

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор –  
генеральный конструктор  
АО «ОДК – Авиадвигатель»,  
член-корреспондент РАН



Иноземцев А.А.

2019 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Иванова Артема Викторовича  
«Технология комплексных полунатурных исследований систем автоматического  
управления соосных винтовентиляторов турбовинтовентиляторных двигателей»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов»

### Актуальность темы диссертационной работы

Создание современных систем автоматического управления (САУ) воздушных винтов (ВВ), в том числе соосных винтовентиляторов (СВВ), сопряжено с полунатурными исследованиями. В соответствии с требованиями отраслевого института ЦИАМ им. П.И. Баранова САУ ВВ должны проходить испытания в замкнутой схеме с математической моделью двигателя на полунатурном стенде для подтверждения соответствия функциональных характеристик САУ требованиям технического задания. При этом большое внимание уделяется достоверности и точности моделирования переходных режимов турбовинтовой силовой установки. В связи с тем, что динамическая система воздушный винт – двигатель является связной, моделирование переходных процессов должно обеспечиваться путем совместного применения математических моделей воздушного винта и двигателя, отражающих их динамические характеристики.

Необходимость решения научных и технических задач по повышению качества проводимых полунатурных испытаний агрегатов САУ ВВ определяет актуальность темы диссертации.

### Научная новизна

Научная новизна состоит в предложенной автором технологии проведения полунатурных испытаний САУ ВВ в основе которой лежат следующие положения:

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
25.01.2019

- воспроизведение переходных процессов обеспечивается за счет рассмотрения динамической системы воздушный винт - двигатель как связной;

- достоверность моделирования переходных процессов во всем диапазоне режимов работы обеспечивается за счет применения нелинейной поэлементной математической модели двигателя;

- в процессе проведения испытаний рассматривается совместная работа САУ ВВ и САУ двигателя с замыканием каналов управления на математические модели.

Необходимо отметить, что стенд полунатурного моделирования для испытаний САУ ВВ с применением описанной технологии разработан впервые в России и соответствует высокому научно-техническому уровню.

### **Практическая значимость**

Предложенная технология проведения полунатурных испытаний САУ ВВ позволяет решать практические задачи:

- расчет коэффициентов регулирования ВВ с учетом нелинейного изменения динамических характеристик системы ВВ - двигатель во всем диапазоне режимов работы;

- определение законов управления ВВ на режимах реверса тяги;

- отработка защитных алгоритмов САУ в условиях появления возможных функциональных отказов (единичных и в комбинации);

- снятие динамической характеристики механизма изменения шага ВВ;

- выявление скрытых дефектов в гидравлической части ВВ и его САУ.

### **Достоверность положений, выносимых на защиту**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается:

- корректным применением фундаментальных законов физики и уравнений теории ВРД;

- применением аттестованного испытательного оборудования и сертифицированных средств измерения;

- результатами испытаний, проводимых на полунатурном стенде.

### **Общие сведения о диссертационной работе**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, четырех приложений. Объем диссертации составляет 263 страницы, список литературы включает 98 наименований.

Во **введении** обоснованы: актуальность научной работы, достоверность результатов проведенных исследований; сформированы цели и задачи



научного исследования; показаны: авторский вклад, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы; сформулированы положения, выносимые на защиту; приведены результаты апробации работы и внедрения в промышленность; кратко описаны структура и содержание работы.

**В первой главе** рассмотрена концепция проведения полунатурных испытаний САУ ВВ. Описаны структура стенда полунатурного моделирования (СПМ), функциональные возможности СПМ, структура программного обеспечения и математических моделей СПМ. Предъявлены требования к применяемым математическим моделям в части динамических характеристик. Рассмотрены программные комплексы, в том числе зарубежные, применяемые для моделирования работы газотурбинного двигателя. Дано обоснование необходимости разработки для СПМ поузловой нелинейной термодинамической математической модели двигателя, на примере Д-27.

**Во второй главе** приводятся основные результаты разработки поузловой нелинейной термодинамической математической модели турбовинтовентиляторного двигателя (ТВВД) на примере Д-27, описаны основные используемые уравнения, показана структурная схема математической модели, представлен алгоритм нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин.

В основе разработанной математической модели лежат уравнения теории воздушно-реактивных двигателей. Процессы в узлах двигателя рассматриваются как квазистационарные, что позволяет применить в модели экспериментально-расчетные характеристики компрессоров и турбин.

**В третьей главе** описывается процесс разработки программного обеспечения в среде LabView, реализующего поузловую нелинейную термодинамическую математическую модель ТВВД Д-27.

Среда LabView нашла широкое применение в сфере программно-технического обеспечения испытаний авиационной техники, в том числе, на стендах полунатурного моделирования.

Приведенная иерархия основной программы соответствует поэлементному строению математической модели и узловой конструкции двигателя. В главе также приводится программный код основных модулей. Программный код выполнен на современном техническом уровне. Текстовые записи программного кода имеют комментарии. Для каждого расчетного параметра в комментариях отмечены единицы измерения.

**Четвертая глава** посвящена исследованию адекватности поузловой математической модели ТВВД Д-27. Для этого использовались результаты летных испытаний самолета Ан-70, дроссельные и высотно-скоростные экспериментально-расчетные характеристики двигателя Д-27. Результаты исследования выявили качественное соответствие разработанной



математической модели реальному объекту в части статических характеристик, однако, количественная оценка выявила значительные погрешности расчета основных параметров двигателя. Погрешность расчета мощности турбины винтовентилятора во всем диапазоне режимов работы силовой установки составила не более 14 %, расхода топлива – не более 30 %.

Проведенный анализ показал необходимость уточнения математической модели ТВВД в части расчетных значений параметров мощности турбины винтовентилятора и расхода топлива в камеру сгорания.

В пятой главе автором предложена методика корректировки математической модели ТВВД Д-27 в части параметров мощности турбины винтовентилятора и расхода топлива в камеру сгорания. Расчетное значение расхода топлива в камеру сгорания корректируется при помощи коэффициента, зависимость которого от внешних условий является практически линейной. Расчетное значение мощности турбины винтовентилятора корректируется путем использования двухмерной характеристики коэффициента идентификации, зависящего от суммарной степени повышения давления воздуха в компрессорах и внешних условий. В указанной главе также приводится программный код модулей идентификации в среде LabView.

В шестой главе описывается идентификация поузловой математической модели ТВВД Д-27 с учетом произведенных корректировок. Рассматривается идентификация статических и динамических характеристик модели во всем диапазоне условий работы, представлены графики сравнения результатов работы модели с параметрами реального двигателя. Погрешность расчета мощности турбины винтовентилятора на основных режимах работы не превышает 1%, за исключением режима «0,8МПа» (на высоте 0 м и скорости полета 0 км/ч), где погрешность составляет 1,3 %. Погрешность расчета расхода топлива не превышает разность расходов топлива у опытных двигателей, работающих на одинаковых режимах. Динамическая погрешность модели не превышает 15 % по величине углового ускорения роторов двигателя. Обозначенные погрешности являются приемлемыми для достоверного моделирования динамической системы ВВ - двигатель и проведения полунатурных испытаний САУ ВВ.

В седьмой главе проведено исследование возможности применения методов нечеткой логики в поузловой математической модели ТВВД. Автором рассмотрено применение генетического алгоритма для нахождения совместной точки работы компрессоров и турбин, предложены методы его исполнения. Представлен программный код модулей реализации генетического алгоритма в среде LabView.

Из результатов исследования видно, что, несмотря на широкий спектр возможных конфигураций генетического алгоритма, последний не может быть использован для решения поставленной задачи – при нахождении



совместной точки работы узлов двигателя он уступает по производительности методу дихотомии.

**Восьмая глава** посвящена апробации поузловой математической модели ТВВД на стендах полунатурного моделирования для испытаний САУ ВВ. Представлены результаты проведения функциональных испытаний соосного винтовентилятора СВ-27, результаты эквивалентно-циклических испытаний гидромеханического регулятора СВ-27, а также результаты испытания САУ ВВ АВ112. Отмечена сходимость результатов полунатурных испытаний с результатами стендовых испытаний на реальном двигателе. Обозначены перспективы и практическая ценность полунатурных испытаний САУ ВВ.

**В заключении** диссертационной работы автор приводит полученные результаты.

**В приложениях** к диссертации приводятся характеристики узлов ТВВД, результаты сравнения параметров работы математической модели ТВВД с материалами летных испытаний, дроссельными и высотно-скоростными экспериментально-расчетными характеристиками ТВВД. Материалы представлены в табличном и графическом видах.

По теме диссертации автором опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, 1 из которых опубликована в журнале, индексируемом в Scopus. Основные положения и результаты диссертации представлены на 8 международных и всероссийских научно-технических конференциях. Всего по теме диссертации опубликовано 11 работ.

### **Рекомендации по использованию диссертации**

Результаты диссертационной работы могут иметь практическую ценность для предприятий-разработчиков турбовинтовых и турбовентиляторных силовых установок, а также их САУ (АО «ОДК», АО «ОДК – Авиадвигатель», ПАО «НПП «Аэросила», АО «ОДК – Климов», ПАО «Кузнецов», «АО «УНПП «Молния», АО «ОДК – СТАР»).

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В представленной работе недостаточно внимания уделено обзору существующих зарубежных стендов полунатурного моделирования ведущих предприятий-разработчиков турбовинтовых силовых установок, что затруднило оценку мировой новизны.
2. В работе следовало бы большее внимание уделить описанию применяемой расчетной схемы математических моделей воздушного винта и двигателя, подробнее описать взаимодействие этих моделей.



В целом можно сказать, что указанные замечания не снижают ценность диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

В качестве рекомендации и для дальнейшего развития работы автору необходимо исследовать вопрос синхронного (связного) управления двигателем и воздушным винтом с целью улучшения динамических характеристик силовой установки по параметру развиваемой тяги.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа посвящена полунатурным исследованиям САУ ВВ турбовинтовентиляторных двигателей и соответствует специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертация Иванова А.В. является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача создания технологии достоверного проведения полунатурных испытаний САУ воздушных винтов, в том числе, соосных винтовентиляторов, имеющая значение для развития авиационного двигателестроения. Диссертация изложена технически грамотным языком, логически структурирована по главам. Публикации и автореферат в полном объеме отражают содержание и основные результаты выполненной работы.

Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор, Иванов Артем Викторович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертационная работа Иванова А.В. и данный отзыв рассмотрены и одобрены отделом расчетно-экспериментальных работ и проектирования САУ, протокол заседания № 2105-19-01 от 15.01.2018 г.

Начальник отделения САУ, к.т.н

И.Г. Лисовин

Начальник отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования САУ, к.т.н.

А.И. Полулях

Сведения о ведущей организации:

Акционерное общество «ОДК – Авиадвигатель», 614990, г. Пермь, ГСП, Комсомольский проспект, 93; тел.: +7 (342) 240-92-67; e-mail: [office@avid.ru](mailto:office@avid.ru); адрес официального сайта в сети «Интернет»: [www.avid.ru](http://www.avid.ru)