

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2014 И.А. Кривошеев, Д.Г. Кожин

Уфимский государственный авиационный технический университет

Рассматриваются методы автоматизированного проектирования и моделирования газотурбинных двигателей (ГТД). Приводятся результаты создания универсальной открытой технологии имитационного моделирования сложных технических объектов. Предлагаемая технология позволяет успешно решать задачи моделирования работы авиационных двигателей в составе летательного аппарата. Другие технические объекты, успешно моделируемые с применением данной технологии, включают энергоустановки различных типов. Приведён опыт создания средств автоматизированного выбора силовых схем и формирования общих компоновок ГТД, средств полунатурного совместного моделирования ГТД и его системы автоматического управления (САУ), создания отечественных PLM-систем СПРАД и Stalker, ряда САД/САЕ-приложений для конструкторско-технологического проектирования узлов и деталей ГТД. Показана эффективность объединения функциональных возможностей средств многоуровневого имитационного моделирования со средствами САД/САЕ/PLM. Показано использование DVIG при полунатурном моделировании ТВВД (Д-27) и его САУ. Приведён метод получения характеристик компрессоров с использованием разработанных систем имитационного моделирования лопаточных венцов, ступеней, компрессоров и двигателей. В их числе новые подходы к проектированию лопаточных машин (метод отслеживания струй - МОС). Показаны результаты разработки компонентов интегрированной логистической поддержки (ИЛП) для организации поддержки эксплуатации ГТД на современном уровне. В частности, описано разработанное ИЭТР (интерактивное электронное техническое руководство) по эксплуатации ГТП (газотурбинного привода) АЛ-31СТ, используемого в Газпроме на компрессорных станциях.

*Автоматизированное проектирование, имитационное и полунатурное моделирование ГТД, узлов и систем, САД/САЕ/PLM-технология.*

В настоящее время на всех этапах проектирования, изготовления, доводки, отладки и эксплуатации ГТД широко используются средства моделирования и автоматизированного проектирования [1]. Существенная их часть поставляется зарубежными компаниями, имеет большую стоимость, закрытые для наших разработчиков коды, часто алгоритмы и функциональные возможности этих систем не вполне устраивают отечественных специалистов в области авиадвигательостроения. В свое время, ещё в составе МАП СССР была развернута отраслевая программа САПР-Д, развитием отдельных её компонентов руководили НТОКСы (научно-технические отраслевые координационные советы): ЦИАМ руководил частью АСП (автоматизации проектирования) и АСИ (автоматизации испытаний), КНПО «Труд» руководил АСК (автоматизации конструирования), НИИД

руководил АСПр (автоматизации производства). В работе участвовал ряд научных групп из авиационных вузов под руководством Тунакова А.П. (КАИ), Ахмедзянова А.М. (УАИ), Маслова В.Г. и Аронова Б.М. (КуАИ), Кирпикина Ю.П. (МАИ). Именно тогда совместными усилиями была создана Интегрированная САПР-Д АСПАД, позволявшая работникам ОКБ (ЛНПО им. Климова) совместно работать над проектом в режиме параллельного проектирования. С использованием СУБД Oracle (КАРС) были реализованы все атрибуты PDM-технологии (режим коллективного разграниченного доступа, обработка транзакций, клиент-сервер, единая база проектных решений (БПР), база данных (БД) прототипов, БД нормативной документации и т.д.). В этот же период был создан и получил существенное развитие программный комплекс ГРАД (КАИ), Монитор модульной техно-

логии (КуАИ), подсистемы «Эскизный проект», ПАРАД и отечественная CAD/CAM/CAE-система Альфа (УАИ). В МАИ в это время развивался НИЦ АСК, создавший ПК под названием БПИО (на основе зарубежного ANVIL3000), который в настоящее время развивается под названием Kredo. Именно тогда возникли сложности с подключением к АСПАД ПК ГРАД - в то время он единственный обеспечивал возможность структурного синтеза различных схем ГТД, газотурбинных установок (ГТУ) и других двигателей. Именно это и послужило импульсом к поиску новых методов и средств моделирования.

В результате в УАИ был создан ПК ПАРАД. Затем была выделена универсальная «оболочка» САМСТО, позволяющая оперативно создавать СИМ (системы имитационного моделирования). В ней имеются все атрибуты CAE-систем (Решатель–процессор, пре- и пост процессор, БД характеристик элементов, БД моделей, БД результатов). За прошедший период были созданы версии САМСТОv 1.05, САМСТОv 2.15, САМСТОv 3.08. Последняя обеспечивает многоуровневое моделирование с использованием «зуминга» и технологии «контейнеров».

Путём развития метода грекоримских квадратов удалось обеспечить в САМСТО оптимизацию при большом количестве критериев и варьируемых параметров. В этой технологии удалось объединить и систематизировать ранее созданные СИМ для моделирования камер сгорания, компрессоров и турбин, двигателей в целом и их САУ, организовать их системное автоматизированное проектирование в составе летательного аппарата (ЛА), как показано на рис. 1. Ряд специализированных СИМ разработан для иден-

тификации состояния ГТД и ГТУ по результатам трендового анализа (рис. 2), отладки включения-выключения форсажа в ТРДДФ по результатам приёмосдаточных испытаний (ПСИ) и т.д. Реинжиниринг жизненного цикла (ЖЦ) ГТД с использованием методологий SADT и RUP позволил сформировать схему новой организации процесса, разработать спецификации на ПО для его поддержки.

Решатель в создаваемых СИМ позволяет обобщённым образом решать произвольные проектно-доводочные и эксплуатационные задачи (поэтому создаваемые в этих средах модели и называются имитационными). В настоящее время усилия коллектива направлены на объединение функциональных возможностей разработанных средств многоуровневого имитационного моделирования и средств CAD/CAE/PLM.

В своё время коллектив участвовал в создании PDM SmarTeam (тогда SimPDM) и была создана первая отечественная PDM-технология параллельного проектирования ГТД под названием СПРАД. Далее коллективом на основе SQL-сервера разработана и внедрена на ряде предприятий полноразмерная отечественная PLM-система Stalker, позволяющая решать не только задачи параллельного проектирования, но и управления дискретным производством. Был разработан также ряд CAD/CAE-приложений для конструкторско-технологического проектирования узлов и деталей ГТД, в т.ч. компрессоров, турбин, композитных лопаток вентиляторов. Это позволит автоматизировать подбор параметров и характеристик элементов в составе дерева проекта, ускорить подбор оптимальных вариантов и доводку изделий.

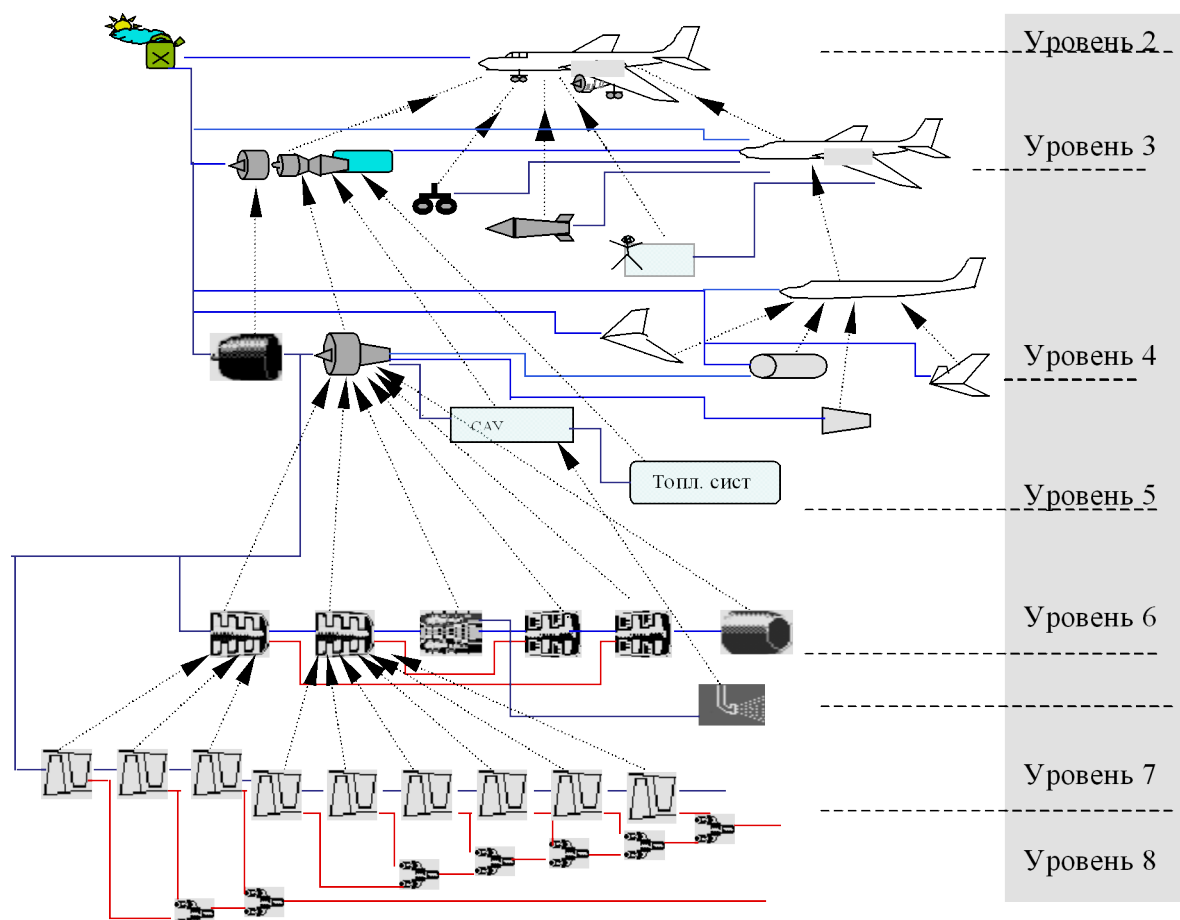


Рис. 1. Схема формирования многоуровневой имитационной сетевой модели ГТД в составе ЛА

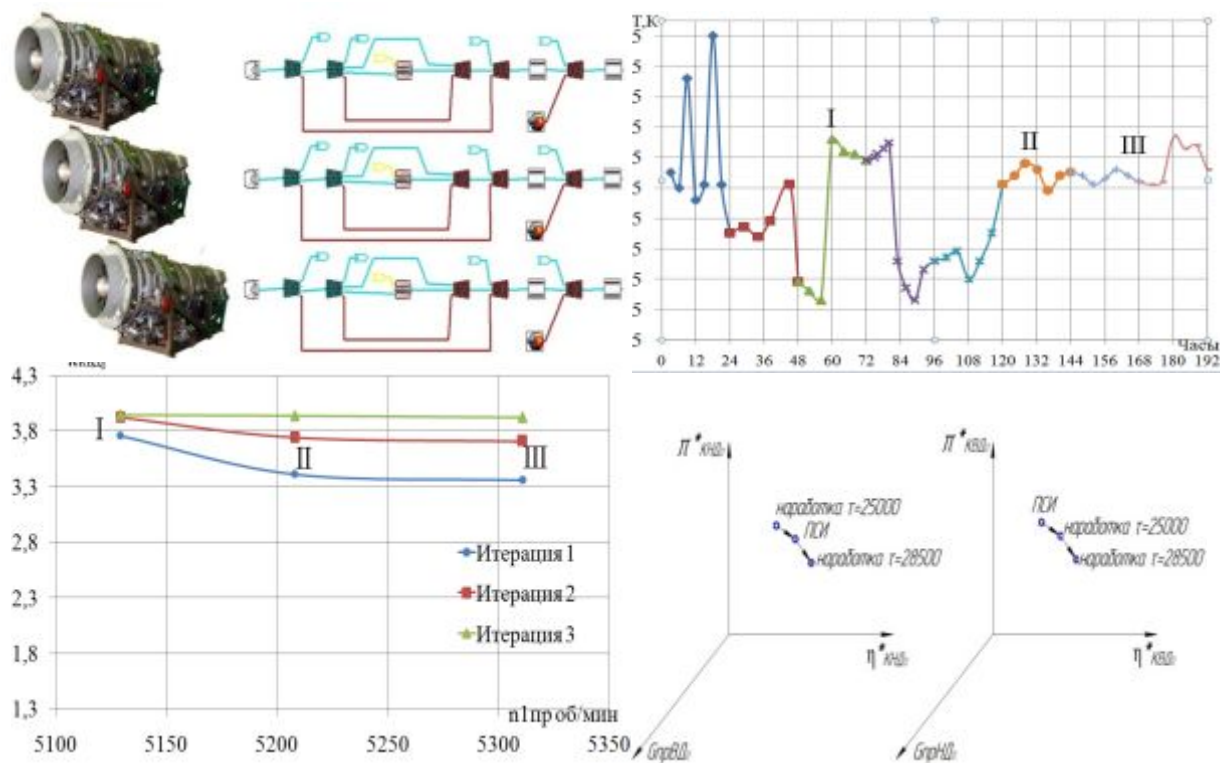


Рис. 2. Диагностика состояния ГТД по результатам трендового анализа записи параметров с использованием тиражированной имитационной модели

Совместно с коллегами из СГАУ разработана интерактивная технология выбора силовых схем и формирования общей компоновки ГТД на этапе эскизного проектирования (рис. 3).

Вместе с КБ «Молния» разработана технология полунатурного моделирования ГТД вместе с его САУ. Она отлажена на примере ТВВД Д-27 (рис. 4).

Особое внимание уделяется моделированию и автоматизированному проек-

тированию [2] лопаточных машин (рис. 5), как основных элементов современных судовых и авиационных двигателей и движителей (компрессоры, турбины, воздушные, гребные, вертолётные винты). Как известно, их характеристики, такие как масса, габариты, КПД, надёжность, удобство эксплуатации в существенной мере определяют соответствующие характеристики двигателей, судов и ЛА в целом.

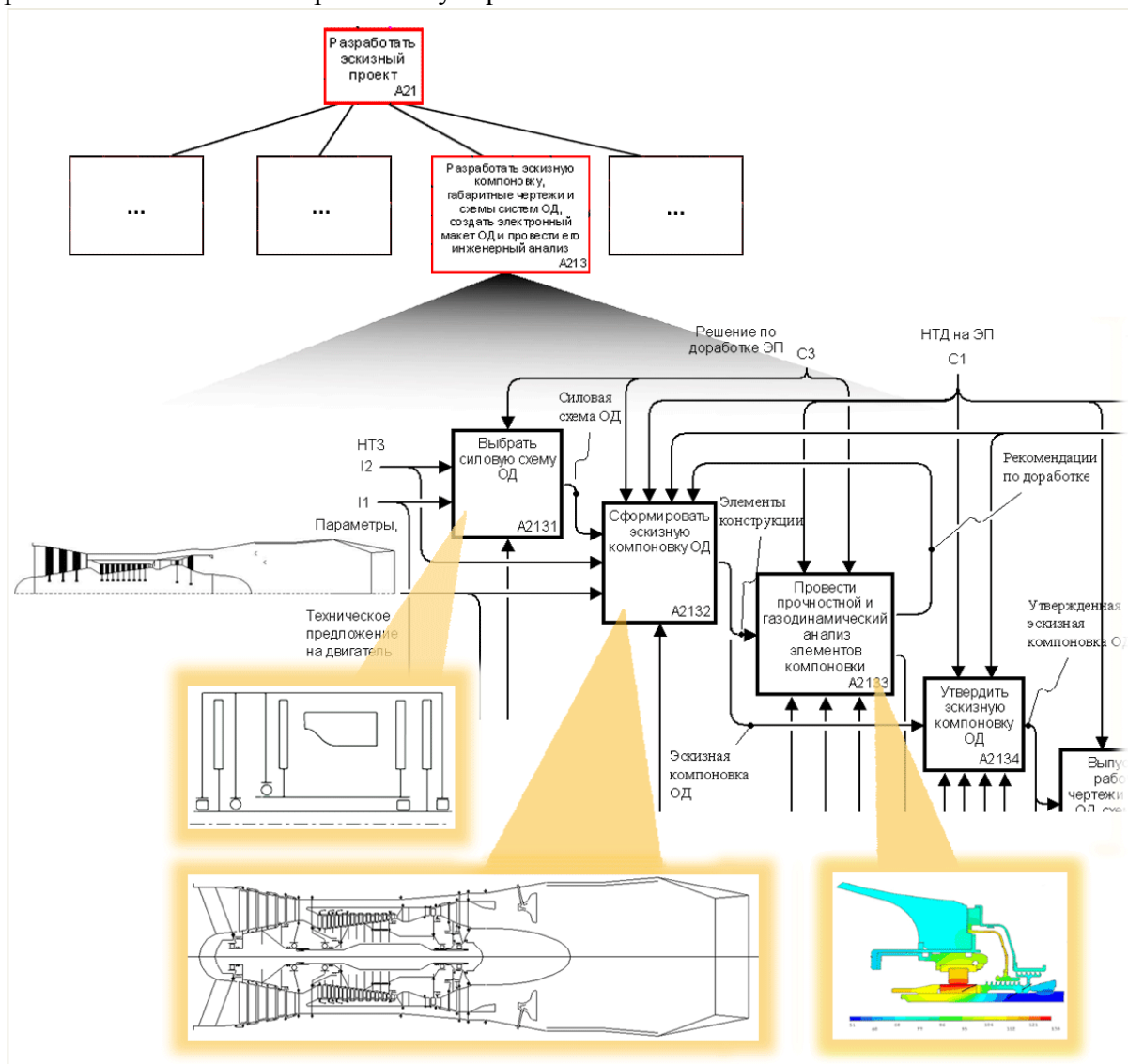


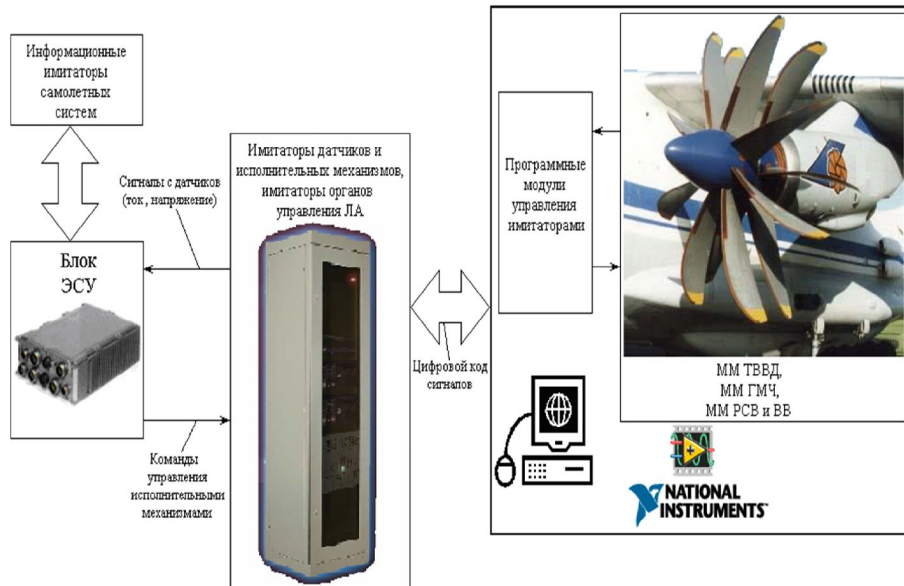
Рис. 3. Автоматизация в выборе конструктивно-силовой схемы ГТД в процессе эскизного проектирования

В настоящее время всё шире используются новые конструкторские решения – биротативные схемы, широкохордные и полые лопатки, рабочие моноколёса (блиски), лопатки с искривлёнными передни-

ми и задними кромками. Возможность их применения тесно связана с использованием новых материалов – композиционных (с полимерной и металлической матрицей), наноструктурных и т.п., а также

новых технологий изготовления – сварки трением при изготовлении моноколёс (блисков), специальных технологий изготовления полых лопаток и лопаток из композиционных материалов. Такие работы ведутся в рамках Дивизиона ОДК «Двигатели для боевой авиации» в кооперации ряда предприятий (ОАО «УМПО»,

ОАО «НПП Мотор», ОАО «УАП Гидравлика», ОАО «КумаПО») с участием УГАТУ. Поэтому разрабатываемые средства моделирования и автоматизированного проектирования компрессоров и турбин должны учитывать эти особенности их рабочего процесса и конструкции.



Структурная схема стенда полунатурного моделирования ГТД и его САУ, разработанного УНПП «Молния»

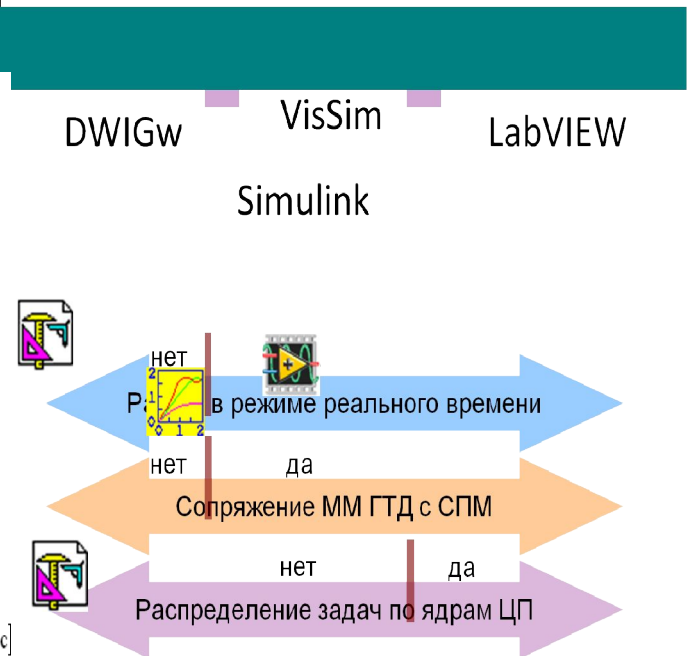
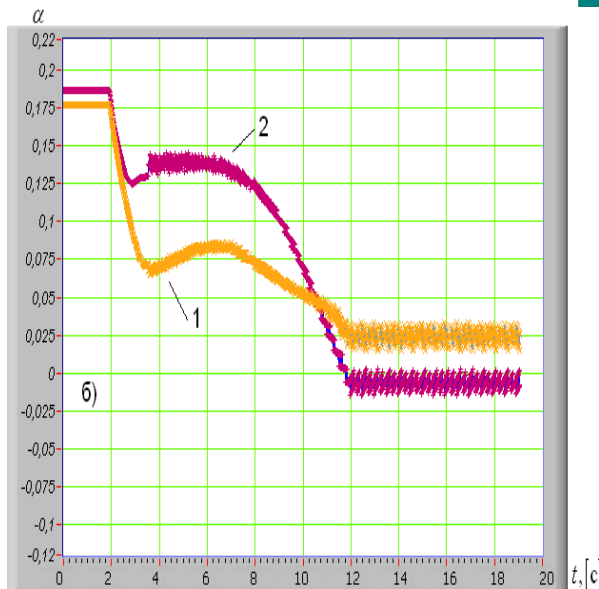


Рис. 4. Использование DVIG при полунатурном моделировании ТВВД (Д-27) и его САУ

В связи с этим в коллективе развиваются новые подходы к проектированию лопаточных машин (рис. 6):

- метод отслеживания струй (МОС);
- использование подвижных Лагранжевых сеток;

– обобщение экспериментальных данных [3] с учётом закономерностей изменения характеристик решёток профилей [4], ступеней, каскадов и лопаточных машин

(ЛМ), их использования при планировании новых экспериментов и испытаний, при диагностике состояния ЛМ и т.п.

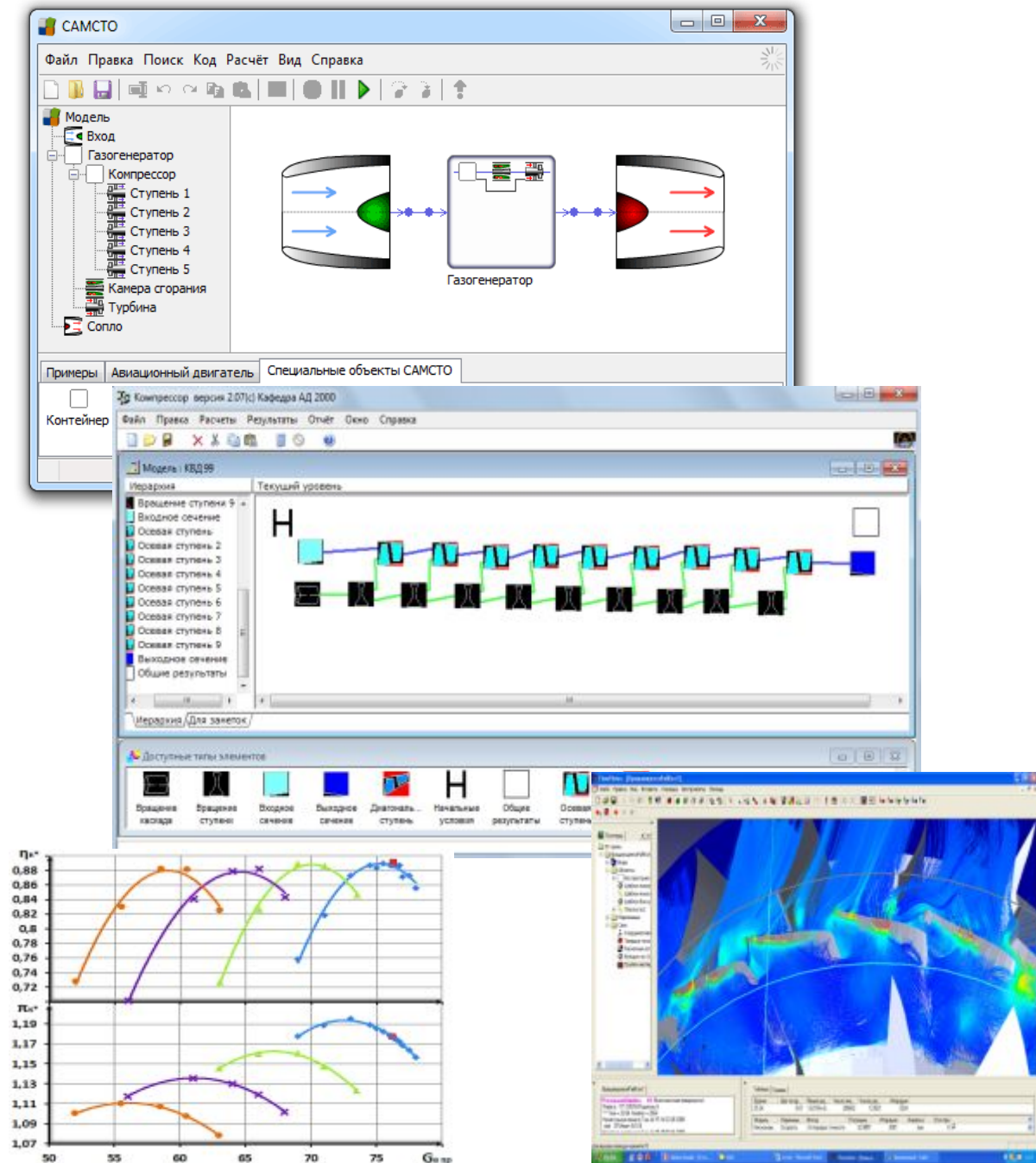


Рис. 5. Получение характеристик компрессоров с использованием разработанных систем имитационного моделирования лопаточных венцов, ступеней, компрессоров и двигателей

Предложенные методы моделирования нестационарного взаимодействия и разработанный математический аппарат позволяют поставить практическую задачу оптимизации взаимного расположения статорных венцов в многоступенчатой

турбомашине (с целью снижения амплитуд возбуждающих нагрузок, приводящих к вибрациям рабочих лопаток в случае, когда окружные шаги неподвижных решёток равны или кратны).



Предложенный в своё время коллективом метод выделения «эквивалентных каналов» (рис. 6), описывающих движение частицы вдоль проточной части одновременно в абсолютном и в относительном движении, который в [5] называют МОС, позволяет с достаточной для инженерной практики точностью описывать различные газодинамические процессы в

решётках турбомашин, в числе которых: клокинг-эффект, нестационарное взаимодействие решёток и, в частности, явления аэроупругости и процессы сегрегации течений газа в межлопаточных каналах. Он позволяет оптимизировать геометрию лопаточных венцов, в том числе подобрать кривизну передних и задних кромок лопаток.

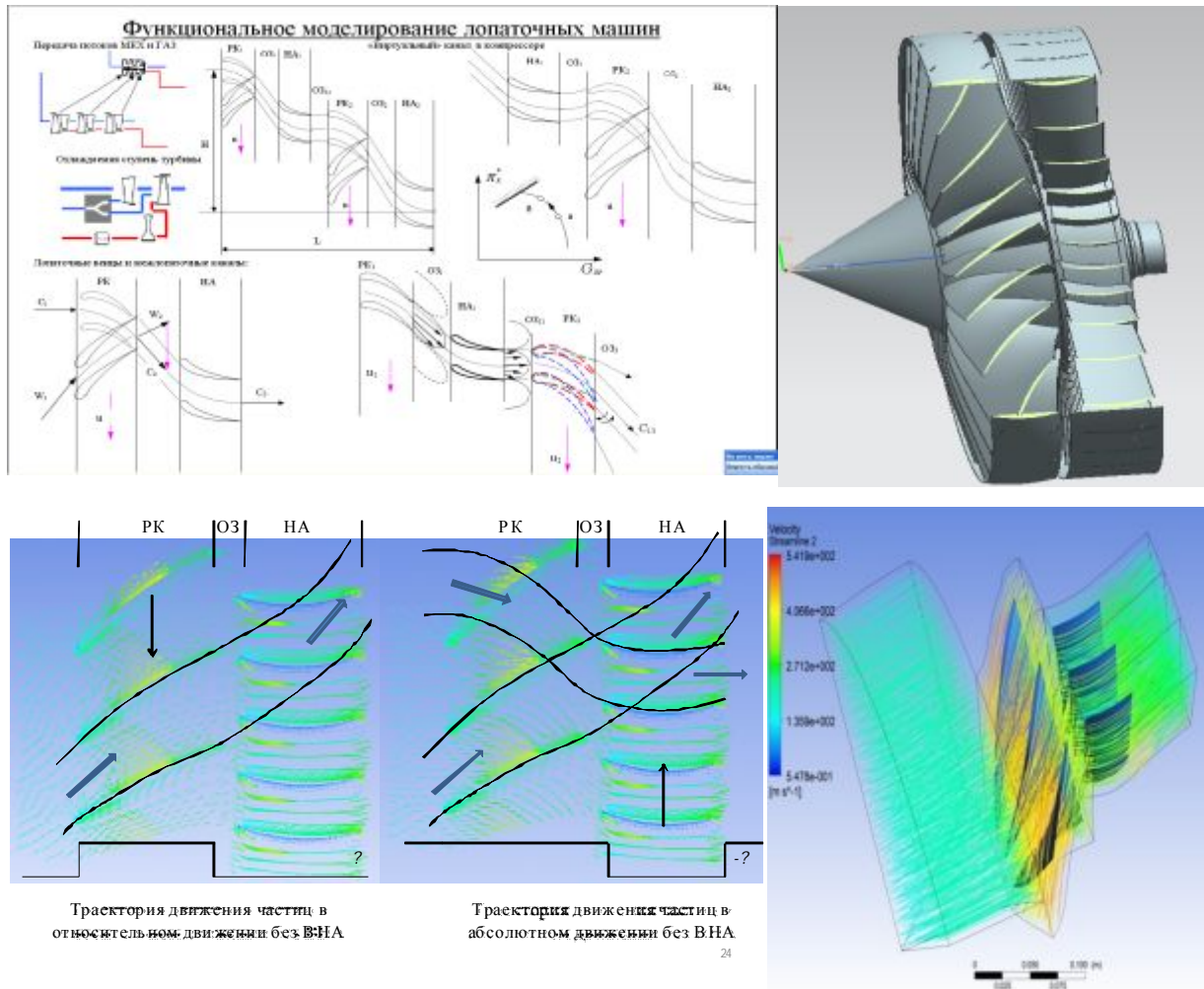


Рис. 6. Используемые новые подходы к проектированию лопаточных машин (метод отслеживания струй - МОС)

При этом новые методы расчёта позволяют использовать при проектировании клокинг-эффект (подбор соответствующего взаимного расположения лопаточных венцов в роторе и в статоре, когда на характерных режимах в межлопаточных каналах в соответствии с МОС удаётся наилучшим образом организовать движение струй в относительной и абсолютной системах координат). Этот метод по-

зволяет скорректировать профили лопаток, учесть нестационарное силовое воздействие потока на лопатку, включая деформацию профиля и возникновение флаттера.

Как известно, широкохордные композитные лопатки позволяют избежать развития колебаний и одновременно получить высоконагруженные ступени, что обеспечивает уменьшение массы и габа-

ритов каскадов компрессоров. При использовании таких лопаток обеспечивается не только демпфирование колебаний, но и повышается их возможность противостоять развитию трещин, работать при наличии дефектов. Используемые в настоящее время полые лопатки винтов, винтовентиляторов и вентиляторов позволяют реализовать большую степень двухконтурности и обеспечить низкие значения удельного расхода топлива, тем самым повысить экономичность и дальность ЛА. Новые методы расчёта эффективны при проектировании такого рода обычных и биротативных лопаточных машин. Биротативные турбины и гребные, воздушные и вертолётные винты позволяют повысить эффективность, уменьшить массу и габариты силовых установок, снизить заметность судов (в т.ч. подводных),

обеспечить соблюдение норм по шуму и т.д. С учётом всех этих тенденций разработанные методы и средства позволяют моделировать и автоматизировать проектирование лопаточных машин такого типа, подбирать и оптимизировать их параметры и характеристики.

В настоящее время считается, что информационная поддержка (в рамках CALS-технологии) распространяется на все стадии ЖЦ ГТД. В связи с этим в коллективе разработана универсальная технология создания компонентов ИЛП эксплуатации. В качестве примера на рис. 7 показано разработанное интерактивное электронное техническое руководство по эксплуатации газотурбинного привода АЛ-31СТ, используемого в Газпроме на компрессорных станциях.

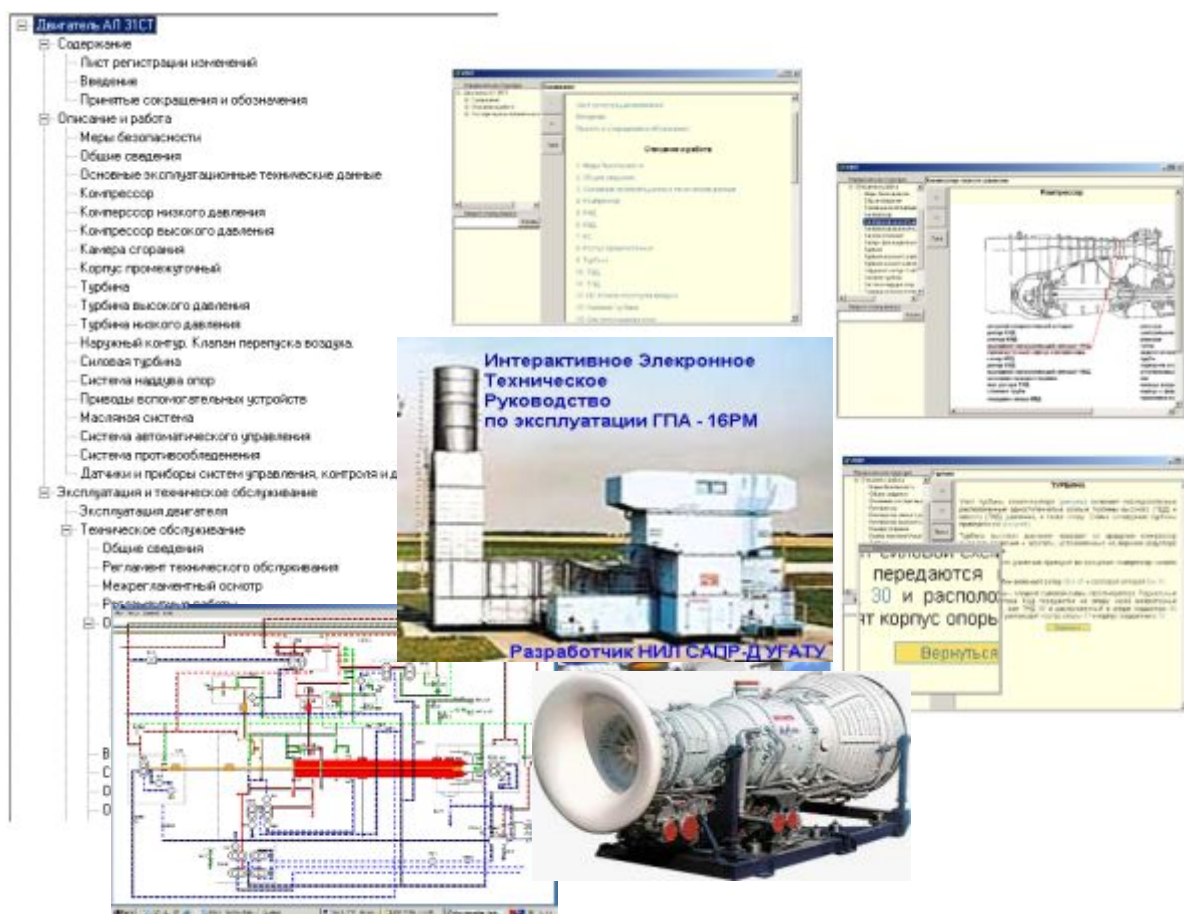


Рис. 7. Разработанное интерактивное электронное техническое руководство по эксплуатации газотурбинного привода АЛ-31СТ



С учётом всех этих тенденций разработанные методы и средства позволяют моделировать и автоматизировать проектирование как лопаточных машин и других узлов, так и авиационных ГТД в целом, подбирать и оптимизировать их параметры и характеристики и тем самым обеспечить разработку двигателей V и VI поколения, организовывать их ППО (последпродажное обслуживание) и при этом обеспечить экономию ресурсов – времени, труда, материалов и энергии. Для этого

НИИ САПР-Д кафедры авиационных двигателей Уфимского государственного авиационного технического университета предлагает сотрудничество промышленным, проектным, научным и учебным организациям в области внедрения CALS и ИПП-технологий в двигателестроении и наземном использовании ГТУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РФ.

### **Библиографический список**

1. Работы ведущих авиадвигательностроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / под общей редакцией В.А. Скибина, В. И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.

2. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М., Кузьмичев В.С. Проектный термогазодинамический расчёт основных параметров авиационных лопаточных машин. Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. 2006. 316 с.

3. Ольштейн Л.Е., Процеров В.Г. Метод расчёта осевого компрессора по данным продувок плоских решёток // Труды

ЦИАМ. № 150 с.п. М.: Бюро Новой Техники, 1948. 64 с.

4. Кривошеев И.А., Рожков К.Е. Развитие методов анализа и расчёта характеристик решёток профилей осевых компрессоров // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 2(61). С. 26-32.

5. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Преимущества использования подвижных, лагранжевых сеток при численном моделировании течений сплошных сред // Авиационно-космическая техника и технология. 2000. Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. С. 88-92.

### **Информация об авторах**

**Кривошеев Игорь Александрович**, доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: [krivosh@sci.ugatu.ac.ru](mailto:krivosh@sci.ugatu.ac.ru). Область научных интересов: исследования в области информационных технологий в двигателестроении.

**Кожин Дмитрий Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент ка-

федры авиационных двигателей, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: [dima\\_ko@mail.ru](mailto:dima_ko@mail.ru). Область научных интересов: исследования в области информационных технологий в двигателестроении, создание универсальных технологий имитационного моделирования сложных технических объектов.

## **DEVELOPMENT OF METHODS OF MODELING AND COMPUTER AIDED DESIGN OF GAS TURBINE ENGINES**

© 2014 I. A. Krivosheev, D.G. Kozhinov

Ufa State Aviation Technical University

Methods of computer-aided design and modeling of GTE are discussed. The results of development of a universal, open technology for simulation of sophisticated technical objects are described. The proposed technology allows solving simulation tasks for modeling the performance of aircraft engines as a part of an aircraft. Other technical objects successfully simulated using this technology, include power plants of various types. The experience of automated selection of construction layout of gas turbine engines is shown. Co-modeling of gas turbine engine and its automated control system is described. The research was conducted using domestic PLM and CAD/CAE systems, such as SPRAD, Stalker, and a number of other applications for technological design of parts and components of gas turbine engines. The effectiveness of combining the functionality of the multi-level simulation with the means of CAD/CAE/PLM systems is shown. Shown use DVIG at seminatural simulation TVVD (D-27) and its ACS. A method for obtaining the characteristics of compressors, using the developed simulation systems blade rows, steps, compressors and dvigateley.V including new approaches to the design of turbomachinery (tracking method jets - ISO). Shows the results of the development of LSI components for the organization Operation Support GTD to-date. In particular, it is described developed IETM (Interactive Electronic Technical Manual) Operating GTR (gas turbine drive) AL-31ST used in Gazprom at compressor stations.

*Automated design, GTE simulation, CAD/CAE/PLM technologies.*

### **References**

1. Raboty vedushchikh aviadvigatelestroitel'nykh kompanii po sozdaniyu perspektivnykh aviatsionnykh dvigatelei (analiticheskii obzor) [Works of leading aircraft engine companies to develop advanced aircraft engines (analytical review) / ed. by V.A. Skibin and V.I. Solonin]. Moscow: CIAM, 2004. 424 p.
2. Belousov A.N., Musatkin N.F., Radko V.M., Kuzmichev V.S. Proektnyi termogazodinamicheskii raschet osnovnykh parametrov aviatsionnykh lopatochnykh mashin [Thermo gas dynamic design calculation of the basic parameters of aviation turbomachinery]. Samara: Samara St. Aersp. Univ. Publ, 2006. 316 p.
3. Olshtein L.E., Protcerov V.G. Method of calculation of the axial compressor according to air tunnel blowing of planar grids // Trudy CIAM. Iss. 150. Moscow: Byuro Novoy Tekhniki Publ., 1948. 64 p. (In Russ.)
4. Krivosheev I.A., Rozhkov K.E. Development of methods for the analysis and calculation of cascade performances of axial-flow compressors // Vestnik of the Irkutsk State Technical University. 2012. No. 2(61). P. 26-32. (In Russ.)
5. Lapotko V.M., Kukhtin U.P. Benefits of using mobile, Lagrangian grids for numerical modeling of continuum flows // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2000. Vypusk 19. Teplovy dvigateli i energoustanovki. P. 88-92. (In Russ.)

### **About the authors**

**Krivosheev Igor Alexandrovich**, Doctor of Science (Engineering), professor at Ufa State Aviation Technical University. E-mail: krivosh@sci.ugatu.ac.ru. Area of Research: information technologies in aircraft and rocket science, including computer-aided design, mathematic modeling, and lifecycle management.

**Kozhinov Dmitry Grigorievich**, Candidate of Science (Engineering), associate professor at Ufa State Aviation Technical University. E-mail: dima\_ko\_@mail.ru. Area of Research: modeling of aircraft engines, software development, and artificial intelligence.