

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ПРОЕКТИРОВАНИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ И РОЛЬ ШКОЛЫ ПРОФЕССОРА В.Г. МАСЛОВА В ПРОЦЕССЕ ЕГО РАЗВИТИЯ

© 2021

Н. М. Боргест кандидат технических наук, профессор кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; borgest@yandex.ru

В. А. Григорьев доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; grigva47@gmail.com

В. С. Кузьмичёв доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей летательных аппаратов; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; kuzm@ssau.ru

Статья подготовлена к 95-летию со дня рождения Валентина Григорьевича Маслова, доктора технических наук, профессора, основателя школы оптимального концептуального проектирования авиационных двигателей, руководителя отдела САПР двигателей (Отдел 6) отраслевой научно-исследовательской лаборатории (ОНИЛ-2) Куйбышевского авиационного института имени академика С.П. Королёва. Рассмотрены этапы создания теоретической базы оптимального проектирования для авиационной техники. Показана роль профессора В.Г. Маслова в формализации знаний при проектировании авиационной техники в условиях неопределённости и многокритериальной оценки проектных решений. Работы Отдела 6 ОНИЛ-2 (КуАИ-СГАУ), руководимые Валентином Григорьевичем, обеспечили самарской научной школе лидирующее положение в области оптимального проектирования двигателей для летательных аппаратов разного назначения. Эти работы способствовали формированию современного понимания интеллектуализации систем и успешному началу работ в области их создания. Показано развитие идей профессора В.Г. Маслова не только в работах его учеников, но и успешных аспирантов его учеников.

Профессор Маслов; оптимальное проектирование; системы искусственного интеллекта; онтология проектирования; авиационная техника

Цитирование: Боргест Н.М., Григорьев В.А., Кузьмичёв В.С. Искусственный интеллект в проектировании авиационной техники и роль школы профессора В.Г. Маслова в процессе его развития // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 3. С. 171-190.
DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-171-190

Биографическая справка

Валентин Григорьевич Маслов родился 23 декабря 1926 года в г. Куйбышеве (ныне Самара). В 1943 году поступил, а в 1949 окончил с отличием Куйбышевский авиационный институт (КуАИ) и был направлен на работу в ОКБ Куйбышевского моторного завода, где принимал участие в доводке двигателей НК-4, НК-6, НК-8 и ряда других проектов. Выполняя исследования по совершенствованию рабочего процесса разрабатываемого в начале 50-х годов турбовинтового двигателя НК-12, В.Г. Маслов



предложил оптимальное распределение свободной энергии между винтом и реактивной струёй, при котором достигается максимум тяги.

В 1960 году В.Г. Маслов перешёл на работу в КуАИ на кафедру теории двигателей, одновременно продолжая сотрудничать с ОКБ моторного завода. На основе проведённых теоретических и экспериментальных исследований по смесителю двигателя НК-8 он защитил кандидатскую диссертацию (1966 г.). Разработанное им лепестковое смесительное устройство обеспечивало рациональное смешение холодного воздуха второго контура с горячими газами, выходящими из турбины низкого давления НК-8.

Работа в ОКБ оказала огромное влияние на формирование В.Г. Маслова как инженера и будущего учёного. Этому способствовали высокий уровень немецких специалистов, которые трудились в то время в ОКБ, и возможность перенять опыт немецкой школы создания авиадвигателей. Большую роль при этом играли присущие немцам практичность и педантизм, системность в работе, ведении документации и формулировании задач исследований. Все это, и в первую очередь глубина теоретических проработок при проведении исследований, позволили В.Г. Маслову повысить квалификацию и приобрести навыки ведения научной работы. Положительное влияние на будущего профессора оказали высокая требовательность и личный пример руководителя ОКБ, главного конструктора Н.Д. Кузнецова. В.Г. Маслов любил работать и брался за работу «обеими руками», часто повторяя, что не работа изнашивает человека, человека изнашивают лень и безделье.

К концу 70-х годов В.Г. Масловым была разработана теория выбора рациональных проектных решений для параметров рабочего процесса авиационных газотурбинных двигателей, рассматривающая двигатель как элемент системы «летательный аппарат». Результаты этих исследований легли в основу докторской диссертации (1979 г.) и вышедшей впоследствии монографии [1]. К тому времени В.Г. Маслов организовал отдел САПР–Д, который выполнял работы в интересах учебного процесса и авиационной промышленности. Одним из результатов работы отдела стала САПР малоразмерных ГТД (САПР–МГТД), созданная совместно с ЦИАМ. Учебная версия САПР–МГТД использовалась также в учебном процессе кафедры теории двигателей летательных аппаратов.



Под руководством профессора В.Г. Маслова в рамках работ по автоматизации проектирования двигателей были подготовлены восемь кандидатских диссертаций (В.С. Кузьмичёв, 1980 г.; В.А. Григорьев, 1980 г.; Н.М. Боргест, 1985 г.; А.Н. Коварцев, 1988 г.; В.Б. Ломакин, 1989 г.; А.Б. Иванов, 1990 г.; Ю.М. Сивцов, 1992 г.; М.А. Морозов, 1992 г.) и три докторские диссертации (В.А. Григорьев, 1998 г.; А.Н. Коварцев, 1999 г.; В.С. Кузьмичев, 2000 г.) [2].

В восьмидесятые годы В.Г. Маслов большое внимание уделял совершенствованию учебного процесса с широким использованием ЭВМ, развитию экспериментальной базы кафедры теории двигателей летательных аппаратов (ТДЛА) и лаборатории, разработал новые современные курсы для студентов и инженеров, обучающихся на факультете повышения квалификации. В 1982 году введённый в эксплуатацию под его руководством учебно-исследовательский стенд по испытаниям ТРДД АИ-25 снабжён автоматизированной системой и до настоящего времени не имеет аналогов в отечественной практике высшего образования [3].

Специфичность проблемы выбора авиационного ГТД, связанная с разными сроками создания ГТД и ЛА, отмечена в работе [4]. Закладка проекта двигателя должна опережать закладку соответствующего ЛА на 3-5 лет. При таком подходе к проектированию параметры ГТД приходится выбирать на основе их предварительного согласо-

ния с прогнозными параметрами предполагаемого ЛА. Такое опережение может обеспечить конкурентоспособность ГТД к моменту его реального выбора для ЛА. При таком подходе выбираемые значения параметров двигателя должны быть устойчивыми к возможным погрешностям прогноза исходных данных по ЛА.

Вспоминая Валентина Григорьевича Маслова, мы, его ученики, с чувством огромной благодарности за годы совместной работы не перестаём удивляться его многогранности, широте кругозора, трудолюбию, умению увлечь за собой и добиваться достижения поставленных целей.

Именно теоретические работы Маслова В.Г. в области критериального анализа и математического моделирования проектируемых систем, поиска общих и частных критериев оптимизации, учёта проектной неопределённости, разработки метода отыскания гарантируемой области компромиссов, определения наилучших решений внутри области компромиссов, оценка устойчивости проектных значений параметров и многое другое – всё это предопределило развитие научного направления онтологии проектирования в Самарском университете.

В статье приведены фрагменты совместных работ, а также работ его учеников и учеников его учеников, развивающих идеи профессора В.Г. Маслова.

В декабре 2021 года профессору В.Г. Маслову исполнилось бы 95 лет.

«При автоматизации проектирования самолёта мы использовали методы искусственного интеллекта, не подозревая об этом ...»

О.С. Самойлович, 1988 год

Введение

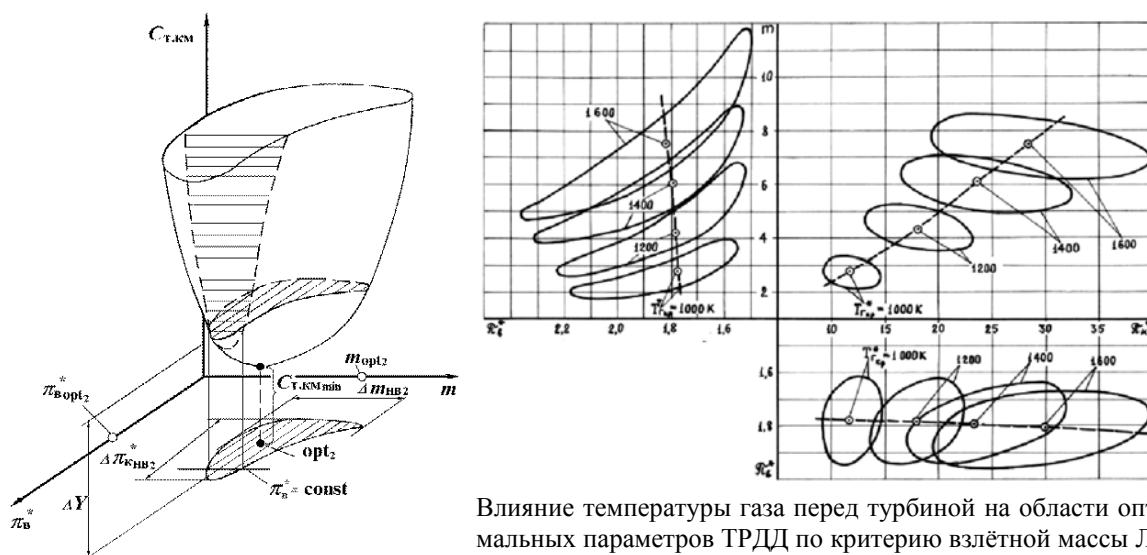
Приведённые в качестве эпиграфа слова главного конструктора ОКБ им. П.О. Сухого, главного конструктора САПР ЛА Минавиапрома СССР, профессора и заведующего кафедрой проектирования самолётов МАИ, доктора технических наук О.С. Самойловича [5; 6] в полной мере соответствуют тем работам, которые велись под руководством проф. В.Г. Маслова [7 – 27] на кафедре теории двигателей летательных аппаратов в КуАИ им. академика С.П. Королёва. Исследуя процесс принятия решений при проектировании, подбирая соответствующие задачам методы, описывая процессы и процедуры, формализуя их, разрабатывая математические и семантические модели в предметной области, проводя критериальный анализ свойств и атрибутов изучаемых сущностей – всё это и многое другое фактически было основой не только разрабатываемых САПР в традиционном понимании, но и создавало предпосылки для создания систем, относящихся к системам с искусственным интеллектом (ИИ). То есть к тем системам, которые были бы способны стать не простым решателем задач с заданными условиями, а интеллектуальными помощниками проектанта, которые учитывают проектную неопределённость и многокритериальность, которые на основе своих баз данных и заложенного проектного опыта способны предложить свои решения проектанту.

Проектирование волшебной «красной кнопки», выполняющей, по словам В.Г. Маслова, в автоматическом режиме ту или иную проектную операцию или процедуру, было мечтой профессора Маслова. Созданный им отдел плодотворно трудился в этом направлении, разрабатывая различные программные системы, автоматизирующие процесс принятия решений, включая в них экспертные компоненты, для задач проектирования сложной авиационной техники. Плеяда его учеников, неформально именуемая себя «школой Маслова», продолжает начатую им работу, развивая направление семантической, содержательной формализации проектной деятельности при создании

авиационной техники, разрабатывая учебно-научные дисциплины, готовя специалистов для науки и промышленности.

Научный базис – теория оптимального выбора

В начале 70-х годов прошлого столетия в СССР было три коллектива (научные школы), которые разрабатывали теоретические основы проектирования авиационных ГТД на начальных этапах с учётом согласования характеристик двигателя и летательного аппарата. Это коллектив отдела 002 Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ) во главе с Ильей Флорентьевичем Флоровым, коллектив кафедры 201 Московского авиационного института во главе с Сергеем Васильевичем Румянцевым и коллектив кафедры теории двигателей летательных аппаратов КуАИ во главе с Валентином Григорьевичем Масловым. В.Г. Маслов первый предложил при проектировании ГТД учитывать неопределённость исходной информации, которая объективно присуща этапу начального проектирования авиационного ГТД, и представлять результаты многокритериальной оптимизации в виде изолиний показателей эффективности в плоскости проектных переменных (рис. 1) [1; 7 – 12].



Влияние температуры газа перед турбиной на области оптимальных параметров ТРДД по критерию взлётной массы ЛА: $M = 0,8$; $H = 11$ км; $L = 3300$ км [1]

Рис. 1. Визуализация областей оптимальных параметров ГТД

В своей докторской диссертации и последующей монографии [1] профессор Маслов представил теорию выбора рациональных параметров авиационных ГТД. Наряду с математическим моделированием рабочего процесса двигателя, параметры которого рассматривались в качестве проектных переменных, и массы силовой установки, регрессионно зависящей от этих же параметров [13 – 15], главной особенностью его теории был системный подход оценки двигателя. То есть двигатель и его параметры рассматривались как элемент, как часть, как подсистема, входящая в систему «летательный аппарат» (самолёт, вертолёт, БПЛА...). Критериями оценки такой системы были уже не показатели двигателя (расход топлива, масса двигателя и его геометрия), а интегральные показатели всей системы – системы «самолёт» (взлётная масса, дальность полёта, себестоимость перевозок [7; 15 – 17]). Особое внимание уделялось в оценке двигателя стремлению к учёту всех этапов жизненного цикла (ЖЦ) системы. Важнейшим в теории, разработанной профессором Масловым, был учёт всей проектной неопределённости, включая многокритериальность любой проектной задачи [10 – 12; 16; 17].

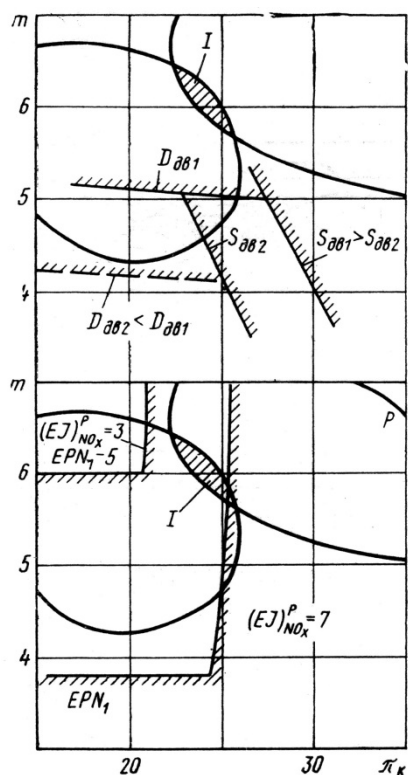


Рис. 2. Наложение ограничений (по стоимости двигателя S , его габаритам D , шуму EPN и эмиссии NO_x) на области компромиссов (I) при выборе параметров ТРДД (степени двухконтурности и степени повышения давления в компрессоре) [1]

В период энергетического кризиса 70-х годов XX века В.Г. Масловым и его учениками был предложен ряд критериев, которые позволяют разрабатывать меры по экономии энергии с учётом всех этапов жизненного цикла ЛА. Снижение расхода топлива в авиации достигается, например, путём усложнения конструкций, применением новейших энергоёмких материалов и сплавов. При этом затраты энергии на стадии создания ЛА и СУ непрерывно возрастают. Очевидно, что энергетически эффективными будут те изделия, которые обеспечивают минимальные суммарные затраты энергии на их создание и эксплуатацию. В качестве критериев оценки энергопотребления ГТД в системе ЛА был предложен критерий энергетической эффективности, который показывает, какая доля энергии, затраченной на создание и эксплуатацию ЛА, превращается в полезную работу. Исследование того периода показали, что доминирующее влияние затрат энергии расходуется на эксплуатацию [16].

Основной результат теории проектного выбора – это определение устойчивой к неопределённости области компромиссов проектных параметров. Сужение области решений с учётом проектных ограничений позволяет формализовать процесс поиска решения (рис. 2) [1], что в перспективе даёт возможность расширить спектр проектных процедур и операций, которые могут быть автоматизированы, что приближает разрабатываемые системы к системам с ИИ [5;19;20].

Применение методов искусственного интеллекта на этапах концептуального проектирования авиационных ГТД

Анализ задач проектирования ГТД показывает, что среди них существуют такие, которые могут быть решены на основе математического моделирования, и такие, для решения которых требуется применение методов и средств ИИ, в частности, «инженерии знаний» для привлечения неформализуемых (или трудноформализуемых) эвристических знаний в рассматриваемой предметной области. Эти задачи, являющиеся по своей сути экспертными, можно подразделить на три класса:

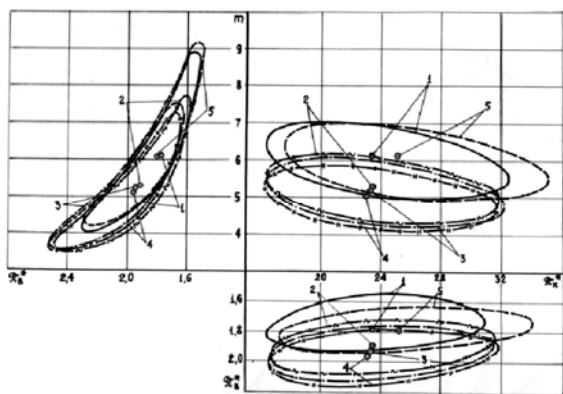
1. *Прогнозирование* нормативов технического уровня ГТД с учётом неопределённости исходной проектной информации и достаточно длительного срока создания двигателя.
2. *Синтез и принятие решений* при непосредственном проектировании двигателя и его элементов на всех стадиях этого процесса.
3. *Экспертиза* этапов проектирования и качества проекта двигателя в целом (оценка научно-технического уровня проекта, обоснованности и рациональности принятия проектных решений и т.п.).

Необходимость одновременного применения и формализованных и эвристических инженерных знаний в САПР ГТД обусловлена сложностью и многообразием информационно-связей в процессе проектирования, невозможностью учёта многих

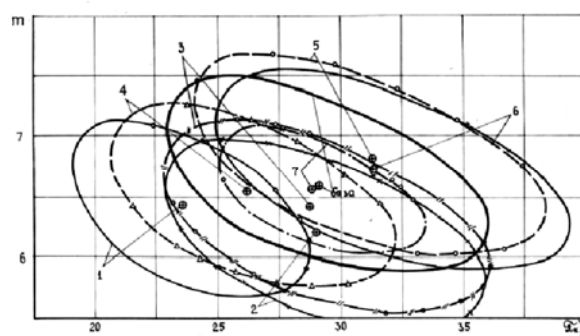
свойств проектируемых двигателей в виде количественных показателей, объективно существующей неопределённостью задач проектирования ГТД. Проектирование такой сложной технической системы, как современный ГТД, является по своей природе творческим процессом и качество проекта во многом зависит от квалификации проектировщиков и опыта их работы с системами проектирования. Использование методов и средств инженерии знаний позволяет систематизировать опыт наиболее квалифицированных специалистов, учитывать более широкий спектр свойств ГТД, оцениваемых в процессе проектирования.

Основное назначение интеллектуальных компонент САПР, реализующих аппарат инженерных знаний, состоит в создании для пользователя дополнительного источника информации в виде рекомендаций и пояснений, являющихся основой для принятия решений о выборе наиболее эффективного алгоритма решения проектной задачи или интерактивного действия в конкретной проектной ситуации. На рис. 3 представлены некоторые результаты решения задач оптимизации в условиях неопределённости исходной проектной информации [8; 9; 15].

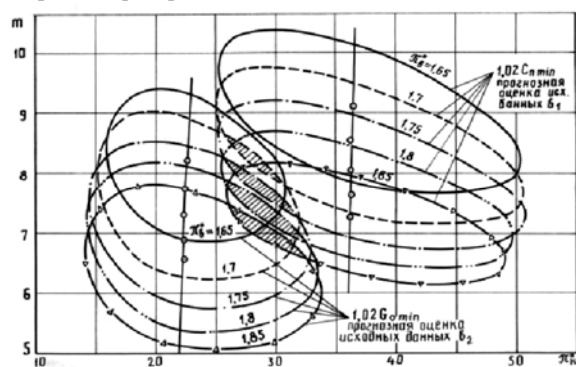
Одним из примеров использования методов ИИ является разработанный в конце 90-х годов экспертный метод распознавания вероятного облика рабочего процесса авиационного ГТД при нехватке опубликованной информации, суть которого изложена ниже [18; 21].



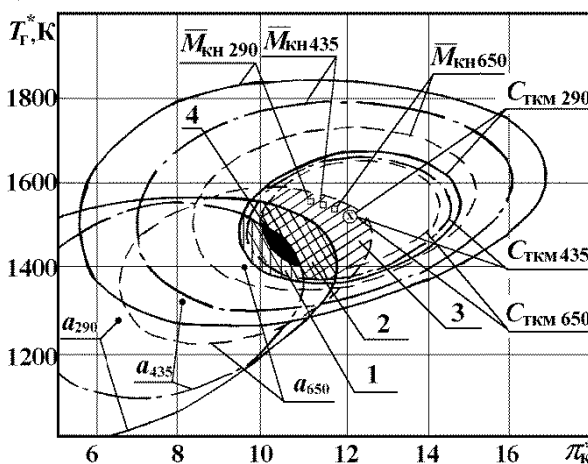
Влияние неопределённости данных по потерям в тракте охлаждения ГТД на области его оптимальных параметров по критерию взлётной массы самолёта



Влияние неопределённости исходных проектных данных, характеризующих термодинамическое совершенство ГТД, на области его оптимальных параметров по критерию энергопотребления самолёта за весь жизненный цикл



Определение области устойчивых оптимальных значений параметров рабочего процесса ГТД по критериям взлётной массы и топливной эффективности самолёта в условиях неопределённости исходных проектных данных (заштрихованная область – устойчивая область решений)



Определение области устойчивых оптимальных значений параметров рабочего процесса ГТД со свободной турбиной для вертолётa

Рис. 3. Примеры решения задач многокритериальной оптимизации в условиях неопределённости исходной проектной информации

Одной из важных задач при проектировании ГТД является анализ тенденций совершенствования узлов ГТД, внедрений в них новейших достижений научно-технического прогресса, развития параметров и конструктивных схем двигателей-конкурентов, проектируемых другими фирмами. Результаты такого анализа являются основой отбора исходной проектной информации, оценки рациональности выбранной концепции проекта и научно-технического уровня (НТУ) разрабатываемого проекта ГТД в целом, развития перспективных направлений необходимого научно-технического задела. Анализ предполагает наличие достаточно полной информации о большинстве двигателей – аналогов данного проекта. Однако фирмы-производители ГТД публикуют информацию о двигателях в весьма ограниченном (в основном рекламном) объёме. В лучшем случае эта информация содержит основные технические данные и некоторые параметры рабочего цикла двигателя на одном из режимов, в отдельных случаях даются отрывочные сведения для других режимов, краткое описание конструктивных особенностей ГТД. Иногда описывается история создания двигателя, его связь с другими двигателями фирмы, даются отрывочные сведения о коэффициентах совершенства отдельных узлов (чаще в относительном виде, в сопоставлении с предшествовавшими модификациями ГТД).

Успешное решение данной проблемы было достигнуто путём применения современных средств информационного обеспечения САПР (банков данных и знаний) в совокупности со специальными методами восстановления недостающей информации по ГТД-аналогам [21 – 24]. При этом распознавание облика рабочего процесса ГТД сводилось к отысканию наиболее вероятной совокупности значений параметров, характеризующих рабочий процесс, достоверных с точки зрения всей количественной и вербальной информации, имеющейся о двигателе и отвечающей закономерностям протекания характеристик ГТД данного типа на заданных режимах. Глубина задачи распознавания облика рабочего процесса ГТД определялась уровнем применяемых при этом математических моделей двигателя, а также глубиной и широтой используемых знаний в рассматриваемой области. В этом случае вся информация, используемая при решении рассматриваемой задачи, разделялась на количественные данные и знания. Такое деление в известной степени условно, однако оно позволило выделить две принципиально разные группы методов, применение которых необходимо для решения задачи: формализованные методы, основанные на математических моделях и предназначенные для обработки данных, и экспертные методы, основанные на логико-лингвистических моделях и предназначенные для обработки знаний. Для представления знаний использовалась продукционная модель (правила-продукции) (рис. 4).

Объединение формализованных в виде математических моделей и эвристических, неформализованных знаний, представляющих собой логико-лингвистические модели, достигается в рамках гибридной САПР. Гибридная САПР ГТД включает в себя все компоненты традиционной САПР и дополнительно имеет средства интеллектуальной поддержки проектных решений (интеллектуальную компоненту).

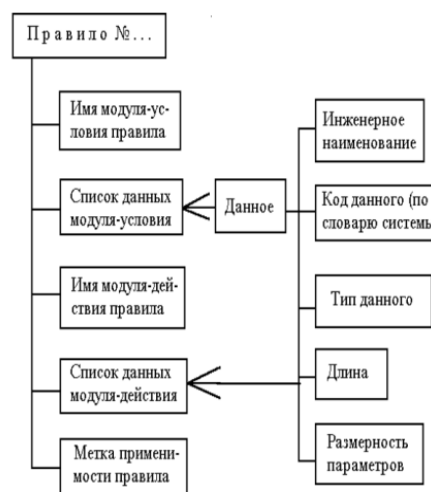


Рис. 4. Структура правила-продукции

Укрупненная структурная схема одного из вариантов гибридной САПР авиационных ГТД, созданной на базе концепции «гибкой САПР» [25], представлена на рис. 5.

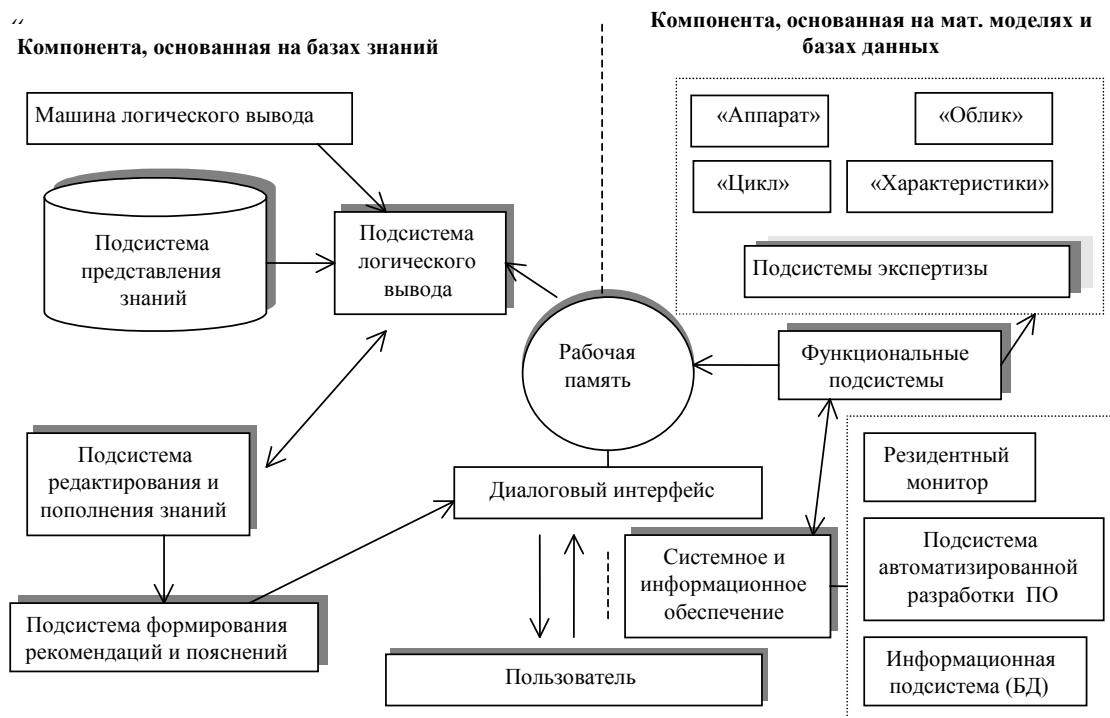


Рис. 5. Структурная схема гибридной экспертной САПР ГТД

В основу создания экспертной САПР положены работы [26 – 31].

В конце 80-х, начале 90-х годов под руководством В.Г. Маслова была разработана по заказу ЦИАМ система автоматизированного проектирования малоразмерных ГТД (МГТД), которая включала компоненты ИИ [25]. Для создания программного обеспечения был разработан специальный макроязык [26].

Одной из наиболее сложных подсистем этой САПР была подсистема проектирования турбокомпрессора МГТД. Это обусловлено тем, что МГТД характеризуются большим разнообразием конструктивно-схемных решений, а число оптимизируемых проектных переменных от 40 до 60.

Задача выбора рациональной схемы турбокомпрессора и его конструктивно-геометрических параметров рассматривалась как задача структурно-параметрической оптимизации, поскольку кроме параметрической оптимизации конструктивно-геометрических параметров необходимо оптимизировать и конструктивную схему турбокомпрессора (число валов, тип компрессора, турбины, число ступеней компрессора и турбины и т.д.), которая задаётся дискретными схемными признаками. Метод решения задачи основывался на применении методов условной оптимизации, используя минимаксный принцип оптимальности. Процесс перебора схем реализован в виде диалогового режима, когда конструктор сам выбирает и компоует варианты схем из матрицы возможных конструктивно-схемных решений, а также автоматического режима при решении оптимизационных задач, когда перебор возможных схем с учётом введённых правил осуществляется без участия проектировщика на основе созданной для этого базы знаний (рис. 6) [32].

Для экспертизы проекта и оценки научно-технического уровня проекта двигателя разработана экспертная система RANG [22; 24].

Огромная роль принадлежит В.Г. Маслову в реализации в КуАИ программы целевой интенсивной подготовки специалистов. В этой работе проявился в полной мере талант В.Г. Маслова как учёного, педагога, незаурядного методиста и новатора. Были созданы новые специализации, внедрены в учебный процесс новые учебные дисциплины, такие как «Системы автоматизированного проектирования», «Банки данных», «Системный анализ» и др. Под руководством В.Г. Маслова созданы комплект методических пособий и указаний, учебно-исследовательская САПР ГТД [33] (рис. 7).

Развитие идей В.Г. Маслова нашло отражение в работах его учеников уже в нескольких поколениях. Создана современная САЕ-система «АСТРА» [34 – 36]. Разработаны методы и средства оптимизации параметров семейства ГТД, создаваемых на базе единого унифицированного газогенератора [37 – 40]. Получили развитие методы и средства оптимизации параметров и схем малогабаритных ГТД для самолётов, крылатых ракет, вертолётов [41].

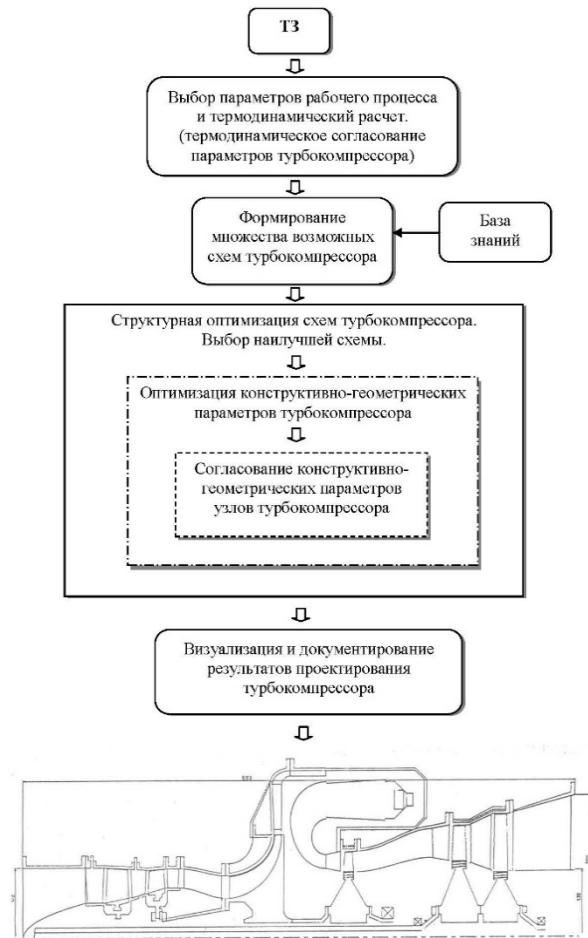


Рис. 6. Укрупнённый алгоритм проектирования турбокомпрессора ГТД

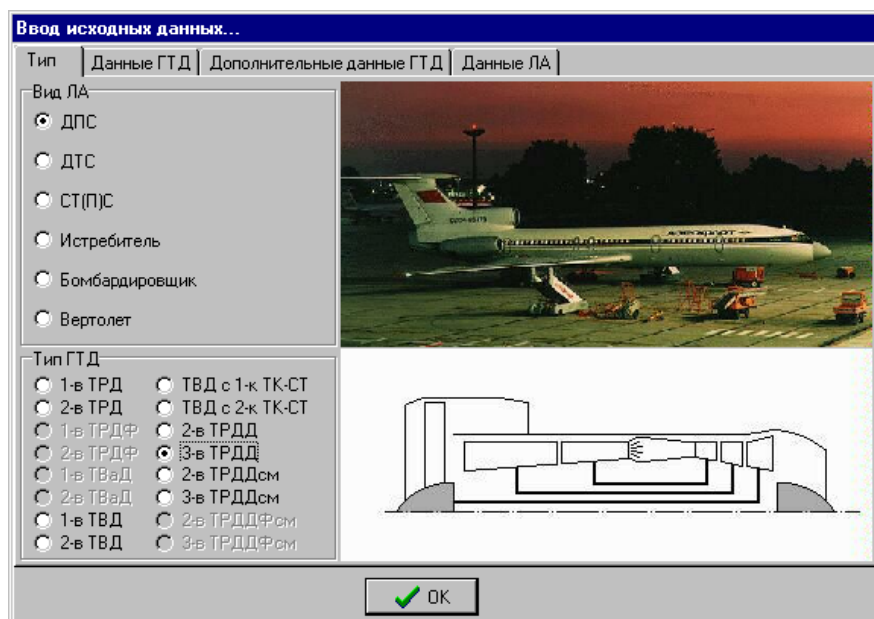


Рис. 7. Учебно-исследовательская САПР ГТД

В последние годы научные исследования велись в области оптимизации параметров и схем ГТД с регенерацией тепла и на основе многоуровневых многодисциплинарных моделей [42].

Робот-проектант

Развитие автоматизации проектирования двигателей и теории оптимального выбора проектных решений получило в работах ученика В.Г. Маслова профессора кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Н.М. Боргеста, который с конца 80-х годов занимается вопросами интеллектуализации предварительного проектирования самолёта [5; 19; 20; 43 – 47]. В то время в работах по созданию САПР активно рассматривались вопросы включения экспертных компонент, формализующих опыт и неформальные знания моделируемой деятельности [19; 20]. В дальнейшем на основе появившихся новых инструментов моделирования, создания тезаурусов предметной области и 3D-моделей [43 – 45] был создан робот-проектант [46; 47]. На рис. 8 показан фрагмент тезауруса, созданного в Protégé на языке OWL и описывающего фрагмент предметной области «самолёт» [43].



Рис. 8. Установление иерархической родовидовой связи между терминами [43]

На рис. 9 приведены примеры компоновок пассажирского салона в разработанной 3D-модели самолёта. Создание параметризованных моделей частей самолёта (его агрегатов), интегрированных в одну модель самолёта, позволяет автоматически перестраивать одновременно и внешние формы и внутреннюю компоновку ЛА [45].

На рис. 10 показан общий вид многоэкранного интерфейса робота-проектанта самолёта, демонстрирующий возможности отслеживания процесса проектирования различных элементов самолёта, проведения необходимых расчётов и контроля за принятием решений на каждом шаге [46].

На рис. 11 показан внешний вид демонстрационного образца робота-проектанта самолёта с экраном touch screen [47]. Это развитие предыдущего пилотного образца робота, в котором реализован интерфейс с пошаговым мониторингом процесса проектирования самолёта. Реализованный прототип робота-проектанта стал ближе к мечте В.Г. Маслова, когда все рутинные пересчёты и перестроения происходят в созданных моделях проектных процедур и операций автоматически, оставляя лишь решение творческих задач за проектировщиком.

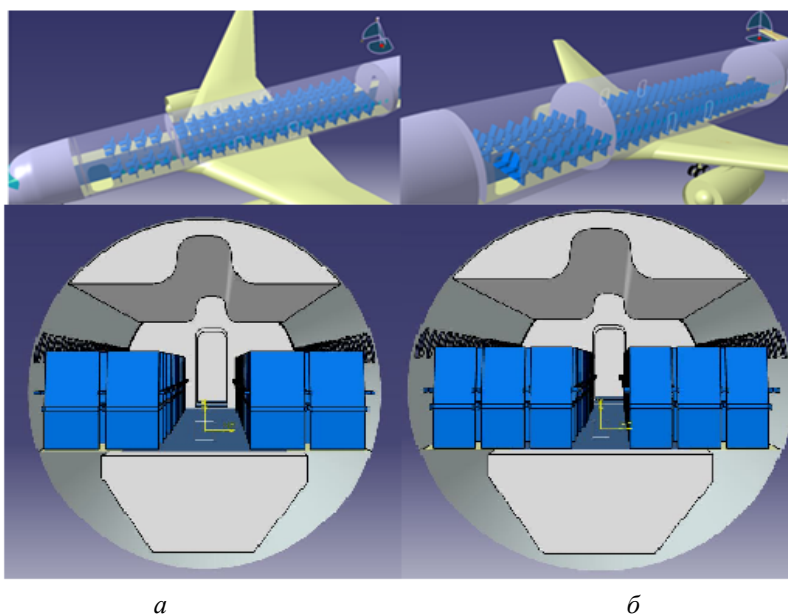


Рис. 9. Примеры компоновок пассажирского салона в разработанной 3D-модели самолёта [45]:
 а – 4 кресла в ряду и 4 ряда в бизнес-классе; б – 6 кресел в ряду и 6 рядов в бизнес-классе



Рис. 10. Общий вид многоэкранного интерфейса робота-проектанта самолёта [46]



Рис. 11. Внешний вид демонстрационного образца робота-проектанта с экраном touch screen [47]

Онтология проектирования

Рождение учебно-научной дисциплины «Онтология проектирования» напрямую связано с работами и идеями профессора Маслова и явилось следствием работ по автоматизации проектной деятельности [48]. Для студентов факультета летательных аппаратов на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов с 2006 года читалась дисциплина «Онтология производственной сферы», а в 2010 и последующих годах был подготовлен учебно-методический комплекс дисциплины «Онтология проектирования» для магистрантов [49 – 51], который читался до 2021 г. В настоящее время эту дисциплину для магистрантов сменил курс «Искусственный интеллект в авиационной технике», чётко обозначив тенденцию интеллектуализации работ в автоматизации проектирования авиационной техники.

Весной 2011 года начал свою работу научный семинар «Онтология проектирования», организованный кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов и Институтом проблем управления сложными системами (ИПУСС) РАН. Осенью этого же года был учреждён научный журнал «Онтология проектирования».

Заключение

Вклад профессора В.Г. Маслова в развитие факультета двигателей летательных аппаратов КуАИ-СГАУ трудно переоценить. Ученики В.Г. Маслова успешно трудятся в различных сферах, работают в Самарском университете [2]. Авторы статьи, работая на кафедрах Самарского университета, связанных с проектированием авиационной техники, продолжают дело своего Учителя.

Естественное развитие накопления знаний, компьютерной техники и информационных технологий привело к созданию научного направления «Онтология проектирования», которое служит базой для создания систем с ИИ.

Библиографический список

1. Маслов В.Г. Теория выбора оптимальных параметров при проектировании авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1981. 123 с.
2. Школа Маслова: ученики / сост. Н.М. Боргест. Самара: Изд-во «Новая техника», 2016. 112 с.
3. Матвеев В.Н. Становление и совершенствование учебной деятельности на кафедре теории двигателей летательных аппаратов // В кн.: «Кафедра теории двигателей летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва». Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. С. 117-140.
4. Маслов В.Г., Кузьмичев В.С., Коварцев А.Н., Григорьев В.А. Теория и методы начальных этапов проектирования авиационных ГТД: учеб. пособие. Самара: СГАУ, 1996. 147 с.
5. Боргест Н.М. Автоматизация предварительного проектирования самолёта: учеб. пособие. Самара: Самарский авиационный институт, 1992. 92 с.
6. Егер С.М., Лисейцев И.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолёта. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
7. Кузьмичев В.С., Маслов В.Г., Бочкарев С.К. Влияние целевого назначения летательных аппаратов на оптимальные параметры силовых установок с ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1976. № 4. С. 68-74.
8. Боргест Н.М., Кузьмичев В.С., Маслов В.Г. Выбор параметров ТРДД в условиях неопределённости исходных проектных данных системы ЛА // Сб. тезисов III

отраслевой конференции «Автоматизированное проектирование авиационных двигателей». М.: ЦИАМ, 1981.

9. Коварцев А.Н., Кузьмичев В.С. Автоматизированный метод поиска областей компромиссов в задачах выбора рациональных параметров рабочего процесса ГТД с помощью ЭВМ // В сб.: «Вопросы прикладной механики в авиационной технике». Деп. ВИНТИ, № 1210-81, 1981.

10. Боргест Н.М., Иванов А.Б. Метод поиска рациональных решений при проектировании сложных технических систем и машин в условиях неопределённых исходных данных // Тезисы докладов Второго Всесоюзного съезда по теории машин и механизмов (14-18 сентября, 1982 г., Одесса). Ч. 1. Киев: Наукова Думка, 1982. С. 51.

11. Боргест Н.М., Иванов А.Б. Разработка программного обеспечения для исследования границ областей оптимальных параметров ГТД в системе многорежимного самолёта. Деп. в ВИНТИ 23.06.83, № 3378-83. С. 43-51.

12. Кузьмичев В.С., Коварцев А.Н., Маслов В.Г. Численный метод определения многомерных областей выбора оптимальных параметров авиационных ГТД с помощью ЭВМ // Тезисы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции «Современные проблемы двигателей и энергетических установок летательных аппаратов». М.: МАИ, 1981. С. 63-64.

13. Боргест Н.М., Кузьмичев В.С. Математическая модель веса двухконтурного турбореактивного двигателя // В кн.: «Газотурбинные и комбинированные установки». М., 1979.

14. Боргест Н.М. Математическая модель ТРДДФ в системе многорежимного самолёта // В сб.: «Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей». Куйбышев: КуАИ, 1983. С. 11-17.

15. Маслов В.Г., Кузьмичев В.С., Григорьев В.А. Выбор параметров и проектный термогазодинамический расчёт авиационных газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуАИ, 1984. 176 с.

16. Боргест Н.М., Кузьмичев В.С., Маслов В.Г. Энергопотребление как критерий оптимизации летательных аппаратов и их двигателей // В сб.: «Научные чтения по авиации и космонавтике». М.: Наука, 1981. С. 251.

17. Боргест Н.М., Маслов В.Г. Определение оптимальных параметров рабочего процесса авиационных ГТД в подсистеме «Выбор параметров ГТД» учебно-исследовательской САПР. Куйбышев: КуАИ, 1986. 16 с.

18. Кузьмичев В.С., Сивцов Ю.М. Метод определения уровня термогазодинамического совершенства элементов ГТД при ограниченной выходной информации // В сб.: «Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей». Куйбышев: КуАИ, 1984. С. 15-18.

19. Боргест Н.М. Концепция гибридной экспертной системы предварительного проектирования самолёта // В сб.: «Методы использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах». Куйбышев, 1989. С. 43-55.

20. Боргест Н.М. Пакет многокритериальной оптимизации в гибридной экспертной системе РИСК // В сб.: «Методы использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах». Куйбышев, 1990. С. 19-22.

21. Кузьмичев В.С., Морозов М.А. Концепция метода распознавания облика рабочего процесса ГТД в условиях дефицита информации // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1991. № 3. С. 44-48.

22. Кузьмичев В.С., Морозов М.А., Новиков О.В. Автоматизированная система оценки научно-технического уровня промышленной продукции // В сб.: «Методы использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах». Куйбышев, 1990. С. 41-47.

23. Кузьмичев В.С., Маслов В.Г., Морозов М.А. Экспертная оценка научно-технического уровня проекта авиационного ГТД // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1992. № 4. С. 50-55.

24. Кузьмичев В.С. Автоматизированная система оценки научно-технического уровня сложных объектов // В сб.: «Ракетно-космическая техника». Сер. XII, вып. 1. Самара, 1997. С. 77-83.

25. Маслов В.Г., Кузьмичев В.С., Григорьев В.А. и др. Концепция построения и реализации гибкой САПР газотурбинных двигателей. Куйбышев: КуАИ, 1988. 148 с. Деп. НИИ тяж. маш. № 231 тн.88 от 27.09.88.

26. Кузьмичев В.С., Ломакин В.Б., Христенко П.В. Построение программного обеспечения САПР ГТД на основе специального макроязыка // В сб.: «Проектирование и доводка авиационных газотурбинных двигателей». Куйбышев: Куйбышевский авиационный институт, 1985. С. 3-12.

27. Кузьмичев В.С., Морозов М.А. Экспертная подсистема САПР ГТД // В сб.: «Методы использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах». Куйбышев, 1989. С. 56-62.

28. Кузьмичев В.С., Морозов М.А., Архипов А.А. Реализация механизма логического вывода и базы знаний в экспертной подсистеме САПР // В сб.: «Методы использования искусственного интеллекта в автоматизированных системах». Куйбышев, 1990. С. 36-41.

29. Кузьмичев В.С., Солодченко О.В. Гибридная экспертная система автоматизированного проектирования ГТД: информационное обеспечение // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» (17-18 сентября 1997 г., Самара). Самара: СГАУ, 1997. С. 63-67.

30. Кузьмичев В.С., Солодченко О.В. Инструментальная оболочка для создания гибридных экспертных САПР сложных технических объектов // Вестник СГАУ. Серия «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Вып. 2, ч. 1. Самара: СГАУ, 1998. С. 41-48.

31. Кузьмичев В.С., Солодченко О.В. Средства интеграции математических и логико-лингвистических моделей // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» (17-18 сентября 1997 г., Самара). Самара: СГАУ, 1997. С. 112-113.

32. Кузьмичев В.С., Сивцов Ю.М. Алгоритм оптимизации конструктивно-геометрического облика турбокомпрессора ГТД в САПР // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1990. № 2. С. 115-117.

33. Кузьмичев В.С. Методологические особенности применения учебно-исследовательской САПР авиационных газотурбинных двигателей в группах ЦИПС // Тезисы докладов республиканской научно-методической конференции «Передовой опыт в рамках Комплексной программы целевой интенсивной подготовки специалистов» (13-16 октября 1988 г., Москва). М.: Завод-втуз при ЗИЛе, 1988.

34. Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю., Рыбаков В.Н., Крупенич И.Н., Кулагин В.В. Методы и средства концептуального проектирования авиационных газотурбинных двигателей в САЕ-системе «АСТРА» // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 5 (36), ч. 1. С. 160-164. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-160-164

35. Кулагин В.В., Кузьмичев В.С., Крупенич И.Н., Ткаченко А.Ю. Вариантное проектирование проточной части турбокомпрессора ГТД с использованием

подсистемы АСТРА-ТК: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета, 2006. 80 с.

36. Кузьмичев В.С., Крупенич И.Н., Кулагин В.В., Ткаченко А.Ю. Автоматизированная система термогазодинамического расчёта и анализа (АСТРА) газотурбинных двигателей // Материалы докладов международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (21-23 июня 2006 г., Самара). Ч. 2. Самара: СГАУ, 2006. С. 120-122.

37. Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Ткаченко А.Ю., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н. Постановка задачи оптимизации параметров ТРДД с выполненным газогенератором // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 5 (36), ч. 1. С. 165-169. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-165-169

38. Кочеров Е.П., Кузьмичев В.С., Кулагин В.В., Федорченко Д.Г. К вопросу о создании двухконтурных двигателей разной тяги на базе выполненного газогенератора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 3 (34), ч. 2. С. 209-215. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-2(34)-209-215

39. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю. Выбор параметров рабочего процесса унифицированного газогенератора и семейства газотурбинных двигателей, создаваемых на его базе // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. 2015. № 4 (35). С. 64-70.

40. Рыбаков В.Н., Кузьмичев В.С., Ткаченко А.Ю., Крупенич И.Н. Метод оптимизации параметров рабочего процесса унифицированного газогенератора и семейства газотурбинных двигателей, создаваемых на его базе // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 1. С. 78-82.

41. Ткаченко А.Ю., Филинов Е.П., Кузьмичев В.С. Оптимизация параметров рабочего процесса и выбор схем малоразмерных двухконтурных турбореактивных двигателей для различных самолётов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25, № 1 (91). С. 58-64.

42. Кузьмичев В.С., Омар Х.Х.О, Ткаченко А.Ю. Повышение эффективности авиационных двухконтурных турбореактивных двигателей за счёт применения рекуператора // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27, № 4. С. 133-146. DOI: 10.34759/vst-2020-4-133-146

43. Боргест Н.М., Шустова Д.В., Гиматдинова С.Р. Иерархические и ассоциативные связи между терминами в тезаурусе на примере словаря проектанта // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 2 (33). С. 228-236. DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-2(33)-228-236

44. Боргест Н.М., Громов А.А., Тарабаева А.И. Определение масс частей самолёта на основе параметрической 3D модели на этапе технических предложений // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 1 (39). С. 55-62. DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-55-62

45. Боргест Н.М., Алеев Р.Х., Аксаныян П.А., Громов А.А. Автоматизированное формирование 3D модели самолёта на этапе технических предложений // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2012. № 4 (35). С. 139-148. DOI:10.18287/2541-7533-2012-0-4(35)-139-148

46. Боргест Н.М., Громов А.А., Громов А.А., Морено Р.Х., Коровин М.Д., Шустова Д.В., Одинцова С.А., Князихина Ю.Е. Робот-проектант: фантазия и реальность // *Онтология проектирования*. 2012. № 4 (6). С. 73-94.

47. Боргест Н.М., Власов С.А., Громов Ал.А., Громов Ан.А., Коровин М.Д., Шустова Д.В. Робот-проектант: на пути к реальности // *Онтология проектирования*. 2015. Т. 5, № 4 (18). С. 429-449. DOI: 10.18287/2223-9537-2015-5-4-429-449

48. Боргест Н.М. Формирование и развитие научной дисциплины «онтология проектирования»: краткая история личного опыта // *Онтология проектирования*. 2020. Т. 10, № 4 (38). С. 415-448. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-415-448

49. Боргест Н.М. *Онтология проектирования*. Самара: Изд-во «Новая техника», 2014. 280 с.

50. Боргест Н.М. *Введение в онтологию проектирования*. Саарбрюкен: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 140 с.

51. Боргест Н.М., Симонова Е.В., Шустова Д.В. *Онтологический анализ решения проектных задач на примерах*. Саарбрюкен: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 144 с.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AIRCRAFT DESIGN AND THE ROLE OF PROFESSOR V.G. MASLOV'S SCIENTIFIC SCHOOL IN THE PROCESS OF ITS DEVELOPMENT

© 2021

N. M. Borgest Candidate of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Construction and Design;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
borgest@yandex.ru

V. A. Grigoriev Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engine Theory;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
grigva47@gmail.com

V. S. Kuzmichev Doctor of Science (Engineering), Professor of the Department of Aircraft Engine Theory;
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;
kuzm@ssau.ru

The article was prepared for the 95th anniversary of the birth of Valentin Grigorievich Maslov, Doctor of Science (Engineering), Professor, founder of the school for optimal design of aircraft engine parameters, head of the engine CAD system department (Department 6) of the applied research laboratory (ONIL-2) of Kuibyshev Aviation Institute named after academician S.P. Korolyov. The stages of creating the theoretical foundation for optimal design of aircraft are discussed. The role of Professor V.G. Maslov in the formalization of knowledge in aircraft design in a context of uncertainty and the importance of multi-criteria assessment of design solutions are described. The work of Department 6 ONIL-2 (KuAI-SSAU), led by Valentin Grigorievich, provided Samara scientific school with a leading position in the field of optimal design of engines for aircraft of varying function. These works contributed to the formation of a modern understanding of the intellectualization of systems and the successful start of work in the field of their creation. The development of Professor V.G. Maslov's ideas in the works of his students is shown.

Professor Maslov; optimal design; artificial intelligence systems; design ontology; aircraft

Citation: Borgest N.M., Grigoriev V.A., Kuzmichev V.S. Artificial intelligence in aircraft design and the role of professor V.G. Maslov's scientific school in the process of its development. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. V. 20, no. 3. P. 171-190. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-3-171-190

References

1. Maslov V.G. *Teoriya vybora optimal'nykh parametrov pri proektirovanii aviatsionnykh GTD* [Theory of choosing optimal parameters in the design of aircraft gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 123 p.
2. *Shkola Maslova: ucheniki / sost. N.M. Borgest* [Maslov's school: students. Compiled by N.M. Borgest]. Samara: Novaya Tekhnika Publ., 2016. 112 p.
3. Matveev V.N. Stanovlenie i sovershenstvovanie uchebnoy deyatel'nosti na kafedre teorii dvigateley letatel'nykh apparatov. *V kn.: «Kafedra Teorii Dvigatelye Letatel'nykh Apparatov Samarskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Universiteta Imeni Akademika S.P. Koroleva»*. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2019. P. 117-140. (In Russ.)
4. Maslov V.G., Kuzmichev V.S., Kovartsev A.N., Grigor'ev V.A. *Teoriya i metody nachal'nykh etapov proektirovaniya aviatsionnykh GTD* [Theory and methods of the conceptual stages of aircraft gas turbine engines design]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1996. 147 p.
5. Borgest N.M. *Avtomatizatsiya predvaritel'nogo proektirovaniya samoleta: ucheb. posobie* [Aircraft preliminary design automation]. Samara: Samara Aviation Institute Publ., 1992. 92 p.
6. Eger S.M., Liseytshev I.K., Samoylovich O.S. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya samoleta* [Basics of computer-aided aircraft design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 232 p.
7. Kuzmichev V.S., Maslov V.G., Bochkarev S.K. Influence of the intended use of aircraft on the optimal parameters of power plants with a gas turbine engine. *Soviet Aeronautics*. 1976. V. 19, Iss. 4. P. 68-74.
8. Borgest N.M., Kuzmichev V.S., Maslov V.G. Vybora parametrov TRDD v usloviyakh neopredelennosti iskhodnykh proyektnykh dannykh sistemy LA. *Sb. tezisov III otraslevoy konferentsii «Avtomatizirovannoe proektirovanie aviatsionnykh dvigateley»*. Moscow: TsIAM Publ., 1981.
9. Kovartsev A.N., Kuzmichev V.S. Avtomatizirovannyi metod poiska oblastey kompromissov v zadachakh vybora ratsional'nykh parametrov rabocheho protsessa GTD s pomoshch'yu EVM. *V sb.: «Voprosy Prikladnoy Mekhaniki v Aviatsionnoy Tekhnike»*. Dep. VINITI, No. 1210-81, 1981.
10. Borgest N.M., Ivanov A.B. Metod poiska ratsional'nykh resheniy pri proektirovanii slozhnykh tekhnicheskikh sistem i mashin v usloviyakh neopredelennykh iskhodnykh dannykh. *Tezisy dokladov Vtorogo Vsesoyuznogo s'ezda po teorii mashin i mekhanizmov (September, 14-18, 1982, Odessa)*. Part 1. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1982. P. 51.
11. Borgest N.M., Ivanov A.B. Razrabotka programmnoho obespecheniya dlya issledovaniya granits oblastey optimal'nykh parametrov GTD v sisteme mnogorezhimnogo samoleta. Dep. v VINITI 23.06.83, № 3378-83. P. 43-51.
12. Kuzmichev V.S., Kovartsev A.N., Maslov V.G. Chislennyi metod opredeleniya mnogomernykh oblastey vybora optimal'nykh parametrov aviatsionnykh GTD s pomoshch'yu EVM. *Tezisy dokladov II Vsesoyuznoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sovremennye Problemy Dvigatelye i Energeticheskikh Ustanovok Letatel'nykh Apparatov»*. Moscow: Moscow Aviation Institute Publ., 1981. P. 63-64. (In Russ.)
13. Borgest N.M., Kuzmichev V.S. Matematicheskaya model' vesa dvukhkoturnogo turboreaktivnogo dvigatelya. *V kn.: «Gazoturbinnye i Kombinirovannye Ustanovki»*. Moscow, 1979.
14. Borgest N.M. Matematicheskaya model' TRDDF v sisteme mnogorezhimnogo samoleta. *V sb.: «Proektirovanie i Dovodka Aviatsionnykh Gazoturbinnnykh Dvigatelye»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1983. P. 11-17. (In Russ.)

15. Maslov V.G., Kuzmichev V.S., Grigor'ev V.A. *Vybor parametrov i proektnyy termogazodinamicheskiy raschet aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Selection of parameters and design thermogasdynamics calculation of aircraft gas turbine engines]. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1984. 176 p.

16. Borgest N.M., Kuzmichev V.S., Maslov V.G. Energopotreblenie kak kriteriy optimizatsii letatel'nykh apparatov i ikh dvigateley. *V sb.: «Nauchnye Chteniya po Aviatsii i Kosmonavtike»*. Moscow: Nauka Publ., 1981. P. 251. (In Russ.)

17. Borgest N.M., Maslov V.G. *Opreделение optimal'nykh parametrov rabocheho protsessa aviatsionnykh GTD v podsysteme «Vybor parametrov GTD» uchebno-issledovatel'skoy SAPR* [Determination of optimal parameters of the work process of aviation gas turbine engines in the subsystem «Choice of gas turbine engine parameters» of the educational and research CAD system]. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1986. 16 p.

18. Kuzmichev V.S., Sivtsov Yu.M. Metod opredeleniya urovnya termogazodinamicheskogo sovershenstva elementov GTD pri ogranichennoy vykhodnoy informatsii. *V sb.: «Proektirovanie i Dovodka Aviatsionnykh Gazoturbinnnykh Dvigatelay»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1984. P. 15-18. (In Russ.)

19. Borgest N.M. Kontsepsiya gibridnoy ekspertnoy sistemy predvaritel'nogo proektirovaniya samoleta. *V sb.: «Metody Ispol'zovaniya Iskusstvennogo Intellekta v Avtomatizirovannykh Sistemakh»*. Kuybyshev, 1989. P. 43-55. (In Russ.)

20. Borgest N.M. Paket mnogokriterial'noy optimizatsii v gibridnoy ekspertnoy sisteme RISK. *V sb.: «Metody ispol'zovaniya Iskusstvennogo Intellekta v Avtomatizirovannykh Sistemakh»*. Kuybyshev, 1990. P. 19-22. (In Russ.)

21. Kuzmichev V.S., Morozov M.A. The concept of a method for recognizing the appearance of the working process of a gas turbine engine under conditions of information deficit. *Soviet Aeronautics*. 1991. V. 34, Iss. 3. P. 44-48.

22. Kuzmichev V.S., Morozov M.A., Novikov O.V. Avtomatizirovannaya sistema otsenki nauchno-tekhnicheskogo urovnya promyshlennoy produktsii. *V sb.: «Metody Ispol'zovaniya Iskusstvennogo Intellekta v Avtomatizirovannykh Sistemakh»*. Kuybyshev, 1990. P. 41-47. (In Russ.)

23. Kuzmichev V.S., Maslov V.G., Morozov M.A. Expert assessment of the scientific and technical level of the aircraft GTE project. *Russian Aeronautics*. 1992. V. 35, Iss. 4. P. 50-55.

24. Kuzmichev V.S. Avtomatizirovannaya sistema otsenki nauchno-tekhnicheskogo urovnya slozhnykh ob"ektov. *V sb.: «Raketno-kosmicheskaya Tekhnika»*. Series XII, Iss. 1. Samara, 1997. P. 77-83. (In Russ.)

25. Maslov V.G., Kuzmichev V.S., Grigor'ev V.A. et all. Kontsepsiya postroeniya i realizatsii gibkoy SAPR gazoturbinnnykh dvigateley. Kuybyshev: KuAI, 1988. 148 p. Dep. NII tyazh. mash. No. 231 tn.88 ot 27.09.88.

26. Kuzmichev V.S., Lomakin V.B., Khristenko P.V. Postroenie programmnoy obespecheniya SAPR GTD na osnove spetsial'nogo makroyazyka. *V sb.: «Proektirovanie i Dovodka Aviatsionnykh Gazoturbinnnykh Dvigatelay»*. Kuybyshev: Kuybyshev Aviation Institute Publ., 1985. P. 3-12. (In Russ.)

27. Kuzmichev V.S., Morozov M.A. Ekspertnaya podsystema SAPR GTD. *V sb.: «Metody Ispol'zovaniya Iskusstvennogo Intellekta v Avtomatizirovannykh Sistemakh»*. Kuybyshev, 1989. P. 56-62. (In Russ.)

28. Kuzmichev V.S., Morozov M.A., Arkhipov A.A. Realizatsiya mekhanizma logicheskogo vyvoda i bazy znaniy v ekspertnoy podsysteme SAPR. *V sb.: «Metody Ispol'zovaniya Iskusstvennogo Intellekta v Avtomatizirovannykh Sistemakh»*. Kuybyshev, 1990. P. 36-41. (In Russ.)

29. Kuzmichev V.S., Solodchenko O.V. Gibrnidnaya ekspertnaya sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya GTD: informatsionnoe obespechenie. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelestroeniya v Povolzhskom Regione» (September, 17-18, 1997, Samara)*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1997. P. 63-67. (In Russ.)

30. Kuzmichev V.S., Solodchenko O.V. Instrumental'naya obolochka dlya sozdaniya gibrnidnykh ekspertnykh SAPR slozhnykh tekhnicheskikh ob"ektov. *Vestnik SGAU. Seriya «Problemy i perspektivy Razvitiya Dvigatelestroeniya»*. Iss. 2, part 1. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1998. P. 41-48. (In Russ.)

31. Kuzmichev V.S., Solodchenko O.V. Sredstva integratsii matematicheskikh i logikolinguisticheskikh modeley. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelestroeniya v Povolzhskom Regione» (September, 17-18, 1997, Samara)*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1997. P. 112-113. (In Russ.)

32. Kuzmichev V.S., Sivtsov Yu.M. Algorithm for optimizing the constructive-geometric appearance of a turbocompressor of a gas-turbine engine in CAD. *Soviet Aeronautics*. 1990. V. 33, Iss. 2. P. 115-117.

33. Kuzmichev V.S. Metodologicheskie osobennosti primeneniya uchebno-issledovatel'skoy SAPR aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley v gruppakh TsIPS. *Tezisy dokladov respublikanskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii «Peredovoy Opyt v Ramkakh Kompleksnoy Programmy Tselevoy Intensivnoy Podgotovki Spetsialistov» (Oktober, 13-16, 1988, Moscow)*. Moscow: Zavod-Vtuz Pri ZILe Publ., 1988. (In Russ.)

34. Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Yu., Rybakov V.N., Krupenich I.N., Kulagin V.V. Methods and means of aircraft gas turbine engine conceptual design underlying the CAE system «ASTRA». *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 5 (36), part 1. P. 160-164. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-160-164

35. Kulagin V.V., Kuzmichev V.S., Krupenich I.N., Tkachenko A.Yu. *VARIANTNOE PROEKTIROVANIE PROTOCHNOY CHASTI TURBOKOMPRESSORA GTD S ISPOL'ZOVANIEM PODSISTEMY ASTRA-TK: ucheb. posobie* [Alternative design of the gas turbine engine turbo compressor flow channel using the ASTRA-TK subsystem: textbook]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2006. 80 p.

36. Kuzmichev V.S., Krupenich I.N., Kulagin V.V., Tkachenko A.Yu. Avtomatizirovannaya sistema termogazodinamicheskogo rascheta i analiza (ASTRA) gazoturbinnnykh dvigateley. *Materialy dokladov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelestroeniya» (June, 21-23, 2006, Samara)*. Part 2. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2006. P. 120-122. (In Russ.)

37. Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Tkachenko A.Yu., Krupenich I.N., Rybakov V.N. Problem formulation of bypass engine parameters optimization with a preselected gas generator. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 5 (36), part 1. P. 165-169. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-5-1(36)-165-169

38. Kocherov E.P., Kuzmichev V.S., Kulagin V.V., Fedorchenko D.G. The task of creating the bypass engines of various thrust levels using the given gas generator. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 3 (34), part 2. P. 209-215. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-3-2(34)-209-215

39. Rybakov V.N., Kuz'michev V.S., Tkachenko A.Yu. Selection of operation process parameters for a unified gas generator and the set of gas-turbine engines created on its baseline. *Vestnik of P.A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University*. 2015. no. 4 (35). 2015. P. 64-70. (In Russ.)

40. Rybakov V.N., Kuzmichev V.S., Tkachenko A.Yu., Krupenich I.N. A method of working process parameter optimization of a unified engine core and a gas turbine engine family being created on its basis. *Russian Aeronautics*. 2018. V. 61, Iss. 1. P. 81-86. DOI: 10.3103/S1068799818010129

41. Tkachenko A.Yu., Filinov E.P., Kuzmichev V.S. Optimization of operating process parameters and choice of schemes of small-sized two-circuit turbojet engines for various aircraft. *Vestnik UGATU*. 2021. V. 25, No. 1 (91). P. 58-64. (In Russ.)

42. Omar H.H., Kuz'michev V.S., Tkachenko A.Y. Efficiency improving of aviation bypass turbojet engines through recuperator application. *Aerospace MAI Journal*. 2020. V. 27, no. 4. P. 133-146. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-4-133-146

43. Borgest N.M., Shustova D.V., Gimatdinova S.R. Hierarchical and associative links between terms in the thesaurus using the example of the designer's dictionary. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 2 (33). P. 228-236. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-2(33)-228-236

44. Borgest N.M., Gromov A.A., Tarabaeva A.I. Determination of aircraft part masses based on a parametric 3D model at the stage of technical proposals. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 1 (39). P. 55-62. (In Russ.). DOI: 10.18287/1998-6629-2013-0-1(39)-55-62

45. Borgest N.M., Aleev R.H., Aksanian P.A., Gromov A.A. Automated construction of a 3D plane model at the stage of technical proposals. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 4 (35). P. 139-148. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2012-0-4(35)-139-148

46. Borgest N.M., Gromov A.I.A., Gromov An.A., Moreno R.H., Korovin M.D., Shustova D.V., Odintsova S.A., Knyazihina Y.E. Robot-designer: fantasy and reality. *Ontology of Designing*. 2012. No. 4 (6). P. 73-94. (In Russ.)

47. Borgest N.M., Vlasov S.A., Gromov A.I.A., Gromov An.A., Korovin M.D., Shustova D.V. Robot-designer: on the road to reality. *Ontology of Designing*. 2015. V. 5, no. 4 (18). P. 429-449. (In Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2015-5-4-429-449

48. Borgest N.M. Formation and development of Ontology of designing as a scientific discipline: a brief history of personal experience. *Ontology of Designing*. 2020. V. 10, no. 4 (38). P. 415-448. (In Russ.). DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-4-415-448

49. Borgest N.M. *Ontologiya proektirovaniya* [Design ontology]. Samara: Novaya Tekhnika Publ., 2014. 280 p.

50. Borgest N.M. *Vvedenie v ontologiyu proektirovaniya* [Introduction to design ontology]. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 140 p.

51. Borgest N.M., Simonova E.V., Shustova D.V. *Ontologicheskiy analiz resheniya proektnykh zadach na primerakh* [Ontological analysis of solving design problems via examples]. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 144 p.