

УДК 621.452.33

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТВВД ПРИ ИСПЫТАНИЯХ СООСНОГО ВИНТОВЕНТИЛЯТОРА СОВМЕСТНО С САУ НА СТЕНДЕ ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. В. Иванов¹, А. М. Данилихин², В. В. Баранов², **В. И. Хилько**

¹temkaw@mail.ru, ²vint@aerosila.ru

ОАО «НПП «Аэросила»

Поступила в редакцию 22.08.2016

Аннотация. На основании полученного опыта в разработке воздушных винтов, соосных винтовентиляторов и гидромеханических регуляторов предложен подход к математическому моделированию турбовинтовентиляторного двигателя при испытаниях соосных воздушных винтов совместно с системами автоматического управления на стенде полунатурного моделирования. Предлагаемый подход к моделированию позволяет с достаточной точностью воспроизводить переходные процессы силовой установки на стенде полунатурного моделирования во всем диапазоне ожидаемых условий эксплуатации.

Ключевые слова: моделирование ТВВД, стенд полунатурного моделирования, испытания винтовентиляторов, испытания САУ

ВВЕДЕНИЕ

Создание и доводка современных воздушных винтов (ВВ), соосных винтовентиляторов (СВВ) и их САУ немислимы без стендов полунатурного моделирования (СПМ). Идея полунатурного моделирования заключается в подмене одного или нескольких натуральных объектов, участвующих в испытаниях, на их модель 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 имитаций, рисками и недопустимостью по причине опасности.

Современный СПМ обеспечивает проведение различных видов испытаний: обкатка гидромеханических регуляторов (регуляторов), приемосдаточные и предъявительские испытания ВВ (СВВ) и регуляторов, эквивалентно-циклические испытания регуляторов, износные испытания ВВ (СВВ), а также различного рода исследовательские испытания ВВ (СВВ) и их САУ. Огромный интерес представляют исследовательские испытания, позволяющие получить ответ на интересую-

щие разработчиков вопросы: запас устойчивости САУ ВВ (СВВ) во всем диапазоне режимов работы, поведение САУ ВВ (СВВ) в отказных ситуациях, отработка алгоритмов управления САУ ВВ (СВВ), построение статических и динамических характеристик ВВ (СВВ) и регуляторов, выявление скрытых дефектов в изделиях, а также отработка алгоритмов и средств полетной диагностики.

Облик современного СПМ для проведения испытаний ВВ (СВВ) совместно с САУ. Современный СПМ позволяет проводить испытания в автоматическом режиме по заранее заданному алгоритму. Высокая степень автоматизации и постоянно возрастающие требования превращают СПМ в сложную многосвязную систему, состоящую из следующих основных частей (рис. 1):

1 Следящий электропривод с механической трансмиссией. Привод маслонасоса регулятора. Является электромеханическим имитатором выходного звена редуктора газотурбинного двигателя (двигателя).

2 Имитатор электронной системы управления (ЭСУ) двигателем и ВВ. Необходим при проведении испытаний на основном канале управления.

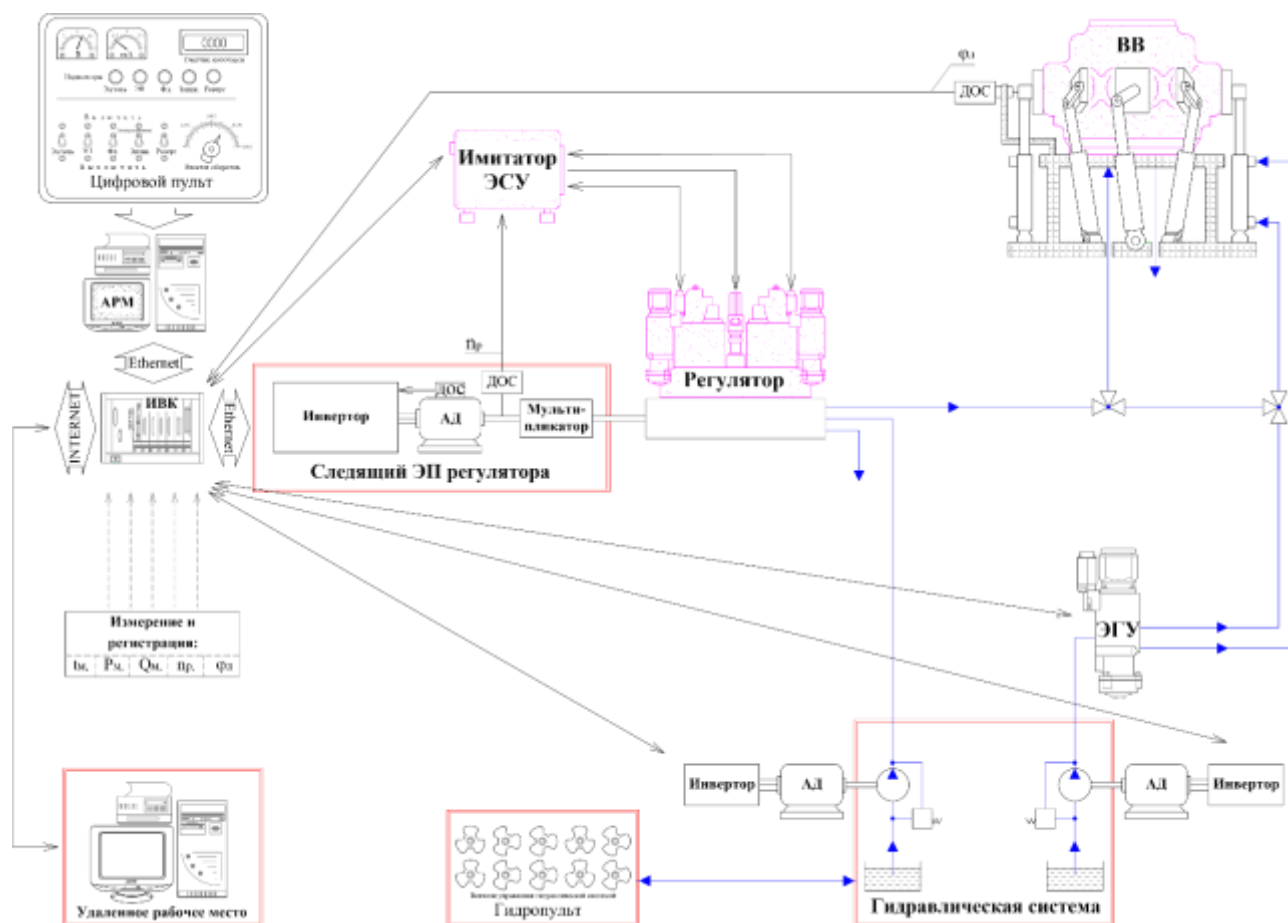


Рис. 1. Структура современного стенда полунатурного моделирования для проведения испытаний ВВ совместно с САУ

3 Система имитации полетной нагрузки.

Воспроизводит крутящие моменты от лопастей, действующие на механизм изменения шага ВВ.

4 Гидромеханическая система. Обеспечивает работу объекта испытаний (ОИ) и структурно представлена следующими элементами:

- входная масломагистраль регулятора с маслонасосом, регулируемым по частоте вращения, для воспроизведения реальных расходов и давлений рабочей жидкости на входе в маслонасос регулятора из двигателя;

- система воспроизведения перетоков по кольцам редуктора двигателя и гидравлических сопротивлений по каналам редуктора двигателя на участке от регулятора до ВВ;

- система обеспечения заданной температуры рабочей жидкости, влияющей на величину утечек в гидравлической системе и параметры управления ВВ;

- система отвода и возврата в маслобаки рабочей жидкости.

5 Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК). Обеспечивает взаимодействие всех систем стенда и управление ОИ, реализован на базе оборудования National Instruments,

позволяющего решать широкий спектр задач. Структуру ИВК формируют:

- математические модели (двигателя, топливорегулирующей аппаратуры (ТРА), ЭСУ, регулятора, ВВ);

- измерительная система (параметры давлений, расходов, температур, частот вращения, угловых и линейных положений, уровней и дискретных величин);

- система управления (аналоговое управление электроприводами и сервоклапанами, а также дискретное управление электродвигателями, электромагнитами и реле);

- система контроля и защиты (мониторинг технического состояния ОИ, защита стендового оборудования и ОИ от непреднамеренных действий, нештатных или аварийных ситуаций, минимизация человеческого фактора);

- система регистрации (высокочастотная и низкочастотная регистрация измеряемых, управляющих и моделируемых параметров, а также логирование хода эксперимента и построение линии тренда исследуемого параметра);

- система сетевого взаимодействия (удаленная передача данных, в том числе на рабочее

место конструктора, и межсетевое взаимодействие с цифровыми системами стенда).

6 Автоматизированное рабочее место оператора. Обеспечивает мониторинг за ходом испытаний и ОИ посредством сетевого взаимодействия с ИВК и позволяет:

- визуализировать параметры работы стендовых систем и состояния ОИ в режиме реального времени;

- управлять объектом и оборудованием в режиме реального времени;

- конфигурировать оборудование стенда;

- реализовать функции цифрового пульта управления;

- вести постобработку зарегистрированных данных (параметрические графики, спектральный анализ, интегрирование, дифференцирование и др.).

Рассмотренный СПМ предназначен для испытаний ВВ совместно с САУ. Структура СПМ для испытаний СВВ одноступенчатая: увеличивается количество ОИ (передний ВВ, задний ВВ) с соответствующим увеличением количества гидравлических связей.

Современный СПМ для испытаний СВВ СВ-27 и регуляторов РСВ-27 позволяет проводить отдельные и совместные испытания СВВ и регулятора. В случае испытаний изолированного регулятора на СПМ задействуется имитатор СВВ, при этом в ИВК используется поэлементная ММ СВВ, состоящая из гидравлической и аэродинамической частей. В случае испытаний изолированного СВВ на СПМ задействуется имитатор РСВ, как ММ эталонного регулятора, состоящая из моделей: маслососа, редукционного капана, электрогидравлического преобразователя, гидромеханического регулятора и командных золотников. Стенд также позволяет проводить полностью модельные испытания (без натурности), в этом случае в ИВК активируются все заложенные ММ. Независимо от степени натурности часть ММ постоянно задействованы в испытаниях (САУ, аэродинамических характеристик СВВ [1], гидравлических сопротивлений каналов управления, ТРА и двигателя).

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Достоверность испытаний, проводимых на СПМ, напрямую зависит от соответствия заложенных математических моделей (ММ) реальным объектам, а также от способности исполнительных механизмов воспроизвести параметры ММ.

ММ двигателя представляет особый интерес, т.к. двигатель является объектом регулирования по частоте вращения и создает требуемую мощность для ВВ (СВВ), обеспечивающего необходимую тягу. Таким образом, при проведении испытаний СВВ совместно с САУ турбовинтовентиляторный двигатель (ТВВД) является основным объектом моделирования. Поэтому для достижения максимальной достоверности проводимых испытаний на СПМ необходимо обеспечить воспроизведение статических и динамических характеристик реального ТВВД во всех ожидаемых условиях эксплуатации.

Проблема моделирования двигателя на нестационарных режимах работы (разгон и торможение, встречная приемистость и др.), подробно рассмотрена в [2–5]. Применение линейных методов моделирования ТВВД (кусочно-линейная динамическая модель и др.) при проведении испытаний СВВ совместно с САУ на СПМ приводит к большим погрешностям воспроизведения нестационарных режимов работы с большими сигналами управления. В связи с этим возникает необходимость в разработке нелинейной ММ ТВВД.

ПОЭЛЕМЕНТНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ММ ТВВД Д-27

С целью повышения качества испытаний СВВ СВ-27 и регуляторов РСВ-27 на СПМ путем увеличения точности воспроизведения динамических характеристик двигателя была разработана нелинейная поэлементная математическая модель (НПММ) ТВВД Д-27 (рис. 2), которую можно условно разделить на две части: термодинамическая модель газогенератора (ГГ) и динамическая модель роторов.

Термодинамическая модель ГГ состоит из семи основных элементов в основе которых лежат экспериментально-расчетные характеристики соответствующих узлов двигателя: компрессора низкого давления, компрессора высокого давления, камеры сгорания, турбины высокого давления, турбины низкого давления, турбины винтовентилятора, выходного устройства. В основе расчета лежат фундаментальные законы сохранения энергии и массы газового потока. В термодинамической модели ГГ происходит расчет температур и давлений вдоль проточной части двигателя.

Динамическая модель состоит из трех основных элементов, описывающих динамику роторов высокого, низкого давлений и дифференциального редуктора Д-27. В основе расчета лежит второй закон Ньютона для вращатель-

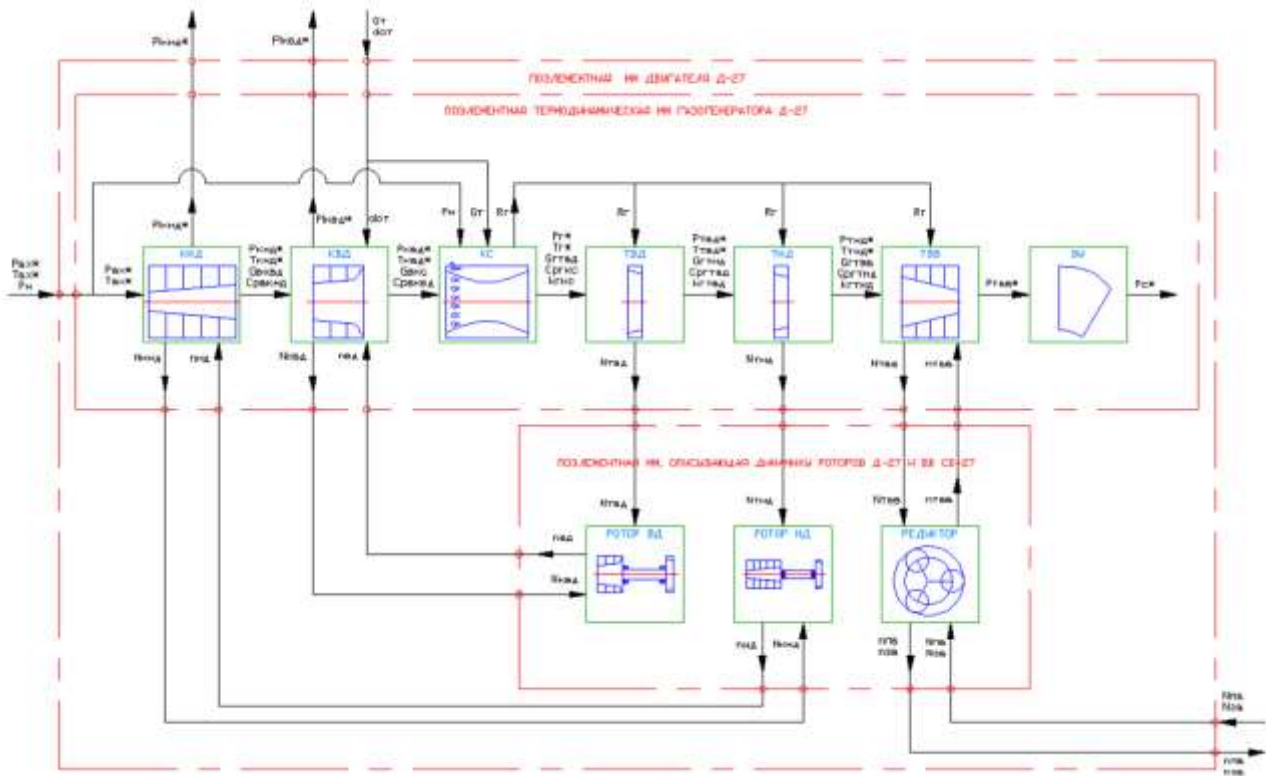


Рис. 2. Структурная схема НПММ ТВВД Д-27

ного движения из которого следует, что необходимое равновесие между компрессорами и турбинами ГТ, а также между СВВ и турбиной винтовентилятора достигается при условии баланса мощностей.

Для применения на СПМ 311ПР ОАО «НПП «Аэросила» указанная НПММ ТВВД Д-27 была реализована в среде LabView (рис. 3). НПММ построена по модульному принципу и позволяет рассчитать температуры и давления в сечениях между основными элементами двигателя,

способна качественно описывать переходные процессы в широком диапазоне режимов работы компрессоров и турбин, моделировать работу двигателя на различных высотах и скоростях полета.

По результатам летных испытаний, а также расчетно-экспериментальным характеристикам Д-27 НПММ прошла идентификацию во всем ожидаемом диапазоне условий эксплуатации.

Положительный эффект моделирования ТВВД Д-27 подтвержден высокой сходимостью

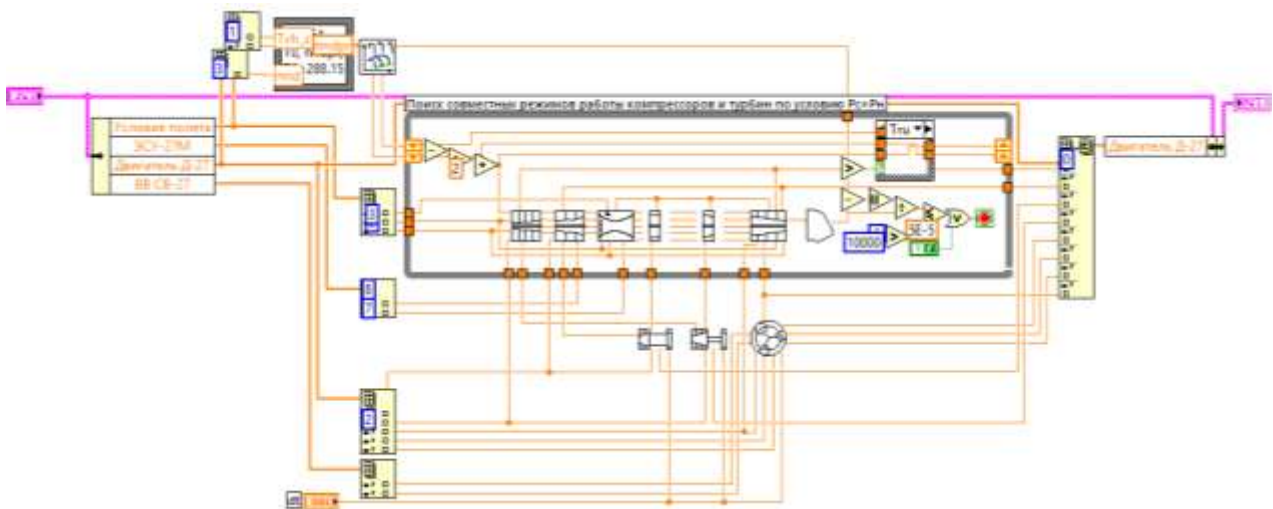


Рис. 3. Программный код LabView НПММ Д-27 на СПМ 311ПР ОАО «НПП «Аэросила»

переходных процессов, полученных на СПМ, с переходными процессами реальной силовой установки.

Модульный принцип построения НПММ двигателя делает ее универсальной: путем корректировки характеристик основных узлов двигателя, произвольной компоновки схемы двигателя из имеющихся модулей могут быть построены НПММ других двигателей для испытания на СПМ разрабатываемых ВВ совместно с САУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный и описанный (на примере двигателя Д-27) подход к математическому моделированию ТВВД при испытаниях СВВ совместно с САУ на СПМ позволяет воспроизводить переходные процессы силовой установки во всем диапазоне ожидаемых условий эксплуатации, что позволяет определить запас устойчивости САУ, отработать законы и алгоритмы управления, смоделировать поведение САУ в отказных ситуациях. Универсальность модели ТВВД (модульное представление) позволяет путем корректировки компоновочной схемы и характеристик основных узлов двигателя создавать ММ двигателей для испытания различных ВВ, СВВ и их САУ на СПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Кривошеев И. А.** Методика представления и использования многомерной характеристики винтовентилятора при автоматизированном проектировании ГТД и его САУ / И. А. Кривошеев, Г. И. Погорелов, В. С. Фатиков, А. Г. Годованюк // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13. № 1 (34). С. 3–8. [I. A. Krivosheev, G. I. Pogorelov, V. S. Phatikov, A. G. Godovanyuk, «Methodology of presentation and use of multi-dimensional characteristics propfan with aided design GTE and ACS», (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 13, no. 1 (34), pp. 3-8, 2009.]

2 **Гуревич О. С.** Системы автоматического управления авиационными ГТД: Энциклопедический справочник / Под ред. д.т.н., проф. О. С. Гуревича. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. С. 153–160. [O.S. Gurevich, Automatic control systems for aircraft GTE: Encyclopedic Reference, (in Russian). Moscow: TORUS PRESS, 2011. pp. 153-160.]

3 **Ахмедзянов Д. А.** Совместная работа авиационных газотурбинных двигателей и топливной автоматики на режимах разгона и торможения / Д. А. Ахмедзянов, И. А. Кривошеев, Р. А. Сунарчин. // Вестник СГАУ. 2006. № 1. С. 24–25. [D. A. Akhmedzyanov, I. A. Krivosheev, R. A. Sunarchin, «The joint work aviation gas turbine engines and fuel system at the acceleration and deceleration modes», (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 1, pp. 24-25, 2006.]

4 **Ахмедзянов Д. А.** Методология имитационного моделирования неустойчивых режимов работы авиационных ГТД / Д. А. Ахмедзянов, Е. С. Власова, А. Е. Кишалов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2006. № 2 (10). С. 41–44. [D. A. Akhmedzyanov,

E. S. Vlasova, A. E. Kishalov, «Methodology of modeling unsteady works modes of aircraft gas turbine engines», (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 2 (10), pp. 41-44, 2006.]

5 **Ахмедзянов Д. А.** Неустойчивые режимы работы авиационных ГТД / Д. А. Ахмедзянов // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7. № 1 (14). С. 36–46. [D. A. Akhmedzyanov, «Unsteady works modes aircraft GTE», (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 7, no. 1 (14), pp. 36-46, 2006.]

ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Артем Викторович, ведущий по САУ вспомогательных газотурбинных двигателей и САУ воздушных винтов ОАО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки» (МАТИ, 2011), аспирант МАИ по спец. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

ДАНИЛИХИН Алексей Михайлович, нач. бригады моделирования и диагностики гидравлических систем конструкторского отдела САУ ОАО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Автоматизированные системы обработки информации и управления» (МГАПИ, 1999).

БАРАНОВ Виктор Васильевич, нач. расчетно-конструкторского отдела ОАО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Энергетические машины и установки» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1971). Канд. техн. наук (ЦИАМ, 1981).

ХИЛЬКО Виталий Иванович, ведущий конструктор ОАО «НПП «Аэросила». Дипл. инж. по спец. «Динамика и прочность машин» (ХАИ, 1961). Канд. техн. наук (ЦИАМ, 1971).

METADATA

Title: Mathematical modeling of the turbopropfan engine when tested coaxial propfan with automatic control system on stand seminatural modeling.

Authors: A. V. Ivanov, A. M. Danilikhin, V.V. Baranov, V.I. Khilko.

Affiliation: Open Joint Stock Company «Scientific Production Enterprise «Aerosila» (JSC «SPE «Aerosila»), Russia.

Email: vint@aerosila.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 3 (73), pp. 89-94, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: On the basis of the experience gained in the development of propellers, coaxial propfans and hydro-mechanical control system propose an approach to mathematical modeling turbopropfan engine when tested coaxial propfan with automatic control system on stand seminatural modeling. The proposed approach to modeling can adequately reproduce the transients of the propulsion plant on the stand seminatural modeling over the entire range of expected operating conditions.

Key words: mathematics model turbopropfan engine, stand seminatural modeling, propfans tests, ACS tests.

About authors:

IVANOV, Artyom Viktorovich, Leading authority on ACS GTE and ACS propellers JSC «SPE «Aerosila». Dipl. engineer, specialty «Aircraft engines and power plants» (MATI, 2011). Postgraduate MAI, specialty "Heat, electrorocket engines and power plants of aircraft".

DANILIKHIN, Aleksey Mikhailovich, Head brigade of hydraulic systems modeling and diagnostics, design department ACS JSC «SPE «Aerosila». Dipl. engineer, specialty «Automated systems processing and control of information» (MGAPI, 1999).

BARANOV, Viktor Vasilevich, Head settlement and design department JSC «SPE «Aerosila». Dipl. engineer, specialty «Energy machines and plants» (MGTU Bauman, 1971). Cand. of Tech. Sci. (CIAM, 1981).

KHILKO, Vitaliy Ivanovich, Leading authority department of ACS JSC «SPE «Aerosila». Dipl. engineer, specialty «Dynamics and strength of machines» (KHAI, 1961). Cand. of Tech. Sci. (CIAM, 1971).