

Научная статья

УДК 621.431.75

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179113>

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАРТЕРА ГЕНЕРАТОРА НА БАЗЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ АСТРА-9

Андрей Юрьевич Ткаченко¹, Владислав Сергеевич Пелевин² ✉, Артем Алексеевич Алексенцев³,
Евгений Павлович Филинов⁴

^{1, 2, 3, 4} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
(Самарский университет),
Самара, Россия

¹ tau@ssau.ru

² Pelevin_01@list.ru ✉

³ artem2000samara@gmail.com

⁴ filinov@ssau.ru

Аннотация. Проведение испытаний газотурбинных установок является неотъемлемой частью производства и доводки современных авиационных двигателей, а также процесса подготовки высококвалифицированных кадров. В работе идет речь о модернизации виртуальной лаборатории по испытаниям на базе САЕ-системы АСТРА и подборе оптимальной пусковой мощности стартера для малоразмерного газотурбинного двигателя с учетом предъявляемых требований. Использование современных компьютерных технологий открыло возможности к проведению испытаний на неустановившихся режимах, моделированию поведения двигателя в экстремальных и нестандартных условиях. Модернизированная версия программы позволит снизить временные и финансовые затраты на подготовку и проведение натурных испытаний двигателей, а также проводить исследования двигателя на переходных режимах для подбора оптимальных значений. Модернизированный программный пакет включает в себя характеристики узлов двигателя малой размерности, что позволяет более точно настраивать модели для исследования их рабочего процесса.

Ключевые слова: моделирование имитационное, модель математическая, двигатель газотурбинный, двигатель прототип, термодинамический расчет, процесс переходный, испытания виртуальные, стартер, пусковая мощность

Финансирование: работа выполнена по проекту FSSS-2022-0019, реализуемого в рамках федерального проекта «Развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок», результат «Созданы новые лаборатории, в том числе под руководством молодых перспективных исследователей»

Для цитирования: Ткаченко А.Ю., Пелевин В.С., Алексенцев А.А., Филинов Е.П. Концептуальное проектирование стартера генератора на базе виртуальной среды АСТРА-9 // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 114–122. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179113>

Original article

CONCEPTUAL DESIGNING OF GENERATOR STARTER BASED ON THE ASTRA-9 VIRTUAL MEDIUM

Andrei Y. Tkachenko¹, Vladislav S. Pelevin²✉, Artem A. Aleksentsev³, Evgenii P. Filinov⁴^{1, 2, 3, 4} Samara National Research University,

Samara, Russia

¹ tau@ssau.ru² Pelevin_01@list.ru ✉³ artem2000samara@gmail.com⁴ filinov@ssau.ru

Abstract

The article deals with starting power determining of the starter with regard to the requirements placed on the starting time. The existing version of the ASTRA software was modernized for simulation modeling performing in accordance with modern tendencies [1, 2] for the said task realization.

The work process real-time modeling imposes high requirements on the parameters computing speed and solution searching of the system of equations of the subassemblies joint operation. Thus, computational efficiency improvement of all algorithms was performed. Sampling frequency increase of the process being modeled and numerical solution error of the system of differential equations decrease were achieved as the result [3].

The generator starter required characteristics determining is an important task in the engine design optimization. Computations on the starter generator required power were performed within the framework of the project on a 22 kgf small-sized gas turbine engine development. A series of the working fluid parameters computations at the engine starting for the starting power values of $N = 50\text{--}300$ W was conducted for the power determining.

The limited starting time, namely no more than 40 seconds for various TH values, is one of the requirements to the engine being developed. Computation was performed and rotor speed n time dependencies were obtained for the given starter power.

The results of the work on these tools development and their implementation based on the ASTRA conceptual design software found application in the course of scientific research on the of advanced gas turbine power plants development. Particularly, the starting power of the starter was selected with regard to the starting time and operating process parameters requirements at different outdoor temperatures, while a small-sized gas turbine engine with a thrust of 22 kgf designing.

Keywords: simulation modeling, mathematical model, gas turbine engine, engine prototype, thermodynamic computation, transient response, virtual tests, starter, starting power

Funding: the work was accomplished under the FSSS-2022-0019 Project, being realized within the framework of “Human Capital Development in the Interests of Regions, Industries and the Research and Development Sector” Federal Project, as the result “New laboratories were set up, including those led by the young prospective researches”.

For citation: Tkachenko A.Yu., Pelevin V.S., Aleksentsev A.A., Filinov E.P. Conceptual Designing of Generator Starter Based on the ASTRA-9 Virtual Medium. *Aerospace MAI Journal*, 2024, vol. 31, no. 1, pp. 114-122. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=179113>

Введение

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) представляют собой сложные и высокотехнологичные технические системы, которые предъявляют высокие требования к подготовке специалистов как в сфере проектирования и производства, так и в сфере эксплуатации и управления. Опыт проектирования и эксплуатации новых авиационных силовых установок показал, что улучшение технических данных перспективных и серийно выпускаемых двигателей невозможно без большого числа экспериментальных исследований [1]. Основной проблемой является сложность оборудования испытательных стендов, высокая стоимость опытных образцов двигателей и последующие затраты на эксплуатацию установки [2]. В связи с этим для оптимизации процесса испытаний, увеличения объема и точности получаемой информации, а также для приближения испытаний к реальным условиям эксплуатации и возможности исследования динамики переходных процессов требуется внедрение современных методов и средств автоматизированных испытаний (рис. 1).

Перспективы развития виртуальных испытательных стендов

По сравнению с традиционными подходами к проведению экспериментальных исследований внедрение имитационных стендов позволяет значительно ускорить и упростить подготовку к натурным испытаниям, оптимизировать программу испытаний двигателей и оценить риски возникновения нештатных ситуаций.

Повышение требований к точности и сложности моделей, применяемых в процессе проектирования

технических систем, обуславливает необходимость совершенствования подходов к реализации средств моделирования и поиска решений инженерных и научных задач. В настоящее время в области математического моделирования рабочего процесса газотурбинных двигателей доминируют довольно архаичные подходы, не учитывающие особенности компьютерной реализации и возможности современных информационных технологий [3, 4].

Основной тенденцией является повышение эффективности, расширение возможностей и области применения средств компьютерного моделирования рабочего процесса газотурбинных силовых установок за счет использования современных информационных технологий, повышения быстродействия алгоритмов численного моделирования и реализации универсальных принципов формирования расчетной модели [5–7].

Взаимодействие с моделью

Реализация инструментов моделирования процесса работы газотурбинного двигателя и интерактивного управления им в реальном времени является одной из особенностей среды концептуального проектирования АСТРА [8, 9]. Данная функциональная возможность, осуществляемая подсистемой имитации процессов на основе численных методов решения систем дифференциальных уравнений, позволяет выполнять виртуальные испытания, не прибегая к использованию сторонних программ. Впервые данная особенность была реализована в 5-й версии среды АСТРА [10], а уже в АСТРА-9 эта и другие возможности виртуальной лаборатории (рис. 2) получили существенное развитие.

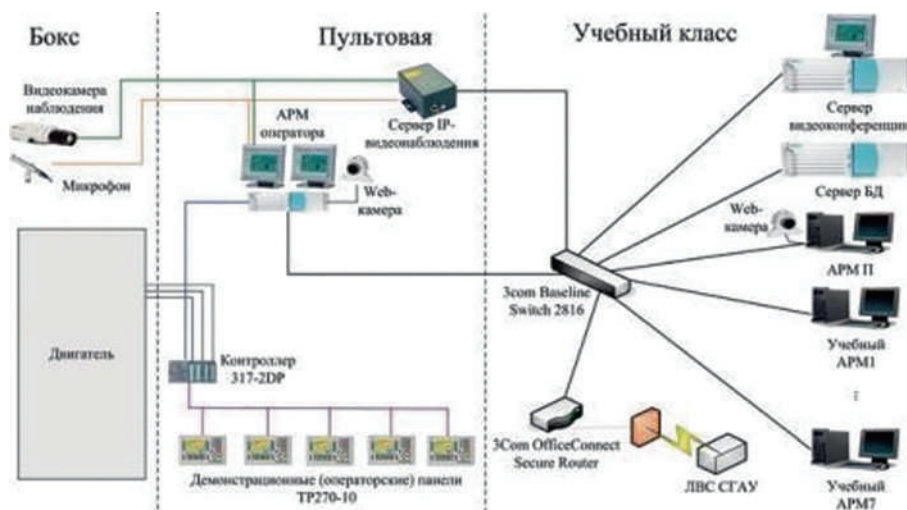


Рис. 1. Структура измерительно-вычислительного комплекса физических стендов

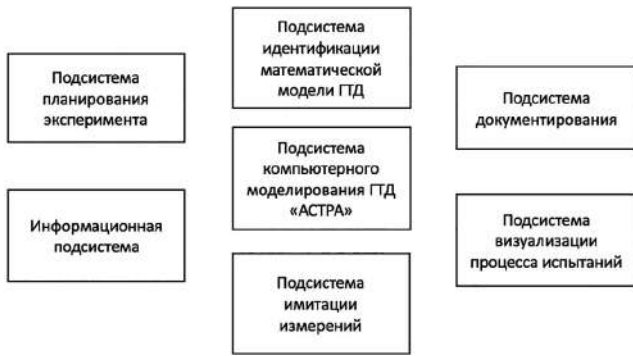


Рис. 2. Структура виртуальной лаборатории

Опыт реализации в среде концептуального проектирования АСТРА имитационных моделей и виртуальных испытательных стендов (рис. 3) показал, что возможность взаимодействия с моделью в ходе вычислений и получения новых данных в реальном времени открывает совершенно новые возможности и в корне меняет сам процесс анализа исследуемого объекта и выработки решений. Благодаря доработанному модулю планирования эксперимента, при построении виртуального стенда в него можно заложить модель двигателя различной конфигурации (рис. 4) и непосредственно в ходе расчета менять их, мгновенно получая результат (рис. 5). Более гибкая настройка модели позволяет не просто подбирать параметры режима работы двигателя, но и имитировать заданные пользователем сценарии испытаний.

Совершенствование расчетного модуля

Моделирование рабочего процесса в реальном времени накладывает высокие требования по скорости расчета параметров двигателя и поиску решения системы уравнений совместной работы узлов. Поэтому в ходе работ по развитию среды АСТРА существенные усилия направлены не только на развитие математической модели до второго уровня [11, 12], но и на повышение вычислительной эффективности всех алгоритмов: численных методов решения системы нелинейных уравнений, расчета термодинамических процессов и свойств рабочего тела [13]. За счет этого достигается повышение частоты дискретизации моделируемого процесса и снижение погрешности численного решения системы дифференциальных уравнений. На тестовых задачах моделирования неустановившихся режимов работы двигателей различных схем частота дискретизации процесса достигает $10^3 \dots 10^4$ Гц.

Способ реализации расчетных модулей, формирующих компьютерную модель, существенно влияет на структуру системы уравнений, описывающей исследуемый объект. Развитие среды АСТРА

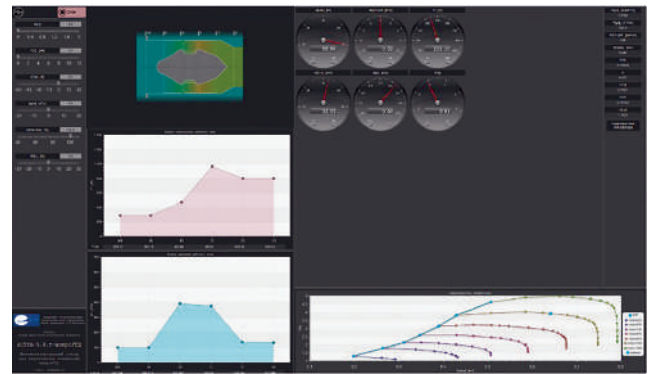


Рис. 3. Виртуальная лаборатория испытаний микроГТД «АСТРА-5»

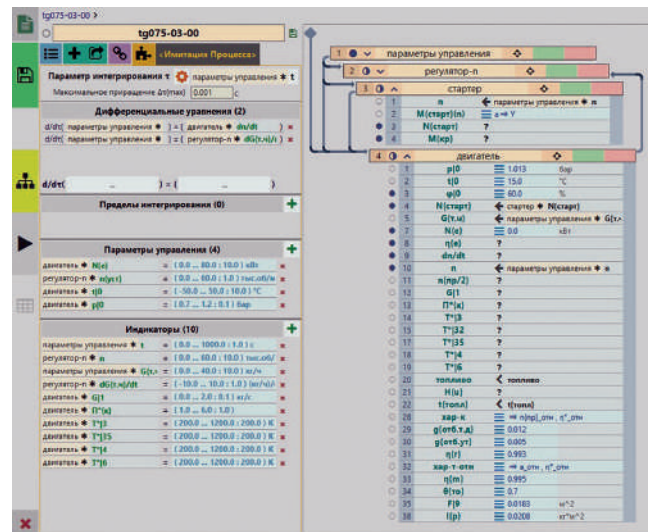


Рис. 4. Панель задания входных параметров и компонентов испытываемого двигателя



Рис. 5. Элементы управления и индикаторы параметров ГТД «АСТРА-9»

в направлении повышения эффективности и устойчивости расчетной схемы привело к созданию универсальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя, базирующейся на следующих принципах [14, 15]:

- параметры, определяющие режим работы

узла двигателя или режим течения рабочего тела, должны являться входными параметрами модуля;

- критерии эффективности термодинамических и газодинамических процессов должны являться входными параметрами для модуля, в котором происходит расчет характеристик данного процесса;
- расчет критериев эффективности в зависимости от параметров режима или других параметров должен выделяться в отдельный модуль;
- в модуле реализуется алгоритм расчета только одного элементарного процесса (сжатия, расширения, подвода теплоты, отбора или подвода воздуха и т. п.).

Следование данным принципам позволяет создавать модули с алгоритмами, не зависящими от типа решаемой задачи и ее постановки. Взаимодействие таких модулей в составе модели двигателя описывается системой уравнений, которая обладает устойчивой и контролируемой сходимостью при численном поиске решения. Что, в свою очередь, значительно упростило моделирование существенно нерасчетных режимов: запуска, авторотации, резкого переключения органов управления, останова и т. п.

Решение задач расчета эксплуатационных характеристик (дроссельных, скоростных, климатических и высотных), исследование динамики переходных процессов, выбор рациональных законов управления двигателем – основные задачи виртуальных испытательных стендов [16], однако реализация экстремальных условий, в которых трудно проводить реальные тесты, а также моделирование повреждений двигателя, которые могут

произойти во время фактического испытания двигателя в таких условиях, является важной отличительной особенностью виртуальных лабораторий нового поколения [17, 18].

Обработка результатов

Немаловажную роль при использовании виртуальных стендов играет удобство и эстетичность пользовательского интерфейса, а также гибкость настройки панели управления и контроля параметров. В среде АСТРА-9 подсистема визуализации и документирования процесса испытаний подверглись кардинальной переработке: использована современная программная библиотека для визуализации индикаторов значений параметров, возможны различные варианты отображения значений (в виде шкалы, диаграммы, значения, графика). По завершению расчетов пользователь получает подробный отчет о изменении параметров и поведении двигателя во время проводимого испытания, на основе которого можно скорректировать параметры силовой установки до оптимальных [19] (рис. 6).

Пример моделирования процесса запуска малоразмерного ГТД приведен на рис. 7.

Определение характеристик стартера генератора для малоразмерного газотурбинного двигателя

Определение потребных характеристик стартера генератора является важной задачей оптимизации конструкции двигателя. Основными задачами является подбор мощности электродвигателя, влияющей на параметры рабочего процесса во время запуска. Запуск двигателя характеризуется тем, что

пар-усл	единица	1	2	3	4
t	! с	0,0	0,566	1,141	1,562
n	! об/мин	500,0	5338,271	9926,636	13174,077
G(т.ч)	! кг/ч	0,0	0,0	0,0	0,0
M(кр)	! -	20,0	20,0	20,0	19,252895
N(стартер)	! кВт	1,0	11,2	20,8	26,6
показатели					
p	! кПа	0,0	0,003	0,007	0,012
P(уд)	! кВт*с/кг	0,0022	0,0211	0,0352	0,0444
S(уд)	! кг/(кВт*ч)	0,0	0,0	0,0	0,0
атм					
p	! кПа	101,3	101,3	101,3	101,3
T	! К	288,2	288,2	288,2	288,2
φ	! %	60,0	60,0	60,0	60,0
11					
p* 1	! кПа	101,3	101,3	101,3	101,3
T* 1	! К	288,2	288,2	288,2	288,2
G 1	! кг/с	0,014	0,1296	0,213	0,2673
G mp 1 1	! кг/с	0,014	0,1296	0,2131	0,2674
12					
G 2	! кг/с	0,014	0,1296	0,213	0,2673
p* 2	! кПа	101,3	101,264	101,204	101,149
T* 2	! К	288,2	288,2	288,2	288,2
к					
n	! об/мин	500,0	5338,271	9926,636	13174,077
n(npr/2)	! об/мин	500,0	5338,262	9926,628	13174,077
G(npr/2)	! кг/с	0,014	0,1296	0,2133	0,2678
Π*(к)	! -	1,004	1,0533	1,1103	1,1531
η*(к)	! -	0,3159	0,4332	0,5625	0,6533
L(к)	! кВт/кг	1,1	10,0	15,7	19,5
N(к)	! кВт	0,0	1,3	3,3	4,9
13					
G 3	! кг/с	0,014	0,1296	0,213	0,2673
p* 3	! кПа	101,706	106,659	112,369	116,639
T* 3	! К	289,2	296,1	303,7	306,4
отборы					
G(отб.с.д)	! -	0,02	0,02	0,02	0,02
G(отб.с.д)	! кг/с	0,0003	0,0026	0,0043	0,0052
G(отб.усл)	! -	0,0	0,0	0,0	0,0
G(отб.усл)	! кг/с	0,0	0,0	0,0	0,0
131					
G 31	! кг/с	0,0137	0,127	0,2088	0,262
p* 31	! кПа	101,706	106,659	112,369	116,639
T* 31	! К	289,2	296,1	303,7	306,4

Рис. 6. Отчет о проведенном испытании

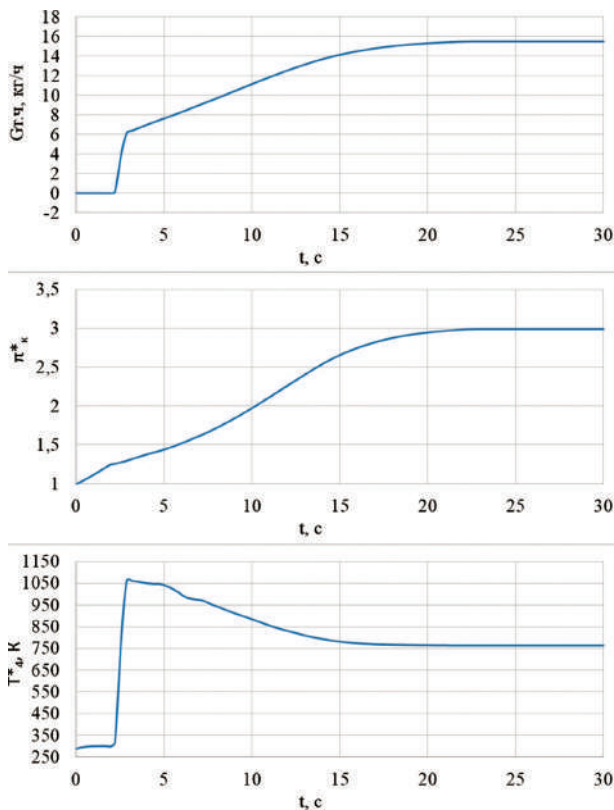


Рис. 7. Пример моделирования процесса запуска малоразмерного ГТД

параметры двигателя меняются с течением времени. Данный виртуальный стенд позволяет получить решение нестационарных задач по определению параметров рабочего тела в сечениях проточной части двигателя.

Определение характеристик стартера генератора для малоразмерного газотурбинного двигателя

Определение потребных характеристик стартера генератора является важной задачей оптимизации конструкции двигателя. Основными задачами является подбор мощности электродвигателя, влияющей на параметры рабочего процесса во время запуска. Запуск двигателя характеризуется тем, что параметры двигателя меняются с течением времени. Данный виртуальный стенд позволяет получить решение нестационарных задач по определению параметров рабочего тела в сечениях проточной части двигателя.

В рамках проекта по разработке малоразмерного газотурбинного двигателя тягой 22 кгс в Самарском университете были проведены расчеты по подбору потребной мощности стартера генератора для удовлетворения ограничениям по забросу температуры газа перед турбиной. На этапе проектирования для деталей турбины были выбраны жаропрочные материалы, обеспечивающие длительную работоспо-

собность при ограничении температуры газа перед турбиной, $T_r^* = 1250$ К. Для определения потребной мощности стартера в нестационарной постановке была проведена серия расчетов параметров рабочего тела при запуске двигателя для значений пусковой мощности $N = 50 \dots 300$ Вт. В результате были получены зависимости T_r^* от времени запуска для различных значений пусковой мощности N (рис. 8).

Из рисунка видно, что меньшим значениям мощности стартера соответствует больший заброс температуры газа перед турбиной T_r^* по значению и по длительности, что негативно влияет на прочность и ресурс деталей. Помимо заброса температуры, запуск двигателя характеризуется неравномерным полем температур на входе в турбину, что может привести к локальным прогарам элементов соплового аппарата и рабочего колеса. Последнее может привести к дисбалансу ротора и вибрациям, что ведет к преждевременному выходу из строя деталей опор двигателя, в частности подшипников. Из рис. 8 видно, что при мощности $N = 200$ Вт значение T_r^* удовлетворяет ограничениям в условиях стандартной атмосферы.

Виртуальный испытательный стенд позволяет моделировать различные атмосферные условия. Для выбранного значения мощности стартера были проведены расчеты T_r^* при пусковой мощности стартера $N = 200$ Вт в зависимости от времени для различных значений температуры воздуха $T_H = -30 \dots +30^\circ\text{C}$, что соответствует эксплуатационному диапазону проектируемого двигателя (рис. 9).

При значениях T_H выше $+15^\circ\text{C}$ происходит заброс температуры, превышающий введенное ограничение. Таким образом, необходимо увеличить мощность стартера. Для дальнейших расчетов была увеличена мощность до значений $N = 250$ Вт. Результаты расчетов представлены на рис. 10.

Одним из требований к проектируемому двигателю является время запуска не более 40 секунд для различных значений T_H . Для данной мощности

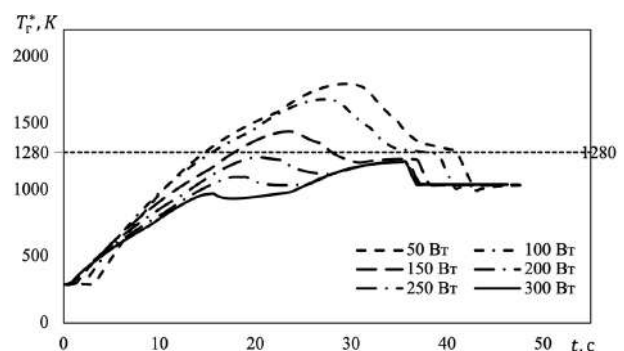


Рис. 8. Зависимость температуры газа перед турбиной T_r^* от времени запуска для различных значений пусковой мощности N

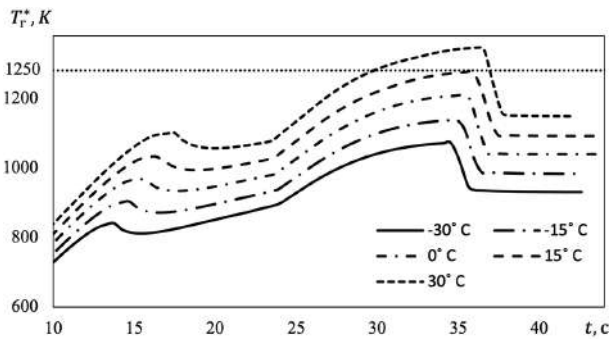


Рис. 9. Зависимость температуры газа перед турбиной T_g^* от времени запуска при пусковой мощности стартера $N = 200$ Вт для различных значений температуры наружного воздуха T_H

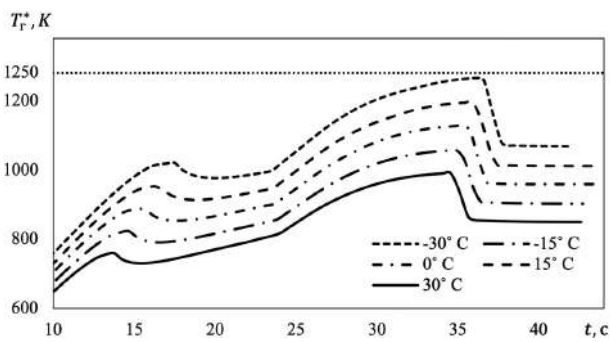


Рис. 10. Зависимость температуры газа перед турбиной T_g^* от времени запуска при пусковой мощности стартера $N = 250$ Вт для различных значений температуры наружного воздуха T_H

стартера был проведен расчет и получены зависимости оборотов ротора n от времени. Для проектируемого двигателя обороты малого газа были выбраны на уровне 35 тыс. об/мин. Из результатов расчета (рис. 11) видно, что данное требование выполняется во всем диапазоне температур.

Выводы

Совершенствование подходов к подготовке и проведению натурных испытаний с целью сокращения трудоемкости и снижения затрат требует разработки и внедрения автоматизированных средств виртуальных испытаний, обладающих возможностями визуализации протекания переходных процессов и наглядного представления результатов анализа закономерностей совместной работы узлов двигателя.

Результаты работы по развитию данных средств и реализации их на базе среды концептуального проектирования АСТРА нашли применение в ходе выполнения научных исследований по разработке перспективных газотурбинных силовых установок, в частности при проектировании малоразмерного

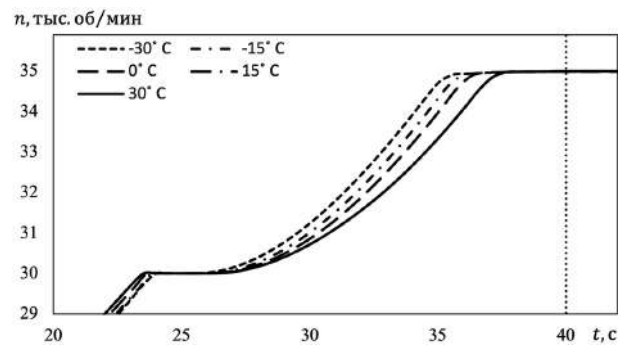


Рис. 11. Зависимость оборотов ротора n от времени при пусковой мощности стартера $N = 250$ Вт для различных значений температуры наружного воздуха T_H

газотурбинного двигателя тягой 22 кгс была подобрана пусковая мощность стартера с учетом предъявляемых требований ко времени запуска и параметров рабочего процесса при различных значениях температуры наружного воздуха.

Гибкость модели в свою очередь позволит моделировать рабочий процесс газотурбинных двигателей для различных сценариев использования для выбора оптимальных параметров беспилотного летательного аппарата в зависимости от его предназначения и полетного цикла [20].

Список источников

1. Черкез А.Я., Онищик И.И., Таран Е.М. Испытания воздушно-реактивных двигателей: Учебник. – М.: Машиностроение, 1992. – 304 с.
2. Федотов М.М., Зиненков Ю.В., Кретинин А.В. и др. Разработка экспериментального стенда для изучения характеристик ступени осевой турбины // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26. № 2(96). С. 93–104. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629693
3. Григорьев В.А., Морозов И.И., Анискин В.Т. Стенды, стендовое оборудование, датчики и средства измерений при испытаниях ВРД: Учебное пособие. – Самара: Изд-во СГАУ, 2006. – 63 с.
4. Claus R., Townsend S. A Review of High-Fidelity Gas Turbine Engine Simulations // 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS; 19-24 September 2010; Nice, France).
5. Abourida S. Hardware-In-The-Loop Testing of Aeronautic Systems with State-of-the-Art Real-Time Technologies // 26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS; 14 - 19 September 2008; Anchorage, Alaska, USA).
6. Bouzid Y. Opal-RT Real-Time Simulators // 6th International Conference on Real-time Simulation Technologies (25-27 June 2013; Paris, France).

7. McKay B. Real-Time Testing with Simulink and xPC Target Turnkey. – The MathWorks, Inc. 2010.
8. Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Крупенич И. Н. и др. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ системе «АСТРА» // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41518>
9. Ткаченко А.Ю., Крупенич И.Н. Разработка виртуального прототипа ГТД в САЕ-системе АСТРА на этапе концептуального термогазодинамического проектирования // Вестник СГАУ. 2012. Т. 34. № 3–2(34). С. 333–342.
10. Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н., Крупенич И.Н. и др. Автоматизированная система для виртуальных испытаний газотурбинных двигателей // Вестник СГАУ. 2014. № 5–3(47). С.113–119.
11. Титов А.В., Осипов Б.М. Классификация математических моделей ГТД по уровню сложности // Инновационная наука. 2016. Т. 2. № 11. С. 70–72.
12. Кулагин В.В. (ред.) Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок: Учебник в 3 кн. Кн. 3. Основные проблемы. Начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 2005. – 464 с.
13. Агульник А.Б., Гнесин Е.М., Картовицкий Л.Л., Мозжорина Т.Ю. Математическое моделирование газотурбинных двигателей (одномерные модели): Учеб. пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2013. – 104 с.
14. Таран Е.М. Универсальный метод согласования математической модели ГТД с результатами испытаний // Испытания авиационных двигателей: межвузовский научный сборник № 14. – Уфа: Изд-во УАИ, 1986. С. 63–70.
15. Титов А.В., Осипов Б.М. Универсальная математическая модель газотурбинного двигателя // Инновационная наука. 2016. № 11–2. С. 74–75.
16. Денисова Е.В., Черникова М.А. Развитие стендов полунатурного моделирования для исследования систем автоматического управления газотурбинным двигателем // Современные наукоемкие технологии. 2019. Т. 3. № 7. С. 122–131.
17. Kho S., Kong C., Ki J. Virtual turbine engine test bench using MGET test device // International Journal of Turbo and Jet Engines. 2015. Vol. 32. No. 2, pp. 165-173. DOI: 10.1515/tjj-2014-0022
18. Thirunavukarasu E., Fang R., Khan J., Dougal R. Modeling and Simulation of Gas turbine System on a Virtual Test Bed (VTB) // ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (09–15 November 2012; Houston, Texas, USA). Vol. 1, pp. 337-346. DOI: 10.1115/IMECE2012-87919
19. Луковников А.В. Концептуальное проектирование силовых установок летательных аппаратов в многодисциплинарной постановке // Вестник МАИ. 2008. Т. 15. № 3. С. 34–43.
20. Закавсин А.С. «Превратить их в маленькие крылатые ракеты»: эксперты — о значении малоразмерных газотурбинных двигателей для БПЛА. 2023. URL: <https://ru.rt.com/pgy>

References

1. Cherkez A.Ya., Onishchik I.I., Taran E.M. *Ispytaniya vozdušno-reaktivnykh dvigatelei* (Tests of air-jet engines), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 304 p.
2. Fedotov M.M., Zinenkov Yu.V., Kretinin A.V. et al. *Vestnik UGATU*, 2022, vol. 26, no. 2(96), pp. 93–104. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629693
3. Grigor'ev V.A., Morozov I.I., Aniskin V.T. *Stendy, stendovoe oborudovanie, datchiki i sredstva izmerenii pri ispytaniyakh VRD* (Test benches, bench equipment, sensors and measuring instruments during testing of the WFD), Samara, SGAU, 2006, 63 p.
4. Claus R., Townsend S. A Review of High-Fidelity Gas Turbine Engine Simulations. *27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS; 19-24 September 2010; Nice, France)*.
5. Abourida S. Hardware-In-The-Loop Testing of Aeronautic Systems with State-of-the-Art Real-Time Technologies. *26th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS; 14 - 19 September 2008; Anchorage, Alaska, USA)*.
6. Bouzid Y. Opal-RT Real-Time Simulators. *6th International Conference on Real-time Simulation Technologies (25-27 June 2013; Paris, France)*.
7. McKay B. *Real-Time Testing with Simulink and xPC Target Turnkey*. The MathWorks, Inc. 2010.
8. Kuz'michev V.S., Kulagin V.V., Krupenich I.N. et al. *Trudy MAI*, 2013, no. 67. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41518>
9. Tkachenko A.Yu., Krupenich I.N. *Vestnik SGAU*, 2012, vol. 34, no. 3–2(34), pp. 333–342.
10. Tkachenko A.Yu., Rybakov V.N., Krupenich I.N. et al. *Vestnik SGAU*, 2014, no. 5–3(47), pp. 113–119.
11. Titov A.V., Osipov B.M. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, vol. 2, no. 11, pp. 70–72.
12. Kulagin V.V. (ed) *Teoriya, raschet i proektirovanie aviatsionnykh dvigatelei i ehnergeticheskikh ustanovok. V 3 kn. Kn. 3. Osnovnye problemy. Nachal'nyi uroven' proektirovaniya, gazodinamicheskaya dovodka, spetsial'nye kharakteristiki i konversiya aviatsionnykh GTD* (Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants: Textbook. In 3 books. Book 3. The main problems. The initial level of design, gas dynamic refinement, special characteristics and conversion of aviation gas turbine engines). Moscow, Mashinostroenie, 2005, 464 p.
13. Agul'nik A.B., Gnesin E.M., Kartovitskii L.L., Mozhorina T.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie gazoturbinykh dvigatelei. Odnomernye modeli* (Mathematical modeling of

- gas turbine engines. One—dimensional models), Moscow, MAI, 2013, 104 p.
14. Taran E.M. *Ispytaniya aviatsionnykh dvigatelei: mezhvuzovskii nauchnyi sbornik No. 14*. Ufa, UAI, 1986, pp. 63-70.
 15. Titov A.V., Osipov V.M. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 11-2, pp. 74–75.
 16. Denisova E.V., Chernikova M.A. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, vol. 3, no. 7, pp. 122-131.
 17. Kho S., Kong C., Ki J. Virtual turbine engine test bench using MGET test device. *International Journal of Turbo and Jet Engines*, 2015, vol. 32, no. 2, pp. 165-173. DOI: 10.1515/tjj-2014-0022
 18. Thirunavukarasu E., Fang R., Khan J., Dougal R. Modeling and Simulation of Gas turbine System on a Virtual Test Bed (VTB). *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition (09–15 November 2012; Houston, Texas, USA)*. Vol. 1, pp. 337-346. DOI: 10.1115/IMECE2012-87919
 19. Lukovnikov A.V. A conceptual design of aircraft propulsion systems in multidisciplinary statement. *Aerospace MAI Journal*, 2008, vol. 15, no. 3, pp. 34–43.
 20. Zakvasin A.C. “Prevratii’ ikh v malen’kie krylatye rakety”: ehksperty — o znachenii malorazmernykh gazoturbinykh dvigatelei dlya BPLA. 2023. URL: <https://ru.rt.com/pgyk>

Статья поступила в редакцию 18.09.2023; одобрена после рецензирования 26.12.2023; принята к публикации 28.12.2023.

The article was submitted on 18.09.2023; approved after reviewing on 26.12.2023; accepted for publication on 28.12.2023.