

УДК 621.452.3:004

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГТД НА БАЗЕ SCADA-ТЕХНОЛОГИЙ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. А. КРИВОШЕЕВ¹, А. В. СУХАНОВ²

¹krivosh@sci.ugatu.ac.ru, ²flyer.88@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 11.11.2013

Аннотация. В работе выполнена разработка алгоритмической компоненты средств интегрированной логистической поддержки (ИЛП) диагностики состояния ГТД на основе идентификации его имитационной модели (ИМ) по результатам контроля с использованием SCADA при системном проектировании и эксплуатации ГТД.

Ключевые слова: автоматизация; SCADA-технологии; газотурбинный двигатель; имитационное моделирование.

В настоящее время при разработке современных газотурбинных двигателей необходимо использовать все новейшие достижения как отечественного, так и зарубежного авиастроения. В практике создания ГТД важное место занимает доводка, состоящая в проведении испытаний и последующем внесении изменений в конструкцию двигателя, а также настройке его автоматики. Кроме того, в производстве двигателей важное место занимают приемосдаточные испытания (ПСИ). Для эффективного поведения этих работ требуется автоматизация испытаний с использованием современных программных и аппаратных средств SCADA.

В эксплуатацию системы научных исследований (СНИ) все активнее внедряются автоматизированные системы диагностики. Их функции, как правило, сводятся к определению выхода какого-либо параметра СНИ (например, газотурбинного двигателя – ГТД или газотурбинной установки (ГТУ) за допустимые границы (уставки) [1, 2]. При этом задача прогнозирования развития отклонения параметра внутри допустимого диапазона не рассматривается. Отклонение параметра (или комплекса параметров) может служить диагностическим признаком неисправности узла и СНИ в целом. При этом важно, чтобы параметр, принятый в качестве критерия, был действительно непосредственно связан с работоспособностью и надежностью СНИ. Кроме того, данный подход не позволяет сразу выявить структурный элемент (СЭ) СНИ (узел и т. д.), в котором произошел

отказ и установить причину отказа (внешний фактор, его вызвавший).

Внедрение алгоритмов отслеживания и распознавания отклонения комплекса параметров в автоматизированную систему диагностики СНИ (например, ГТД или ГТУ) позволяет существенно повысить их контролепригодность и увеличить срок эксплуатации. В проекте разработан алгоритм диагностики, основанный на сравнении имитационной модели, уточняемой в ходе эксплуатации с реальным объектом (СНИ) и определении отклонений.

При этом проанализированы подходы к решению задач технической диагностики с использованием инструментария математического моделирования. В работе рассматривается подход, основанный на использовании имитационных моделей, получающих информацию в режиме реального времени от объекта (СНИ) с помощью SCADA-системы. Реализация подобного подхода возможна при интеграции системы имитационного моделирования (поэлементная динамическая имитационная модель) ГТД со SCADA-системой. Рассмотрены варианты, когда (в соответствии со стандартом FADEC) блок диагностики включен в бортовую САУКД самолета, либо когда он используется в наземном диагностическом комплексе (послеполетная диагностика).

На рис. 1 представлена общая структура предложенной системы.

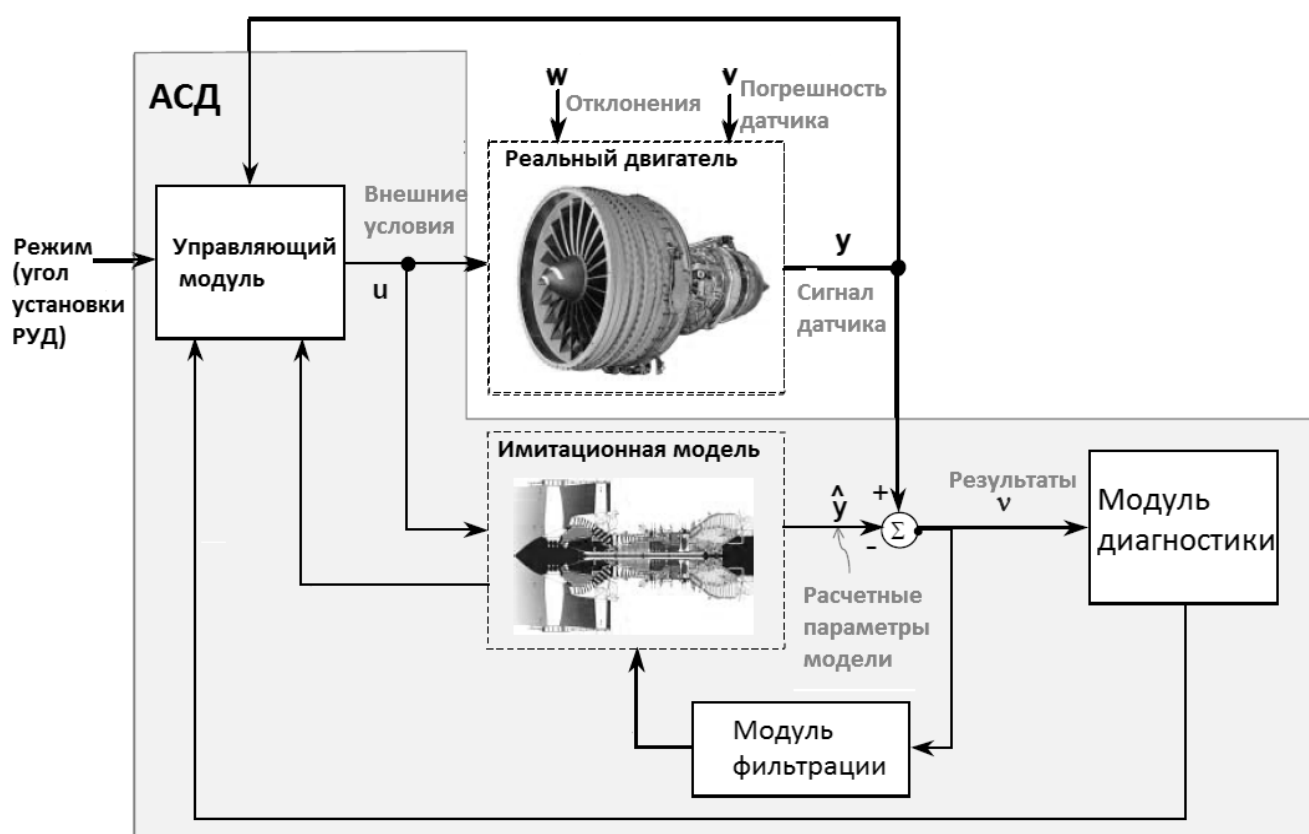


Рис. 1. Структурная схема системы автоматизированной диагностики СНИ (на примере ГТД) с использованием SCADA и имитационного моделирования

Автоматизированная система диагностики (АСД) с помощью SCADA-системы получает от объекта (СНИ) данные о режиме работы (для ГТД или ГТУ это угол установки РУД и параметры окружающей среды, такие как T_n , P_n , влажность и т. п.). Данные поступают в имитационную модель, которая рассчитывает все параметры на заданном режиме. Данные параметры сравниваются с реальными параметрами объекта, также опрашиваемыми SCADA-системой, и результаты сравнения поступают в модуль диагностики, в котором заложен алгоритм, определяющий наличие допустимых и недопустимых отклонений параметров.

Одновременно с этим, используя результаты сравнения, уточняется и имитационная модель. Все данные попадают в управляющий модуль, который анализирует полученную информацию, выдает предупреждения о возможных отказах и неисправностях и выдает команды на останов двигателя при аварийных ситуациях.

В опубликованной авторами работе [3] рассмотрена интеграция SCADA-системы LabView с системой имитационного моделирования

с целью повышения эффективности управления и диагностики состояния СНИ (в соответствии со стандартом FADEC). Изложенный подход реализован в проекте, что позволило получить индивидуальную модель ГТД по результатам испытаний, а также произвести ее уточнение. Предлагаемая система является логическим продолжением данной работы применительно к процессу диагностики СНИ (на примере ГТД) в процессе эксплуатации.

При испытаниях могут использоваться методы планирования экспериментов. Применение в работе таких подходов позволит сделать результаты еще более содержательными, а их использование – еще более удобным.

Для реализации алгоритма диагностирования внутри модуля диагностики предложено использовать инструментальный экспертных систем (ЭС). Данное решение является оправданным в связи с наиболее простой реализацией в системе имитационного моделирования. Реализация включает в себе несколько этапов:

- оценка влияния отказов и дефектов узлов СНИ (в данном случае ГТД) на его параметры (в данном случае термогазодинамические),

- оценка взаимного влияния параметров дефектного узла на параметры узла без дефекта;

- анализ набора взаимосвязанных параметров для определения наиболее вероятного местонахождения дефекта;

- разработка экспертной системы (ЭС), включающей в себя возможные комбинации наборов параметров СНИ (для ГТД прежде всего термогазодинамических параметров) и их взаимосвязь с возможными дефектами, возникающими в процессе доводки и эксплуатации изделия. Полученные в результате испытаний зависимости параметров друг от друга можно свести к многомерной функции (например, методом греко-латинских квадратов).

При этом проводится анализ причин отказов СНИ. Так, например, возникновение большинства дефектов в ГТД возможно в следующих случаях:

- Повреждение в результате попадания постороннего предмета на вход в двигатель. Возможны как риски, задиры, загибы кромок и поверхностей рабочих лопаток, так и их обрыв.

- Повышенная температура в узлах двигателя – камере сгорания, турбине, сопле. В результате воздействия высоких температур могут образоваться трещины и прогары.

- Превышение критической частоты вращения роторов двигателя.

- Износ в процессе эксплуатации, связанный с естественной выработкой ресурса.

- Загрязнение тракта двигателя в процессе эксплуатации.

- Некачественное изготовление (брак) деталей и сборочных единиц ГТД.

Проведенный анализ дефектов и отказов СНИ (на примере ГТД) позволил формализовать задачу создания экспертной системы (ЭС) для диагностики состояния СНИ. Использование результатов данного анализа, разработанной системы имитационного моделирования и предложенного алгоритма периодического уточнения имитационной модели СНИ – сначала путем ее идентификации по результатам испытаний, затем по результатам контроля параметров в эксплуатации, позволило реализовать алгоритмы работы экспертной системы, сформировать модуль диагностики (рис. 2), включающий SCADA-систему, систему имитационного моделирования (СИМ) и имитационную модель СНИ для комплексной автоматизированной системы диагностики СНИ (на примере ГТД).

При попадании на вход двигателя достаточно крупных посторонних объектов, как правило, возникают такие виды дефектов как выбоины и задиры на поверхности лопаток (рис. 2), трещины, образующиеся при взаимодействии лопатки с инородным предметом, загиб кромок и периферийных частей лопаток первых ступеней компрессора. Особо опасными дефектами являются трещины в корневом сечении лопаток, так как при дальнейшей эксплуатации двигателя они продолжают развиваться, что в конечном счете может привести к обрыву лопатки и, как следствие, помпажу.

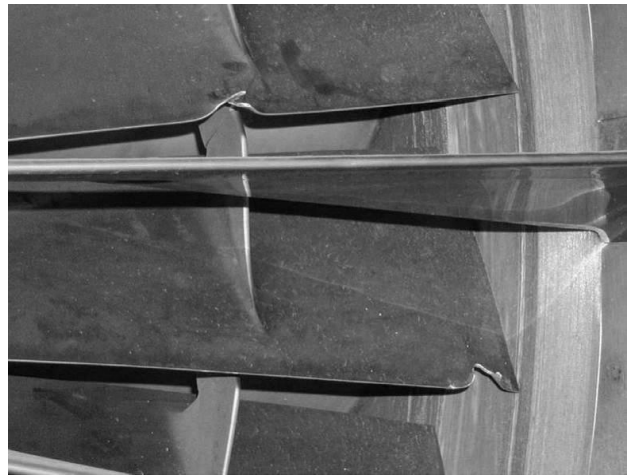


Рис. 2. Дефекты лопаток компрессора [4]

Данный вид дефектов, как правило, выявляется на стадиях визуального осмотра при предполетной подготовке или послеполетного обслуживания. Термогазодинамически отследить их затруднительно вследствие кратковременного незначительного изменения параметров двигателя при попадании сравнительно небольших объектов. Однако при возникновении значительной неисправности в компрессоре могут возникать следующие отклонения параметров от номинальных:

- возрастание температуры выхлопных газов на выходе из двигателя T_5 ;
- уменьшение степени повышения давления в компрессоре;
- изменение соотношения частот вращения роторов компрессоров высокого и низкого давления n_2/n_1 .

Повышение температуры газа в камере сгорания, турбине и сопле часто связано со сбоями в работе топливной системы двигателя, связанных с системой ее регулирования, а также возникающих при засорении форсунок нагаром. При этом могут возникнуть такие дефекты как прогары и трещины отсеков камеры сгорания,

сопловых и рабочих лопаток турбин высокого и низкого давления.

При превышении критических оборотов роторов двигателя велика вероятность повышенного износа в опорах ротора двигателя и, как следствие, заклинивание. Также возможно увеличение линейных размеров вращающихся узлов вследствие воздействия на них нерасчетных центробежных сил, что приведет к недопустимому соприкосновению со статором вращающихся узлов и выход их из строя, вплоть до отказа двигателя.

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что часть дефектов может быть обнаружена при контроле параметров рабочего цикла ГТД. В качестве показателей могут служить такие приведенные параметры как степень повышения давления в компрессоре, расход топлива, частота вращения роторов, температура газов на выходе из двигателя и угол РУД. Для оценки состояния механической части можно использовать параметры вибрации, а также расход и состояние масла. Этот набор является минимально необходимым для оценки состояния двигателя в эксплуатации и прогнозирования его дальнейшей работы.

Ниже приведен анализ отказов и дефектов узлов газотурбинного двигателя с целью выявления характерного набора термодинамических параметров, позволяющих однозначно определить узел двигателя, в котором проявился тот или иной дефект.

Снижение эффективного КПД компрессора может быть вызвано утечками и перетеканием воздуха в ступенях компрессора, заеданием клапана перепуска или не полным закрытием ленты перепуска воздуха. Это приведет к понижению степени повышения давления в двигателе. Для обеспечения требуемой степени повышения давления в компрессоре необходимо увеличить угол РУД, а следовательно, возрастет и расход топлива. Это повлечет за собой рост температуры газов на входе в турбину, мощности, развиваемой турбиной, и увеличение частоты вращения ротора турбины высокого давления (наблюдается увеличение температуры газов на выходе из двигателя, частоты вращения ротора компрессора высокого давления n_2 , расхода топлива G_T).

При загрязнении компрессора (рис. 3) также наблюдается снижение КПД. Загрязнение лопаток влияет на их геометрию, увеличивает шероховатость рабочей поверхности и уменьшает проходное сечение решетки профилей, а значит, уменьшается КПД ступеней компрессора и расход проходящего через него воздуха. Загрязне-

ние компрессора может быть результатом при эксплуатации двигателя в морских условиях (соль, повышенная влажность), использования при промывке двигателя неочищенной воды, замасливания первых ступеней компрессора, что приводит к налипанию мелкодисперсной пыли на поверхность лопаток. Как правило, загрязнение устраняется посредством продувки или промывки загрязненных ступеней. При снижении КПД компрессора для достижения требуемой степени повышения давления необходима избыточная мощность и повышение частоты вращения ротора, что влечет повышенный расход топлива и, следовательно, повышенную температуру на входе в турбину (наблюдается увеличение температуры на выходе из двигателя и частоты вращения ротора компрессора высокого давления n_2).



Рис. 3. Загрязнение лопаток ГТД солью [5]

Камера сгорания является наименее подверженным диагностике узлом вследствие особенностей конструкции и высоких температур в рабочей зоне. Все эксплуатационные дефекты элементов камер сгорания могут быть разделены на следующие группы [6].

1. Срыв пламени и прекращение горения топливо-воздушной смеси, например, вследствие резкого уменьшения расхода воздуха при помпаже компрессора или резкого уменьшения расхода топлива при падении давления топливоподдачи ниже допустимого значения.

2. Повреждения корпусов. Наблюдаются в основном усталостные повреждения.

Усталостные трещины чаще всего образуются в зонах сварных швов, фланцев для отбора воздуха, бобышек для крепления агрегатов. Усталостные повреждения возникают от действия вибраций при повышенных монтажных статических нагрузках, изменяющих расчетный характер нагружения при работе двигателя.

Встречаются случаи повреждения корпусов из-за их перегрева вследствие заброса горячих газов из жаровой трубы в кольцевой канал при отрицательном перепаде давления на стенках жаровой трубы. При разрушении корпуса основной камеры сгорания происходит резкое повышение давления в мотогондоле или фюзеляже ЛА, деформация и локальный перегрев конструкции. Факторами, способствующими разрушению корпусов камер сгорания, являются: остаточные напряжения в материале; повышение общей или локальной температуры в камере сгорания, снижающей прочность материала корпуса; наличие сварочных трещин и пор. Если повреждения и разрушения корпуса происходят в процессе эксплуатации вследствие повышенных вибрационных нагрузок, то они характеризуются следующими признаками:

- многоочаговый характер разрушения корпуса;
- массовые случаи усталостного разрушения трубопроводов подвода топлива к клапану запуска, пусковым блокам;
- разрушение фланца заднего корпуса компрессора, газосборника, внутренней обечайки камеры сгорания, элементов крепления корпуса камеры сгорания к сопловому аппарату турбины.

3. Повреждения жаровых труб. Проявляются в виде:

- трещин и деформаций термического происхождения;
- трещин усталостного характера между отверстиями для прохождения воздуха;
- трещин по сварным швам (в том числе в местах соединения секций жаровой трубы);
- короблений стенок жаровой трубы;
- прогаров стенок (рис. 4).

Возникновение и развитие повреждений жаровых труб при циклических изменениях температуры в значительной степени зависит от физико-механических характеристик используемых материалов: коэффициента теплопроводности, коэффициента термического расширения, предела длительной прочности. Возникновению повреждений жаровых труб способствует нагарообразование на стенках, особенно в области первичной зоны жаровой трубы и на форсунках.

Нагарообразование является следствием неполного сгорания топлива, определяется конструктивными особенностями жаровой трубы и отклонениями значений газодинамических параметров в отдельных областях зоны горения от расчетных. В результате неполного сгорания

частицы углерода осаждаются на поверхности газоздушного тракта, что приводит к изменению условий охлаждения отдельных участков камеры, их перегреву и прогару.



Рис. 4. Прогар жаровой трубы [6]

Повреждение жаровой трубы может также возникнуть из-за неравномерного нагрева стенок вследствие нарушения характера распыла топлива отдельными форсунками. Жаровая труба может служить источником вторичных разрушений. Даже при незначительных первичных разрушениях выпавшие кусочки жаровой трубы могут повредить лопатки и диск турбины, вызвать повышенные вибрации элементов конструкции ротора.

4. Повреждения трубопроводов подвода топлива. Наиболее часто повреждения трубопроводов, размещенных на корпусе двигателя, происходят в виде усталостного разрушения и в виде разгерметизации соединений трубопроводов (появления течи). При разрушении или негерметичности трубок и шлангов топливной системы, размещенных внутри проточной части, топливо может засасываться компрессором и попадать в камеру сгорания, вызывая в ней местное переобогащение смеси. Это приводит к затягиванию процесса выгорания, так что пламя омывает лопатки соплового аппарата, а в отдельных случаях выходит и в реактивное сопло.

5. Повреждения топливных форсунок и коллекторов. Проявляются в виде ухудшения распыла топлива, уменьшения его расхода вследствие коксования форсунок и коллекторов или их засорения (в результате попадания производственной стружки, применения недостаточно очищенного топлива, разрушения топливных фильтров). Нарушение характеристик распыла форсунок вызывает местный перегрев стенок камеры сгорания, что проявляется в выпучивании, растрескивании, повышенном окислении

материала стенки. Ухудшение распыла топлива форсунками может быть связано с закоксовыванием форсунок, образованием нагара на форсунках или их засорением. Коксование рабочих коллекторов и форсунок вызывается локальной более высокой температурой нагрева элементов конструкции (из-за неравномерности параметров обтекающего их закомпрессорного воздуха, неравномерности лучистых потоков от зоны горения, отклонений размеров). Процесс отложения кокса протекает достаточно быстро, нередко – лавинообразно. Изменение характеристик распыла вследствие коксообразования приводит к увеличению окружной неравномерности газодинамических параметров в жаровой трубе, что негативно влияет на надежность как элементов самой камеры, так и сопловых и рабочих лопаток турбины.

Одним из наиболее информативных факторов, позволяющим судить о наличии неисправности элементов камеры сгорания, является температурное поле в ее выходном сечении. Ряд дефектов камер (прогары и коробления жаровой трубы, оплавление и растрескивание кромок отверстий, коксование форсунок и их разрушение, деформация элементов подвески жаровой трубы и др.) вызывает изменение распределения температуры газа в выходном сечении камеры. На большинстве двигателей контролируется температура газа за турбиной высокого давления. В этом случае выходное температурное поле камеры сгорания трансформируется после прохождения через лопаточные венцы турбины. Как показывает практика, многие особенности распределения температуры газа, связанные с дефектами, при этом сохраняются.

Возникновение дефектов в турбине также может быть определено по набору термогазодинамических параметров. Обрыв лопатки в турбине в явной форме скажется на ее характеристике, так как уменьшится полезная мощность, развиваемая турбиной.

Как правило, обрыв рабочей лопатки или ее прогар, а также дефекты соплового аппарата характеризуются падением частоты вращения ротора высокого давления n_2 . При этом для поддержания степени повышения давления в компрессоре π_k необходимо увеличение расхода топлива, что приводит к увеличению температуры на выходе из двигателя. При этом частота вращения ротора низкого давления n_1 не меняется, вследствие малого изменения распределения полезной работы по лопаткам ступени низкого давления.

При обрыве лопатки или другом дефекте в ступени низкого давления будет наблюдаться

обратная ситуация: уменьшение частоты вращения турбины низкого давления n_1 , рост температуры на выходе из двигателя T_5 и расхода топлива, и отсутствие резких видимых изменений в ступенях турбины высокого давления.

Повышенный уровень вибрации опор и корпусов газотурбинного двигателя также может служить диагностическим признаком. В зависимости от комплекса параметров, характеризующих развитие того или иного дефекта, вибрация может служить дополнительным параметром, с помощью которого можно определить и локализовать дефект. К примеру, обрыв лопатки в компрессоре или турбине наряду с вышеописанными изменениями в комплексе характерных параметров будет сопровождаться повышенной вибрацией соответствующих опор. Повышенный уровень вибрации корпуса компрессора может свидетельствовать о предпослажном состоянии, повышенный уровень вибрации в опорах наряду с повышением температуры масла на выходе из опоры может сообщить о повышенном износе и скором заклинивании или разрушении опоры.

При этом важно, что двигатель является замкнутой системой. Каждый из параметров двигателя связан как минимум с одним параметром в явной или не явной форме. Поэтому в случае изменения величины того или иного параметра без изменения других параметров необходимо рассматривать возможность неисправности или дефекта самого датчика. В первую очередь это касается датчиков, расположенных в горячей части двигателя: камере сгорания, турбине, сопле.

Современное требование к программному обеспечению автоматизированных систем стендовых испытаний (АСИ) включает возможность в темпе испытаний с помощью математических моделей оценивать характеристики двигателя и параметры рабочего процесса, вводить с прогнозированием результата регулировочные воздействия в систему управления двигателя, проводить контроль достоверности измеренных параметров. Повышено требование к формированию базы данных (БД), которая должна иметь возможность уточнения базы данных, с учетом изменений методик обработки результатов и условий испытаний.

Этому требованию в основном не отвечают широко применяемые системы автоматизации испытаний в серийном производстве, где условия испытаний строго регламентируются, и эти системы не имеют способности адаптации к постоянно изменяющимся задачам и условиям газодинамической доводки.

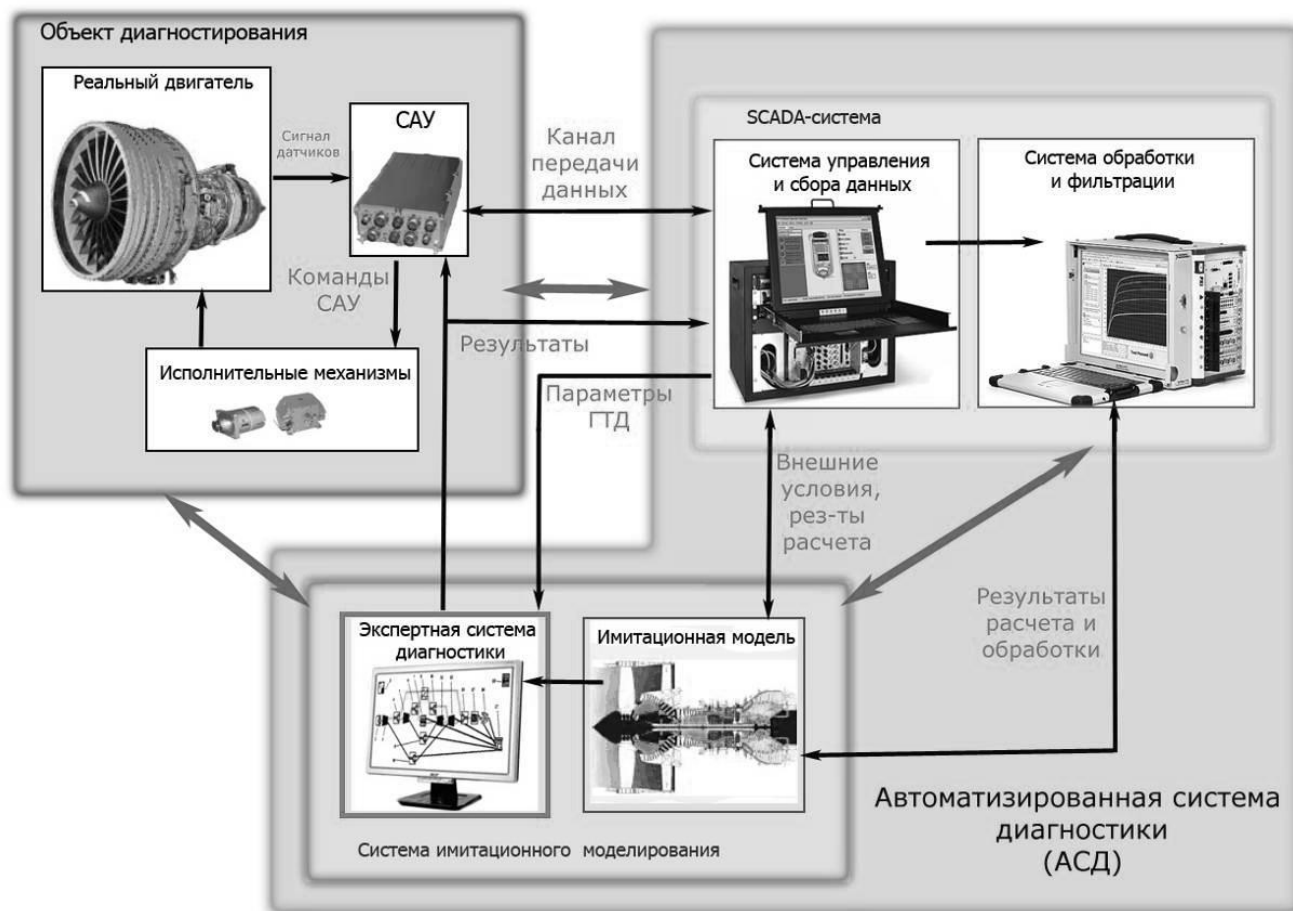


Рис. 5. Комплексная автоматизированная система диагностики ГТД

В БД результаты испытаний удобно записывать в виде полиномиальных зависимостей параметров испытываемого двигателя (в т. ч. представляющих дроссельные, климатические, высотно-скоростные характеристики ГТД).

Анализ разброса результатов измерений позволяет хранить в БД испытаний спектры рассеивания (доверительные интервалы, СКО – среднеквадратические отклонения) и показывать графически результаты как зависимости математических ожиданий параметров, окруженные трубками с заданной плотностью вероятности.

Развитие предложенной системы (рис. 5) ведется в направлении создания алгоритмов управляющего модуля и модуля фильтрации автоматизированной системы диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмедзянов А. М., Дубравский Н. Г., Тунаков А. П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. М.: Машиностроение, 1983. 206 с. [A. M. Akhmedzyanov, N. G. Dubravskiy, and A. P. Tunakov,

Diagnosis of the GTE thermal gas parameters, (in Russian). Moscow: Mashinostroyeniye, 1983.]

2. Сиротин Н. Н., Коровкин Ю. М. Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 272 с. [N. N. Sirotin and Y. M. Korovkin, *Technical diagnostics of aircraft gas turbine engines, (in Russian). Moscow: Mashinostroyeniye, 1979.]*

3. Ахмедзянов Д. А., Суханов А. В., Кишалов А. Е. Обмен данными между SCADA-системой и системой имитационного моделирования авиационных двигателей в процессе испытаний // Молодой ученый. 2011. № 8 (31), т. 1. С. 50–53. [D. A. Akhmedzyanov, A. V. Sukhanov, and A. E. Kishalov, "Communication between the SCADA system and the imitating simulation of aircraft engines during testing," *Molodoy Uchenyy*, vol. 1, no. 8 (31), pp. 50-53, 2011.]

4. Шулекин В. Т. Характеристика ступени осевого компрессора ГТД с повреждёнными лопаткам: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2008. 90 с. [V. T. Shulekin, *Feature stage axial compressor turbine engine with a damaged shoulder blades: Tutorial, (in Russian). Moscow: MSTUCA, 2008.]*

5. Еникеев Г. Г. Экспериментальные исследования роторных воздухоочистителей газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 55–64. [G. G. Enikeev, "Experimental studies a rotary turbine engine air cleaner," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 55-64, 2012.]

б. Зырянов А. В., Сенюшкин Н. С., Харитонов В. Ф.

Разработка метода диагностики камер сгорания ГТД на основе математического моделирования их рабочего процесса // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 98–105. [A. V. Ziryaynov, N. S. Senyushkin, and V. F. Kharitonov, "Development of a method of diagnostics of the combustion chambers of GTE based on mathematical modeling of their work process," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 2 (47), pp. 98-105, 2012.]

ОБ АВТОРАХ

КРИВОШЕЕВ Игорь Александрович, проф., декан фак-та авиац. двигателей, науч. рук. НИЛ САПР-Д. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (СГАУ, 2000). Иссл. в обл. инф. технологий в двигателестроении.

СУХАНОВ Андрей Владимирович, асп. каф. авиац. двигателей. М-р техн. и технол. (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. диагностики и автоматизации процесса испытаний ГТД.

METADATA

Title: development of the complex automated system of diagnostics of GTE on the basis of SCADA-technology and imitating modeling.

Authors: I. A. Krivocheev¹ and A. V. Sukhanov².

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹krivosh@sci.ugatu.ac.ru, ²flyer.88@mail.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 134-141, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The work done to develop the algorithmic components of the ILS – the diagnostics status of GTE based on the identification of SM as a result of its control using SCADA system for the design and operation of GTE.

Key words: automation; SCADA-technology; gas turbine engine simulation modeling.

About authors:

KRIVOCHEEV, Igor Alexandrovich, Prof., Aviation Engines Dept. Dipl. Mech. Eng. (USATU, 1976). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 1981), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2000).

SUKHANOV Andrey Vladimirovich, Dipl. Mast. (USATU, 2011), Graduate Student.