

УДК 621.452.3
Код ГРНТИ 55.42.47

doi 10.54708/19926502_2026_30111110

Цифровой двойник ГТД как новый уровень возможностей моделирования

Д.А. Ахмедзянов*, А.Е. Кишалов, А.В. Суханов

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, Россия

Аннотация. В статье описано современное состояние информационных технологий в авиадвигателестроении, показано, что цифровой двойник газотурбинного двигателя (ГТД) – единая обучаемая цифровая система, которая включает в себя комплекс методик и математических моделей, описывающих двигатель на протяжении всего его жизненного цикла: проектирование, испытания, производство и эксплуатация. Показана возможность использования разработанных методов и средств для автоматизированного проектирования, подбора параметров, материалов и конструкции, анализа программ управления авиационными ГТД на ранних стадиях разработки, для отладки двигателей при испытаниях, для диагностики и оценки состояния газотурбинной энергетической установки (на базе ГТД).

Ключевые слова: цифровой двойник газотурбинного двигателя, автоматизированное проектирование, моделирование, этапы жизненного цикла.

*akhmedzyanov@yandex.ru

Введение

В последние годы отрасль авиационного двигателестроения трансформируется в связи с развитием информационных технологий. Особенно заметные изменения произошли за последние 4–5 лет в связи с реализацией государственной политики в области информационных технологий в различных отраслях народного хозяйства в рамках национальной программы «Цифровая экономика РФ». Сегодня в процессе создания новых газотурбинных двигателей активно используются передовые цифровые решения, в частности автоматизированные системы проектирования, производства, диагностики газотурбинных двигателей. Вектор развития двигателестроительной отрасли страны направлен на проектирование конкурентоспособных на мировом уровне продуктов как в военной, так и в гражданской сферах.

Одним из наиболее перспективных направлений с учетом опыта зарубежных стран в области создания высокотехнологичной наукоемкой продукции является подход на базе цифровых двойников изделий [1]. Концепция цифрового двойника предполагает создание представления системы из двух систем, взаимодействующих друг с другом: физической системы и виртуальной, включающей всю информацию о физической системе. Ключевым моментом является постоянное взаимодействие этих систем через обратную связь (обмен информацией), что позволяет отображать состояние в реальном времени состояние физической системы в виртуальной и наоборот. Такой подход в области двигателестроения открывает широкий спектр возможностей его применения, начиная с этапа проектирования изделия и заканчивая его утилизацией, охватывая весь жизненный цикл.

1. Цифровой двойник ГТД как новый уровень возможностей моделирования

Ведущие авиадвигателестроительные фирмы поставили задачу существенно снизить срок разработки двигателей, что требует в том числе повышения эффективности проектирования и упреждающей отработки новых технологических решений и технологий с подтверждением их эффективности при испытаниях узлов. Большая часть эксплуатационных показателей закладываются на стадиях концептуального проектирования и эскизной компоновки [2].

Развитие математического моделирования и рост вычислительных мощностей приводит к все большему внедрению на всех этапах жизненного цикла авиационных ГТД цифровых технологий и связанных с ними подходов [1, 3].

Цифровой двойник [1] – это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и его составными частями. Цифровая модель изделия состоит из взаимоувязанных компьютерных моделей разного уровня детализации (0D, 1D, 2D, 3D). Цифровой двойник может быть рассмотрен как объект и как технология проектирования.

К цифровому двойнику как к технологии предъявляется большое количество требований [4]:

- двойник должен содержать в себе данные основных этапов жизненного цикла изделия (таких, как проектирование, производство, испытания, эксплуатация);
- располагаться в едином информационном пространстве, обеспечивающем коллективную работу специалистов над одним изделием с разным уровнем доступа;
- обеспечение требуемого уровня точности и соответствия используемых математических моделей реальным физическим объектам;
- должен позволять отслеживать историю создания и развития изделия и его компонентов на протяжении всего жизненного цикла.

Цифровая модель изделия (согласно ПНСТ 928-2024 [5]) – это система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям. В *рекомендуемый* состав составной части цифрового двойника авиационного ГТД для сопровождения проектирования могут входить компьютерные модели:

- для анализа основных термодинамических параметров ГТД;
- анализа аэродинамических и газодинамических характеристик основных узлов ГТД;
- анализ прочности и ресурса ДСЕ ротора и статора;
- САУ и ее элементов;
- анализа процесса горения в камере сгорания;
- работы двигателя в МСА;
- междисциплинарные и имитирующие работу группы узлов.

В современной промышленной политике технологии цифровых двойников, а также средства компьютерного проектирования и моделирования являются ключевыми инструментами при решении задач по обеспечению выхода продукции на глобальные международные рынки [3, 6]. Информационные технологии в двигателестроении имеют существенный потенциал развития. Именно поэтому в рамках государственной и корпоративной политики предприятий этому вопросу уделяется особое внимание. Государственная национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» содержит федеральный проект «Цифровые технологии», ключевой целью которого является обеспечение технологической независимости, возможности коммерциализации отечественных исследований и разработок, а также ускорение технологического развития российских компаний и обеспечение конкурентоспособности разрабатываемых ими продуктов и решений на глобальном рынке. Примером корпоративной политики развития информационных технологий может послужить концепция «Цифровой двойник» (Рис. 1). Данная концепция разработана в 2002 году профессором Мичиганского университета Майклом Гривсом для управления жизненным циклом изделия. Технология цифровых двойников отвечает как текущим запросам отрасли, так и формирует основу для долгосрочного технологического лидерства.

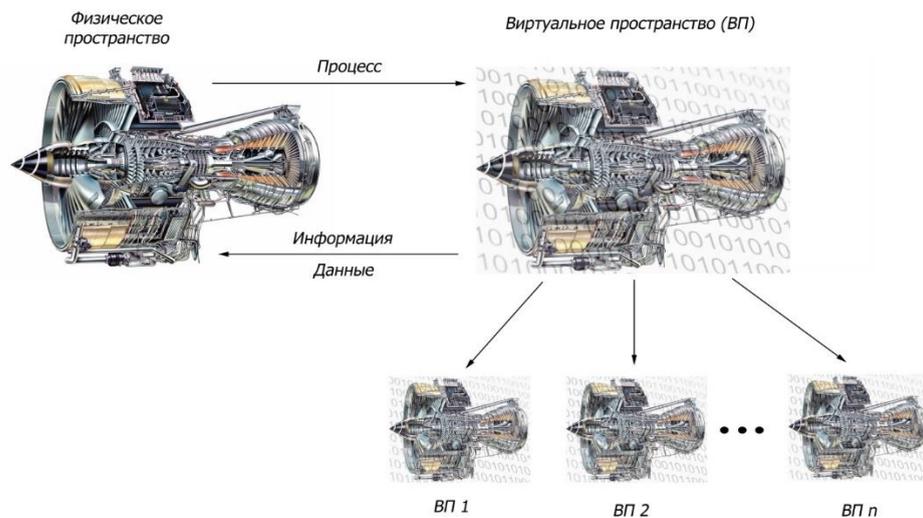


Рисунок 1. Концепция цифрового двойника.

Согласно концепции создания сложной наукоемкой продукции, к которой относится газотурбинный двигатель, наибольший интерес представляет создание цифрового двойника на этапах, требующих наибольшего интеллектуального потенциала, – этапах проектирования и доводки газотурбинного двигателя, а в процессе эксплуатации – диагностики неисправности в узлах ГТД. Причем особенный интерес представляет прогнозирование возникновения неисправностей либо отказов ГТД до их проявления на физическом объекте. Именно такую задачу и призван решить цифровой двойник в глобальном аспекте своего существования.

Цифровой двойник в целом выступает как интегрированная система, которая охватывает все этапы жизненного цикла изделия, на каждом из которых создается модель изделия либо процесса, начиная с идеи и заканчивая утилизацией изделия. Целевая модель вида жизненного цикла изделия в привязке к концепции цифрового двойника представлена на Рис. 2.

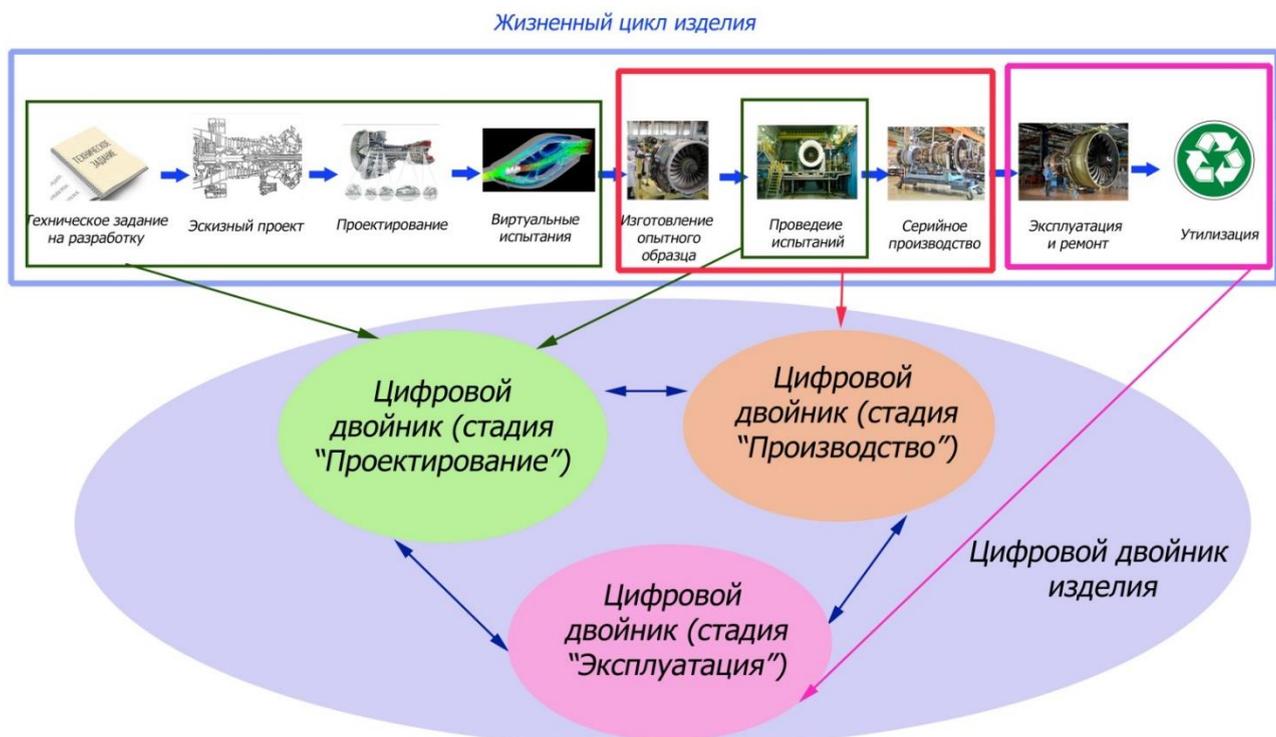


Рисунок 2. Концепция цифрового двойника в привязке к ЖЦ изделия.

Данная статья посвящена вопросу разработки цифровых моделей в области авиационного двигателестроения и наземных газотурбинных установок на их базе.

2. Автоматизированное проектирование, подбор параметров, материалов и конструкции авиационных ГТД на ранних стадиях разработки

При разработке газотурбинного двигателя критически важно обеспечить соответствие каждого узла заданным характеристикам при выполнении условий прочности на всех режимах эксплуатации. Основные эксплуатационные параметры определяются на стадиях концептуального проектирования и эскизной компоновки. Концептуальное проектирование – это начальный этап проектирования газотурбинного двигателя (ГТД), характеризующийся многовариантностью решений и наличием рисков, обусловленных значительной неопределенностью. В рамках концептуального проектирования разрабатываются и обосновываются выбор схемы, параметров рабочего процесса, законов управления и регулирования, формирование геометрии проточной части. Большинство задач, возникающих на этапе концептуального проектирования, относятся к задачам многокритериальной параметрической и структурной оптимизации.

Специфика обратных задач, решаемых при проектировании ГТД, в отличие от прямых задач заключается в том, что они имеют множество возможных решений, требуют значительных вычислительных ресурсов и обычно считаются аналитически неразрешимыми [7]. Для их корректного решения необходимы дополнительные условия и ограничения, что делает необходимой автоматизацию этапа концептуального проектирования и компоновки для оптимизации параметров и поиска компромисса между прочностью, весом, габаритами и показателями эффективности. Одной из основных задач, которую необходимо решить, чтобы обеспечить высокую степень совершенства современных ГТД, является интеграционная задача, то есть объединение данных отдельных структурных элементов в единое информационное пространство. Кроме того, параметры узлов должны быть согласованы между собой, что возможно при решении задач прочности и выбора материала деталей и сборочных единиц проточной части на этапе концептуального проектирования.

Для повышения эффективности проектирования двигателя предложен метод, в котором на ранних стадиях проектирования применяется разработанная система поддержки принятия решения (СППР), позволяющая на основании результатов термогазодинамического расчета производить автоматизированное проектирование конструкций основных элементов проточной части ГТД и ГТУ [6], определять теплонапряженное состояние основных деталей и на последующие стадии конструкторской проработки предоставлять рациональные варианты конструкции (Рис. 3).

СППР «АМ» разработана в MetaCAEP/FrameWork САМСТО на базе системы имитационного термогазодинамического моделирования авиационных двигателей DVIGw. СППР для выбора материалов основных элементов проточной части двигателя состоит из отдельных СЭ для прочностного анализа основных элементов газовоздушного тракта двигателя и процедурных СЭ для выбора материалов деталей и сборочных единиц его узлов. На Рис. 5 представлена топологическая модель современного ТРДДФсм с элементами СППР «АМ» [9].

В элементах СППР происходит проектирование облика конструкции моделируемого узла, определение действующих сил, напряжения и температурного состояния элементов (Рис. 4). Затем процедурные СЭ обращаются к БД материалов (или БД КМ), получают информацию о свойствах и характеристиках материала. В БД содержатся свойства более 380 различных материалов для основных деталей и сборочных единиц авиационных двигателей. В БД КМ содержится информация в семи наиболее часто употребляемых в конструкции авиационных двигателей волокон и семи вариантов матрицы, что позволяет анализировать сорок девять различных КМ, свойства которых изменяются в зависимости от коэффициента армирования и от температуры КМ (по оценке СППР).

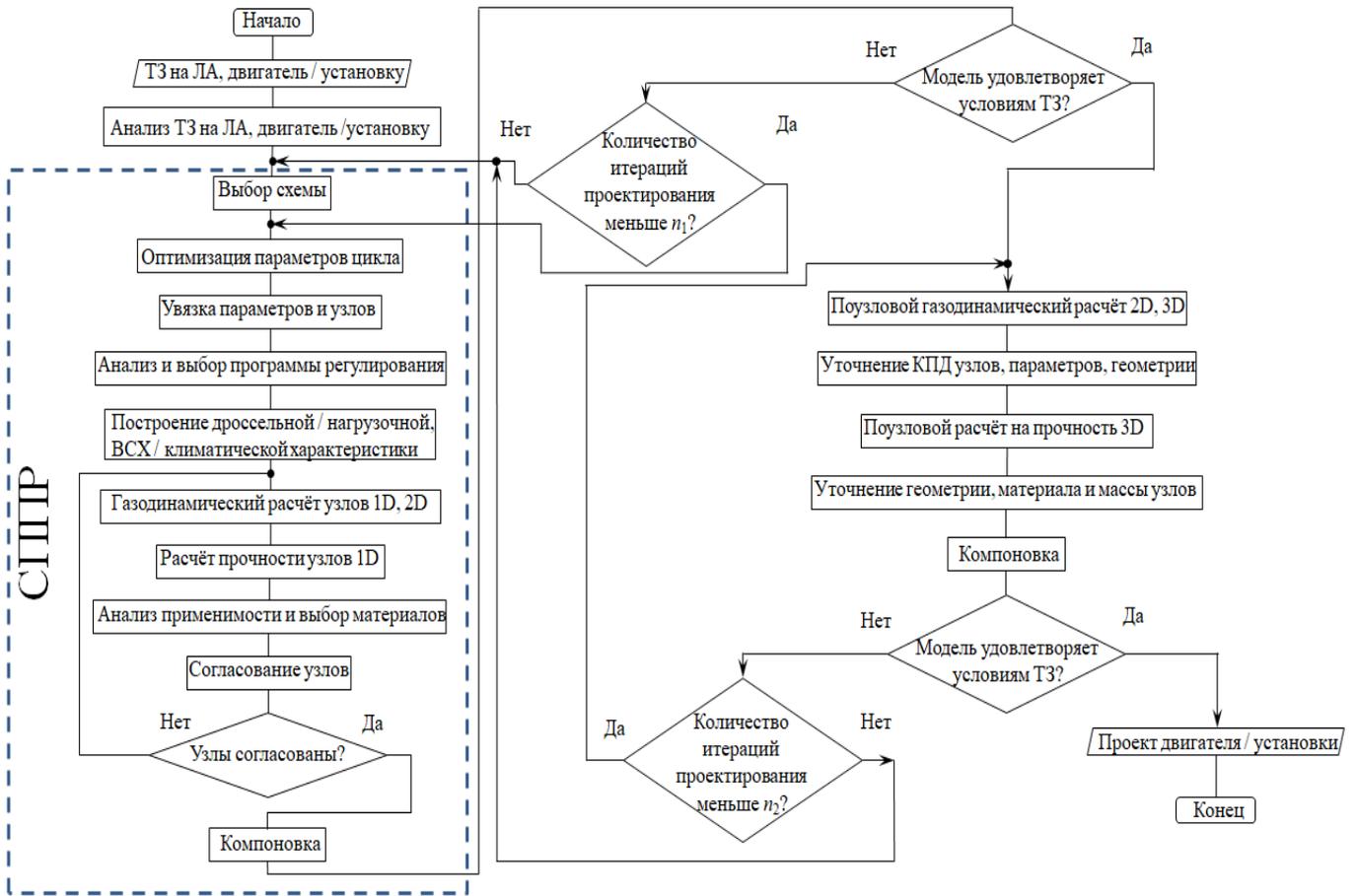


Рисунок 3. Блок-схема комплекса методов проектирования ГТД и ГТУ.

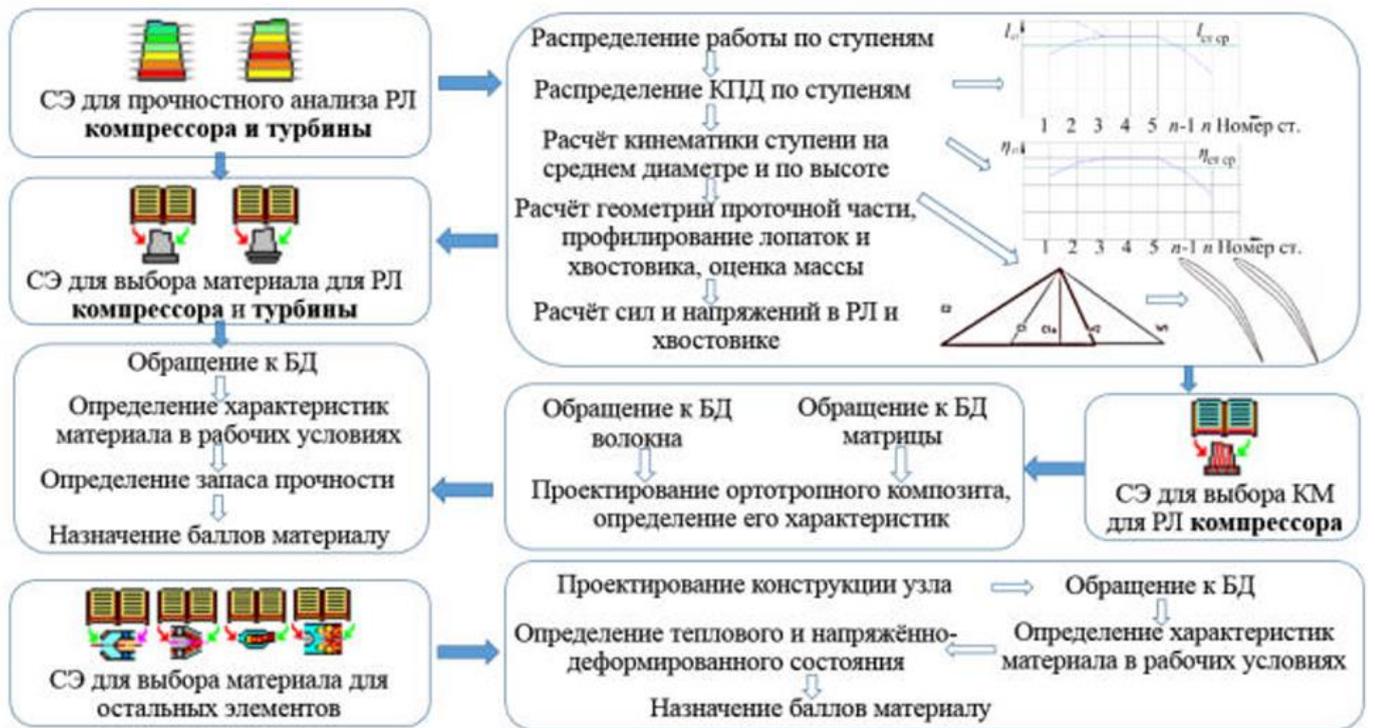


Рисунок 4. Графическое описание математической модели СППР.

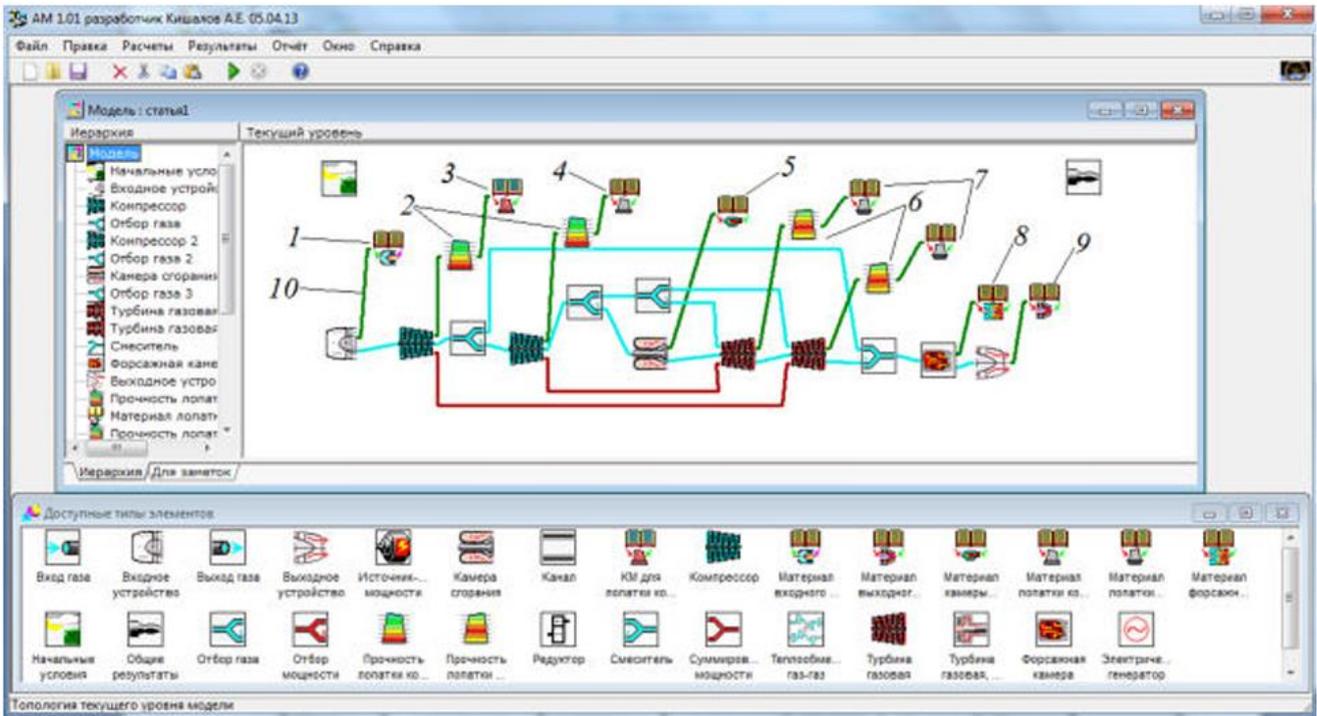


Рисунок 5. Топологическая модель ТРДДФсм в СИМ и СППР АМ:

- 1 – СЭ для выбора материала ВУ; 2 – СЭ для прочностного анализа РЛ компрессора;
- 3 – СЭ для выбора КМ для РЛ компрессора; 4 – СЭ для выбора материала РЛ компрессора;
- 5 – СЭ для выбора материала корпуса и ЖТ основной КС; 6 – СЭ для прочностного анализа РЛ турбины;
- 7 – СЭ для выбора материала РЛ турбины; 8 – СЭ для выбора материала корпуса и ТЭ ФК; 9 – СЭ для выбора материалов выходного устройства;
- 10 – информационный поток между СЭ.

При моделировании перебираются различные варианты конструктивного исполнения различных узлов и анализируются их характеристики [10]. В результате расчета формируется таблица рассмотренных вариантов конструктивного исполнения и рекомендуемые к применению материалы основных деталей и сборочных единиц (Рис. 6).

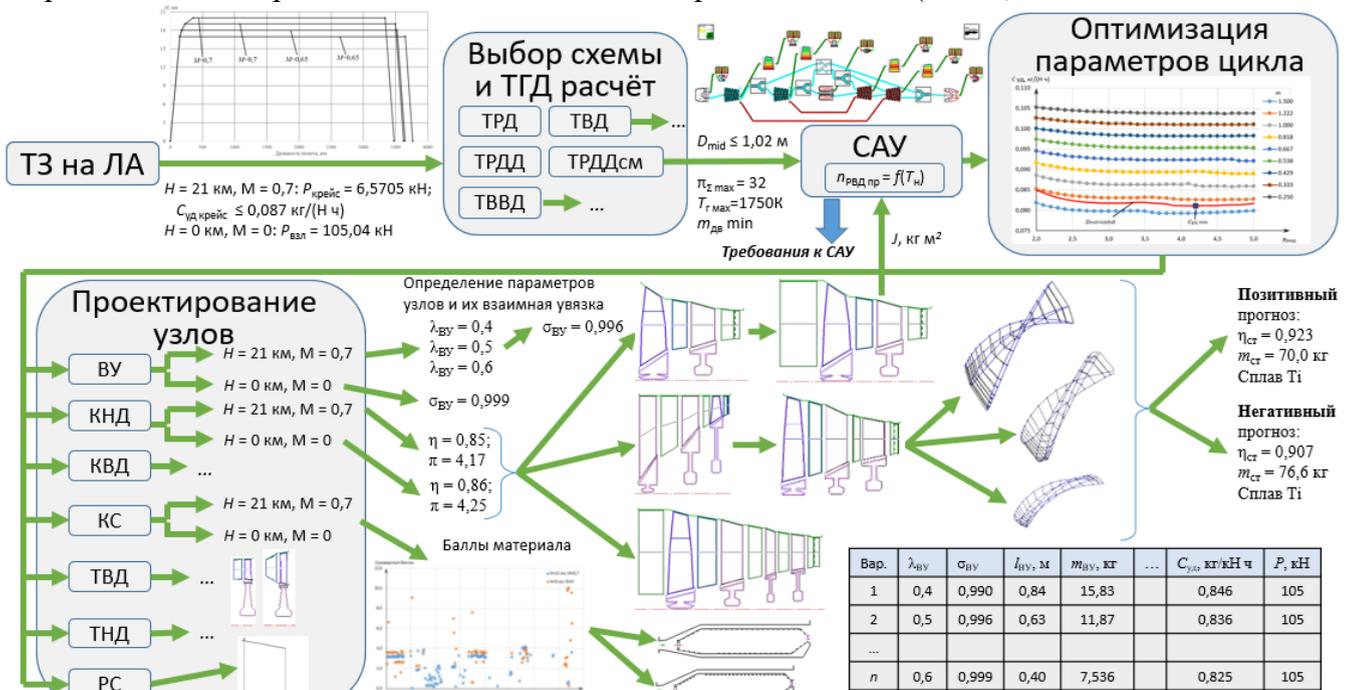


Рисунок 6. Пример проектирования конструкции узлов ТРДД и выбора материалов его основных деталей и сборочных единиц.

3. Элемент цифрового двойника двигателя и САУ

Моделирование двигателя в различных режимах работы невозможно без учета налагаемых на двигатель ограничений (частоты вращения роторов, температуры газов перед и за турбиной, давления на входе в КС и т.п.). То есть моделировать работу двигателя без работы его САУ невозможно. В разных режимах работы и разных режимах полета управление и регулирование двигателем осуществляется по различным законам. САУ двигателя осуществляет переключение с закона на закон, обеспечивая надежную и устойчивую его работу во всем эксплуатационном диапазоне режимов.

Практика разработки современных газотурбинных двигателей показала, что роль переходных процессов в обеспечении таких важных показателей, как газодинамическая устойчивость, управляемость, диапазон и темпы изменения тяги, величина и длительность возможного превышения допустимых уровней температуры, давления газа и частоты вращения роторов крайне высока. Динамические характеристики двигателей являются одними из наиболее важных факторов, которые необходимо учитывать уже на стадии проектирования при определении рабочих режимов, при распределении работ по каскадам компрессора многовальных ГТД, при выборе законов управления и методов контроля. Анализ переходных процессов и их влияния на динамические характеристики двигателя является обязательным элементом проектирования, напрямую определяющим надежность, эффективность и безопасность эксплуатации газотурбинного двигателя.

Для моделирования авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок в термогазодинамическом аспекте с учетом воздействия его САУ разработана система имитационного моделирования Dvig_Otladka2 (разработана в MetaСАПР/FrameWork САМСТО на базе системы имитационного термогазодинамического моделирования АД DVIGwp). При моделировании переходных процессов применяется квазистационарная подстановка, при которой предполагается, что характеристики основных узлов не изменяются, но при этом учитываются динамические характеристики ротора и элементов системы регулирования. На Рис. 7 приведены структурные элементы системы Dvig_Otladka2 и реализуемые программы регулирования.

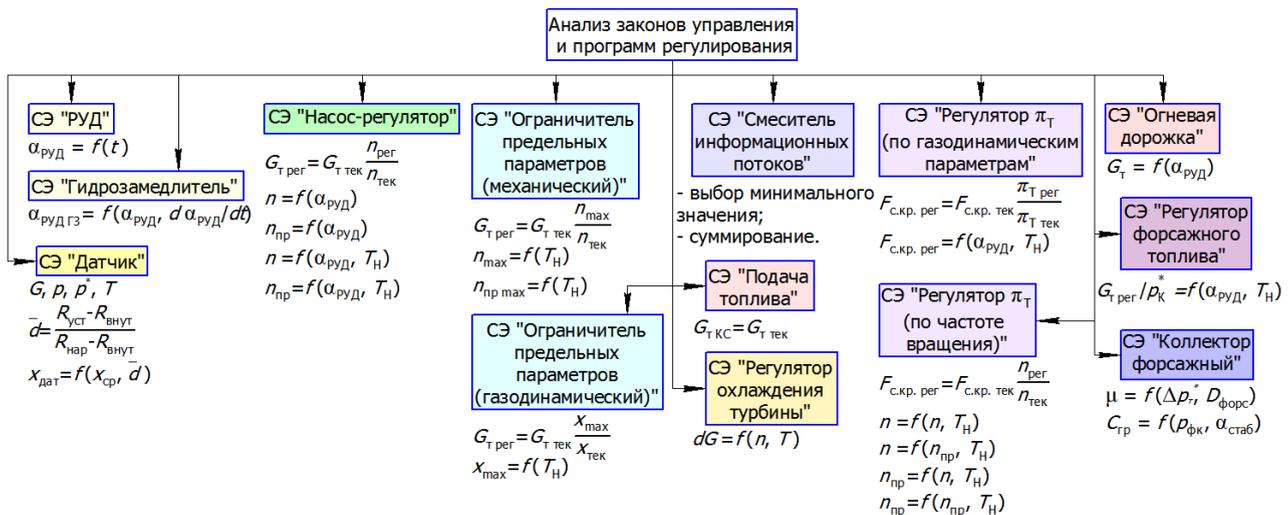


Рисунок 7. Структурные элементы системы Dvig_Otladka2 и реализуемые программы регулирования.

На Рис. 8 приведена схема двухвального ТРДФ, в которой можно наблюдать пример реализации подхода, при котором модель двигателя в термогазодинамическом аспекте дополнена структурными элементами (СЭ), имитирующими действие автоматики. В ней при помощи набора СЭ, описывающих элементы САУ, реализованы следующие законы: поддержание режима (частоты вращения ротора высокого давления) насосом регулятором; управление критическим сечением сопла регулятором ПиТ (по газодинамическим

параметрам); управление расходом топлива в ФК регулятором форсажного топлива и четырьмя форсажными коллекторами; розжиг ФК «огневой дорожкой».

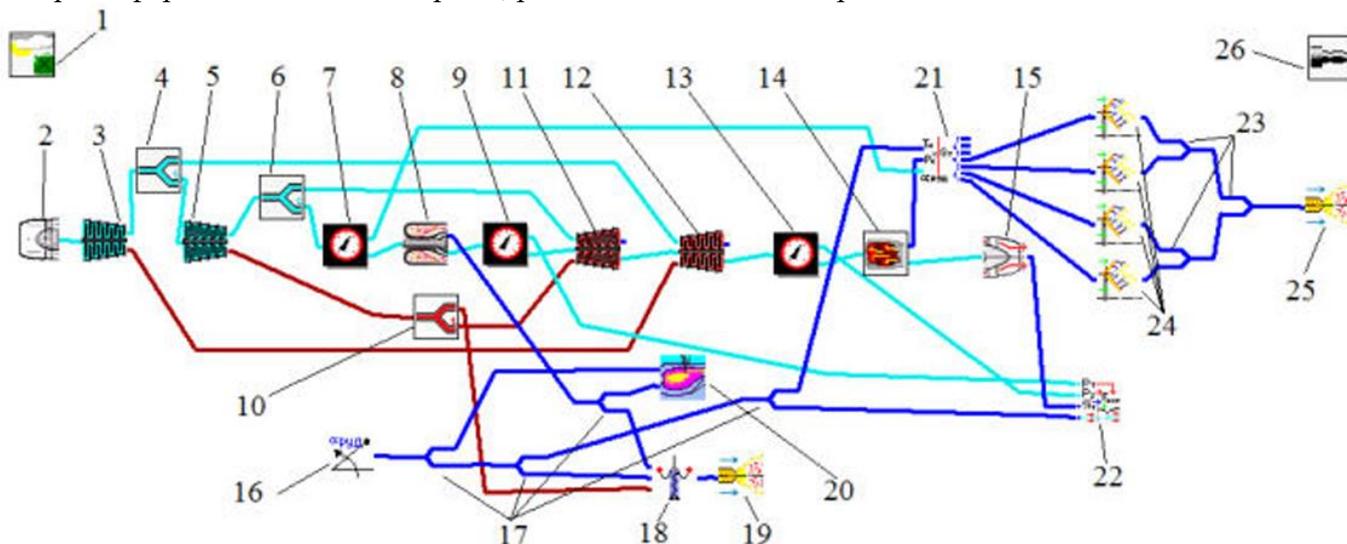


Рисунок 8. Топологическая структурная схема имитационной модели двухвального ТРД с элементами автоматики в системе DVIG_OTLADKA2: 1 – СЭ «Внешние условия»; 2 – СЭ «Входное устройство»; 3 – СЭ «КНД»; 4, 6 – СЭ «Отбор газа»; 5 – СЭ «КВД»; 7, 9, 13 – СЭ «Датчик»; 8 – СЭ «КС»; 10 СЭ «Отбор мощности»; 11 – СЭ «ТВД»; 12 – СЭ «ТНД»; 14 – СЭ «ФК»; 15 СЭ «РС»; 16 – СЭ «РУД»; 17 – СЭ «Разветвитель информационных потоков»; 18 – СЭ «Насос-регулятор»; 19, 25 – СЭ «Подача топлива»; 20 – СЭ «Огневая дорожка»; 21 – СЭ «Регулятор форсажного топлива»; 22 – СЭ «Регулятор ПиТ (по газодинамическим параметрам)»; 23 – СЭ «Смеситель информационных потоков»; 24 – СЭ «Коллектор форсажный»; 26 – СЭ «Общие результаты».

На Рис. 9 и 10 приведены некоторые результаты моделирования переходного процесса включения форсажа для двигателя семейства АЛ-31Ф. Переходный процесс начался на 5,8 с ($\alpha_{руд}$ переведен с режима Максимал на режим Полный Форсаж).

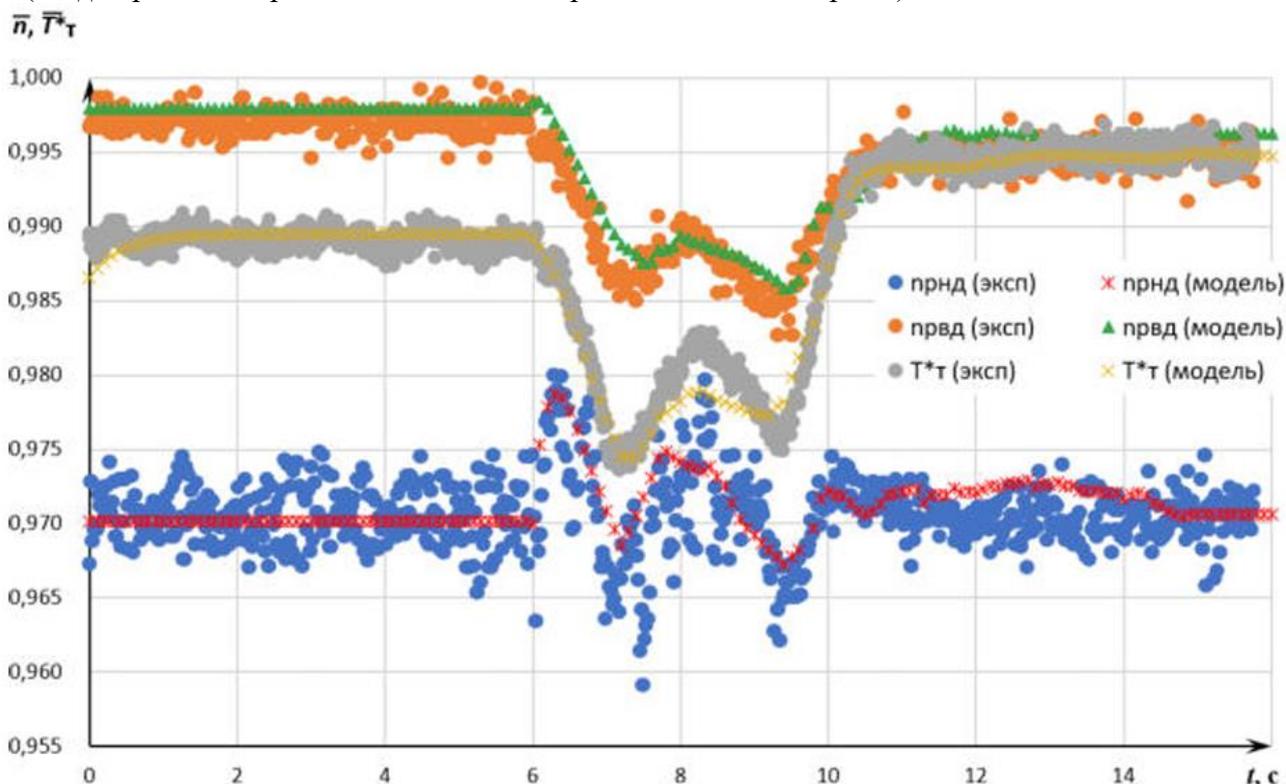


Рисунок 9. Изменение относительных частот вращения РНД, РВД и T^*_t .

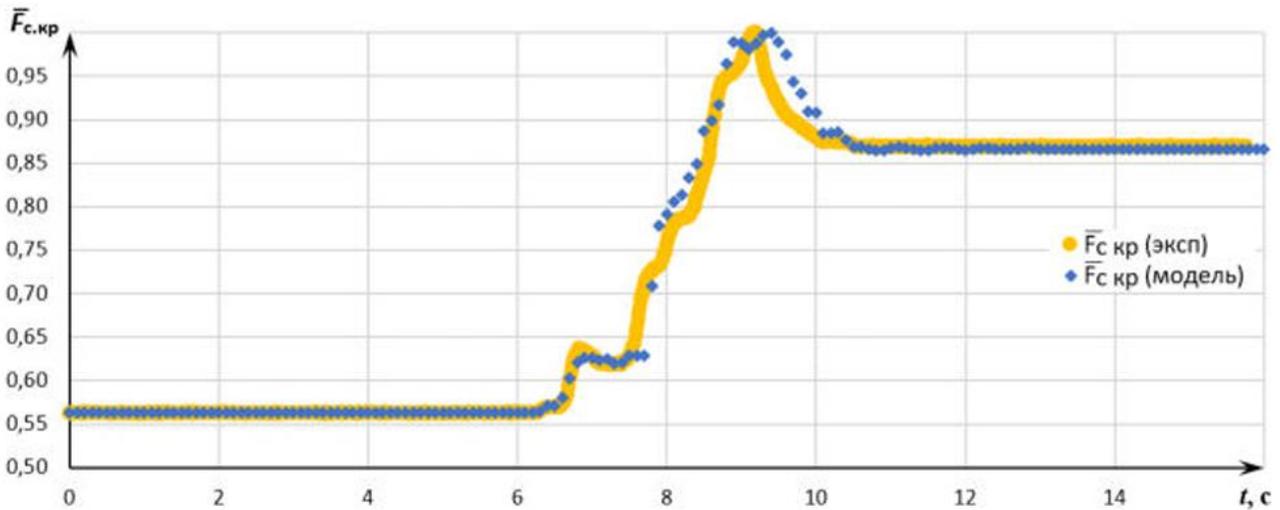


Рисунок 10. Изменение относительной $F_{с.кр}$ во времени.

Благодаря тому, что на начальном этапе исследования данная модель двигателя была идентифицирована на режимах М и ПФ, среднее расхождение параметров на установившемся режиме при моделировании переходного процесса не превышает 0,1%. В переходном процессе расхождение моделирования не превышает 5%, хотя разброс экспериментальных точек составляет порядка 1%. Достаточно высокая точность моделирования позволяет говорить об этой модели как о элементе цифрового двойника изделия.

4. Диагностика и оценка состояния ГТЭУ (на базе ГТД)

Современные параметрические системы диагностики ориентированы на фиксацию выхода какого-либо параметра газотурбинного двигателя или газотурбинной установки (ГТУ) за допустимые границы (уставки). При этом вопрос оценки и прогнозирования развития отклонения параметра внутри диапазона не рассматривается. Между тем, отклонение параметра (или комплекса параметров) может служить диагностическим признаком неисправности узла. Алгоритмы отслеживания и распознавания отклонения комплекса параметров и их внедрение в автоматизированную систему диагностики ГТД и ГТУ могут значительно повысить их надежность и увеличить срок эксплуатации.

Одним из решений может стать алгоритм диагностики, основанный на сравнении математической модели, уточняемой в ходе эксплуатации с реальным объектом и определении отклонений [11].

Основные принципы функционирования автоматизированной системы диагностики основаны на базе современных представлений о функционировании системы в рамках концепции «Цифровой двойник». При работе системы возможно создание полной копии изделия в системе имитационного моделирования, либо в SCADA-системе с вшитой в нее математической моделью ГТД или ГТУ. Взаимодействуя в процессе отладки и испытаний по результатам идентификации типовой математической модели формируется индивидуальная математическая модель ГТД. Автоматизированная система диагностики, выполняя анализ параметров индивидуальной математической модели:

- в процессе отладки формирует рекомендации о настройках параметров агрегатов;
- в процессе испытаний контролирует соответствие параметров изделия нормам, заложенным в технологической и конструкторской документации;
- в процессе эксплуатации контролирует соответствие параметров изделия нормам конструкторской документации с учетом оценки комплекса параметров, характеризующих наиболее опасные и часто встречающиеся дефекты.

Основным преимуществом такого подхода является наличие индивидуальной математической модели изделия на всех этапах жизненного цикла от первых

технологических испытаний до момента утилизации, который также может быть спрогнозирован автоматизированной системой диагностики и определен как совокупность параметров, при которых дальнейшая эксплуатация двигателя технически и экономически нецелесообразна.

Для практического внедрения алгоритма диагностирования ГТУ на базе ГТД предлагается использовать инструментарий экспертных систем (Рис. 11). Данное решение является оправданным в связи с наиболее простой реализацией в системе имитационного моделирования. Реализация включает в себе несколько этапов:

- анализ влияния отказов и дефектов узлов ГТД на термогазодинамические параметры;
- анализ взаимного влияния параметров узла с дефектом на параметры исправного узла;
- анализ набора взаимосвязанных параметров для определения наиболее вероятного местонахождения дефекта;
- разработка экспертной системы и формирование базы, включающей в себя возможные комбинации наборов термогазодинамических параметров и их взаимосвязь с возможными дефектами, возникающими в процессе доводки и эксплуатации изделия. Интеграция цифровых двойников и экспертных систем создает основу для качественно нового уровня диагностики.

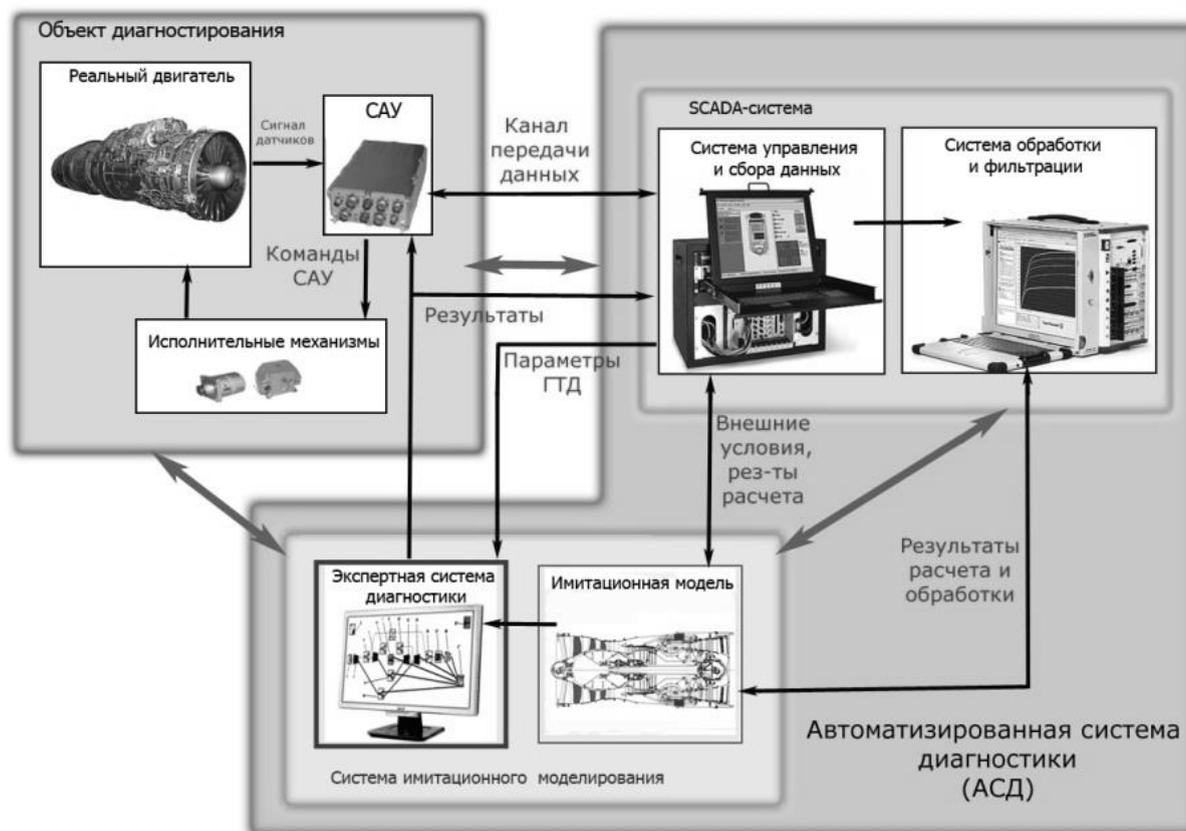


Рисунок 11. Функциональная модель АСД.

Заключение

Показана возможность повышения эффективности процесса проектирования газотурбинных двигателей и установок за счет разработки комплекса методов и средств для этапа концептуального проектирования. Разработанные методы и средства (для элемента цифрового двойника) адаптированы для автоматизации испытаний ГТД, в частности для отладки автоматики двигателя. Также показана возможность повышения эффективности параметрической диагностики промышленных газотурбинных установок на базе авиационных ГТД путем разработки автоматизированной системы диагностики и контроля испытаний.

Таким образом, цифровой двойник ГТД – это полезное новое понятие и перспективное решение, новый уровень возможностей моделирования и диагностики, представляющий собой единую цифровую систему, включающую в себя комплекс методов, средств и математических моделей, описывающих работу авиадвигателя в различных аспектах на протяжении всего его жизненного цикла: проектирование, испытания, производство и эксплуатация.

Литература:

1. Боровков А.И., Гамзикова А.А., Кукушкин К.В., Рябов Ю.А. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности: экспертно-аналитический доклад. М.: ИЦ «Технет» НТИ, 2019. 58 с. [Borovkov A.I., Gamzikova A.A., Kukushkin K.V., Ryabov Yu.A. Digital twins in the high-tech industry: expert-analytical report. Moscow: Infrastructure Center “Technet”, 2019. 58 p. (in Russian)].
2. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общей редакцией д. т. н. В. А. Скибина, к. т. н. В. И. Солонина. М.: ЦИАМ, 2004. 424 с. [Works of leading aircraft engine manufacturing companies on design of advanced aircraft engines (analytical review) / ed. by Dr. of Engineering Sciences V.A. Skibin, Cand. of Engineering Sciences V.I. Solonin. Moscow: CIAM, 2004. 424 p. (in Russian)].
3. Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. Цифровые двойники – платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 4(745). С. 60–72. [Salnikov A.V., Gordin M.V., Shmotin Yu.N., Nikulin A.S., Makarov P.V., Frantsuzov M.S. Digital twins – a platform for aircraft engine lifecycle management // BMSTU Journal of Mechanical Engineering. 2022. No. 4(745). P. 60–72 (in Russian)]. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72.
4. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с. [GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 10 p. (in Russian)].
5. ПНСТ 928-2024. Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники авиационных газотурбинных двигателей. Общие положения. [PNST 928-2024. Preliminary National Standard of the Russian Federation. Computer models and simulation. Digital twins of aviation gas turbine engines. General provisions]
6. Виноградов К.А., Никулин А.С., Шмотин Ю.Н. Опыт АО «ОДК» по внедрению технологий цифрового двойника при создании газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2023. Т. 22. № 4. С. 25–36. [Vinogradov K.A., Nikulin A.S., Shmotin Yu.N. JSC “ODK” experience in implementing digital twin technologies in the design of gas turbine engines // Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering. 2023. Vol. 22. No.4. P. 25–36 (in Russian)]. DOI: 10.18287/2541-7533-2023-22-4-25-36.
7. Ланшин А.И., Полев А.С. Анализ долгосрочных тенденций, ключевых научно-технических и технологических проблем и прогноз развития авиационных двигателей для летательных аппаратов 2030...2035 годов. В сб.: Авиационные двигатели и энергетические установки: сборник научных трудов / под ред. А.В. Луковникова. М.: ЦИАМ, 2020. С. 7–22. [Lanshin A.I., Polev A.S. Analysis of long-term trends, key scientific, technical and technological problems and forecast of development of aircraft engines for aircraft in 2030...2035. In: Aircraft engines and power plants: Collected scientific works / ed. by A.V. Lukovnikov. Moscow: CIAM, 2020. P. 7–22 (in Russian)].
8. Кишалов А.Е., Кислицын В.К. Развитие методологии цифрового проектирования ВРД // Авиационные двигатели. 2025. № 1(26). С. 101–111. [Kishalov A.E., Kislitsyn V.K.

Development of methodology for digital design of airbreathing jet engines // Aviation Engines. 2025. No. 1(26). P. 101–111 (in Russian)].

9. Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е. Автоматизация ранних стадий проектирования конструкции и анализ программ регулирования авиационных ВРД и наземных ЭУ // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25. № 4(94). С. 46–60. [Kishalov A.E., Akhmedzyanov D.A. Automation of the early stages of structural design and analysis of control programs for aircraft jet engines and ground-based power plants // Vestnik UGATU. 2021. Vol. 25. No. 4(94). P. 46–60 (in Russian)].

10. Кишалов А. Е. Автоматизированное проектирование авиационных ВРД на ранних стадиях разработки // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25. № 3(93). С. 18–33. [Kishalov A.E. Computer-aided design of aircraft air-jet engine at the early stages of development // Vestnik UGATU. 2021. Vol. 25. No 3(93). P. 18–33 (in Russian)].

11. Суханов А.В., Ахмедзянов Д.А. Выявление дефектов в узлах газотурбинных энергетических установок с использованием SCADA-технологий и имитационного моделирования // Вестник УГАТУ. 2023. Т. 27. № 1(99). С. 98–105. [Sukhanov A.V., Akhmedzyanov D.A. Parametric diagnostics and assessment of the state of gas turbine power plants using scada-technologies and imitation modelling // Vestnik UGATU. 2023. Vol. 27. No. 1(99). P. 98–105 (in Russian)].

Об авторах:

АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович, д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007), проф. каф. авиац. двигателей, декан ФАДЭТ, УУНиТ, Россия. Иссл. в обл. раб. процессов в авиац. ГТД, автоматизации испытаний, разработки мат. моделей сл. техн. объектов, САПР авиац. ГТД. Email: akhmedzyanov@yandex.ru.

КИШАЛОВ Александр Евгеньевич, канд. техн. наук по тепловым, электроракетным двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов (УГАТУ, 2010). доц. каф. авиационных двигателей УУНиТ, Россия. Иссл. в обл. рабочих процессов в авиационных ГТД на установившихся и неуставившихся режимах, разработки математических моделей сложных технических объектов, автоматизированное проектирования. Email: kishalov@ufanet.ru.

СУХАНОВ Андрей Владимирович, старший препод. каф. АД, УУНиТ, Россия. Исследования в обл. параметрической диагностики и оценки состояния газотурбинных энергетических установок с использованием SCADA-технологий и имитационного моделирования, в области цифровых двойники. Email: flyer.88@mail.ru.

Metadata:

Title: Digital twin of a gas turbine engine as a new level of modeling capabilities.

Author 1: Dmitry Albertovich Akhmedzyanov, Dr. of Technical Sciences, Professor, Dean of Faculty of Aircraft Engines, Energy and Transport, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: akhmedzyanov@yandex.ru.

Author 2: Alexander Evgenyevich Kishalov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: kishalov@ufanet.ru.

Author 3: Andrey Vladimirovich Sukhanov, Senior Lecturer of the Department of Aircraft Engines, Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia, Email: flyer.88@mail.ru.

Abstract: The article describes the current state of information technology in the aircraft engine industry, and shows that the GTD digital twin is a single learnable digital system that includes a set of techniques and mathematical models that describe an engine throughout its entire life cycle: design, testing, production, and operation. The possibility of using the developed methods and tools for computer-aided design, selection of parameters, materials and structures, analysis of control programs for aviation GTE at the early stages of development, for debugging engines during testing, for diagnostics and assessment of the condition of GTEU (based on GTE) is shown.

Keywords: GTE digital twin, automated design, modeling, life cycle stages.