

На правах рукописи



Иванов Артем Викторович

**ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПОЛУНАТУРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ СООСНЫХ ВИНТОВЕНТИЛЯТОРОВ  
ТУРБОВИНТОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный  
руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Бабин Сергей Васильевич**

Официальные  
оппоненты: **Куликов Геннадий Григорьевич,**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор

**Гайдай Максим Станиславович,**  
кандидат технических наук, публичное акционерное общество «ОДК - Сатурн», главный конструктор по системам автоматического управления

Ведущая организация: Акционерное общество «ОДК - Авиадвигатель»

Защита состоится «18» февраля 2019 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» [https://mai.ru/upload/iblock/9a9/Dissertatsiya-v.12\\_1-\\_Zuev\\_.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/9a9/Dissertatsiya-v.12_1-_Zuev_.pdf).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08,  
д.т.н., профессор



Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования.

Создание и доводка современных воздушных винтов (ВВ), в том числе соосных винтовентиляторов (СВВ), и их систем автоматического управления (САУ), включая гидромеханические регуляторы (ГМР), немыслимы без стендов полунатурного моделирования (СПМ). Идея полунатурного моделирования заключается в подмене одного или нескольких натуральных объектов, участвующих в испытаниях, на их математическую модель (ММ) с целью снижения себестоимости испытаний или с целью исключения влияния натуральных объектов друг на друга (в случае поиска дефектов в изделии). Нередко полунатурное моделирование является единственным способом проведения испытаний в условиях отказных или аварийных ситуаций в связи с техническими проблемами их имитации, рисками и недопустимостью по причине опасности.

Достоверность проводимых на СПМ испытаний напрямую зависит от соответствия динамических и статических характеристик заложенных ММ характеристикам реального объекта моделирования. При испытаниях ВВ и САУ на СПМ основным объектом моделирования является газотурбинный двигатель (ГТД).

Сегодня, ввиду сложности воспроизведения в режиме реального времени динамических и статических характеристик ГТД во всем диапазоне ожидаемых условий эксплуатации, ОАО «НПП «Аэросила», являющееся единственным в стране разработчиком современных ВВ и винтовентиляторов гражданского и военного применения, при разработке и доводке соосного винтовентилятора СВ-27 столкнулось с проблемой достоверного моделирования на СПМ характеристик турбовинтовентиляторного двигателя (ТВВД) Д-27.

Существующие подходы к моделированию ГТД на СПМ в режиме реального времени не позволяют в полной мере проводить испытания ВВ и их САУ, что вызвано следующими особенностями.

1 ММ ТВВД, представленная в виде внешней характеристики двигателя – зависимости мощности турбины винтовентилятора (ТВВ) от положения рычага управления двигателем (РУД) и частоты вращения ТВВ  $N_{ТВВ} = f(\alpha_{руд}, n_{ТВВ})$ , не обеспечивает достоверное моделирование переходных процессов, а также моделирование основных параметров двигателя, таких как: суммарная степень повышения давления компрессоров  $\pi_{к\Sigma}^*$ , температура газа за турбиной высокого давления  $t_{ТВД}^*$  и др., являющихся необходимыми для замыкания обратных связей каналов управления САУ (в законе управления расходом топлива в камеру сгорания (КС) ТВВД Д-27, заложенном в электронной системе автоматического управления и контроля ЭСУ-27, основным регулируемым параметром является  $\pi_{к\Sigma}^*$ ). Указанные особенности не позволяют провести идентификацию ММ ТВВД.

2 Использование на СПМ расчетных высотно-скоростных характеристик (ВСХ) ТВВД Д-27 позволяет методом линейной интерполяции рассчитать основные параметры двигателя на различных высотах и скоростях полета, что

дает возможность проведения испытаний совместно с САУ, однако, не позволяет достаточно точно моделировать параметры двигателя на неустановившихся режимах работы. Для моделирования переходных процессов двигателя между статическими режимами, определяемыми по ВСХ, необходимо дополнительно применять динамическую характеристику ГТД, представленную в виде зависимости ускорения ротора турбокомпрессора от приведенной частоты вращения ротора турбокомпрессора и приведенного расхода топлива  $\dot{n}_{\text{ТК}} = f(n_{\text{ТК.пр}}, G_{\text{Т.пр}})$ . Динамическая характеристика ГТД базируется на учете инерционности ротора турбокомпрессора и не учитывает влияние следующих внешних воздействий на двигатель: изменение геометрии проточной части двигателя, изменение параметров отборов воздуха (место отбора, величина отбора) и параметров отбора механической мощности (привод вспомогательных агрегатов и энергоузлов), влияние числа  $Re$  на характеристики двигателя и др. Кроме того, для трехвального ТВВД Д-27 необходимо использовать многомерную динамическую характеристику, что значительно усложняет проведение расчетов.

3 Кусочно-линейная динамическая математическая модель (КЛДМ) ТВВД Д-27 работает на основе статической характеристики двигателя и, в настоящее время, является наиболее достоверным методом моделирования переходных процессов ТВВД на СПМ. КЛДМ применена при создании и доводке электронной САУ ЭСУ-27 на СПМ разработчика (АО УНПП «Молния»). Несмотря на преимущества КЛДМ ТВВД Д-27, статическая характеристика двигателя, лежащая в основе разработанной ММ, приведена только для земных условий по международной стандартной атмосфере – в документации не описывается возможность использования ММ ТВВД Д-27 при высотах и скоростях полета отличных от нуля, в том числе при нарушении подобия процессов в узлах двигателя вследствие влияния числа  $Re$  на их характеристики. Применение такой ММ для воспроизведения переходных процессов во всем диапазоне ожидаемых условий эксплуатации требует проведение дополнительного расчета массива динамических коэффициентов для каждой необходимой комбинации внешних условий, что значительно увеличивает трудоемкость доработки такой модели. Кроме того, КЛДМ работает только в окрестности установившегося режима (окрестности линии рабочих режимов) и не может использоваться для моделирования в широком диапазоне режимов работы компрессоров и турбин, т.к. разгон и торможение двигателя являются существенно нестационарными процессами с достаточно большими сигналами управления, и применение линейных методов здесь приводит к большим погрешностям.

Учитывая несовершенство существующих подходов к моделированию ГТД на СПМ, возникает необходимость создания нелинейной поузловой термодинамической математической модели (НПММ) ТВВД Д-27, которая способна качественно описывать переходные процессы двигателя Д-27 в широком диапазоне режимов работы компрессоров и турбин, моделировать работу двигателя на различных высотах и скоростях полета. Такая модель

позволяет получить термодинамические параметры рабочего тела (температуры и давления) в сечениях между основными элементами двигателя, что дает возможность проводить исследовательские испытания САУ в замкнутых контурах управления, в том числе совместно с электронной САУ ЭСУ-27.

Поузловая ММ ТВВД является универсальной, позволяет корректировать отдельные элементы (КНД, КВД, КС, ТВД, ТНД, ТВВ, ВУ), не изменяя модель в целом, что делает возможным создание на ее базе НПММ других двигателей (путем корректировки характеристик элементов двигателя и изменения количества элементов) для применения на СПМ.

Актуальным, в настоящее время, является также внедрение в стенд полунатурного моделирования поузловой нелинейной термодинамической математической модели двигателя ТВ7-117СТ (АО «Климов») с целью реализации полунатурных испытаний САУ разрабатываемого ВВ АВ112 для легкого военно-транспортного самолета Ил-112В.

В целом, можно отметить, что существующие математические модели и технологии полунатурных исследований САУ ТВВД позволяют прежде всего решать задачи устойчивости и качества регулирования в замкнутых контурах, как необходимые условия обеспечения работоспособности САУ. В дополнение к указанным задачам необходимо добавить задачи, связанные с исследованием характеристик систем контроля и диагностики как внутренних, так и внешних отказов, а также задачи, связанные с анализом вибрационной прочности и явлениями газодинамической устойчивости (помпаж, флаттер, акустика и др.), которые требуют моделирования дополнительных параметров или их физической имитации.

#### **Цели и задачи исследования.**

**Целью работы является** разработка технологии полунатурных испытаний агрегатов САУ соосных винтовентиляторов в замкнутых каналах управления с применением поузловой ММ ТВВД для повышения эффективности проектирования и доводки СВВ и их САУ (включая ГМР).

**Для достижения цели в работе ставятся следующие задачи:**

1 Провести анализ структурной организации и базовых характеристик стенда полунатурного моделирования для испытания агрегатов САУ соосных винтовентиляторов, определить недостатки существующего подхода.

2 Разработать поузловую нелинейную термодинамическую ММ ТВВД на примере ТВВД Д-27 для замыкания каналов управления на стенде полунатурного моделирования.

3 Разработать модуль реализации ММ ТВВД в среде программирования, применяемой на стенде полунатурного моделирования.

4 Исследовать реализованную ММ для ТВВД Д-27 на адекватность, по результатам исследования провести уточнение ММ с последующей идентификацией.

5 Исследовать пути возможной оптимизации расчета разработанной ММ ТВВД Д-27 с применением современных методов нечеткой логики и выработать рекомендации для применения указанной ММ на других СПМ

ОАО «НПП «Аэросила», предназначенных для испытаний аналогичных ВВ и ГМР.

6 Внедрить идентифицированную ММ ТВВД на стенд полунатурного моделирования 311ПР ОАО «НПП «Аэросила».

### **Научная новизна.**

Новыми научными результатами, полученными в работе, является технология полунатурных испытаний агрегатов САУ соосных винтовентиляторов с применением поузловой ММ ТВВД для замыкания на нее каналов управления.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Предложенная технология полунатурных испытаний агрегатов САУ с применением в стенде полунатурного моделирования поузловой нелинейной термодинамической ММ ТВВД Д-27 в замкнутых каналах управления представляет теоретическую и практическую ценность – позволяет максимально достоверно проводить исследовательские испытания воздушных винтов, соосных винтовентиляторов и агрегатов их САУ, отвечать на интересующие разработчиков вопросы:

- синтезирование оптимальных законов и алгоритмов управления САУ СВВ для различных режимов работы ТВВД, в том числе, для режима реверса тяги;
- отработка комплексного управления СВВ в составе ТВВД в различных высотно-скоростных и климатических условиях;
- оценка запасов устойчивости САУ СВВ во всем диапазоне режимов работы;
- построение статических и динамических характеристик СВВ и агрегатов САУ;
- отработка алгоритмов функционирования агрегатов САУ при отказах элементов конструкции ТВВД и его систем, в том числе, сложно воспроизводимых в эксплуатации ввиду их опасности;
- своевременное выявление системных ошибок при проектировании САУ;
- выявление скрытых дефектов в опытных и серийных изделиях;
- отработка алгоритмов и средств систем контроля и диагностики.

### **Методология и методы исследования.**

При выполнении работы использовались следующие теории и законы теоретического уровня исследований:

#### **1 теории:**

- теория воздушно-реактивного двигателя (ВРД);
- теория воздушного винта;
- теория математического моделирования;
- теория нечеткой логики и генетических алгоритмов;
- теория САУ.

**2 законы:**

- закон сохранения энергии;
- закон сохранения массы;
- второй закон Ньютона для вращательного движения.

Кроме того, применялись следующие методы эмпирического и теоретического уровней исследования:

**1 эмпирического уровня:**

- сравнение – для оценки результатов математического моделирования в отношении реального объекта;
- анализ – для выявления общих и частных проблем при испытаниях САУ винтовентиляторов и ВВ на стенде полунатурного моделирования;
- абстракция – для упрощения представления и реализации математических моделей.

**2 теоретического уровня:**

- индукция – для обобщения отклонений, полученных в результате сравнения параметров работы поузловой математической модели двигателя и параметров работы реального двигателя в различных высотно-скоростных условиях;
- интуиция – для выявления эффективности использования нечеткой логики и генетического алгоритма при нахождении совместной точки работы компрессоров и турбин в поузловой математической модели двигателя;
- доказательство – для осуществления процесса идентификации поузловой математической модели двигателя;
- моделирование – для осуществления имитации работы турбовинтовентиляторного двигателя на стенде полунатурного моделирования при помощи его поузловой математической модели, взаимодействующей с асинхронным электродвигателем привода маслососа ГМР.

**Положения, выносимые на защиту.**

На защиту выносятся:

1 Применение поузловой математической модели ТВВД на стенде полунатурного моделирования для замыкания каналов управления и отработки систем контроля и диагностики.

2 Технология полунатурных испытаний САУ соосных винтовентиляторов в замкнутых каналах управления.

3 Результаты апробации поузловой математической модели ТВВД, работающей в замкнутых каналах управления на стенде полунатурного моделирования.

**Достоверность результатов проведенных исследований.**

Достоверность результатов выполнения научной работы основывается на:

- корректном использовании фундаментальных уравнений теории ВРД, полученных на основе фундаментальных законов физики;
- применении программно-математического аппарата, отвечающего современному уровню;

- положительных результатах сравнения параметров, полученных при моделировании, с параметрами реального объекта исследования.

#### **Авторский вклад.**

Автор внес значительный вклад в создание стенда полунатурного моделирования 311ПР ОАО «НПП «Аэросила». Автором лично разработаны программные модули графических интерфейсов стенда, программные модули системы для анализа и постобработки результатов испытаний, программный модуль конфигурирования систем стенда, математические модели аэродинамических характеристик соосного винтовентилятора СВ-27; разработана, реализована, идентифицирована и внедрена в стенд нелинейная термодинамическая поузловая математическая модель двигателя Д-27. На базе разработанных программных модулей поузловой математической модели двигателя Д-27 автором лично реализована, идентифицирована и внедрена в комплекс имитационного моделирования и стенд полунатурного моделирования поузловая математическая модель турбовинтового двигателя ТВ7-117СТ.

#### **Апробация результатов.**

Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и конгрессах:

- II Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения» (Воронеж, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», 2014);
- Межвузовской молодежной научно-практической конференции Университетского округа Ступинского муниципального района «Первые Колачёвские чтения» (Ступино, МАТИ, 2015);
- Международной молодежной научной конференции «XLI Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2015);
- 14-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015» в рамках II Международной недели авиакосмических технологий «Aerospace Science Week» (Москва, МАИ, 2015);
- Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, ЦИАМ, 2015);
- Межвузовской молодежной научно-практической конференции «Вторые Колачёвские чтения», посвященной 50-летию Ступинского филиала МАИ (Ступино, МАИ, 2015);
- Научно-техническом конгрессе по двигателестроению НТКД-2016 (Москва, ВДНХ, 2016);
- Научно-техническом конгрессе по двигателестроению НТКД-2018 (Москва, ВДНХ, 2018).

#### **Публикации.**

По результатам научных исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 11 работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК, 8 – в материалах международных конгрессов и конференций.

### **Внедрение в промышленность.**

Математическая модель, реализованная на примере ТВВД Д-27, внедрена в промышленности – на стенде полунатурного моделирования 311ПР ОАО «НПП «Аэросила».

На основе программных модулей ММ ТВВД Д-27 была реализована ММ ВГТД со свободной турбиной УБЭ-1700 в рамках составной части опытно-конструкторских работ (СЧ ОКР) «Разработка бортовой энергетической установки УБЭ-1700 для установки на самолеты специального назначения» (ОАО «НПП «Аэросила») для отработки законов управления двигателем в процессе запуска и на режиме в различных высотно-скоростных условиях полета.

Также на базе программных модулей ММ ТВВД Д-27 была реализована поузловая ММ турбовинтового двигателя ТВ7-117СТ по материалам, предоставленным АО «Климов», примененная в составе ММ силовой установки (СУ) военно-транспортного самолета Ил-112В в рамках СЧ ОКР «Разработка винта воздушного для самолета Ил-112В» по заказу ОАО «Ил». Математическая модель, реализованная на примере двигателя ТВ7-117СТ, также внедрена в промышленности – на стенде полунатурного моделирования для испытания ВВ АВ112 и ГМР РСВ-34С.

Кроме того, ММ ТВ7-117СТ в составе ММ СУ Ил-112В в настоящее время проходит адаптацию с целью ее применения в комплексном тренажере самолета Ил-112В (КТС-112В) и в процедурном тренажере самолета Ил-112В (ПТС-112В) для обучения летного состава и отработки им сложных ситуаций. Адаптация ММ СУ Ил-112В осуществляется в рамках СЧ ОКР «Разработка компонентов динамической библиотеки программного модуля силовой установки самолета Ил-112В» по заказу АО ЦНТУ «Динамика».

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, четырех приложений. Диссертационная работа изложена на 263 машинописных страницах, содержит 143 рисунка, 39 таблиц и список литературы включает в себя 98 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**В первой главе** раскрыта концепция проведения полунатурных испытаний СВВ и агрегатов САУ – применение математической модели ТВВД и аэродинамических характеристик СВВ для имитации работы системы ТВВД – САУ – СВВ в замкнутых контурах управления. Рассмотрены основные составляющие технологии проведения комплексных полунатурных испытаний: структурная организация и базовые характеристики современного СПМ, структура программного обеспечения СПМ, структура и характеристики математических моделей СПМ и методы их взаимодействия с натурными объектами испытания (гидромеханическая часть СВВ и агрегаты САУ).

Отмечена ключевая роль математических моделей в процессе воспроизведения на СПМ статических и динамических характеристик системы ТВВД – САУ – СВВ, на основании этого сформулирована основная проблема СПМ – недостоверное моделирование динамических характеристик ТВВД в режиме реального времени в замкнутых каналах управления.

Для решения основной проблемы СПМ проведен подробный обзор и анализ отечественных и зарубежных программных комплексов, позволяющих моделировать работу ГТД: GasTurb 12, GSP11, ГРАД, ГРЭТ, АСТРА, комплексный математический стенд ЦИАМ, DVIGw.

Проведенный анализ показал, что имеющиеся на сегодняшний день готовые программные продукты не могут быть применены на СПМ по ряду причин. Основными причинами являются: отсутствие возможности расчета параметров двигателя в режиме реального времени и отсутствие возможности взаимодействия с программно-аппаратными средствами стенда.

Расчет параметров ММ ТВВД в режиме реального времени является обязательным условием для достоверного воспроизведения переходных процессов на СПМ, поскольку программно-аппаратные средства СПМ непрерывно взаимодействуют с натурными объектами испытания (гидромеханическая часть СВВ и САУ).

В заключении первой главы на основании проведенного обзора СПМ, и анализа возможных путей решения основной проблемы СПМ поставлена цель диссертационной работы и определены задачи научного исследования.

**Во второй главе** разработана нелинейная поузловая (поэлементная) термодинамическая математическая модель ТВВД на примере ТВВД Д-27, описаны основные подходы и применяемые уравнения.

НПММ ТВВД Д-27 структурно повторяет поузловое строение двигателя (см. Рисунок 1). В соответствии со структурной схемой НПММ можно условно разделить на две основные части: термодинамическая модель газогенератора (ГГ) и динамическая модель роторов.

Термодинамическая модель ГГ состоит из семи основных элементов (узлов): компрессор низкого давления (КНД), компрессор высокого давления (КВД), камера сгорания (КС), турбина высокого давления (ТВД), турбина низкого давления (ТНД), турбина винтовентилятора (ТВВ), выходное устройство (ВУ). В термодинамической модели ГГ происходит расчет температур и давлений вдоль проточной части двигателя. Процессы в узлах двигателя рассматриваются как квазистационарные. Алгоритм нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин в термодинамической модели основан на методе дихотомии (см. Рисунок 2).

Динамическая модель состоит из трех основных элементов, описывающих динамику роторов высокого и низкого давления (ВД, НД), а также дифференциального редуктора, обеспечивающего противоположное вращение переднего и заднего воздушных винтов.

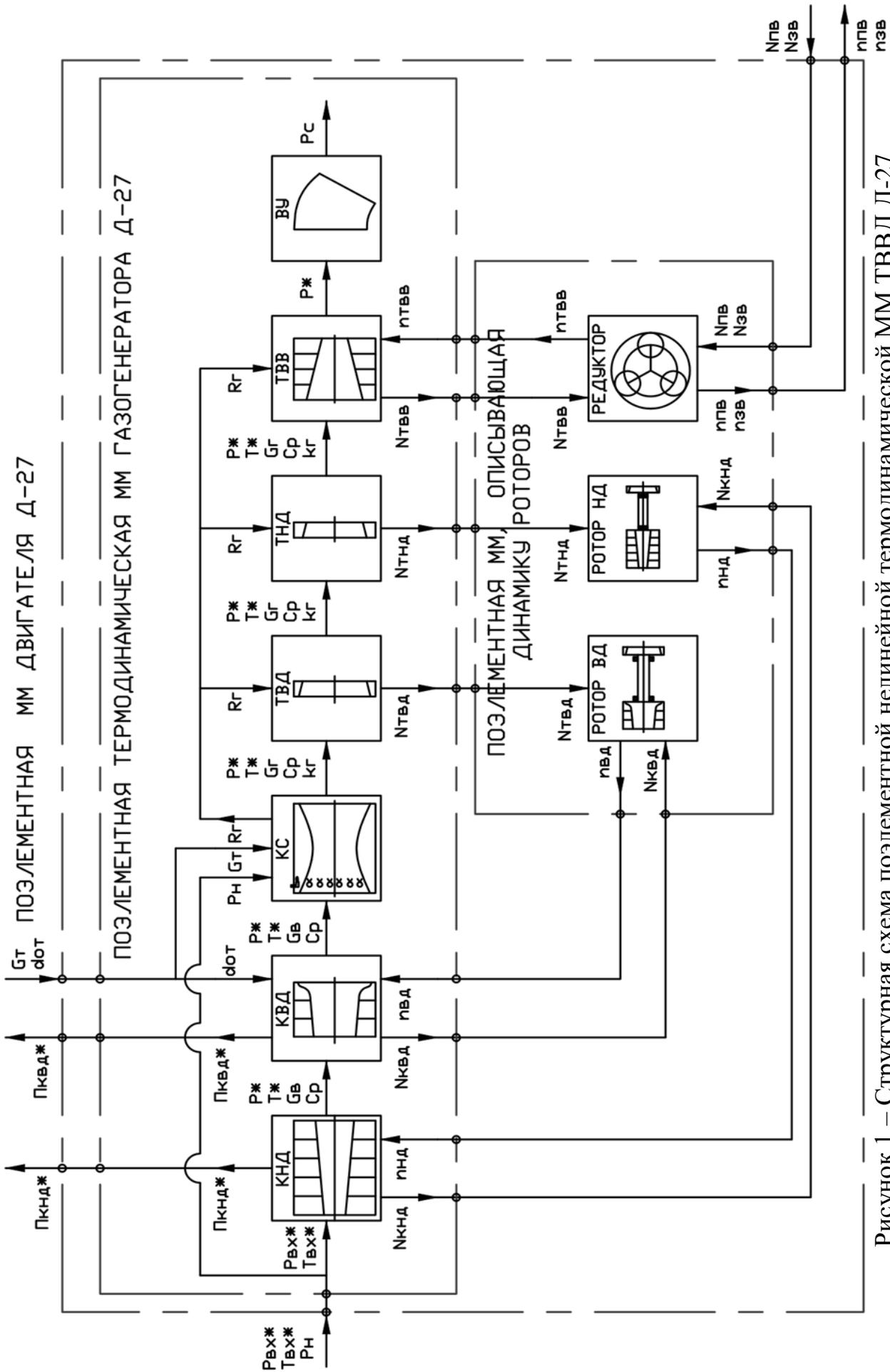


Рисунок 1 – Структурная схема поэлементной нелинейной термодинамической ММ ТВВД Д-27

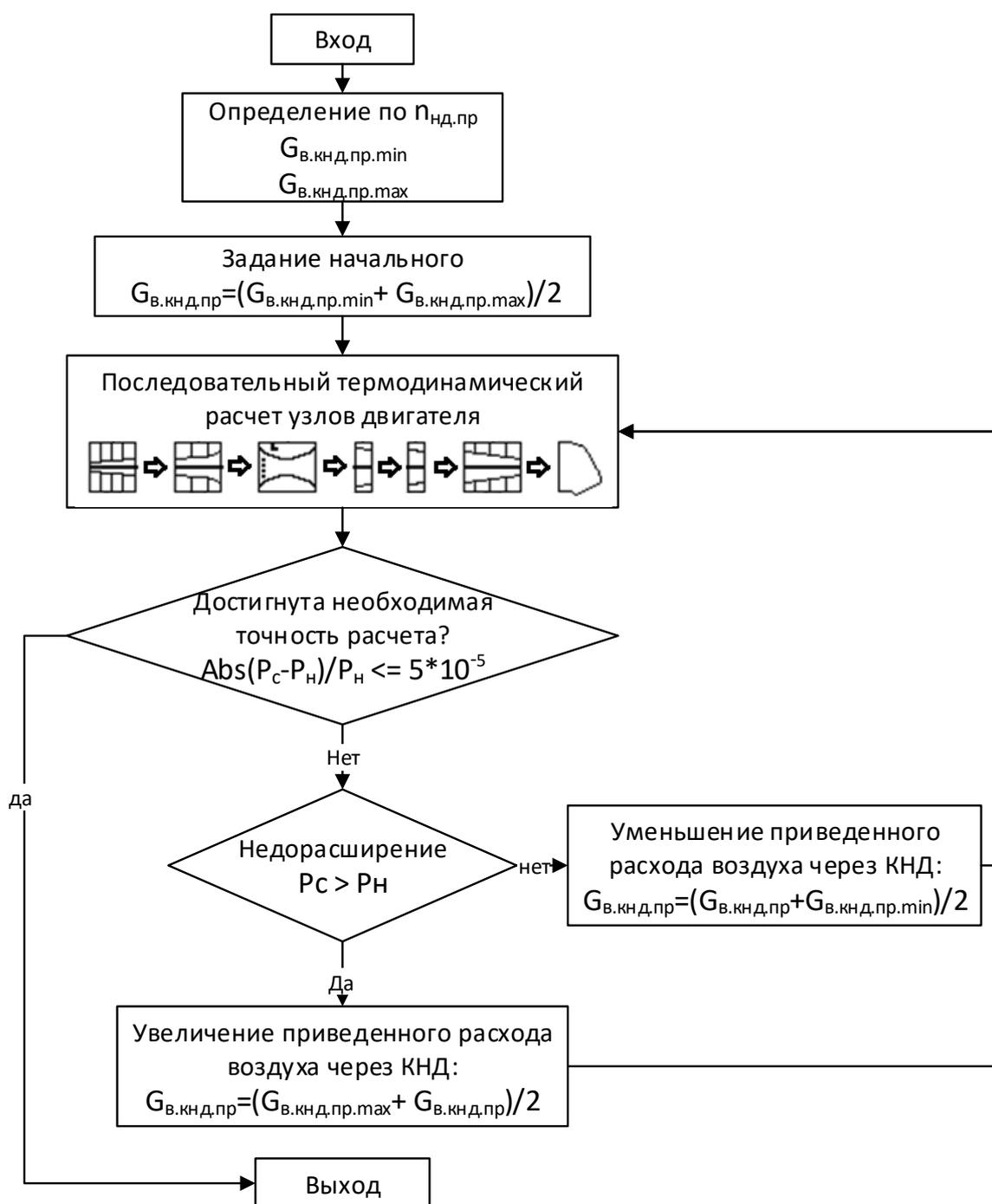


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма нахождения совместной точки работы узлов ТВВД

При разработке ММ ТВВД использовались следующие фундаментальные законы.

1 Закон сохранения энергии газового потока – сумма удельной энтальпии, удельной кинетической энергии, а также удельного подведенного или отведенного количества теплоты или удельной работы сохраняются между условными сечениями:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} \pm q \pm l = i_2 + \frac{c_2^2}{2}, \quad (1)$$

где  $i_1, i_2$  – значение удельной энтальпии в условных сечениях,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  
 $c_1, c_2$  – скорость течения газового потока в условных сечениях,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;  
 $q$  – удельное подведенное или отведенное количество теплоты,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  
 $l$  – удельная работа, совершенная над газовым потоком или самим газовым потоком,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .

2 Закон сохранения массы газового потока (неразрывность газового потока) – массовый расход газового потока с учетом отбора сжатого воздуха или подачи топлива сохраняется между условными сечениями:

$$G_{Г1} - G_{отб} + G_T = G_{Г2}, \quad (2)$$

где  $G_{Г1}, G_{Г2}$  – массовый расход газового потока в условных сечениях,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;  
 $G_{отб}$  – массовый расход отбираемого сжатого воздуха,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;  
 $G_T$  – массовый расход топлива в КС,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ .

3 Второй закон Ньютона для вращательного движения – угловое ускорение ротора прямо пропорционально крутящему моменту и обратно пропорционально моменту инерции:

$$\dot{n} = \frac{\Delta N}{2\pi \cdot n \cdot I}, \quad (3)$$

где  $\dot{n}$  – угловое ускорение,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  
 $\Delta N$  – разность мощностей источника и потребителя, Вт;  
 $n$  – частота вращения,  $\frac{\text{об}}{\text{с}}$ ;  
 $I$  – момент инерции,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Из структурной схемы (Рисунок 1) видно, что на НПММ ТВВД Д-27 оказывают влияние внешние возмущения:

- давление торможения воздуха на входе в двигатель  $P_{вх}^*$ ;
- температура воздуха на входе в двигатель по параметрам торможения  $T_{вх}^*$ ;
- расход топлива в камеру сгорания  $G_T$ ;
- отбор воздуха за КВД  $\delta_{отб}$ ;
- мощности, отбираемые передним и задним ВВ  $N_{пв}, N_{зв}$ .

Параметры  $P_{вх}^*, T_{вх}^*, G_T, \delta_{отб}$  оказывают влияние на термодинамическую ММ ГГ, а  $N_{пв}, N_{зв}$  – на динамическую модель дифференциального редуктора СВВ.

Внешними параметрами ММ ТВВД Д-27 являются:

- степень повышения давления торможения КНД  $\pi_{кнд}^*$ ;
- степень повышения давления торможения КВД  $\pi_{квд}^*$ ;
- частоты вращения переднего и заднего ВВ  $n_{пв}, n_{зв}$ .

**В третьей главе** проведена разработка модуля реализации поузловой ММ ТВВД Д-27 в среде программирования LabView, применяемой на стенде полунатурного моделирования, дано обоснование выбора среды программирования, описана работа программных модулей и приведен их программный код.

**В четвертой главе** проведено исследование адекватности (верификация) НПММ ТВВД Д-27, для чего были использованы следующие материалы:

- результаты летных испытаний (ЛИ) самолета АН-70 (полет №640 от 31.10.12, полет №657 от 27.01.13);

- дроссельные характеристики ТВВД Д-27, полученные расчетным путем по ММ ГП «ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко;

- высотно-скоростные экспериментально-расчетные характеристики ТВВД Д-27, представленные ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко.

Сравнение результатов обработки НПММ с указанными материалами показало, что качественно ММ ТВВД Д-27 описывает поведение реального двигателя в части исследуемых параметров  $\pi_{\text{КС}}^*$ ,  $G_{\text{T}}$ ,  $T_{\text{T}}^*$ ,  $N_{\text{ТВВ}}$  во всем диапазоне режимов работы, однако, для достижения требуемой точности статического расчета параметров двигателя необходимо уточнение ММ.

**В пятой главе** описана методика алгебраической коррекции НПММ ТВВД Д-27 в части параметров  $G_{\text{T}}$  и  $N_{\text{ТВВ}}$ .

Для уточнения значений расхода топлива в КС введен коэффициент идентификации  $k_{\text{и}}$ , показывающий отношение расхода топлива в КС, полученного по результатам расчета НПММ, к расходу топлива в КС, полученному по результатам летных испытаний:

$$k_{\text{и}} = \frac{G_{\text{T.мод}}}{G_{\text{T}}}, \quad (4)$$

где  $G_{\text{T.мод}}$  – расход топлива в КС по результатам расчета ММ,  $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ ;

$G_{\text{T}}$  – расход топлива в КС по результатам летных испытаний,  $\frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ .

Анализ, проведенный в Главе 4, установил влияние высоты  $H$  и числа  $M$  на погрешность расчета расхода топлива – с увеличением  $H$  и  $M$  погрешность уменьшается. Следовательно, на величину коэффициента идентификации  $k_{\text{и}}$

должен оказывать влияние комплекс  $\frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}$ .

Для выявления зависимости  $k_{\text{и}} = f\left(\frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}\right)$  было выбрано несколько экспериментальных точек (см. Рисунок 3).

Из Рисунка 3 видно, что зависимость коэффициента  $k_{\text{и}}$  от комплекса

$\frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}$  является квазилинейной. По выбранным точкам была построена

аппроксимирующая линия по которой определяется коэффициент  $k_{\text{и}}$ .

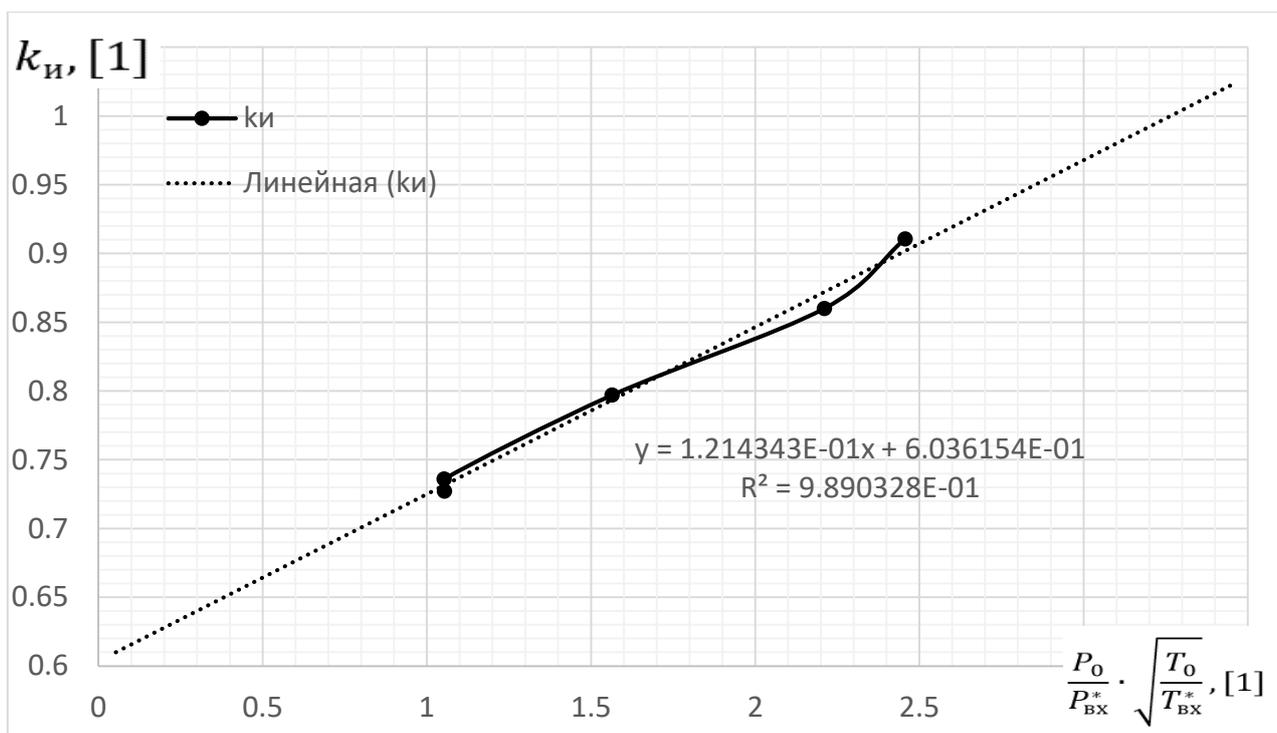


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента идентификации  $k_{и}$

от комплекса  $\frac{P_0}{P_{BX}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{BX}^*}}$

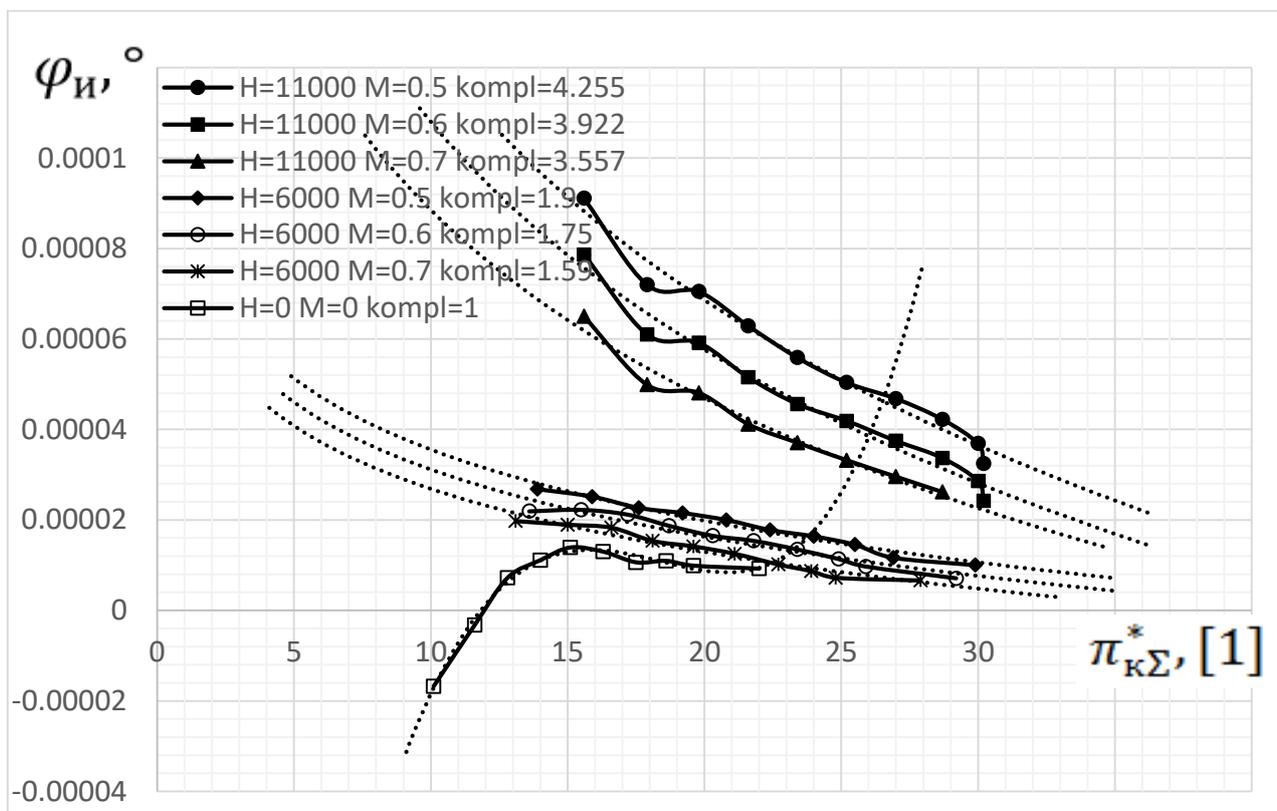


Рисунок 4 – Зависимость угла идентификации  $\varphi_{и}$  от суммарной степени

повышения давления  $\pi_{к\Sigma}^*$  и комплекса  $\frac{P_0}{P_{BX}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{BX}^*}}$

Для уточнения параметра  $N_{\text{ТВВ}}$  введен угол идентификации  $\varphi_{\text{и}}$ , представляющий угол между двумя линиями, образованными общей точкой с координатами  $(\pi_{\text{КС}0}^* = 6,2; N_{\text{ТВВ}0} = 203300 \text{ Вт})$ , соответствующими минимальным значениям параметров  $\pi_{\text{КС}}^*$  и  $N_{\text{ТВВ}}$ , а также точкой (полученной по дроссельным характеристикам ТВВД) с координатами  $(\pi_{\text{КС}}^*; N_{\text{ТВВ}})$  и точкой (полученной по результатам расчета НПММ) с координатами  $(\pi_{\text{КС}}^*, N_{\text{ТВВ.МОД}})$  при одинаковых значениях параметра  $\pi_{\text{КС}}^*$ :

$$\varphi_{\text{и}} = \text{atan} \left( \frac{N_{\text{ТВВ}} - 203300}{\pi_{\text{КС}}^* - 6,2} \right) \cdot \frac{180}{\pi} - \text{atan} \left( \frac{N_{\text{ТВВ.МОД}} - 203300}{\pi_{\text{КС}}^* - 6,2} \right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (5)$$

Применение угла идентификации в данном случае дает лучшие результаты, чем применение коэффициента идентификации.

Анализ, проведенный в Главе 4, установил влияние высоты  $H$  и числа  $M$  на погрешность расчета мощности, развиваемой ТВВ. Следовательно, на величину  $\varphi_{\text{и}}$  должен оказывать влияние комплекс  $\frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}$ .

Для различных значений  $\pi_{\text{КС}}^*$  и  $\frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}$  построена многомерная характеристика  $\varphi_{\text{и}}$ , представленная на Рисунке 4.

По линиям  $\varphi_{\text{и}} = f \left( \frac{P_0}{P_{\text{ВХ}}^*} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{\text{ВХ}}^*}}, \pi_{\text{КС}}^* \right)$  были построены аппроксимирующие кривые, по которым определяется угол  $\varphi_{\text{и}}$  и рассчитывается мощность ТВВ.

**В шестой главе** проведена идентификация уточненной НПММ ТВВД Д-27 в части статических и динамических параметров. Результаты сравнения моделируемого расхода топлива в КС с расходом топлива реальных двигателей при проведении летных испытаний на различных высотах и скоростях полета показали, что расчетный расход топлива в КС совпадает со среднестатистическим расходом топлива в КС испытываемых двигателей (см. Рисунки 5, 6).

Кроме того, проведено сравнение моделируемой мощности ТВВ с мощностью ТВВ, полученной по экспериментально-расчетным данным ГП «ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко (см. Рисунок 7).

Проведенный анализ показал, что погрешность расчета уточненной ММ в части параметров  $G_{\text{Т}}$  и  $N_{\text{ТВВ}}$  является допустимой для моделирования совместной работы СВВ, ТВВД и САУ на СПМ.

Ввиду отсутствия необходимых экспериментальных данных идентификация динамических параметров НПММ проводилась в составе стенда полунатурного моделирования в замкнутых каналах управления путем сравнения ее динамических характеристик с динамическими характеристиками КЛДМ Д-27. Воспроизведение динамических характеристик КЛДМ в условиях, отличающихся от земных, обеспечивалось применением формул приведения из теории ВРД. Типовой график сравнения динамических характеристик ММ в замкнутых каналах управления приведен на Рисунке 8.

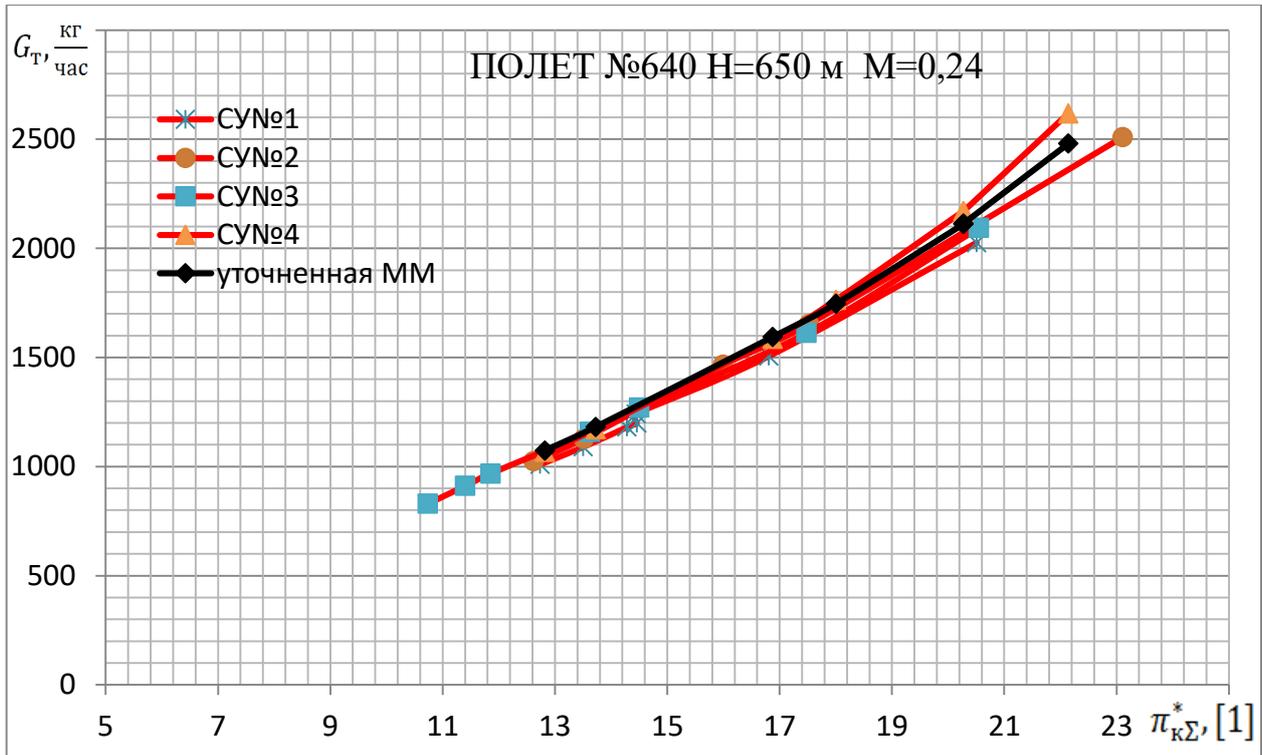
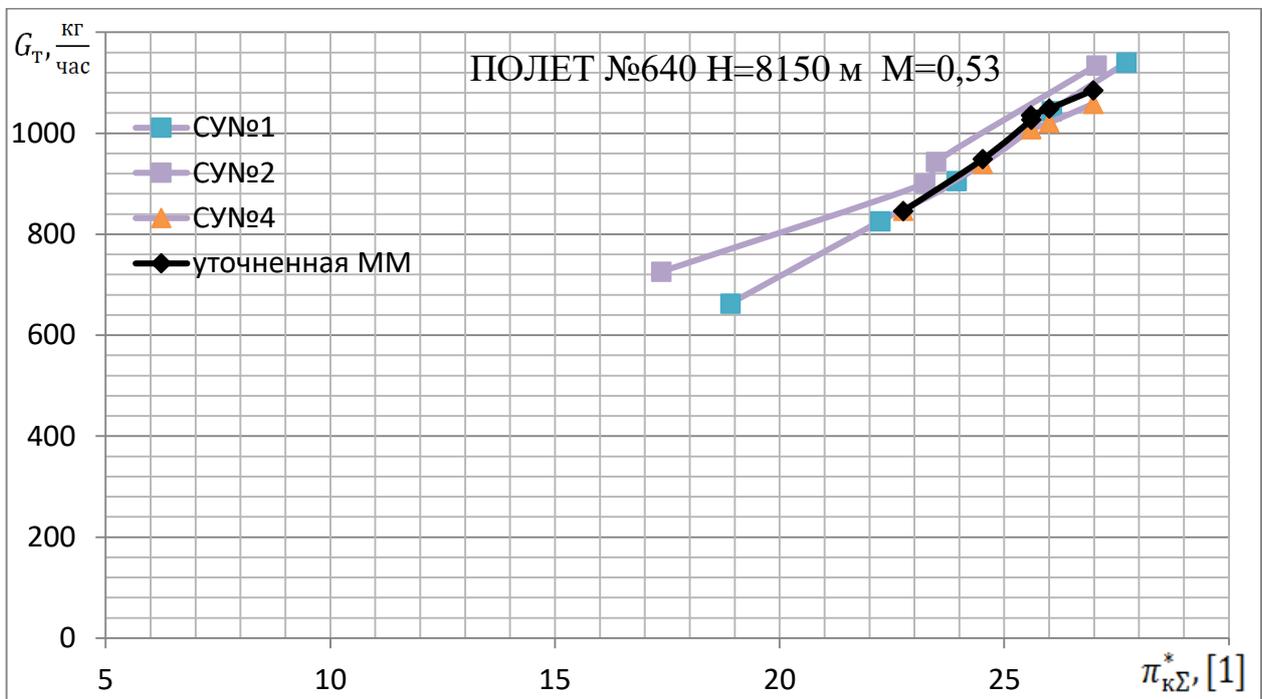


Рисунок 5 – Сравнение расходов топлива в КС СУ №1,2,3,4, измеренных в процессе летных испытаний (полет №640 от 31.10.12), с расходами топлива в КС, полученными по результатам расчета уточненной ММ ТВД Д-27, на высоте  $H = 650$  м и при числе Маха  $M = 0,24$



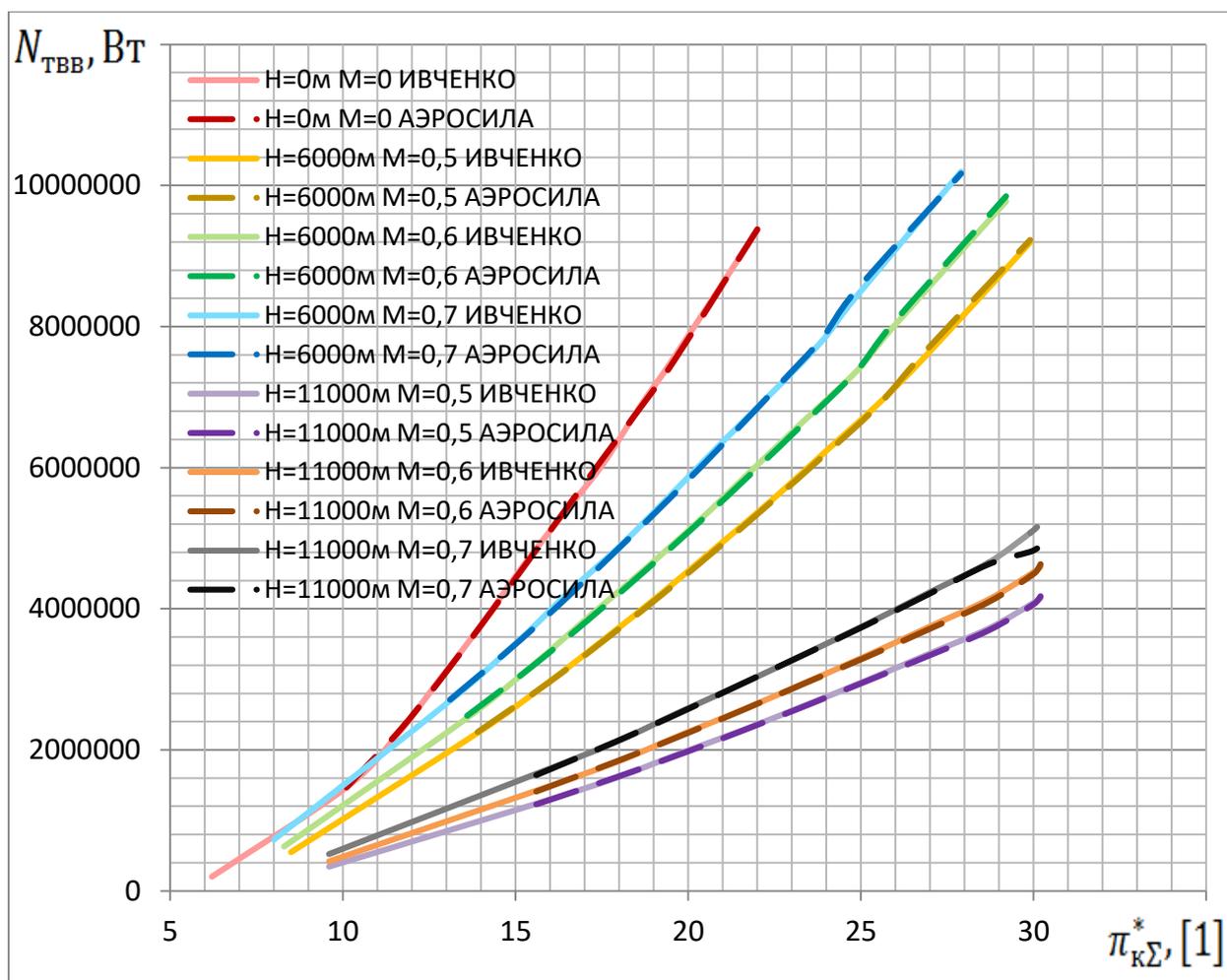


Рисунок 7 – Сравнение мощностей, развиваемых ТВВ, по экспериментально-расчетным данным ГП «ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко с мощностями, развиваемыми ТВВ, полученными по результатам расчета уточненной ММ ТВВД Д-27, в различных условиях полета

Результаты моделирования показали, что динамическая погрешность при сравнении результатов обработки двух ММ находится в пределах 15 %, что является приемлемым результатом, учитывая динамическую погрешность КЛДМ при высокой скорости сброса и дачи газа, а также в процессе встречной приемистости.

В заключении шестой главы подытоживается, что погрешность динамического расчета поузловой нелинейной ММ ТВВД Д-27 в замкнутых каналах управления в части параметров  $n_{нд}$  и  $n_{вд}$  является допустимой для моделирования совместной работы СВВ, двигателя и САУ на СПМ.

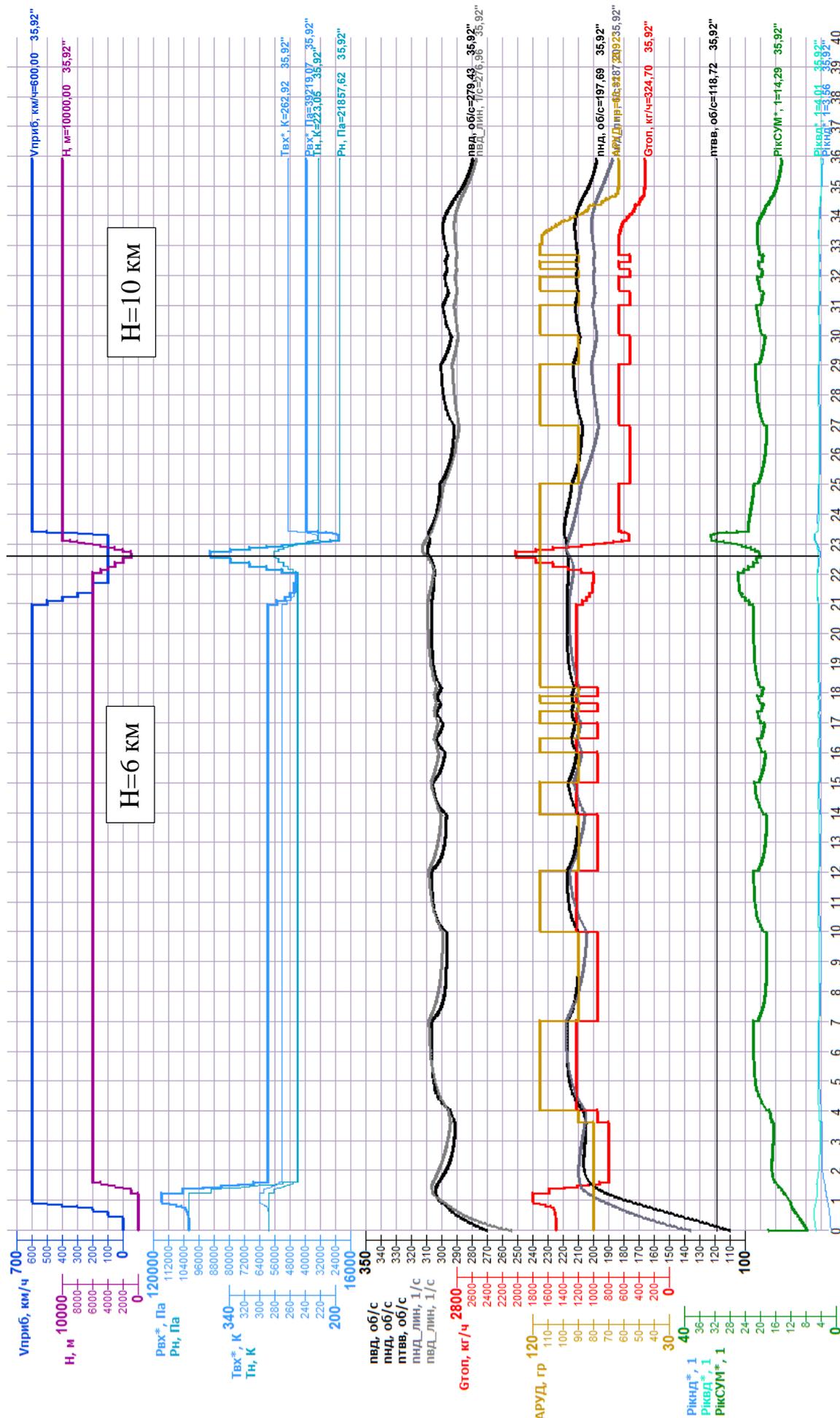


Рисунок 8 – Сравнение динамических характеристик нелинейной поэлементной ММ ТВВД Д-27 с динамическими характеристиками КЛДМ Д-27 на высоте  $H = 6000$  м и на высоте  $H = 10000$  м при скорости полета  $V_{\text{приб}} = 600 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$  (параметры атмосферы соответствуют МСА)

В седьмой главе с целью минимизации вычислительных операций нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин при использовании НПММ ТВВД Д-27 в режиме реального времени применен современный метод оптимизации – генетический алгоритм (ГА), исследована эффективность его применения.

В настоящее время ГА получил широкое применение для решения задач в области авиационных ГТД.

Для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин ГА был реализован в среде LabView совместно с НПММ ТВВД Д-27.

Работа ГА была проверена при различных значениях заданной точности расчета, различном числе особей в популяции и различных вероятностях мутации генов в каждой хромосоме. В процессе моделирования фиксировалось количество произведенных итераций – последовательных пересчетов термодинамической модели газогенератора. Результаты отработки наиболее оптимальной конфигурации ГА представлены на Рисунке 9.

Результаты моделирования показали, что при точности расчета  $\frac{|P_c - P_n|}{P_n} \leq 0,01$  ГА производит недопустимо большое количество итераций для каждой расчетной точки переходного процесса. Кроме того, ГА является относительно нестабильным методом расчета – количество итераций, необходимое для нахождения однотипных расчетных точек, может существенно отличаться.

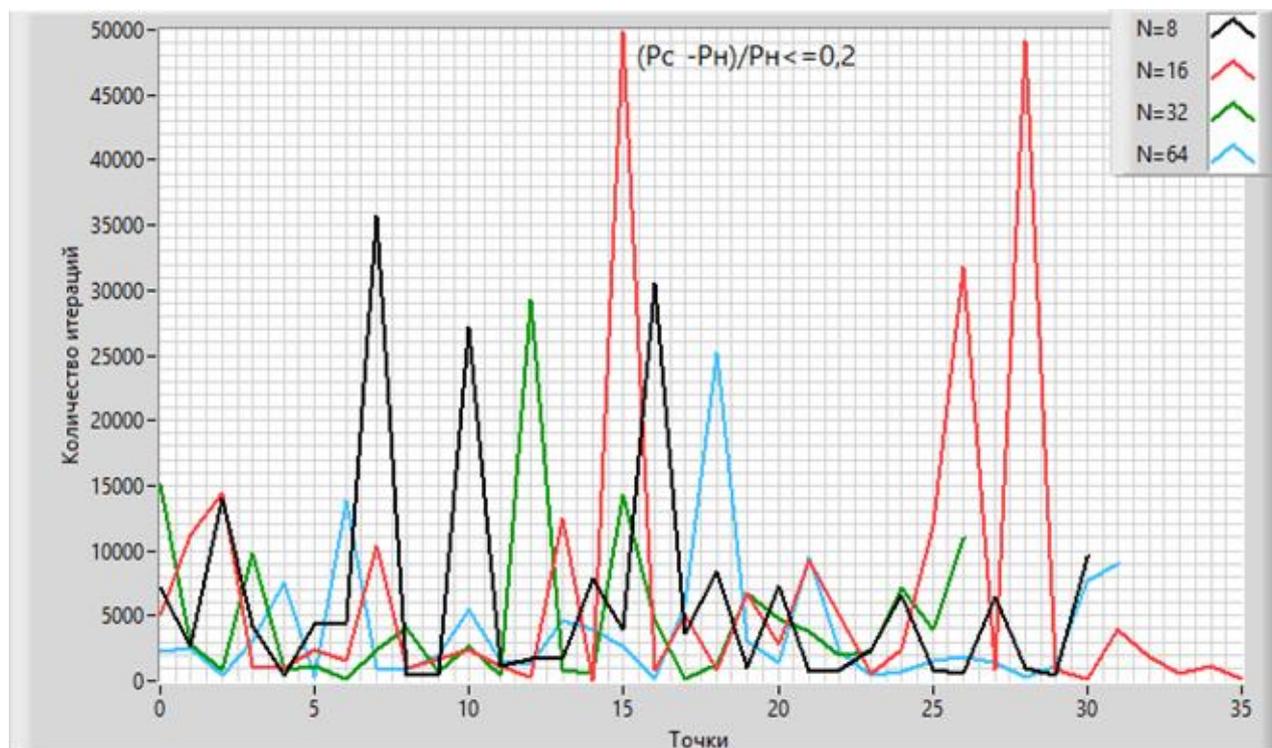


Рисунок 9 – Результат отработки ГА при различном числе особей в популяции

Значительное увеличение скорости расчета достигается только за счет уменьшения точности расчета, однако, нестабильность ГА приводит к увеличенному количеству итераций, определяемому параметрами функций скрещивания и мутации, при расчете отдельных точек переходного процесса (см. Рисунок 9).

На основании вышеизложенного можно сказать, что применение ГА для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин в поэлементной нелинейной ММ ТВВД Д-27 является неэффективным решением.

**В восьмой главе** приводятся результаты апробации поузловой математической модели ТВВД на стенде полунатурного моделирования при испытаниях агрегатов САУ СВВ в замкнутых каналах управления. Для апробации НПММ ТВВД Д-27 на стенде полунатурного моделирования ОАО «НПП «Аэросила» были проведены функциональные испытания винтовентилятора СВ-27 на основной и резервной (гидромеханической) САУ. При этом имитировались различные переходные процессы силовой установки с дачей и сбросом газа в диапазоне режимов «земной малый газ» – «взлет». Описана апробация НПММ ТВВД Д-27 в замкнутых каналах управления в ходе испытаний гидромеханического регулятора РСВ-27 на СПМ по программе эквивалентно-циклических испытаний (см. Рисунок 10). Приводятся результаты апробации НПММ ТВД ТВ7-117СТ, построенной на базе разработанной НПММ ТВВД, в составе стенда имитационного моделирования для формирования и отработки алгоритмов САУ ВВ АВ112.

В заключении восьмой главы отмечено, что технология полунатурных испытаний агрегатов САУ соосных винтовентиляторов в замкнутых каналах управления с применением поузловой ММ ТВВД дает высокую сходимость результатов полунатурных испытаний с результатами реальных испытаний СВВ в составе ТВВД, обеспечивает полноценное взаимодействие математической модели ТВВД с электронной системой управления. Реализация испытаний САУ СВВ в замкнутых каналах управления на стендах полунатурного моделирования с применением поузловых ММ ТВВД раскрывает огромный спектр возможностей для выбора и отработки алгоритмов и законов управления СВВ на режимах реверса и прямой тяги во всех ожидаемых условиях эксплуатации, а также при имитации отказных ситуаций.

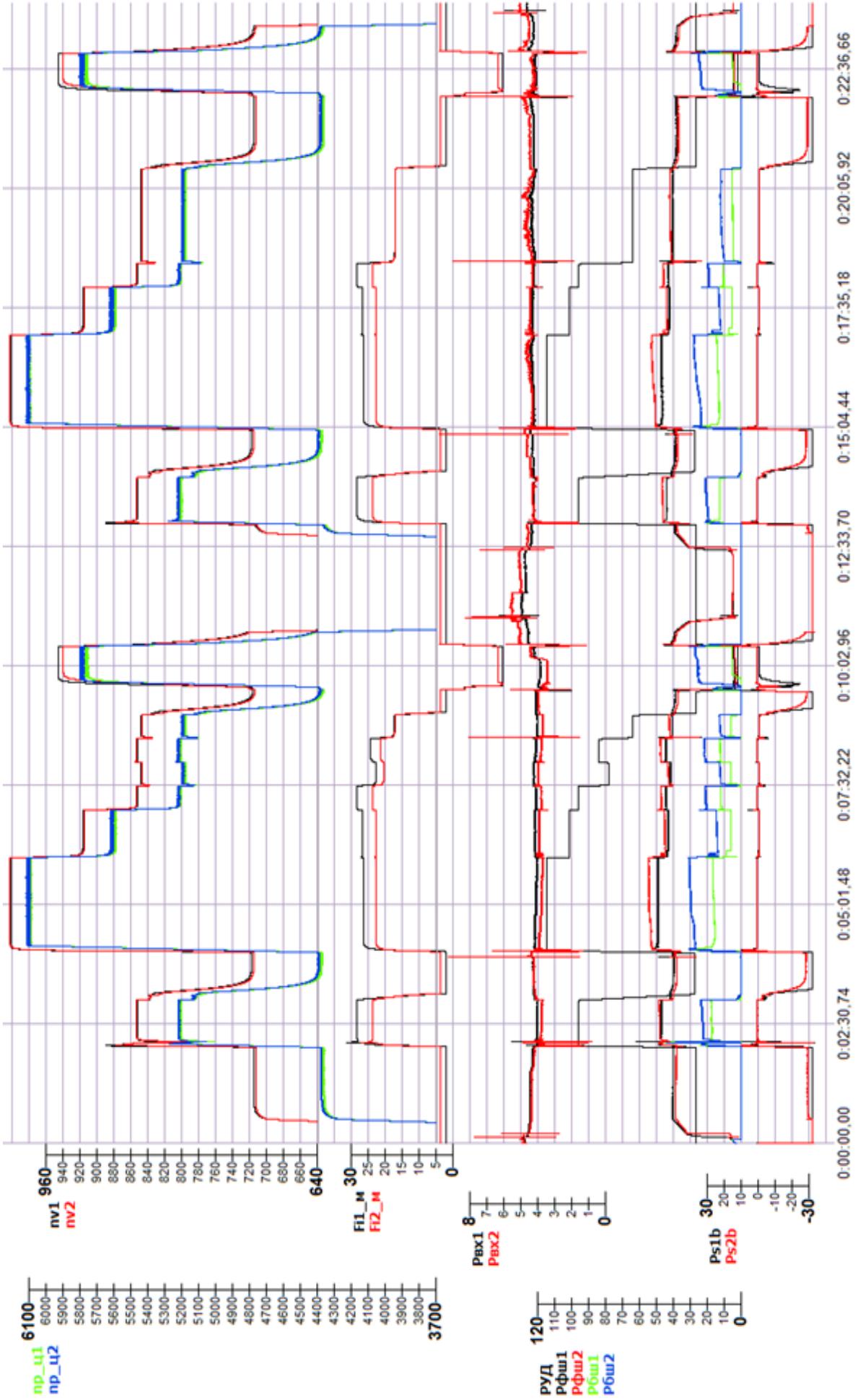


Рисунок 10 – Эквивалентно-циклические испытания РСВ-27 на СПМ 311ПР с применением поузловой ММ ТВВД Д-27

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана технология проведения полунатурных испытаний САУ соосных винтовентиляторов в замкнутых на поузловую ММ двигателя каналах управления.

2 Разработана, реализована и идентифицирована поузловая нелинейная термодинамическая ММ ТВВД Д-27, позволяющая моделировать работу двигателя в широком диапазоне внешних условий.

3 Выполнена апробация разработанной поузловой нелинейной ММ ТВВД Д-27 на стенде полунатурного моделирования 311ПР разработки ОАО «НПП «Аэросила».

4 Концепция поузлового (поэлементного) представления разработанной нелинейной ММ ТВВД Д-27 стала прототипом при создании поузловой нелинейной ММ двигателя ТВ7-117СТ, примененной в составе ММ силовой установки самолета Ил-112В, в составе стенда полунатурного моделирования для испытаний ВВ АВ112 и его САУ, в составе комплексных тренажеров самолета КТС-112В и ПТС-112В совместно с ММ АВ112 и ММ САУ для подготовки летного состава и отработки им сложных ситуаций.

5 Технология полунатурных испытаний САУ винтовентиляторов (воздушных винтов) в замкнутых на поузловую ММ ТВВД каналах управления позволяет до начала проведения натурных испытаний на моторном стенде и самолете синтезировать оптимальные законы и алгоритмы управления силовой установки на различных режимах работы, оценить запасы устойчивости САУ, построить статические и динамические характеристики винтовентилятора и агрегатов САУ, отработать алгоритмы функционирования агрегатов САУ при отказах элементов конструкции ТВВД и его систем, своевременно выявить системные ошибки при проектировании САУ, выявить скрытые дефекты в опытных и серийных изделиях.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях:*

1 Иванов, А.В. Математическое моделирование ТВВД при испытаниях соосного винтовентилятора совместно с САУ на стенде полунатурного моделирования / А.В. Иванов, А.М. Данилихин, В.В. Баранов, В.И. Хилько // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2016. – Т.20. – №3 (73). – С. 89-94.

2 Иванов, А.В. Исследование применения генетического алгоритма при моделировании турбовинтового двигателя / А.В. Иванов // Вестник Московского авиационного института. – 2016. – Т.23. – №4. – С. 79-85.

3 Иванов, А.В. Применение нелинейной математической модели двигателя на стенде полунатурного моделирования при испытаниях воздушных винтов совместно с системой автоматического управления / А.В. Иванов, А.М. Данилихин, В.В. Баранов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2018. – №1. – С. 4-9.

*Другие публикации:*

4 Баранов В.В., Хилько В.И., Данилихин А.М., Иванов А.В. Математическое моделирование турбовинтового двигателя при испытаниях воздушных винтов и регуляторов на стенде полунатурного моделирования // Академические жуковские чтения: тезисы докл. II Всероссийской научно-практической конференции (Воронеж, 25-27 ноября 2014 г.). – Воронеж, 2014.

5 Баранов В.В., Хилько В.И., Данилихин А.М., Иванов А.В. Математическое моделирование турбовинтового двигателя при испытаниях воздушных винтов на стенде полунатурного моделирования // Первые Колачёвские чтения: материалы Межвузовской молодежной научно-практической конференции (Ступино, 3 апреля 2015 г.). – Ступино, 2015. – С. 46-48.

6 Баранов В.В., Бабин С.В., Хилько В.И., Данилихин А.М., Иванов А.В. Математическое моделирование при испытаниях воздушных винтов и регуляторов на стенде полунатурного моделирования // XLI Гагаринские чтения: научные труды Международной молодежной научной конференции (Москва, 7-9 апреля 2015 г.). – Москва, 2015. – Т.2. – С. 117-119.

7 Иванов А.В., Баранов В.В., Хилько В.И., Данилихин А.М. Математическое моделирование турбовинтовентиляторного двигателя при испытаниях воздушных винтов и регуляторов на стенде полунатурного моделирования // Авиация и космонавтика – 2015: тезисы 14-ой Международной конференции (Москва, 16-20 ноября 2015 г.). – Москва, 2015. – С. 110-112.

8 Иванов А.В., Баранов В.В., Хилько В.И., Данилихин А.М. Математическое моделирование турбовинтового двигателя при испытаниях воздушных винтов и регуляторов на стенде полунатурного моделирования // Авиадвигатели XXI века: сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 24-27 ноября 2015 г.). – Москва, 2015. – С. 867-870.

9 Иванов А.В., Баранов В.В., Хилько В.И. Испытания воздушных винтов и их систем автоматического управления на стендах полунатурного моделирования // Вторые Колачёвские чтения: материалы Межвузовской молодежной научно-практической конференции (Ступино, 8 апреля 2016 г.). – Ступино, 2016. – С. 54-56.

10 Баранов В.В., Хилько В.И., Данилихин А.М., Иванов А.В. Испытания воздушных винтов и их САУ на стендах полунатурного моделирования // Международный форум двигателестроения: сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2016) (Москва, 19-21 апреля 2016 г.). – Москва, 2016. – С. 328-333.

11 Иванов А.В. Имитационное моделирование турбовинтовой силовой установки в практике разработки САУ НПП «Аэросила» // Международный форум двигателестроения: сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2018) (Москва, 4-6 апреля 2018 г.). – Москва, 2018. – Т.2. – С. 88-90.