят эти потоки. Истинные их значения, даже усредненные, определить сложно, да это и не входит в задачи диссертационного исследования САРТ такого специфического ДС, как УДС-1. Поэтому для приближенного определения названных параметров были использованы экспериментальные данные, полученные при испытаниях ДС мод. УДС-1. При этом определялись не значения k_i и F_i по отдельности, а произведения этих параметров

$$A_i = k_i \cdot F_i. \quad (5.10)$$

Это произведение, по аналогии с термином “пропускная способность турбины”, принятым в теории турбин и равным μF , где μ – коэффициент

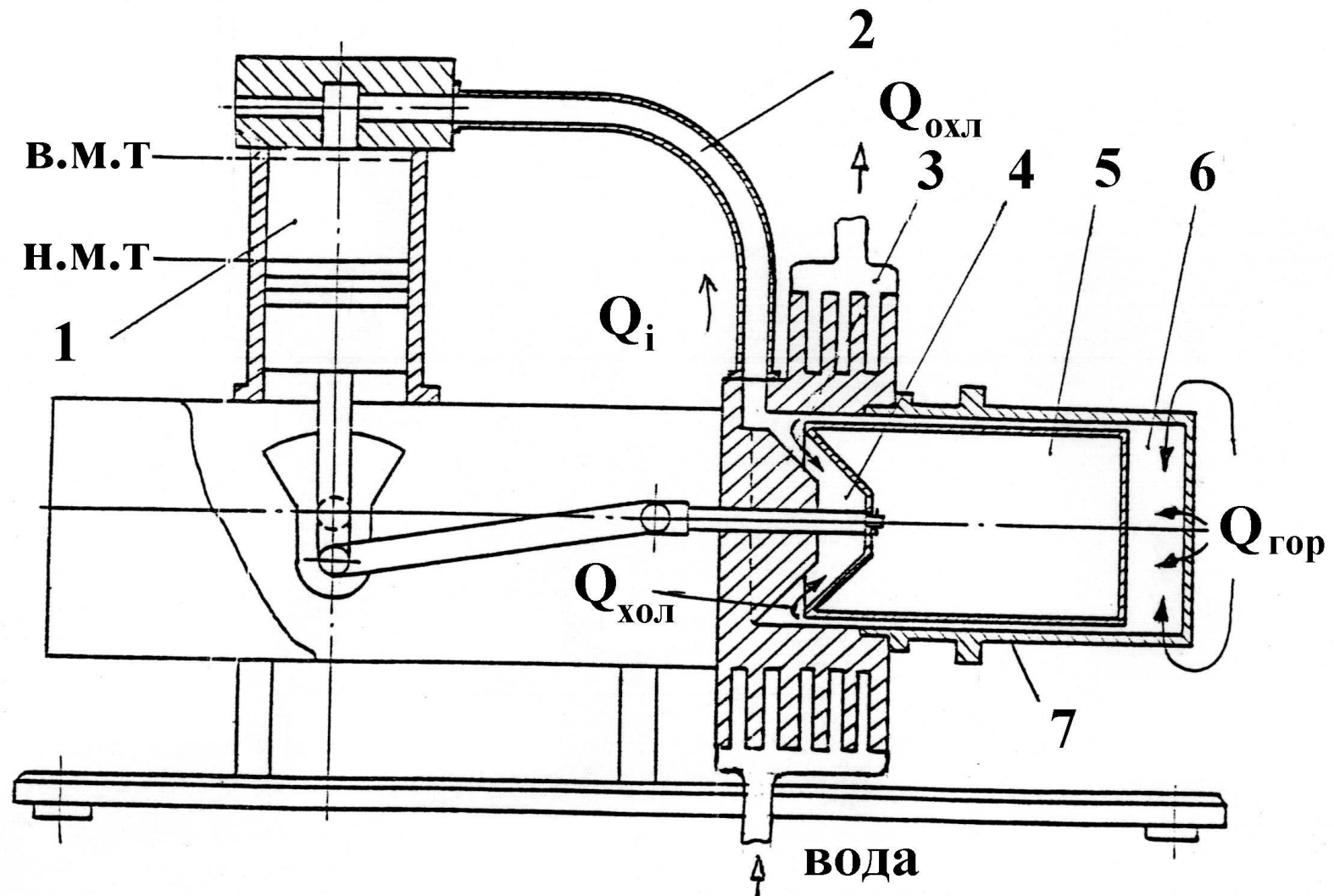


Рис. 5.30. Схема основных тепловых потоков в ДС мод. УДС-1

расхода, а F – площадь проходного сечения впускного тракта турбины, назовем “теплопроводящей способностью” соответствующего элементам ДС.

По данным измерения с применением осциллографирования давления в рабочем цилиндре, максимальный индикаторный к.п.д. двигателя УДС-1 находится на уровне 1,6%.

Номинальным скоростным режимом ДС мод. УДС-1 в составе электрической установки принята частота вращения коленчатого вала 450 мин⁻¹. При этой частоте вращения максимальная индикаторная мощность двигателя по результатам измерений составляет 11,0 Вт. Чтобы получить такую мощность при индикаторном к.п.д. $\eta_i=1,6\%$ необходимо вводить в горячую полость двигателя тепловой поток

$$Q_{гор} = N_i / \eta_i = 11 / 0,016 = 687,5, \text{ Вт} \quad (5.11)$$

Тепловой поток, отводимый в холодную полость

$$Q_{хол} = Q_{гор} - Q_i = 687,5 - 11 = 676,5, \text{ Вт} \quad (5.12)$$

Этот тепловой поток отводится в систему охлаждения ДС

$$Q_{охл} = Q_{хол}. \quad (5.13)$$

Данные опытов показывают, что на номинальном режиме работы ДС мод. УДС-1 температура продуктов сгорания возле стенки дополнительного цилиндра составляет $T_{к.с.}=1060\text{K}$, а температура в горячей полости дополнительного цилиндра $T_{гор}=820\text{K}$.

С учетом этих данных из уравнения (3.9) получаем

$$A_1 = k_1 F_1 = \frac{Q_{гор}}{T_{к.с} - T_{гор}} = \frac{687,5}{1060 - 820} = 2,86, \text{ Дж/(K}\cdot\text{c)} \quad (5.14)$$

По данным измерений средняя температура рабочего тела в холодной полости на установившемся режиме работы равняется $T_{хол}=350\text{K}$. Из уравнения (3.11) получаем

$$A_2 = k_2 F_2 = \frac{Q_{хол}}{F_2 (T_{гор} - T_{хол})} = \frac{676,5}{820 - 350} = 1,44, \text{ Дж/(K}\cdot\text{c)} \quad (5.15)$$

Из холодной полости теплота отводится в систему водяного охлаждения через оребренную часть дополнительного цилиндра. Температура охлаждающей жидкости принята равной $T_{\text{охл}}=320\text{K}$.

Учитывая, что $Q_{\text{охл}}=Q_{\text{хол}}$, из уравнения (3.20) получаем для установившегося режима работы

$$A_3 = k_3 F_3 = \frac{Q_{\text{охл}}}{F_3 (T_{\text{хол}} - T_{\text{охл}})} = \frac{676,5}{350 - 320} = 22,5, \text{ Дж}/(\text{K} \cdot \text{с}) \quad (5.16)$$

Теплота из горячей полости переносится в холодную полость в результате перемещения массы рабочего тела из одной полости в другую. Поэтому для расчетов принято, что масса рабочего тела $M_{\text{р.т.гор}}$, воспринимающая теплоту в горячей полости, и масса $M_{\text{р.т.хол}}$ отдающая ее в холодной полости, одинаковы и равны массе рабочего тела, содержащейся в его объеме, вытесняемой при перемещении вытеснителя на полный ход, равный 30 мм.

По результатам расчетов

$$M_{\text{р.т.гор}} = M_{\text{р.т.хол}} = 0,00013 \text{ кг.}$$

Теплоемкость рабочего тела (воздуха) принята постоянной и равной

$$c_{\text{р.т}} = 1000 \text{ Дж}/(\text{см}^3 \cdot \text{K}).$$

Обратим внимание на следующее. При работе ДС температуры $T_{\text{гор}}$ и $T_{\text{н}}$ могут изменяться при изменении индикаторной мощности, вызванным изменением внешней нагрузки на двигатель. Индикаторная мощность регулируется изменением дополнительного “мертвого” объема $V_{\text{м}}$, а изменение температуры $T_{\text{н}}$ устраняется действием САРТ. Однако в ДС мод. УДС-1 тепловой поток $Q_{\text{г}}=N_{\text{г}}=11 \text{ Вт}$ значительно меньше вводимого теплового потока $Q_{\text{гор}}=687,5 \text{ Вт}$, по уравнению (5.11). Поэтому температуры $T_{\text{гор}}$, $T_{\text{н}}$, $T_{\text{хол}}$ в пределах скоростных характеристик ДС мод. УДС-1 могут изменяться весьма незначительно. Такого, конечно, не будет в более мощных ДС с достаточно высоким индикаторным к.п.д.

5.9. Проверка адекватности математической модели системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга мод. УДС-1

Адекватность математической модели САР ДС мод. УДС-1 проверялась при совместной работе САРТ и САРЧ. Возмущающим воздействием для САР является резкое изменение нагрузки, передаваемой на коленчатый вал двигателя со стороны электрического агрегата.

Во время опытов и расчетов задавалась максимальная допустимая температура T_n стенки горячей части дополнительного цилиндра на уровне 910...920 К, который автоматически поддерживала САРТ.

Для проверки адекватности математической модели сравнивались опытные статистические и динамические характеристики САР с соответствующими характеристиками, рассчитанными на математической модели.

Расхождение между сравниваемыми кривыми оценивались по основной ошибке, как описано в подразделе 4.7.

Основной статистической характеристикой САРЧ является скоростная характеристика с регуляторной ветвью. Так как релейный регулятор частоты вращения в САРЧ ДС модели УДС-1 астатический, то при изменении нагрузки в пределах по регуляторной ветви частота вращения может изменяться только в узких пределах, заданных при настройке регулятора.

На рис. 5.31 построена расчетная скоростная характеристика ДС модели УДС-1 с релейным регулятором при трех значениях задающего воздействия по частоте вращения в виде управляющего напряжения $UN_{\varnothing}=80; 64$ и 48 мВ. Получились три астатические регуляторные ветви. На них видно, что расчетные точки имеют незначительный разброс. Он находится в пределах заданной точности регулирования, которая составляет для регуляторных ветвей: 1 - $\pm 3,5\%$, 2 - $\pm 3,1\%$, 3 - $\pm 2,1\%$.

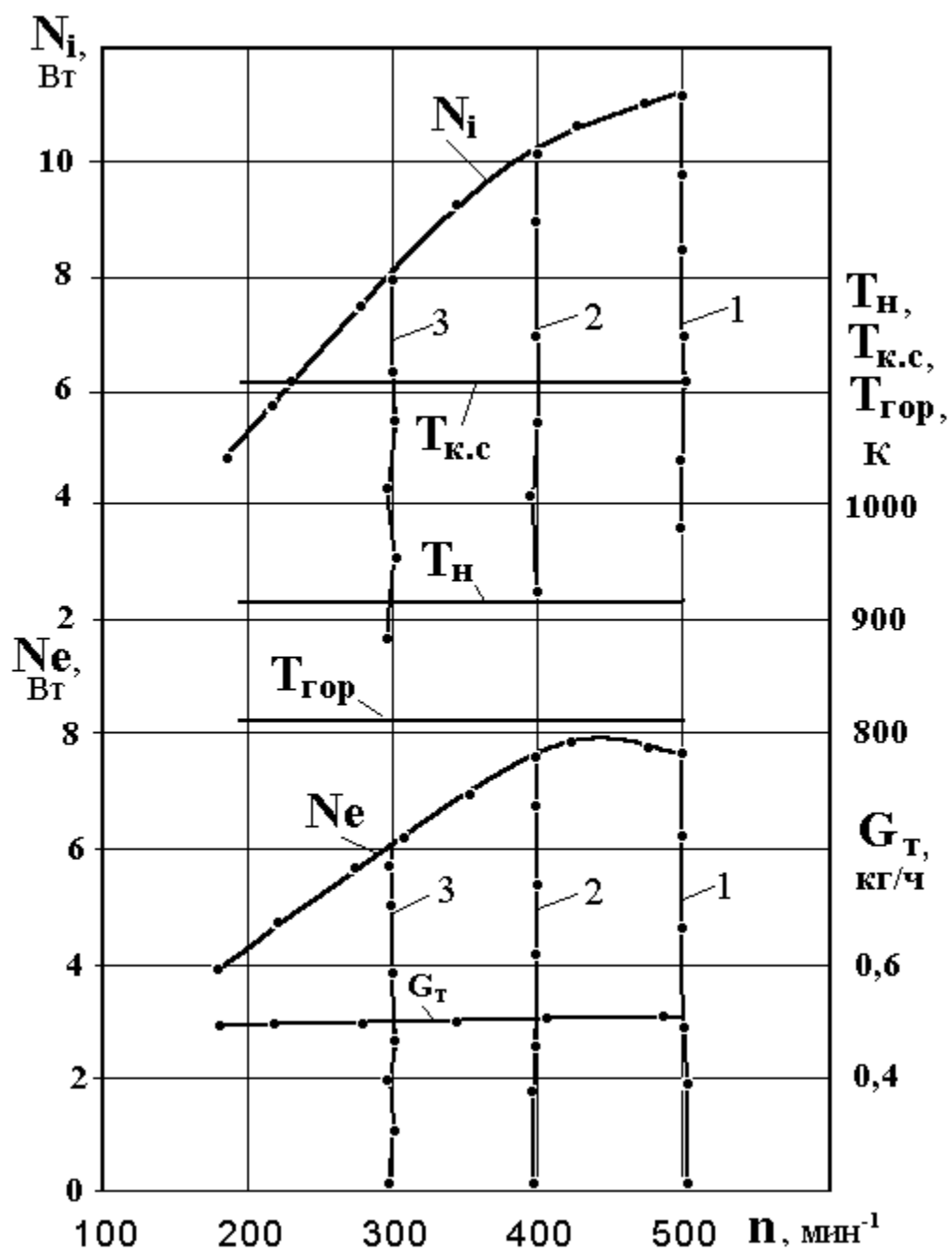


Рис. 5.31. Всережимная характеристика ДС мод. УДС-1 с релейным регулятором расчетная: $UN\emptyset$, мВ: 1 – 80; 2 – 64; 3 – 48

Регуляторные ветви 1,2,3 формируются в результате изменения величины дополнительного “мертвого” объема V_m под действием регулятора частоты вращения.

На рис. 5.32 построены расчетные зависимости мощности Ne от величины “мертвого” объема по данным расчета приведенных на рис. 5.31 скоростных характеристик. На рис. 5.32 обозначены расчетные точки, взятые для построения этих зависимостей. Видно, что зависимости эти линейные, имеют отрицательный наклон, который уменьшается с ростом частоты вращения. Величина “мертвого” объема при $Ne=0$ наибольшая при меньшей частоте вращения и составляет $V_m=144$; 132 и 90 $см^3$ соответственно при $n=300$, 400 и 500 $мин^{-1}$.

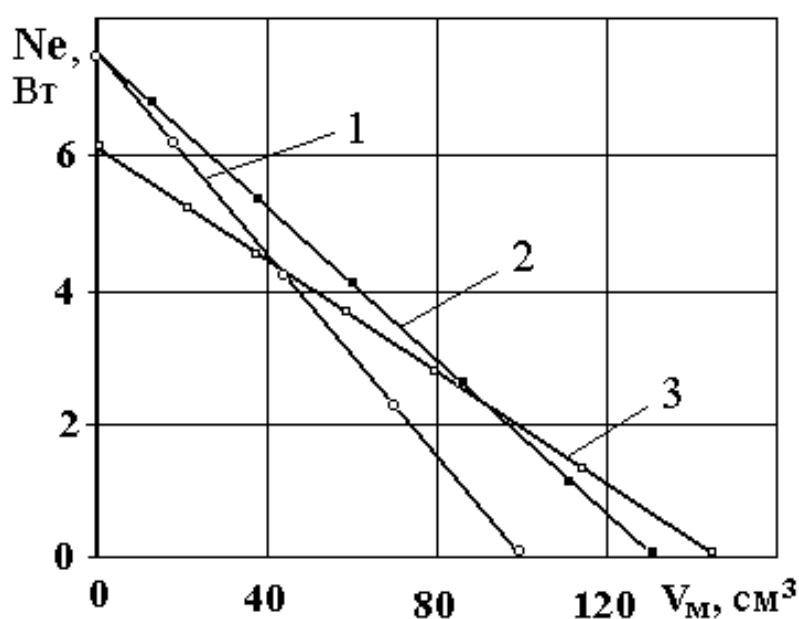


Рис. 5.32. Расчетная зависимость эффективной мощности ДС мод. УДС-1 от величины дополнительного “мертвого” объема:

при n , $мин^{-1}$: 1 – 500; 2 – 400; 3 – 300

Система автоматического регулирования температуры поддерживает заданное значение температуры T_n на уровне 910 К в пределах всей скоростной характеристики, в том числе и на регуляторных ветвях. Индикаторная мощность ДС изменяется в зависимости от частоты вращения и нагрузки в пределах 1,6...11,3 Вт. Но эта величина ничтожна по сравнению с тепловым потоком, вводимым извне в ДС, который достигает 690...700 Вт, поэтому температура $T_{гор}$ изменяется лишь на 1,0...1,4 К. Такое изменение находится в пределах чувствительности регулятора и он на него не реагирует. Поэтому расход газового топлива G_T и температуры $T_{к.с.}$, T_n , $T_{хол}$ остаются постоянными.

На рис. 5.33 показана опытная всережимная скоростная характеристика ДС мод. УДС-1 с экспериментальным релейным регулятором частоты вращения, снятая при тех же частотах вращения, что и на расчетной характеристике. Видно, что регуляторные ветви астатические, как на расчетных характеристиках, что говорит об адекватности математической модели в статике.

При снятии показанных на рис. 5.33 скоростных характеристиках температуры $T_{к.с.}$, T_n , $T_{гор}$, $T_{хол}$ и расход топлива G_T , так же как и при расчетах, оставались постоянными и равнялись:

$$T_{к.с.} = 1123 \text{ К}; T_n = 918 \text{ К}; T_{гор} = 833 \text{ К}; T_{хол} = 338 \text{ К}; G_T = 0,54 \text{ кг/с}.$$

На рис. 5.34 построены опытные зависимости мощности N_e от дополнительного “мертвого” объема при постоянных частотах вращения $n=300, 400$ и 500 мин^{-1} . Они имеют такой же характер, как и расчетные зависимости, показанные на рис. 5.32. По этому рисунку видно, что максимальные значения объема V_m находятся в интервале 75...100 см³.

В экспериментальном образце ДС мод. УДС-1 максимальное значение дополнительного “мертвого” объема по чертежу равно $V_{m \max} = 120 \text{ см}^3$. Этого объема достаточно, для регулирования частоты вращения двигателя в составе Стирлинг - электрического агрегата.

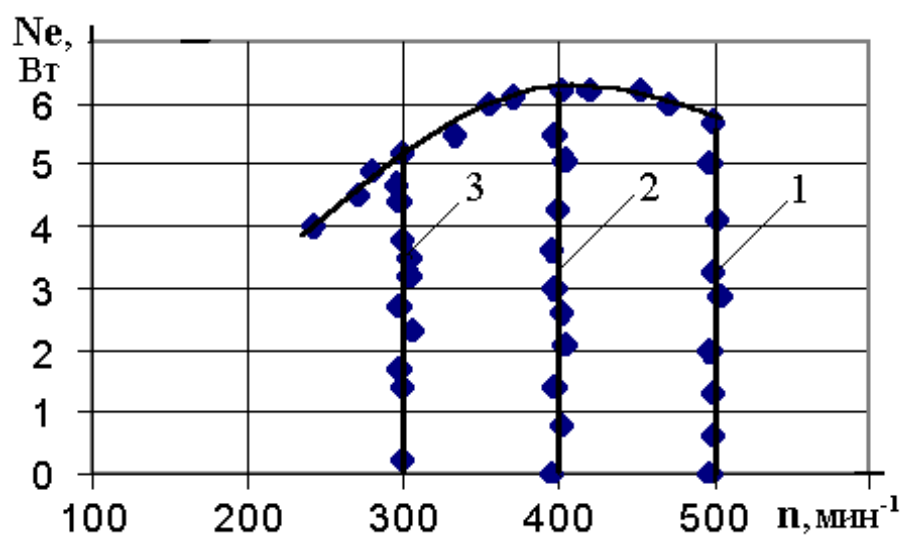


Рис. 5.33. Опытная всережимная характеристика ДС мод. УДС-1 с релейным регулятором частоты вращения

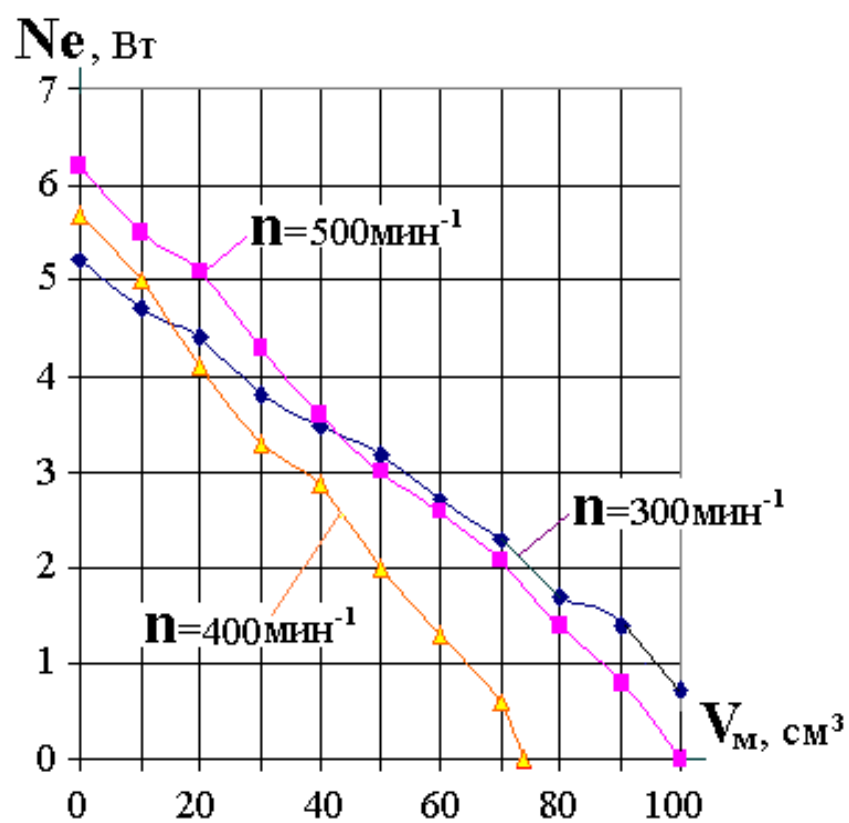


Рис. 5.34. Опытные зависимости мощности N_e ДС мод. УДС-1 с релейным регулятором от величины “мертвого” объема V_m

Для проверки адекватности математической модели САР ДС мод. УДС-1 в динамике сравнивались переходные процессы в САР после мгновенного сброса и наброса нагрузки, полученные опытным путем, рассчитанными на ПЭВМ. При снятии опытных переходных процессов выяснилось, что в САРЧ имеется запаздывание. Аналогичное запаздывание было внесено в программу расчетов. Кроме того, учтено, что сброс и наброс нагрузки в опытах происходит хотя и быстро, но не мгновенно. Поэтому в программу расчетов введено замедленное изменение момента нагрузки на 0,5с при сбросе - набросе 100 % нагрузки. Сравнивались переходные процессы после сброса и наброса 50 и 100 % нагрузки от 6,3 до 3,15 Вт и от 6,3 Вт до нуля и наоборот.

Эти интервалы выдерживались, конечно не точно, что существенного значения не имеет.

В программе расчетов переходных процессов принято:

Коэффициенты дифференциального уравнения движения двигателя

$$\dot{I} DD = 0,008 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^3;$$

$$\dot{I} D = 0,012 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Коэффициенты уравнения формирователя пропорционального и дифференциального сигналов управления

$$KNP=0,16 \text{ безразмерный};$$

$$KND=0,16 \text{ с}.$$

Коэффициент усиления исполнительного механизма

$$KP=8 \text{ и } 16.$$

Максимальная величина дополнительного “мертвого” объема

$$VM_{\max} = 60 \text{ и } 120 \text{ см}^3.$$

Максимальный ход поршня дополнительного “мертвого” объема

$$Y(4)_{\max} = 75 \text{ и } 150 \text{ мм}.$$

На рис. 5.35 а, б показаны примеры записи на ПЭВМ переходных процессов после сброса и наброса 50 % нагрузки. На них изображено

изменение частоты вращения n функции времени t , а также изменение положения переключателя реле: “+” – увеличение “мертвого” объема; “-” – уменьшение “мертвого” объема и среднее нейтральное положение, когда в исполнительный механизм регулятора управляющий сигнал не поступает.

Регистрировались также температура T_n наружной стенки дополнительного цилиндра в горячей его части, расход топлива G_T и перемещение поршня в цилиндре с “мертвым” объемом, по которому вычислялось изменение “мертвого” объема V_m .

Во время переходных процессов показатели T_n и G_T практически не изменялись, поэтому записи их не приводятся.

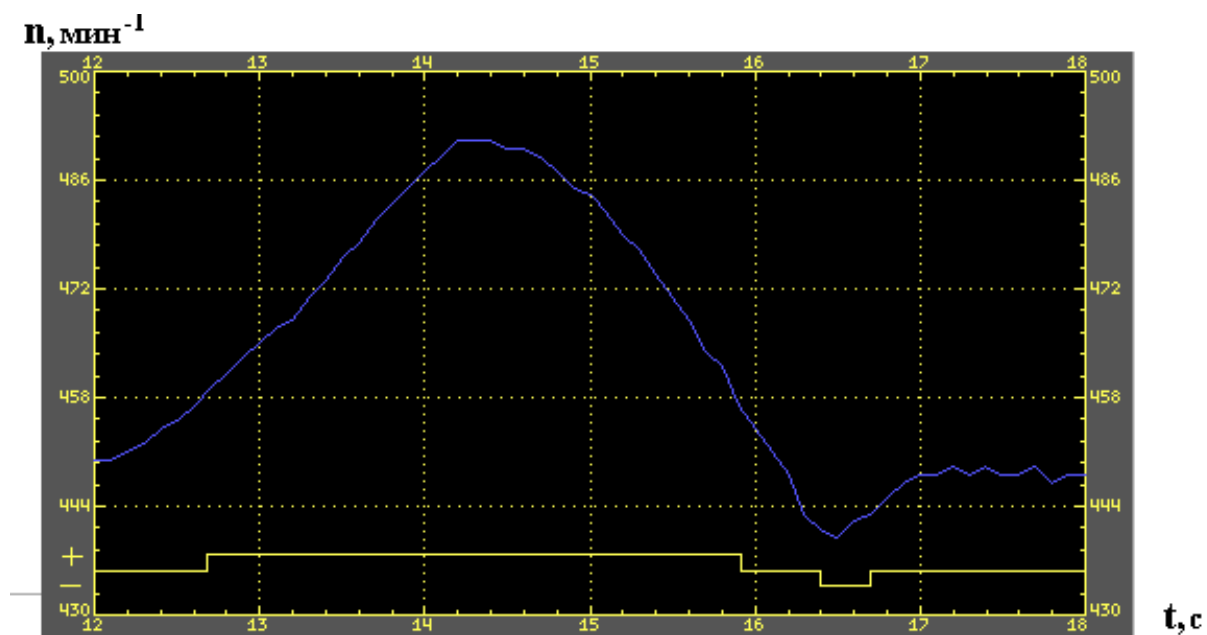
На рис. 5.36 построены опытные и расчетные переходные процессы после сброса 50 % нагрузки от 6,05 до 2,75 Вт (от 0,127 до 0,064 Н·м). Момент нагрузки уменьшался со скоростью 0,254 Н·м/с, запаздывание начала изменения объема V_m в опыте 0,6 с.

Регулятор частоты вращения настроен на поддержание частоты вращения 450 мин⁻¹ с точностью $\pm 3,1$ мин⁻¹, а регулятор температуры стенки нагревателя на поддержание температуры 920 К с точностью $\pm 1,84$ К. Максимальная величина “мертвого” объема – 60 см³.

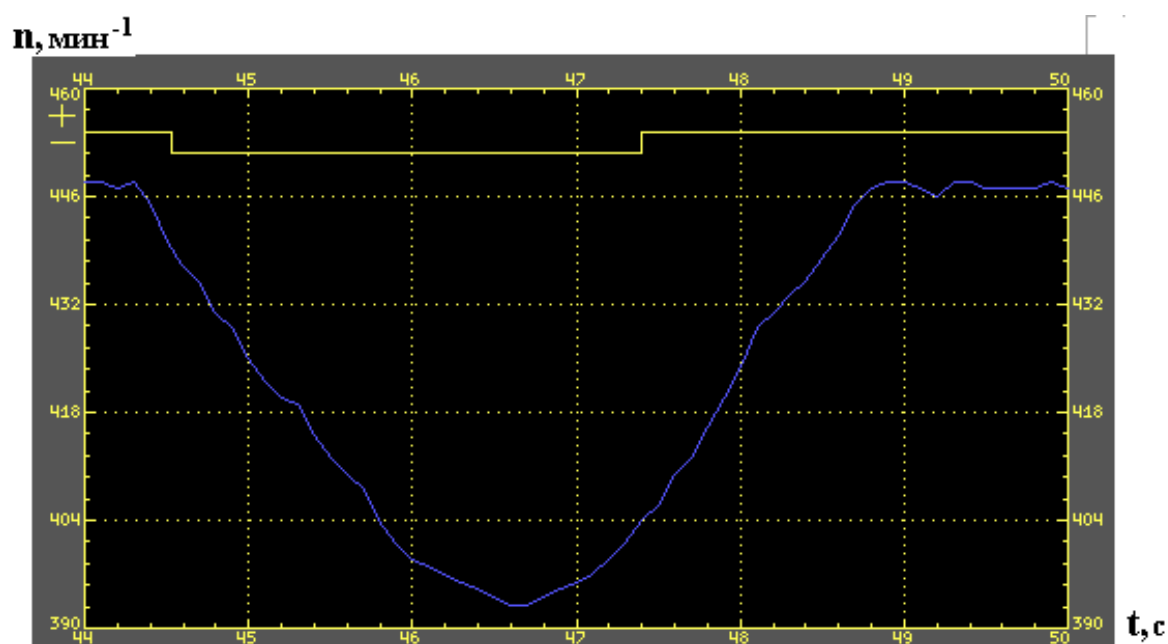
Видно, что переходной процесс проходит с одним забросом частоты вращения n , что говорит о хорошем качестве работы САРЧ. Опытная и расчетная кривые изменения n достаточно хорошо совпадают. Опытная ошибка для частоты вращения равняется 4,08 %, что меньше допустимого значения 10 %. Заброс частоты вращения составляет 9,5%. Длительность переходного процесса 6 с.

Температура T_n и часовой расход топлива G_T за время переходного процесса не изменяются по указанным ранее причинам.

Основная ошибка для температуры T_n составляет 2,26%, а для расчета топлива 7,74 %.



а) после сброса нагрузки



б) после наброса нагрузки

Рис. 5.35. Переходные процессы в САРЧ ДС мод. УДС-1 после сброса и наброса 50 % нагрузки

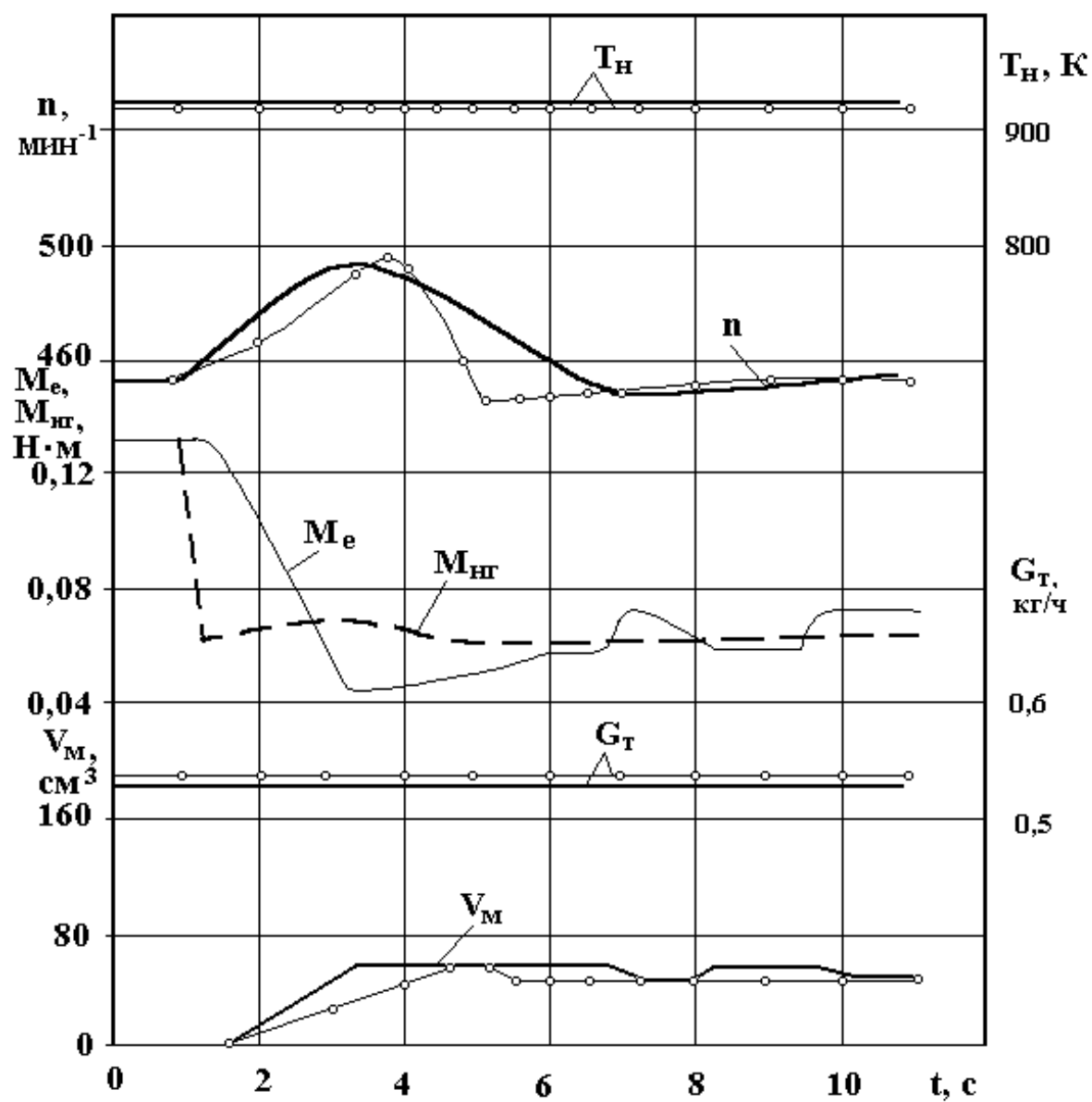


Рис. 5.36. Переходные процессы в САР после сброса нагрузки N_{HG} от 6,05 до 2,75 Вт:

— расчет
 ○—○—○ опыт

На рис. 5.37 построены опытные и расчетные переходные процессы после наброса 50 % нагрузки от 2,8 до 5,85 Вт (от 0,063 до 0,126 Нм). И в этом случае переходной процесс проходит с одним колебанием (просадкой) частоты вращения.

Расчетные кривые хорошо совпадают с опытными. Основная ошибка для частоты вращения составляет 1,91 %, а для температуры T_n – 5,93 %. Это значительно меньше допустимого значения 10 %.

Просадка частоты вращения по опытной кривой составляет 11,8 %, длительность переходного процесса 5с.

Рис. 5.38 а, б показаны примеры записи переходных процессов после сброса и наброса 100 % нагрузки, а на рис. 5.39 и 5.40 опытные кривые положены на рассчитанные на математической модели. Мощность нагрузки изменялась в пределах от 0 до 6,0 Вт. Чтобы обеспечить изменение мощности двигателя в этих пределах максимальный ход поршня в цилиндре с “мертвым” объемом был увеличен в опытах до 125 мм, а при расчетах до 150 мм.

Из рис. 5.39 и 5.40 видно, что опытные и расчетные кривые изменения n хорошо совпадают между собой. Основная ошибка составляет 4,18 % при сбросе нагрузки и 0,19 % при набросе.

Заброс частоты вращения по опытной на рис.5.38 кривой равен 17,3 %, длительность переходного процесса 7 с.

Просадка частоты вращения на рис.5.39 равна 15,4 %, длительность переходного процесса 7с.

Были сняты и рассчитаны на математической модели переходные процессы после сброса и наброса 50 % нагрузки при максимальных величинах “мертвого” объема 100 (в опытах) и 120 см³ (при расчетах). Они оказались практически такими же, как при максимальном “мертвом” объеме 60 см³. Это значит, что уменьшение “мертвого” объема до 60 см³ в опытах со сбросом и набросом 50 % нагрузки на переходные процессы заметно не повлияло.

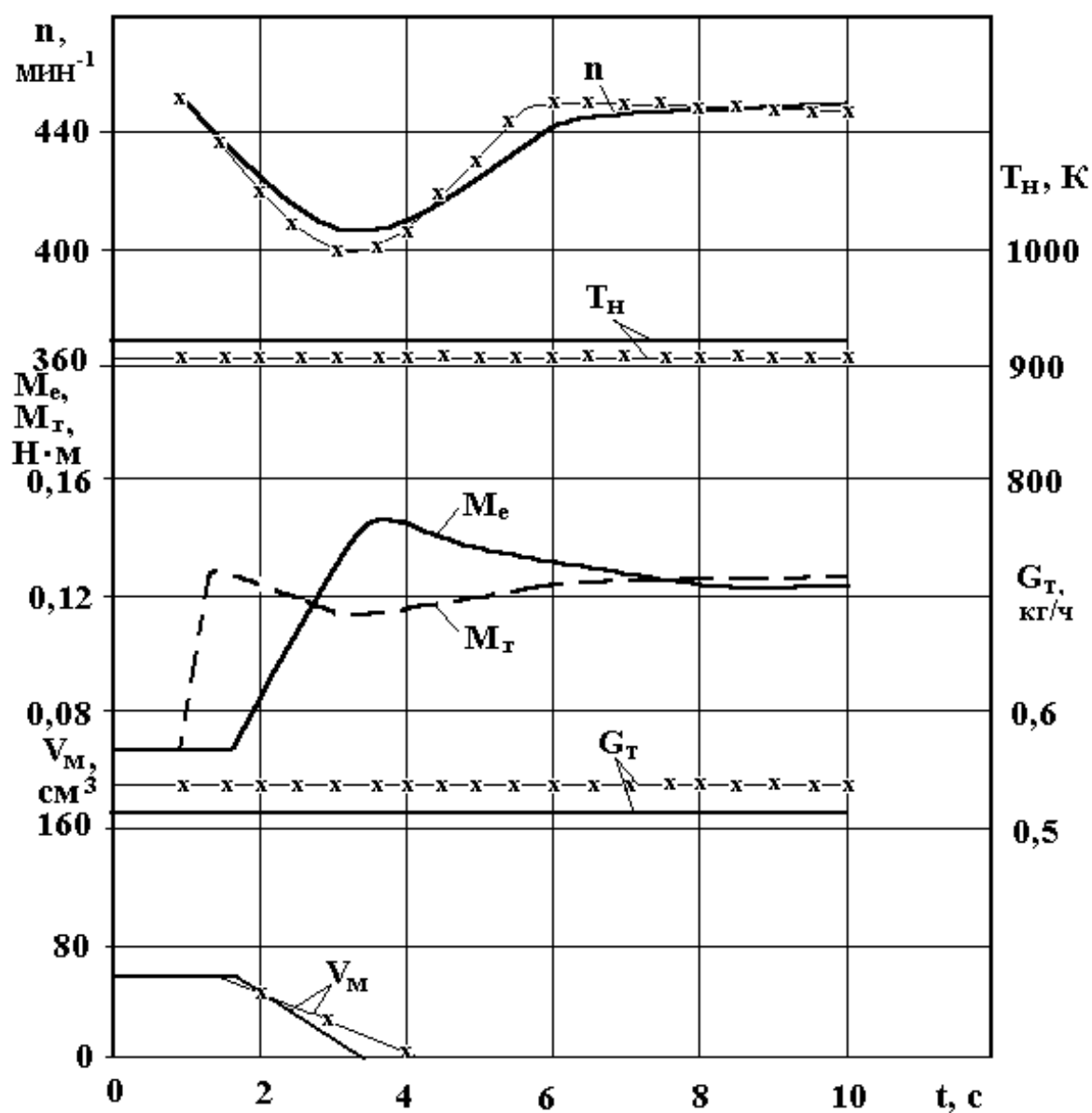
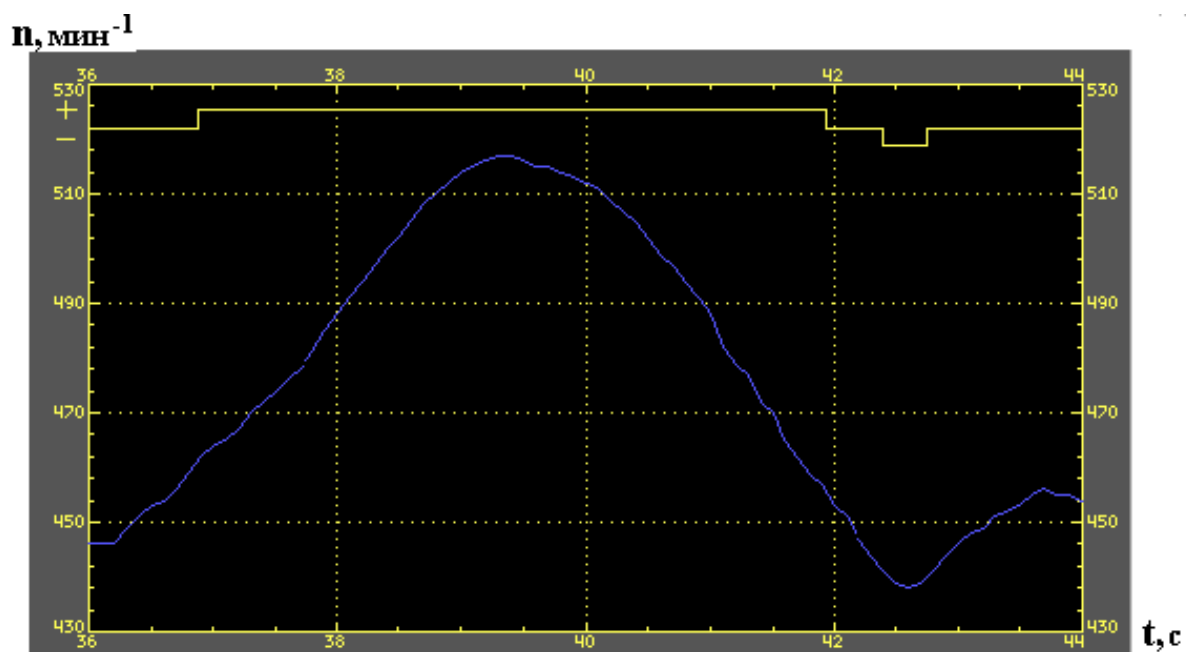


Рис. 5.37. Переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после наброса нагрузки $N_{н\Gamma}$ от 3,15 до 6,3 Вт:

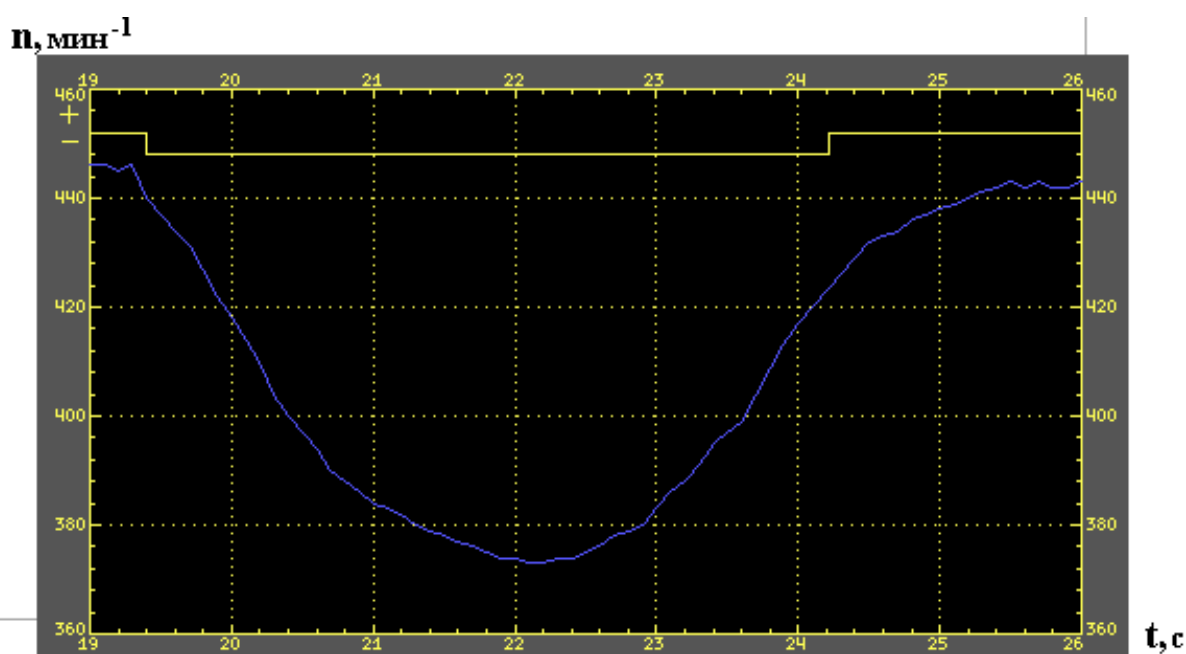
соединительный канал $\varnothing$ 4 мм

— расчет

x—x—x опыт



а) после сброса нагрузки



б) после наброса нагрузки

Рис. 5.38. Переходные процессы в САРЧ ДС мод. УДС-1 после сброса и наброса 100 % нагрузки

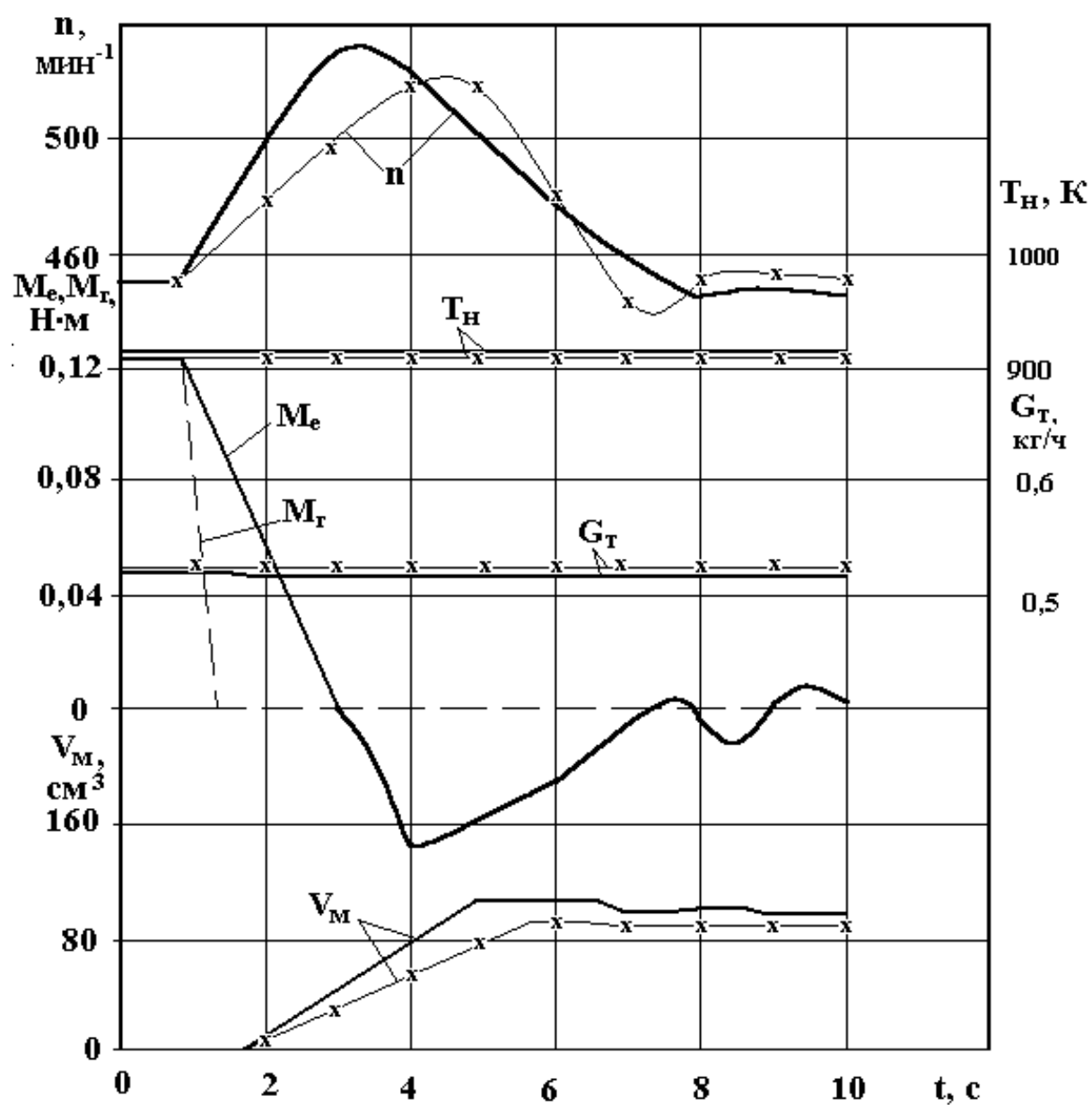


Рис. 5.39. Переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса 100 % нагрузки $N_{нг}$ от 6,3 до 0:

— расчет

x—x—x опыт

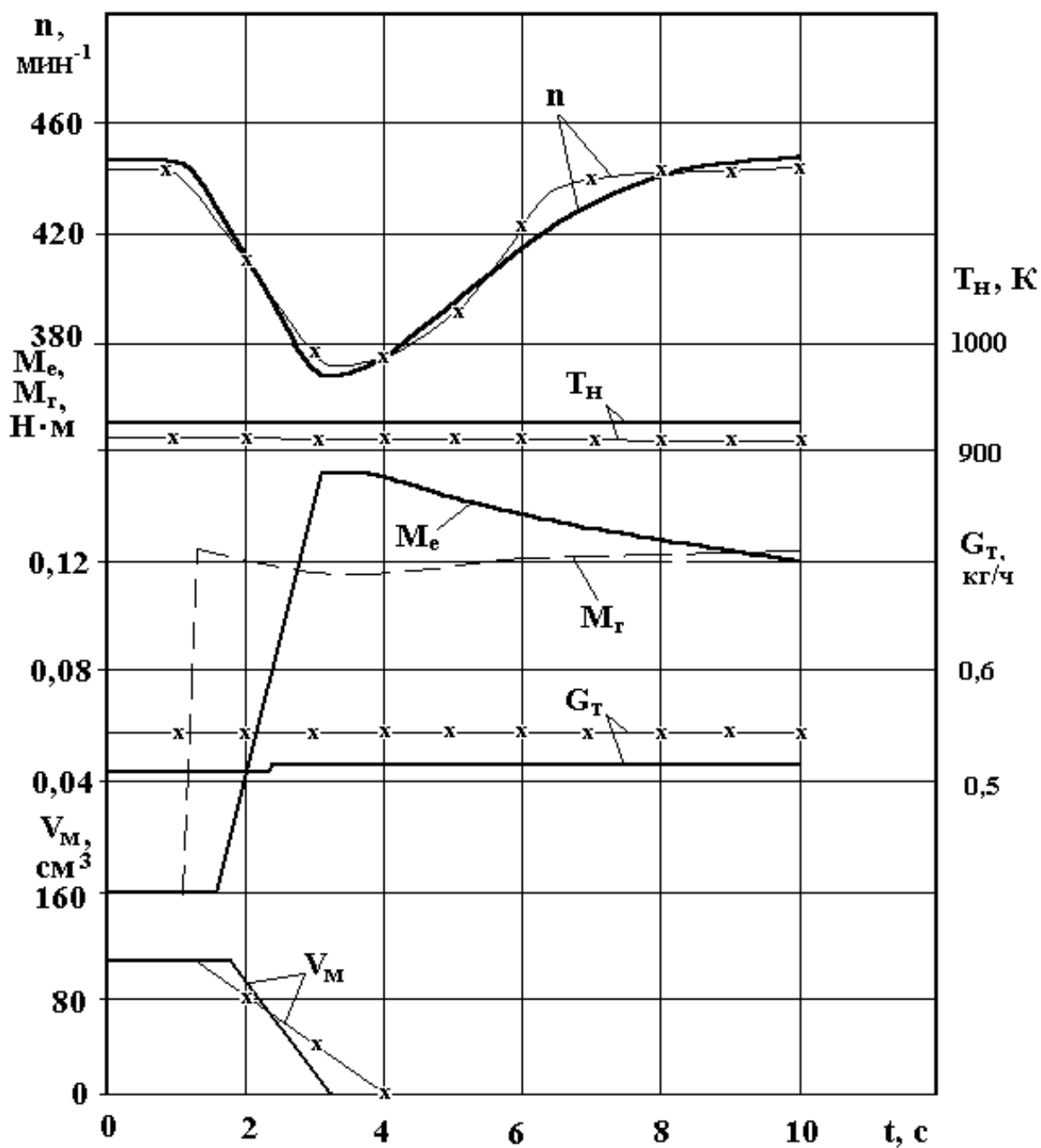


Рис. 5.40. Переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после наброса 100 % нагрузки $N_{нг}$ от 0 до 6,3 Вт:

Как видно из изложенного выше, переходные процессы как при сбросе, так и при набросе 50 и 100 % нагрузки не колебательные. Это свидетельствует о большом запасе устойчивости САРЧ, которая как известно из теории автоматического регулирования и управления, тем больше, чем меньше колебательность переходных процессов.

Таким образом подтверждена адекватность математической модели САР ДС мод. УДС-1 в целом, так как во время переходных процессов работали одновременно и САРЧ и САРТ. Можно считать, что математическая модель пригодна для проведения расчетно-теоретических исследований.

Кроме того, проверка адекватности математической модели подтвердила функциональную работоспособность разработанной САР и возможность применения ее для регулирования температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала маломощных ДС.

5.10. Влияние конструктивных и регулировочных параметров системы автоматического регулирования двигателя Стирлинга мод. УДС-1 на показатели переходных процессов

На качество переходных процессов в САР двигателей влияют, как известно, инерционность входящих в нее звеньев и быстродействие регулятора (или регуляторов, если САР многомерная).

САР ДС мод. УДС-1 является не связанной двухмерной, в нее входят САРТ температуры стенки нагревателя и САРЧ частоты вращения коленчатого вала двигателя.

В математической модели этой САР учтена инерционность ДС в агрегате с электрогенератором и тепловая инерционность системы подвода теплоты в нагревателе и отвода избыточной теплоты в систему охлаждения. Инерционность других звеньев, входящих в САР, не учитывается ввиду ее малости по сравнению с инерционностью ДС вместе с электрогенератором.

Чтобы изменить ту и другую инерционности ДС нужно вносить изменения в его конструкцию.

Быстродействие САРТ и САРЧ зависит как от конструктивных параметров некоторых из входящих в них звеньев, так и от регулировочных параметров.

К конструктивным параметрам САР, которые можно изменять при ее проектировании относятся:

1. Передаточное число шестеренной передачи от реверсивного электродвигателя к штоку поршня в цилиндре с дополнительным “мертвым” объемом.
2. Передаточное число шестеренной передачи от реверсивного электродвигателя к затвору дозатора горючего газа.
3. Отношение диаметра цилиндра с “мертвым” объемом к постоянной максимальной величине “мертвого” объема.

К регулировочным параметрам САР можно отнести:

1. Коэффициенты усиления пропорциональных сигналов управления в блоках формирования сигналов управления в САРТ и в САРЧ.
2. Коэффициенты усиления дифференциальных сигналов управления в блоках формирования сигналов управления в САРТ и САРЧ.
3. Задаваемая точность регулирования температуры стенки нагревателя и частоты вращения.
4. Максимальная величина “мертвого” объема.

Температура стенки нагреваемой части дополнительного цилиндра ДС изменяется медленнее, чем частота вращения, поэтому больший интерес представляет быстродействие САРЧ. Оно определяется скоростью изменения “мертвого” объема независимо от того, каким способом это изменение достигается. Поэтому для расчетно-теоретических исследований принято варьирование коэффициента усиления КР исполнительного механизма регулятора частоты вращения. Этот коэффициент изменяли от 8 до

40 мм/(с·В).

На рис. 5.41 построены расчетные переходные процессы после сброса нагрузки от 6,094 Вт до нуля. Сброс нагрузки происходил за 0,5 с, а изменение “мертвого” объема начиналось с запаздыванием на 0,6 с, принятых с учетом значений этих показателей, измененных во время экспериментов.

На рис. 5.41 показаны зависимости частоты вращения $n=n(t)$ и величины “мертвого” объема $V_m=V_m(t)$ от времени t . Зависимости $V_m=V_m(t)$ при КР=16, 24, 32, 40 мм/(с·В) последовательно смещены одна относительно другой на 40 см³, чтобы график был читаемым.

Видно, что увеличение КР приводит к уменьшению заброса частоты вращения от 115 мин⁻¹ (25,5%) при КР=8 до 49 мин⁻¹ (10,8%) при КР=40 мм/(с·В). Длительность переходного процесса сокращается от 8 до 6 с. Скорость изменения “мертвого” объема возрастает от 37,5 см³/с до 150 см³/с. После завершения переходного процесса поршень “мертвого” объема совершает устойчивые автоколебания и “мертвый” объем изменяется с размахом около 20 см³ и частотой, возрастающей по мере увеличения КР от 0,33 Гц при КР=8 мм/(с·В) до 1,0 Гц при КР=40 мм/(с·В). На частоту вращения n они не влияют.

Эффект от увеличения КР быстро уменьшается по мере того как КР становится больше. Это видно из рис.5.42.

Аналогичная картина имеет место после наброса нагрузки при тех же условиях: по мере увеличения КР “просадка” частоты вращения уменьшается, однако по величине она несколько больше, чем забросы (рис.5.43). Она уменьшается от 145 мин⁻¹ (32,2%) при КР=8 мм/(с·В) до 55 мин⁻¹ (12,5%) при КР=40 мм/(с·В). После завершения переходного процесса возникают автоколебания “мертвого” объема с размахом около 10 см³ и частотой от 0,3 Гц при КР=8 до 0,7 Гц при КР=40, которые на частоту вращения n не влияют.

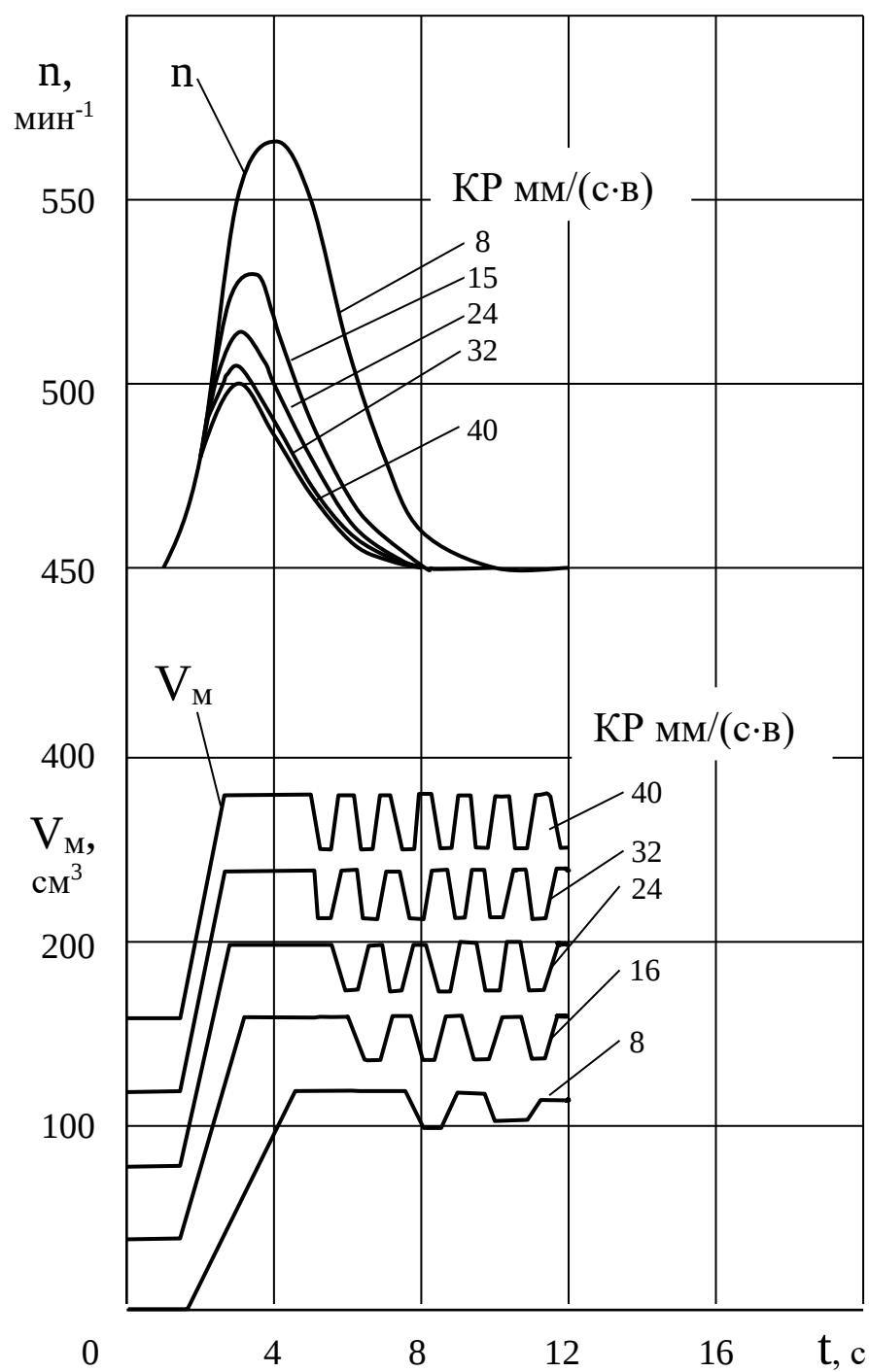


Рис. 5.41. Влияние коэффициента усиления KP на переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса нагрузки от $N_{\text{нр}}=6,094$ Вт до 0

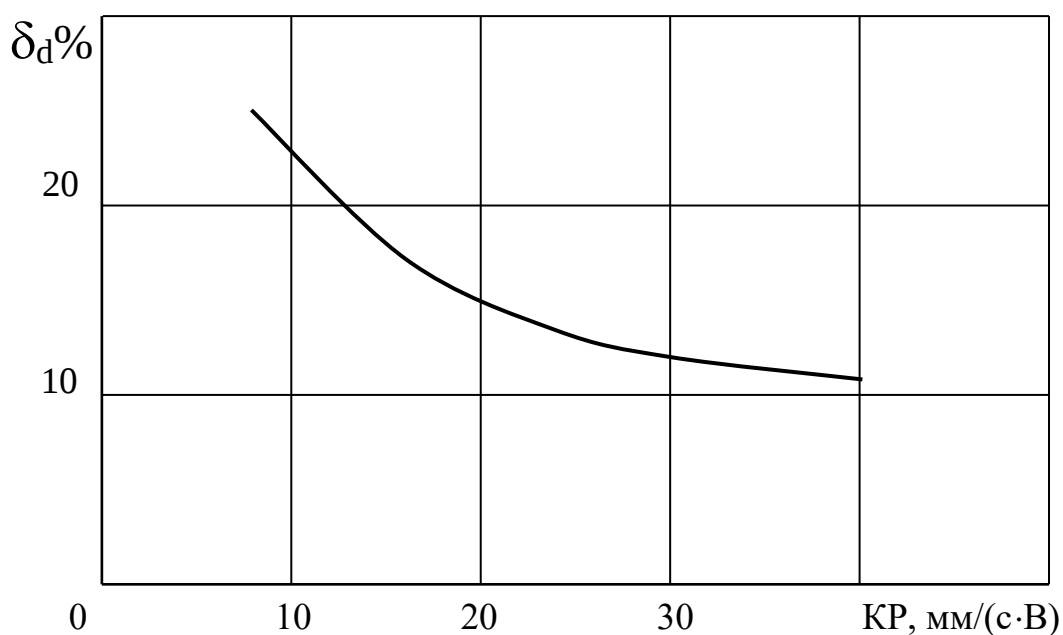


Рис. 5.42. Зависимость заброса δ_d частоты вращения в САР ДС мод УДС-1 после сброса нагрузки от 6,094 Вт до 0 от коэффициента усиления K_P

Максимальная величина “мертвого” объема должна быть такой, чтобы обеспечивалась работа двигателя на холостом ходу по астатической регуляторной ветви. Отклонение в сторону уменьшения этого объема приводит к повышению частоты вращения на холостом ходу из-за перехода на работу без регулятора, а в сторону увеличения – к увеличению размаха колебаний “мертвого” объема на холостом ходу. На рис. 5.44 показаны расчетные переходные процессы после сброса нагрузки от 6,094 Вт до 0 при величинах максимального “мертвого” объема $V_{m\max}=96; 104; 112; 120; 128 \text{ см}^3$.

Из этого графика видно, что изменение $V_{m\max}$ в указанных пределах на заброс частоты вращения не влияет. Но при $V_{m\max}=96$ и 104 см^3 существенно возрастает частота вращения на холостом ходу после завершения переходного процесса до 489 и 467 мин^{-1} соответственно вместо 450 мин^{-1} . При этих величинах $V_{m\max}$ объем V_m не имеет колебаний, т.к. ход поршня “мертвого” объема ограничен.

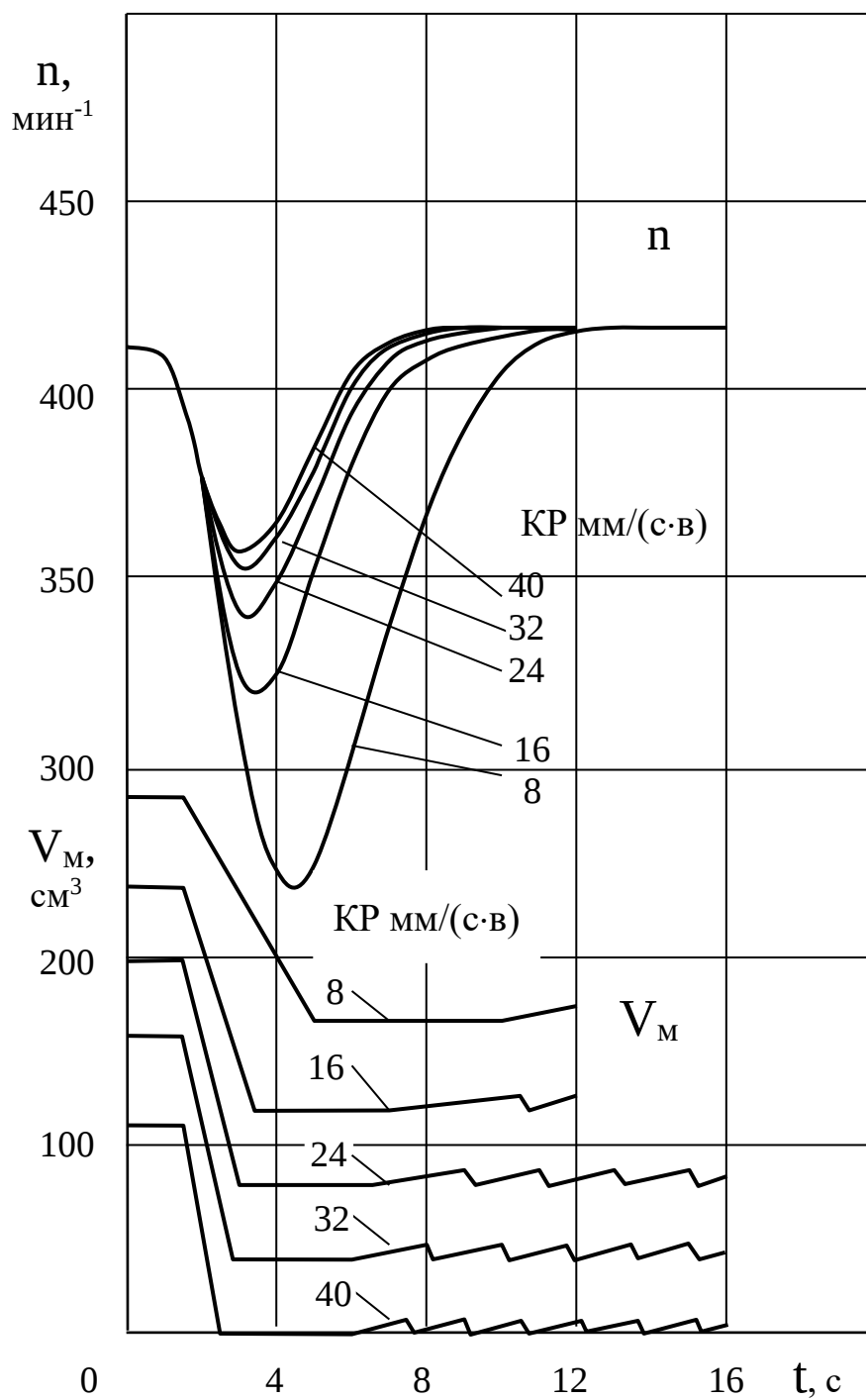


Рис. 5.43. Влияние коэффициента усиления KP на переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после наброса нагрузки от $N_{\text{нр}} = 0$ до 6,0 Вт

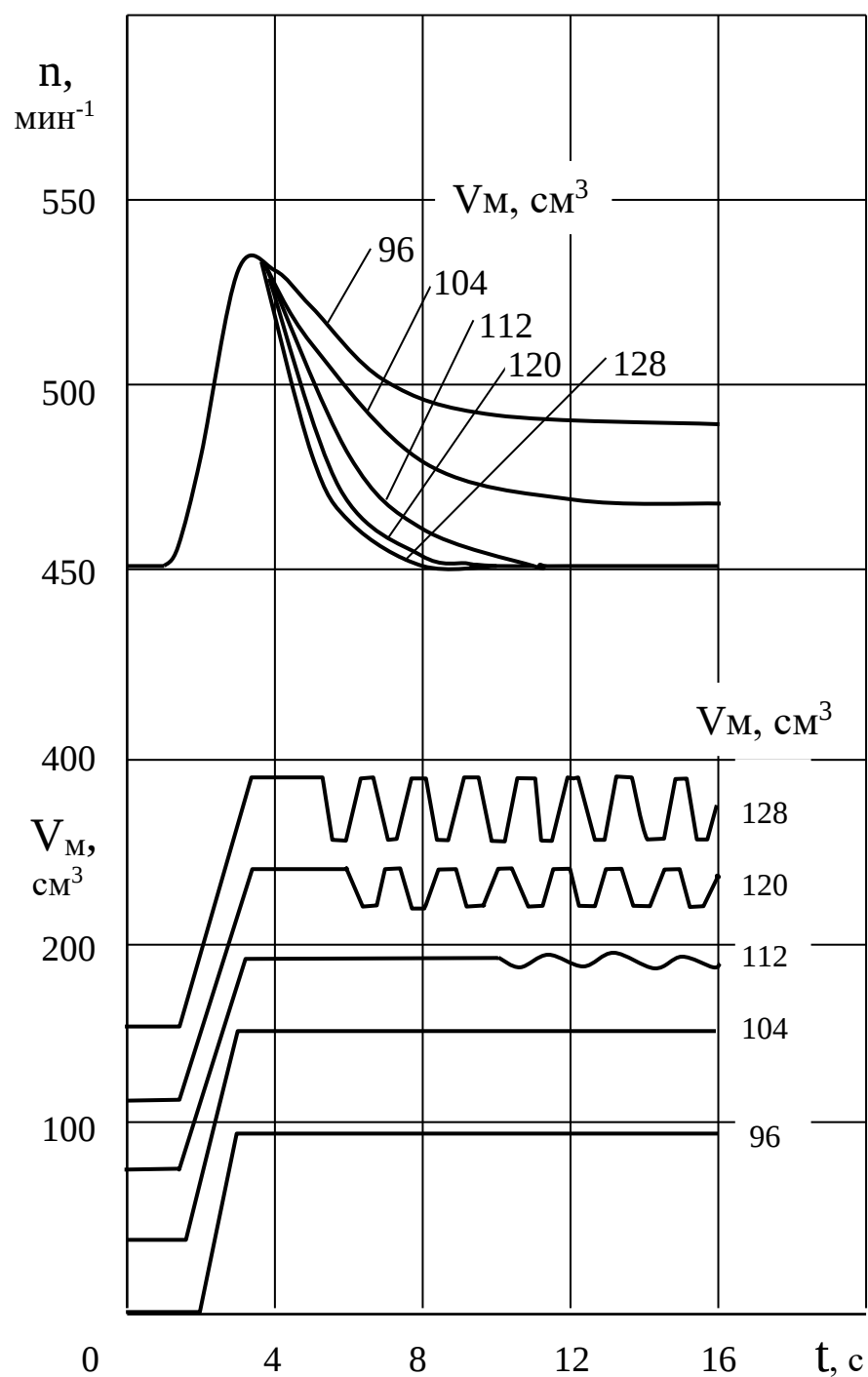


Рис. 5.44 Влияние величины максимального “мертвого” объема $V_{M \max}$ на переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса нагрузки от $N_{\text{нг}}=6,094$ Вт до 0

При $V_{m \max}=112 \text{ см}^3$ начинаются небольшие колебания V_m , размах которых увеличивается по мере увеличения $V_{m \max}$. Однако колебаний частоты вращения n это не вызывает.

Наилучшим можно считать $V_{m \max}=120 \text{ см}^3$, т.к. при таком $V_{m \max}$ надежно гарантируется работа на холостом ходу по астатической регуляторной ветви. Повышение точности регулирования частоты вращения n на заброс и просадку в переходных процессах не влияет. На рис. 5.45 и 5.46 показаны переходные процессы после сброса и наброса нагрузки $N_{нг}$ в пределах от 6,094 Вт до 0 и от 0 до 6,094 Вт при точности регулирования n равной $\Delta n=\pm 0,625 \text{ мин}^{-1}$ и $\pm 3,125 \text{ мин}^{-1}$. Коэффициенты $KP=16 \text{ мм}/(\text{с}\cdot\text{В})$ и $KND=0,16 \text{ с}$. На рис. 5.45 и 5.46 крестиками обозначены кривые, относящиеся к расчету при $\Delta n=\pm 3,125 \text{ мин}^{-1}$ и левая шкала V_m относится тоже к этому расчету.

Кривая $n=n(t)$ на участке заброса совпадают полностью, и после перехода процесса тоже практически совпадают. Отличаются кривые $V_m=V_m(t)$. При $\Delta n=\pm 0,625 \text{ мин}^{-1}$ размах колебаний приблизительно в 2 раза меньше, а частота колебаний в 4 раза больше. Однако эти колебания на частоте вращения n не отражаются.

Анализ влияния воздействия по производной от частоты вращения n показал, что этот фактор на величину заброса и просадки частоты вращения не влияет, но от него существенно зависит устойчивость САРЧ. При $KND=0$ появляются незатухающие колебания величины “мертвого” объема и частоты вращения n . После сброса нагрузки частота колебаний n около 0,2 Гц, а размах колебаний составляет 37...38 мин^{-1} , что недопустимо (рис. 5.47).

При значениях $KND=0,10...0,20 \text{ с}$ получаются наилучшие показатели переходных процессов. При $KND>0,3 \text{ с}$ замедляется возвращение частоты вращения к начальному значению в конце переходных процессов (рис. 5.48). Следовательно, воздействие по производной надо использовать только для обеспечения устойчивости САРЧ.

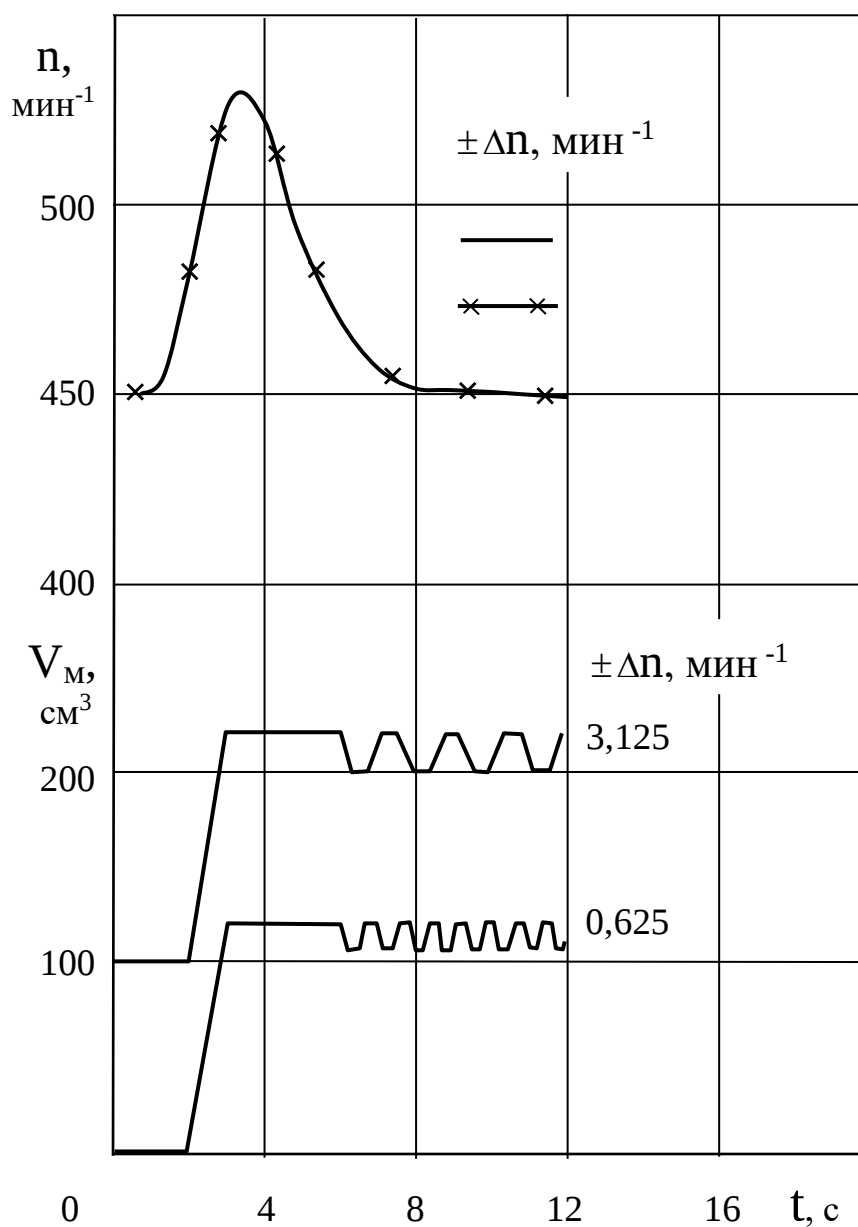


Рис. 5.45. Влияние точности регулирования $\pm \Delta n$ частоты вращения на переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса нагрузки от 6 Вт до 0

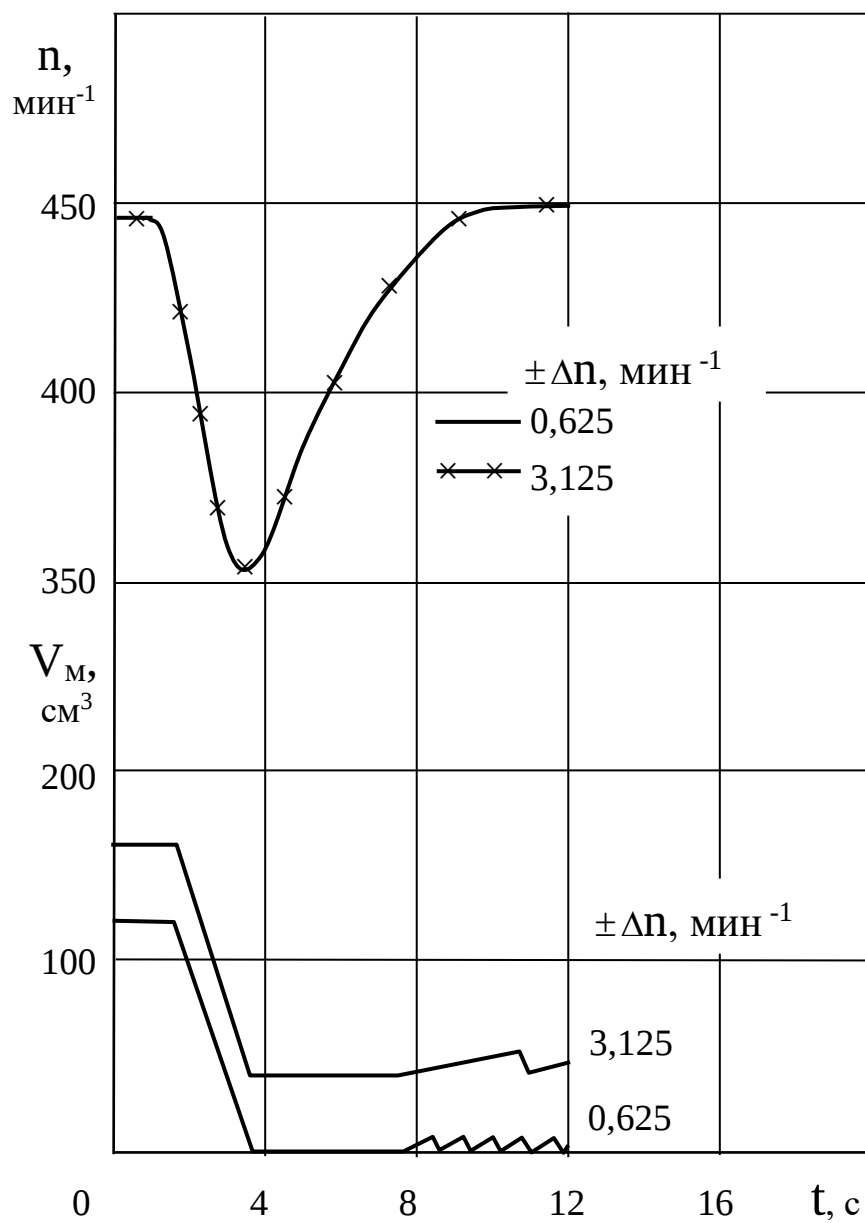


Рис. 5.46. Влияние точности регулирования $\pm \Delta n$ частоты вращения на переходные процессы в САП ДС мод. УДС-1 после наброса нагрузки от $N_{\text{нл}} = 0$ до 6 Вт

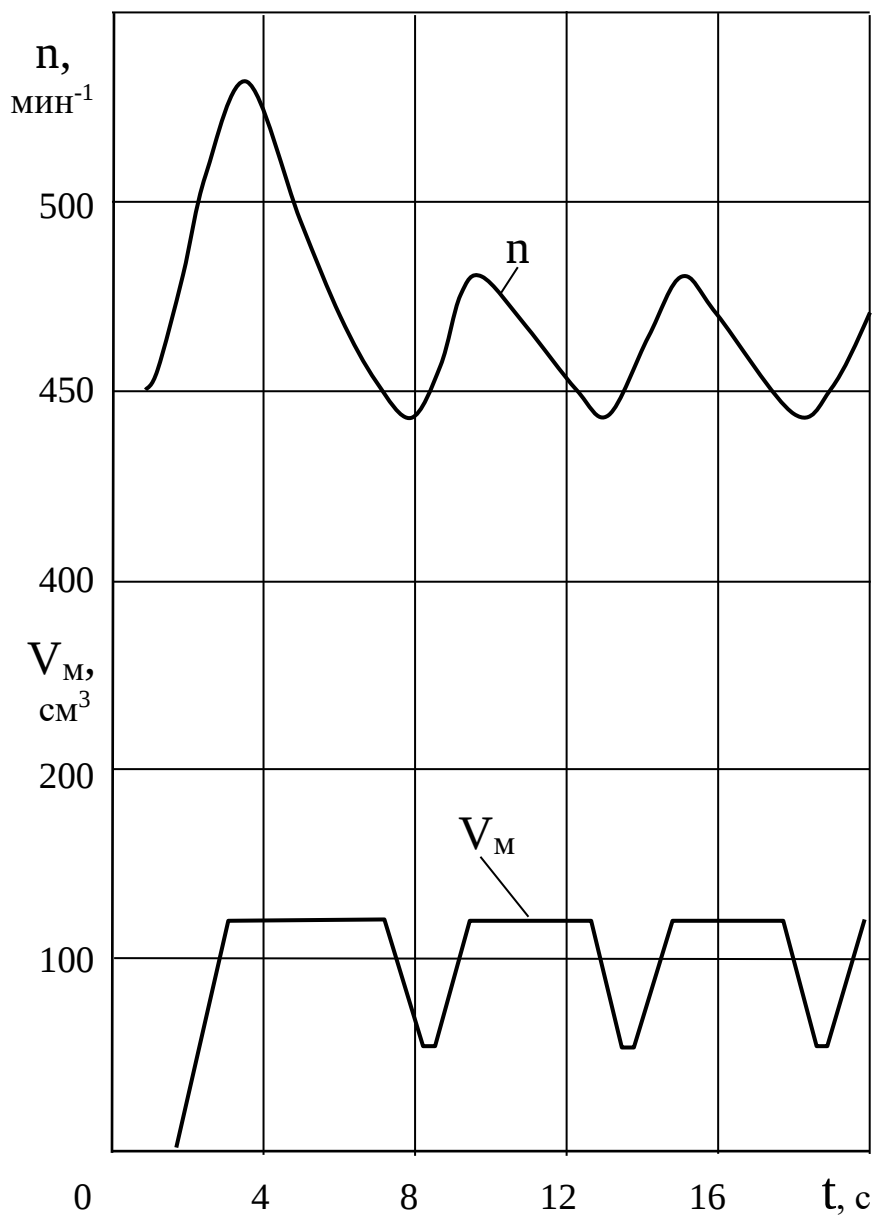


Рис. 5.47. Переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса нагрузки от $N_{\text{нл}} = 6,094$ Вт до 0 при отсутствии воздействия по производной от частоты вращения n : $K_{\text{ND}}=0$

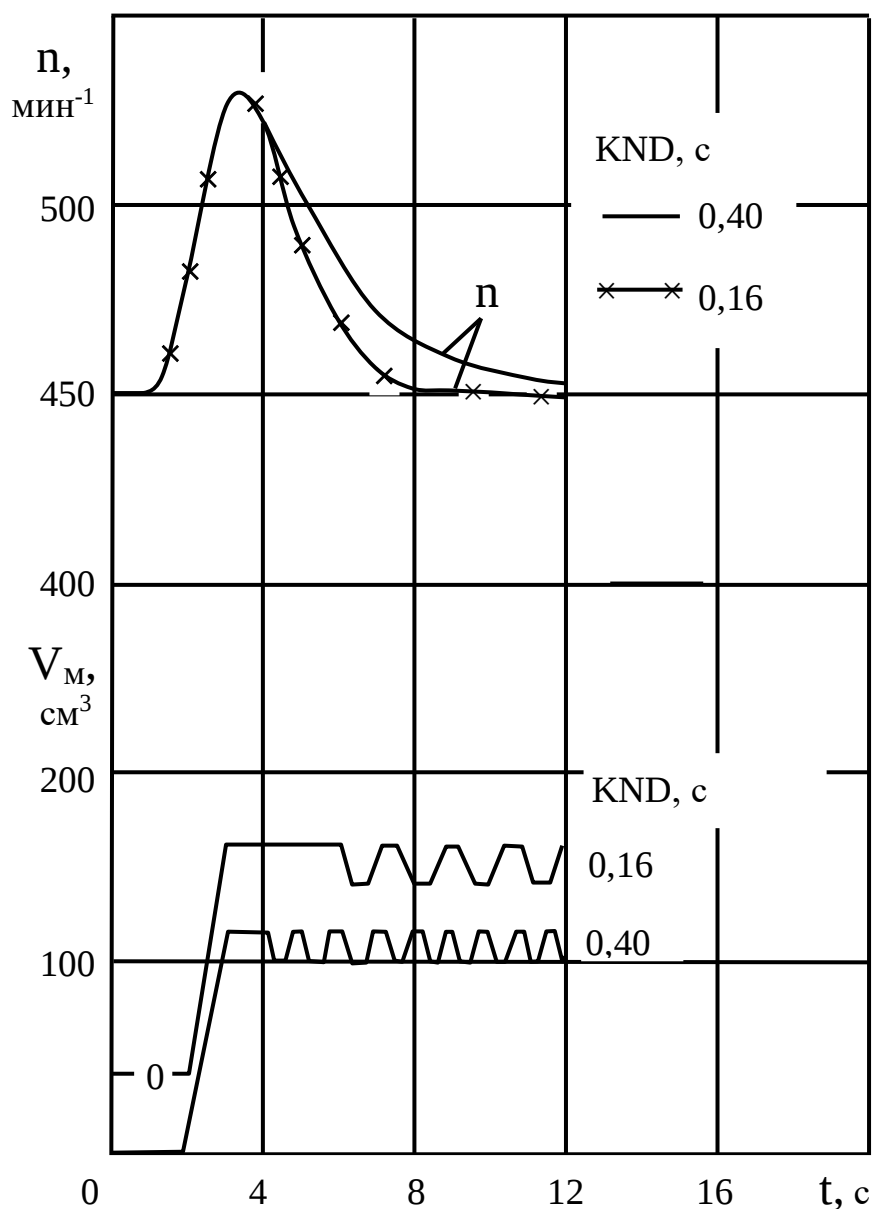


Рис. 5.48. Влияние коэффициента усиления воздействия по производной от частоты вращения КИД на переходные процессы в САР ДС мод. УДС-1 после сброса нагрузки от $N_{\text{нр}}=6$ Вт до 0

Большое влияние на заброс и просадку частоты вращения после сброса и наброса нагрузки оказывает запаздывание изменения величины “мертвого” объема, вызванное зазорами и люфтами в приводе от электромотора к поршню “мертвого” объема. Это видно из рис. 5.49, на котором показаны зависимости заброса и просадки частоты вращения от величины запаздывания $t_{\text{зап}}$ изменения “мертвого” объема, полученные путем расчетов на математической модели для двух значений коэффициента усиления исполнительного механизма регулятора частоты вращения: $KP=16$ и 24 мм/(с·В) .

Как уже отмечалось выше, просадка частоты вращения несколько больше чем ее заброс. Но в обоих случаях при увеличении запаздывания $t_{\text{зап}}$ от 0 до 0,8 с заброс и просадка возрастают линейно. При $KP=16 \text{ мм/(с·В)}$ заброс возрастает в 2,2 раза, а просадка в 2,5 раза, а при $KP=24 \text{ мм/(с·В)}$ заброс возрастает в 4,2 раза, а просадка в 3,0 раза.

На рис. 5.50 показаны зависимости длительности переходных процессов τ после наброса и сброса нагрузки при $KP=24 \text{ мм/(с·В)}$. Она тоже линейно возрастает с увеличением запаздывания $t_{\text{зап}}$.

В разделе 1 было сказано, что в САР Стирлинг – электрического агрегата забросы (просадка) частоты вращения не должны превышать 10%, а длительность переходных процессов должна быть не более 5 с. Из рис. 5.49 и 5.50 видно, что эти условия выполняются при $KP=24 \text{ мм/(с·В)}$ при значениях $t_{\text{зап}}=0...0,1 \text{ с}$.

Это значит, что подбором быстродействия регулятора частоты вращения (коэффициента KP) и уменьшением до минимума запаздывания перемещения поршня в “мертвом” объеме можно обеспечить требуемое качество регулирования разработанной САРЧ Стирлинг – электрического агрегата.

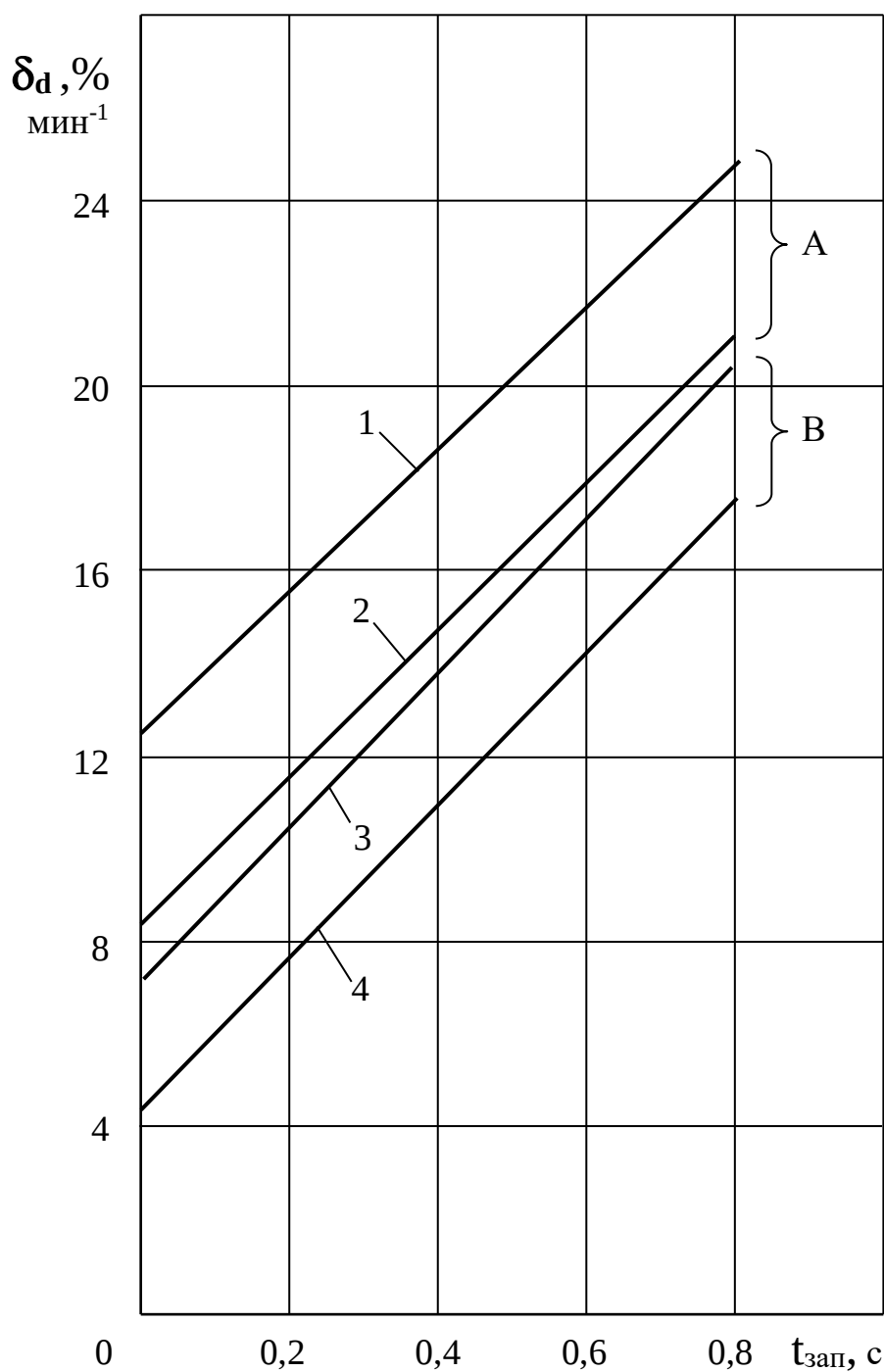


Рис. 5.49. Зависимости просадки (1, 3) и заброса (2, 4) δ_d частоты вращения от запаздывания $t_{\text{зап}}$ изменения величины “мертвого объема” в САР ДС мод. УДС-1 при КР, мм/(с·в): 16 (А) и 24 (В)

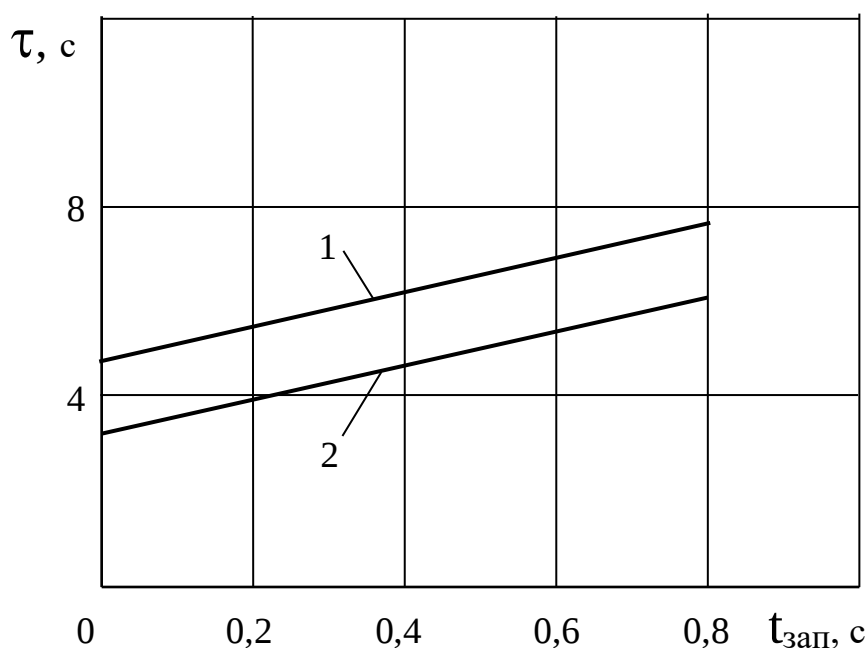


Рис. 5.50. Зависимости длительности τ переходных процессов после наброса (1) и сброса (2) нагрузки в САР ДС мод. УДС-1 при $K_P = 24$ мм/(с·В) от запаздывания $t_{\text{зап}}$ изменения величины “мертвого” объема

При сбросах и набросах нагрузки мощность ДС мод. УДС-1 может изменяться на 6...7 Вт. А так как термический к.п.д. этого ДС очень низкий, такое изменение нагрузки незначительно влияет на температуры $T_{\text{гор}}$ и $T_{\text{н}}$. Поэтому чтобы уловить реакцию САРТ на изменение температуры $T_{\text{н}}$, в расчетах САРТ была настроена на высокую точность регулирования $\Delta T_{\text{н}} = \pm 1,8$ К.

Расчетные исследования показали, что на всех рассматриваемых режимах САРТ поддерживает заданный уровень температуры $T_{\text{н}}$ с принятой точностью, что свидетельствует о нормальном ее функционировании.

Во время переходных процессов она реагирует на изменение температуры $T_{\text{н}}$, хотя они и незначительные.

Например, участие возрастания n после сброса нагрузки от 6 Вт до 0 температура $T_{\text{н}}$ увеличивается от 921 до 922 К, при этом срабатывает САРТ и

подача топлива уменьшается от 0,52 кг/ч до 0,511 кг/ч и температуры $T_{к.с}$ постепенно уменьшается от 1075 до 1070 К, температура T_n до 919,5 К.

При этом температура $T_{гор}$ в горячей полости дополнительного цилиндра сначала возрастает от 818 до 822 К, а затем постепенно снижается до 819 К.

После наброса нагрузки такие же изменения происходят в обратном направлении.

5.11. Направление дальнейших исследований

В настоящей диссертации разработана двухмерная САР температуры стенки нагревателя и частоты вращения коленчатого вала маломощного ДС с регулированием мощности изменением величины “мертвого” объема и доказана ее функциональная работоспособность. Но в качестве объекта регулирования вынуждено принят негерметичный, а поэтому неперспективный ДС мод. УДС-1.

Поэтому первой задачей дальнейших исследований является проведение их на перспективном герметичном маломощном ДС. Такого ДС сейчас в Украине нет, его надо создать. Работы в этом направлении ведутся в НТУ и ТГАТА.

На рис. 5.51 и 5.52 показан вариант маломощного Стирлинг – электрического агрегата, разрабатываемого на кафедре “Двигатели и теплотехника” НТУ. На них обозначено: 1 – рабочий поршень; 2 – рабочий цилиндр; 3 – маслоуловитель; 4 – камера сгорания; 5 – регенератор; 6 – охладитель рабочего тела; 7 – цилиндр с “мертвым” объемом; 8 – шестерня привода штока поршня “мертвого” объема; 9 – шток поршня “мертвого” объема; 10 – поршень “мертвого” объема; 11 – “мертвый” объем; 12 – электрический генератор; 13 – маховик; 14 – свеча для воспламенения горючей смеси при пуске двигателя; 15 – дополнительный цилиндр; 16 –

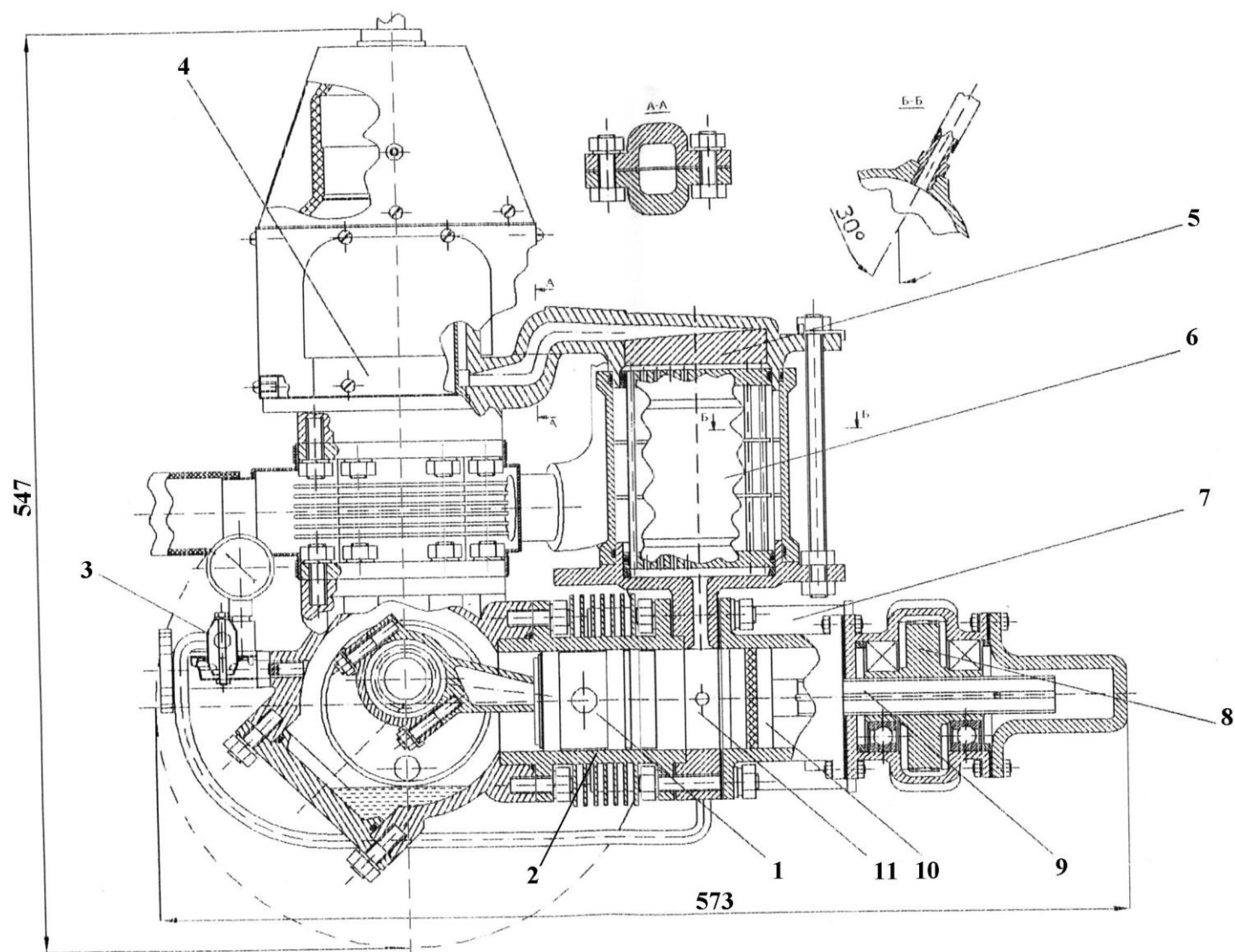


Рис. 5.51. Поперечный разрез двигателя Стирлинга: $N_e=2,0$ кВт; $n=1500$ мин⁻¹

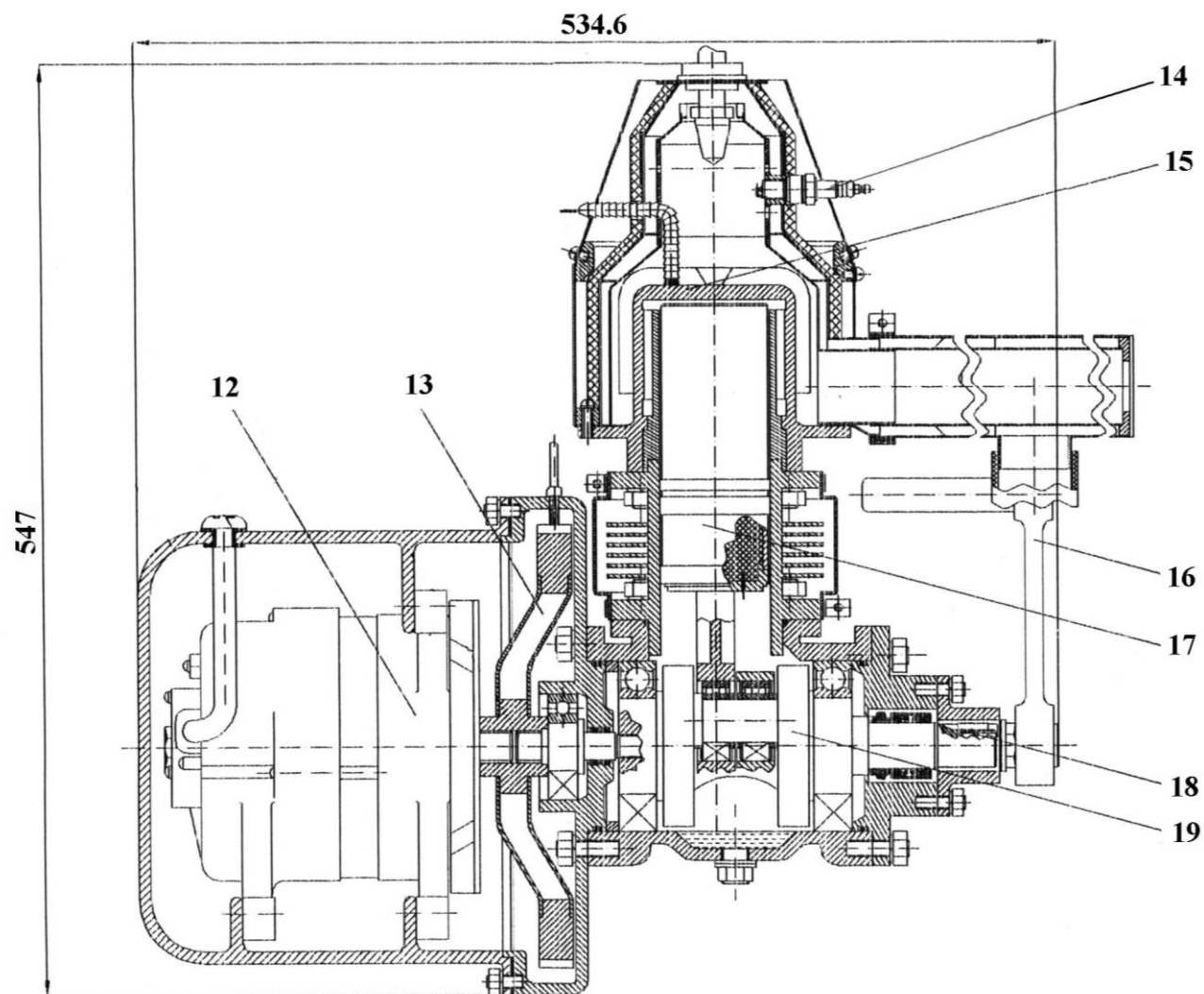


Рис. 5.52. Продольный разрез двигателя Стирлинга: $N_e=2,0$ кВт; $n=1500$ мин⁻¹

пусковая рукоятка; 17 – поршень-вытеснитель дополнительного цилиндра; 18 – храповой механизм; 19 – коленчатый вал.

Цилиндр 7 с изменяемым “мертвым” объемом выполнен как продолжение рабочего цилиндра 2. Двигатель герметичен, электрический генератор 12 размещен внутри картера двигателя.

Второй задачей можно считать улучшение качества переходных процессов путем введения воздействия по нагрузке электрического генератора или параллельных корректирующих связей. Это темы для следующих диссертаций.

Выводы по пятому разделу

1. С помощью дополнительного изменяемого “мертвого” объема можно регулировать мощность ДС мод. УДС-1 в пределах от максимального значения до нуля. Для этого исходный “мертвый” объем нужно увеличивать в 1,6...1,7 раза.

2. ДС мод. УДС-1 с изменяемым дополнительным “мертвым” объемом развивает мощность до $N_e = 7,0 \dots 7,7$ Вт при частоте вращения коленчатого вала $n = 400 \dots 450$ мин⁻¹, температуре наружной стенки горячей части дополнительного цилиндра $T_n = 915 \dots 920$ К и температуре в холодной полости $T_{хол} = 340 \dots 350$ К. Его вполне можно использовать в качестве регулируемого объекта для исследований двухмерной САР ДС.

3. Зависимости эффективных крутящего момента и мощности ДС мод. УДС-1 от частоты вращения коленчатого вала подобны опубликованным в литературе аналогичным зависимостям известных ДС различной мощности, и сходны с соответствующими зависимостями поршневых бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Они имеют параболический характер.

4. Получить скоростную характеристику условных механических потерь ДС путем прокручивания его коленчатого вала от внешнего приводного электродвигателя невозможно, так как в этом случае ДС начинает работать

как холодильная машина. Эту характеристику можно определить путем снятия серии индикаторных диаграмм ДС при разных частотах вращения, вычисления по ним значений индикаторной мощности и вычитания из них значений эффективной мощности, измеренных путем торможения ДС при тех же частотах вращения. Полученная таким методом скоростная характеристика условных механических потерь ДС мод. УДС-1 имеет вид параболы и хорошо аппроксимируется полиномом второй степени.

5. Проведением трехфакторного эксперимента методом математического планирования многофакторных экспериментов подтверждена возможность аппроксимации опытных зависимостей индикаторного крутящего момента M_i ДС мод. УДС-1 от частоты вращения n , температуры $T_{гор}$ в горячей полости и величины дополнительного “мертвого” объема V_m полиномом 2-ой степени с тремя аргументами. Определены численные значения коэффициентов аппроксимации для этого полинома.

6. Момент сопротивления электрического генератора, агрегатированного с ДС мод. УДС-1, возрастает с ростом частоты вращения и уменьшается с увеличением сопротивления нагрузочного реостата. Эта двухфакторная зависимость достаточно хорошо аппроксимируется полиномом 2-ой степени с двумя аргументами.

7. ДС мод. УДС-1 в агрегате с электрическим генератором является апериодическим звеном 2-го порядка, движение которого описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка с постоянными коэффициентами. Путем варьирования значений коэффициента $I_{дд}$ при второй производной и I_d при первой производной определены их значения, $I_{дд} = 0,008 \text{ кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^3$ и $I_d = 0,012 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, при которых обеспечивается адекватность математической модели самого ДС мод. УДС-1 без регуляторов.

8. Максимальный индикаторный КПД ДС мод. УДС-1 равен 1,5...1,6 %, это значит, что индикаторная мощность этого ДС составляет незначительную долю вводимого в него теплового потока. Поэтому изменение нагрузки,

действующей на ДС, в пределах от полной мощности до нуля вызывает весьма незначительное изменение температуры $T_{гор}$, T_n , $T_{хол}$ при постоянном расходе топлива.

9. Разработанная динамическая математическая модель двухмерной САР ДС мод. УДС-1 адекватно описывает установившиеся и переходные процессы в ней. Основная ошибка измерения основных параметров n , T_n , V_m , G_T значительно меньше предельно допустимой ошибки 10%.

ВЫВОДЫ

1. Для автономного снабжения электричеством небольших жилых зданий, мастерских, ферм, строительных площадок и т.п. расширяется применение двигатель – электрических агрегатов постоянного и переменного тока небольшой мощности 0,5...10,0 кВт. В качестве первичного двигателя в них, как правило, используются поршневые двигатели внутреннего сгорания : бензиновые с искровым зажиганием и дизели.

2. Но в таких агрегатах можно применять и двигатели с внешним подводом теплоты – двигатели Стирлинга (ДС), конструкции которых, благодаря созданию новых высокопрочных и жаростойких материалов и технологий их обработки доведены до высокой степени совершенства.

Однако для ДС требуется сложная многомерная система автоматического регулирования (САР) частоты вращения коленчатого вала и температуры стенки нагревателя, причем мощность регулируют изменением начального давления рабочего цикла в цилиндрах ДС.

3. Систему автоматического регулирования маломощного двигателя Стирлинга можно упростить путем применения регулирования мощности изменением величины “мертвого” объема и подачи воздуха в камеру сгорания естественной тягой.

Такая экспериментальная двухмерная САР разработана в диссертации.

Для натурных исследований изготовлена экспериментальная Стирлинг – электрическая установка с учебным ДС мод. УДС-1, оборудованным экспериментальной САР.

4. Экспериментальная САРТ разработана на базе микропроцессорного измерителя – регулятора ТРМ12-Рис, в который внесены изменения для увеличения его быстродействия, а экспериментальная САРЧ – на базе счетчика импульсов СИ-8. В САРТ и САРЧ реализуется релейный

трехпозиционный принцип регулирования и осуществляется пропорционально – дифференциальный закон регулирования.

5. Опытами установлено, что ДС мод. УДС-1 в агрегате с электрическим генератором является апериодическим звеном второго порядка, движение которого описывается линейным дифференциальным уравнением 2-го порядка.

6. Для расчетно – теоретических исследований разработана нелинейная динамическая математическая модель САР ДС мод. УДС-1 в агрегате с электрогенератором и составлены алгоритмы и программы для выполнения расчетов на ЭВМ. В математическую модель входят одно дифференциальное уравнение второго порядка и четыре дифференциальные уравнения первого порядка, в ней учтены основные существенные и несущественные нелинейности. Динамические процессы в САР рассчитывались на ЭВМ путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты-Фельдберга.

Подтверждена адекватность математической модели.

7. Расчеты на математической модели и натурные эксперименты показали:

а) релейные регуляторы обеспечивают получение астатических характеристик частоты вращения ДС и температуры нагревателя;

б) переходные процессы по частоте вращения после мгновенного сброса – наброса нагрузки происходят с одним забросом частоты вращения, что свидетельствует о большом запасе устойчивости САРЧ;

в) на показатели качества переходных процессов после мгновенных сброса и наброса нагрузки основное влияние оказывает скорость изменения дополнительного “мертвого” объема и запаздывание начала его изменения. Чем больше скорость и меньше запаздывание, тем меньше заброс частоты вращения и длительность переходного процесса;

г) введение в закон регулирования воздействия по производной способствует повышению устойчивости САР;

д) при скорости изменения дополнительного “мертвого” объема не менее $100 \text{ см}^3/\text{с}$ и запаздывании не более $0,1 \text{ с}$ в исследованном САР обеспечиваются показатели переходных процессов в соответствии с ГОСТ 13822-82 и ГОСТ 10511-83: заброс частоты вращения не более 10%, длительность переходного процесса регулирования не более 5с.

8. Проведенные исследования имеют поисковый характер. Результаты их используются в научно-исследовательской работе и в учебном процессе в ТГАТА и НТУ и могут быть использованы при разработках отечественных Стирлинг - электрических агрегатов небольшой мощности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гутаревич Ю.Ф., Говорун А.Г., Корпач А.А. К вопросу использования рапсового масла в качестве моторного топлива// Труды ТГАТА.- Вып.2. Отраслевое машиностроение, Т.3.-Мелитополь, 1998.-С.60-64.
2. Уон Чжинан, Ши Линь Использование биогаза в Китае// Проблемы механизации технологических процессов в сельском хозяйстве: - К., 1992.- С.89-92.
3. Чалый Д.А. Проблемы термической переработки биомассы в моторное топливо// Труды ТГАТА.-Вып.2. Отраслевое машиностроение, Т.2. –Мелитополь, 1997. С.121-124.
4. Киселев А.В. Перспективы альтернативных топлив в теплообеспечении животноводческих ферм// Труды ТГАТА.- Вып.2. Отраслевое машиностроение. Т.2. – Мелитополь, 1997.- С.125-128.
5. Парсаданов И.В. Эффективность применения природного газа в качестве топлива для дизелей// Труды ТГАТА.- Вып.2. Отраслевое машиностроение, Т.3.-Мелитополь,1998.-С.39-42.
6. Уокер Г. Двигатели Стирлинга. – М.: Машиностроение, 1985. – 402 с.
7. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. – М.: Мир, 1986. - 464 с.
8. Мищенко Н.И. Нетрадиционные малоразмерные двигатели внутреннего сгорания. В 2 томах. Т.1. – Донецк: “Лебедь”, 1998. – 228 с.
9. Van Cassel R., Reiniok F.. Design of the 4-215 DA Automotive Stirling Engine. // SAE Preprints:- 1977. №770082. – 14 p.
10. Simetkosky M.A.. Automotive Stirling Engine Development Program. Mod.1 Stirling Development//18th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. Energy Marketplace, Orlando, Fla., Aug. 21-26, 1983: Proc. Vol.2.p.856-862.
11. Richney A.E.. Mod.2 Automotive Stirling Engine Description and Performance Projections // SAE Techn. Paper Ser.- 1986.- №860059. – 8 p.

12. Farrel R.A.. Mod.2 Stirling Engine Overwiev // SAE Techn. Pap. Ser.- 1988.- №880539. – 12 p.
13. V160 Stirling Engine Program Update / Lohansson L., Torstensson B., Williams T.Y., Houtman W.H., Monahan R.// SAE Techn. Pap. Ser.- 1988.- №880542.-9p.
14. Tadashi Kondoh, Kikuo Katoh. Automotive Stirling Engine Development for Small Passenger Car// SAE Techn. Pap. Ser. –1988.- №880538. – 7 p.
15. STM 4-120 Stirling Engine test development/ Cadett T.M., Meijen R.I., Verhey R.P., Pearson C.I., Khalili K.// SAE Techn. Pap. Ser.- 1989.- №890149 .– 6 p.
16. Walker G., Fauvel R., Srinivasan S., Gustafson R., van Denthem I. Future Coal-Burning Stirling engines // Journ. Mech. Engrs.-1983.- January - P.37-44.
17. Wos J.. Design Characteristics of an Advanced Stirling Engine Concept // Proc. 14th Intercoc. Energy Conf., Boston, Mass., 1979. Vol.1. P.1191-1196.
18. Мартін Вульф, Файнешнл Таймс. Як захід підвів Росію.-К.: Наукова думка, 1996.-55с.
19. Украина в числах.- 2000.-№19.
20. Украина в цифрах за 1999-2000 годы. Краткий статистический справочник.-К.: Техника, 2000-270с.
21. Народное хозяйство України в цифрах у 2000 р. Статистичний щоденник.-К.: Техніка, 2001.-215с.
22. Доброходов В., Лалаяни А., Стырикович М. Биоэнергетика в начале пути//Правда. 28.апреля 1984.
23. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга: Пер. с англ.: - М.: энергия, 1978. – 152с.
24. Автомобильные двигатели. Под ред. М.С. Ховаха. –М.: Машиностроение, 1977. – 591с.

25. Разработка принципиальные схемы, конструкции и математические модели, методы расчета и оптимизации системы автоматического регулирования (САР) двигателя Стирлинга. Выбор и анализ информационных данных по системам автоматического регулирования частоты вращения и температуры двигателей Стирлинга: Отчет о НИР / киевский авт. дор. ин-т /КАДИ/; Руководитель К.Е. Долганов. - № ГР 01.89 0028508; Инв. № 029.00029357. –Киев, 1989. – 118с.

26. Лушпа А.И., Баубеков А.А. Оценка возможности пневмогидравлического способа регулирования автомобильного двигателя Стирлинга // Двигателестроение. – 1985. - №12. – С. 24-25

27. ГОСТ 14228-80. Дизели и газовые двигатели автоматизированные. Классификация по объему автоматизации. –М.: Изд-во стандартов, 1981. – 6с.

28. ГОСТ 13822-82. Электроагрегаты и передвижные электростанции, дизельные. Общие технические условия. –М.: Изд-во стандартов, 1983. – 45с.

29. ГОСТ 10511-83. Системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) судовых, тепловозных и промышленных дизелей. Общие технические требования. –М.: Изд-во стандартов, 1984. – 15с.

30. Винарский М.С. Разработка и исследование системы автоматического регулирования температуры нагревателя двигателей с внешним подводом теплоты: Дис.... канд. техн. наук: 05.04.02. – Защита 29.03.88; ЦНИДИ. –Л., 1988 – 193с.

31. Michael A. Simetkosky. Automotive Stirling Engine Development Program. Mod I Stirling Engine Development. 18th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf.: Energy Marketplace, Orlando, Flo, Aug. 21-26, 1983. Proc. Vol.2, p. 856-862.

32. Alber E. Richney. Mod II Automotive Stirling Engine Description and Performance Projections. – SAE Tech. Pap. Ser., 1986. - №860059. – 8p.

33. Roger A. Farrel. Mod II Stirling Engine Overview. – SAE Techn. Pap. Ser., 1988. - №880539. – 12p.

34. Chip Hindes and Robert Stotts. Automotive Stirling Engine System Component Review. – SAE Techn. Pap. Ser., 1987. - №870102. – 5p.
35. Meacher Iohn S. Mod II automotive Stirling engine performance and manufacturing cost reduction. – SAE Techn. Pap. Ser., 1989. - №890151. – 11p.
36. Двигатель с внешним подводом теплоты: А.с. 1105676 СССР, МКИ F 02 G 1/06. / А.И. Лушпа, А.А. Баубеков (СССР). - №3694869/25; Заявлено 27.01.84; Опубл. 07.06.85, Бюл. №21. – 2с.
37. Столяров С.П. Двигатели Стирлинга. Проблемы XXI века. Инженерные проблемы маркетинга // Двигателестроение. – 2002. - №1. – С.9-12.
38. Долганов Кинт, Лисовал Анатолий, Постол Юлия, Краснокутская Зоя. Экспериментальная когенерационная Стирлинг – электрическая установка // Materialy XIII Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemow pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2002, – С.47-50.
39. Долганов К.Е., Лисица В.П. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга модели УДС-1. – Двигателестроение, 1989, №5, С.28,33.
40. Скурьят Э.Н. И снова “Стирлинг”. – Техника-молодежи, 1986, №7, С.26-30.
41. Андрусенко С.И., Долганов К.Е., Дейнеко А.М. Учебно-демонстрационный двигатель Стирлинга // Автомобильная промышленность. – 1989. - №10. С. 18-19.
42. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Постол Ю.А. Исследование двигателя Стирлинга модели УДС-1 // Вісник НТУ “ХПІ”. Тематик. зб. наук. праць “ДВЗ”. Харків, НТУ “ХПІ”. – 2001. - №1. – С. 99-108.
43. Дослідний Стирлінг – електричний агрегат / Долганов К.Е., Постол Ю.О., Мержиєвська В.В. // Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2002. – Вип..5 – С. 36-37.

44. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Постол Ю.О. Вдосконалення двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: УТУ, 2001. - №11. – С.26-30.

45. Стефановский А.Б., Снижко Е.В., Постол Ю.А. Приближенное определение коэффициентов полезного действия малогабаритного двигателя Стирлинга типа “гамма” // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: Научный вестник – Челябинск: ЧВАИ, 2001. – Вып. 12. – С.77-81.

46. Долганов Кинт, Лисовал Анатолий, Постол Юлия, Мержиевская Валентина. Релейный регулятор частоты вращения для экспериментальной Стирлинг-электрической установки / *Materialy XIV Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemow pojazdow samochodowych i maszyn roboczych samojedznych”*. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2003, – С.55-60.

47. Справочник по карабельной автоматике / Ю.К. Баленко, П.И. Бухтеев, А.А. Кротов и др. – М.: Воениздат, 1974. –326с.

48. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – Л.: Энергия, 1969. – 375с.

49. Долганов К.Е. Применение электронных систем управления на газодизелях // Автошляховик України. – 1994. - №3. – С. 20-23.

50. Математическая модель САРЧ дизеля с автономным турбонаддувом / Долганов К.Е., Остапенко Г.И., Голод И.И., Краснокутская З.И., Каньковский И.Е.; Киевск. автомоб.-дор. ин-т. – Киев, 1986. – 35с.: ил. – Библиогр.: 17 назв. – Рус. – Доп. в УкрНИИНТИ 07.07.86, №1587 – Ук 86.

51. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1979. – 615с.

52. Крутов В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1989. – 416с.

53. Крутов В.И. Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект. – М.: Машиностроение, 1978. – 472с.

54. Сережко Н.Ю. Совершенствование системы автоматического регулирования скорости дизель – электрического агрегата с механическим регулятором: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 30.09.82. – Харьков, ХИИТ, 1982. – 284с.

55. Остапенко Г.И. Улучшение эксплуатационной топливной экономичности и снижении дымности отработавших газов транспортного дизеля путем совершенствования системы регулирования топливоподачи: Дис. .. канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 27.12.82. – Харьков, ХИИТ, 1982. – 257с.

56. Ковалев С.А. Улучшение статических и динамических показателей и повышение топливной экономичности мобильного дизель – электрического агрегата путем введения импульса по нагрузке: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 27.06.86. – Баку, АзПИ, 1986. – 274с.

57. Грицук И.В. Улучшение статических и динамических характеристик САРЧ дизеля передвижного сварочного агрегата АС-81 совершенствованием регулятора частоты вращения: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 22.12.88. – Харьков, ХИИТ, 1988. – 331с.

58. Голод И.И. Повышение использования мощности и улучшение топливной экономичности тракторного дизеля в условиях эксплуатации применением адаптивного регулятора: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 31.03.88. – Харьков, ХИИТ, 1988. – 338с.

59. Лисовал А.А. Улучшение статических и динамических показателей системы автоматического регулирования частоты вращения (САРЧ) дизель – электрического агрегата применением параллельного корректирующего устройства с электронным блоком управления: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02. Защищена 20.06.91. – Харьков, ХИИТ, 1991. – 224с.

60. Рафалес-Ламарка Э.Э., Николаев В.Г. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 119с.

61. Таблицы планов экспериментов для факторных и полиномиальных моделей (справочное пособие) / Под. Ред. Налимова В.В. – М.: Металлургия, 1982. – 752с.

62. Айзерман М.А. Лекции по теории автоматического регулирования. – М.: Госфизматиздат, 1958. – 520с.

63. Постол Ю.А. Методика и результаты определения мгновенных интенсивностей нагрева и охлаждения газообразного рабочего тела в ДВПТ по его индикаторной диаграмме // Труды ТГАТА, т.5, вып.2. – Мелитополь, 1998. – С. 11-16.

64. Стефановский Б.С., Стефановский А.Б., Постол Ю.А., Снижко Е.В. Некоторые особенности нагрева и охлаждения рабочего тела в течение рабочего цикла ДВПТ модификации “гамма” // Труды ТГАТА, т.6, вып.2. – Мелитополь, 1998. - С. 10-13.

65. Стефановский А.Б., Постол Ю.А., Снижко Е.В. Обобщенные зависимости, характеризующие нагревание рабочего газа учебно-демонстрационного двигателя Стирлинга УДС-1 // Автомобильная техника: Науч. вест. / ЧВАИ. – Челябинск, 2002. Вып.14.– С.126 -131.

66. Головинцов А.Г., Юдаев Б.Н., Федотов Е.И. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Машиностроение, 1970. – 295с.

67. Яковлев Л.Г. Приборы контроля работы силовых установок. – М.: Машиностроение, 1969. – 300с.

68. Форсайт Д.Е., Малькольм М.А., Моулер К.Б. Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. – 273с.

69. Салтыков А.И., Макаренко Г.И. Программирование на языке Фортран. – М.: Наука, 1984. – 272с.

70. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768с.

71. Основы автоматического регулирования и управления /Л.И.Каргу, А.П. Литвинов, Л.А. Майборода, В.В. Морозов и др. – М.: Высшая школа, 1974. – 439с.

72. Долганов К.Е., Лисовал А.А., Постол Ю.А., Постол А.А. Электрическая тормозная установка для исследований двигателя Стирлинга модели УДС-1. Вісник “ХП”, Тематичний збірник наук праць “ДВЗ”. Харків, НТУ “ХП”, 2001. – №2, С.61-66.

73. ГОСТ 18509-80. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1980.- 58 с.

74. Райков И.Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. – М.: Высшая школа, 1975.- 320 с.

75. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 10 с.

76. ГОСТ 11.004-74. Прикладная статистика. Правила определения оценки и доверительных границ для параметров нормального распределения. – М.: Издательство стандартов, 1974. – 20с.

77. ГОСТ 11.002-73. Правила оценки аномальности результатов наблюдений. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 26с.

78. Галушко В.Г. Вероятностно-аналитические методы на автотранспорте. – К.: Вища школа, 1976. – 232с.

79. Общая теория статистики: Учебник / Г.С. Кильдышев, В.Е. Овсиенко, П.К. Рабинович, Т.В. Рябушкин. – М.: Статистика, 1980. – 423с.

80. Долганов К.Є., Лісовал А.А., Мержиєвська В.В., Постол Ю.О. Регулювання потужності двигуна Стірлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів: Зб. наук. пр. – К.: УТУ; ТАУ, 2003. - №16. – С.56-60.

81. Долганов К.Е., Мержиевська В.В., Постол Ю.А. Характеристики удосконаленого двигуна Стирлінга моделі УДС-1 // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту і експлуатації автомобілів; Збірник наук. пр. – Вип.13. –Київ, НТУ, ТАУ. –2002, - С.13-18.

82. Долганов К.Е., Постол Ю.А. Характеристики мініатюрного двигателя Стирлинга модели УДС-1 // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки; Зб. наук. пр. НАУ “ХАІ”. –Харків, “ХАІ”. –2002. –Вип.30. С.28-30.

83. Долганов Кинт, Постол Юлия, Лисовал Анатолий. Определение условных механических потерь в двигателе Стирлинга модели УДС-1 / Materiały XII Sympozjum “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju systemów pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”. Politechnika Rzeszowska, Rzeszow 2001, – С.65-68.

84. Постол Ю.А. Разработка системы автоматического управления миниатюрного электрического агрегата с приводом от двигателя Стирлинга // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Двигуни та енергоустановки; Зб. наук. пр. НАУ “ХАІ”. – Харків., “ХАІ”. – 2001. – Вип.26. – С.267-368.

85. Таблицы планов экспериментов для факторных и полиномиальных моделей (Справочное пособие) / Бродский В.З., Бродский Л.И., Голикова Т.И. и др. – М.: Металлургия, 1982. – 752с.

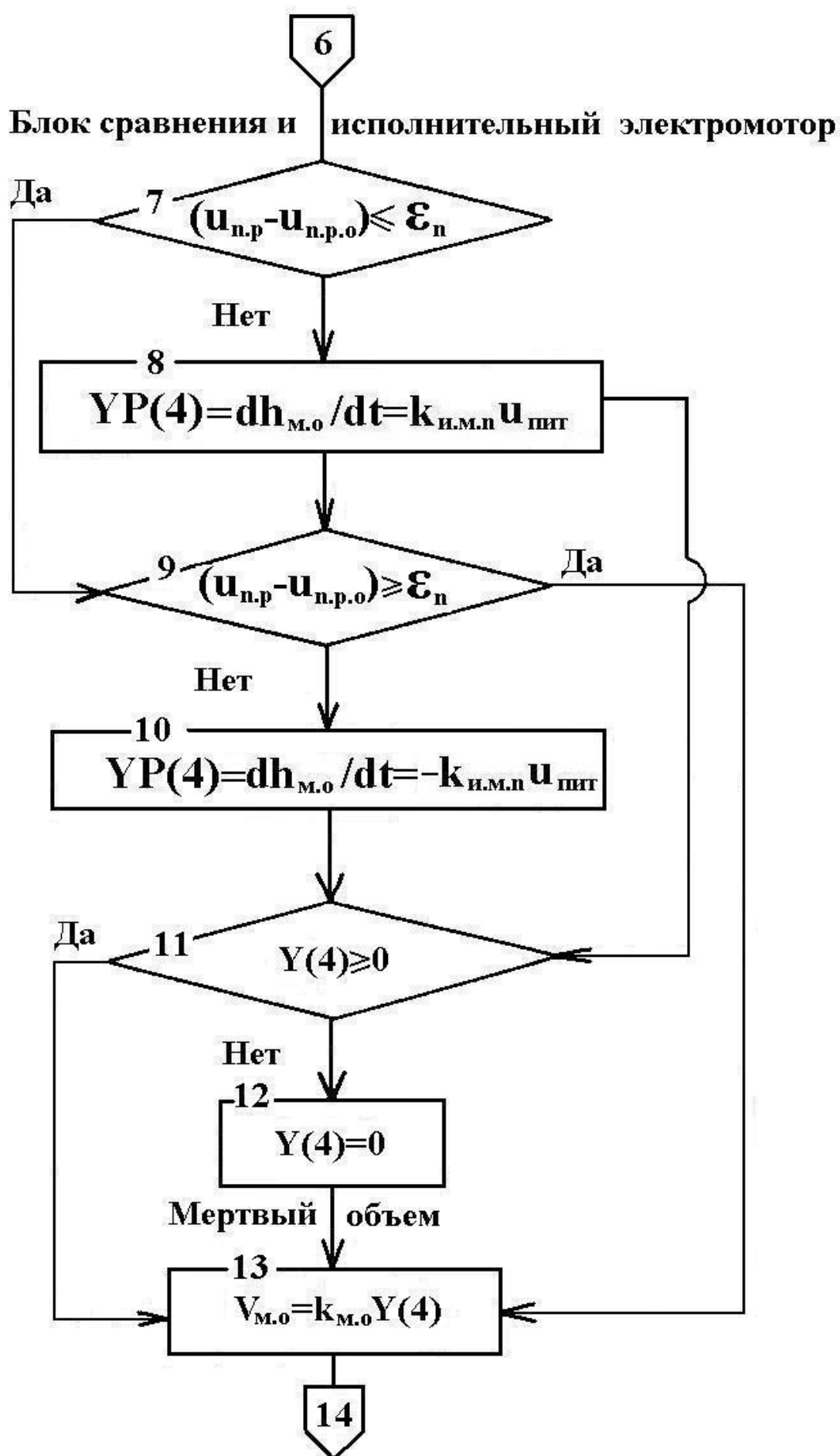
86. Постол Ю.О. Перехідні процеси в САР дослідного міні Стірлінг – електричного агрегату // Тези доповідей на 59-й науковій конференції НТУ. – К.: НТУ, 2003. – С. 9.

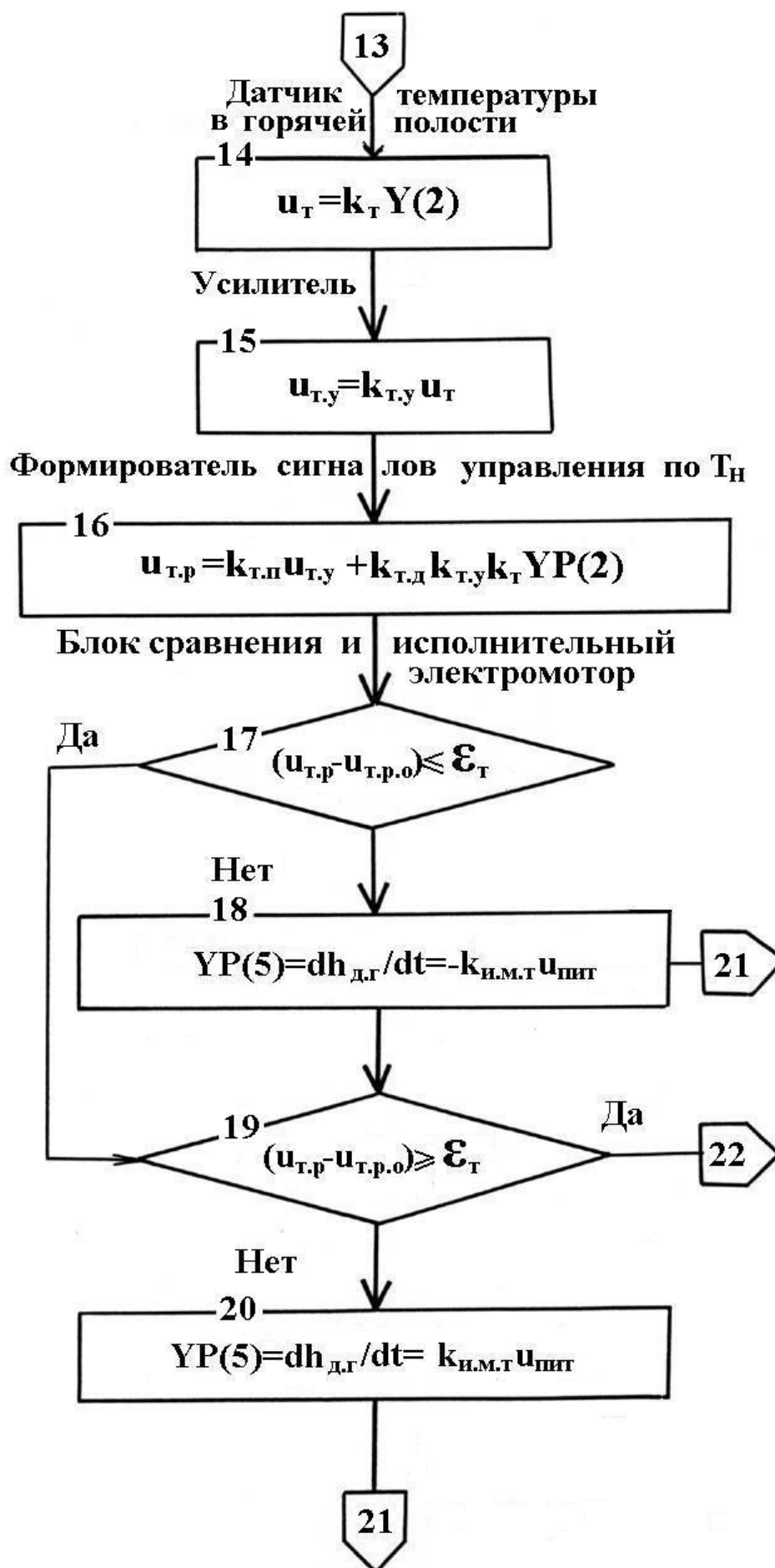
87. Долганов К.Є., Постол Ю.О., Мержиевська В.В. Дослідна система автоматичного регулювання для двигуна Стірлінга невеликої потужності // Автошляховик України. Управління безпекою та якістю транспортних засобів і перевезень: – 2003. – Окрем. вип. – С. 67-70.

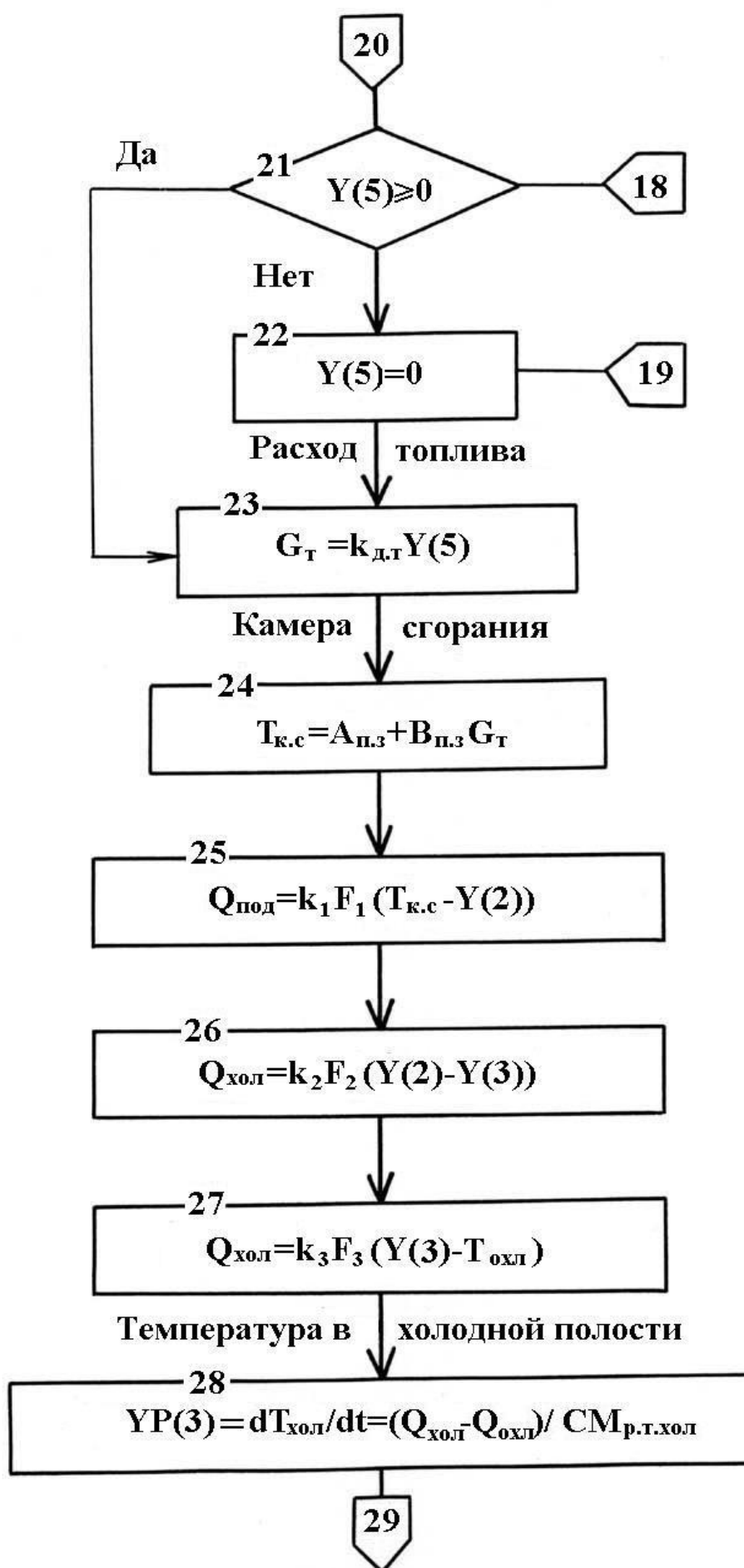
Приложение А

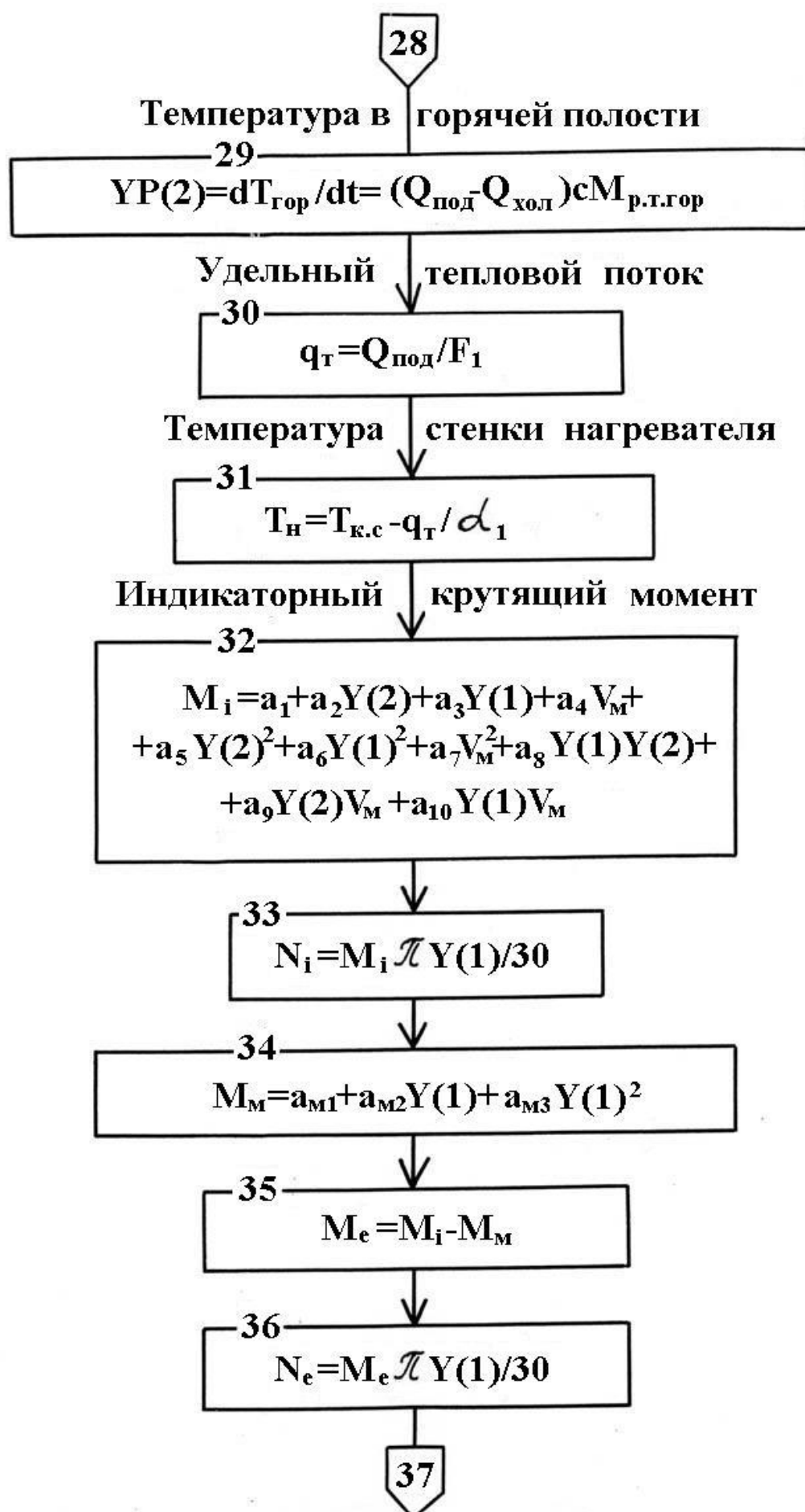
Блок-схема алгоритма расчета в
подпрограмме SUB routine (T, Y, YP)



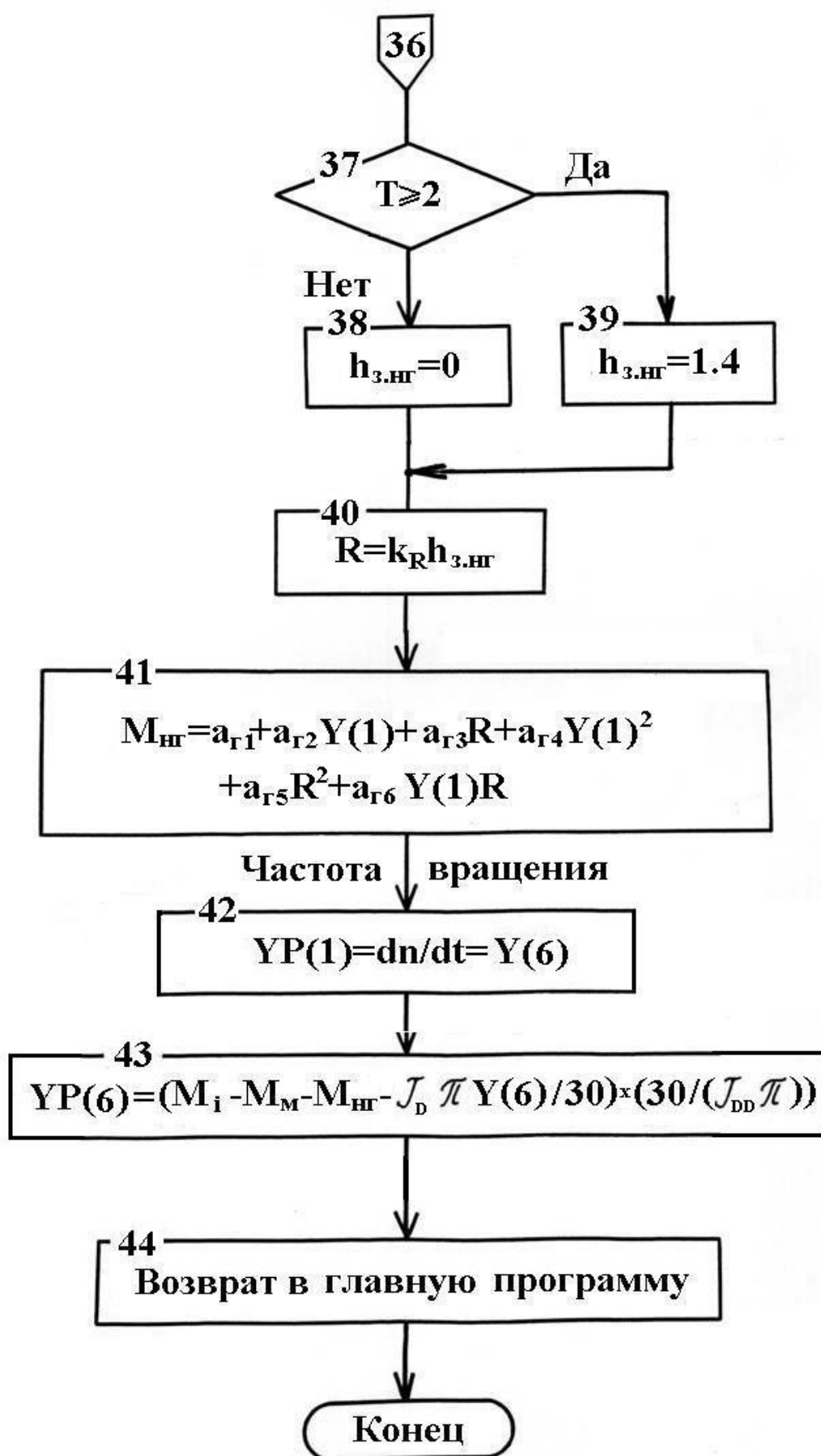








Задание нагрузки



В блоке 1 вводятся декларативные операторы описания типа констант и переменных, операторы общих блоков памяти.

В блоке 2 вводятся числовые значения исходных данных.

В блоке 3 вводятся задающие воздействия по частоте вращения и температуре в горячей полости в виде напряжений электрического тока.

В блоке 4 частота вращения коленчатого вала преобразуется в электрическое напряжения, которое усиливается в блоке 5.

В блоке 6 формируются пропорциональный и дифференциальный сигналы управления частотой вращения.

В блоках 7...12 сравнивается текущее значение частоты вращения в виде пропорционального ей электрического напряжения с напряжением задающего воздействия и вырабатывается сигнал, передаваемый в исполнительный механизм “мертвого” объема.

В блоке 13 вычисляется текущая величина “мертвого” объема.

В блоке 14 температура $T_{гор}$ в горячей полости дополнительного цилиндра преобразуется в электрическое напряжение, которое усиливается в блоке 15.

В блоке 16 формируются пропорциональный и дифференциальный сигналы управления температурой $T_{гор}$.

В блоке 17...22 текущее значение температуры $T_{гор}$ в виде пропорционального ей электрического напряжения сравнивается с напряжением задающего воздействия и вырабатывается сигнал, передаваемый в исполнительный механизм дозатора горючего газа.

В блоке 23 вычисляется текущее значение часового расхода горючего газа.

В блоке 24 вычисляется температура продуктов сгорания, омывающих горячую часть дополнительного цилиндра двигателя.

В блоке 25 вычисляется тепловой поток в горячую полость дополнительного цилиндра.

В блоке 26 вычисляется тепловой поток из горячей в холодную полость дополнительного цилиндра.

В блоке 27 вычисляется тепловой поток из холодной полости дополнительного цилиндра в систему охлаждения.

В блоке 28 вычисляется текущее значение температуры в холодной полости дополнительного цилиндра.

В блоке 29 вычисляется текущее значение температуры в горячей полости дополнительного цилиндра.

В блоках 30 и 31 вычисляются удельный тепловой поток и температура стенки нагревателя.

В блоках 32...34 вычисляются индикаторные крутящий момент и мощность и момент условных механических потерь.

В блоках 35...36 вычисляются эффективные крутящий момент и мощность.

В блоках 37...40 задается нагрузка электрогенератора.

В блоке 41 вычисляется момент нагрузки, создаваемой генератором.

В блоке 42 вычисляется частота вращения коленчатого вала.

В блоке 43 происходит возврат в главную программу.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРОГРАММА РАСЧЕТОВ НА ЭВМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В САР
ДС МОЕЛИ УДС-1 ПОСЛЕ СБРОСА И НАБРОСА НАГРУЗКИ

```

C      -----
      EXTERNAL UDS117
      DIMENSION Y(6),YP(6),WORK(39),IWORK(6)
      REAL MI,MM,ME,MNG,ID,NE,TN,NI,GT,K1,K2,K3,MRT,MRTX
      REAL KP,KT,KU,KG,KN,KUN,KM,KV,TG,KTT
      REAL U0,U1,U2,UT,UN0,UN1,UN2,UN,UP,IDD,KNN,KVV
      REAL T,TOUT,RELERR,ABSERR
      COMMON MI,MM,ME,MNG,HNG,ID,NE,TN,NI,GT,HGT,K1,K2,K3,
      * F1,F2,F3,QT,QX,QOX,CRT,
      * KP,KT,KU,KG,KN,KUN,KM,KV,KTT,
      * U0,U1,U2,UT,UN0,UN1,UN2,UN,UP,KVV
      * MRT,TX,TG,TOX,VM,HZV,HM0,CM,PM,EM,HM,IDD,KNN
      OPEN (4,FILE='udc_008.DAT',STATUS='NEW')
C      OPEN (5,FILE='PRN')
      NEQN=6
      Y(1)=450.
      Y(2)=818.
      Y(3)=349.
      Y(4)=150.
      Y(5)=1.035
      Y(6)=0.
      T=0.0
      TFINAL=20.02
      TPRINT=0.02
      TOUT=T
      RELERR=1E-1
      ABSERR=1E-2
      IFLAG=1
      I=0
      WRITE(*,11)
      WRITE(4,11)
11  FORMAT (7X,64('*')/25X,'TABLE OF CALCULATION RESULT'/7X,64('*'))
10  CALL RKF45 (UDS117,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,IWORK)
15  GO TO (80,20,30,40,50,60,70,80),IFLAG
20      T=TOUT
      TOUT=TOUT+TPRINT

      IF(1.EQ.0.) GO TO 16
      IF(1.EQ.10.) GO TO 17
      GO TO 18
17  I=0
16  WRITE(4,113)T,MI,MM,MNG,
      * Y(1),ME,NE,HNG,
      * Y(2),NI,GT,HGT,
      * Y(3),TN,QT,QX,
      * Y(4),TG,VM,QOX,
      * Y(5),U1,UN
      WRITE(*,113)T,MI,MM,MNG,
      * Y(1),ME,NE,HNG,
      * Y(2),NI,GT,HGT,
      * Y(3),TN,QT,QX,
      * Y(4),TG,VM,QOX,
      * Y(5),U1,UN
113  FORMAT(11X,T=' ',F10.3,4X,'MI=' ,F8.3,2X,'MM=' ,F10.3,
      * 2X,'MNG=' ,F10.4/
      * 8X,'Y(1)' ,F10.3,4X,'ME=' ,F8.3,
      * 2X,'NE=' ,F10.3,2X,'HNG=' ,F10.4/

```

```

      * 8X,'Y(2)=' ,F10.3,4X,'NI=' ,F8.3,2X,'GT=' ,F10.3,
      * 2X,'HGT=' ,F10.3/
      * 8X,'Y(3)=' ,F10.3,4X,'TN=' ,F8.3,
      * 2X,'QT=' ,F10.3,2X,'QX=' ,F10.3/
      * 8X,'Y(4)=' ,F10.3,4X,'TG=' ,F8.3,
      * 2X,'VM=' ,F10.3,2X,'QOX=' ,F10.4/
      * 8X,'Y(5)=' ,F10.3,4X,'U1=' ,F8.3,2X,'UN=' ,F10.3
      * /7X,64(' '))
18 CONTINUE
   I=I+1

      IF (TOUT.LE.TFINAL) GO TO 10
      STOP
30 WRITE(4,31)RELERR
   WRITE(*,31)RELERR
   GO TO 10
40 WRITE(4,41)
   WRITE(*,41)
   GO TO 10
50 ABSERR=1.0E-2
   WRITE(4,51)ABSERR
   WRITE(*,51)ABSERR
   GO TO 10
60 RELERR=10*RELERR
   WRITE(4,31)RELERR
   WRITE(*,31)RELERR
   IFLAG=2
   GO TO 10
70 WRITE(4,71)
   WRITE(*,71)
   IFLAG=2
   GO TO 10
80 WRITE(4,81)
   WRITE(*,81)
31 FORMAT(' RELATIVE ERR IS MADE MORE,RELERR=' ,E10.2)
41 FORMAT(' INTEGRATION IS NOT FINISHED,MANY STEPS')
51 FORMAT(' ABSOLUTE ERR IS MADE MORE,ABSARR=' ,E10.2)
71 FORMAT(' TOO MACH EXIT POINTS')
81 FORMAT(' MISTAKE IN CALL OF RKF45')
END

      SUBROUTINE UDS117(T,Y,YP)
      DIMENSION Y(6),YP(6),WORK(39),IWORK(6)
      REAL MI,MM,ME,MNG,ID,NE,TN,NI,GT,K1,K2,K3,MRT,MRTX
      REAL KP,KT,KU,KG,KN,KUN,KM,KV,TG,KTT
      REAL U0,U1,U2,UT,UN0,UN1,UN2,UN,UP,IDD,KNN,KVV
      REAL T,TOUT,RELERR,ABSERR
      DIMENSION A(10),AM(3)
      COMMON MI,MM,ME,MNG,HNG,ID,NE,TN,NI,GT,HGT,K1,K2,K3,
      * F1,F2,F3,QT,QX,QOX,CRT,
      * KP,KT,KU,KG,KN,KUN,KM,KV,KTT,
      * U0,U1,U2,UT,UN0,UN1,UN2,UN,UP,KVV
      * MRT,TX,TG,TOX,VM,HZV,HM0,CM,PM,EM,HM,IDD,KNN
      DATA A/-.31109E+00,.68912E-03,.70121E-03,.15462E-02,
      * -.13238E-06,-.98765E-06,.12345E-06,-.11979E-06,
      * -.36458E-05,.10348E-12/,
      * AM/.050442857,-5.56071E-05,2.01786E-07/
      B=2140.
      ANG=0.00047
      PI=3.14159
      ID=0.012
      IDD=0.008
      AT=.5
      BNG=0.0002

```

```

MRT=.00013
CRT=1000.
CM=0.0032
HM0=0.
HZV=1875.
F1=.01
F2=.01
F3=.06
K1=87.5
K2=46.
K3=120.
KT=0.0326
KTT=0.15
KU=0.4
KN=0.16
KNN=0.16
KUN=0.15
KM=10.
KP=24.
KV=0.8
KVV=0.
KG=0.083
U0=31.0
A1=145.75
TX=350.
TOX=320.
MRTX=.00013
AG=743.
BG=640.
VM=0.
UP=6.

C      CALCULATION OF REGIME PARAMETS OF ENGINE UDS-117
C      -----
U0=30.0
UN0=72.

C      SPEED REGULATOR
C      -----
UN=KN*Y(1)+KNN*YP(1)
IF((UN-UN0).LE.0.5) GO TO 107
IF(T.GE.(1+0.2)) GO TO 106
UP=0
106  YP(4)=KP*UP
GO TO 108
107  IF((UN-UN0).GE.-0.5) GO TO 110
IF(T.GE.(1+0.2)) GO TO 104
UP=0
104  YP(4)=-KP*UP
GO TO 108
110  YP(4)=0.
108  IF(Y(4).GE.0) GO TO 105
Y(4)=0
GO TO 111
105  IF(Y(4).LE.150.) GO TO 111
Y(4)=150.
111  VM=KV*Y(4)-KVV*YP(4)
C      IF(VM.LE.130) GO TO 103
C      VM=130
C      TEMPERATURE REGULATOR
C      -----
103  U1=KT*TN
IF((U1-U0).LE.0.06) GO TO 109
YP(5)=-KTT*UP

```

```

      GO TO 113
109 IF((U1-U0).GE.-0.06) GO TO 112
      YP(5)=KTT*UP
      GO TO 113
112 YP(5)=0
113 IF(Y(5).GE.0) GO TO 114
      Y(5)=0
114 GT=AT*Y(5)
      TG=AG+BG*GT
      QT=K1*F1*(TG-Y(2))
      QX=K2*F2*(Y(2)-Y(3))
      QOX=K3*F3*(Y(3)-TOX)
      YP(3)=(QX-QOX)/(CRT*MRTX)
      MI=(A(1)+A(2)*Y(2)+A(3)*Y(1)+A(4)*VM+A(5)*Y(2)**2+
      * A(6)*Y(1)**2+A(7)*VM**2+A(8)*Y(2)*Y(1)+A(9)*
      * Y(2)*VM+A(10)*Y(1)*VM)*0.83
      NI=MI*PI*Y(1)/30
      YP(2)=(QT-NI-QX)/(CRT*MRT)
C   HGT=0.5
      QU=QT/F1
      TN=TG-QU/A1
      MM=AM(1)+AM(2)*Y(1)+AM(3)*Y(1)**2
      ME=MI-MM
      NE=ME*PI*Y(1)/30
C           LOAD DOWN
C
C   IF(T.LE.1.) GO TO 101
C   HNG=1.-2.*(T-1)
C   IF(HNG.GE.0.) GO TO 102
C   HNG=0.0
C   GO TO 102
C 101 HNG=1.
C   GO TO 102
C           LOAD UP I
C
C   IF(T.LE.1) GO TO 101
C   HNG=0.+2.*(T-1)
C   IF(HNG.LE.1.) GO TO 102
C   HNG=1.
C   GO TO 102
C 101 HNG=0.
C   GO TO 102
C           LOAD UP II
C
C   IF(T.LE.1) GO TO 101
C   HNG=10.
C   IF(T.LE.2) GO TO 102
C   HNG=1
C   GO TO 102
C 101 HNG=0.5
C 102 MNG=ANG+HNG*Y(1)*BNG
      102 MNG=(0.075+0.00011*Y(1))*HNG
      YP(1)=Y(6)
      YP(6)=(MI-MM-MNG-ID*PI*Y(6)/30)*((30.0/IDD)/PI)
C   YP(1)=(MI-MM-MNG)*((30.0/ID)/PI)
      RETURN
      END

SUBROUTINE RKF45(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,
IWORK,IWORK)
  DIMENSION IWORK(5),Y(NEQN)
  DIMENSION WORK(70)
  EXTERNAL F

```

```

K1M=NEQN+1
K1=K1M+1
K2=K1+NEQN
K3=K2+NEQN
K4=K3+NEQN
K5=K4+NEQN
K6=K5+NEQN
CALL RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,
1WORK(1),WORK(K1M),WORK(K1),WORK(K2),WORK(K3),WORK(K4),
2WORK(K5),WORK(K6),WORK(K6+1),IWORK(1),IWORK(2),
3IWORK(3),IWORK(4),IWORK(5))
RETURN
END
SUBROUTINE RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,
1IFLAG,YP,H,F1,F2,F3,F4,F5,SAVRE,SAVAE,NFE,KOP,
2INIT,JFLAG,KFLAG)
LOGICAL HFAILD,OUTPUT
DIMENSION Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),
1F3(NEQN),F4(NEQN),F5(NEQN)
EXTERNAL F
DATA REMIN,MAXNFE/1.E-8,10000/
IF(NEQN.LT.1) GOTO 10
IF((RELERR.LT.0.0).OR.(ABSERR.LT.0.0)) GOTO 10
MFLAG=IABS(IFLAG)
IF((MFLAG.EQ.0).OR.(MFLAG.GT.8)) GOTO 10
IF(MFLAG.NE.1) GOTO 20
EPS=1.0
5 EPS=EPS/2.0
EPSP1=EPS+1.0
IF(EPSP1.GT.1.0) GOTO 5
U26=26.0*EPS
GOTO 50
10 IFLAG=8
RETURN
20 IF((T.EQ.TOUT).AND.(KFLAG.NE.3)) GOTO 10
IF(MFLAG.NE.2) GOTO 25
IF((KFLAG.EQ.3).OR.(INIT.EQ.0)) GOTO 45
IF(KFLAG.EQ.4) GOTO 40
IF((KFLAG.EQ.5).AND.(ABSERR.EQ.0.0)) GOTO 30
IF(KFLAG.EQ.6.AND.(RELERR.LE.SAVRE).AND.
1(ABSERR.LE.SAVAE)) GOTO 30
GOTO 50
25 IF(IFLAG.EQ.3) GOTO 45
IF(IFLAG.EQ.4) GOTO 40
IF((IFLAG.EQ.5).AND.(ABSERR.GT.0.0)) GOTO 45
30 STOP
40 NFE=0
IF(MFLAG.EQ.2) GOTO 50
45 IFLAG=JFLAG
IF(KFLAG.EQ.3) MFLAG=IABS(IFLAG)
50 JFLAG=IFLAG
KFLAG=0
SAVRE=RELERR
SAVAE=ABSERR
RER=2.0*EPS+REMIN
IF(RELERR.GE.RER) GOTO 55
RELERR=RER
IFLAG=3
KFLAG=3
RETURN
55 DT=TOUT-T
IF(MFLAG.EQ.1) GOTO 60
IF(INIT.EQ.0) GOTO 65

```

```

      GOTO 80
60  INIT=0
      KOP=0
      A=T
      CALL F(A,Y,YP)
      NFE=1
      IF(T.NE.TOUT) GOTO 65
      IFLAG=2
      RETURN
65  INIT=1
      H=ABS(DT)
      TOLN=0.0
      DO 70 K=1,NEQN
      TOL=RELERR*ABS(Y(K))+ABSERR
      IF(TOL.LE.0.) GOTO 70
      TOLN=TOL
      YPK=ABS(YP(K))
      IF(YPK*H**5.GT.TOL) H=(TOL/YPK)**0.2
70  CONTINUE
      IF(TOLN.LE.0.0) H=0.0
      H=AMAX1(H,U26*AMAX1(ABS(T),ABS(DT)))
      JFLAG=ISIGN(2,IFLAG)
80  H=SIGN(H,DT)
      IF(ABS(H).GE.2.0*ABS(DT)) KOP=KOP+1
      IF(KOP.NE.100) GOTO 85
      KOP=0
      IFLAG=7
      RETURN
85  IF(ABS(DT).GT.U26*ABS(T)) GOTO 95
      DO 90 K=1,NEQN
90  Y(K)=Y(K)+DT*YP(K)
      A=TOUT
      CALL F(A,Y,YP)
      NFE=NFE+1
      GOTO 300
95  OUTPUT=.FALSE.
      SCALE=2.0/RELERR
      AE=SCALE*ABSERR
100 HFAILD=.FALSE.
      HMIN=U26*ABS(T)
      DT=TOUT-T
      IF(ABS(DT).GE.2.0*ABS(H)) GOTO 200
      IF(ABS(DT).GT.ABS(H)) GOTO 150
      OUTPUT=.TRUE.
      H=DT
      GOTO 200
150 H=0.5*DT
200 IF(NFE.LE.MAXNFE) GOTO 220
      IFLAG=4
      KFLAG=4
      RETURN
220 CALL FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,F1)
      NFE=NFE+5
      EEOET=0.0
      DO 250 K=1,NEQN
      ET=ABS(Y(K))+ABS(F1(K))+AE
      IF(ET.GT.0.0) GOTO 240
      IFLAG=5
      RETURN
240 EE=ABS((-2090.0*YP(K)+(21970.0*F3(K)-15048.0*F4(K)))+
      1(22528.0*F2(K)-27360.0*F5(K)))
250 EEOET=AMAX1(EEOET,EE/ET)
      ESTTOL=ABS(H)*EEOET*SCALE/752400.0

```

```

IF(ESTTOL.LE.1.0) GOTO 260
HFAILD=.TRUE.
OUTPUT=.FALSE.
S=0.1
IF(ESTTOL.LT.59049.0) S=0.9/ESTTOL**0.2
H=S*H
IF(ABS(H).GT.HMIN) GOTO 200
IFLAG=6
KFLAG=6
RETURN
260 T=T+H
DO 270 K=1,NEQN
270 Y(K)=F1(K)
A=T
CALL F(A,Y,YP)
NFE=NFE+1
S=5.0
IF(ESTTOL.GT.1.889568E-4) S=0.9/ESTTOL**0.2
IF(HFAILD) S=AMIN1(S,1.0)
H=SIGN(AMAX1(S*ABS(H),HMIN),H)
IF(OUTPUT) GOTO 300
IF(IFLAG.GT.0) GOTO 100
IFLAG=-2
RETURN
300 T=TOUT
IFLAG=2
RETURN
END
SUBROUTINE FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,S)
DIMENSION Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),F3(NEQN),
IF4(NEQN),F5(NEQN),S(NEQN)
CH=H/4.0
DO 221 K=1,NEQN
221 F5(K)=Y(K)+CH*YP(K)
CALL F(T+CH,F5,F1)
CH=3.0*H/32.0
DO 222 K=1,NEQN
222 F5(K)=Y(K)+CH*(YP(K)+3.0*F1(K))
CALL F(T+3.0*H/8.0,F5,F2)
CH=H/2197.0
DO 223 K=1,NEQN
223 F5(K)=Y(K)+CH*(1932.0*YP(K)+(7296.0*F2(K)-7200.0*F1(K)))
CALL F(T+12.0*H/13.0,F5,F3)
CH=H/4104.0
DO 224 K=1,NEQN
224 F5(K)=Y(K)+CH*((8341.0*YP(K)-845.0*F3(K))+
1(29440.0*F2(K)-32832.0*F1(K)))
CALL F(T+H,F5,F4)
CH=H/20520.0
DO 225 K=1,NEQN
225 F1(K)=Y(K)+CH*((-6080.0*YP(K)+(9295.0*F3(K)-5643.0*F4(K)))+
1(41040.0*F1(K)-28352.0*F2(K)))
CALL F(T+H/2.0,F1,F5)
CH=H/7618050.0
DO 230 K=1,NEQN
230 S(K)=Y(K)+CH*((902880.0*YP(K)+(3855735.0*F3(K)-
11371249.0*F4(K)))+(3953664.0*F2(K)+277020.0*F5(K)))
RETURN
END

```

Приложение В

Список идентификаторов и исходных данных к программе расчета переходных процессов в САР ДС мод. УДС-1

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Напряжение задатчика частоты вращения n , В	$u_{п.о}$	UNO	задается
Напряжение задатчика температуры $T_{гор}$	$u_{т.о}$	UO	задается
Напряжение, пропорциональное текущему значению n , мВ	u_n	UN	вычисляется
Коэффициент преобразования частоты вращения n в напряжение u_n , мВ·мин	k_n	KN	0,16
Усиленное напряжение, пропорциональное частоте вращения n , В	$u_{н.у}$	UNU	вычисляется
Коэффициент усиления напряжения тока, В/мВ	$k_{н.у}$	KUN	0,15
Напряжение регулирования частоты вращения на выходе из формирователя сигнала управления, В	$u_{н.р}$	UNR	вычисляется
Коэффициент усиления пропорционального сигнала по частоте вращения, безразмерный	$k_{н.п}$	KNP	0,16

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Коэффициент усиления дифференциального сигнала по частоте вращения, с	$k_{п.д}$	KND	0,16
Допустимая нестабильность напряжения регулирования частоты вращения на выходе из формирователя сигнала управления, В	ε_n	EN	задается
Коэффициент усиления исполнительного механизма регулятора частоты вращения, мм/(с·В)	$k_{и.м.п}$	KP	24
Напряжение питания исполнительных реверсивных электродвигателей, В	$u_{пит}$	UP	6
Коэффициент усиления “мертвого” объема, см ³ /мм	$k_{м.о}$	KV	0,8
“Мертвый” объем, см ³	$V_{м.о}$	VM	вычисляется
Напряжение, пропорциональное текущему значению температуры $T_{гор}$, мВ	u_T	U1	вычисляется
Коэффициент преобразования температуры $T_{гор}$ в напряжение, мВ/К	k_T	KT	0,0326

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Усиленное напряжение, пропорциональное температуре $T_{гор}$, В	$u_{т.у}$	UTU	вычисляется
Коэффициент усиления напряжения в усилителе, В/мВ	$k_{т.у}$	KTU	0,4
Напряжение регулирования температуры $T_{гор}$ на выходе из формирователя сигнала управления, В	$u_{т.р}$	UTR	вычисляется
Допустимая нестабильность напряжения регулирования температуры на выходе из формирователя сигнала управления, В	ε_t	ET	задается
Коэффициент усиления исполнительного механизма регулятора температуры, мм/(с·В)	$k_{и.м.т}$	KTT	0,15
Коэффициент усиления дозатора горючего газа, кг/(ч·см)	$k_{дг}$	AT	0,5
Часовой расход горючего газа, кг/ч	G_t	GT	вычисляется
Температура продуктов сгорания, К	$T_{к.с}$	TG	вычисляется

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Коэффициент уравнения характеристики температуры продуктов сгорания: $A_{п.з}$, К $B_{п.з}$, К·ч/кг	 $A_{п.з}$ $B_{п.з}$	 AG BG	 743 640
Поток теплоты, подводимой в горячую полость дополнительного цилиндра, Вт	$Q_{под}$	QT	вычисляется
Коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к рабочему телу в горячей полости дополнительного цилиндра, Вт/(м ² ·К)	k_1	K1	87,5
Площадь наружной поверхности дополнительного цилиндра, через которую вводится теплота, м ²	F_1	F1	0,01
Поток теплоты, поступающей из горячей полости дополнительного цилиндра в холодную полость, Вт	$Q_{хол}$	QX	вычисляется
Коэффициент теплопередачи из горячей полости дополнительного цилиндра в холодную Вт/(м ² ·К)	k_2	K2	46

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Площадь поверхности, через которую передается теплота из горячей полости дополнительного цилиндра в холодную, м^2	F_2	F2	0,01
Поток теплоты, отводимой из холодной полости дополнительного цилиндра, в систему охлаждения, Вт	$Q_{\text{охл}}$	QOX	вычисляется
Коэффициент теплопередачи из холодной полости дополнительного цилиндра в систему охлаждения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	k_3	K3	120
Площадь внутренней поверхности дополнительного цилиндра, через которую передается теплота из холодной полости в систему охлаждения, м^2	F_3	F3	0,06
Средняя массовая теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	c	CRT	1000
Средняя масса воздуха, находящегося в холодной полости, кг	$M_{\text{р.т.хол}}$	MRTX	0,00013

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентификатор	Числовое значение
Средняя масса воздуха, находящегося в горячей полости, кг	$M_{p.t.гор}$	MRT	0,00013
Удельный тепловой поток, Вт/м ²	q_T	QU	вычисляется
Температура стенки нагревателя, К	T_H	TN	вычисляется
Коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к внешней стенки горячей части дополнительного цилиндра, Вт/(м ² ·К)	α_1	A1	145,75
Индикаторная мощность, Вт	N_i	NI	вычисляется
Индикаторный крутящий момент, Н·м	M_i	MI	вычисляется
Число π	π	PI	3,14159
Момент условных механических потерь, Н·м	M_M	MM	вычисляется
Эффективный крутящий момент, Нм	M_e	ME	вычисляется
Эффективная мощность, Вт	N_e	NE	вычисляется
Текущее время, с	t	T	задается
Координата задатчика нагрузки, безразмерная	$h_{з.нг}$	HNG	задается

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентифика- тор	Числовое значение
Координата задатчика нагрузки, безразмерная	$h_{з.нг}$	HNG	задается
Момент нагрузки, Н·м	$M_{нг}$	MNG	вычисляется
Сопротивление нагрузочного реостата, Ом	R	R	вычисляется
Коэффициенты дифференциального уравнения движения двигателя:			
I_D , кг·м ²	I_D	ID	0,012
I_{DD} , кг·м·с ³	I_{DD}	IDD	0,008
Коэффициенты аппроксимирующих уравнений: Уравнений индикаторного крутящего момента двигателя $M_i = M_i(T_{гор}, n, V_m)$			
a_1 , Н·м		A(1)	-0,31109
a_2 , Н·м/К		A(2)	$+0,68912 \cdot 10^{-3}$
a_3 , Н·м·мин		A(3)	$0,70121 \cdot 10^{-3}$
a_4 , Н·м/см ³		A(4)	$0,15462 \cdot 10^{-2}$
a_5 , Н·м/К ²		A(5)	$-0,13238 \cdot 10^{-6}$
a_6 , Н·м·мин ²		A(6)	$-0,98765 \cdot 10^{-6}$
a_7 , Н·м/см ⁶		A(7)	$0,1345 \cdot 10^{-6}$
a_8 , Н·м·мин/К		A(8)	$-0,11979 \cdot 10^{-6}$
a_9 , Н·м/(К·см ³)		A(9)	$-0,36458 \cdot 10^{-5}$
a_{10} , Н·м·мин/см ³		A(10)	$0,10348 \cdot 10^{-12}$

Продолжение приложения В

Параметр, единица измерений	Обозначение	Идентифика- тор	Числовое значение
Уравнение условных механических потерь $M_m = M_m(n)$ $a_{m1}, \text{ Н}\cdot\text{м}$ $a_{m2}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{мин}$ $a_{m3}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{мин}^2$		AM(1) AM(2) AM(3)	0,05044 $-5,56071 \cdot 10^{-5}$ $2,01786 \cdot 10^{-7}$
Уравнение момента нагрузки электрического генератора $a_{г1}, \text{ Н}\cdot\text{м}$ $a_{г2}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{мин}$ $a_{г3}, \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{Ом}$ $a_{г4}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{мин}^2$ $a_{г5}, \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{Ом}^2$ $a_{г6}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{мин}/\text{Ом}$		AG(1) AG(2) AG(3) AG(4) AG(5) AG(6)	0,12573 $0,18490 \cdot 10^{-3}$ $-0,52700 \cdot 10^{-2}$ $0,23539 \cdot 10^{-6}$ $0,074906 \cdot 10^{-4}$ $-0,62549 \cdot 10^{-5}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ФРАГМЕНТ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В САР ДС МОДЕЛИ УДС-1 ПОСЛЕ НАБРОСА НАГРУЗКИ

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

T= .000 MI= .054 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 450.000 ME= -.012 NE= -.584 HNG= .0000
Y(2)= 818.000 NI= 2.540 GT= .517 HGT= .000
Y(3)= 349.000 TN= 920.392 QT= 224.175 QX= 215.740
Y(4)= 150.000 TG=1074.200 VM= 120.000 QOX= 208.8000
Y(5)= 1.035 U1= .000 UN= 72.000

T= .200 MI= .054 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 449.732 ME= -.012 NE= -.579 HNG= .0000
Y(2)= 818.918 NI= 2.540 GT= .511 HGT= .000
Y(3)= 349.967 TN= 919.334 QT= 219.849 QX= 215.717
Y(4)= 150.000 TG=1070.174 VM= 120.000 QOX= 215.7655
Y(5)= 1.022 U1= 29.939 UN= 71.584

T= .400 MI= .054 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 449.026 ME= -.012 NE= -.568 HNG= .0000
Y(2)= 820.363 NI= 2.543 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.045 TN= 920.475 QT= 219.182 QX= 216.346
Y(4)= 150.000 TG=1070.857 VM= 120.000 QOX= 216.3252
Y(5)= 1.025 U1= 30.007 UN= 71.164

T= .600 MI= .054 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 448.005 ME= -.012 NE= -.549 HNG= .0000
Y(2)= 820.555 NI= 2.549 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.059 TN= 920.590 QT= 219.014 QX= 216.428
Y(4)= 150.000 TG=1070.857 VM= 120.000 QOX= 216.4256
Y(5)= 1.025 U1= 30.011 UN= 70.784

T= .800 MI= .055 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 446.767 ME= -.011 NE= -.527 HNG= .0000
Y(2)= 820.577 NI= 2.555 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.061 TN= 920.603 QT= 218.995 QX= 216.437
Y(4)= 150.000 TG=1070.857 VM= 120.000 QOX= 216.4373
Y(5)= 1.025 U1= 30.012 UN= 70.438

T= 1.000 MI= .055 MM= .066 MNG= .0000
Y(1)= 445.386 ME= -.011 NE= -.503 HNG= .0000
Y(2)= 820.575 NI= 2.562 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.061 TN= 920.602 QT= 218.996 QX= 216.437
Y(4)= 150.000 TG=1070.857 VM= 120.000 QOX= 216.4368
Y(5)= 1.025 U1= 30.012 UN= 70.123

T= 1.200 MI= .055 MM= .065 MNG= .0495
Y(1)= 443.553 ME= -.010 NE= -.470 HNG= .4000
Y(2)= 820.570 NI= 2.571 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.060 TN= 920.599 QT= 219.001 QX= 216.434
Y(4)= 150.000 TG=1070.857 VM= 120.000 QOX= 216.4346
Y(5)= 1.025 U1= 30.012 UN= 69.075

T= 1.400 MI= .081 MM= .065 MNG= .0987
Y(1)= 439.873 ME= .016 NE= .735 HNG= .8000
Y(2)= 820.062 NI= 3.730 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 350.034 TN= 920.294 QT= 219.446 QX= 216.213
Y(4)= 123.636 TG=1070.857 VM= 98.909 QOX= 216.2413
Y(5)= 1.025 U1= 30.003 UN= 66.686

T= 1.600 MI= .107 MM= .064 MNG= .1227
Y(1)= 433.766 ME= .043 NE= 1.959 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.227 NI= 4.879 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 349.984 TN= 919.793 QT= 220.176 QX= 215.852
Y(4)= 96.930 TG=1070.857 VM= 77.544 QOX= 215.8846
Y(5)= 1.025 UI= 29.986 UN= 63.779

T= 1.800 MI= .134 MM= .063 MNG= .1219
Y(1)= 426.032 ME= .071 NE= 3.155 HNG= 1.0000
Y(2)= 818.374 NI= 5.982 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 349.933 TN= 919.280 QT= 220.922 QX= 215.483
Y(4)= 70.225 TG=1070.857 VM= 56.180 QOX= 215.5151
Y(5)= 1.025 UI= 29.970 UN= 61.773

T= 2.000 MI= .161 MM= .062 MNG= .1210
Y(1)= 418.224 ME= .098 NE= 4.300 HNG= 1.0000
Y(2)= 817.547 NI= 7.037 GT= .512 HGT= .000
Y(3)= 349.883 TN= 918.784 QT= 221.646 QX= 215.125
Y(4)= 43.520 TG=1070.857 VM= 34.816 QOX= 215.1576
Y(5)= 1.025 UI= 29.953 UN= 60.894

T= 2.200 MI= .187 MM= .062 MNG= .1203
Y(1)= 411.575 ME= .126 NE= 5.418 HNG= 1.0000
Y(2)= 818.348 NI= 8.079 GT= .522 HGT= .000
Y(3)= 349.905 TN= 921.695 QT= 226.265 QX= 215.484
Y(4)= 16.814 TG=1076.937 VM= 13.451 QOX= 215.3184
Y(5)= 1.044 UI= 30.049 UN= 61.121

T= 2.400 MI= .205 MM= .061 MNG= .1198
Y(1)= 406.993 ME= .143 NE= 6.108 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.184 NI= 8.718 GT= .520 HGT= .000
Y(3)= 349.978 TN= 921.721 QT= 224.492 QX= 215.835
Y(4)= .000 TG=1075.747 VM= .000 QOX= 215.8411
Y(5)= 1.040 UI= 30.048 UN= 62.355

T= 2.600 MI= .205 MM= .061 MNG= .1195
Y(1)= 404.533 ME= .144 NE= 6.099 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.162 NI= 8.682 GT= .520 HGT= .000
Y(3)= 349.976 TN= 921.708 QT= 224.512 QX= 215.825
Y(4)= .000 TG=1075.747 VM= .000 QOX= 215.8268
Y(5)= 1.040 UI= 30.048 UN= 63.471

T= 2.800 MI= .205 MM= .061 MNG= .1194
Y(1)= 403.717 ME= .144 NE= 6.096 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.171 NI= 8.670 GT= .520 HGT= .000
Y(3)= 349.976 TN= 921.713 QT= 224.503 QX= 215.830
Y(4)= .000 TG=1075.747 VM= .000 QOX= 215.8277
Y(5)= 1.040 UI= 30.048 UN= 64.481

T= 3.000 MI= .205 MM= .061 MNG= .1195
Y(1)= 404.132 ME= .144 NE= 6.098 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.172 NI= 8.676 GT= .520 HGT= .000
Y(3)= 349.976 TN= 921.714 QT= 224.503 QX= 215.830
Y(4)= .000 TG=1075.747 VM= .000 QOX= 215.8277
Y(5)= 1.040 UI= 30.048 UN= 65.392

T= 3.200 MI= .205 MM= .061 MNG= .1196
Y(1)= 405.454 ME= .144 NE= 6.102 HNG= 1.0000
Y(2)= 819.161 NI= 8.695 GT= .520 HGT= .000
Y(3)= 349.976 TN= 921.707 QT= 224.512 QX= 215.825
Y(4)= .000 TG=1075.747 VM= .000 QOX= 215.8273
Y(5)= 1.040 UI= 30.048 UN= 66.218

Приложение Д

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
ФГУП Государственный научно-
исследовательский институт
по промышленным тракторам
по научной работе
канд. техн. наук, доцент



2003 г.

АКТ

об использовании и внедрении полученных результатов и рекомендаций
диссертационной работы Ю.А. Постол " Разработка и определение
рациональных параметров системы автоматического регулирования
двигателя Стирлинга небольшой мощности сельскохозяйственного
назначения "

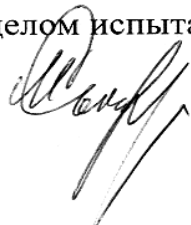
ФГУП ГосНИИ ПТ более 10 лет занимался вопросами разработки, создания и исследования двигателей Стирлинга. Поэтому тема диссертационной работы Ю.А. Постол представляет для института реальный интерес.

В диссертации излагаются принципиально новые подходы к созданию простой и дешевой двухмерной системы автоматического регулирования двигателей Стирлинга малой мощности.

Использование системы автоматического регулирования предложенного типа позволяет успешно применять стирлинги в качестве первичных двигателей в электрогенераторных агрегатах, особенно в автономных агрегатах небольшой мощности 0,5...10 кВт, которые уже сегодня предпочтительны в небольших сельскохозяйственных и других малых предприятиях и объектах как источники электроснабжения.

Полученные в диссертации научные результаты (принципиальная и конструктивная схемы двухмерной системы автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала двигателя Стирлинга небольшой мощности и температуры его нагревателя, математическая модель, алгоритмы и программы для расчетов на ЭВМ статических и динамических характеристик исследованной системы регулирования) и практические рекомендации приняты ФГУП ГосНИИ ПТ к проработке при формировании планов НИОКР на 2004-2005 гг.

Ученый секретарь научно технического совета
канд. техн. наук  В.Н. Белоусов

Зав. отделом испытаний
 М.В. Сычугов

УТВЕРЖДАЮ

заместитель начальника института

по учебной и научной работе

доцент, полковник

Н. Омелян



2003 г.

А К Т

реализации научных результатов диссертационного исследования
Ю.А. Постол, выполненного на тему: " Разработка и определения
рациональных параметров системы автоматического регулирования
двигателя Стирлинга небольшой мощности
сельскохозяйственного назначения "

Комиссия в составе: председателя – начальника кафедры двигателей канд. техн. наук, профессора академии военных наук РФ полковника А.И. Богданова, канд. техн. наук, профессора полковника В.И. Нефедова, канд. техн. наук, доцента Н.Е. Александрова составила настоящий акт об использовании при чтении лекций №82 "Перспективные типы двигателей" по дисциплине "Двигатели военной автомобильной техники" и №29 "Процесс расширения. Тепловой баланс двигателей" по курсу "Теплотехника" следующих положений диссертационной работы Ю.А. Постол:

-концепции решения проблемы автоматического регулирования стирлинг-генераторного агрегата,

-возможность использования исследованного стирлинг-генераторного агрегата

в качестве утилизатора теплоты отработавших газов поршневых ДВС.

Председатель комиссии
к. т. н., профессор АВН РФ
полковник

А.И. Богданов

Члены комиссии:

к. т. н., профессор
полковник

В.И. Нефедов

к. т. н., доцент

Н.Е. Александров

ТАВРИЧЕСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АГРОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Факультет МСХ

Кафедра “Тракторы и автомобили”



АКТ

о внедрении научно-исследовательских разработок в учебный процесс

Результаты научных исследований Постол Ю.А. использованы в учебном процессе при изучении дисциплины “Основы теории ДВС”.

Автор разработки

Ю.А. Постол,
ассистент

Зав. кафедрой
“Тракторы и автомобили”

А.И. Панченко,
доцент, к.т.н.