

## Глава 3

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ РКТ

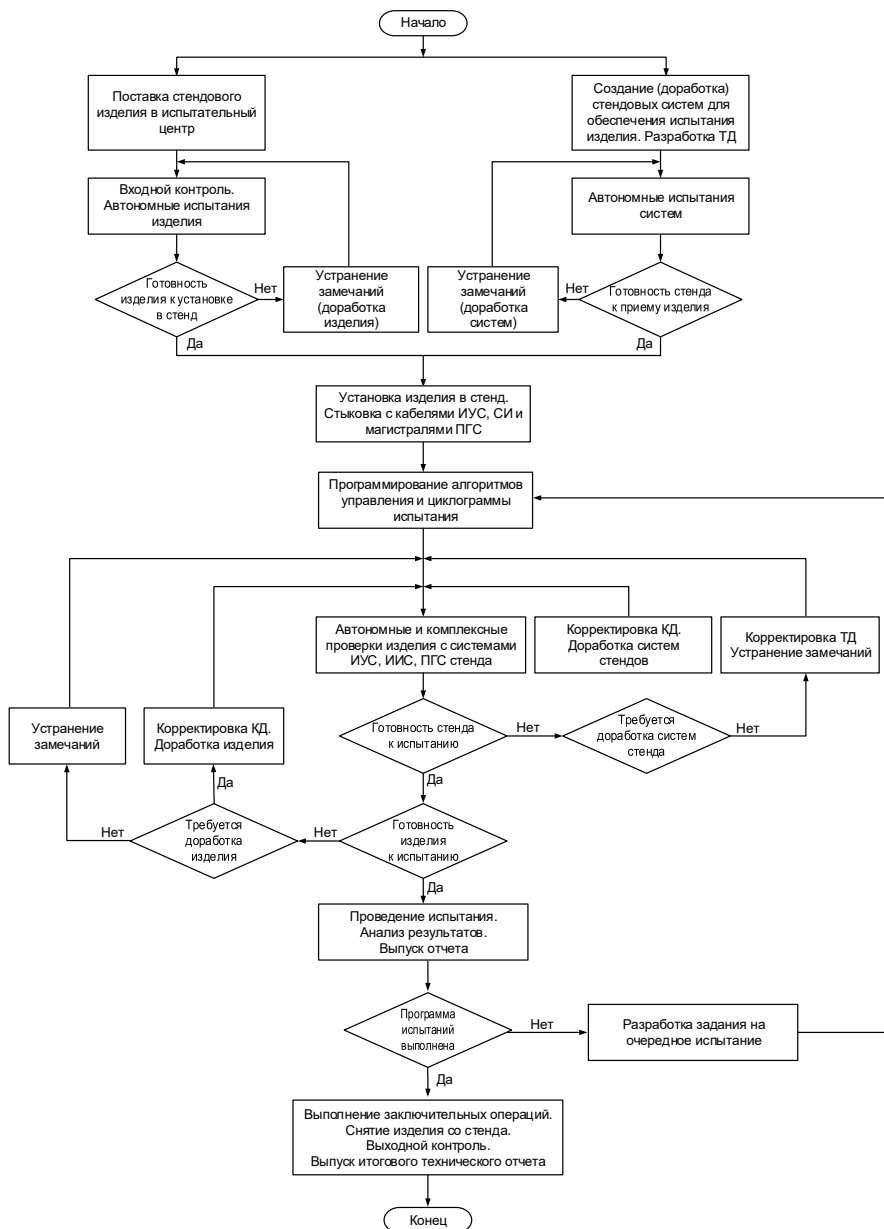
Каждый испытательных стенд (комплекс) отрасли имеет сложившиеся на протяжении многих лет собственные технологии подготовки и проведения испытаний. Тем не менее, приведенный ниже материал может дать общее, характерное для многих стендов представление о сложности и многообразии проблем, возникающих при испытаниях сложных изделий РКТ типа ступеней ракет-носителей (РН). Такие испытания проводятся, как правило, в федеральных испытательных центрах совместными усилиями коллективов специалистов-испытателей, конструкторов РН, жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), агрегатов, приборов и разработчиков алгоритмов управления изделием.

Испытания ступеней РН по сравнению с испытаниями ЖРД характеризуются гораздо более сложной технологией подготовки пуска, более сложными алгоритмами управления, требованиями по отработке большого числа систем изделия, включая элементы штатной системы управления, сложным технологическим оборудованием стенда, повышенными требованиями к безопасности и безаварийности испытаний [1–4].

Из всей проблематики технологии подготовки и проведения испытаний особое внимание в данной главе уделено аспектам, связанным с тенденцией увеличения доли интеллектуальной и информационной составляющей в составе объектов испытаний: бортовых приборов, а также штатных алгоритмов управления и контроля.

Стендовые испытания, проводимые с подачей рабочих газов и компонентов топлива на изделие, можно разделить на «холодные» и «огневые» – по отсутствию или наличию реакции сгорания или разложения компонентов рабочего тела. «Холодные» испытания, как правило, являются необходимым этапом стендовых испытаний ступеней РН, предшествующим огневым испытаниям, и имеют целью подтверждение или опытное определение характеристик пневмогидравлических систем (ПГС) изделия, подтверждение требуемых параметров компонентов топлива, конструкции и среды в отсеках, отработку штатной технологии заправки изделия. Целью огневых испытаний ЖРД является комплексное подтверждение работоспособности двигателя, а ступеней РН – подтверждение работоспособности ПГС совместно с двигателем в условиях работы, максимально приближенных к штатным.

Обобщенная блок-схема последовательности операций подготовки и проведения стендовых испытаний ступеней РН приведена на рис. 3.1.



**Рис. 3.1. Блок-схема последовательности операций подготовки и проведения стендовых испытаний:**

ТД – технологическая документация; КД – конструкторская документация; ИУС – информационно-управляющая система; СИ – система измерения; ПГС – пневмогидравлическая система; ИИС – информационно-измерительная система

*Стендовые изделия* изготавливаются специально для проведения отработочных испытаний и имеют некоторые отличия от серийных изделий. Ввиду высокой стоимости как объектов испытаний, так и самих испытаний при каждом эксперименте требуется получить максимум информации об изделии. Поэтому ПГС оснащается дополнительными источниками информации (датчиками), а в случае ступеней РН – снабжается дополнительными стендовыми системами (системами аварийного наддува, слива, дренажа и др.), обеспечивающими безопасность проведения испытаний. Доработанное таким образом изделие носит название «стендовое изделие». Целями отработочных испытаний являются подтверждение соответствия характеристик изделия требованиям конструкторской документации; проверка работоспособности изделия в условиях, приближенных к полетным; уточнение режимов и условий работы систем и агрегатов изделия при их совместном функционировании; исследование взаимодействия систем изделия; отработка эксплуатационной документации; проверка полноты конструкторской и технологической документации и т.д.

Весь цикл испытаний можно разделить на несколько этапов:

- подготовка и автономные испытания стендовых систем; аттестация испытательного оборудования;
- прием, входной контроль и установка изделия на стенде;
- подготовка, автономные и комплексные проверки систем стенда и изделия;
- проведение испытаний;
- обработка результатов и выпуск отчетной документации.

### **3.1. Этапы подготовки и проведения стендовых испытаний**

**Подготовка и автономные испытания стендовых технологических систем.** Для универсальных испытательных стендов характерно наличие постоянного, неизменяемого и переменного («стенд – борт») оборудования, которое разрабатывается и изготавливается для испытаний конкретного изделия. В частности, для обеспечения выполнения задач отработки ступеней РН схемы «стенд – борт» обеспечивают заправку, слив и дренажи окислителя и горючего, термостатирование изделия, пожаро-взрывопреупреждение, контроль опасных накоплений газов и решает многие другие задачи. В соответствии со схемами «стенд – борт» выпускается конструкторская документация, осуществляются изготовление, очистка (обезжиривание) и монтаж обвязки «стенд – борт». После монтажа проводятся работы по проверке ее герметичности и прочности. По магистралям подачи и слива кислорода проводятся проливки жидким азотом. На данном этапе кроме проверки работоспособности стендовой ПГС «стенд – борт» по реализации требуемых параметров (расходов заправки и слива, температур на входе в борт и т.п.) проверяется работа стендовых систем управления, регулирования и измерения. Далее проводятся проливки трубопроводов ПГС на контрольный фильтр штатными

компонентами. Подтверждение требуемой чистоты подаваемых на изделие рабочих тел является условием допуска ПГС к работе с изделием. Аналогичные работы выполняются по системам газоснабжения: проверка герметичности, очистка внутренних полостей с контролем чистоты, проверка реализации требуемых параметров (расходов, температур, давлений).

Аттестация испытательного оборудования (ИО) проводится согласно ГОСТ Р 8.568–97 «Аттестация испытательного оборудования. Основные положения» для подтверждения воспроизведения условий испытаний в пределах допускаемых отклонений и установления пригодности использования испытательного оборудования в соответствии с его назначением.

Испытательное оборудование подвергают:

первичной аттестации при вводе системы в эксплуатацию;

периодической аттестации через интервалы времени, установленные в эксплуатационной документации на испытательное оборудование, в процессе его эксплуатации.

В случае ремонта или модернизации испытательного оборудования, проведения работ с фундаментом, на котором оно установлено, перемещения испытательного оборудования и других причин, которые могут вызвать изменения характеристик воспроизведения условий испытаний, испытательное оборудование подвергают повторной аттестации.

Первичная аттестация испытательного оборудования заключается:

в экспертизе эксплуатационной и проектной документации, на основании которой выполнена установка испытательного оборудования;

в экспериментальном определении технических характеристик испытательного оборудования и подтверждении пригодности его к использованию.

В процессе первичной аттестации устанавливают:

возможность воспроизведения внешних воздействующих факторов или режимов функционирования систем;

отклонение условий испытаний от нормированных;

безопасность персонала и отсутствие вредного воздействия на окружающую среду;

перечень характеристик испытательного оборудования, которые проверяют при первичной аттестации оборудования, методы, средства и периодичность ее проведения.

При положительных результатах аттестации на основании протокола первичной аттестации оформляют аттестат на оборудование.

Сведения о выданном аттестате (номер и дата выдачи), полученные значения характеристик испытательного оборудования, а также срок последующей периодической аттестации испытательного оборудования и периодичность ее проведения в процессе эксплуатации заносятся в формуляр испытательного оборудования.

Периодическую аттестацию ИО в процессе его эксплуатации проводят в объемах, необходимых для подтверждения соответствия характеристики испытательного оборудования требованиям нормативных документов. При этом контролируется технический уровень эксплуатационных документов на оборудование в целях подтверждения возможности их использования в процессе аттестации.

Первичную аттестацию испытательного оборудования проводит комиссия. В состав комиссии включают представителей:

подразделения предприятия (организации), проводящего испытания на данном испытательном оборудовании;

метрологической службы предприятия;

государственных научных метрологических центров и (или) органов государственной метрологической службы.

Периодическую аттестацию испытательного оборудования в процессе его эксплуатации проводят сотрудники подразделения, в котором установлено оборудование, уполномоченные руководителем подразделения для выполнения этой работы, и представители метрологической службы предприятия.

**Входной контроль изделия.** Входной контроль начинается с проверки комплектности и внешнего осмотра изделия. При входном контроле ступеней РН дополнительно проводятся пневмоиспытания на герметичность и анализ влажности в баках окислителя, горючего и шар-баллонах изделия.

Входной контроль изделия в части систем измерения (СИ) и управления (СУ) заключается в проверке датчиков, элементов автоматики (электропневмоклапанов (ЭПК), пиропатронов (ПП), приводов регуляторов) и кабельной сети бортовых систем измерения, управления, регулирования и аварийной защиты. Операции входного контроля проводятся в монтажно-испытательном корпусе (МИК) испытательной станции в соответствии с эксплуатационной документацией на изделие и технологической документацией на подготовку СИ и СУ.

Отличительной особенностью стендовых испытаний изделий типа ступеней современных РН, оснащенных цифровыми системами управления, является большой объем сложных задач управления, контроля и аварийной защиты изделия. Традиционные задачи регулирования соотношения компонентов топлива, управления тягой и ее вектором, контроля уровня компонентов топлива в баках, аварийной защиты двигателя практически на всех современных стендовых изделиях решаются с участием периферийных блоков штатной системы управления, установленных на борту.

При входном контроле таких изделий тестовые проверки этих приборов в идеале должны выполняться с помощью контрольной аппаратуры, поставляемой фирмами – разработчиками приборов. Проблема заключается в том, что данная аппаратура предполагает наличие в составе ступени РН штатного бортового вычислительного комплекса. Как правило, в составе *стендового варианта ступени РН* таковой отсутствует из-за отличия решаемых задач.

При наземных испытаниях ступеней РН функции бортового вычислительного комплекса выполняет стендовая информационно-управляющая система, обеспечивая обмен информацией с штатными бортовыми приборами с помощью интерфейсов типа ARINC-429 (ГОСТ 18977–79), MIL STD 1553B (ГОСТ Р 52070–2003) и др. Это означает, что проверки функционирования бортовых приборов при традиционной технологии могут быть выполнены после установки изделия на стенде непосредственно перед испытанием совместно со стендовой системой управления изделия.

Хотя установлено [5, 6], что на этапе автономных испытаний элементов и систем изделия выявляется до 90 % конструктивных, производственных или технологических дефектов, остается значительный процент дефектов, которые могут быть выявлены только после сборки, на этапе проверок комплексного функционирования сложных многокомпонентных систем, таких как ступени РН.

Опыт стендовых испытаний ступеней РН «Союз-2» и «Ангара» показал актуальность организации комплексных проверок таких изделий на более ранних этапах подготовки к испытаниям, например на этапе окончания сборки изделия, до его транспортировки в испытательный центр. Такая технология была применена в ходе подготовки к испытаниям стендового блока первой ступени РН «Союз-2-1в». В ее основе – комплексная проверка функционирования элементов системы управления, схем и алгоритмов взаимодействия бортовых и наземных систем на заводе после этапа сборки и выходного контроля изделия, а также на этапе входного контроля в МИК испытательной станции с помощью специального *автоматизированного комплекса проверки изделия* (АКПИ) [7].

АКПИ, представляющий собой программируемый информационно-вычислительный комплекс с модулями сопряжения с бортовыми приборами по интерфейсу MIL STD 1553B, обеспечивает:

- автоматизированный контроль сопротивления изоляции, целостности и разобщенности электроцепей автоматики изделия (ЭПК, приводов, датчиков управления и аварийной защиты);

- тестирование бортовых приборов штатной системы управления;

- управление ЭПК и приводами по заданным циклограммам и в «ручном» режиме;

- контроль срабатывания сигнализаторов давления и контактных датчиков при пневмоиспытаниях систем изделия;

- проверку каналов аналоговых датчиков с регистрацией исходных уровней сигналов;

- реализацию режимов качания камер сгорания по циклограммам, аналогичным циклограммам качания при проведении стендовых испытаний.

Применение АКПИ позволяет:

- обеспечить полную проверку бортовых элементов автоматики и выявить конструктивные и производственные дефекты на этапе сборки изделия на заводе-изготовителе, оперативно устранить и исключить проявление их на стенде;

отработать программно-аппаратный интерфейс взаимодействия бортовых и наземных комплексов систем управления, регулирования и аварийной защиты *до установки изделия на стенде*.

**Подготовка, автономные и комплексные проверки систем стенда и изделия** представляют собой наиболее трудоемкий и сложный этап проведения стендовых испытаний изделий РКТ.

После установки изделия осуществляются его стыковка со съемными участками «стенд – борт» и подготовка стендовых систем управления и измерения.

При подготовке стендовой системы измерения (СИ) выполняются следующие работы:

подготовка аппаратно-программных средств и наземной кабельной сети, сквозная проверка адресации датчиков стенда и изделия и их подключение к кабельной сети;

подготовка исходных данных (ИД) для сбора, регистрации, оперативной обработки (в темпе испытаний) и визуального отображения информации по медленноменяющимся (ММП) и быстроменяющимся (БМП) параметрам, а также для послепусковой обработки телеметрической информации;

запись исходных уровней датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) стенда и изделия, контрольных и калибровочных сигналов промежуточных преобразователей стенда и изделия, обработка и анализ зарегистрированной информации.

При подготовке стендовой информационно-управляющей системы (ИУС) к испытаниям должны быть выполнены следующие работы:

подготовка аппаратуры и наземной кабельной сети ИУС, сквозная проверка адресации элементов автоматики стенда и изделия и их подключение к кабельной сети;

подготовка исходных данных для сбора, регистрации, оперативной обработки (в темпе испытаний) и визуального отображения информации, а также для послепусковой обработки телеметрической информации;

программирование и отладка циклограммы и алгоритмов управления изделием и системами стенда;

автономные проверки систем управления с использованием средств имитационного моделирования;

автономные проверки систем стенда и изделия совместно с системами управления;

комплексные проверки совместного функционирования систем.

Из перечисленных работ, большей частью традиционных, выделим наиболее сложные.

***Программирование, отладка циклограммы и алгоритмов управления изделием и системами стенда и автономные проверки систем управления с использованием средств имитационного моделирования.*** При испы-

таниях серийных изделий подготовка обычно сводится к выбору запрограммированной ранее циклограммы и алгоритмов. После достаточно простой проверки, подтверждающей правильность выполнения загрузки системы управления, она готова к автономным и комплексным проверкам с изделием и стендом. В зависимости от специфики технологии испытаний на этом этапе может выполняться также настройка параметров алгоритмов управления изделием или технологическими системами стенда. Но эта операция, как правило, является типовой, хорошо отработанной и не занимает много времени. В связи с этим остановимся более подробно на реализации алгоритмов управления РН и экспериментальными установками.

Современные изделия РКТ, особенно ступени РН, отличаются наличием сложных электронных систем, обеспечивающих управление режимами работы изделия. При этом *алгоритмы управления системами изделия также являются объектами испытаний*, что обуславливает высокие требования к стендовым ИУС по их правильной реализации. Общий порядок разработки и отладки рабочего программно-математического обеспечения (ПМО) ИУС, реализующего алгоритмы управления, регулирования, аварийной защиты и визуального отображения информации при испытаниях ступеней РН, представлен на рис. 3.2.

Задание на разработку рабочего программного обеспечения ИУС формируется разработчиками изделия и специалистами технологической службы стенда совместно со службой управления и отражается в функциональной схеме изделия, перечне элементов автоматики, деле испытания и других технологических и технических документах, действующих на предприятии.

Наряду с рабочим программным обеспечением системы управления формируется программное обеспечение имитации объекта. Задачей программ имитации является интерпретация передаточных функций технологических систем стенда и изделия как объектов управления. Общий принцип работы системы имитации при отладке алгоритмов управления показан на рис. 3.3. Данная схема имитации рассчитана на проверку работоспособности системы управления *в режиме реального времени без расстыковки разъемов кабелей связи с объектом*. Это обеспечивается следующими мерами:

- наличием отдельно выделенного контроллера, реализующего модель объекта управления или специально заданные наборы тестовых последовательностей сигналов в режиме реального времени;

- наличием в модулях ввода двух интерфейсов: объект/имитатор с возможностью переключения режима ввода по команде от системы управления;

- возможностью работы модулей вывода на пониженном напряжении (3В), достаточном для контроля прохождения сигналов управления, но недостаточном для реального срабатывания ЭПК стенда и объекта испытания.



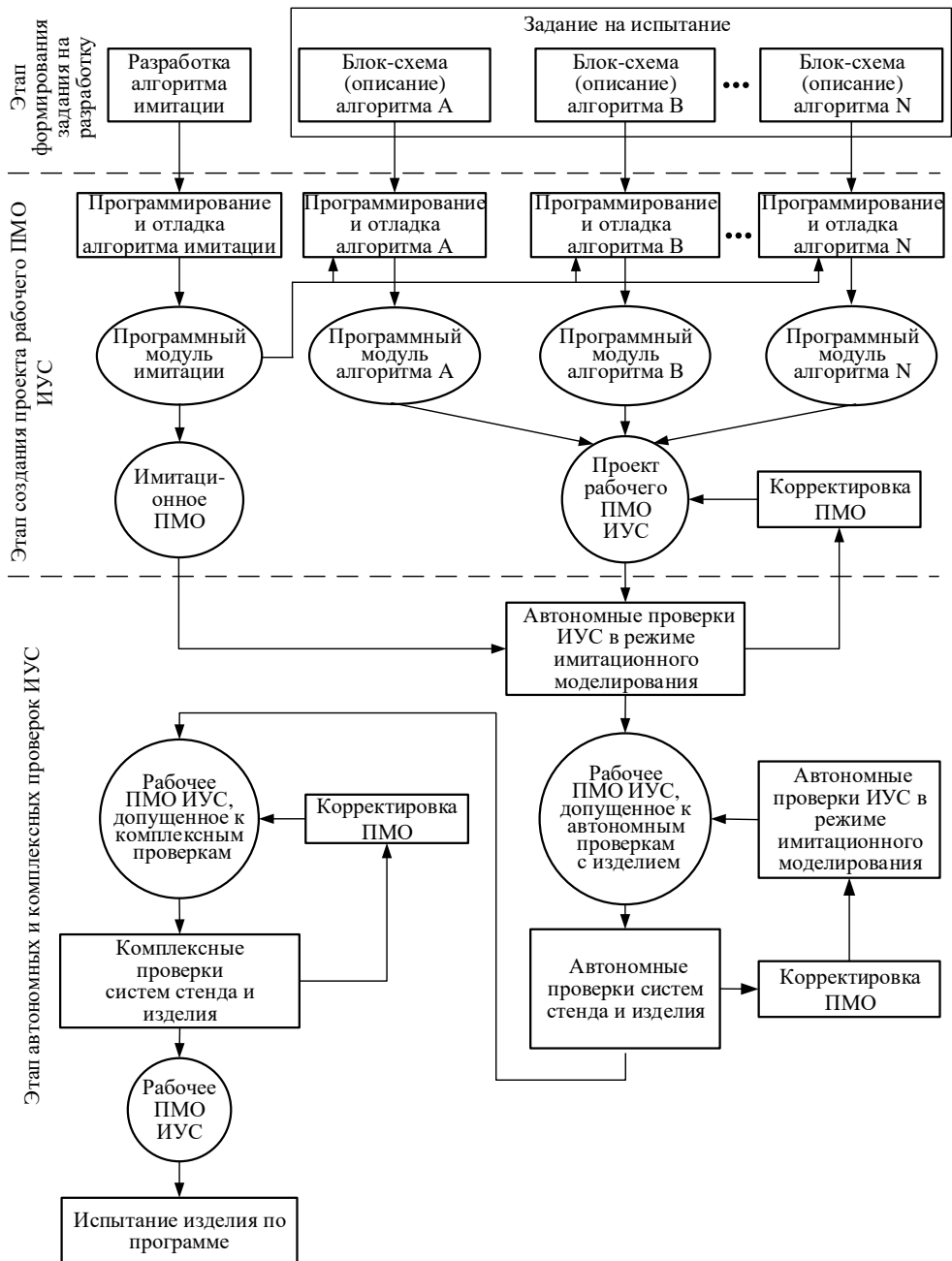


Рис. 3.2. Последовательность создания и подготовки рабочего ПМО ИУС к испытаниям

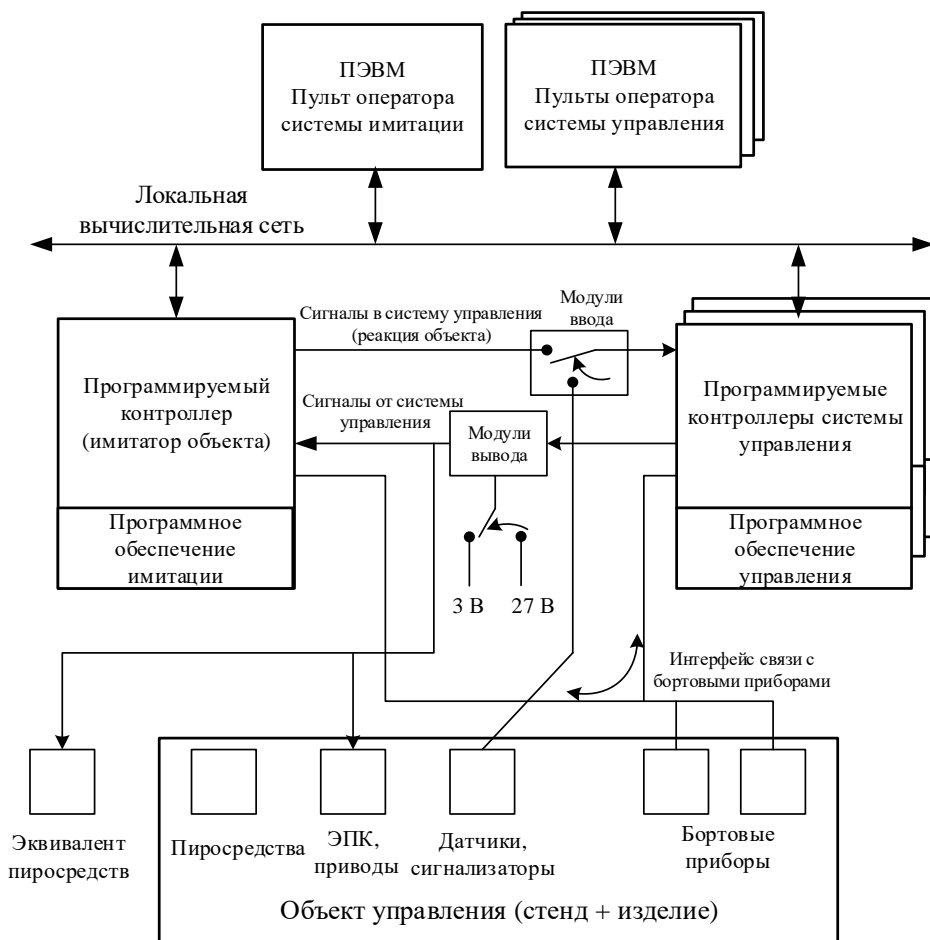


Рис. 3.3. Обобщенная схема системы имитации в составе ИУС

Как правило, при испытаниях ступеней РН в ИУС одновременно функционируют от нескольких десятков до нескольких сотен алгоритмов. Часть из них представляет собой достаточно простые алгоритмы, логика которых заключается в выдаче/снятии команды управления клапаном при наступлении определенного события – срабатывания контакта сигнализатора или реле давления, достижения параметром (температурой, давлением, расходом) определенного значения. Проверка таких алгоритмов сводится к «ручной» имитации наступления логического условия (а при двунаправленном действии алгоритма – еще и наступления обратного условия) и контролю реакции на него.

Сложные алгоритмы управления требуют включения в состав имитатора ИУС программного комплекса, способного реализовывать модели объектов

управления в режиме реального времени. В ходе отладки систем управления в режиме имитационного моделирования проводятся проверки:

правильности реализации циклограммы испытаний и алгоритмов управления и регулирования параметров технологических систем стенда, ПГС изделия, регулирования тяги и соотношения компонентов топлива и т.п.;

функционирования алгоритмов системы аварийной защиты (САЗ) с имитацией сигналов датчиков двигателя;

функционирования алгоритмов и визуальных форм (мнемосхем) отображения информации с имитацией сигналов датчиков стенда и изделия.

Положительный результат проверки функционирования каждого алгоритма в отдельности не является достаточным условием для заключения о безошибочной работе всего комплекса алгоритмов в целом в среде аппаратно-программного комплекса ИУС. Использование общих системных ресурсов контроллера ИУС (процессора, памяти, интерфейсов ввода/вывода) требует проверки отсутствия взаимовлияния алгоритмов друг на друга при их комплексном функционировании в режиме реального времени.

Идеальным вариантом для подготовки к испытаниям является применение моделей объектов испытания с высоким коэффициентом подобия. Использование имитационно-моделирующего комплекса «стенд – изделие» совместно с ИУС в режиме реального времени позволит подойти к технологии, при которой этап автономных и комплексных проверок будет приобретать характер виртуальных испытаний, обеспечивающих более качественную и полную подготовку систем и персонала к реальным работам.

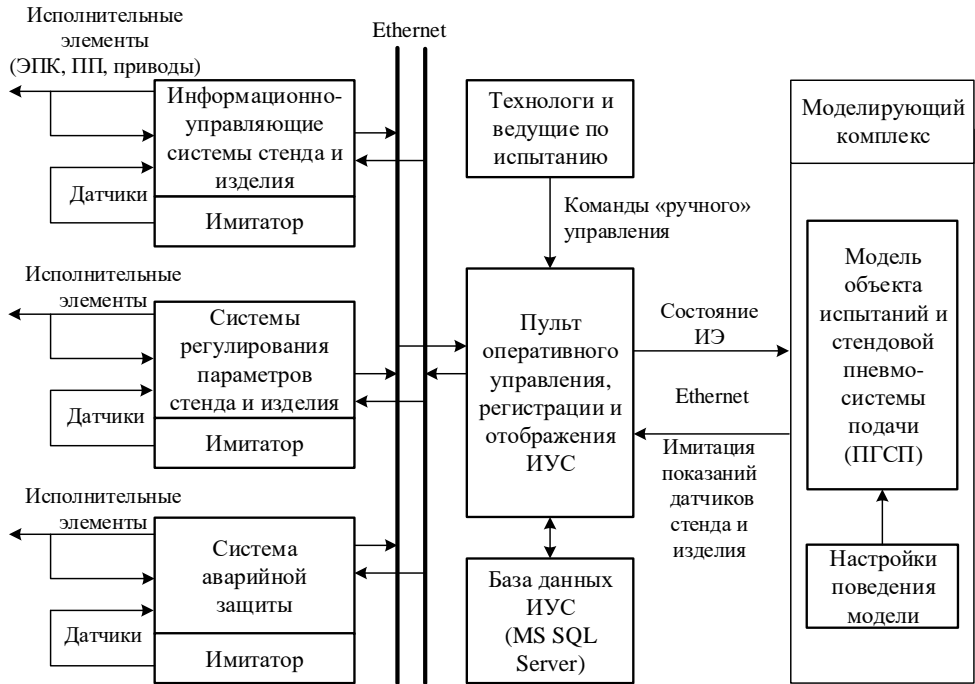
На рис. 3.4 показана структурная схема имитационно-моделирующего комплекса «стенд – изделие» + ИУС, которая может быть использована в режиме виртуального испытания при автономных и комплексных проверках систем.

Входными данными для модели являются команды ИУС на изменение состояния исполнительных элементов (ИЭ) автоматики стенда. Каждому изменению автоматики соответствуют функциональные зависимости изменения граничных условий модели. Шаг выдачи расчетных значений параметров физических процессов в местах расположения датчиков должен соответствовать циклу работы ИУС (например, 10 мс).

К сожалению, в настоящее время данная схема может быть реализована только для испытаний серийных изделий. К моменту начала испытаний сложных экспериментальных установок достаточно детализированных моделей объекта испытаний нет.

Кроме того, сложные алгоритмы, подобные алгоритмам системы управления расходом топлива (СУРТ), поддержания давления в баках первой и третьей ступеней космического ракетного комплекса (КРК) «Ангара», управления тягой и соотношением компонентов топлива двигателей, делают программное обеспечение имитации чрезвычайно сложным. Его разработка и отладка требуют трудозатрат, сравнимых с разработкой ПМО самой системы

управления, что повышает вероятность логических ошибок. Для разработки сложных алгоритмов имитации объекта управления недостаточно квалификации специалистов-испытателей, и требуется привлечение к этой работе разработчиков изделия, которые могут формально описать процессы в ДУ при различных режимах испытаний, внешних возмущениях и нештатных ситуациях.



**Рис. 3.4. Структурная схема имитационно-моделирующего комплекса «стенд – изделие» + ИУС**

Поэтому в стендовой практике используется технология, основанная на заключении разработчиков о всесторонней обработке алгоритмов управления системами изделия на собственных моделях и эквивалентах, а в случае алгоритмов аварийной защиты – при натуральных испытаниях ЖРД. При их отладке в среде стендовой системы управления используются тестовые модели (контрольные тесты), поставляемые разработчиками алгоритмов. Тестовые модели представляют собой функциональные зависимости «время – параметр» (как правило, в табличной форме), привязанные к режимам работы изделия. Кроме тестовой модели нормального пуска разработчик предоставляет несколько тестовых моделей, имитирующих поведение параметров в аварийных ситуациях.

Для моделирования поведения параметров изделия согласно тестовым моделям применяется следующая схема:

в соответствии с заданным периодом (равным циклу работы систем управления, например 10 мс) контроллер системы имитации (см. рис. 3.3) осуществляет покадровое формирование временных срезов параметров на основе тестовых моделей;

значения параметров преобразуются из физических величин в коды, которые из имитатора подаются на входы управляющих контроллеров;

работа контроллера имитации и контроллеров систем управления синхронизируется таким образом, что в момент, когда в очередном кадре тестовых данных обнаруживается нулевая отметка времени, в управляющих контроллерах осуществляется запуск циклограммы управления двигательной установкой. Одновременно в имитаторе запускаются алгоритмы имитации работы систем изделия: нагружения реле давления камер сгорания; временной последовательности срабатывания точек СУРТ; давлений в баках окислителя и горючего согласно собственным тестовым данным и т.д.;

результаты выполнения циклограммы регистрируются, после чего производится анализ полученных данных.

Тестовое обеспечение существенно оптимизирует процесс отладки программного обеспечения и автономных проверок ИУС и позволяет исключить грубые логические ошибки, способные привести к невыполнению программы испытаний. Понятно, что оно не позволяет проверить все «ветки» алгоритмов и настройку их переменных ввиду невысокого коэффициента подобия тестовых моделей. В результате неточности настройки алгоритмов управления могут быть выявлены только при «холодных» и огневом испытании изделия. Следует отметить что, подтверждение правильности работы штатных алгоритмов и их настроек является одной из целей испытания.

В результате автономных проверок в режиме имитационного моделирования формируется рабочее ПМО ИУС, которое обеспечивает проведение автономных проверок систем управления совместно с системами стенда и изделия – следующего этапа подготовки к испытанию.

**Автономные проверки систем стенда и изделия совместно с системами управления.** При подготовке к испытаниям ступеней РН объем автономных проверок определяется главным конструктором и уточняется на этапе согласования конструкторской и технологической документации. Состав проверок зависит от состава систем изделия и традиционных подходов разработчиков, определяемых опытом стендовых испытаний. При испытании ступеней РН выполняются проверки:

функционирования стартовых электропневматических щитов, установленных на стенде;

функционирования интерфейсов связи ИУС с бортовыми приборами;

функционирования ИУС при реализации алгоритмов ПГС с подачей давления на датчики с помощью технологической оснастки без наддува баков окислителя и горючего;

функционирования приводов СУРТ;

ПГС изделия совместно со стендовыми системами с штатным функционированием алгоритмов управления пневмощитами, алгоритмов ПГС и дополнительных систем с подачей давления в баки и шар-баллоны изделия;

функционирования системы управления вектором тяги двигателя (качания камер);

интерфейса обмена командами между ИУС и САЗ;

функционирования средств контроля, диагностики и отображения информации на реальном информационном потоке от систем управления и измерения.

По сути, эти проверки являются первыми проверками функционирования всего комплекса стендовых систем и систем изделия, собранного по схеме испытаний. Поэтому качество их выполнения во многом определяет успешность предстоящего испытания.

Автономные проверки, как правило, проводятся в несколько этапов, определяемых технологией, построенной по принципу «от простого к сложному», и составом систем изделия. Например, сначала проверяется прохождение команд с определением правильности их адресации на элементы автоматики (ЭПК, приводы дросселя и регулятора), за исключением элементов одноразового действия типа пиросредств или клапанов, срабатывание которых при проверках не разрешено эксплуатационной документацией на изделие. Затем в схему подаются рабочие среды: газы, жидкости, выполняются автономные проверки функционирования той или иной системы изделия или стенда. Успешное завершение таких проверок позволяет перейти к этапу совместных проверок взаимосвязанных систем изделия и стенда с работой штатных алгоритмов управления ими.

В состав стендовых блоков ступеней РН, как правило, включаются элементы штатной системы управления – периферийные бортовые приборы, выполняющие роль преобразователей сигналов с датчиков изделия в цифровой код или дискретные сигналы и формирователей управляющих сигналов на исполнительные элементы изделия. Проверка функционирования интерфейсов ИУС с такими приборами предвещает автономные проверки систем изделия и является одной из самых сложных и важных, так как она практически подтверждает правильность принятых технических решений по организации в ИУС каналов взаимодействия с бортовой электроникой. Проверки проводятся обычно совместно с представителями предприятий-разработчиков в тестовом режиме, предусмотренном алгоритмами управления работой приборов.

Одной из самых сложных в составе автономных проверок ступеней РН является проверка функционирования системы управления расходом топлива. Функциональная схема СУРТ первой ступени РН «Союз-2-1в» представлена на рис. 3.5.

Сложность проведения проверки обусловлена тем, что СУРТ является системой с обратной связью, реализованной в основном через датчики уровней

компонентов топлива, имитировать срабатывание которых невозможно, если это не предусмотрено в бортовом преобразователе. В таком случае проверка проводится в несколько этапов, при положительном завершении каждого из которых формируется заключение о готовности системы в целом. Рассмотрим этапы выполнения проверки СУРТ более подробно.

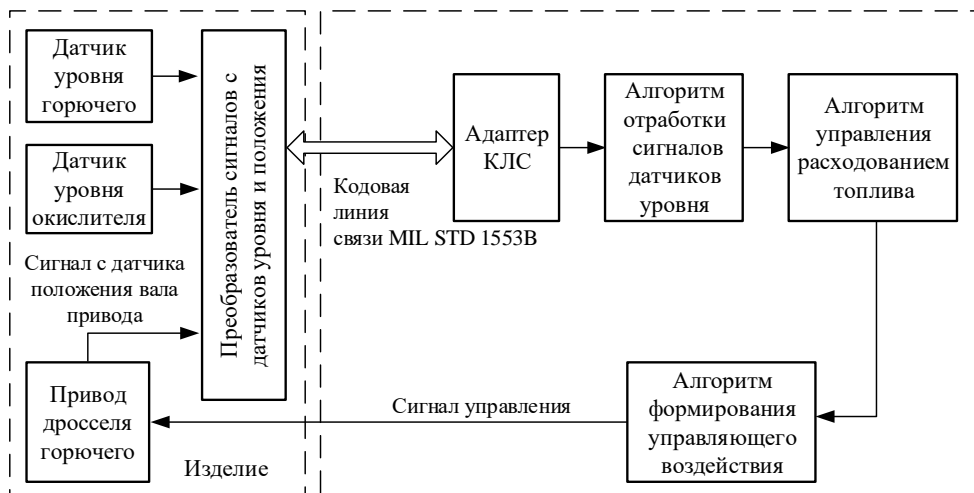


Рис. 3.5. Функциональная схема СУРТ первой ступени РН «Союз-2-1в»

На первом этапе проводится проверка функционирования интерфейсов ИУС с бортовым преобразователем информации. В ходе этой проверки выполняется контроль цепей датчиков и работы каналов преобразования бортового прибора встроенными средствами контроля и имитации, а также проверка каналов приема и обработки цифрового массива данных в ИУС. Комплексная проверка приема информации с датчиков уровня выполняется на натуральных компонентах топлива при проведении «холодных» испытаний с заправкой баков изделия.

Алгоритмическая часть СУРТ включает в себя три алгоритма:

- алгоритм обработки сигналов с датчиков уровня с определением физических времен срабатывания чувствительных элементов;

- алгоритм управления расходом топлива, преобразующий приведенную разность времен прохождения компонентами одноименных чувствительных элементов к рассогласованию реального соотношения компонентов с заданным;

- алгоритм, преобразующий это рассогласование в управляющий сигнал.

Второй этап – отладка алгоритмов – выполняется при автономных проверках ИУС в режиме имитационного моделирования с помощью контрольных тестов, поставляемых разработчиками алгоритмов, задающих входные параметры и содержащих соответствующие им параметры выходных управляющих воздействий.

Третьим этапом является автономная проверка тракта управления приводом дросселя. Основной задачей этой проверки является определение соответствия направления вращения вала привода полярности управляющего сигнала. Обычно для этого используется лимб на приводе, так как по одному датчику положения вала привода достоверно определить направление вращения, как правило, не представляется возможным. В случае отсутствия лимба используют асимметрию градуировочной характеристики или сигналы с концевых переключателей на упорах привода.

Еще одной важной системой, обрабатываемой при стендовых испытаниях ступеней РН, является система управления вектором тяги СУВТ (другое название – система перемещения камер сгорания – СПКС), образующая рулевой тракт двигателя. Отклонение камер или аэродинамических рулей осуществляется при помощи электрогидравлических сервоприводов (ЭГС). При стендовых испытаниях управление ЭГС в зависимости от состава бортовых средств выполняется как специальной стендовой ИУС (например, ИУС-ЭГС для испытаний ступеней РН «Ангара»), так и штатными бортовыми приборами, управляемыми наземной системой (испытания ступеней РН «Союз-2»). Режимы качания, реализуемые ИУС при проведении стендовых испытаний в определенном порядке и с определенной длительностью, образуют циклограмму управления ЭГС во время огневых испытаний. Такую же циклограмму обычно реализуют и при автономных испытаниях ЭГС, или так называемых «холодных» качаниях. Целью таких испытаний является оценка динамических характеристик рулевого тракта двигателя, а задачами – определение амплитудных и фазовых частотных характеристик рулевых трактов при «холодных» испытаниях и определение давлений в магистралях подачи и слива ПГС ЭГС при различных расходах и сигналах управления. Средства видеорегистрации отклонения камер вместе с регистрацией сигналов датчиков перемещения штоков камер (рулей) позволяют также оценить соответствие полярности управляющего сигнала направлению отклонения камер.

Как уже отмечалось, задачи аварийной защиты двигателя при стендовых испытаниях ЖРД и ДУ решаются с помощью алгоритмов обработки диагностических параметров, определяющих критические отклонения в работе двигателя или предпосылки их развития. Алгоритмы аварийной защиты разрабатываются совместно с двигателем и могут быть реализованы различными путями, например в отдельной автономной системе САЗ или интегрированы в стендовую систему управления в виде отдельной программы контроля и управления. Простые алгоритмы, ограничивающиеся допусковым контролем диагностических параметров, программируются обычно наряду с алгоритмами управления и отлаживаются в общей программной среде ИУС, как было описано выше. В наиболее сложных случаях требуются автономные испытания программного либо программно-аппаратного интерфейса ИУС – САЗ,



целью которых являются проверка прохождения сигналов датчиков аварийной защиты двигателя, проверка формирования и передачи команд и информационных сигналов (квитанций) между ИУС и САЗ и информационных «кадров» между программами. При этих проверках особое внимание уделяется соответствию временных параметров приема и обработки информации требованиям программ и методик испытаний систем.

Строго говоря, проверки взаимодействия ИУС и САЗ можно отнести как к автономным проверкам ИУС, так и к комплексным проверкам, тем более, что на всех этих этапах они обычно и проводятся. Это обусловлено высокими требованиями к надежности функционирования САЗ при испытаниях ЖРД, а особенно при испытаниях ступеней РН, когда цена сбоя в работе системы очень высока.

В ходе автономных проверок изделия и стенда с выдачей команд на исполнительные элементы, подачей давления в системы изделия и работой информационно-управляющих и измерительных систем выполняется также автономная проверка систем отображения информации и информационной системы контроля, диагностики и отображения параметров (СКДО). Последняя создается, как правило, по заданию разработчиков изделия и предназначена для оценки его текущего состояния и принятия оперативных решений в ходе выполнения операций, предвещающих запуск двигателя. Участие в автономных проверках разработчиков изделия в сочетании с реальным информационным потоком от стендовых систем позволяет проверить СКДО в условиях, близких к условиям испытаний, выявить и устранить их до начала комплексных проверок.

Положительные результаты автономных проверок систем стенда и изделия совместно с системами управления позволяют перейти к следующему этапу подготовки – комплексным проверкам.

**Комплексные проверки.** Перед каждым стендовым испытанием ЖРД и ДУ проводятся комплексные проверки систем управления совместно с изделием и стендовыми системами с реализацией заданной циклограммы, проверкой правильности обмена командами, временной синхронизации систем. Целью комплексных проверок является подтверждение готовности к испытаниям систем и пусковой команды путем наиболее полного воспроизведения хода испытаний в условиях нормального завершения и нештатных ситуаций. Объем, технология проведения и состав комплексных проверок определяются ОСТ 92-8814-76 и стандартами организаций и зависят от специфики объектов и типов испытаний, стендов и систем управления. Так, например, часто используется технология проведения комплексных проверок в три этапа:

- комплексные проверки систем управления;
- генеральные комплексные проверки;
- контрольные комплексные проверки.

Комплексные проверки систем управления проводятся перед каждым испытанием и имеют целью проверку функционирования комплекса ИУС

стенда с реализацией алгоритмов управления и циклограммы испытания без выдачи команд на исполнительные элементы (ИЭ) стенда и изделия. При этом вместо пиросредств должны быть подключены эквиваленты.

Генеральные комплексные проверки предшествуют испытанию изделия и предназначены для проверки функционирования всего комплекса стендовых систем управления, измерения, контроля, энергоснабжения в условиях, максимально приближенных к реальному испытанию. Генеральные комплексные проверки проводятся с выдачей команд на стенд и изделие, кроме пиросредств, вместо которых должны быть подключены эквиваленты. По результатам генеральных комплексных проверок оценивается готовность всего комплекса систем стенда и изделия к испытаниям.

Контрольные комплексные проверки предназначены для оценки правильности функционирования ИУС после включения систем в день испытания с проверкой циклограммы без выдачи команд на стенд и изделие. После окончания контрольной комплексной проверки начинаются операции подготовки и заправки стендовых систем и аппаратура ИУС не выключается до окончания испытания изделия.

Из приведенной выше технологической схемы подготовки к испытаниям можно сделать следующие выводы:

1. Уже в настоящее время элементы имитационного моделирования широко используются на этапах автономных и комплексных проверок. Развитие направления по разработке и внедрению информационных технологий компьютерного моделирования процессов в стендовых системах, ракетных двигателях и ступенях ракет позволит оптимизировать процесс подготовки к испытаниям за счет перераспределения работ с этапа автономных проверок ИУС совместно со стендом на этап отладки ИУС с использованием средств имитационного моделирования.

2. На очереди стоит вопрос использования имитационно-моделирующего комплекса «стенд – изделие» совместно с ИУС в режиме реального времени. С развитием информационных технологий компьютерного моделирования этап комплексных проверок будет постепенно приобретать характер *виртуальных испытаний*, обеспечивающих более качественную и полную подготовку систем и персонала к реальным работам.

3. Использование математических моделей стендовых ПГС позволит автоматизировать выполнение технологических операций заправки и подготовки стенда к испытаниям путем организации на базе стендовых ИУС экспертных систем, аккумулирующих опыт специалистов испытательных станций.

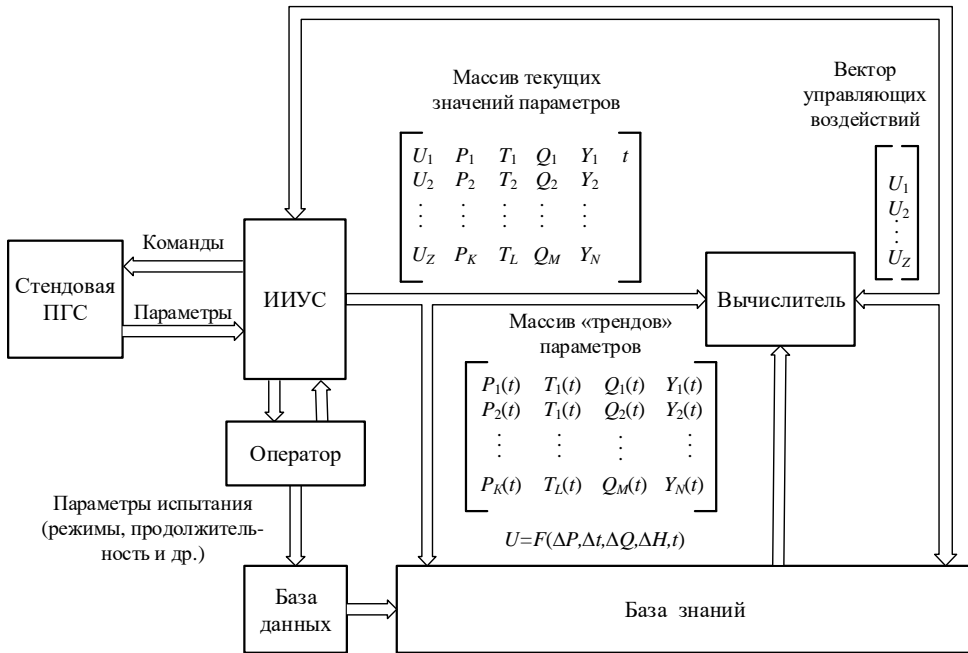
**Проведение испытаний.** Цикл испытаний можно разделить на три этапа: подготовительные операции; испытание изделия по циклограмме; послепусковые операции.

**Подготовительные операции** включают в себя прием и заправку стендовых емкостей рабочими средами (сжатыми газами, рабочими жидкостями и компонентами топлива) и подачу их к изделию с требуемыми температурами, давлениями, расходами. Технология выполнения заправки разрабатывается для каждого конкретного стенда и представляет собой типовую применительно к данному стенду последовательность операций по обеспечению требуемых для предстоящего испытания уровней и температур компонентов и рабочих жидкостей (воды, жидкого азота) в стендовых емкостях и давлений газов (воздуха, азота, гелия и др.) в баллонах. Операции заправки и подачи компонентов топлива, рабочих жидкостей и газов сводятся к выполнению набора типовых операций по управлению исполнительными элементами стенда и контролю параметров по датчикам систем измерения и управления. Эти операции выполняются в полуавтоматическом режиме операторами ИУС по командам ведущих специалистов-технологов. Параметры заправляемых компонентов топлива, рабочих жидкостей и газов зависят от изделия, типа (продолжительности) испытания и условий окружающей среды.

В целом процесс набора готовности стенда для подачи рабочих сред на изделие является кропотливым и достаточно продолжительным (особенно при работе с криогенными компонентами топлива), малоавтоматизированным процессом, результат которого во многом зависит от квалификации выполняющих его специалистов. В последнее время предпринимаются попытки усовершенствовать этот процесс, но они в основном сводятся к повышению наглядности и оперативности предоставления информации о состоянии параметров стенда и изделия ведущим по испытанию.

Между тем уровень развития современных стендовых ИУС, способных интегрировать задачи управления и измерения, и появление на стендовых базах отрасли высокопроизводительных вычислительных средств позволяют более глубоко автоматизировать процесс набора готовности стенда к подаче компонентов топлива, рабочих жидкостей и газов на изделие. Такая автоматизация, особенно эффективная для стендов с высокой интенсивностью типовых испытаний, например испытаний серийных изделий, может быть реализована с помощью экспертной системы, которая сможет выполнить все операции подготовки стенда к испытанию в режиме совета или в автоматическом режиме [8]. Пример такой системы приведен на рис. 3.6.

Прототипом экспертной системы является система контроля, диагностики и отображения (СКДО) параметров изделия, разработанная для испытаний ступеней космического ракетного комплекса (КРК) «Ангара» [9,10]. Типовой характер процесса подготовки и набранная при проведении множества испытаний статистическая информация по параметрам подачи рабочих сред позволяют создать экспертную систему, обобщающую опыт, накопленный при выполнении типовых операций и имеющую в своей основе базу знаний и базу данных.



**Рис. 3.6. Функциональная схема автоматизации процесса подготовки к испытаниям с использованием экспертной системы**

База знаний должна содержать формальное описание общего алгоритма подготовки, типовых операций по каждой стендовой системе, моделей поведения параметров («трендов»), методов контроля параметров и взаимосвязи с окружающей средой и другими системами стенда. База данных представляет собой массив переменных, значения которых характеризуют каждое испытание, например режимы работы двигателя, общее время и время каждого режима, параметры окружающей среды и др., и позволяют настроить экспертную систему на конкретное испытание. То есть, по сути, речь идет о создании модели стендовой ПГС, работающей в режиме реального времени при заправке стенда и подготовке его к испытаниям. Одним из условий работы экспертной системы является ее «обучаемость», т.е. модель не должна быть статичной, а должна автоматически корректироваться с учетом опыта проводимых работ.

Помимо выполнения технологических операций подготовки к пуску экспертная система может выполнять диагностику стендовой арматуры, вырабатывая своевременные рекомендации по проведению профилактических работ в целях предупреждения выхода элементов автоматики (ЭА) из строя при подготовке к испытаниям, так как такие случаи нередки и приводят к существенным задержкам, а порой и к отмене испытания. Здесь требуются исследование и разработка методов диагностирования технического состояния ЭА стендовой ПГС и определяющих параметров для каждого типа ЭА.

Таким образом, существующий уровень развития стендовых ИУС и вычислительных средств позволяет создавать экспертные системы, аккумулирующие опыт ведущих специалистов и позволяющие автоматизировать процесс заправки и подачи на изделие рабочих сред и диагностировать неисправность стендовых агрегатов, существенно повышая надежность выполнения подготовительных операций.

**Непосредственно испытания** изделия проводятся по циклограмме, обеспечивающей работу двигателей, систем питания топливом, органов управления в течение времени, близкого к продолжительности полета. При испытаниях проверяется работа системы управления с элементами автоматики двигателя при его запуске и выключении, точность действия систем управления расходом топлива (СУРТ) или систем опорожнения баков (СОБ) и регулирования кажущейся скорости (РКС), а также работа органов управления по заданной программе. В ходе испытаний измеряются параметры стенда и изделия. Кроме того, фиксируются прохождение команд от системы управления, моменты срабатывания элементов автоматики, угловые перемещения и скорости поворота органов управления, показания датчиков СУРТ (СОБ), РКС, температуры и давления в топливных баках, деформации конструкций, частоты и амплитуды колебаний элементов основных отсеков и т.д.

Важным моментом испытаний ЖРД и ступеней РН является момент принятия решения о готовности к запуску двигателя. Оно принимается на основании анализа комплекса параметров, характеризующих состояние ПГС, компонентов топлива и рабочих газов изделия. Современные ИУС позволяют автоматизировать процесс контроля готовности к запуску ЖРД, что реализовано на многих стендах отрасли.

Автоматизированный контроль готовности к запуску двигателя был заложен и в штатную технологию подготовки пуска КРК «Ангара». Штатные алгоритмы контроля, реализованные в стендовой системе управления изделием и отработанные при огневых испытаниях первой ступени, включали анализ ряда параметров, характеризующих температуру окислителя на входе в двигатель, вакуумирование полостей двигателя, давление рабочих газов, состояние клапанов и т.д. Контроль по каждому параметру осуществлялся в определенные интервалы времени в ходе автоматического выполнения ИУС циклограммы предпусковых операций. Индикация результатов контроля в виде информационного табло со значениями параметров и сигналами «норма»/«не норма» выводилась на экраны автоматизированных рабочих мест (АРМ) контроля, диагностики и отображения параметров изделия (СКДО) и пульт оператора ИУС изделия. В случае формирования сигнала «не норма» в алгоритмах контроля по некоторым параметрам было предусмотрено аварийное прекращение подготовки пуска с автоматическим разворачиванием соответствующей циклограммы, а по отдельным параметрам решение о прекращении подготовки пуска формировалось в ИУС в режиме «совет».

Управление запуском, работой двигателя и его остановом, а также контроль основных параметров двигателя выполняются системой управления и аварийной защиты в автоматическом режиме, требующем вмешательства специалистов только в случае возникновения визуальных признаков аварийной ситуации на изделии или стенде. Испытательная команда контролирует ход испытания по информации на дисплеях АРМ.

**Послепусковые операции** выполняются операторами системы управления по командам ведущих специалистов и имеют целью приведение изделия и стенда в безопасное состояние.

**Обработка результатов и выпуск отчетной документации.** По окончании испытания выполняется обработка результатов регистрации данных по каждой из систем управления, контроля и измерения в целях приведения к единой форме. Материалы передаются в специальную службу анализа. Служба анализа интегрирует данные с разных систем и обрабатывает их совместно со службами испытательного комплекса, используя методики, разработанные конструкторами изделия. Производится анализ работы ИУС, САЗ, выполнения заданной циклограммы испытания, работы систем управления расходом топлива, тягой и ее вектором, контроля заправки баков изделия совместно со специалистами – разработчиками систем. По результатам анализа в зависимости от характера проведенных работ выпускаются следующие отчетные документы:

- экспресс-данные;
- протокол испытания;
- техническая справка;
- экспресс-отчет;
- технический отчет;
- заключение.

**Экспресс-данные** выдаются после испытания, результаты которого используют для оценки работоспособности изделия, его систем, узлов, агрегатов и систем стенда.

**Протокол испытания** выпускается по отдельным испытаниям или серии испытаний и он содержит фактические материалы, полученные при испытаниях, без окончательных выводов.

**Техническая справка** выпускается по отдельным испытаниям и содержит краткие фактические материалы испытаний без анализа, выводов и рекомендаций.

**Экспресс-отчет** выпускается по отдельным или серии испытаний. Кроме фактических материалов испытаний он содержит выводы по их результатам. Однако выводы экспресс-отчета нельзя считать окончательными, так как предполагаются дальнейшие исследования материалов испытания.

**Технический отчет** выпускается после окончания испытаний по данной программе, этапу работ или по результатам отдельного испытания и содержит результаты всех работ по подготовке и проведению испытаний изделия с анализом работы всех систем и агрегатов изделия, выводы и рекомендации о работоспособности, а также заключение о готовности изделия к следующему этапу отработки.

**Заключение** выпускается по требованию главного управления по принадлежности изделия, главного конструктора комплекса, председателя комиссии (межведомственной или государственной) по проведению испытаний после окончания испытаний по программе, этапу работ или по результатам отдельного испытания и содержит основные результаты испытания, выводы и рекомендации.

### 3.2. Информационная структура системы испытаний

Любая сложная система определяется структурой и поведением. Эти понятия являются такими же фундаментальными, изначальными, неопределяемыми понятиями, как для физики пространство и время. Под *структурой* понимается инвариантная во времени фиксация связей между элементами системы (статическое описание системы). Под *поведением* системы понимается ее функционирование во времени (динамическое описание системы). Поведенческие аспекты системы выражаются с помощью понятий «функция» и «цель». В самом общем плане *цель* – это состояние (совокупность свойств системы, определяющих характер ее отношений с внешней средой), к которому направлена тенденция движения системы. С усложнением системы возрастает и сложность ее поведения [11].

В данном разделе дается видение авторов в части *структурной составляющей испытательной системы*. Структурированию прежде всего подлежат экспериментальные данные и технологии, связанные с их хранением, доступом и получением необходимых характеристик испытываемых изделий на протяжении их жизненного цикла.

**Объем и содержание экспериментальных данных.** Экспериментальные данные представляют собой особый вид информации, характерной особенностью которого является тесная взаимосвязь различных фрагментов информации, относящихся к одному эксперименту. Причем существует определенный необходимый набор данных, позволяющий использовать результаты конкретного эксперимента. В общем виде в этот набор входят:

- описание объекта исследования;
- описание экспериментальной установки;
- описание условий проведения эксперимента;
- описание технологии проведения эксперимента;
- описание средств измерения параметров объекта исследований;

описание методик получения параметров объекта исследований;  
параметры объекта исследований, зарегистрированные в ходе проведения эксперимента;

описание свойств объекта исследований, выявленных при проведении эксперимента.

Применительно к испытаниям РКТ необходимый набор информации по каждому эксперименту должен содержать:

***описания объекта исследования:***

перечень узлов и агрегатов, входящих в состав обрабатываемого изделия с указанием их заводских номеров (комплектация изделия);

конструкторскую документацию (графическую и текстовую), а также изменения и дополнения этой документации, позволяющие определить устройство изделия, подвергнутого испытанию в данном эксперименте;

***описания экспериментальной установки:***

перечень узлов и агрегатов, входящих в состав экспериментальной установки; конструкторскую документацию (графическую и текстовую), а также изменения и дополнения этой документации, позволяющие определить устройство экспериментальной установки, использованной в данном эксперименте;

***описания условий проведения эксперимента:***

атмосферные условия (барометрическое давление, температура);  
данные химического анализа использованных компонентов топлива и газов;  
настройку стендовых систем (давление в баллонных, настойки редукторов, настройки обратных связей);

настройку изделия;

настройку системы управления (заданную циклограмму, алгоритмы регулирования);

настройку системы аварийной защиты;

описание изменений состояния стенда при проведении эксперимента.

***описания средств измерения параметров объекта исследований:***

перечень датчиков, преобразователей и регистраторов с указанием их заводских номеров;

конструкторскую документацию (графическую и текстовую), а также изменения и дополнения этой документации, позволяющие определить устройство системы измерения, использованной в данном эксперименте;

описание коммутации датчиков, преобразователей и регистраторов, использованных в данном эксперименте;

описание алгоритмов преобразования сигналов датчиков (электрических) в физические значения;

использованные при преобразовании тарировки датчиков и преобразователей;

***описания методик получения параметров объекта исследований:***

описание использованного алгоритма получения косвенно измеряемых параметров;



описание использованного алгоритма получения характеристик объектов исследования;

описание использованных справочных данных.

**параметры объектов исследований, зарегистрированные в ходе проведения эксперимента:**

значения параметров прямого и косвенного измерения в виде хронологических рядов различной дискретности;

оценки точности и достоверности полученных параметров;

**описания свойств объекта исследований, выявленных при проведении эксперимента:**

значения характеристик объектов исследований, полученные при проведении эксперимента;

описание изменений состояния объекта (в том числе при авариях), произошедших при проведении эксперимента.

Приведенный комплекс информации по каждому отдельному испытанию составляет единое *описание эксперимента*, наличие которого является необходимым условием использования результатов данного испытания при получении характеристик объектов исследований.

В процессе дальнейшей обработки нескольких описаний экспериментов происходит выделение характеристик отдельного объекта исследования, которые не имеют жесткой связи с конкретным экспериментом и, соответственно, находятся вне его описания. Данные характеристики, принадлежащие к категории конечных продуктов экспериментальных исследований, имеют высокую потребительскую ценность. Необходимо отметить, что описание процесса получения такого рода характеристики в силу его уникальности является необходимым приложением к ней и наличие такого описания в значительной степени определяет ценность характеристики.

Таким образом, для полноценного использования результатов испытаний должна сохраняться следующая информация:

описание эксперимента для каждого проведенного испытания;

все полученные характеристики для каждого из объектов исследования;

описания способа получения для каждой характеристики.

**Технологический процесс сбора информации.** Опираясь на приведенный выше перечень информации, необходимой для создания полноценного описания эксперимента, типовой технологический процесс сбора информации в рамках испытательного комплекса можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3.7. На схеме серым цветом выделены подразделения испытательного комплекса, а также другие субъекты, являющиеся источниками поступления или редактирования информации.

На приведенной схеме видно, что источниками необходимой для создания полноценного описания эксперимента информации являются практически все структурные подразделения испытательного комплекса. Причем в ряде

случаев информация, оформленная в виде единого документа, создается и редактируется несколькими различными службами. Необходимо также отметить, что вся описанная информация необходима тем или иным службам испытательного комплекса для подготовки и проведения эксперимента, а в некоторых случаях нескольким службам одновременно. При бумажном способе хранения и передачи информации это приводит к существованию нескольких, часто противоречащих друг другу копий информации. Попытки сбора информации с применением доминирующей в настоящее время бумажной технологии приводит к формированию неполноценных описаний экспериментов. Это означает, что, во-первых, часть экспериментов оказывается неиспользованной из-за неизбежной недостоверности информации, а во-вторых, число получаемых характеристик и число возможных объектов исследования оказываются существенно ограниченными.

Повышение информационной отдачи каждого эксперимента, по нашему мнению, может быть достигнуто за счет внедрения *единой в рамках испытательного комплекса автоматизированной системы*, на которую должны быть возложены как задачи сбора информации для формирования описания эксперимента, так и задачи информационного обеспечения служб испытательного комплекса в процессе подготовки и проведения испытания. Объединение этих двух функций в одной системе является, по-видимому, единственным способом обеспечения достоверности и непротиворечивости информации при формировании описания эксперимента.

Основные функции *единой информационной системы* испытательного комплекса:

- обеспечение пользователей необходимыми средствами поиска и одновременным доступом к необходимой им информации;

- обеспечение пользователей необходимыми средствами ввода и редактирования информации, носителем которой они являются;

- поддержка максимальной непротиворечивости создаваемого описания эксперимента;

- регулирование прав доступа к просмотру и редактированию информации.

В силу специфики экспериментальных работ, где как результат, так и процесс проведения эксперимента в значительной части случаев не может быть спрогнозирован, а также в силу того, что носителями значительного объема информации являются непосредственные исполнители технологических операций подготовки и проведения испытания, полная автоматизация большинства операций рассматриваемого технологического процесса нецелесообразна. Поэтому автоматизированная система должна представлять собой комплекс аппаратных и программных средств, ориентированных на диалог с непосредственным носителем или потребителем информации.

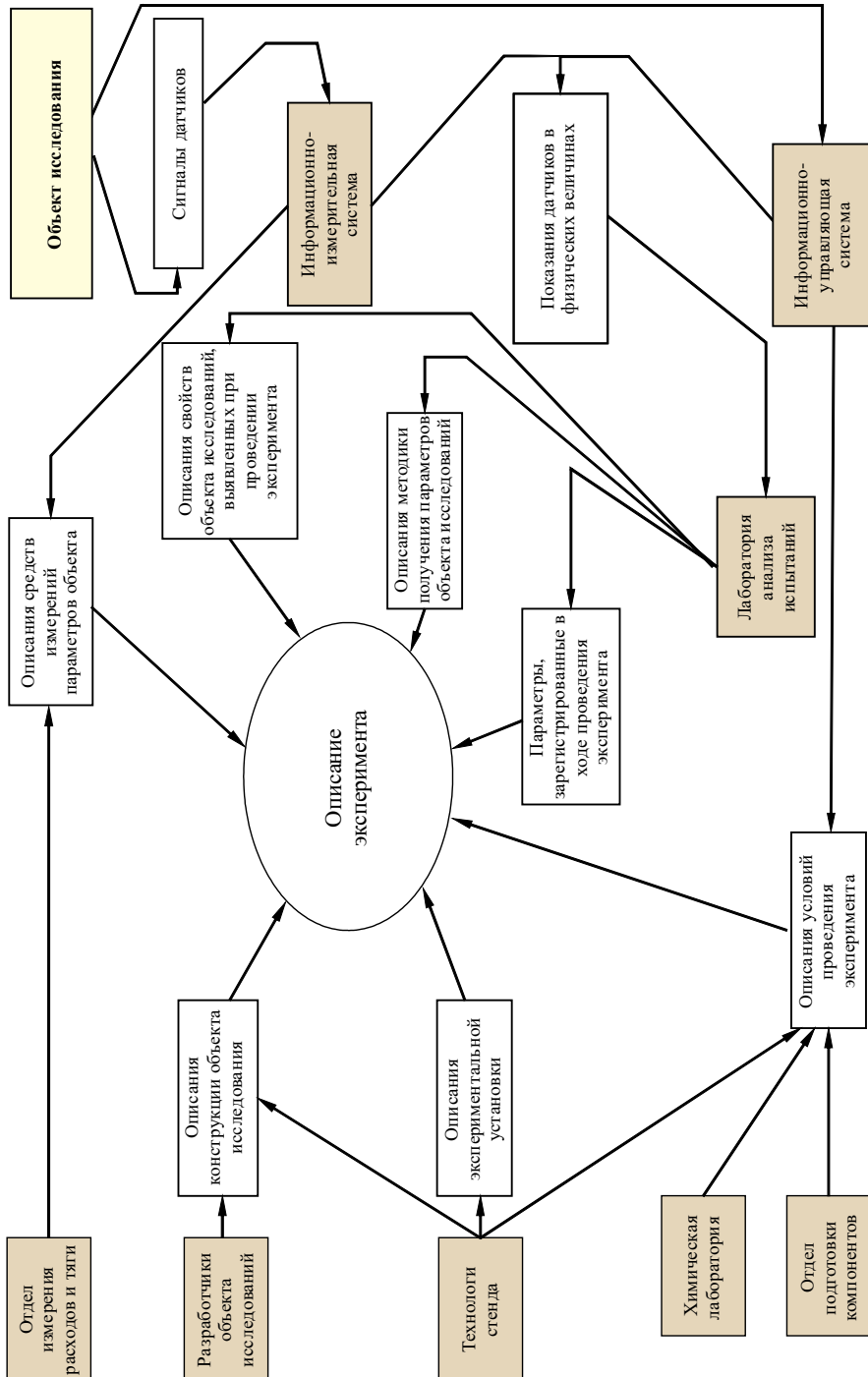


Рис 3.7. Схема технологического процесса сбора информации

Необходимо особенно отметить, что эффект от единой информационной системы испытательного комплекса во многом будет зависеть от доступности перечисленных средств непосредственным носителям или потребителям информации. Опыт выполнения частично автоматизированных операций процесса показывает, что операторы и другой технический персонал, являющийся посредником между носителем информации и автоматизированной системой, являются также основным источником ошибок и искажений информации. Центром автоматизированной единой информационной системы испытательного комплекса должна являться *база данных*, на которую будет возложена функция поддержания непротиворечивости описания эксперимента в процессе формирования его в многопользовательском режиме доступа.

**Технологический процесс получения характеристик и оценок обрабатываемых изделий.** Последовательность основных операций процесса получения характеристик и оценок обрабатываемого изделия выглядит следующим образом:

- определение набора факторов, учитываемых при получении характеристики;
- определение диапазонов изменения факторов и сочетаний этих диапазонов;
- определение набора экспериментов, при которых имелась необходимая информация и воспроизводились исследуемые сочетания факторов;

- отыскание в описаниях каждого отобранного эксперимента соответствующих выбранному сочетанию факторов значений исследуемой характеристики или параметров, позволяющих ее определить;

- создание из значений факторов и соответствующих им значений характеристики выборки по всем отобранным экспериментам;

- статистическая обработка выборки и получение характеристики объекта исследования;

- сравнение полученной характеристики с требованиями ТЗ и формирование оценки объекта исследования.

Выполнение первых пяти из перечисленных выше операций однозначно связано с поиском и отбором экспериментальных данных. Автоматизация подобных процессов является традиционной областью использования систем управления базами данных (СУБД). Однако необходимо отметить, что и при создании автоматизированной системы получения характеристик работы объектов исследования следует ориентироваться на организацию активного диалога с пользователями, поскольку автоматизация таких операций, как определение учитываемого набора факторов или диапазонов их допускаемого изменения, принципиально невозможна.

**Концепция структурирования экспериментальных данных.** Как следует из предшествующего материала, СУБД является основным инструментом в двух технологических процессах. Первый из них – это технологический

процесс сбора информации и создания описания эксперимента. Второй – технологический процесс статистической обработки и получения характеристик и оценок обрабатываемых изделий.

При использовании базы данных в процессе создания описания эксперимента на нее возлагаются задачи организации многопользовательского доступа к данным и поддержания их непротиворечивости и целостности при редактировании данных. Решение этих задач является традиционной областью использования систем управления обработкой транзакций (OnLine Transaction Processing – OLTP). В [12] приводится следующее описание задач, для решения которых необходимо OLTP:

**одновременный доступ.** Множество пользователей могут одновременно обращаться к одной и той же строке, но в конкретный момент времени только один пользователь имеет возможность изменять данные. На строку накладывается блокировка, так что пользователи могут читать данные, но не изменять их. Разные типы блокировок обеспечивают разный доступ другим пользователям. Если одному из пользователей необходимо изменить ту же строку, то он должен дожидаться, пока первый пользователь завершит изменение. Система OLTP должна гарантировать, что только один пользователь в конкретный момент времени сможет изменять данные. Пример: при реализации билетов в кинотеатр через несколько пунктов продажи необходимо гарантировать, что на одно место был продан только один билет. OLTP гарантирует, что два пункта продажи не смогут продать два билета на одно и то же место;

**целостность изменений.** Все проводимые в базе изменения выполняются в виде *транзакций*. Каждая транзакция может включать в себя несколько шагов изменения. Система OLTP гарантирует, что все включенные в транзакцию шаги будут выполняться как одно целое. Если любой из шагов транзакции будет выполнен неудачно, то все выполненные в транзакции изменения будут отменены. Тем самым поддерживается целостность данных. Пример: при переводе денег между банками сумма снимается со счета в первом банке и кладется на счет во втором банке. Если не удастся положить деньги на счет, то сумма будет потеряна, так как в первом банке деньги уже сняты. Транзакции гарантируют, что если не удастся положить деньги во второй банк, то они останутся лежать в первом банке.

Сравнив это описание с основными функциями единой информационной системы испытательного комплекса, можно отметить полное совпадение требований, предъявляемых к СУБД. Таким образом, единая информационная система испытательного комплекса должна строиться как система OLTP. Соответственно, должна быть конфигурирована и база данных, в которой может создаваться описание эксперимента.

С другой стороны, при получении характеристик и оценок обрабатываемых изделий задачи, возлагаемые на СУБД, оказываются ближе к задачам, возлагаемым в настоящее время на системы поддержки принятия решений

или системы OLAP (OnLine Analytical Processing). В литературе приводится следующее описание особенностей OLAP-систем: «Фундаментальное отличие системы OLAP от обычной базы данных заключается в следующем:

система OLAP характеризуется *отсутствием изменений данных*. Можно сказать, что данные используются только для чтения. Это позволяет более компактно располагать данные на страницах базы данных, увеличив плотность записи до 100 %;

для проведения эффективного анализа в системе OLAP обычно создается множество индексов, ускоряющих проведение анализа и выборки данных. Выполнение запросов не должно превышать 5 с;

система OLAP должна выполнять базовые операции *численного и статистического анализа*. Кроме того, необходимо реализовать многомерное представление информации, что позволяет более наглядно представлять структуру данных;

для более эффективного анализа данных должна поддерживаться возможность создания *материализованных представлений*. Каждое материализованное представление представляет собой конкретный запрос, а вычисление данных для этого запроса производится на стадии добавления или изменения данных. Это позволяет к тому моменту, когда пользователи обратятся с запросом, иметь готовый результат. Материализованные представления позволяют резко увеличить производительность при выполнении типичных запросов;

системы OLAP должны обеспечивать *сохранность конфиденциальных данных*, обеспечивая совместный доступ к информации множества пользователей. Подсистема безопасности должна пресекать попытки несанкционированного доступа к информации, в то же время разрешая авторизированным пользователям выполнять просмотр и анализ корпоративных данных.»

Нетрудно заметить, что описанные особенности систем OLAP полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к базе данных результатов испытаний на этапе получения характеристик и оценок обрабатываемых изделий.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что на различных этапах обработки экспериментальных данных база данных должна выполнять принципиально различные функции. В соответствии с этим требования к структуре базы, и особенно к СУБД, оказываются противоречивыми и зачастую взаимоисключающими. Поэтому перед началом непосредственного проектирования структуры базы данных необходимо сделать выбор приоритетного направления использования СУБД и, как следствие, основных, принципов конфигурирования базы данных.

Автоматизация процесса сбора информации является сложной и дорогостоящей задачей. Конкретное конфигурирование СУБД для решения этой задачи во многом зависит от особенностей структуры конкретного испытательного комплекса, поэтому далее мы ограничимся рассмотрением принципов конфигурирования СУБД и базы данных как системы поддержки принятия решений.

Обобщая изложенное выше, можно сформулировать следующие принципы построения структуры базы экспериментальных данных:

основным приоритетом является максимальная скорость отработки запроса пользователя и создание выборки данных. Как следствие, таблицы базы данных должны быть нормализованы в форме не ниже третьей и, как правило, иметь в качестве ключевых индексные поля;

пользовательский интерфейс должен предоставлять максимальные удобства в создании запросов;

средствами СУБД должны осуществляться базовые операции численного и статистического анализа;

средствами СУБД должно осуществляться хранение созданных пользователем запросов, а также реализация материализованных представлений;

средства СУБД должны обеспечивать минимальный уровень поддержания целостности данных, однако использование механизма транзакций должно быть ограничено и не препятствовать работе СУБД по формированию выборок данных;

средства СУБД должны обеспечивать функции регулирования доступа к данным, обеспечивая защиту данных от несанкционированного доступа.

За всю историю развития баз данных было разработано множество способов хранения, структуризации и обработки информации. По технологии обработки базы данных подразделяются следующим образом:

**распределенная база данных.** Этот способ обработки требует использования нескольких серверов, на которых может храниться пересекающаяся или даже дублирующаяся информация. Для работы с такой базой данных используется система управления распределенными базами данных (СУРБД);

**централизованная база данных.** При таком способе обработки база данных располагается на одном компьютере-сервере. Если для этого компьютера установлена поддержка сети, то множество пользователей с клиентских компьютеров могут одновременно обращаться к информации, хранящейся в центральной базе данных. В локальных сетях чаще всего используется именно такой способ обработки данных.

Системы централизованных баз данных с сетевым доступом имеют различные архитектуры:

**файл-сервер.** Эта архитектура предполагает использование выделенного компьютера в качестве сервера файлов. На этом сервере хранятся файлы базы данных, которые по запросу пользователей копируются на их локальные компьютеры. Там и проводится вся основная обработка данных. После того как пользователи выполнят необходимые изменения данных, они копируют файлы обратно на файл-сервер, где другие пользователи, в свою очередь, могут снова их использовать. Кроме того, каждый пользователь может создавать на локальном компьютере свои собственные базы данных, используемые

им монополюно. При использовании архитектуры файл-сервер производительность системы резко падает с ростом числа пользователей;

**клиент-сервер.** При использовании этой архитектуры выделенный компьютер не только используется в качестве хранилища файлов, но и выполняет основной объем действий по обработке информации. Пользователь (клиент) с рабочей станции отправляет список операций обработки данных (запрос), которые необходимо выполнить, центральному компьютеру (серверу). Сервер выполняет необходимые вычисления и выборку данных и отправляет готовый результат клиенту. Для описания запросов часто используется структурный язык запросов – SQL (Structured Query Language), специально разработанный для этих целей.

Помимо подразделения баз данных по методам обработки можно классифицировать их по используемой модели (или структуре) данных. Модель данных включает в себя структуры данных, операции их обработки и ограничения целостности. С помощью модели данных можно наглядно представить структуру объектов и установленные между ними связи. В терминологии моделей данных используются понятия «элемент данных» и «правила связывания». Элемент данных описывает любой набор данных, а правила связывания определяют алгоритмы взаимосвязи элементов данных.

К настоящему времени разработано множество различных моделей данных, но на практике используются три основных.

**Иерархическая модель данных,** которая, как следует из названия, имеет иерархическую структуру, т.е. каждый из элементов связан только с одним вышестоящим элементом, но в то же время на него может ссылаться один или несколько нижестоящих элементов. В терминологии иерархической модели используются более конкретные понятия, чем элемент данных и правила связывания: «элемент» (узел), описывающих некоторый объект, хотя, в принципе, это может быть любой набор данных, имеющих какой-то ключевой атрибут. Иерархическая модель схематически изображается в виде графа, где каждый узел является вершиной. Эта модель представляет собой совокупность элементов, расположенных в порядке их подчинения от общего к частному и образующих перевернутое дерево (граф). Иерархическое дерево имеет единственную вершину, не подчиненную никакой другой вершине и находящуюся на самом верхнем (первом) уровне. Число вершин первого уровня определяет число деревьев в базе данных.

**Сетевая модель данных.** В этой модели используется та же терминология, что и в иерархической модели: «узел», «уровень» и «связь». Единственное различие между иерархической и сетевой моделями данных заключается в том, что в последней каждый элемент данных может быть связан с любым другим элементом.



**Реляционная модель данных.** Основная идея реляционной модели данных заключается в том, чтобы представить любой набор данных в виде двумерной таблицы. В простейшем случае реляционная модель описывает единственную двумерную таблицу, но чаще всего эта модель описывает структуру и взаимоотношения между несколькими различными таблицами.

Наименьшая единица данных, которой оперирует реляционная модель данных, – это отдельное атомарное для данной предметной области значение данных, которое не может быть разложено на более простые составляющие.

Множество атомарных значений одного и того же типа образуют домен. В самом общем виде домен определяется заданием некоторого базового типа данных, к которому относятся элементы домена, и произвольного логического выражения, применяемого к элементам данных. В простейшем случае домен определяется как допустимое потенциальное множество значений одного типа.

Если два значения берутся из одного и того же домена, то можно выполнять сравнение этих двух значений.

Некоторое множество атрибутов образует ключ для данного отношения, если задание значений этих атрибутов однозначно определяет значения всех остальных атрибутов в таблице.

Множество атрибутов отношения является возможным ключом тогда и только тогда, когда удовлетворяются два независимых от времени условия:

**уникальность.** В каждый момент времени никакие два различных кортежа отношения не имеют одинакового значения для комбинации входящих в ключ атрибутов. То есть в таблице не может быть двух строк, имеющих одинаковый идентификационный номер или номер паспорта.

**минимальность.** Ни один из входящих в ключ атрибутов не может быть исключен из ключа без нарушения уникальности.

Каждое отношение имеет по крайней мере один ключ. Один из ключей выбирается в качестве первичного ключа. Остальные ключи, если они есть, принимаются за альтернативные.

Приведенные выше понятия легли в основу реляционной модели данных, которая в настоящее время является наиболее эффективной и популярной моделью, поэтому *далее база данных результатов испытаний рассматривается как реляционная.*

Реляционная база данных – это совокупность отношений, содержащих всю информацию, которая должна храниться в базе данных. То есть база данных представляет собой набор взаимосвязанных таблиц, необходимых для хранения всех данных.

**Описание объекта исследований.** При формировании структуры группы таблиц, составляющих описание объекта исследований, целесообразно разделить описания, присущие данному объекту как типу, и описания, присущие данному экземпляру объекта исследования. Такое разделение позволяет избежать дублирования информации и значительно сократить объем базы данных.

В базе данных группа таблиц, составляющих описание объекта исследования (ОИ) как типа, может содержать следующие таблицы:

- список ОИ;
- список агрегатов ОИ;
- список измеряемых параметров ОИ;
- список косвенно определяемых параметров ОИ;
- список характерных режимов ОИ;
- список характерных событий ОИ;
- список характеристик ОИ;
- список характеристик агрегатов ОИ.

Группа таблиц, дополняющая описание отдельного экземпляра ОИ, включает:

- особенности ОИ;
- комплектацию ОИ;
- значения заводских характеристик агрегатов ОИ.

Структура группы, представляющей описание объекта исследований, представлена на рис. 3.8. В состав каждой таблицы помимо информационных полей включены индексные поля, которые используются в качестве внешних ключей при организации связей с дочерними таблицами. Этот прием обусловлен общим принципом построения базы данных как системы поддержки принятия решений и призван ускорить операции поиска за счет использования операций целочисленного сравнения. Для идентификации особенностей экземпляра объекта исследований используется его заводской номер, аналогично проводится и идентификация особенностей экземпляра агрегата ОИ. В макетах таблиц выделены ключевые поля. Связи обозначены стрелками в направлении от родительской таблицы к дочерним таблицам.

**Описание экспериментальной установки.** Как видно на схеме, приведенной на рис. 3.9, структура описания экспериментальной установки (ЭУ) практически полностью повторяет структуру описания объекта исследования. Главным отличием является использование в качестве идентификатора состояния стендовых систем и стенда в целом даты последней модификации системы. Такая организация информации обусловлена существующей системой документирования изменений систем стенда, когда изменения фиксируются в журнале проведения стендовых работ по дате проведения доработок.

**Условия проведения эксперимента и полученные в ходе эксперимента данные.** Эта группа таблиц непосредственно связана с конкретным экспериментом, и идентификатором записей в данной группе таблиц выступает индивидуальный индекс испытания. Структура группы представлена на рис. 3.10.

Из схемы видно, что главное связывание таблиц группы происходит по индексу испытания. Связи, отмеченные на рисунке штриховыми линиями, невозможно реализовать стандартными средствами базы данных. Эти связи могут быть реализованы путем создания специализированного программно-математического обеспечения в рамках разработки ПМО СУБД.

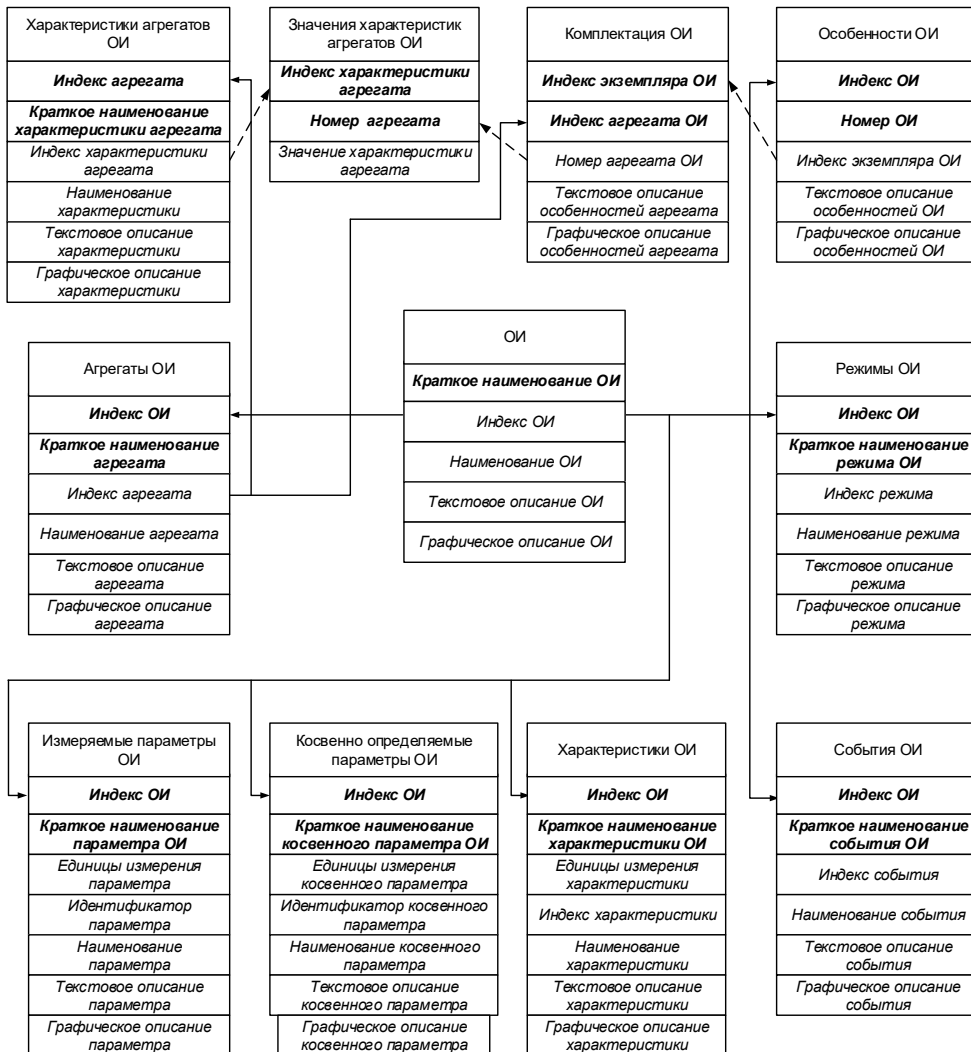


Рис. 3.8. Структура описания объекта исследований

Особое место в данной группе таблиц занимают таблицы с уникальными именами, предназначенные для хранения параметров работы ЖРД при испытаниях. Число этих таблиц в разрабатываемой базе заранее не определено. Эти таблицы предполагается создавать динамически при занесении в базу результатов очередного испытания. Каждой создаваемой таблице будет присваиваться уникальное название, которое одновременно будет помещаться в соответствующее поле таблицы размещения параметров. Именно использование этого названия и будет обеспечивать доступ к данным при осуществле-

нии запросов. Необходимо отметить, что названия колонок (полей) этих динамически создаваемых таблиц будут соответствовать идентификаторам параметров, хранимым в соответствующих таблицах описания объекта исследований или экспериментальной установки. Обеспечение этой связи также возлагается на специальное программно-математическое обеспечение.

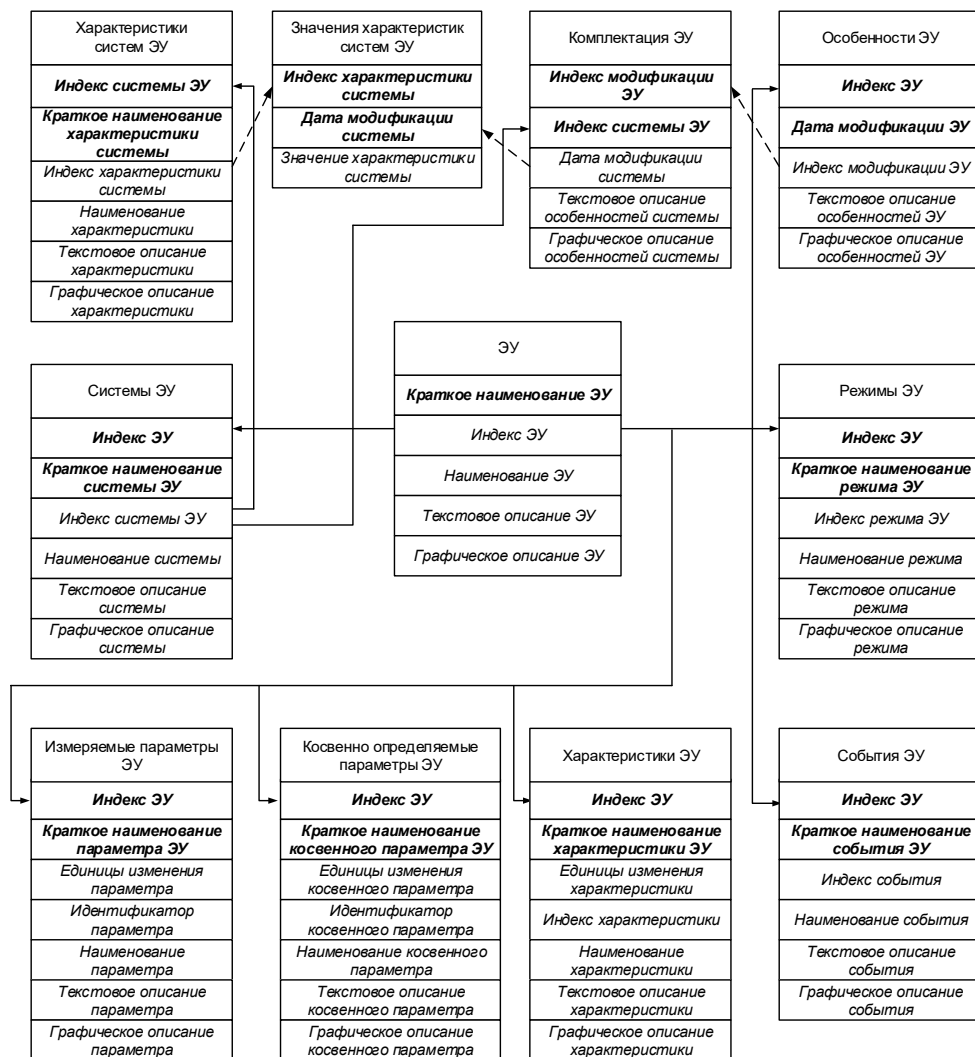


Рис. 3.9. Структура описания экспериментальной установки

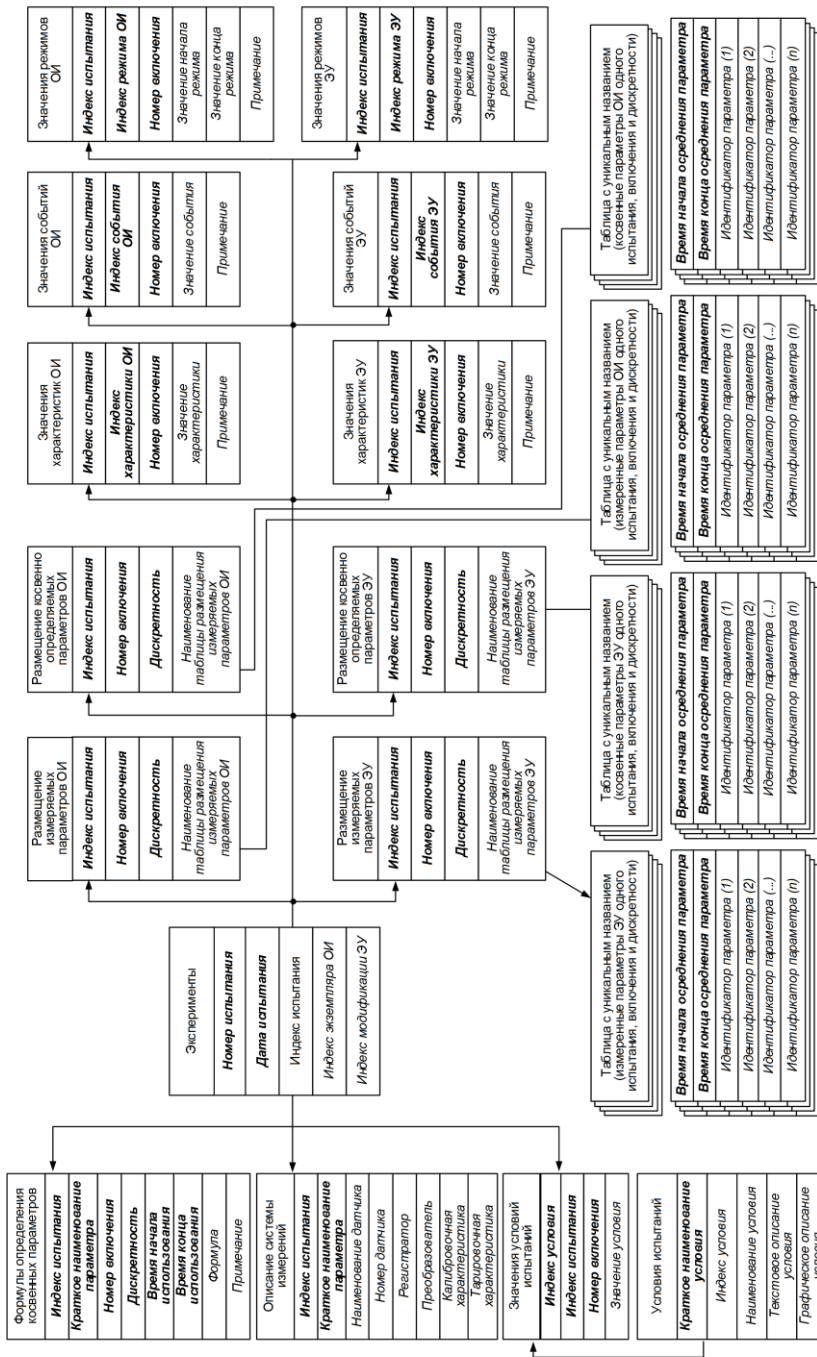


Рис. 3.10. Структура описания условий проведения эксперимента и размещения экспериментальных данных

### 3.3. Программно-алгоритмическая модель описания технологических процессов подготовки и проведения испытаний

В данном разделе на примере особенностей технологии испытаний сложных изделий РКТ как комплекса организационных мер, производственных операций, процессов и приемов, направленных на достижение цели испытаний (получение необходимой информации об объекте исследований), дается описание динамической *составляющей испытательной системы*. Показано, что система испытаний изделий РКТ имеет ярко выраженную ситуационную модель поведения. На объект управления (стендовые системы, изделие) подаются управляющие воздействия, в результате которых он, реагируя на них, переходит в некоторое *состояние* (ситуацию). Состояние характеризуется множеством специфических для данного состояния свойств объекта и остается «стабильным» до тех пор, пока над объектом не будет выполнено действие, в результате которого его состояние может измениться. *Переход* из одного состояния в другое осуществляется при достижении определенных условий или событий. Для описания *динамики испытательной системы* предложена модель параллельно функционирующих конечных автоматов как одна из наиболее простых и эффективных. Модель конечных автоматов не является единственно возможной. Существуют и другие способы алгоритмического описания управления поведением такого рода процессов [14–17].

Отработка технологического процесса подготовки пуска является одной из целей испытаний. Для начального этапа стендовых испытаний характерен полуавтоматический режим работы с большой долей «ручных» операций. К окончанию стендовых испытаний определяются данные, необходимые для разработчиков штатной технологии подготовки изделия и его пуска в условиях космодрома.

После этапа разработки конструкторской документации на схему «стенд – борт» конкретного изделия группа инженеров – ведущих по испытанию в числе многих других разрабатывает и согласовывает с заказчиком и участниками кооперации следующие документы:

- перечень элементов автоматики;
- программу измерений;
- сетевой график проведения испытаний;
- карты ведущего по испытанию и операционные карты ведущих по технологическим системам стенда;
- циклограмму испытания;
- перечень нештатных ситуаций.

**Перечень элементов автоматики** предназначен для разработки технологической документации и программного обеспечения систем управления бортовыми и стендовыми элементами автоматики при подготовке и проведении

испытаний. Перечень включает в себя исполнительные и информационные элементы автоматики.

К **исполнительным элементам** автоматики относятся электропневмоклапаны (ЭПК), пиросредства, приводы, нагреватели, команды управления приборами, алгоритмы, комплексные команды и т.п.

К **информационным элементам** относятся сигнализаторы давления, концевые выключатели, программные признаки, показания датчиков и приборов, расчетные параметры и т.п.

Каждый элемент автоматики представлен именем, обозначением на схеме ПГС, назначением, местом расположения (стенд/изделие), принадлежностью к определенной системе управления (если их несколько), описанием или блок-схемой алгоритма и т.д.

На многих стендах отрасли используется *номерная система обозначений* элементов автоматики. Это оправдано следующими обстоятельствами. При испытаниях серийных изделий символьные аббревиатуры для операторов имеют физический смысл. Более того сам процесс испытаний достаточно автоматизирован. Доля «ручных» операций невелика, а функции операторов часто выполняют сами инженеры-технологи, используя мнемосхемы с функцией непосредственного управления элементами автоматики (рис.3.11).

Испытания сложных экспериментальных изделий в отличие от серийных носят разовый характер. Для таких испытаний имеют место значительное число «ручных» операций и разделение функций ведущих инженеров и операторов систем. При таких обстоятельствах использование *символических обозначений* элементов автоматики требует большего внимания к их правильному произношению ведущими по испытанию и, соответственно, их восприятию операторами систем управления, особенно когда команды «включить» / «выключить» следуют одна за другой в пределах секунды. Более того, поскольку обозначения элементов автоматики от изделия к изделию изменяются, то возникает достаточно большая вероятность их ошибочной интерпретации испытательным персоналом.

Номерное обозначение для оператора обезличено. Команда выполняется достаточно быстро и надежно. Ведущий дает команды и контролирует их исполнение с помощью мнемосхем ПГС стенда и изделия, обеспечивающих наглядное графическое и цветовое представление о состоянии исполнительных элементов и запущенных алгоритмах. В отличие от мнемосхем-пультов для испытаний серийных изделий эти мнемосхемы ввиду их насыщенности служат лишь для контроля текущего состояния систем стенда и изделия в процессе испытаний (рис. 3.12).

В **программе измерений** в табличной форме для каждого измеряемого параметра содержатся его наименование, обозначение, размерность, диапазон

измерения, тип датчика, место расположения (стенд/изделие), принадлежность к определенной системе измерения или управления (если их несколько) и другая информация.

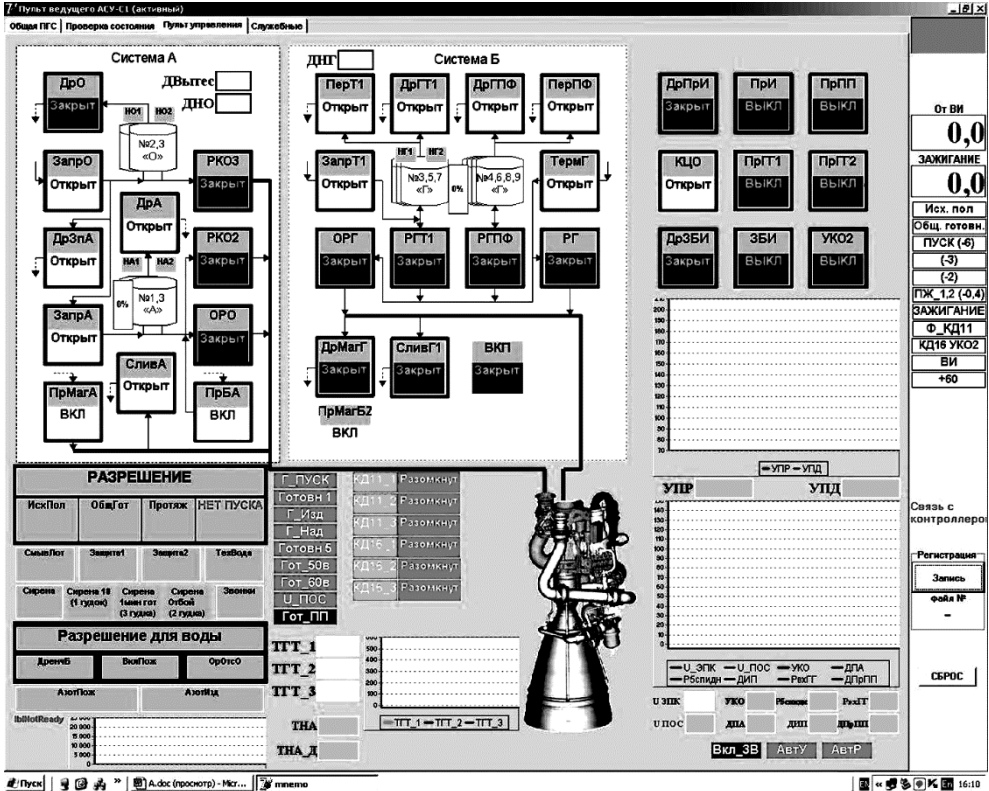


Рис. 3.11. Внешний вид панели пульта-мнемосхемы

При испытаниях сложных изделий общее число элементов автоматики и измеряемых параметров исчисляется несколькими тысячами, а алгоритмов контроля, управления и регулирования параметров стенда и изделия – сотнями.

**Сетевой график проведения испытаний** определяет последовательность технологических операций во времени. На рис. 3.13 показан пример сетевого графика испытаний ступени РН «Союз-2-1в».

**Карты ведущих** – технологические документы, содержащие описание действий и перечень команд ведущего по испытанию, ведущих инженеров отдельных технологических систем, обеспечивающих во временной последовательности выполнение операций технологического процесса подготовки и проведения испытаний изделия.



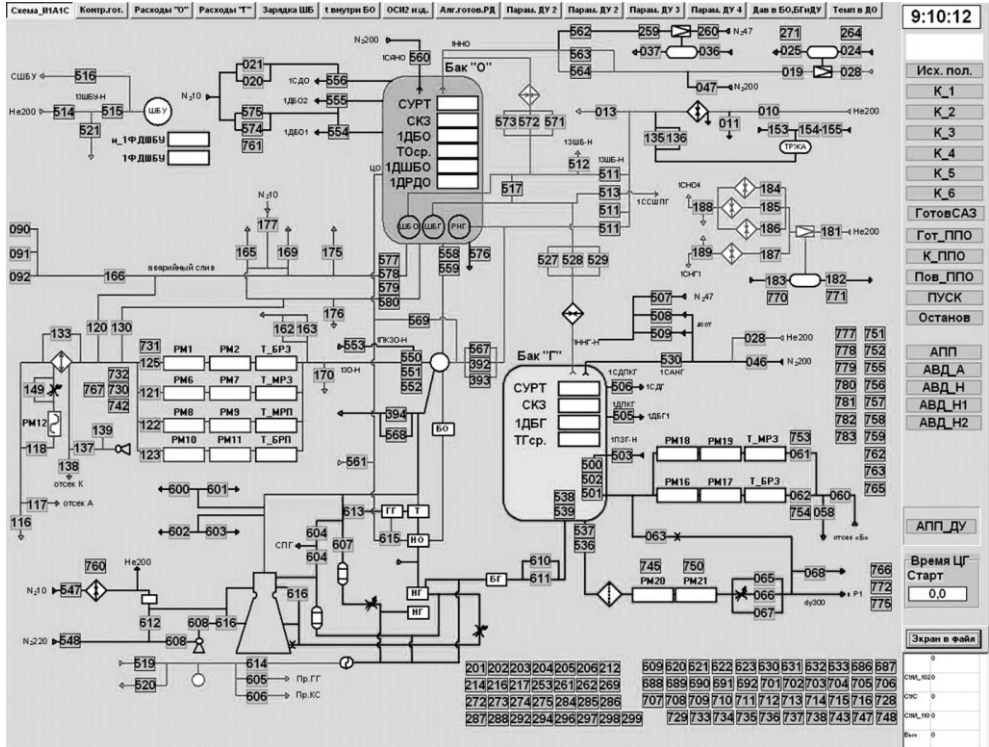


Рис. 3.12. Внешний вид одной из панелей мнемосхемы ведущего по испытанию ступени РН

Объем технологической документации для испытаний сложных изделий составляет десятки документов. Общая организация работ такого рода традиционна. Технологический процесс возглавляет ведущий по испытанию (ВИ). У него в подчинении находятся ведущие по технологическим системам: заправки бака окислителя (ВБО), заправки бака горючего (ВБГ), газоснабжения изделия (ВСГИ), термостатирования изделия (ВТИ), безопасности испытаний (ВБИ) и т.д. Ниже по уровню следуют операторы (ОП) информационно-измерительных систем (ИИС), информационно-управляющих систем стенда (ИУС-С), системы управления и аварийной защиты изделия (СУ-САЗ), пожаротушения (ПТ), системы измерения уровня заправки (СИУЗ) и т.д. Контроль хода испытания осуществляют представители разработчика изделия и предприятий кооперации. Из этой организационной структуры становится понятна роль комплексных проверок, в ходе которых отрабатывается в режиме виртуального испытания взаимодействие столь большого коллектива участников испытания.



Таблица 3.1

Фрагмент карты ведущего по испытанию

Исполнитель (оператор системы)	Команда ведущего по испытанию исполнителю, содержание операции	Контроль (доклад исполнителя или пара- метры визуального контроля)
ВБО	10.18 Дозаправить бак «О» до НУ по линии под- слива (6 минут до штатной циклограммы, если алгоритм 719 не включен)	
ВБО	10.19 Получить доклад о завершении дозаправки бака «О» до НУ	Бак «О» до НУ заправлен
ОП СУ-САЗ ОП ИУС-С	10.20 Команда «Общая готовность»	Есть «Общая готовность» Контроль состояния элементов автоматики по мнемосхеме, контроль параметров: Т78СБ = 30...40 °С Т80СБ = 30...40 °С Р33СБ = 2000±200 м <sup>3</sup> /ч Т82СБ = 30...40 °С ДБОа = 0,9...3,2 ати ДБГа = 0,2...0,4 ати Д75СБ = 47±3 ати Д99СБ, ДППП = 25±2 ати Т21СБ, Т24СБ, Т23СБ, Т10К = = -170...-180 °С
ОП ПТ	10.21 Включить насосы спецназначения №1, №3 и получить доклад об их включении, включить задвижки ЗД4, ЗД6	Насосы включены, задвижки открыты Контроль подачи воды
ОП СУ-САЗ	10.22 Включить питание бортовых приборов	Питание бортовых приборов включено
ОП СУ-САЗ	10.23 Автоматизированный контроль СУ-САЗ (тестирование)	Проводится автоматизированный контроль СУ-САЗ
ОП СУ-САЗ	10.24 Доложить о завершении автоматизирован- ного контроля СУ-САЗ	Автоматизированный контроль СУ-САЗ проведен, замечаний нет

Окончание таблицы 3.1

Исполнитель (оператор системы)	Команда ведущего по испытанию исполнителю, содержание операции	Контроль (доклад исполнителя или параметры визуального контроля)
ВБО ВБГ ведущий СУ-САЗ ведущий ИУС-С ведущий «ЦСКБ–«Прогресс»	10.25 Получить доклад от ВБО, ВБГ, СУ-САЗ, ИУС-С, «ЦСКБ – «Прогресс» о готовности к работе по штатной циклограмме	Есть готовность к работе по штатной циклограмме
	<b>11. Отработка штатной циклограммы</b>	ТОВДа < –182 °С
ВТИ	11.1 Прекратить подачу в ХО воздуха низкого давления	Есть прекратить подачу в ХО воздуха низкого давления Контроль параметров: P33СБ = 0 м <sup>3</sup> /ч
ОП СУ-САЗ	11.2 Выключить «Старт», доложить о выключении	«Старт» выключен
ОП СУ-САЗ	11.3 Команда « <b>Включение продувки ХО...</b> » (включение штатной циклограммы)	Есть « <b>Включение продувки ХО...</b> »
ВИ	11.4 Работа по штатной циклограмме в автоматическом режиме	Контроль прохождения штатной циклограммы ВИ контролирует параметры изделия и состояние элементов автоматике по мнемосхеме
ОП СИУЗ-Э ОП ИУС-С	11.5 По команде «Надув» переключиться на ускоренный режим регистрации, продолжительность регистрации 240 с. На 320-й с после команды « <b>Включение продувки ХО...</b> » выключить 450, включить 015	Есть ускоренный режим регистрации 450 выключен 015 включен
ОП СУ-САЗ	11.6 Доклад о завершении штатной циклограммы	Циклограмма завершена

**Циклограмма испытаний** определяет работу систем управления стендом и изделием. Форма представления стендовой циклограммы испытаний не стандартизирована и определяется в основном спецификой испытаний, а также многолетними традициями предприятий – разработчиков изделия и испытательных комплексов.

В качестве примеров ниже приведены упрощенный фрагмент карты ведущего по испытанию и циклограмма огневого испытаний ступени РН «Союз-2-1в». В примерах встречаются следующие сокращения: НУ, ВУ – номинальный и верхний уровни заправки соответственно; ХО – хвостовой отсек; МД – маршевый двигатель; РД – рулевой двигатель; АПП – аварийное прекращение пуска; АД – аварийное выключение двигателя; Отмена ПП – отмена предстартовой подготовки; КСТ – конечная ступень тяги; ПЩС – стендовый пневмоцилт; ДПК – дренажно-предохранительный клапан; РД5 – реле давления; РКО – разделительный клапан окислителя; ШБ – шар-баллон.

В левой колонке циклограммы «К-2» обозначает момент выдачи комплексной команды К-2; «К-2 + 150 с» – время через 150 с после выдачи команды К-2; «К-16 += 10 с» – время через 10 с после текущего значения К-16, после чего К-16 увеличивается на 10 с.

Таблица 3.2

#### Циклограмма огневого испытания

<b>Исходное положение</b>	Вкл. 023, 035, 089, 149, 153, 190, 250, 251, 252, 253, 259, 260, 264, 271, 327, 737, 739, 741, 743, 750, 760, пуск секундомера
Подтверждение состояния ПГС стенда и изделия	Все остальные элементы выключены!
По готовности к заправке бака «О» дать команду К-2 (по команде ВИ)	
<b>К-2</b>	Вкл. 190, 318
<b>К-2 + 150 с</b> Охлаждение бака «О»	Вкл. 133, 175, 185, 190, 312, 324, 343, 701 Выкл. 146, 174
По команде ВИ дать команду К-3	
<b>К-3</b> Заправка бака «О»	Вкл. 023, 133, 190, 502, 513, 710 Выкл. 311
По размыканию контактов РД8 Вкл. 131, 190, 561, 702, 708 выкл. 133, 701	
После сигнала «Предварительный уровень» при Т71СБ < -150 °С дать команду К-4	
<b>К-4</b> Зарядка и подпитка погруженных гелиевых баллонов	Вкл. 009, 010, 323 Выкл. 006, 011, 013
По команде ВИ (или по команде ВБО) до команды «продувка ХО» может быть дана команда К-12	
<b>К-12</b> Дозаправка по магистрали подслива	Вкл. 132, 313, 704 Выкл. 133, 145, 149, 701

Заливка МД, включение газлифта (при достижении НУ при дозаправке включить К-16)

Продолжение таблицы 3.2

Время, с	Команда	Вкл./выкл. вручную	Включить по циклограмме	Выключить по циклограмме
<b>К-16</b>	<b>К-16</b> Подача газа высокого давления	<b>По команде ВИ</b>	190, 199, 326	
<b>К-16 += 30 с</b>	Открытие клапана циркуляции «О» МД		190, 510	
<b>К-16 +=10 с</b>	Открытие РКО МД (при отсутствии сигнала от концевых контактов клапана К11 о его открытии к моменту выдачи «Откр. РКО МД» – АПП-1 от СУ-СА3)		190, 508	
<b>К-16 +=10 с</b>			190	508, 510
<b>К-16 +=590 с</b>	Включение газлифта (при отсутствии сигнала от концевых контактов клапана К10 о его открытии к моменту выдачи «Включение газлифта» – АПП-1 от СУ-СА3)		007, 008, 190	
<b>К-16 +=1 с</b>			190, 735	580

По команде ВИ включить «Общую готовность»

<b>Общая готовность (контроль готовности к штатной циклограмме)</b>	Вкл. 007, 008, 009, 010, 016, 017, 019, 035, 090, 091, 092, 151, 190, 250, 251, 252, 253, 259, 260, 264, 271, 318, 323, 324, 325, 326, 327, 343, 562, 735, 737, 739, 745, 750, 760, стоп секундомера Выкл. 006, 013, 023, 026, 027, 072, 095, 096, 097, 170, 311, 312, 313, 341, 342, 752, 762
---	---

**Штатная циклограмма пуска (выполняется автоматически)**

Время, с	Команда	Вкл./выкл. вручную	Включить по циклограмме	Выключить по циклограмме
	<b>Включение продувки ХО</b> от стеновой системы	<b>По команде ВИ</b>	018,190,199, пуск секундомера	014
ХО+=215 с	Открытие ДПК бака «Г»		190, 341	
ХО+=12 с	<b>Ключ на дренаж</b>		190, 506	317, 562
ХО+=40 с	<b>Надув</b>	<b>Ускоренный режим регистрации</b>	029, 190, 512, 565, 566, 670, 680	030, 513
ХО+=100 с	Земля – борт (при отсутствии к моменту выдачи «Земля – борт» суммы первых размыканий контактов РД5, РД6, АПП-2)	На 320-й с выкл. 450, включить 015	190, 669	
ХО+=19,3 с	Выключение газлифта		190	007, 008, 343, 735
ХО+=4,37 с	Продувка МД		004, 005, 190	
ХО+=0,23 с	Продувка РД		190	512
ХО+=1,1 с	<b>Пуск!</b> (если нет замкнутого положения контактов РД6 к моменту команды «Пуск», то АПП-2)		013, 190,	009, 010, 323, 327

Продолжение таблицы 3.2

Время, с	Команда	Вкл./выкл. ручную	Включить по циклограмме	Выключить по циклограмме
ХО±0,9 с	Открытие клапана «О» РД (если нет замыкания контактов реле давления РД10 ПЩС, то АПП-3)		190, 648, 649, 688, 689, 690, 691	
ХО ±= 0,5 с	<b>Зажигание</b> (если нет размыкания контактов РД7 к моменту выдачи команды, то АПП-3)		190, 567, 600, 602, 604, 628, 629, 630, 631, 636, 637, 638, 639, 673	318
ХО ±=0,4 с	Запуск пиротурбины		190, 626, 627, 667, 668	
ХО ±=0,8 с	Открытие клапана «Г» РД		190, 674, 675	
ХО ±=0,1 с	Прекращение продувки МД		190	004, 005
ХО ±=0,1 с	<b>Зажигание РД</b>		190, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 644, 645, 652, 653, при получении суммы первых замыканий трех СД РД30 включаются от СУ-СА3 650, 651	565, 566
ХО ±=0,5 с	Продувка ХО		190, 504, 551	
Зажигание РД ±=1,1* с	<b>Главная</b> (если нет суммы замыкания трех сигнализаторов давления РД30, то АВД от СУ-СА3)		190, 410, 411, 536, 533, 534, 570, 512, 514, 516, 684, 685	
Зажигание РД ±=57,5 с	Вторая ступень наддува		190, 640, 641, 642, 643	
Зажигание РД ±=80 с	Третья ступень наддува		190, 632, 633, 634, 635	
Зажигание РД ±=51,5 с	Перевод МД на КСТ		190	504
Зажигание РД ±=3,72 с	Сброс азота из баллонов ШБ7, ШБ8		190, 550	
Зажигание РД ±=7,28 с	<b>Выключение двигателей</b>		190, 550, 622, 623, 624, 625, 646, 647	016, 017, 512, 567
Выключение двигателей +0,09 с	Закрытие клапанов РД		190, 654, 655, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 676, 677	570, 673
Выключение двигателей +10 с	Выключение стендовой продувки РД		190	410, 411
Выключение двигателей +20 с	Окончание работ		023, 151, 153, 190, 314, 318, 343, 509, 752	013, 018, 019, 290, 291, 506, 551
Выключение двигателей +30 с			190	509

Продолжение таблицы 3.2

Время, с	Команда	Вкл./выкл. вручную	Включить по циклограмме	Выключить по циклограмме
Выключение двигателей +300 с	Прекращение продувки РД		190, стоп секундомера	029, 324, 325, 550
	<b>Окончание слива</b> остатков окислителя	Команда ВИ	146, 163, 164, 174, 190, 312	314, 502
Окончание слива +10 с			190	514, 516

**Циклограмма проведения аварийного слива из баков «Г» и «О»**

По команде ВИ включить К-13

<b>К-13</b> <b>Аварийный слив</b>	Вкл. 006, 013, 069, 090, 091, 092, 151, 190, 314, 317, 323, 341, 344 Выкл. 009, 010, 067, 068, 145, 150, 281, 282, 283, 287, 311, 313, 506, 513
--------------------------------------	--

При открытых К52, К53 выключить по команде ВИ элементы 317, 341 и включить 752, 762

По окончании слива по команде ВИ включить К-14

<b>К-14</b> <b>Окончание аварийного слива</b>	Вкл. 311, 341 Выкл. 314, 344, 762
--	--------------------------------------

При давлении ДБГа = 0,3...0,5 ати выключить 341

По команде ВИ включить К-17

<b>К-17</b> <b>Аварийный сброс газов</b>	Вкл. 004, 005, 006, 190, 323, 550, 551 Выкл. 009, 010
---	--

К-17+4 с Вкл. 190, выкл. 004, 005

К-17+300 с Вкл. 190, выкл. 550, 551

**Циклограммы аварийного прекращения испытания**

<b>АПП-1</b> <b>Отмена ПП-1</b>	Вкл. 190, 509, 514, 516 Выкл. 007, 008, 324, 325, 735
------------------------------------	--

АПП-1+10 с Вкл. 190, выкл. 509

АПП-1+60 с Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 018, 514, 516

<b>АПП-2</b> <b>Отмена ПП-2</b>	Вкл. 190, 343, 509, 514, 516, 562 Выкл. 007, 008, 324, 325, 506, 565, 566, 735
------------------------------------	---

АПП-2+10 с Вкл. 190, выкл. 509

АПП-2+60 с Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 018, 514, 516

<b>АПП-3</b> <b>Отмена ПП-3</b>	Вкл. 190, 343, 509, 514, 516, 562 Выкл. 004, 005, 007, 008, 029, 324, 325, 506, 565, 566, 735
------------------------------------	--

АПП-3+10 с Вкл. 190, выкл. 509

АПП-3+60 с Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 018, 514, 516

<b>АВД-1</b> <b>Авария-4</b>	Вкл. 006, 084, 190, 315, 318, 323, 343, 345, 509, 514, 516, 550, 551, 622, 623, 624, 625, 770 Выкл. 007, 008, 009, 010, 016, 017, 029, 324, 325, 506, 565, 566, 673, 735
---------------------------------	---

АВД-1+2 с Вкл. 004, 005, 190, выкл. 567

АВД-1+5 с Вкл. 190, выкл. 004, 005



*Продолжение таблицы 3.2*

<b>АВД-1+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 509
<b>АВД-1+300 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 514, 516, 550, 551
<b>АВД-2 Авария-5</b>	Вкл. 006, 084, 190, 315, 318, 323, 343, 345, 410, 411, 509, 550, 551, 622, 623, 624, 625, 646, 647, 650, 651, 654, 655, 676, 677, 770 Выкл. 007, 008, 009, 010, 016, 017, 324, 325, 504, 506, 565, 566, 570, 673, 735
<b>АВД-2+0,05 с</b>	Вкл. 190, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, выкл. 567
<b>АВД-2+1 с</b>	Вкл. 190, 514, 516
<b>АВД-2+2 с</b>	Вкл. 004, 005, 190
<b>АВД-2+5 с</b>	Вкл. 190, выкл. 004, 005
<b>АВД-2+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 410, 411, 509
<b>АВД-2+300 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 029, 514, 516, 550, 551
<b>АВД-3 Авария-6</b>	Вкл. 006, 084, 190, 315, 318, 323, 343, 345, 410, 411, 509, 550, 551, 622, 623, 624, 625, 646, 647, 770 Выкл. 007, 008, 009, 010, 016, 017, 324, 325, 504, 506, 512, 565, 566, 567, 570, 673, 735
<b>АВД-3+0,09 с</b>	Вкл. 190, 654, 655, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 676, 677
<b>АВД-3+2 с</b>	Вкл. 190, 004, 005
<b>АВД-3+5 с</b>	Вкл. 190, выкл. 004, 005
<b>АВД-3+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 410, 411, 509
<b>АВД-3+300 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 029, 514, 516, 550, 551
<b>Авария-1</b>	Вкл. 084, 190, 315, 345, 509, 514, 516, 770 Выкл. 007, 008, 324, 325, 735
<b>Авария-1+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 509
<b>Авария-1+60 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 514, 516
<b>Авария-2</b>	Вкл. 084, 190, 315, 341, 343, 345, 509, 514, 516, 562, 770 Выкл. 007, 008, 324, 325, 506, 546, 565, 566, 735
<b>Авария-2+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 509
<b>Авария-2+60 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 514, 516
<b>Авария-3</b>	Вкл. 084, 190, 315, 341, 343, 345, 509, 514, 516, 562, 770 Выкл. 004, 005, 007, 008, 029, 324, 325, 506, 546, 565, 566, 735
<b>Авария-3+10 с</b>	Вкл. 190, выкл. 509
<b>Авария-3+60 с</b>	Вкл. 190, стоп секундомера, выкл. 514, 516

Примечания к циклограмме:

- СУ-САЗ и ИУС-С программно обеспечивают заданную последовательность прохождения команд «Исходное положение-1», К-2, К-3, К-4, К-16, «Общая готовность», «Включение продувки ХО» (штатная циклограмма), «Окончание слива остатков окислителя»;
- групповая команда К-12 включается операторами ИУС-С по команде ВИ (ВБО) в интервале времени от команды К-4 до команды «Включение продувки ХО»;
- команда К-17 может быть выдана ВИ на любой стадии проведения испытания;
- команда АПП-1 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от К-16 до команды «Ключ на дренаж»;
- команда АПП-2 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от команды «Ключ на дренаж» до команды «Пуск»;

- команда АПП-3 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от команды «Пуск» до команды «Зажигание»;
- при прохождении команд АПП-1 или АПП-2 от СУ-САЗ должна иметься возможность перейти к команде К-16 или «Общая готовность» и продолжить работу по циклограмме;
- команда «Отмена ПП-1» дается оператором СУ-САЗ по команде ВИ в интервале времени от команды «Исходное положение» до команды «Ключ на дренаж»;
- команда «Отмена ПП-2» дается оператором СУ-САЗ по команде ВИ в интервале времени от команды «Ключ на дренаж» до команды «Пуск»;
- команда «Отмена ПП-3» дается оператором СУ-САЗ по команде ВИ в интервале времени от команды «Пуск» до команды «Зажигание»;
- команда АД-1 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от команды «Зажигание» до команды «Зажигание РД»;
- команда АД-2 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от команды «Зажигание РД» до команды «Главная»;
- команда АД-3 проходит от СУ-САЗ в интервале времени от команды «Главная» до команды «Выключение двигателей»;
- команды «Авария-1"... "Авария-6» даются руководителем испытаний от кнопки АДр, подключенной к СУ-САЗ, или оператором СУ-САЗ по команде ведущего по испытанию;
- команда «Авария-1» проходит в интервале времени от команды «Исходное положение-1» до команды «Ключ на дренаж»;
- команда «Авария-2» проходит в интервале времени от команды «Ключ на дренаж» до команды «Пуск»;
- команда «Авария-3» проходит в интервале времени от команды «Пуск» до команды «Зажигание»;
- команда «Авария-4» проходит в интервале времени от команды «Зажигание» до команды «Зажигание РД»;
- команда «Авария-5» проходит в интервале времени от команды «Зажигание РД» до команды «Главная»;
- команда «Авария-6» проходит в интервале времени от команды «Главная» до команды «Выключение двигателей»;
- команды АПП-1, АПП-2, АПП-3, «Отмена ПП-1», «Отмена ПП-2», «Отмена ПП-3», АД-1, АД-2, АД-3, «Авария-1», «Авария-2», «Авария-3», «Авария-4», «Авария-5», «Авария-6» останавливают выполнение штатной циклограммы;
- после прохождения команд АПП-1, АПП-2, АПП-3, «Отмена ПП-1», «Отмена ПП-2», «Отмена ПП-3», АД-1, АД-2, АД-3, «Авария-1», «Авария-2», «Авария-3», «Авария-4», «Авария-5», «Авария-6» система управления должна иметь возможность последовательного исполнения команд К-13, К-14, К-17;
- после формирования любого вида команд «Отмена ПП», АПП, АД, «Авария» прекращается контроль остальных видов команд «Отмена ПП», АПП, АД, «Авария»;
- СУ-САЗ выдает команду «Выключение двигателей» с последующим выполнением команд циклограммы по первому из событий:
  - по времени, в соответствии с заданием на пуск;
  - по признаку «преждевременное окончание компонентов топлива», в соответствии с заданием на пуск;
- при прохождении любого вида аварийных команд СУ-САЗ прекращает качание камер сгорания (КС) рулевого двигателя и переводит рулевые машины в нулевое положение.

Примечания к циклограмме, описывающие многовариантный характер процесса подготовки и проведения испытаний, наглядно представлены на рис. 3.14. Видно, что кроме штатных последовательностей завершения испытаний имеется 6 аварийных, реализуемых автоматически (АПП-1, ..., АВД-3), 12 – по кнопке аварийного выключения двигателя («Авария-1», ..., «Авария-б») и более 10 – по командам ведущего по испытанию («Отмена ПП-1», ..., «Отмена ПП-3, К-12, К-17»). Данная схема является несколько упрощенной, поскольку не учитывает того, что условия формирования признаков автоматического аварийного завершения испытаний могут формироваться не только самой циклограммой, но и автономными алгоритмами контроля и аварийной защиты двигателей, контроля запаса компонентов топлива и т.п. Если схему дополнить, то общее число возможных сценариев пуска возрастет как минимум в два раза. На рис. 3.15 показан пример формирования признака АВД-2 на участке от команды «Зажигание РД» до «Главная».

Все изложенное дает представление об объеме необходимых комплексных проверок. Так, например, при подготовке к испытаниям РН «Союз-2-1в» таковых было более 50.

Теперь мы можем подойти к описанию динамики поведения системы испытаний – **программно-алгоритмической модели управления технологическими процессами**. Из сетевого графика (см. рис. 3.13), фрагмента карты ведущего по испытанию и собственно циклограммы подготовки и проведения пуска видно, что процесс испытаний представляет собой ряд параллельно протекающих взаимосвязанных технологических процессов (термостатирования, заправки бака горючего, заправки бака окислителя, поддержания давлений в баках, работы по штатной циклограмме пуска, послепусковых операций) с ярко выраженной *ситуационной моделью поведения*. На объект управления (стендовые системы, изделие) подаются управляющие воздействия, в результате которых он, реагируя на них, переходит в некоторое *состояние (ситуацию)*. Примеры состояний: «исходное положение», «заправка малым расходом», «общая готовность» и т.п. Состояние характеризуется множеством специфических для данного состояния свойств объекта и остается «стабильным» до тех пор, пока над объектом не будет выполнено действие, в результате которого его состояние может измениться. *Переход* из одного состояния в другое выполняется либо автоматически, либо по командам ведущих по испытанию при достижении определенных условий или событий.

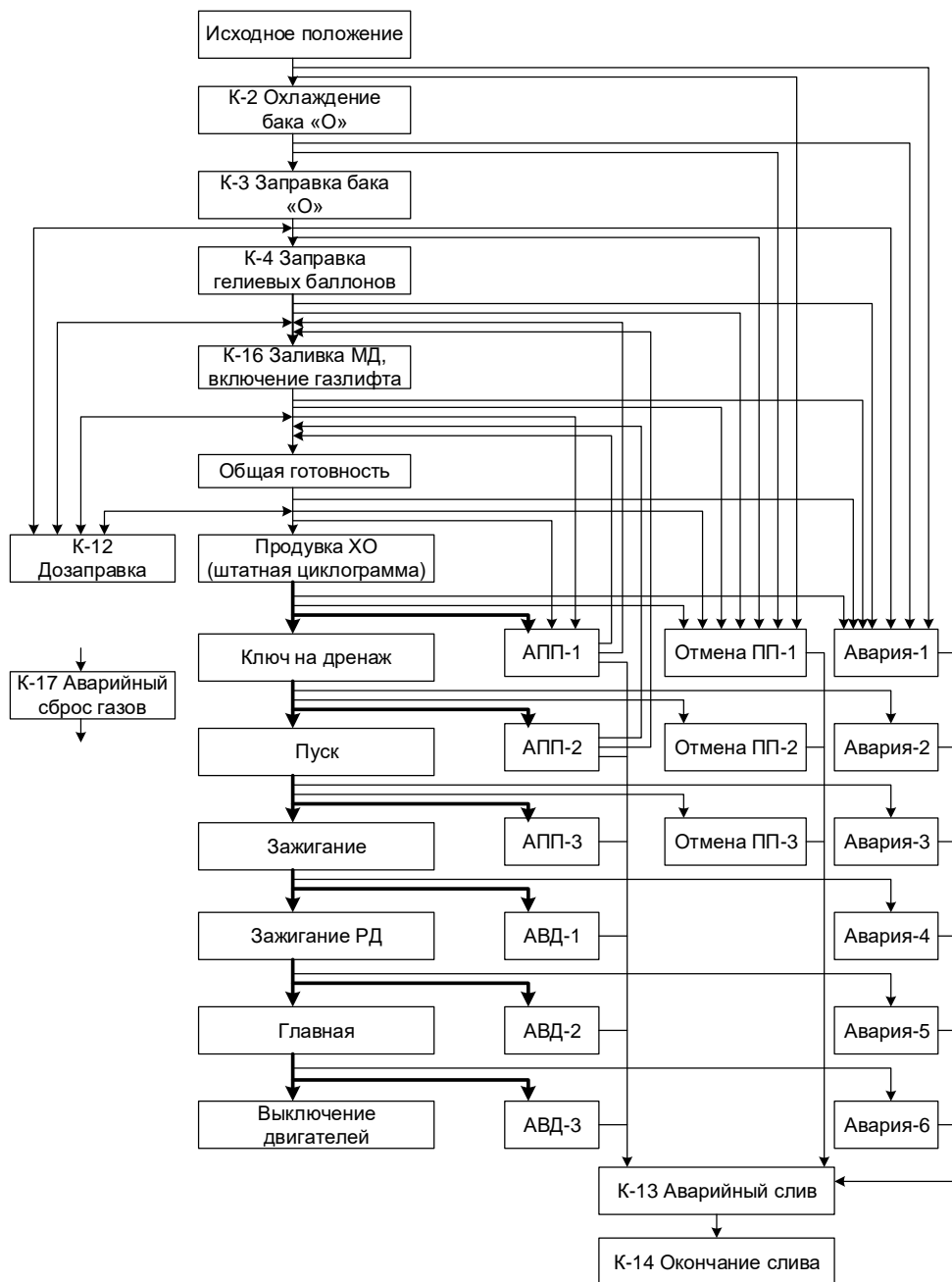
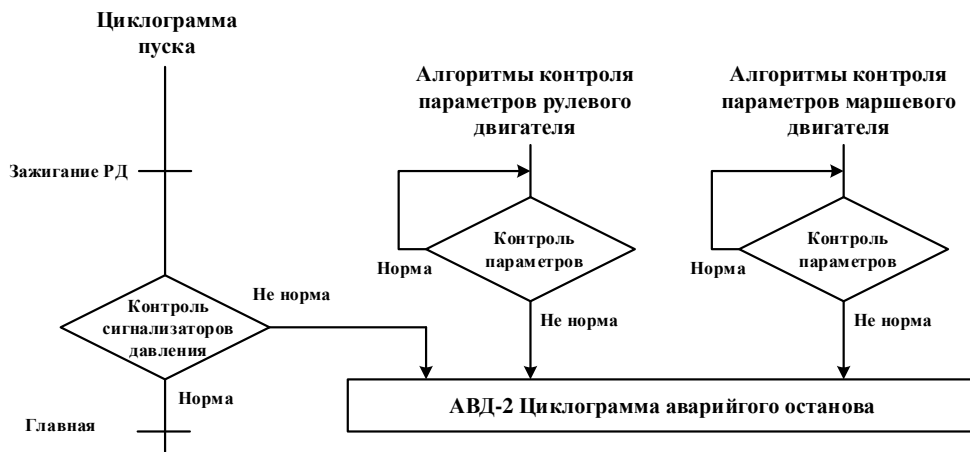


Рис. 3.14. Схема, иллюстрирующая множество сценариев реализации циклограммы испытания



**Рис. 3.15.** Пример формирования признака АВД-2 на участке от команды «Зажигание РД» до «Главная»

Существуют различные способы алгоритмического описания моделей управления поведением такого рода процессов [16, 17]. Наиболее простой и эффективной является модель параллельно функционирующих конечных автоматов. Каждый конечный автомат определяется конечным множеством состояний и переходов из одного состояния в другое, причем состояния фиксируют результат предшествующих событий, а переходы – варианты будущего, обусловленные реакцией на различные внешние воздействия, а также логическими и функциональными зависимостями на множестве параметров моделируемого объекта [11].

Управление технологическими процессами осуществляется информационно-управляющими системами (ИУС), работающими в режиме реального времени. По определению системы реального времени (различают системы жесткого и мягкого реального времени) ориентированы на обработку непредсказуемого потока внешних событий в предсказуемые времена. Система жесткого реального времени (к данному классу относится ИУС) должна успеть отреагировать на события (в том числе одновременные) в течение времени, определенного как критическое. Значение критического времени для каждого события определяется объектом управления и самим событием и, естественно, может быть разным, но время реакции системы должно быть известно уже при создании системы. Отсутствие реакции в заданное время считается ошибкой для систем жесткого реального времени.

Способы достижения требуемого времени реакции на событие определяются алгоритмической моделью функционирования программируемых контроллеров (процессорных модулей) ИУС. В основном используются две мо-

дели. Первая – событийно-управляемая, когда дальнейшее действие осуществляется непосредственно после возникновения события. Вторая – наиболее часто используемая – циклическая. К последней относятся известные стендовые ИУС, бортовые системы управления РН, а также большинство промышленных систем управления ведущих фирм мира.

Циклические системы осуществляют действия, связанные с управлением технологическими процессами (сбор данных, обработку алгоритмов и выдачу сигналов на объект) через фиксированные промежутки времени. Основным событием для такой системы является начало очередного интервала времени. Соответственно, время реакции системы на события, связанные с асинхронными прерываниями от подсистем ввода/вывода, таймеров, локальных вычислительных сетей обмена данными между контроллерами распределенной ИУС и операторскими станциями, должно укладываться в заданный интервал. Величина интервала выбирается исходя из предположения о его допустимости для дискретизации решаемой задачи автоматизации технологического процесса. Как показывает практика, для большинства задач по испытаниям ЖРД и ступеней РН цикл управления составляет от 500 мкс до 10 мс.

Известны различные подходы к описанию параллельных алгоритмов логического управления технологическими процессами. Это связано с отраслевыми традициями, особенностями технологических процессов и используемыми техническими средствами управления. Специально для стендовых систем управления испытаниями ракетно-космической техники был разработан и уже более 20 лет используется в стендовой практике **язык записи параллельных алгоритмов логического управления CLL** (Control Logic Language) [3]. Для него характерны компактность и выразительность синтаксических конструкций, доступность для операторов-технологов, часто не имеющих навыков профессионального программирования.

В основу языка CLL положена модель, согласно которой алгоритм описывается в виде совокупности параллельно функционирующих и взаимодействующих друг с другом программ, реализующих модель конечного автомата. Каждая из программ состоит из блоков, называемых *ситуациями*. Ситуация состоит из возможно пустого множества операторов изменений выходных и внутренних переменных, а также множества *условных переходов* в другие ситуации. Из текущей ситуации программа переходит в следующую только в случае истинности булевой функции перехода, соединяющей эти ситуации.

Кроме входных и выходных переменных в программе могут быть использованы внутренние переменные для хранения различных значений и для выполнения вычислительных операций над ними. К числу управляющих (ситуационных) переменных относятся имена программ. В ходе реализации алгоритма с помощью ситуационных переменных программы могут быть включены, выключены, а также установлены в заданную ситуацию.

На рис. 3.16 представлена блок-схема выполнения шага алгоритма контроллером логического управления. Организация обмена сигналами с объектом управления (ОУ) в языке не регламентируется. Главное, что в цикле управляющей задачи контроллера содержимое области выходов выводится на ОУ, а содержимое области входов обновляется новым состоянием входных сигналов. Обработка операторов программ управления определяется следующими правилами:

параллельные программы ( $Pr_i$ ) упорядочены по приоритету, определяемому порядком их появления в программном проекте, и обрабатываются последовательно;

выполнение шага алгоритма осуществляется в течение фиксированного по времени цикла. В течение одного цикла происходит обработка неделимых последовательностей операторов каждой из программ от самой младшей по приоритету до самой старшей. Неделимая последовательность операторов программы начинается оператором условного перехода текущей ситуации программы  $S_{тек}$  и заканчивается исполнительными операторами следующей ситуации, т.е. точками ожидания программ в период между циклами являются операторы перехода текущей ситуации. В исходном состоянии текущей является первая ситуация программы;

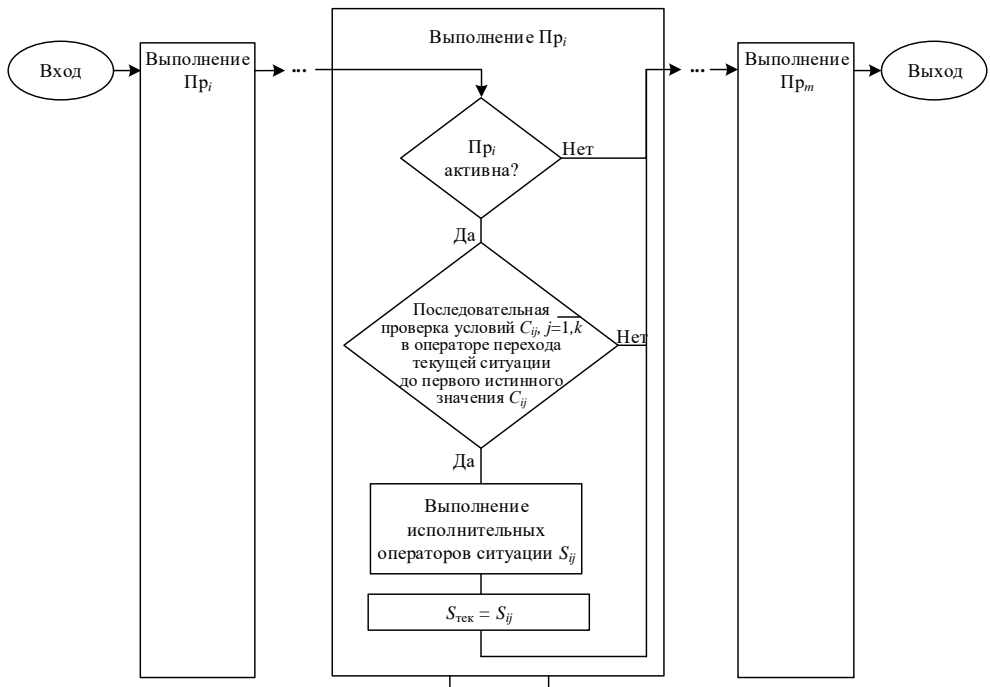


Рис. 3.16. Блок-схема реализации программ управления

для разрешения конфликтов между несколькими готовыми к срабатыванию переходами из текущей ситуации  $S_{ij}$  используются приоритеты. Приоритеты переходов определяются порядком их появления в описании оператора перехода, причем первые более приоритетны, чем последующие.

Язык **CLL** содержит следующие операторы (рис. 3.17):

описания констант, целых, входных, выходных, флаговых и внешних переменных;

описания структуры алгоритма в виде программ и ситуаций;

исполнительные операторы: присваивания; включения и выключения выходных переменных и программ; установки программы в заданную ситуацию;

оператор, обеспечивающий безусловный или условный переход из одной ситуации в другие.

### Операторы языка CLL

#### 1. Операторы определения переменных:

**конст** <список констант>;  
**целое** <список целых переменных>;  
**флаг** <список флаговых переменных>;  
**вход** <список входных переменных>;  
**выход** <список выходных переменных>;  
**внешний** <список внешних переменных>;

#### 2. Операторы описания структуры алгоритма:

<алгоритм управления> ::=  
 { [<определение переменных>] <программа> }  
 <программа> ::=  
**прог** <заголовок>;  
 { <ситуация> }  
**конец** [<имя программы>];  
 <ситуация> ::=  
**сит** <имя ситуации>;  
 [[<метка>:] <исполнительные операторы>]  
 <оператор перехода>  
**конец** [<имя ситуации>];

#### 3. Исполнительные операторы:

<оператор присваивания> ::=  
 <переменная><=><арифм. выражение>;  
**вкл** <список логических переменных>;  
**откл** <список логических переменных>;  
**уст** <имя программы> **в** <имя ситуации>;  
**начало\_С**; <операторы языка С> **конец\_С** ;

#### 4. Оператор перехода:

**переход** <список альтернатив>;  
 <альтернатива> ::=  
 <имя ситуации> [ **если** <лог\_выражение>]

Рис. 3.17. Операторы языка CLL



**Операторы языка «С».** Язык **СLL** прежде всего предназначен для программирования алгоритмов логического типа, поэтому в нем отсутствуют операторы традиционных языков программирования. Однако это не означает, что они недоступны. В текст программы могут быть вставлены блоки операторов языка «С».

**Исполнительные операторы.** Исполнительные операторы непосредственно реализуют алгоритм управления. К их числу относятся операторы изменения переменных, а также операторы управления последовательностью исполнения ситуаций в программе.

**Операторы изменения состояния** выходов и состояния программ имеют следующий вид:

```
вкл <список переменных>;
выкл <список переменных>;
```

В качестве переменных могут выступать названия программ, флаговые, выходные и внешние переменные. С помощью оператора «**вкл**» значения всех указанных при описании переменных или непосредственно перечисленных разрядов выходных переменных устанавливаются в «1». Оператор «**выкл**» предназначен для установки разрядов в «0». Если переменная представляет имя программы, то она будет включена или выключена из обработки. В операторе «**выкл**» допускается в качестве переменной указывать название программы, содержащей данный оператор. В этом случае произойдет приостановка программы и в текущем такте, если она находится «ниже» в программном проекте, или в следующем такте, если она находится «выше», программа уже не будет участвовать в дальнейшей работе. Включить ее можно только из другой программы.

С помощью **оператора установки** можно запустить нужную программу с любой ситуации:

```
уст <имя программы> в <имя ситуации>;
```

В качестве исполнительных операторов могут быть использованы операторы языка «С».

Примеры исполнительных операторов:

```
прог Исх_положение;
  сит _начало;
    переход _1 если ИСХ_ПОЛ;
  конец;
  сит _1;
    уст цикл_КВИ в _начало;
    выкл цикл_КВИ;
    уст Контроль_АВД в _1;
    выкл Контроль_АВД;
    выкл Автомат_Г11, Автомат_Г12, Автомат_А11;
    уст упр_системой1_2_Г11 в _начало;
```

```

уст упр_системой1_2_Г12 в _начало;
уст упр_системой1_2_А11 в _начало;
переход _начало если !ИСХ_ПОЛ;
конец;
конец;

```

**Оператор перехода.** Оператор перехода всегда является последним оператором ситуации и определяет дальнейшую последовательность выполнения программы. В качестве альтернатив перехода оператор содержит одно или несколько имен ситуаций и соответствующие им логические выражения. Действие оператора заключается в последовательном просмотре и вычислении логических выражений до тех пор, пока какое-нибудь выражение не окажется истинным. В случае удачи проверка других выражений не производится, т.е. первые альтернативы имеют приоритет над последующими. Если ни одно из выражений не окажется истинным, переход не выполняется и в следующем такте оператор будет выполнен вновь.

Оператор перехода имеет вид

```
переход <список альтернатив>; ,
```

где <альтернатива> из <списка альтернатив> представляет собой:  
 <имя ситуации>  
 или  
 <имя ситуации> **если** <логическое выражение>.

В первом случае переход является безусловным, а во втором – определяется истинностью логического выражения.

Синтаксис логического выражения CLL аналогичен условному выражению языка «С». Составляющие логического выражения могут объединяться с помощью трех логических операций, перечисленных в порядке возрастания приоритета: ! – «не»; && – «и»; || – «или». Если в логическом выражении не используются скобки, то оно выполняется слева направо. Для задания правильности порядка вычисления логического выражения используются скобки.

Пример:

```
переход сит1 если (a>b) && !c,
    сит2;
```

Оператор перехода языка логического управления достаточно гибок и выразителен для программирования различных вариантов условий ветвления. Можно выделить три случая: оператор безусловного перехода; оператор условного перехода; оператор условного перехода с ожиданием.

Рассмотрим два последних случая. Оператор условного перехода выглядит следующим образом:

```
переход <имя1> если <условие1>, // иначе
    <имя2> если <условие2>, // иначе
```

```

    . . .
    <имяN>;

```

В операторе условного перехода с ожиданием отсутствует безусловная передача управления, в результате чего выполнение программы будет приостановлено до выполнения одного из условий:

```

переход <имя1> если <условие1>, // иначе
    . . .
    <имяN> если <условиеN>;

```

**Программирование технологического процесса на языке CLL.** Пусть задание на подготовку и проведение испытания описывает один либо несколько возможно взаимодействующих друг с другом технологических процессов управления. Формализованное описание этих процессов будет соответствовать программам управления.

В каждом из процессов выделяется множество состояний входных, выходных и внутренних переменных, обеспечивающих последовательную реализацию логики протекания процесса, а также условия перехода из одного состояния в другое. Каждое из состояний и условия перехода из него в другие состояния составят ситуацию программы.

Ситуация записывается в виде множества операторов присваивания переменным требуемых значений и оператора перехода в следующую ситуацию.

Управление программами осуществляется с помощью операторов включения/выключения программ, оператора установки программы в требуемую ситуацию, а также за счет возможности проверки состояния программы в условиях перехода. Каждая из программ может быть уже активной в исходном состоянии либо быть запущена (включена) из другой программы. В связи с этим в программном проекте по меньшей мере одна программа в исходном состоянии должна быть включена.

Для того чтобы обеспечить лучшую «читаемость» программ, именам программ, ситуаций и переменных рекомендуется давать названия, соответствующие реальным процессам и объектам.

Программы могут быть циклическими или однократного действия, постоянно активными или запускаемыми из других программ.

Примером циклической постоянно активной программы могут служить блокировки безопасности:

```

прог Блокировка_безопасности_по_ДД;
    сит _1;
        выкл КЛ;
        переход _1 если !ДД;
    конец;
конец;

```

Постоянно активная циклическая программа с ожиданием запуска по какому-либо условию (например, представленному переменной «Запуск») выглядит следующим образом:

```
прог Пр;  
  сит _1;  
  // Операторы приведения переменных в исходное  
  // состояние после завершения работы  
  ...  
  переход _2 если Запуск;  
конец;  
сит _2;  
  ...  
  переход _3 если ...  
конец;  
...  
сит _n;  
  ...  
  переход _1 если !Запуск;  
конец;  
конец;
```

Программа однократного действия выглядит следующим образом:

```
прог Пр;  
  сит _1;  
  // Операторы приведения переменных в исходное  
  // состояние после завершения работы  
  ...  
  выкл Пр; // Программа Пр выключает сама себя  
  переход _2 если ...;  
конец;  
сит _2;  
  ...  
  переход _3 если ...  
конец;  
...  
сит _n;  
  ...  
  переход _1;  
конец;  
конец;
```

Следует еще раз напомнить, что точками ожидания программ в период между циклами являются операторы перехода текущей ситуации. В случае срабатывания перехода выполняются исполнительные операторы обозначенной в переходе ситуации. В исходном состоянии текущей является первая ситуация программы.

Программа может быть в исходном состоянии выключена:

```
прог Пр выкл;
```

```

сит _0;
    выкл Пр;
    переход _1;
конец;
сит _1;
// Операторы приведения переменных в исходное
// состояние
...
    переход _2 если ...;
конец;
...
конец;

```

Для ее запуска необходимо, чтобы какая-либо программа выполнила следующие операторы:

```

уст Пр в _0;
вкл Пр;

```

Типовой проект программного обеспечения, реализующего алгоритм управления, имеет следующую структуру:

- описание CLL-переменных;
- определение переменных и функций, используемых во вставках на языке «С»;
- программа расчета формул;
- программы-таймеры;
- программы аварийной защиты;
- программы циклограммы пуска;
- программы управления и регулирования;
- программы блокировок безопасности.

**Циклограмма испытаний**, как правило, имеет вполне определенную структуру, обеспечивающую выполнение следующих технологических операций:

- подготовка к пуску;
- набор предпусковой готовности;
- запуск двигателя;
- работа по программе испытаний;
- останов двигателя;
- действия в случае нештатных и аварийных ситуаций.

Возможны различные варианты реализации циклограммы. Пример циклограммы стендовых испытаний с жесткой последовательностью технологических операций выглядит следующим образом:

```

прог Циклограмма_пуска;
    сит начало;
    // Операторы приведения программы в исходное состояние
    выкл ИСХ_ПОЛ, КОМ_1, КОМ_2, ПУСК, КОМ_N, ОБЩ_ГОТ, Тай-
мер, ...;
    переход Исходное_положение если ИСХ_ПОЛ;

```

```

конец;
сит Исходное_положение;
// Операторы приведения станда и изделия в исходное положение
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход К_1 если КОМ_1;
конец;
сит Ком_1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход К_2 если КОМ_2;
конец;
...
сит Ком_N;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Общая_готовность ОБЩ_ГОТ;
конец;
сит Общая_готовность;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Пуск если ПУСК;
конец;
сит Пуск;
    уст Таймер в начало;
    вкл Таймер;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _1 если ((Т == N1) && (t >= n1));
конец;
сит _1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _2 если ((Т == N2) && (t >= n2));
конец;
...
сит _k;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало;
конец;
конец;

```

В данной программе ситуации Ком\_1, ..., Ком\_N содержат комплексные команды, реализующие технологические операции подготовки к пуску (захолаживание магистралей, заправку и т.п.). Циклограмма имеет жесткую структуру без возможности возврата к начальным этапам. Значения битовых флагов-команд управления циклограммой (Исх\_пол, Общ\_Гот, Пуск) поступают в контроллер с пульта оператора.

Пример циклограммы, обеспечивающей максимальную независимость в последовательности проведения технологических операций, выглядит следующим образом:

```
прог Исходное_положение;
  сит начало;
    переход _1 если Исх_Пол;
  конец;
  сит _1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало если !Исх_пол;
  конец;
конец;
прог К_1;
  сит начало;
    переход _1 если КОМ_1;
  конец;
  сит _1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало если !КОМ_1;
  конец;
...
прог Общая_готовность;
  сит начало;
    переход _1 если Общ_гот;
  конец;
  сит _1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало если !Общ_гот;
  конец;
конец;
прог Пуск;
  сит начало;
    выкл Пуск, Таймер, ...;
    переход _1 если Пуск;
  конец;
  сит Пуск;
    уст Таймер в начало;
    вкл Таймер;
    вкл ...;
    переход _1 если ((T == N1) && (t>=n1));
  конец;
  сит _1;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _2 если ((T==N2) && (t>=n2));
  конец;
...
```

```

сит _k;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало;
конец;
конец;

```

Возможен некий промежуточный вариант между приведенными выше решениями:

```

прог Циклограмма;
сит начало;
    выкл Таймер;
    переход Ожидание;
конец;
сит Ожидание;
    выкл ...;
выкл Исх_Пол, Общ_Гот;
переход Исходное_положение если Исх_Пол,
    Общая_готовность если Общ_Гот;
конец;
сит Исходное_положение;
    выкл Общ_Гот, ПУСК;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Ожидание.м если !Исх_Пол,
    Общая_готовность если Общ_Гот;
конец;
сит Общая_готовность;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Ожидание.м если !Общ_Гот,
    Пуск если ПУСК;
конец;
сит Пуск;
    уст Таймер в начало;
    вкл Таймер;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _1 если (T==3) && !прм_ПрГГ,
    _АВД_ГГ_ПО_прм_ПрГГ если (T==3) && прм_ПрГГ;
конец;
сит _АВД_ГГ_по_ПРМ_ПрГГ;
    вкл АВД_ГГ;
    выкл Общ_Гот, ПУСК;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Общая_готовность;
конец;
сит _1;
    вкл ...;

```



```

    выкл ...;
    уст Таймер в начало;
    переход _2 если (T==1);
конец;
сит _2;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _3 если (T==2) && прм_При,
        _АВД_И_по_ПРМ_При если (T==2) && !прм_При;
конец;
сит _АВД_И_по_ПРМ_При;
    выкл АВД_И;
    выкл Общ_Гот, ПУСК;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход Общая_готовность;
конец;
сит _3;
    выкл Контрол_кнопки_АВД_ведущего;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _4 если ((T==2) && (t>= 500));
конец;
сит _4;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _5 если (T==4);
конец;
сит _5;
    выкл ЗАЖИГАНИЕ;
    выкл ...;
    выкл ...;
    уст Таймер_1 в начало;
    переход _6 если ((T==0) && (t>= 100));
конец;
сит _6;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _7 если ((T==0) && (t>=900));
конец;
сит _7;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _8 если ((T==1) && (t>=100));
конец;
сит _8;
    выкл Контроль_Оборотов;
    выкл Контроль_Температуры;
    выкл ...;
    выкл ...;
    переход _9 если ((T==2) && (t>=300));
конец;

```

```

...
сит _24;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Останов если (T==260);
конец;
сит Останов; // Команда выключение изделия
    вкл ОСТАНОВ_ПО_КОНЦУ_ПРОГРАММЫ;
м:    уст Таймер в начало;
    вкл ...;
    выкл ...;
    выкл Контроль_кнопки_АВД_ведущего;
    выкл Контроль_Оборотов;
    выкл Контроль_Температуры;
    переход _25 если ((T==0) && (t>=100));
конец;
сит _25;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _26 если (T==20);
конец;
...
сит _27;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход Конец_ЦГ если (T==60);
конец;
// Конец циклограммы
сит Конец_ЦГ;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход начало если !ПУСК;
конец;
// АВД по кнопке ведущего по испытанию
сит _АВД_Вед;
    переход Останов;
конец;
// АВД по оборотам ТНА
сит АВД_ТНА;
    переход Останов.м;
конец;
// АВД по Температуре
сит _АВД_Темп;
    переход Останов.м;
конец;
конец;

```

При реализации программ аварийной защиты двигателя (АВД) следует руководствоваться следующими общими правилами:

первым действием после диагностирования аварийной ситуации должны быть запрет контроля всех других видов АВД и остановка циклограммы пуска;

после завершения работы программа АВД должна себя выключить; для исключения потери времени (одного такта) на остановку циклограммы программы контроля признаков АВД должны располагаться в программном проекте до программы, реализующей циклограмму пуска.

Функции аварийной защиты могут быть реализованы различными способами. Прежде всего в программном проекте определяются сами программы контроля аварийной ситуации. Например, следующим образом:

```
// Алгоритм отслеживает включение кнопки АВД ведущим
прог Контроль_кнопки_АВД_ведущего выкл;
    сит начало;
        выкл Контроль_кнопки_АВД_ведущего;
        переход _1 если кн_АВД;
    конец;
сит _1;
    выкл Ф_АВД_вед;
    выкл Контроль_оборотов, Контроль_температуры;
    уст Циклограмма в _АВД_Вед;
    переход начало;
конец;
конец;
// Алгоритм контроля АВД по оборотам
прог Контроль_оборотов выкл;
    // Предельное значение оборотов составляет
    // 19500 об/с = 650 Гц. Решение об аварийной ситуации
    // принимается при превышении данного значения любым
    // из двух датчиков чисел оборотов в двух тактах подряд.
    сит начало;
        выкл Контроль_оборотов;
м:    переход _1 если (NTNA1>=650) || (NTNA2>=650);
    конец;
    сит _1;
    переход _2 если (NTNA1>=650) || (NTNA2>=650), начало.м;
конец;
сит _2;
    выкл Контроль_кнопки_АВД_ведущего, Контроль_температуры;
    выкл Ф_АВД_ТНА;
    уст Циклограмма в _АВД_ТНА;
    переход начало;
конец;
конец;
```

При определении признака АВД циклограмма пуска устанавливается в соответствующую ситуацию (АВД\_Вед, \_АВД\_ТНА и т.д.), из которой осуществляется переход на общую последовательность циклограммы останова испытания. Возможны варианты, когда для какого-либо из видов АВД предполагается индивидуальная циклограмма останова. Она может быть набрана либо в циклограмме пуска, либо в программе контроля АВД.

В первом случае соответствующий участок циклограммы пуска будет выглядеть следующим образом:

```
// АДВ по кнопке ведущего по испытанию
сит _АВД_Вед;
    переход Останов_по_кн_АВД_вед;
конец;
...
сит Останов_по_кн_АВД_вед;
    уст Таймер в начало;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _30 если ((Т== ... ;
конец;
...

```

Во втором случае циклограмма останова реализована в программе контроля АДВ:

```
прог Контроль_кнопки_АВД_ведущего_выкл;
    сит начало;
        выкл Контроль_кнопки_АВД_ведущего;
        переход _1 если кн_АВД;
    конец;
сит _1;
    вкл АДВ_вед;
    выкл Контроль_оборотов, Контроль_температуры;
    уст Циклограмма в Конец_ЦГ;
    уст Таймер в начало;
    вкл ...;
    выкл ...;
    переход _2 если ((Т== ... ;
конец;
...
    переход начало;
конец;
конец;

```

Следует учитывать, что приоритет программ *убывает* с возрастанием их номера. Однако с точки зрения результата действия исполнительных операторов ситуация диаметрально противоположная – приоритет программ *растет* с возрастанием их номера. Данное обстоятельство важно при реализации так называемых «блокировок безопасности». Например, пусть требуется обеспечить выключенное состояние клапана КЛ при замкнутых контактах датчиках давления ДД. Решение состоит в следующем. Согласно алгоритмической модели при выполнении шага алгоритма осуществляется операция вывода/ввода и далее последовательная обработка операторов текущих ситуаций всех программ от первой до последней. Таким образом, наибольшим влиянием на окончательное состояние переменной к началу очередного шага

обладает последняя из обновивших ее программ. Именно в такой программе и должна быть реализована блокировка безопасности:

```
прог Блокировка безопасности;  
  сит _1;  
    выкл КЛ;  
    переход _1 если !ДД;  
  конец;  
конец;
```

### 3.4. Особенности построения стендовых систем управления и аварийной защиты

**Стендовые информационно-управляющие системы (ИУС)**, системы управления (СУ) в ходе испытаний изделий РКТ решают следующие задачи: дискретного управления исполнительными элементами стенда и изделия; регулирования параметров процессов изделия и стенда; управления рулевыми камерами сгорания.

Структура стендовой ИУС, в первую очередь, определяет ее эффективность и экономичность. Стендовая ИУС, как и любая техническая система, состоит из подсистем, решающих некоторый набор задач из общего алгоритма управления. Эти задачи могут быть распределены между подсистемами по территориальному, функциональному или смешанному принципу. Исходя из этого для выбора структуры ИУС необходимо определить [3]:

- состав подсистем, реализующих определенные в техническом задании задачи автоматизации стендовых испытаний;

- архитектуру построения подсистем с учетом требований быстродействия и надежности;

- размещение технических средств подсистем в сооружениях испытательного комплекса с учетом требований метрологии, электропитания и заземления;

- организацию единого времени и обмена данными между подсистемами ИУС, обеспечивающих функционирование подсистем как единого информационно-управляющего комплекса;

- организацию оперативного управления с помощью автоматизированных рабочих мест операторов, инженеров-технологов, ведущих инженеров, специалистов и руководителей организации – заказчика по испытанию.

На принятие решения по выбору структуры ИУС влияют следующие факторы: принятая на испытательном стенде технология проведения испытаний;

- тип испытываемых изделий;

- сложность изделия и испытательного оборудования, определяемая числом каналов измерения, управления и регулирования, а также сложностью реализуемых алгоритмов управления;

- требования по надежности и быстродействию;

требования к программно-аппаратным средствам имитации объекта управления;

требования к интеграции ИУС и стендовых информационно-измерительных систем (ИИС);

требования к стоимости ИУС;

топология размещения изделия и стендового технологического оборудования;

продолжительность и интенсивность испытаний на стендах испытательной станции.

ИУС может строиться в виде централизованной или распределенной системы, состоящей из отдельных подсистем. Вариант централизованной системы используется для небольших стендов и установок лабораторного типа с числом датчиков и исполнительных элементов, исчисляемым десятками. Для сложных стендов наиболее эффективной является распределенная структура ИУС.

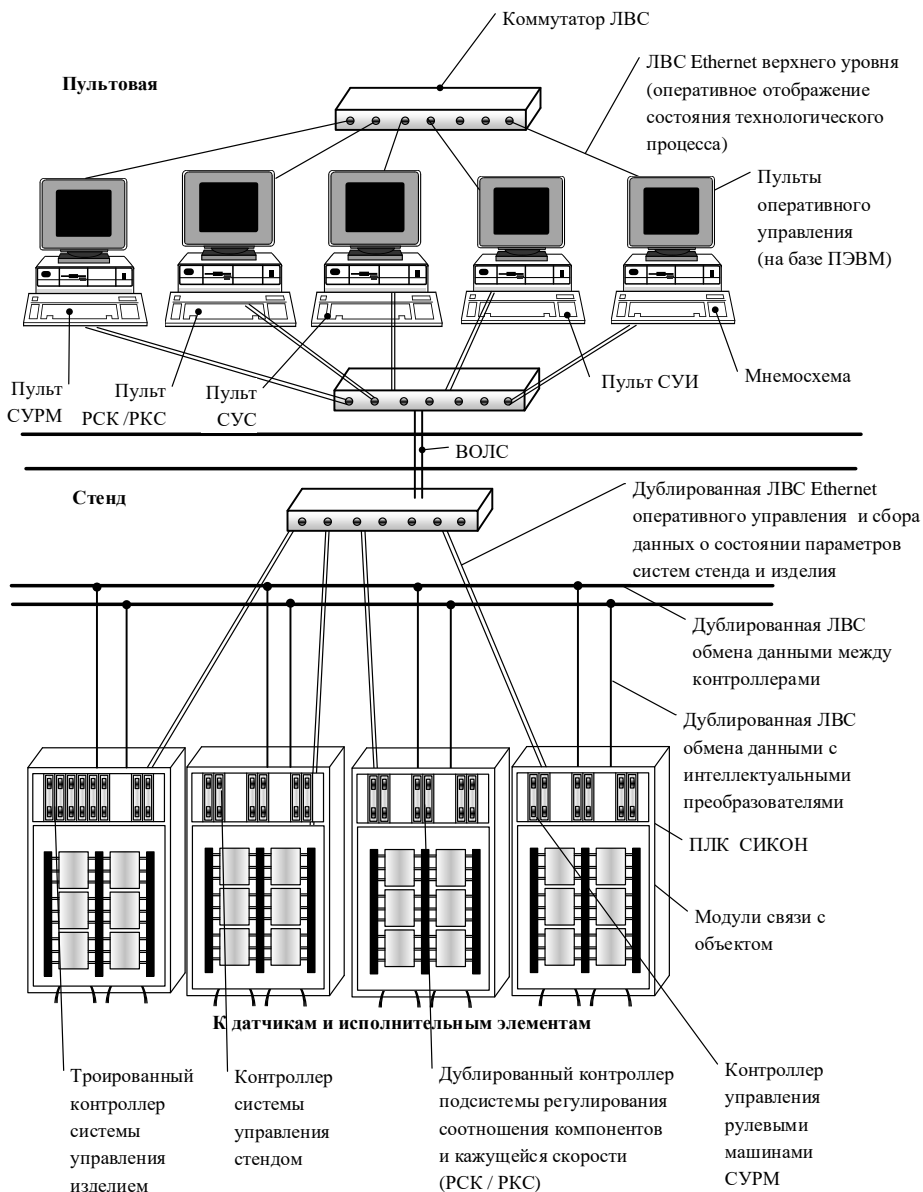
Распределенная ИУС представляет собой комплекс автономных интеллектуальных подсистем, реализующих различные задачи автоматизации испытаний. Подсистемы объединяются единой локальной вычислительной сетью (ЛВС). Распределенная структура позволяет сократить и упростить кабельную сеть, повысить помехозащищенность измерительных каналов, обеспечивает простое подключение пультов местного управления, параллельное независимое проведение работ на стендах, индивидуальное решение вопросов резервирования в зависимости от важности решаемых каждой из подсистем задач.

Выбор варианта размещения оборудования ИУС зависит от расстояния между сооружениями испытательной станции, наличия и качества помещений для установки аппаратуры, требований по точности измерения и особенностей существующей кабельной сети.

Проблема помехозащищенности измерительных каналов является одной из причин размещения основной части аппаратуры ИУС непосредственно в помещениях испытательного сооружения стенда. При этом связь между зданием управления и помещением выносной аппаратуры ИУС на испытательном сооружении осуществляется с помощью волоконно-оптических кабелей. С другой стороны, размещение всей аппаратуры ИУС в здании управления (бункере) упрощает ее обслуживание и гарантирует наилучшие климатические условия.

Выбор состава подсистем ИУС носит неформализованный характер, так как зависит от многих указанных выше факторов. Как правило, процедура выбора осуществляется методом экспертных оценок различных вариантов.

Распределенная архитектура была принята для построения ИУС на многих стендах отрасли. Типичная ИУС имеет трехуровневую организацию (рис. 3.18).



**Рис. 3.18. ИУС типового стенда:**

ЛВС – локальная вычислительная система; СУРМ – система управления рулевыми машинами; СУС – система управления стендом; СУИ – система управления испытываемым изделием; ПЛК – программируемый логический контроллер; СИКОН – сетевой индустриальный контроллер; РСК/РКС – регуляторы соотношения компонентов топлива и кажущейся скорости; ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

Два нижних уровня составляют *контроллеры* (микропроцессорные устройства с интерфейсами ввода/вывода) и оборудование связи с объектом. На верхнем уровне находятся рабочие станции операторов, ведущих инженеров и специалистов, серверы баз данных. В состав ИУС входят *имитаторы*, представляющие собой выделенные программируемые контроллеры, задачей которых является генерация по заданной циклограмме последовательности сигналов, обеспечивающих проверку правильности работы алгоритмов и оборудования ИУС.

Задачи, решаемые ИУС, рассмотрим на примере стендовых испытаний ступеней РН «Ангара» [9]. Их можно разделить на следующие группы:

- управление процессами заправки изделия компонентами топлива, рабочими газами;

- обеспечение и контроль режимов работы ракетной ступени по циклограмме, имитирующей предстартовые технологические процессы и полет ракеты;

- обеспечение специалистов, проводящих испытание, средствами визуального контроля параметров стенда и изделия для принятия решений в процессе испытаний.

Первую группу задач решает комплекс стендовых систем управления, контроля и регулирования ИУС-С. Основным назначением систем управления испытательным стендом ИУС-С является:

- дискретное управление исполнительными элементами стенда, управление технологическими процессами в соответствии с заданной циклограммой;

- автоматическое регулирование и контроль параметров (давлений, расходов, температур) стендовых технологических систем и отсеков изделия;

- контроль опасных накоплений газов (кислорода, паров керосина, азота) в отсеках стенда и непосредственно у изделия.

Вторую группу задач решает комплекс систем управления и контроля изделия, включающий в себя систему контроля заправки (СКЗ), информационно-управляющую систему изделия (ИУС-И), информационно-управляющую систему электрогидравлических сервоприводов (ИУС-ЭГС), систему аварийной защиты (САЗ). Из названий становится понятен широкий спектр функций, выполняемых перечисленными системами. Это:

- контроль уровней компонентов топлива в баках при заправке изделия и испытании (сливе);

- контроль давлений в шар-баллонах при их зарядке и подготовке к пуску;

- контроль и поддержание давления в баках, начиная с предпусковых операций и заканчивая остановом двигателя;

- контроль параметров двигателя перед запуском;

- управление запуском, работой по циклограмме полета и остановом двигателя;

- контроль и управление расходом компонентов топлива с учетом обеспечения равномерного опорожнения баков и поддержание заданного соотношения компонентов в камере сгорания двигателя;



управление комплектами блоков сопел крена;

управление отклонением камеры (камер) двигателя и аэродинамических рулей на заданные углы с заданной частотой колебаний по каналам тангажа и рыскания;

контроль критических параметров двигателя с момента его запуска до останова с возможностью автоматического выключения в случае выхода одного или группы параметров из допусковых значений.

При всем разнообразии решаемых задач эти системы имеют одну общую особенность – все они непосредственно связаны с элементами автоматики ракетной ступени, образуя функционально ориентированные автономные или связанные между собой комплексы бортовых и наземных средств (рис. 3.19).

Характерной особенностью современных стендовых испытаний ракетно-космической техники является высокий уровень автоматизации технологических процессов, который обеспечивается применением большого числа алгоритмов управления и контроля, их возрастающей сложностью. Безошибочная реализация алгоритмов в информационно-управляющих системах является важным элементом в достижении успешности и безопасности испытаний.

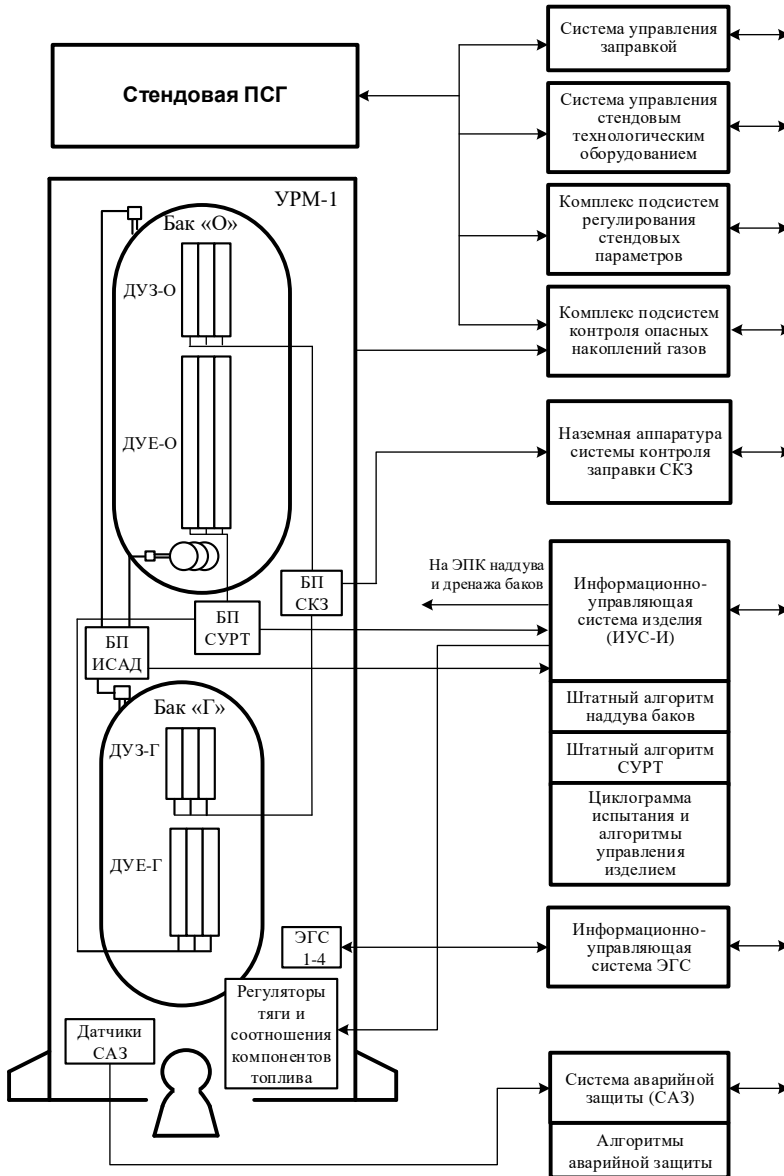
Для обеспечения проверки функционирования алгоритмов при разработке систем применяются специальные схемные решения. В составе ИУС предусматриваются специальные контроллеры, предназначенные для управления имитацией сигналов с датчиков объекта. Модули связи с объектом, преобразователи, блоки размножения сигналов также оснащаются каналами организации имитации.

Программное обеспечение ИУС разрабатывается с возможностью моделирования изменяющихся во времени сигналов. Таким образом, в составе ИУС формируется своеобразный имитационно-моделирующий комплекс, позволяющий решать усложняющиеся задачи управления и контроля. Примененная схема проверки позволяет безошибочно реализовать как алгоритмы управления технологическими системами стенда, так и сложнейшие алгоритмы управления и контроля изделия.

**Архитектуры ИУС.** При стендовых испытаниях ЖРД и ступеней ракет предъявляют повышенные требования к надежности систем управления. Как правило, повышение надежности и живучести аппаратуры управления достигается:

созданием многоканальных (дублированных или троированных) структур ИУС (здесь под каналом понимается самодостаточный тракт ввода, обработки и вывода сигналов на объект управления резервированной аппаратуры);

распределенной структурой ИУС, когда входящие в нее подсистемы специализируются на определенной задаче (управление изделием/стендом, регулирование параметров изделия/стенда, аварийной защиты) и в зависимости от ее важности строятся по дублированной либо троированной схеме.



**Рис. 3.19. Функциональная схема работы систем контроля и управления испытываемым изделием:**

УРМ – универсальный ракетный блок; ПГС – пневмогидросистема; БП – бортовой прибор; ЭПК – электропневмоклапан; ДУЗ, ДУЕ – датчики уровня заправки; СУРТ – система управления расходом топлива; СКЗ – система контроля заправки; ЭГС – система электрогидравлических сервоприводов; ИСАД – измерительная система абсолютного давления

Поддержка резервирования обеспечивается:

простым и надежным способом размножения входных аналоговых и дискретных сигналов;

наличием модулей дискретного и аналогового вывода/вывода с поддержкой дублирования и модулей дискретного вывода для троированных систем с функцией мажоритирования;

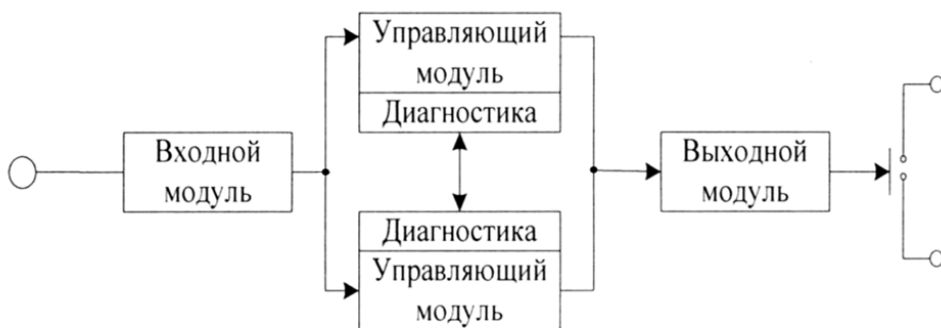
использованием дублированных интерфейсов связи с операторскими станциями и другими контроллерами в распределенных системах;

наличием в контроллерах интерфейса, обеспечивающего обмен и мажоритирование информации при работе контроллера в составе троированных контроллерных блоков;

наличием аппаратно-программных средств определения отказавшего канала в троированном контроллерном блоке и автоматического безударного реконфигурирования системы.

В стендовых ИУС допустимо использование архитектур трех типов:

*одноканальных ИУС с дублированием управляющих контроллеров* (рис. 3.20) – наиболее простая архитектура, лежащая в основе многих ИУС для управления стендовым технологическим оборудованием. Поскольку последствия отказа управляющего контроллера непредсказуемы, *использование одноканальных ИУС без резервирования функций управляющего контроллера не рекомендуется;*



**Рис. 3.20. Архитектура 1oo1D (1 out of 1) с одноканальной системой, где второй модуль, работающий в режиме «горячего» резерва, обеспечивает возможность программно-управляемого останова**

*дублированных ИУС* (рис. 3.21) – применяются при построении ИУС управления стендовым технологическим оборудованием с повышенными требованиями к безопасности испытаний. По надежности дублированные ИУС не уступают троированным при условии корректного решения задачи автоматической диагностики отказа;

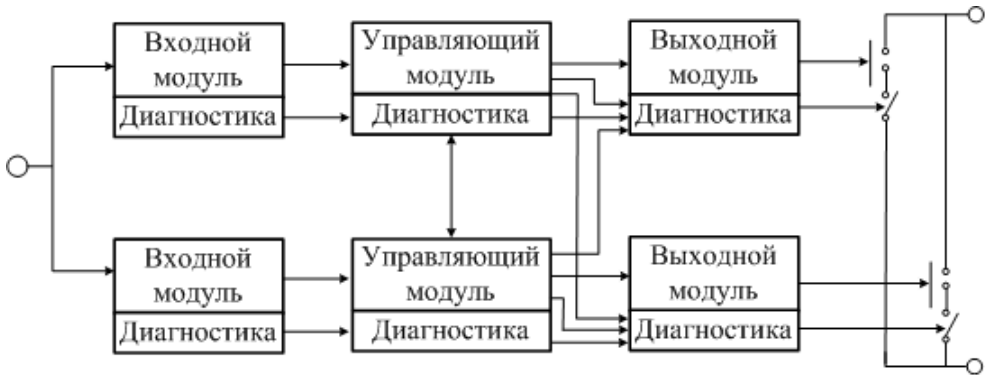


Рис. 3.21. Архитектура 1oo2D. Схема деградации 2-1-0

*троированных ИУС* (рис. 3.22) – применяются при построении систем аварийной защиты, ИУС управления изделием, ИУС управления стендовым технологическим оборудованием с повышенными требованиями к безопасности испытаний.

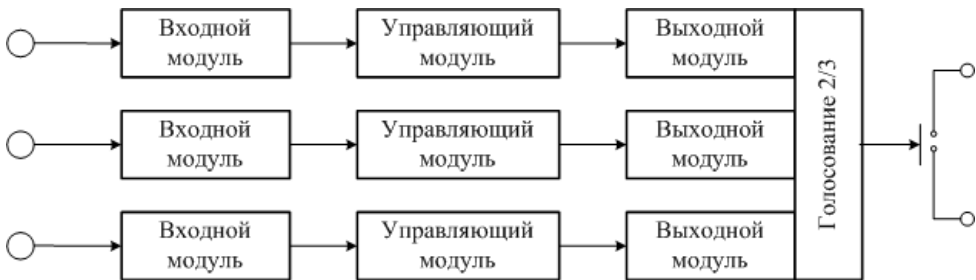


Рис. 3.22. Архитектура 2oo3. Схема деградации 3-2-0

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 61508 в качестве меры надежности систем безопасности определен интегральный уровень безопасности SIL (Safety Integrity Level) – дискретная величина от 1 до 4, задающая уровень требований, которые должны обеспечивать системы управления и аварийной защиты. Чем более ответственным является объект, тем более надежной должна быть система. Как правило, при испытаниях изделий РКТ типа ЖРД, ДУ, ступени РН руководствуются уровнями SIL 2 (защита оборудования и продукции, защита от травматизма) для технологических систем, не связанных с безопасностью испытаний, и SIL 3 (защита обслуживающего персонала и населения) для систем, связанных с безопасностью, в том числе систем управления и аварийной защиты изделия (табл. 3.3).

*Кроме вероятности отказа (не более 0,001) определяющим требованием к системам обеспечения безопасности является программно-управляемое функционирование после одиночного отказа в течение заданного времени.*

Таблица 3.3

**Рекомендации по применению архитектур ИУС**

Вероятность отказа $Q$	0,01	0,001
Надежность $P$ -100, %	99,0	99,9
SIL согласно ГОСТ Р МЭК 61508	2	3
Архитектура системы	Дублирование контроллеров управления (1oo1D)	Полностью дублированные либо троированные системы (1oo2D либо 2oo3)
Входы системы	Нерезервированные 1oo1, либо резервированные 1oo2	Резервированные 1oo2 либо 2oo3
Выходы системы	Нерезервированные 1oo1	Нерезервированные 1oo1 либо резервированные 1oo2

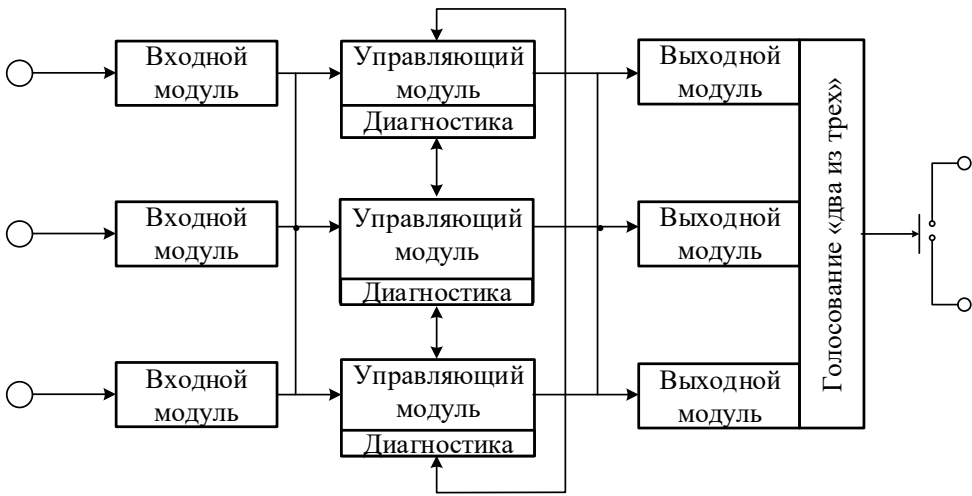
Как следует из табл. 3.3, при одиночном отказе программно-управляемая защита объекта возможна только для архитектур 2oo3 (2 out of 3) и 1oo2D.

Архитектура 1oo2D представляет собой полностью дублированную структуру, дополненную независимыми диагностическими средствами, позволяющими организовать перекрестную проверку соседнего канала. В случае когда средства диагностики обнаруживают неисправность в одном из каналов, канал отключается, а система продолжает работать на втором канале. При восстановлении работоспособности канала он включается в работу, полностью восстанавливая работоспособность системы. Схема деградации архитектуры 1oo2D при последовательных отказах каналов выглядит следующим образом: 2-1-0.

Архитектура 2oo3 представляет собой структуру из трех каналов, соединенных параллельно, с мажоритарным голосованием, при котором состояние выхода не изменяется, если только один канал дает результат, отличный от двух других. В классическом варианте данной архитектуры предполагается, что любое диагностическое тестирование только извещает об обнаруженных сбоях и не участвует в выходном голосовании. Схема деградации архитектуры 2oo3 при последовательных отказах каналов выглядит следующим образом: 3-2-0.

Если сравнить вероятности отказов указанных архитектур, то при прочих равных условиях архитектура 1oo2D выглядит более предпочтительной. Вероятности отказов архитектур 1oo2D и 2oo3 соотносятся как 1:3. Трехкратное превышение вероятности отказа систем 2oo3 по сравнению с системами 1oo2D связано с их архитектурной избыточностью. Несмотря на это преимущество использование архитектуры 1oo2D при построении стендовых САЗ ЖРД и ДУ остается проблематичным. Основная проблема заключается в определении и реализации надежных решений по диагностике отказа при цикле работы системы, составляющем не более 10 мс, и жестких ограничениях на время реакции САЗ – не более 50 мс.

В работах [3, 10] предложена и реализована в десятках стендовых систем управления оригинальная архитектура 2oo3d (рис. 3.23), обеспечивающая промежуточное между 1oo2D и 2oo3 значение вероятности отказов.



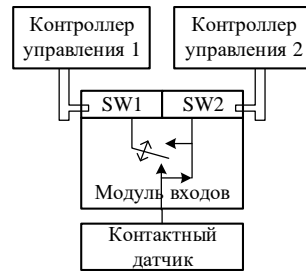
**Рис. 3.23.** Архитектура 2oo3d. Схема деградации управляющей части 3-1-0, а входной и выходной частей, работающих по классической схеме, 3-2-0. Вероятности отказа архитектур 1oo2D, 2oo3d, 2oo3 соотносятся примерно как 1:2:3

В отличие от классической схемы предлагаемая архитектура 2oo3d позволяет реализовать автоматическое определение отказавшего канала по схеме голосования «два из трех» и автоматическую реконфигурацию к одноканальной архитектуре, обеспечивающую работоспособность системы. В результате реконфигурации один из двух работоспособных контроллеров (следующий по номеру за отказавшим) становится ведущим, и к нему подключаются все три выходных интерфейса связи контроллеров с троированными модулями выходов.

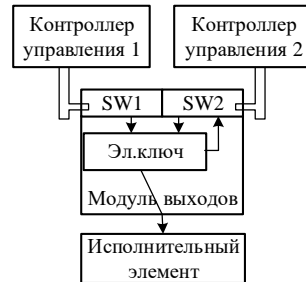
Рассмотрим реализацию различных архитектур с использованием технических возможностей аппаратуры стендовых ИУС [3]. Наибольшее практическое воплощение получили следующие типы систем.

*Одноканальные ИУС с дублированием управляющего контроллера.* Используются для управления технологическими системами, не требующими повышенных мер безопасности. В системах подобного типа оба контроллера получают идентичную информацию с объекта управления, но фактически управляет объектом только один контроллер, назначенный ведущим (рис. 3.24). Данное решение исключает весьма неоднозначные и ресурсоемкие процедуры взаимной диагностики и автоматического определения неисправного контроллера.

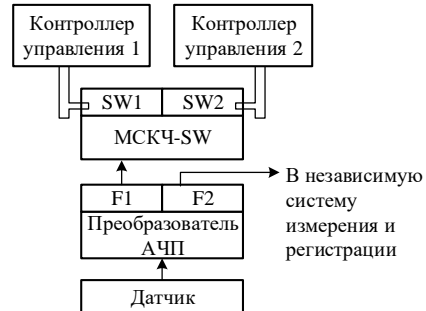
Дискретный ввод реализуется с помощью модулей дискретного ввода, каждый из которых имеет два интерфейса: основной (SW1) и дополнительный (SW2). Модуль может работать в двух режимах: рабочем и имитации. Соответственно, второй контроллер при подготовке служит в качестве имитатора объекта управления, а в «боевом» режиме – в качестве «горячего» резерва основного контроллера



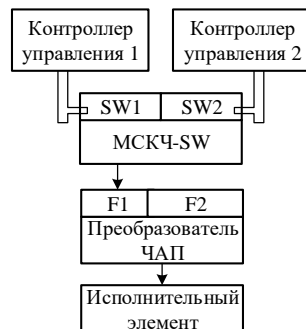
Дискретный вывод реализуется с помощью модулей дискретного вывода, каждый из которых имеет два интерфейса: основной (SW1) и дополнительный (SW2). Основной интерфейс служит для подачи команд на исполнительные элементы (ЭПК, ПП и т.п.). Через дополнительный осуществляется либо управление, либо контроль исполнения команд. Выбор «ведущего» канала производится по команде оператора



Аналоговый ввод реализуется с помощью аналого-частотных преобразователей (АЧП), значение входного сигнала которых ( $U, I, R, dR/R$ ) пропорционально частоте  $F=2...10$  кГц, принимаемой обоими контроллерами с помощью модуля МСКЧ-SW. Модуль МСКЧ-SW имеет два интерфейса: основной (SW1) и дополнительный (SW2) и может работать в двух режимах: рабочем и имитации. Соответственно, второй контроллер при подготовке служит в качестве имитатора объекта управления, а в «боевом» режиме в качестве «горячего» резерва основного контроллера



Аналоговый вывод реализуется с помощью частотно-аналоговых преобразователей (ЧАП), значение выходного сигнала которых ( $U, I$ ) пропорционально частоте  $F=2...10$  кГц, формируемой контроллерами и модулем МСКЧ-SW. Модуль МСКЧ-SW имеет два интерфейса: SW1 и SW2. Выбор ведущего контроллера осуществляется по команде оператора



**Рис. 3.24. Организация ввода-вывода одноканальных ИУС с дублированием управляющих контроллеров:**

SW – (Space Wire) интерфейс связи контроллера с модулями ввода-вывода;  
 МСКЧ – модуль ввода/вывода частотных сигналов

На уровне модулей ввода/вывода дублирование обеспечивается следующими схемными решениями:

модули ввода аналоговых сигналов имеют два гальванически развязанных выхода, позволяющих подключиться к двум контроллерам;

модули ввода дискретных сигналов имеют два выходных интерфейса, к каждому контроллеру;

модули вывода дискретных сигналов имеют по два входных интерфейса от двух контроллеров. Переключение реального управления выходами с одного интерфейса на другой осуществляется по служебным командам от контроллеров «я ведущий» или «я ведомый». Команды «я ведущий»/«я ведомый» являются взаимоисключающими, т.е. если один из контроллеров назначается ведущим, то второй назначается ведомым. В случае «зависания» какого-либо контроллера модули вывода считают ведущим интерфейс, по которому была выдана последняя команда «я ведущий».

*Троированные ИУС.* На рис. 3.25, 3.26 приведена структура троированной ИУС. В отличие от дублированных систем троированные системы позволяют реализовать автоматическое определение отказавшего канала по схеме голосования «два из трех» и автоматическую реконфигурацию, обеспечивающую работоспособность системы.

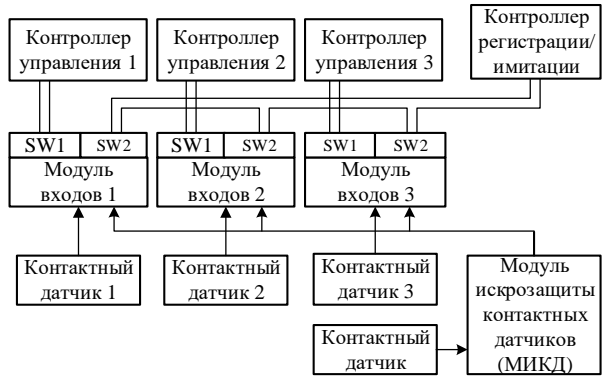
Наибольшую трудность при создании троированных систем представляет задача взаимной синхронизации содержимого памяти каналов. От правильности ее решения зависят быстрдействие системы и способность обеспечить «безударное» продолжение функционирования при отказе какой-либо ее части.

Рассинхронизация чаще всего связана с различным восприятием контроллерами входной информации. Вероятность такого события возрастает с увеличением частоты изменения входных переменных при большом числе условных переходов в алгоритме. Это явление характерно для технологических процессов в ходе стендовых испытаний или подготовки к старту ракетных изделий и известно под названием «дребезг» параметров (например, подрабатывание контактов сигнализаторов давления на пороге настройки).

В системах управления задача управления работает жестко и циклически. В течение одного такта осуществляются опрос входов, обработка программ управления и вывод сигналов на объект управления. Для отсчета длительности такта в процессоре каждого канала используются аппаратные таймеры, которые синхронизируются от сигналов глобальных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Внутри такта работа контроллера в каждом канале осуществляется независимо от работы контроллеров других каналов. При типичной для стендовых испытаний длительности такта в 10 мс расхождения в функционировании контроллеров при одинаковых условиях в течение такта несутельственны.



Дискретный ввод реализуется с помощью модулей дискретного ввода, каждый из которых имеет два интерфейса: основной (SW1) и дополнительный (SW2). Модуль может работать в двух режимах: рабочем (регистрации) и имитации. Если контактный датчик имеет троированное исполнение, то каждый контакт подключается к своему модулю входов. Если контакты не резервированы, то необходим дополнительный модуль МИКД, который по выходу обеспечивает размножение сигналов



Дискретный вывод реализуется с помощью блоков преобразования интерфейсов, каждый из которых имеет четыре интерфейса: основные (SW1, SW2, SW3) и дополнительный (SW4). Основные интерфейсы служат для подачи команд через RS485 на 32-канальные силовые модули вывода (до 8 шт.) и далее на исполнительные элементы (ЭИК, ПП и т.п.) по схеме «2 из 3». Через дополнительный интерфейс SW4 осуществляется контроль исполнения команд



Аналоговый ввод реализуется с помощью аналого-частотных преобразователей (АЧП), значение входного сигнала которых ( $U, I, R, dR/R$ ) пропорционально частоте  $F=2...10$  кГц. Сигнал частоты с интерфейса F1 АЧП с помощью модуля гальванической развязки МГР размножается на четыре направления: три в троированный контроллер, один в контроллер регистрации. Преобразование частотного сигнала в цифровой код или обратно осуществляется модулем МСКЧ-SW. Имеется возможность подать на регистрирующий контроллер или на независимую систему регистрации сигнал с интерфейса F2 АЧП. Для реализации режима имитации возможна имитация частотных сигналов контроллером регистрации/имитации через дополнительные интерфейсы модуля МСКЧ-SW

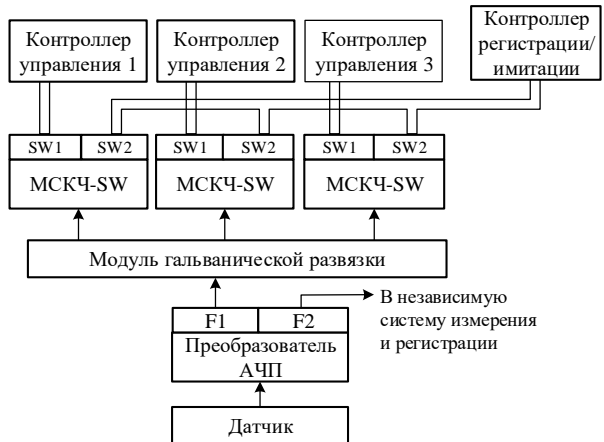


Рис. 3.25. Организация ввода-вывода троированных ИУС

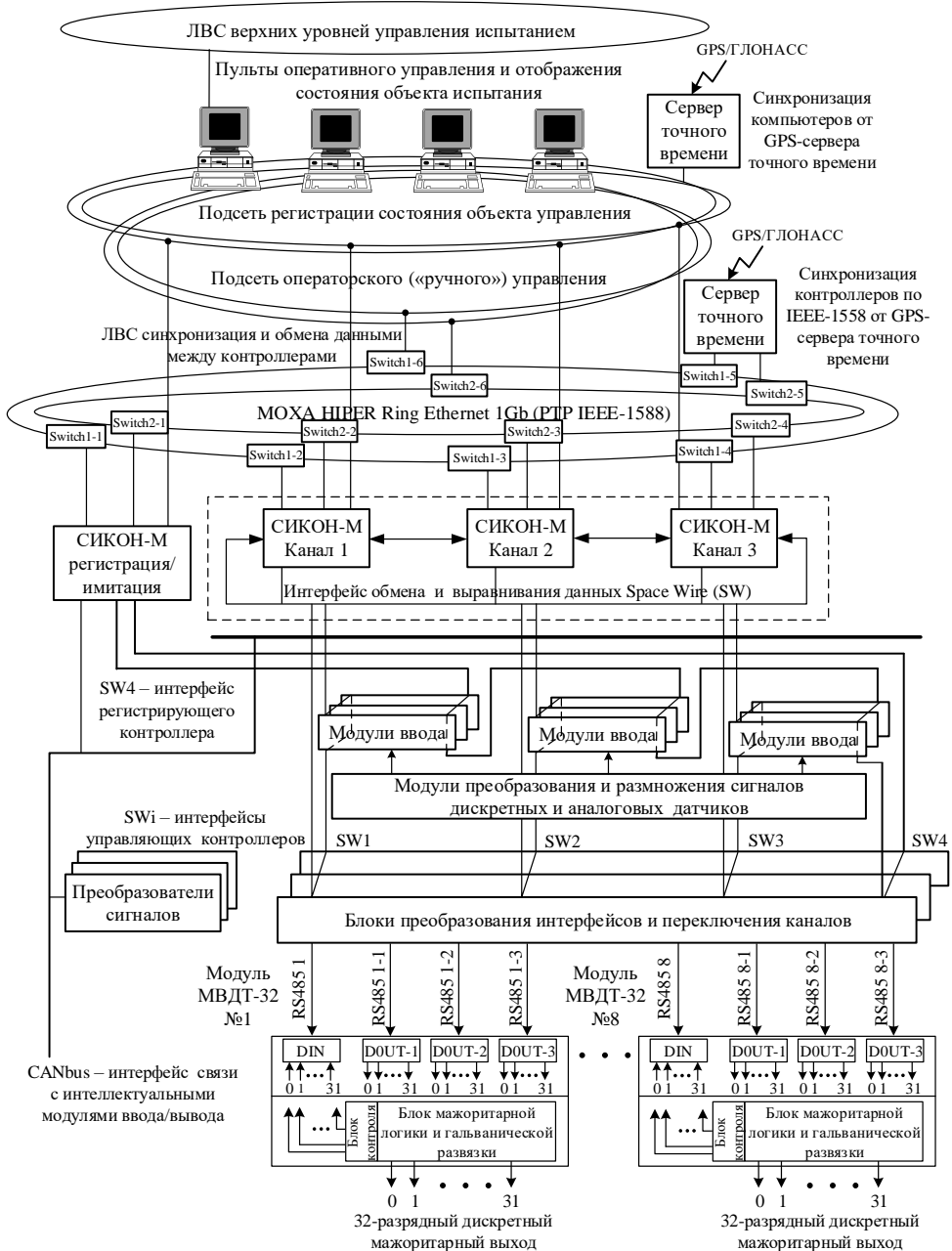


Рис. 3.26. Обобщенная структура трюированной ИУС

В начале каждого такта производится обмен массивами состояний входов, выходов и промежуточных переменных. После обмена в каждом канале дискретная информация подвергается процедуре голосования «два из трех» по каждому биту, а для аналоговых данных за результирующее принимается значение, оставшееся после отбрасывания верхнего и нижнего значений.

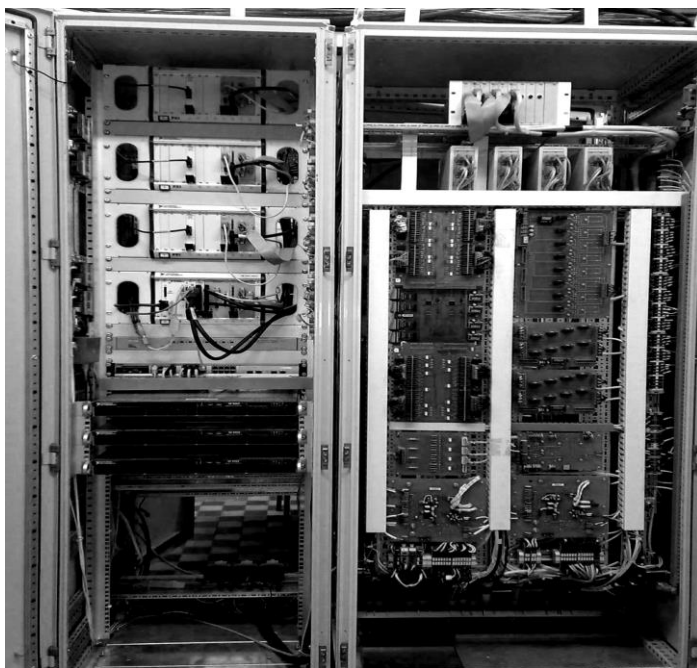
Данная схема троирования не предполагает самодиагностики процессоров. Каждый из них вырабатывает решение об исправности своих соседей с помощью предельно простой тестовой проверки: длины переданного и принятых от левого и правого контроллеров массивов в результате обмена должны совпадать. Если размеры массивов совпадают, то происходит выравнивание значений. В противном случае выравнивания значений не происходит и каждый канал выдает в выходные блоки значения выходов, сформированные на предыдущем такте.

Если в течение нескольких тактов подряд (это число программируется и равно, как правило, двум) от какого-либо контроллера не получено нужного количества данных, то вырабатывается сигнал о его неисправности и производится схемная реконфигурация структуры троированного контроллера. В результате реконфигурации один из двух работоспособных контроллеров становится ведущим, и к нему подключаются все три выходных интерфейса связи контроллеров с троированными модулями выходов.

**Особенности построения стендовых систем аварийной защиты.** Системы аварийной защиты (САЗ) предназначены для автоматического контроля критических параметров ЖРД (как наиболее сложного элемента ДУ) с момента его запуска до останова с возможностью автоматического выключения в случае выхода одного или группы параметров за допусковые значения. Алгоритмы контроля создаются разработчиком двигателя на этапе его проектирования и в некоторых случаях даже настраиваются для каждого экземпляра двигателя. Программно-аппаратная реализация САЗ осуществляется с учетом требований по объему измеряемых параметров и быстродействию системы в целом. САЗ может быть реализована как автономная система либо интегрирована с системой управления изделием. Совмещение в одном троированном комплексе СУ-САЗ программно-аппаратных средств реализации задач управления и аварийной защиты обеспечивает существенное повышение надежности и сокращение времени реакции на аварийную ситуацию по сравнению с автономными системами управления и аварийной защиты. При этом четвертый канал СУ-САЗ обеспечивает дополнительную, независимую регистрацию параметров ЖРД и ступени РН. В состав этого канала также входят имитатор, задачей которого является генерация по заданной временной циклограмме тестовых значений сигналов датчиков для проверки правильности работы алгоритмов и оборудования СУ-САЗ в ходе подготовки к испытаниям.

Число контролируемых параметров в САЗ, как правило, составляет от единиц до нескольких десятков. Например, для испытаний третьей ступени РН

«Ангара» стендовая СУ-САЗ (рис. 3.27) обеспечивала контроль по 33 параметрам двигателя.



**Рис. 3.27. Система аварийной защиты и управления для испытаний третьей ступени РН «Ангара»**

Основными требованиями к работе САЗ являются достоверность распознавания аварийной ситуации и быстродействие. Современные программно-аппаратные средства позволяют получить *время реакции САЗ* на уровне 20...40 мс при большой сложности и многоступенчатости алгоритмов контроля.

Состав параметров контроля и схема резервирования измерительных каналов определяются разработчиком ЖРД. Например, для ЖРД РД-0146 в число контролируемых параметров входят:

- числа оборотов турбонасосных агрегатов: 4 параметра  $\times$  4 измерительных канала;

- расходы компонентов топлива: 2 параметра  $\times$  3 измерительных канала;

- температуры компонентов вблизи расходомеров: 2 параметра  $\times$  3 измерительных канала;

- температура горячего охлаждения камеры сгорания: 1 параметр  $\times$  3 измерительных канала;

- температура запальника: 1 параметр  $\times$  4 измерительных канала;

- давление окислителя на входе: 3 параметра  $\times$  3 измерительных канала;

перепад давлений: 2 параметра × 3 измерительных канала;  
токи на исполнительные элементы: 8 параметров;  
углы поворота дросселей: 2 параметра;  
вибрации: 9 параметров.

Резервирование датчиков позволяет обеспечить нормальную работу САЗ при отказах средств измерения. При этом используются:

мажоритарная схема выбора параметра из совокупности измерений в конкретной точке конструкции;

просеивание сбоев (выбросов) измерений;

цифровая фильтрация (осреднение) измерений;

так называемые цензоры: алгоритмы – обнаружители отказов измерительных средств САЗ;

штрафование диагностических алгоритмов (отключение алгоритма по набору заданного числа выходов его логики на аварийную ветвь, не подтвержденных срабатыванием других алгоритмов).

При условии единичных сбоев (в течение такта) входных данных работа логики контроля считается штатной. При наличии множественных сбоев входных данных из логики контроля исключаются алгоритмы, использующие данную информацию.

Системы аварийной защиты используют логику контроля, разработанную конструкторами ЖРД и ДУ. В приведенном ниже описании идеологии построения алгоритмического обеспечения САЗ авторы опираются на опыт и результаты исследований, полученные ведущими отечественными разработчиками ЖРД: ОАО «КБХА» и РКК «Энергия».

**Структура алгоритма САЗ** – пакетная. Каждый пакет осуществляет контроль на определенном участке работы двигателя (участок может быть определен командами циклограммы или параметрами функционирования двигателя). ПКУ (программа контроля и управления – программная реализация алгоритма САЗ) решает задачи управления запуском двигателя на стадии интенсивного термостатирования и далее на режимах предварительной, основной и конечной ступеней тяги.

**Структура пакета алгоритмов САЗ** – единообразная. В пакет входят следующие типы алгоритмов САЗ:

алгоритмы-переключатели – начальные и оконечные;

алгоритмы формирования функциональных параметров;

алгоритмы формирования диагностических признаков;

алгоритмы принятия решения.

На каждом такте решения задачи САЗ программа контроля и управления вначале обращается к начальным алгоритмам-переключателям, затем – к вычислениям по алгоритмам в указанной выше последовательности и в завершение вычислений – к оконечным алгоритмам-переключателям.

Алгоритмы-переключатели вырабатывают признак изменения участка контроля и сообщают признак следующего участка контроля. В одном пакете обязательно наличие начальных алгоритмов-переключателей (может быть несколько) и возможно наличие нескольких оконечных алгоритмов-переключателей (их может не быть совсем).

Алгоритмы формирования функциональных параметров выбирают наиболее достоверную измерительную информацию, вычисляют комплексные параметры и/или текущие пороги контроля (по данным измерений нескольких параметров), вычисляют прогнозируемые значения контролируемых параметров.

Алгоритмы формирования диагностических признаков (включая алгоритмы – цензоры измерений), анализируя параметры функционирования двигателя, вырабатывают логические признаки, в совокупности характеризующие текущее состояние двигателя и измеряемых параметров. Среди освоенных и перспективных задач оперативного диагностирования следует отметить:

контроль текущего значения параметра, равно как и аналогичный контроль прогнозируемого значения параметра на соответствие постоянным или дрейфующим (линейно изменяющимся во времени) порогам, заданным относительно номинала параметра (константы) или заданным относительно фактического (измеренного) начального значения параметра, или заданным как линейная или квадратичная функция другого параметра или двух других параметров;

обнаружение предельного приращения параметра на фиксированном интервале по текущему значению порога;

обнаружение предельного смещения параметра как абсолютного или относительного отклонения, среднего по нескольким измерениям (контроль размаха скользящего среднего);

обнаружение предельного тренда параметра с отсевом влияния сопоставимого с флуктуациями дрейфа (обнаружение отклонения среднего, нарастающего в темпе, значимо превосходящем флуктуации параметра);

обнаружение предельных выбросов параметра за значение глобального экстремума;

обнаружение предельного размаха параметра по фиксированным порогам или по линейно зависящим от параметра порогам, или по дрейфующим порогам;

обнаружение аномалий топологии фазовой траектории двигателя на переходных режимах на основе количественного и качественного анализа взаимного поведения параметров;

обнаружение предельного смещения параметра и предельного изменения масштаба флуктуаций параметра приемами статистического последовательного анализа на основе критерия кумулятивной суммы (обнаружитель разладки статистического процесса);

оценку максимального правдоподобия для величины неисправности – определение в нормированном пространстве параметров двигателя (фазовом

пространстве) точки на отрезке прямой (одномерная гипотеза неисправности) или полуплоскости (двумерная гипотеза неисправности), ближайшей к проекции изображения режима двигателя (в фазовом пространстве) на эту прямую или плоскость (задача линейной алгебры); оценку меры правдоподобия данного типа неисправности (гипотезы) – определение в нормированном пространстве параметров двигателя квадрата расстояния от точки на отрезке прямой (одномерная гипотеза неисправности) или полуплоскости (двумерная гипотеза неисправности), ближайшей к проекции изображения режима двигателя на эту прямую или плоскость, до точки – изображения режима двигателя (задача линейной алгебры); оценку максимального правдоподобия для «щадящего» управления над всей совокупностью значимых гипотез неисправностей (задача нелинейного программирования).

Алгоритм принятия решения, анализируя совокупность всех диагностических признаков, сравнивает текущее состояние двигателя с набором аномальных состояний и, например, в случае идентификации аварии формирует признак команды АВД с «окраской», определяющей способ реализации, или признак команды аварийного дросселирования или другой команды. Если наступают условия для формирования признаков нескольких команд, то решающее правило выбирает признак приоритетной команды.

Разработка и отработка алгоритмов САЗ осуществляются параллельно с разработкой ЖРД и его отработкой при огневых стендовых испытаниях.

На основании структурно-функционального анализа конструкции двигателя и его агрегатов, анализа результатов автономных доводочных испытаний агрегатов двигателя и энергоустановок, результатов огневой отработки двигателей-прототипов и отчасти результатов расчетного анализа влияния внутренних факторов на параметры работы двигателя проводится анализ видов, последствий и критичности отказов, в ходе которого устанавливаются:

- перечень аварийных ситуаций, возможные последствия, их критичность, вероятность их появления;

- параметры и алгоритмы, предназначенные для своевременного обнаружения каждой аварийной ситуации, мера достоверности (вероятности) обнаружения аварийной ситуации;

- возможные последствия аварийных ситуаций и их критичность с учетом их обнаружения логикой аварийной защиты.

Создаваемая на базе указанного анализа исходная версия алгоритма САЗ, с которой стартует процесс огневой доводки двигателя, характеризуется низкой эффективностью: как правило, коэффициент охвата аварийных ситуаций доходит до 30 %, причем основную долю «не охваченных» аварийных ситуаций составляют именно наиболее критичные (скоротечные и разрушительные) отказы. Следует отметить также высокую частоту ложных отказов в начальный период отработки: до двух-трех ложных на один действительный отказ.

Таким образом, основная тяжесть отработки алгоритмов САЗ ложится на период огневой доводки двигателя, в ходе которой выявляются и устраняются причины отказов «логики контроля» и дефектов аппаратно-программного комплекса САЗ.

Так, например, для изделия И5А2С (третья ступень РН «Ангара») с двигателем РД-0124А «логика контроля» должна была к началу ОСИ иметь:

вероятность безаварийной работы двигателя не менее 0,98;

вероятность невыдачи ложного сигнала АВД не менее 0,9995;

коэффициент доверия при оценке нижних границ вероятностей не менее 0,9.

Отработка «логики контроля» двигателя РД-0124 проводилась в ходе 150 огневых стендовых испытаний. Из них 61 завершилось аварийно. В двенадцати случаях имели место ложные аварийные выключения, связанные с ошибками в «логике контроля», ошибками в настройке алгоритмов, отказами датчиков, отказами оборудования. В пяти случаях команда АВД была сформирована по команде ведущего инженера из-за появления на двигателе пламени. При этом согласно «логике контроля» на момент АВД ситуация была штатной. В девятнадцати случаях САЗ выключила двигатель до наступления внешних повреждений. В пяти случаях двигатель был выключен с некритическими внешними повреждениями. В шести случаях двигатель был выключен с критическими (опасными) внешними повреждениями, а в трех случаях – с катастрофическими.

Логика алгоритмов диагностирования двигателя строится исходя из банка данных возможных отказов. Конфигурация диагностического алгоритма и пороги контроля должны обеспечить заданную вероятность обнаружения аварийной ситуации. Значения порогов, определяющие коридоры изменения параметров и зависимостей комплекса параметров, должны с учетом времени реакции САЗ обеспечивать безопасность испытаний. В то же время от корректности выбора значений порогов в значительной степени зависят риски формирования ложных признаков АВД, связанные с различием экземпляров двигателей, условиями испытаний, приработкой или деградацией узлов в результате процессов износа, ошибками измерений и т.п.

Расчет границ контроля для каждого алгоритма ведется исходя из требования невыдачи им ложного сигнала на основании статистики поведения контролируемого параметра при кондиционных испытаниях. Считается, что требования по вероятности невыдачи ложного сигнала  $P$  признаются выполненными, если пороги для алгоритмов контроля перекрывают односторонние толерантные пределы, определенные для вероятности  $P$  и коэффициента доверия  $\gamma$  по данным из статистической выборки объемом  $N$  из совокупности «успешных» испытаний.

Важнейшая характеристика алгоритма диагностирования – вероятность своевременного обнаружения аварийной ситуации – не поддается ни расчету, ни экспериментальной проверке в связи с тем, что:



отсутствуют программные и технические средства для адекватного данной задаче моделирования области возможного поведения параметров при развитии аварийной ситуации данного типа с учетом разброса внешних и внутренних факторов, меры повреждения, ошибок измерения в динамике отказа;

физическое воспроизведение для этой цели множества аварийных ситуаций, соответствующих отказу данного типа, является чрезвычайно трудной задачей.

Основная функция алгоритмов-цензоров состоит в защите от ложных решений при независимых отказах датчиков (каналов) измерения параметра в том случае, когда в результате предшествующих отказов датчиков (каналов) схема резервирования измерения данного параметра исчерпана.

Цензор сопоставляет значение параметра, выбранное как субмаксимальное из совокупности одновременных его измерений, с предельными значениями. Если значение параметра выходит за пределы возможных значений в условиях аварийной ситуации, то цензор отключает алгоритмы, контролируемые данным параметром. Применение цензоров требует корректной оценки границ предельного поведения параметров в аварийных ситуациях.

Методика расчета границ изменения параметров для цензоров включает в себя: определение условий работы датчиков, влияющих на их динамические характеристики;

определение динамических характеристик измерительных систем (датчик + импульсный канал + канал вторичного преобразования и фильтрации);

определение предельных границ и характера (скорости) изменения параметров САЗ во времени при различных аварийных ситуациях;

определение настройки алгоритмов-цензоров (выбор метода и порогов обнаружителя отказов датчика).

**Вопросы надежности систем управления и аварийной защиты.** Испытания ЖРД и ступеней ракет предъявляют особые требования к системам обеспечения безопасности. Среди них важное место занимают системы аварийной защиты и управления (СУ-САЗ), надежность которых должна обеспечивать требуемый уровень безопасности испытаний.

Уровень надежности СУ-САЗ зависит от следующих основных факторов: уровня надежности используемых технических средств, их взаимосвязи в надежностной структуре системы, степени использования различных видов резервирования;

уровня надежности программного обеспечения системы и программно-алгоритмического обеспечения аварийной защиты, их функциональности и взаимосвязи в структуре всего программного обеспечения СУ-САЗ;

уровня организации работ по подготовке СУ-САЗ к испытаниям.

Надежность СУ-САЗ должна быть обоснована и экспериментально подтверждена. Для этого должен быть:

проведен анализ видов и последствий отказов оборудования СУ-САЗ;

проведен расчет надежности аппаратной части СУ-САЗ;

разработана «Программа и методика экспериментального определения основных технических и технологических характеристик СУ-САЗ»;

в соответствии с Программой проведены эксперименты, определяющие время реакции СУ-САЗ на аварийную ситуацию, и эксперименты, подтверждающие работоспособность СУ-САЗ при отказах оборудования, входящего в состав СУ-САЗ.

Целью работ по анализу видов и последствий отказов является определение опасных вероятных событий при выполнении СУ-САЗ функций аварийной защиты и управления изделием в ходе стендовых испытаний.

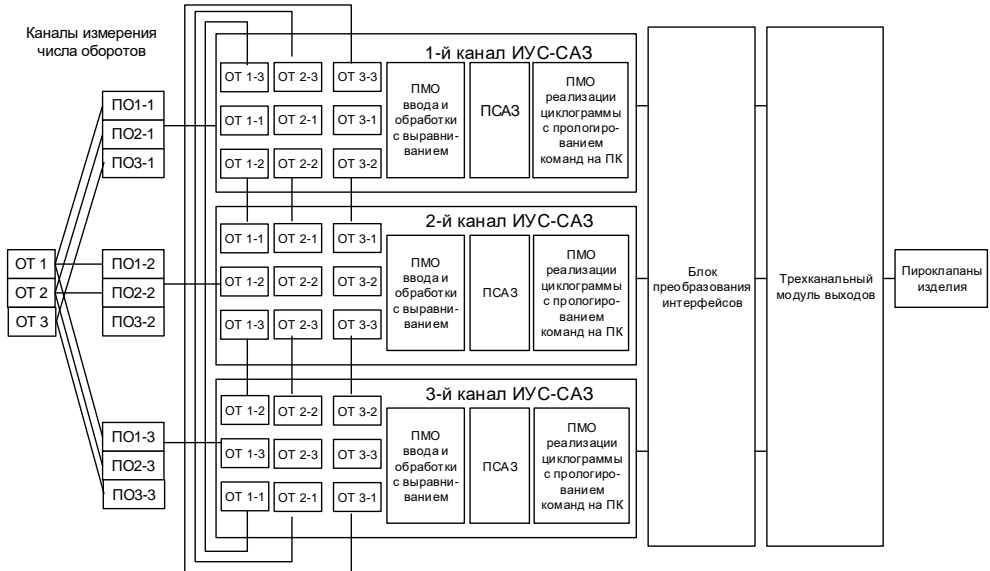
Оценка надежности аппаратной части СУ-САЗ необходима для подтверждения соответствия полученных надежностных характеристик требованиям, предъявляемым к системе СУ-САЗ при стендовых испытаниях изделия.

Целью экспериментов по определению основных технических характеристик СУ-САЗ является определение динамических характеристик преобразователей и времени реакции системы аварийной защиты по каждому типу контролируемых параметров. Временные характеристики определяются методом исследования кривой переходной характеристики, т.е. реакции системы на воздействие единичной ступенчатой функции. Кроме того, в Программе должны быть предусмотрены проверки по подтверждению живучести СУ-САЗ при возникновении одиночных отказов оборудования.

*Анализ видов и последствий отказов СУ-САЗ* оформляется в виде документа, в котором описываются опасные вероятные события (для всех достаточно предсказуемых обстоятельств) при выполнении СУ-САЗ функций аварийной защиты и управления изделием в ходе стендовых испытаний. Анализируются отказы аппаратуры СУ-САЗ и частично датчиков в части задач аварийной защиты двигателей. Отказы наземной кабельной сети обычно не рассматриваются, так как ее работоспособность проверяется в ходе многочисленных автономных и комплексных проверок при подготовке к испытанию и отказ во время испытания при его штатном проведении маловероятен.

В качестве примера приведем анализ отказов оборудования и их последствий в части функции аварийной защиты по числу оборотов турбины ЖРД для СУ-САЗ ступени РН.

На рис. 3.28 представлена типичная схема аварийной защиты по числу оборотов турбины ЖРД с использованием троированного датчика ОТ1...ОТ3. Аппаратные и программные решения обеспечивают идентичность работы каналов СУ-САЗ за счет выравнивания входной информации. Троированная структура СУ-САЗ обеспечивает на входе программы аварийной защиты (ПСАЗ) в каждом канале СУ-САЗ три выровненных показания троированного датчика чисел оборотов.



**Рис. 3.28.** Схема аварийной защиты по числу оборотов турбины ЖРД

Данная схема парирует следующие виды отказов элементов СУ-САЗ:

одиночные отказы преобразователей ПО сигналов чисел оборотов в каналах измерения ОТ1...3 (т.е. система допускает отказ трех ПО – по одному в каналах измерения ОТ1, ОТ2, ОТ3). Отказ парируется за счет обмена и выравнивания показаний чисел оборотов между тремя каналами СУ-САЗ по логике выбора срединного из значений в трех каналах;

одиночный отказ связанного модуля СМ. Данный вид отказа эквивалентен предыдущему в случае отказа трех ПО (по ОТ1, ОТ2, ОТ3) в одном канале СУ-САЗ. Отказ парируется за счет обмена и выравнивания показаний чисел оборотов между тремя каналами ИУС-САЗ по логике выбора срединного из значений в трех каналах;

одиночный отказ управляющего контроллера СИКОН-М. Отказ парируется логикой троированного обмена между контроллерами. При обнаружении отказа входная и процессорная части системы автоматически трансформируются к одноканальному варианту с сохранением функции мажорирования по выходу с помощью блока преобразования интерфейсов (БПИ), который обеспечивает подключение всех трех интерфейсов модулей выходов к ведущему каналу ИУС-САЗ. При этом ведущим каналом становится канал, следующий за отказавшим (по круговой системе);

одиночный отказ одного из трех модулей в БПИ – парируется классической мажоритарной схемой «два из трех»;

одиночный отказ элементов схемы одного из каналов трехканального модуля вывода, парируется классической мажоритарной схемой «два из трех»;

двойной отказ: процессорного модуля СИКОН-М в любом канале СУ-САЗ и оборудования вывода в любом канале ИУС-САЗ (БПИ, модуль выходов);

двойной отказ: отказ оборудования ввода (ПО, СМ) и отказ оборудования обработки и управления СИКОН-М в соседних каналах ИУС-САЗ по круговой системе. То есть допустимы комбинации: отказ оборудования ввода в первом канале и отказ оборудования управления и обработки во втором канале; отказ оборудования ввода во втором канале и отказ оборудования управления и обработки в третьем канале и т.д.;

тройной отказ: отказ в оборудовании вывода в любом канале ИУС-САЗ (БПИ, модуль выходов), отказ в оборудовании ввода (ПО, СМ) и отказ в оборудовании обработки и управления СИКОН-М в соседних каналах ИУС-САЗ по круговой системе. То есть допустимы комбинации: отказ оборудования ввода в первом канале и отказ оборудования управления и обработки во втором канале; отказ оборудования ввода во втором канале и отказ оборудования управления и обработки в третьем канале и т.д. На фоне данных отказов допустимы отказы по любому каналу оборудования вывода.

Кроме одиночных парируемых отказов анализируются виды и последствия множественных непарируемых отказов, а также меры по оперативному восстановлению работоспособности СУ-САЗ.

Например, СУ-САЗ не парирует следующие виды множественных отказов:

отказы измерительных преобразователей СУ-САЗ – «удаленному» восстановлению из бункера управления не подлежат. *Отказы диагностируются.* Если одиночный отказ происходит до начала работ по циклограмме испытания и имеется возможность прохода на стенд, то отказавшее оборудование может быть заменено в течение 1 ч. Последствия множественных отказов преобразователей во время автоматического исполнения циклограммы «Пуска» определяются логикой программы САЗ, имеющей приоритет невыдачи «ложного» АД. То есть в случае аварийной ситуации решение об аварийном останове принимается ведущим по испытанию нажатием кнопки «ручного» АД;

множественные отказы в каналах ввода дискретной информации, по которым осуществляется контроль состояния сигнализаторов давления, а также кнопки «ручного» АД приводят к «ложному» формированию либо неформированию соответствующих признаков АД.

В случае отказа одного из трех контроллеров СУ-САЗ переходит на одноканальный режим работы. Возможность восстановления СУ-САЗ до штатной конфигурации определяется допустимостью временного выключения (до 30 мин) включенных на данный момент ЭПК и алгоритмов, а также наличием в циклограмме заранее предусмотренных средств для ее установки к требуемому этапу работы. В случае если первый отказ не был устранен и испытания были продолжены, последующий (второй) отказ в ведущем канале СУ-САЗ

во время исполнения циклограммы «Пуска» эквивалентен сбросу алгоритмов и снятию питания ЭПК.

*Одиночные отказы каналов БПИ и выходных модулей парируются, но не диагностируются.* Двойной отказ каналов БПИ и выходных модулей приводит к невыдаче управляющих сигналов. Данная ситуация *диагностируется*. Последствия работы в таких условиях непредсказуемы. Необходимо принятие решения о прекращении испытания.

*Отказ основной ЛВС диагностируется и парируется.* В случае отказов оборудования ЛВС, находящегося в бункере управления, возможно их восстановление в течение ~30 мин. Если отказ оборудования ЛВС, находящегося на стенде, происходит до начала работ по циклограмме испытания и имеется возможность прохода на стенд, то функции ЛВС могут быть восстановлены в течение 1 ч. Множественные отказы оборудования основной и резервной сети ЛВС приводят к потере операторского управления.

Для профилактики множественных непарируемых отказов комплекс эксплуатационных и технологических мероприятий по подготовке СУ-САЗ к испытаниям должен обеспечивать полную исправность системы на момент запуска штатной циклограммы, что делает практически маловероятным появление множественных непарируемых отказов аппаратуры СУ-САЗ в процессе автоматической работы.

**Анализ видов, последствий технологических отказов и их предупреждение.** К технологическим относятся следующие виды отказов:

1. *Ошибка персонала при запуске ПМО СУ-САЗ.* Методы контроля – контроль версии ПМО управляющего контроллера. Код версии должен быть доступен для визуального контроля на пульте оператора СУ-САЗ. Загрузка управляющего контроллера осуществляется из рабочего каталога с последней и единственной версией. *Непреднамеренный запуск СУ-САЗ с иной версией должен быть исключен.* Тем не менее, для повышения технологической дисциплины в части контроля версий предлагается:

производить запись в формуляр СУ-САЗ не только окончательных, но и промежуточных версий ПМО начиная с этапа комплексных проверок с указанием причины изменения версии;

после этапа комплексных проверок изменение версий ПМО СУ-САЗ с записью в формуляре производить по согласованным участниками кооперации техническим решениям.

2. Ошибки в исходных данных алгоритмов СУ-САЗ. Учитывая особую важность операции контроля исходных данных, применяют следующие мероприятия, исключающие подобный вид технологических отказов:

для обеспечения контроля ввода исходных данных файлы, содержащие эти данные, в распечатанном виде согласовываются с участниками кооперации с отметкой в деле испытания и бортжурнале СУ-САЗ;

обеспечивается визуальный контроль введенных исходных данных на пультах операторов СУ-САЗ;

в качестве дополнительной меры на этапах автономных и комплексных проверок в дополнение к имитационным предусматриваются физические проверки формирования признаков АВД путем задания статических уровней сигналов в *электрических величинах* (значения которых согласованы с участниками кооперации) с помощью генератора, магазина сопротивлений и т.п.

**Оценка надежности СУ-САЗ.** Оценка надежности автоматизированных систем производится для реализуемых системой функций. Отказом функции СУ-САЗ при оценке надежности необходимо считать невыполнение хотя бы одной из следующих функций, определенных требованиями технического задания: автоматического управления и аварийной защиты; операторского («ручного») управления; информационных.

Отказами функций системы являются:

для функций автоматического управления и аварийной защиты – отсутствие формирования управляющих воздействий по любой из функций, реализующих циклограмму испытаний, алгоритмы управления и аварийной защиты;

для операторских функций – прекращение выдачи команд «ручного» управления от оперативного персонала (отказ операторского интерфейса);

для информационных функций – отсутствие сбора, обработки, передачи, регистрации и оперативного отображения информации.

Для расчета надежности систем управления и аварийной защиты при стендовых испытаниях ЖРД и ДУ приняты следующие допущения и предположения:

состояние системы по всем выполняемым функциям однозначно определяется набором состояний всех ее элементов. Под элементами понимаются модули и блоки системы. Для каждого элемента оборудования задана в качестве показателя надежности его наработка на отказ –  $T_0$ ;

блоки и модули системы и система в целом по каждой из выполняемых функций имеют два возможных состояния: работоспособен и неработоспособен;

отдельные элементы системы в надежности смысле взаимонезависимы;

длительность непрерывной работы системы определяется временем испытания  $T_n$ . Длительность стендового испытания ЖРД и ДУ принята равной 72 ч;

к моменту начала испытания система, включая программное обеспечение, находится в полностью работоспособном состоянии, подтвержденном предшествующими испытаниями автономными и комплексными проверками; метрологические характеристики измерительных преобразователей соответствуют проектным значениям;

*возможность восстановления элемента системы (модуля, блока и т.п.) после его отказа не предусматривается (данное допущение является предельным, в реальности восстановление после отказа элемента системы производится в зависимости от фазы испытаний и возможности доступа к нему).*

Расчет надежности выполняется следующим образом. Формируется таблица исходных данных с перечнем элементов структурной схемы надежности (СШ) и их наработкой на отказ. Составляются СШ для каждой из оцениваемых на надежность функций системы. Резервированные структуры сводятся к эквивалентным, соединенным последовательно. Последовательные элементы, приводятся к одному элементу.

Общая схема расчетов:

1. Для каждого элемента определяется интенсивность отказов:

$$\lambda = 1 / T_0.$$

2. Последовательные однотипные элементы сводятся к одному с интенсивностью отказов  $s$  определяемой, по формуле

$$\lambda_s = n\lambda.$$

3. Последовательные разнотипные элементы с интенсивностями отказов  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$  сводятся к элементу с интенсивностью отказов

$$\lambda_k = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_m.$$

4. Параллельные структуры СШ, состоящие из двух разнотипных элементов с интенсивностями отказов  $\lambda_1, \lambda_2$ , сводятся к элементу с интенсивностью отказов

$$\lambda = 2\lambda_1\lambda_2T_n.$$

5. В результате выполненных упрощений СШ будет представлять последовательное соединение структур МооN (M out of N). Для каждой из структур рассчитывается средняя вероятность отказа на интервале  $[0, T_n]$ :

$$Q_{cp} = C_N^{N-M+1} (\lambda T_n)^{N-M+1} / (N - M + 2).$$

В частности, для систем типа 1оо1, 1оо2, 2оо3 используются соотношения

$$Q_{cp}^{1оо1} = \frac{1}{2} \lambda T_n;$$

$$Q_{cp}^{1оо2} = \frac{1}{3} (\lambda T_n)^2;$$

$$Q_{cp}^{2оо3} = (\lambda T_n)^2;$$

6. Результирующая вероятность отказа системы на интервале  $[0, T_n]$  рассчитывается по формуле

$$Q_{cp} = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - Q_i).$$

7. Результирующая вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле

$$P = 1 - Q_{cp}.$$

8. В качестве дополнительного показателя может быть приведена средняя интенсивность отказов на интервале  $[0, T_{и}]$ :

$$\lambda_{\text{ср}} = 2Q_{\text{ср}} / T_{и}.$$

Исходные данные по наработке на отказ на элементы оборудования ИУС-САЗ (экспертная оценка) содержатся в табл. 3.4, а структурные схемы надежности функций ИУС-САЗ приведены на рис. 3.29.

Таблица 3.4

### Экспертная оценка наработки на отказ оборудования ИУС-САЗ

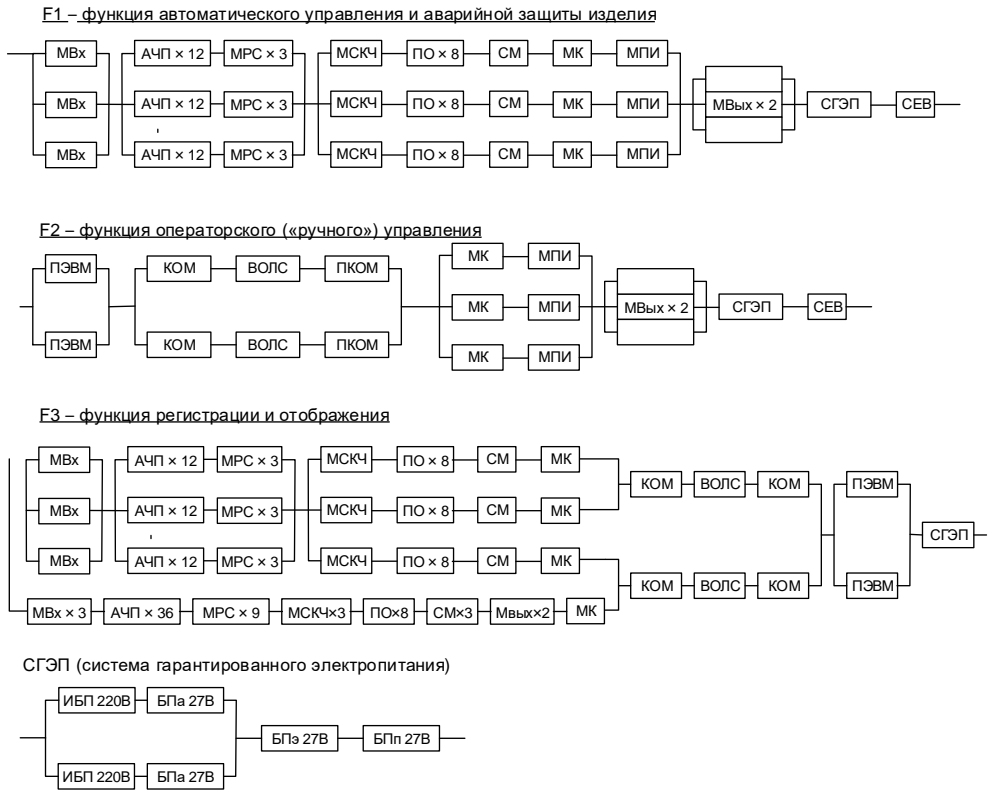
Оборудование	Обозначение	T <sub>0</sub> , ч	T <sub>и</sub> , ч
<b>Система гарантированного электропитания (СГЭП)</b>			
Источник бесперебойного питания (ИБП) ~220 В	ИБП220В	120 000	72
Источник питания ЭПК 27 В	БПп27В	120 000	72
Источник питания ПП 27 В	БПэ27В	120 000	8
Источник питания автоматики 27 В	БПа27В	120 000	72
<b>Средства операторского управления, отображения и регистрации</b>			
Волоконно-оптическая линия связи с преобразователями Тх/Фх и Фх/Тх	ВОЛС	80 000	72
Коммутатор Ethernet	КОМ	80 000	72
Промышленный коммутатор Ethernet	ПКОМ	120 000	72
ПЭВМ	ПЭВМ	40 000	72
<b>Средства синхронизации и обеспечения единого времени</b>			
Сервер точного времени GPS / ГЛОНАСС М600	СЕВ	120 000	72
<b>Контроллерное оборудование</b>			
Контроллер СИКОН-М	МК	60 000	72
Модуль частотного ввода	МСКЧ	60 000	72
Модуль преобразования интерфейсов SW-RS485	МПИ	60 000	72
<b>Аналоговый ввод</b>			
Аналого-частотный преобразователь сигналов датчиков температуры и давления	АЧП	40 000	72
Модуль размножения сигналов	МРС	80 000	72
Связной модуль	СМ	120 000	72
Преобразователь сигналов датчиков чисел оборотов	ПО	40 000	72
<b>Дискретный ввод/вывод</b>			
Модуль дискретного ввода 32-канальный	Мвх	60 000	72
Модуль вывода троированный 32-канальный	Мвых	60 000	72

В результате проектное значение надежности аппаратной части системы СУ-САЗ по функции управления и аварийной защиты F1 составило ~ 0,998. По функциям операторского управления F2, а также регистрации и отображения F3 проектное значение надежности не менее 0,99.

Результирующая вероятность безотказной работы СУ-САЗ рассчитывается следующим образом:

$$P = P_{\text{САЗ}} P_{\text{в.р.}} P_{\text{б.р.}} P_{\text{л.с.}},$$





**Рис. 3.29. Структурная блок-схема надежности функций СУ-САЗ**

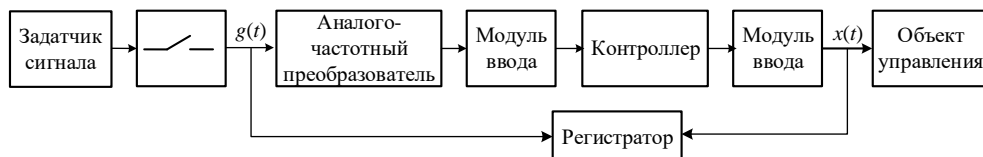
где  $P_{САЗ}$  – вероятность безотказной работы аппаратуры;  $P_{в.р}$  – вероятность реализации требуемого времени реакции;  $P_{б.р}$  – вероятность безаварийной работы двигателя, реализуемая специальным программно-алгоритмическим обеспечением САЗ;  $P_{л.с}$  – вероятность невыдачи ложного сигнала АВД, реализуемая специальным программно-алгоритмическим обеспечением САЗ.

Так, например, в ходе более 150 огневых стендовых испытаний ЖРД РД-0124, разработчиком которого является ОАО «КБХА», показатели надежности специального программно-алгоритмического обеспечения аварийной защиты были доведены до  $P_{б.р} = 0,98$  и  $P_{л.с} = 0,9995$  [12].

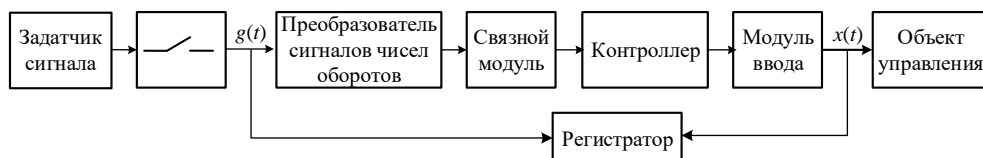
**Экспериментальное определение времени реакции СУ-САЗ по параметрам аварийной защиты ЖРД.** Одним из важнейших критериев надежности систем аварийной защиты двигателей является время реакции каналов СУ-САЗ на изменения значений контролируемых параметров. Быстродействие каналов приема, обработки информации и скорость принятия решения определяют коэффициент охвата отказов ЖРД системой аварийных ситуаций

и, следовательно, эффективность СУ-САЗ как инструмента диагностирования состояния двигателя во время его работы. Заданное на этапе проектирования время реакции системы обеспечивается как самим алгоритмом аварийной защиты, так и системными программно-аппаратными средствами, включающими в себя устройства преобразования сигналов с датчиков, контроллерное оборудование и системное программное обеспечение. Подтверждение технических характеристик экспериментальным путем выполняется на стадии автономных испытаний системы перед вводом ее в эксплуатацию. Подобные работы по определению динамических характеристик каналов СУ-САЗ двигателя РД-0124 в составе блока третьей ступени РН «Ангара» и первой ступени РН «Союз-2-1в» проводились при подготовке к ОСИ.

Для определения времени реакции СУ-САЗ была использована следующая методика. Эксперименты по определению характеристик быстродействия СУ-САЗ по каналам контроля давлений и температур проводились по схеме, приведенной на рис. 3.30, по каналам чисел оборотов – по схеме, приведенной на рис. 3.31.



**Рис. 3.30. Схема экспериментального определения времени реакции СУ-САЗ по каналам давлений и температур**



**Рис. 3.31. Схема экспериментального определения времени реакции ИУС-САЗ по каналам сигналов чисел оборотов ТНА**

Особенностью измерительных каналов давления и температуры является использование в них аналого-частотных преобразователей (АЧП), имеющих в своем составе инерционные звенья, оказывающие существенное влияние на быстродействие.

Особенностью измерительных каналов чисел оборотов является использование в них микропроцессорного преобразователя (ПО), осуществляющего оцифровку входного сигнала с частотой 64 кГц с последующими обработкой по алгоритму вольт-секундной площади и передачей результирующего значения в контроллер через связной модуль по интерфейсу CANbus.

Целью экспериментов являлось определение динамических характеристик каждого типа преобразователей и времени реакции системы аварийной защиты по каждому типу контролируемых параметров. Временные характеристики определялись методом исследования кривой переходной характеристики, т.е. реакции системы на воздействие единичной ступенчатой функции.

В качестве задатчиков сигнала использовались резисторы (эквивалент потенциометрического датчика давления), источник напряжения (эквивалент термопары), генератор синусоидального сигнала (эквивалент сигнала датчика числа оборотов), реле (эквивалент сигнализатора давления). В качестве исполнительного элемента использовался предохранитель – эквивалент пироклапана (ПК).

В основу программы контроля был заложен алгоритм, при котором на имитатор пироклапана выдавалась команда при однократном превышении параметром порогового уровня (уставки). Сигналы с имитатора на входах преобразователей формировались одновременно с сигналом «Старт», регистрируемым совместно с сигналом датчика Холла, пропорциональным току через имитатор ПК, с частотой 16 кГц ( $x(t)$ ). Для статистики проверки проводились по три раза.

Регистрация сигнала «Старт», значений входного сигнала с имитатора  $g(t)$ , команды  $x(t)$  на исполнительный элемент объекта управления осуществлялась с частотой 16 000 измерений в секунду.

На рис. 3.32 приведен пример временной диаграммы цикла СУ-САЗ, необходимой для пояснения полученных результатов.

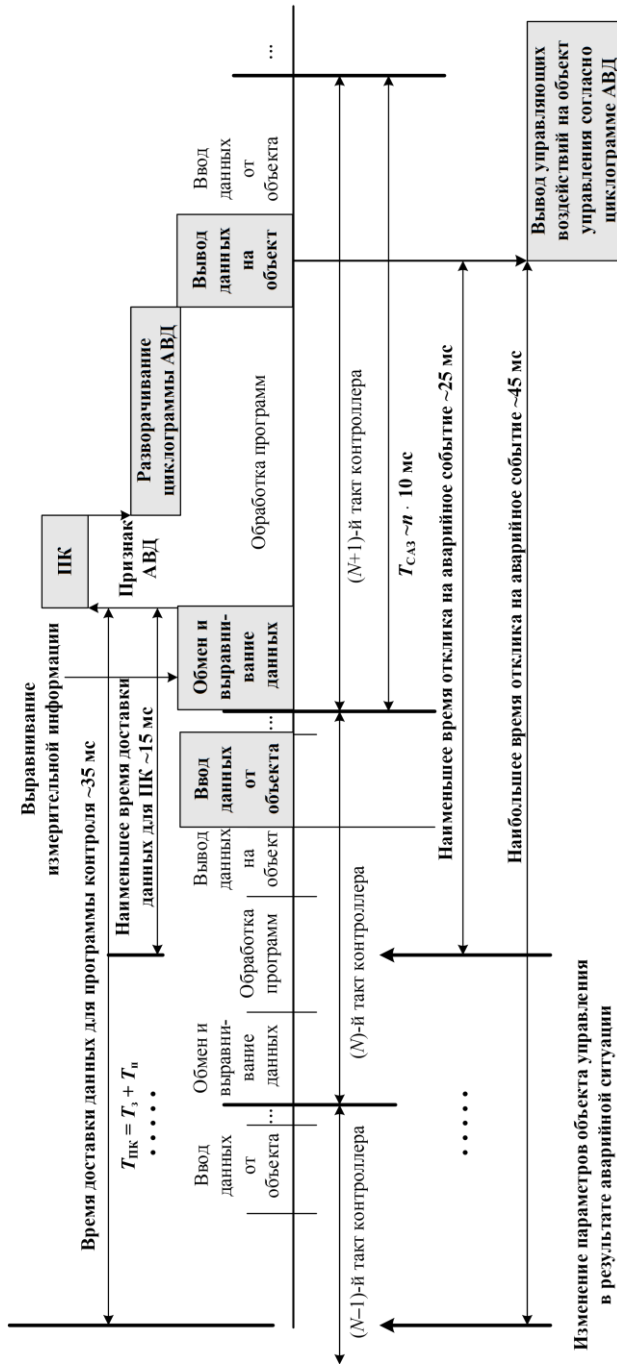
Время реакции (отклика) на аварийное событие вычисляется как

$$T_p \sim T_3 + T_n + T_{САЗ},$$

где:  $T_3 \sim 0 \dots 10$  мс – задержка в канале измерения, вызванная асинхронностью такта контроллера и оборудования ввода;  $T_n = \tau + T_m$  – время преобразования сигнала, учитывающее постоянную времени преобразователя  $\tau$  и задержку  $T_m$ , вносимую модулем ввода данных в контроллер;  $T_{САЗ} = n \cdot 10$  мс – время работы алгоритма контроля,  $n$  – число тактов контроллера.

Для экспериментального определения постоянной времени преобразования  $\tau$  использовалась следующая методика:

1. При имитации «скачка» использовался сигнал амплитудой, равной полному диапазону (100 %) изменения параметра.
2. Имитация производилась как на увеличение (прямой ход), так и на уменьшение (обратный ход) параметра.
3. Как для прямого, так и для обратного хода было проведено по четыре группы экспериментов со следующими значениями аварийной уставки относительно диапазона «скачка»: 40 % ( $\tau/2$ ), 63 % ( $\tau$ ), 87 % ( $2\tau$ ), 95 % ( $3\tau$ ).



$T_r \sim T_s + T_n + T_{САЗ}$  – время реакции (отклика) на аварийное событие;

$T_s \sim 0...10$  мс – транспортная задержка в канале измерения, вызванная асинхронностью такта контроллера и оборудования ввода данных от преобразователей сигналов;

$T_n \sim 15...25$  мс – время преобразования сигнала, учитывающее постоянную времени преобразователей сигналов датчиков давления (15 мс), температуры (5 мс), числа оборотов (10 мс), конечных выключателей (1...5 мс);

$T_{САЗ} = n \cdot 10$  мс – время работы алгоритма контроля, где  $n$  требуемое для работы число тактов контроллера

Рис. 3.32. Временная диаграмма цикла СУ-СА3 по медленноменяющимся параметрам (давлению, температуре, чисел оборотов, конечным выключателям)

Полученные значения постоянных времени преобразователей сигналов  $\tau$  с учетом статистики экспериментов составили:

- по каналам температурных параметров – 3...5 мс;
- по каналам параметров давлений – 13...15 мс;
- по каналам параметров чисел оборотов – 10...15 мс;
- по каналам дискретных параметров – 1...5 мс;

Данные эксперименты подтверждают параметры аналоговых фильтров АЧП соответствующих типов.

«Транспортное» запаздывание  $T_{ПК} = T_3 + T_n$ , определенное как запаздывание во времени начала изменения параметра на входе в программу контроля ПК от момента изменения входной величины (выходного сигнала датчика) до уровня превышения границы уставки (выходного сигнала датчика), составило от 15 до 30 мс.

Суммарное время реакции системы на отклонения параметров за допустимый диапазон (аварийную ситуацию)  $T_p$  составило от 25 до 45 мс.

**Системы контроля и диагностики верхнего уровня (СКДО).** До недавнего времени задачи измерения, дискретного управления, регулирования и аварийной защиты для испытаний изделий РКТ решались самостоятельно в соответствии с принятой в отрасли организацией управления, разработки и производства. В последнее десятилетие наметилась тенденция к их интеграции. Этому способствует, в частности, развитие электронной техники, методов технической диагностики и аварийной защиты изделий, анализа нештатных ситуаций программными средствами экспертных систем.

В данных методах используется все больше измеряемых параметров изделий РКТ, оборудования испытательных стендов и сигналов управления ими. Поэтому переход к интегрированным стендовым информационно-измерительным и управляющим системам (ИИУС), реализующим в единой идеологии функции управления, измерения, диагностики и аварийной защиты, является вполне закономерным. Актуальность интеграции также связана с возможностью повышения качества испытаний (надежности, оперативности и информативности) и снижения затрат на их проведение.

В зависимости от задач испытаний и требований надежности интеграция ИИС и ИУС осуществляется различными способами. Наиболее часто это происходит на «нижнем» уровне, когда ИИС и ИУС обмениваются сигналами между входными и выходными модулями. Как правило, в качестве обменных команд используются сигналы «Старт», сигналы временной синхронизации, сигналы групповых команд циклограммы, сигналы регистрации токов ЭПК, пиропатронов (ПП) и т.п.

Вариант полной интеграции задач измерения и управления параметрами стенда и изделия реализуется на базе единой аппаратной платформы. В качестве примера можно привести систему управления и аварийной защиты (СУ-САЗ) третьих ступеней ракет-носителей «Союз-2» и «Ангара».

Совмещение на одной аппаратной платформе средств реализации задач измерения, управления и аварийной защиты в системах СУ-САЗ для стендовых испытаний РН «Союз-2» и «Ангара» обеспечило существенное сокращение времени реакции на аварийную ситуацию, а также возможность использования измерительной информации для решения задач регулирования.

Другим вариантом интеграции ИИС и ИУС является объединение информационных потоков на «верхнем» уровне – локальных вычислительных сетей. Примером такой интеграции является система контроля, диагностики и отображения хода испытаний (СКДО), сыгравшая значительную роль в обеспечении эффективности стендовых испытаний РН «Ангара» [9, 10].

В соответствии с классической моделью управление технологическим процессом при стендовых испытаниях изделий РКТ представляет собой иерархическую систему, состоящую из следующих уровней [3]:

уровня поля (Field), включающего в себя датчики и исполнительные элементы объекта автоматизации (электропневмоклапаны, приводы дросселей, нагреватели и т.п.);

уровня автоматизированных систем управления технологическим процессом (Process Control), обеспечивающего базовые алгоритмы управления и аварийной защиты;

уровня усовершенствованного управления процессом (Advanced Process Control – APC), использующего технологии моделирования и оптимизации;

уровня управления производством (Manufacturing Execution System – MES);

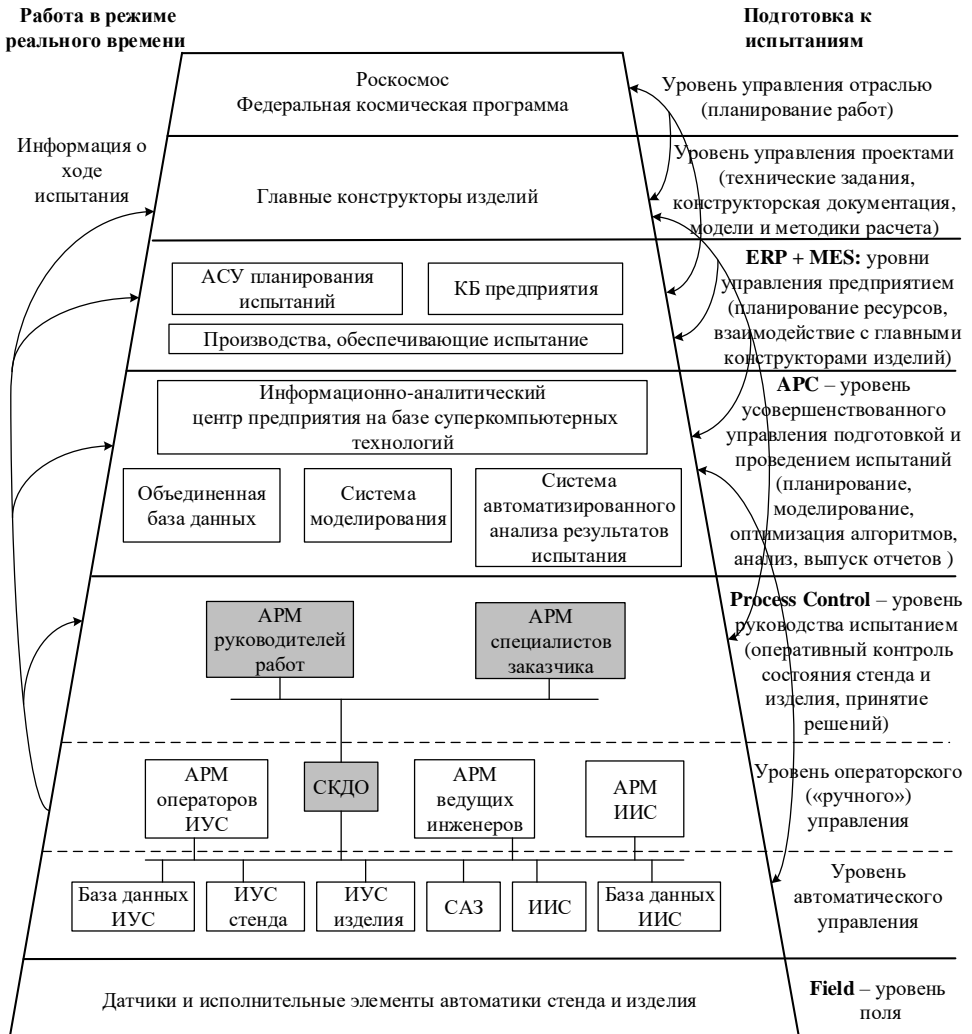
уровня управления предприятием (Enterprise Resource Planning – ERP).

В настоящее время применительно к стендовым системам управления, обеспечивающим испытания изделий РКТ, модель управления подготовкой и проведением испытаний представляется в виде структуры, показанной на рис. 3.33. На рисунке серым тоном выделены системы автоматизации испытаний. Видно, что это в основном системы «нижнего» уровня.

На уровне управления технологическим процессом (Process Control), как правило, имеется разделение систем автоматизации на информационно-управляющие системы, обеспечивающие собственно технологический процесс, и телеметрические информационно-измерительные системы, осуществляющие сбор информации от датчиков стенда и изделия. Такое разделение обусловлено различными требованиями по информативности систем, отличающимися, по меньшей мере, на порядок. Например, если информативность ИУС, работающих с единым циклом 10 мс, может составлять десятки тысяч измерений в секунду, то информативность ИИС – от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов измерений в секунду.

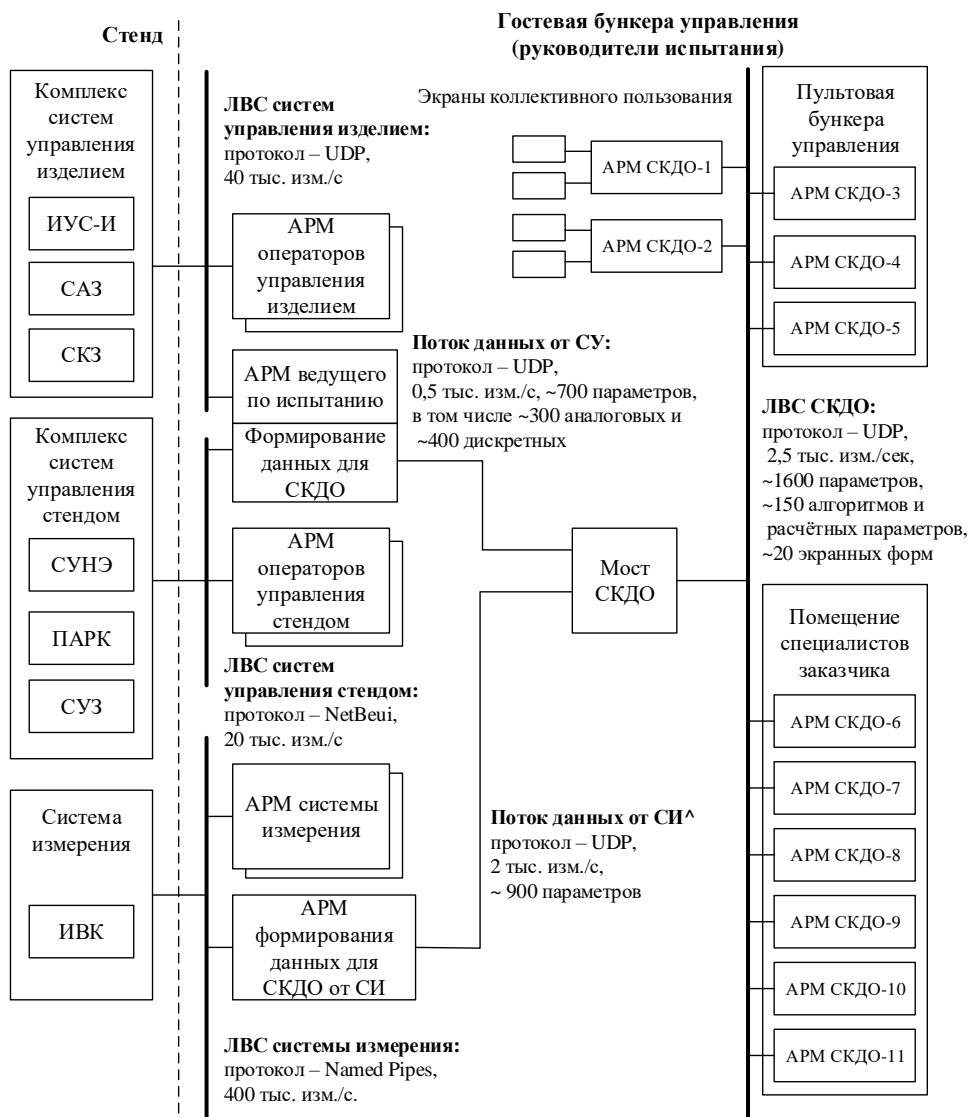
Для создания единого информационного поля используются системы, объединяющие измерительные потоки низовых подсистем. На схеме, приведенной на рис. 3.32, в качестве такого интегратора показана система контроля, диагностики и оперативного отображения. СКДО представляет собой

комплекс программно-аппаратных средств, обеспечивающий обработку и визуальное отображение информации о состоянии стенда и изделия в удобной для принятия решений форме. При этом СКДО оперирует с интегрированной информацией, получаемой от комплексов систем управления стенда (ИУС-С), систем управления изделием (ИУС-И) и системы измерения (СИ).



**Рис. 3.33. Иерархия уровней управления испытаниями изделий РКТ в Научно-испытательном центре ракетно-космической промышленности**

Структурная схема системы и ее основные технические характеристики (число параметров и экранных форм, информативность потоков данных) приведены на рис. 3.34.



**Рис. 3.34. Структурная схема системы контроля, диагностики и отображения для стендовых испытаний ступеней РН «Ангара»:**

СКЗ – система контроля заправки; СУНЭ – система управления научным экспериментом; ПАРК – подсистема аналогового регулирования и контроля; СУЗ – система управления заправкой; ИВК – информационно-вычислительный комплекс

СКДО реализована как система верхнего уровня, не оказывающая непосредственного влияния на работу стендовых систем управления и измерения.



Интегратор информационных потоков (мост) и автоматизированные рабочие места (АРМ) СКДО реализованы на стандартных персональных компьютерах, объединенных ЛВС Ethernet.

Благодаря объединению информационных потоков ИУС-С, ИУС-И, СИ в СКДО появилась возможность отображать на экранах рабочих терминалов системы значений любых измеренных и расчетных параметров с использованием математических операций и логических алгоритмов, с учетом этапа испытаний и состояния исполнительных элементов изделия и стенда в режиме реального времени. АРМ СКДО универсальны с точки зрения эксплуатации, т.е. на любом терминале может быть организовано рабочее место любого специалиста. Состав и структура отображаемой информации задаются экранными формами согласно техническому заданию на конкретное испытание. Специалистам предоставлена возможность получения справочной информации о любом параметре (назначение параметра, тип датчика, диапазон измерения) из базы данных (БД). Представление об экранных формах СКДО можно получить из рис. 3.35.

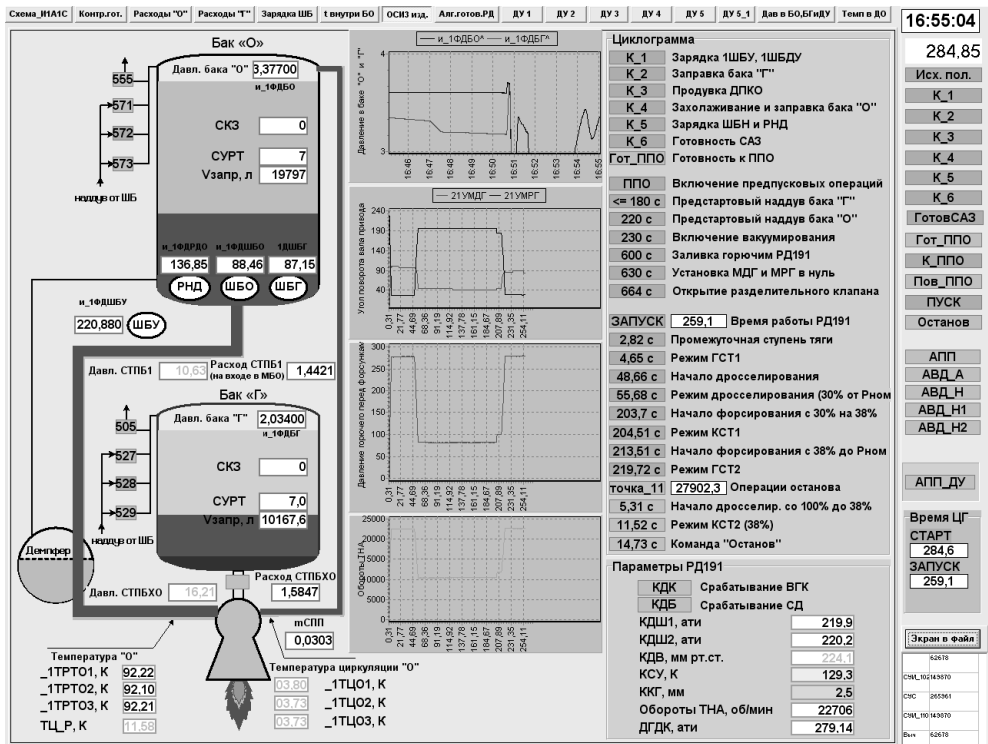


Рис. 3.35. Внешний вид мнемосхемы изделия

Структурная схема программного обеспечения СКДО приведена на рис. 3.36. В состав программного обеспечения СКДО входят: программы передачи данных от отдельных систем в сеть СКДО; программа формирования объединенного потока данных; программы отображения информации на АРМ СКДО.

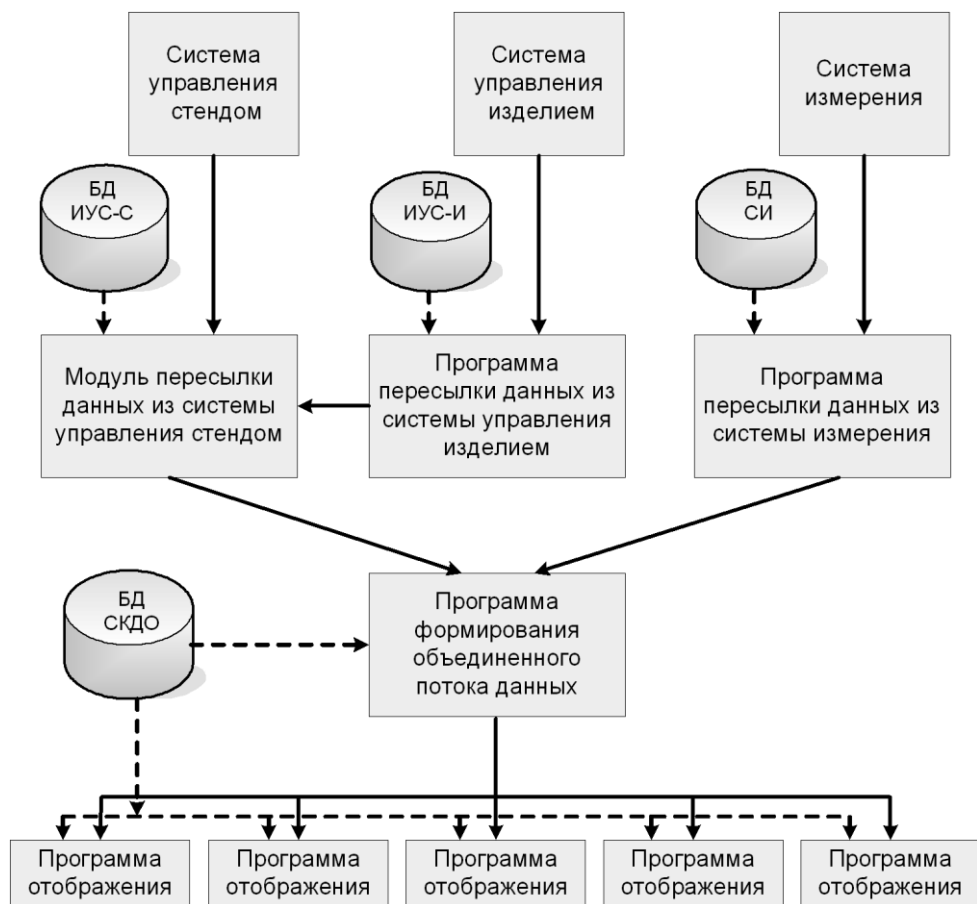


Рис. 3.36. Структура программного обеспечения СКДО

Для объединения информационных потоков требуются унификация протоколов передачи данных и фильтрация информации с целью устранить ее избыточность. Таким протоколом для СКДО был принят протокол UDP. Хотя UDP не обеспечивает надежную доставку сообщений – в случае каких-либо сбоев посланный пакет будет потерян, но за счет отсутствия контроля соединения, как в более надежном протоколе TCP, достигаются существенно более высокие скорость передачи данных и пропускная способность системы в це-

лом. Это немаловажно в условиях того объема информации, с которым работает СКДО. Данное решение является общепринятым для систем, функционирующих в режиме реального времени.

При наличии доступа в интернет возможности СКДО могут быть расширены путем распространения информационного поля о состоянии технологического процесса на вышестоящие уровни иерархии управления испытаниями изделий РКТ (см. рис. 3.33).

Сама по себе постановка задачи использования интернет-технологий на корпоративном уровне и для удаленного доступа к информации технологических процессов не является новой. Имеется ряд преимуществ, которыми обладают данные решения:

- вся логика приложения сосредоточена на стороне сервера;

- в качестве клиентской части используется стандартный веб-браузер, соответственно, отпадают расходы на установку и сопровождение клиентского программного обеспечения;

- на клиентской стороне может использоваться любая платформа (персональный компьютер, ноутбук, планшет, смартфон и т.д.) под управлением различных операционных систем.

Для доступа к СКДО через интернет используются принципы работы web-сервисов. Основными компонентами web-сервисов являются:

- сервер (программа, которая обрабатывает запросы, выполняет действия с данными и отправляет ответы клиенту);

- клиент (программа, которая отправляет запросы на сервер и интерпретирует полученные ответы);

- сетевые протоколы (к примеру, HTTP);

- сеть (физический уровень передачи данных).

Взаимодействие компонентов web-сервисов показано на рис. 3.37. Программа-клиент посылает запрос удаленному серверу, который обрабатывает запрос и отправляет клиенту ответ. В свою очередь, клиент обрабатывает ответ и отображает данные пользователю.

При разработке сервисов применяются понятия тонкого и толстого клиента. Тонкий клиент – программа, которая переносит большую часть задач по обработке информации на сторону сервера (пример – браузер), в то время как толстый клиент сам выполняет обработку данных. В случае СКДО ставилась задача обеспечить работу удаленных пользователей без установки специального программного обеспечения. Таким образом, при разработке различных реализаций использовалась концепция тонкого клиента.

Для работы системы удаленного контроля, диагностики и отображения хода испытаний необходим отдельный компьютер, подключенный к сети интернет и локальной сети СКДО. Программа получает данные по протоколу UDP от СКДО, обрабатывает их и формирует HTML/JavaScript-код. Web-сер-

вер, встроенный в программу, передает этот код по протоколу HTTP в интернет (рис. 3.38). Пользователь, пройдя процедуру верификации, может получить оперативный доступ к информации о ходе испытаний. Для обеспечения безопасности испытаний удаленные пользователи могут только просматривать информацию и не могут повлиять на проведение испытаний.

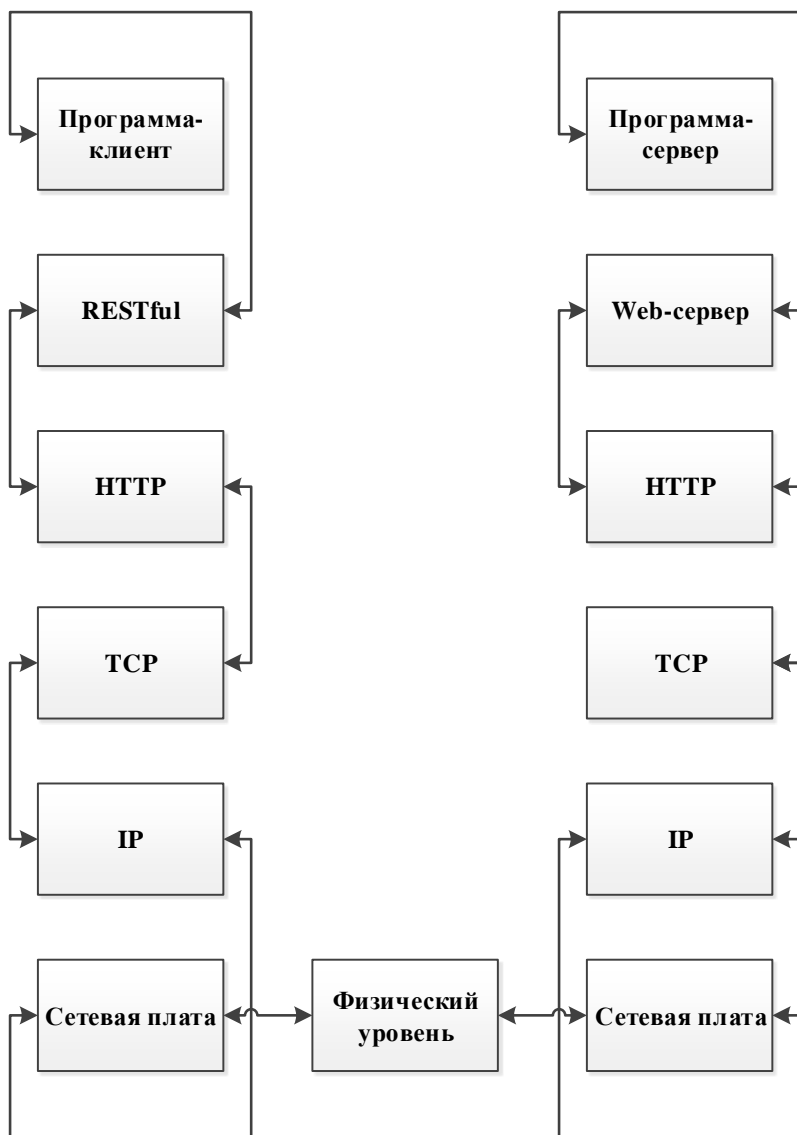
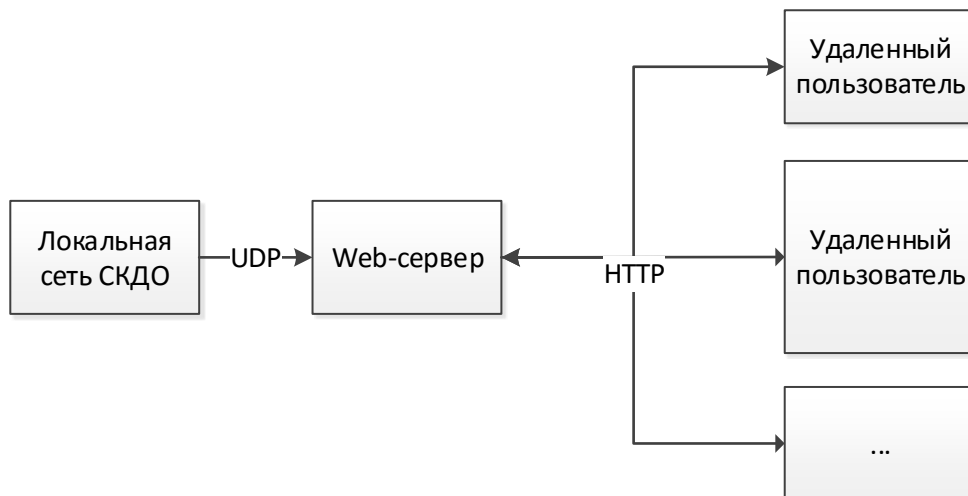
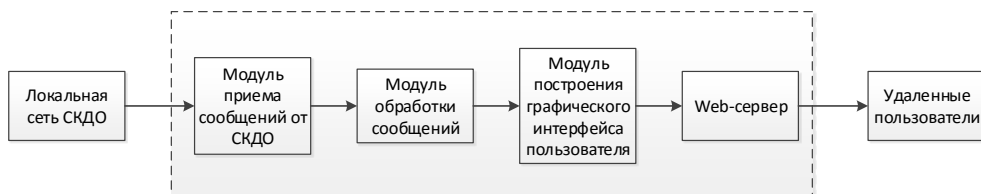


Рис. 3.37. Взаимодействие компонентов web-сервисов



**Рис. 3.38.** Схема работы системы удаленного контроля, диагностики и отображения хода испытаний

Структурная схема программного обеспечения web-сервера показана на рис. 3.39. Программное обеспечение состоит из следующих основных модулей:



**Рис. 3.39.** Структурная схема программного обеспечения web-сервера

модуля приема сообщений от СКДО, который принимает по протоколу UDP объединенный поток данных от СКДО, формируемый из сообщений от ИУС-С, ИУС-И и СИ;

модуля обработки сообщений, который распознает полученные данные и обновляет значения соответствующих параметров во внутренней базе данных программы;

модуля построения графического интерфейса пользователя, который служит для визуализации параметров из базы данных в форме графиков и мнемосхем.

Полученный интерфейс передается по протоколу HTTP удаленным пользователям.

Надо отметить, что изложенные выше решения по организации удаленного доступа к параметрам технологического процесса в ходе подготовки и

проведения испытаний в режиме реального времени через интернет не являются единственными. В настоящее время разработано большое количество программных средств для передачи изображения рабочего стола на удаленные компьютеры в режиме реального времени. Особенно большое распространение подобные системы приобрели при проведении конференций, вебинаров, презентаций и для удаленной поддержки пользователей.

Недостатком средств удаленного доступа является необходимость установки специального программного обеспечения на компьютер клиента или запуск специальных сервисов (например, Remote Desktop Connection в Windows). Однако некоторые сервисы (например, TeamViewer) позволяют получить доступ к удаленному компьютеру непосредственно через браузер клиента (с помощью технологии AdobeFlash). Для этого пользователю необходимо зарегистрироваться на сайте TeamViewer ([www.teamviewer.com](http://www.teamviewer.com)), войти под своей учетной записью и указать ID компьютера, к которому надо подключиться. На компьютере СКДО в этом случае должна быть установлена программа TeamViewer.

В отличие от технологий описанных выше web-сервисов данная технология отправляет удаленным пользователям непосредственно изображение рабочего стола, а не HTML/JavaScript-код, интерпретируемый браузером. Это приводит к возникновению большого потока данных, а следовательно, к увеличению требований к пропускным способностям каналов связи. В то же время TeamViewer использует облачные вычисления и технологии сжатия видеопотока для обеспечения приемлемой скорости соединения.

Как и при кодировании видеопотока, TeamViewer сжимает не все изображение рабочего стола, а только изменение положений пикселей или групп пикселей. Можно отметить следующие основные факторы, влияющие на частоту обновления изображения удаленного экрана:

- разрешение экрана (при большом разрешении или наличии нескольких мониторов скорость резко снижается);

- число цветов (при выставлении 8- или 16-битной цветовой палитры скорость увеличивается);

- наличие резко меняющихся кадров, при котором скорость снижается (кодек кодирует изменения между кадрами);

- число подключенных к трансляции пользователей.

### Список литературы к главе 3

1. **Испытательные** комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей, двигательных установок и их систем / А.Г. Галеев, К.П. Денисов, В.И. Ищенко, В.А. Лисейкин, Г.Г. Сайдов, А.Ю. Черкашин; под ред. Н.Ф.Моисеева/ М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2012.
2. **Кучкин В.Н., Кучкин К.В., Сайдов Г.Г.** Теоретические основы разработки испытательного оборудования для ракетно-космической техники / под ред. Г.Г. Сайдова М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2014.
3. **Информационно-управляющие** системы для стендовых испытаний ЖРД и двигательных установок / В.А. Лисейкин, В.В. Милютин, Г.Г. Сайдов, И.А. Тожокин. М.: Машиностроение/Машиностроение-Полет, 2012.
4. **Теоретические** основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб. пособие. М.: Логос, 2003.
5. **Бизяев Р.В.** Системная технология диагностирования стендовых изделий РКТ. М.: Изд-во МАИ, 1997.
6. **Недайвода А.К.** Технологические основы обеспечения качества ракетно-космической техники. М.: Машиностроение, 1998.
7. **Обеспечение** проверки бортовых средств системы управления при подготовке к стендовым испытаниям ступеней ракет-носителей / И.А. Тожокин, В.А. Лисейкин, В.В. Милютин, О.А. Волнухин // Сб. материалов II Всероссийской науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» II Козловские чтения; под общ. ред. А.Н. Кирилина. Самара, Сам НЦ РАН. 2011.
8. **Нейлор К.** Как построить свою экспертную систему: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. **Информационно-управляющая** система для стендовых испытаний РН «Ангара» / В.А. Лисейкин, В.В. Милютин, И.А. Тожокин и др. // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2009. Спец. вып.
10. **Система** контроля, диагностики и отображения информации для стендовых испытаний РН «Ангара» / А.В. Абросимов, Р.В. Бизяев, В.А. Лисейкин и др. // Науч. труды «Вестник МАТИ». 2013. №20.
11. **Ломако Е.И.** Математические и понятийные средства системантики. М.: Системная энциклопедия, 2008.
12. **Григорьев Ю.А.** Проблемы выбора модели доступа к данным при проектировании информационных систем на основе СУБД // Информационные технологии. 1999. № 5.
13. **Базы данных:** достижения и перспективы на пороге 21-го столетия / под ред. А. Зильбершатца, М. Стоунбрейкера и Д. Ульмана // Системы управления базами данных. 1996. № 3.

14. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006.
15. **Комплексная** автоматизация мониторинга состояния космических средств на основе интеллектуальных информационных технологий / О.В. Майданович, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов // Прил. к журналу «Информационные технологии». 2011. № 10.
16. **Котов В.Е.** Сети Петри. М.: Наука, 1984.
17. **Питерсон Дж.** Теория сетей Петри и моделирование систем / Пер. с англ. М.В. Горбатовой и др.; под ред. В.А. Горбатова. М.: Мир, 1984.
18. **Лисейкин В.А.** К вопросам надежности стендовых систем управления и аварийной защиты при испытаниях ЖРД и ДУ // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2012. №12.
19. **Towards** virtual laboratories: a survey of LabView-based conduction of sciece experimental via the internet with an illustrative consideration of remote control of an oscilloscope / Agumba O. John., Katana G. Gabriel and Karimi M. Patrick // International Journal of Current Research. Vol. 33. Is. 6. P. 123–127, June, 2011.
20. **IntraWeb** Online Documentation, <http://www.atozed.com/intraweb/docs>.