

Сольнищев Р. И.

Лекции
по информационным технологиям
в проектировании и производстве
киберфизических систем.

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

Оглавление

Предисловие.....	3
СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	6
Глава 1. Определения, понятия и примеры киберфизических систем (КФС) как объектов проектирования и производства.....	9
Глава 2. Традиционный процесс проектирования и производства и его цифровизация.....	21
Глава 3. Подготовка предприятия к внедрению информационных технологий	41
Глава 4. Математические модели в обеспечении информационных технологий	66
Глава 5. Методы и алгоритмы в обеспечении информационных технологий	86
Глава 6. Оценки процесса проектирования и производства.....	105
Заключение	124

Предисловие

Предлагаемый курс лекций служит введением применения информационных технологий (ИТ) в проектировании и производстве киберфизических систем (КФС).

КФС объединяют гетерогенные (физически разнородные) объекты управления, измерительно-преобразующие, телекоммуникационные, контролирующие и многие другие подсистемы. Такие КФС как «город», распределённые геоинформационные системы, гибкие производственные системы (ГПС), системы управления «природа-техногенка» (СУПТ), пилотажно-навигационные комплексы, межпланетные космические станции (МКС) становятся объектами проектирования и производства наряду с традиционными объектами промышленности.

Необходимость создания КФС определяется непрерывным процессом развития потребностей общества и производственных сил. Создание КФС невозможно без разработки и применения наиболее подвижной составляющей производственных сил – орудий труда – инструментария проектирования и производства КФС в виде современных информационных технологий (ИТ).

Изготовление опытных образцов КФС с последующими многочисленными испытаниями аналогично традиционным промышленным изменениям либо весьма затруднительно, либо практически невозможно из-за недопустимой затратности материальных и временных ресурсов. Поэтому наибольший вес приобретают предпроектные исследования, начальные и последующие этапы проектирования с построением материальных моделей, математическим моделированием, методами и алгоритмами имитации испытаний КФС и другими составляющими математического обеспечения ИТ КФС.

Инструментарий ИТ проектировщика КФС основывается на математическом обеспечении как на фундаменте. Множество инструментов современных ИТ можно сравнить с прошлыми средствами автоматизации проектирования и производства как **современный супермаркет** с бесчисленными полками, заполненными образцами инструментов ИТ с **небольшим магазином средств САПР, АСУТП и т.п.** – в прошлом.

Однако в этой связи возникает роль выбора из множества широко разрекламированных инструментов ИТ тех, которые подходят для конкретного предприятия, его проектных и производственных процедур.

В создании КФС выбор такого инструментария востребован прежде всего для головного предприятия, определяющего конфигурацию, функциональную и структурную схемы КФС, её декомпозицию на подсистемы (мультиагенты). Ограниченность информации о будущей КФС и высокая затратность по созданию таких систем представляют требования к инструментам ИТ «построение математических моделей», «моделирование», «анализ», «синтез» для получения максимума возможного по желаемым характеристикам создаваемой КФС. Существенное место среди такого инструментария занимают инструменты на основе средств искусственного интеллекта, решающие задачи ранее доступные только человеку, в том числе аналитические вычисления на ЭВМ, эвристические методы, а также реализацию отдельных звеньев КФС рассмотренных в предлагаемом курсе лекций.

Предприятия, разрабатывающие подсистемы, отдельные звенья КФС, в основном нуждаются в инструментах ИТ для процедур конструирования, технологической подготовки производства, документооборота.

Ввиду ограниченности рамок в этом курсе лекций не приводится построение базы знаний ИТ КФС и не рассматриваются детально САПР, АСТПП и другие средства ИТ на проектных и производственных процедурах

создания КФС как макромодульной системы из множества отдельных звеньев – датчиков, (сенсоров)-преобразующих устройств, интерфейсных блоков, микропроцессоров, пультов и щитов коммуникаций, подвижных информационно-измерительных модулей и многих других.

Применение ИТ для этих модулей КФС детально рассмотрено в рекомендательной литературе. В данном курсе в качестве некоторой компенсации приводятся сведения по ИТ проектирования и производства подсистем типичных КФС. «Система управления природа-техногеника», (БПА), пилотажно-навигационного комплекса (БЦВМ), гибких производственных систем (ГПС).

Рекомендуемая литература приводится в конце каждой главы также как и контрольные вопросы необходимые для усвоения материала.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

КФС - киберфизическая система (англ. *cyber-physicalsystem*)

CPS - информационно-технологическая концепция, подразумевающая **Интеграцию** вычислительных ресурсов в физические процессы

СУНВГА - система управления нейтрализацией выхлопных газов автомобиля

СУПТ - система управления «природа-техногеника»

Геомониторинг - программно-информационная система для контроля **Мобильных** объектов с использованием навигационного оборудования.

Онтология - общая схема представления и использования знаний в конкретной предметной области

ВВГ - вредные выхлопные газы

M2M - межмашинное взаимодействие

M2I - взаимодействие машины с инфраструктурой

M2N - взаимодействие машины с природой

ГЛОНАСС - глобальная навигационная спутниковая система

САУ - система автоматического управления

DFM - (англ. *Design for Manufacturing*) проектирование для производства IPC - стандарты для разработки, конструирования и производства печатных плат

PCBA (англ. *Printed Circuit Board Assembling*) - монтаж печатной платы

AD - аддитивная технология

SMT (англ. *Surface Mount Technology*) - Технология монтажа на **поверхность** печатных плат

IDEFO (англ. *Icam DEFinition for Function Modeling*) методология функционального **Моделирования**

DFD (англ. *Data flow diagrams*) - диаграммы потоков данных **БЗ** - база знаний **БД** - база данных

SPI - (англ. *solderpasteinspection*) - контроль нанесения паяльной пасты
IT - (англ. *InformationTechnology*) информационные технологии iThink -
программный продукт для моделирования динамики систем, ИП —
инновационный процесс

Индустрия 4.0 - переход на полностью автоматизированное цифровое
Производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме
реального времени

IoT (InternetofThings) - Интернет вещей, вычислительные сети
физиче-ских объектов («вещей»), оснащённых встроенными системами для
взаимо- действия друг с другом или с внешней средой СМ К - система
менеджмента качества

FMEA (англ. *FailureModeandEffectsAnalysis*) - анализ видов и
последствий отказов; методология проведения анализа и выявления наиболее
критических шагов производственных процессов с целью управления
качеством

АСК – автоматизированная система контроля

ЖЦИ – жизненный цикл изделия

САПР – система автоматизации проектирования

АСТПП– автоматизированная система технологической подготовки
производства

ГПС - гибкие производственные системы

АСУ - автоматизированная система управления АСУП -
автоматизированная система управления производством САПУП - система
автоматического проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ

КИС - корпоративные информационные системы

ИМДП - информационная модель дискретного производства

ИМИ - информационная модель изделия

ИМОП - информационная модель объекта проектирования

ИСУП - интегрированная система управления предприятием

АСНИ - автоматизированная система научных исследований

ИППС - интегрированная проектно-производственная система
LCP – Lifecycle Products
CAD - Computer Aided Design
CAM - Computer Aided Manufacturing
CAE - Computer Aided Engineering
DFM - Design for Manufacturing
PDM - Product Data Management
CIM - Computer-integrated Manufacturing
CAMP - Computer Aided Production Manufacturing
KADS - Knowledge Acquisition and Design Support
1KADE - Intelligent Manufacturing Assisted Design Environment
CAPP - Computer Aided Product Planning
CPDM - Collaborative Product Definition Management
РосКосмос – Федеральное космическое агентство
NASA – National Aeronautics and Space Administration
ESA – European Space Agency
CNSA – China National Space Administration

Глава 1. Определения, понятия и примеры киберфизических систем (КФС) как объектов проектирования и производства

Исследование, проектирование и производство КФС представляется в виде многоэтапного процесса, в котором происходит «движение» объекта проектирования и производства от исходных данных до самого изделия.

Дадим основные определения и понятия по КФС как объекта проектирования и производства. **Под КФС будем понимать интеграцию физических, вычислительных и информационных подсистем в единую систему, функционирующую в реальном времени и пространстве.** Исторически понятие КФС возникло от нового направления в науке, - **кибернетики**, - основателем которого считают Н. Винера. В 1948 г. была опубликована книга Н. Винера «Управление и связь в животном и машине», в которой были изложены основные принципы кибернетики как науки:

- принцип обратной связи в технике и живом организме;
- гетерогенность в техногенных и биологических системах;
- подобие процессов динамики и управления в машинах» и «живых организмах»;
- неопределенность в предсказании поведения;
- наличие «связей» - передачи информации между подсистемами.

КФС как техногенные системы возникли во время второй мировой войны в виде инженерных решений задач управления радиолокационными станциями управления артиллерийскими зенитными орудиями, самолетами - снарядами ФАУ-1, ФАУ – 2.

В последующие периоды появились понятия «**сложные системы**» (СС), «**большие системы**» (80-е годы), которые, по существу, распространили принципы «Кибернетики» на инженерные решения в областях аэрокосмической, судостроительной, атомно-энергетической и других

отраслей промышленности, а также на социально-экономические объекты (урбанизация территорий, проектно-производственные процессы т.п.).

В дальнейшем появилось понятие «встроенные системы», как составляющие КФС.

Это понятие раскрывает созданные ранее вычислительные комплексы, встроенные в системы управления подвижных объектов, в основном, космических («Кварц» - 1958 г., «Восток» - 1960 г., «Луна - 16» - 1970 г., «Марсоход» - 1980 г. и др.).

В последнее время появилось понятие «**мультиагенты**», под которым понимаются подсистемы КФС, включающие измерительно-информационные, обрабатывающие, коммуникационные устройства, и способные интерпретировать входные данные и передавать выходную информацию с элементами самоорганизации («роевой эффект»). Используя эти новые понятия, можно определить КФС как **«СС с мультиагентными подсистемами»**.

Классификацию КФС можно, следуя Н. Винеру, представить с поведенческой точки зрения в виде структуры, представленной на рис. 1, где КФС как объект, взаимодействующий с внешней средой, оценивается обобщенными характеристиками как «поведенческая» система (рис. 1.1).

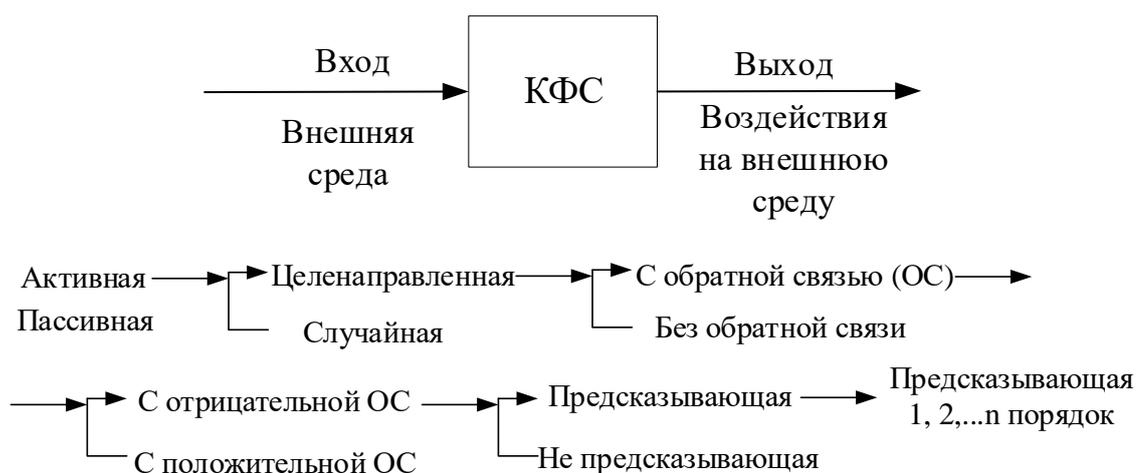


Рисунок 1.1 – Классификация КФС

Классификацию КФС, как систем управления (СУ), можно представить в виде структуры, показанной на рис. 1.2.

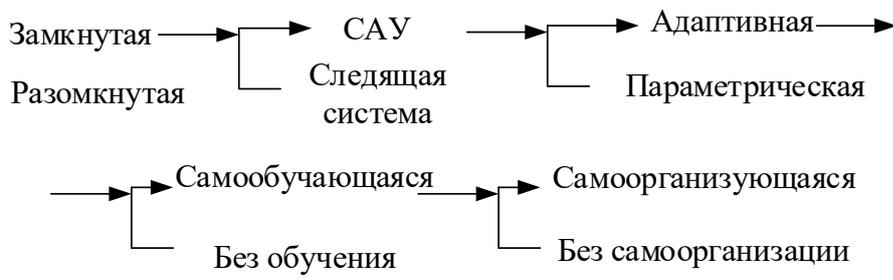


Рисунок 1.2 – Классификацию КФС

Термины, указанные на рис. 1.2, обычно используются применительно к системам управления широкого назначения. Рассмотрим примеры КФС в соответствии приведенными определениями, понятиями и классификацией.

Пример 1.1. Система управления «Природа – Техногеника» (СУПТ) (рис.1.3)

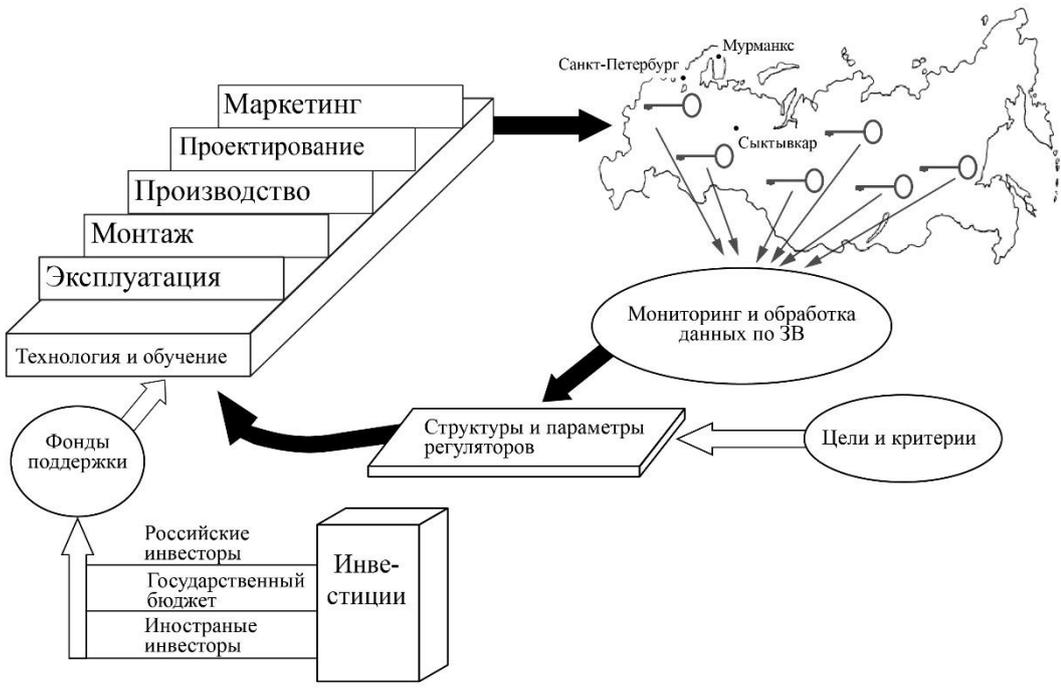


Рисунок 1.3 – Система управления «Природа – Техногеника»

СУПТ является типичной КФС, поскольку содержит все принципиальные характеристики таких систем.

По поведенческой классификации в СУПТ прослеживается вся цепь взаимодействия с внешней средой, в то же время СУПТ, как САУ, включает последовательность переходов от разомкнутой СУ с явно выраженным «человеческим фактором» до самоорганизующейся на конечном этапе её создания.

Содержание признаков КФС в СУПТ следующее:

В нормативно-юридических документах по охране окружающей среды формируются основные элементы векторного критерия экологической безопасности:

- степень рисков и воздействия на окружающую среду;
- наилучшие для данного предприятия технологии;
- выбор производственной площадки по критерию минимизации вреда окружающей среде;
- минимизация ресурсо- и энергозатрат;
- минимизация (или исключение) химических технологий или биотехнологий, опасных для окружающей среды;
- снижение цены природоохранных мер;
- гетерогенность СУПТ, включающей разнородные физические и химические поля, техногенные объекты, искусственные и естественные экосистемы;
- многокритериальность при проектировании и производстве;
- неопределённость в процессе создания СУПТ, например, при задании исходных данных (природные явления, техногенные «отказы» и т.д.);
- мультиагентность, выражающаяся в подсистемах информационно-измерительной (ИИ), подвижных носителей ИИ, исполнительных в сочетании с регуляторами;

– нелинейность - распространение материальных и информационных потоков, процессы роста и убывания массового движения происходят по нелинейным законам;

– многомерность и многосвязность СУПТ, выражающаяся в множестве регулируемых выходных сигналов, видов ЗВ, внутренних и внешних связей, внешних воздействий;

– наличие обратных связей в СУПТ, как отрицательных, так и положительных, в частности, административных воздействий, которые уводят в сторону от цели;

– сопротивляемость административным воздействиям, которая определяется нечувствительностью СУПТ к неверно выбранным «точкам» таких воздействий.

– обязательное включение в СУПТ «человека-оператора», ЛПР;

– соотношения краткосрочных и долгосрочных реакций на воздействия в СУПТ неопределенны - может оказаться «сначала хуже, потом лучше» (как обычно рекламируется административное воздействие) или «сначала хуже, потом еще хуже» (как обычно бывает на практике);

– чувствительность СУПТ к ошибкам, вызванным «человеческим фактором».

Составляющими человеческого фактора являются:

– длинные цепи прохождения документов с результатами мониторинга ЗВ через бюрократические учреждения в виде согласований, координаций, разрешений, затрат;

– субъективизм актов, отчетов, инструкций по результатам проверок;

– накопление малых отклонений «человеком - оператором» от установок (инструкций) технологического процесса;

– возможные ошибки ЛПР («ЛПР - тоже человек»);

– подделка запасных частей, поставляемых в технологическую составляющую СУПТ (может приводить к авариям и катастрофам);

– несовершенство законодательно-нормативной базы.

Пример 1.2. Город как КФС (рис. 1.4)

Город как КФС включает такие важнейшие подсистемы, как строительство, транспорт, теплоэнергетическая и водопроводно-канализационная, связь, промышленные предприятия, торговля, здравоохранение, культурные предприятия.

Многочисленные проблемы, возникающие в системе «город» известные как общая проблема урбанизации, настоятельно требуют подходы к ее решению как КФС. Вот некоторые из этих проблем: непрекращающийся рост городов; разрушение окружающей среды вследствие урбанизации; нехватки жилья, транспорта, средств связи; несбалансированность отдельных отраслей городского хозяйства.

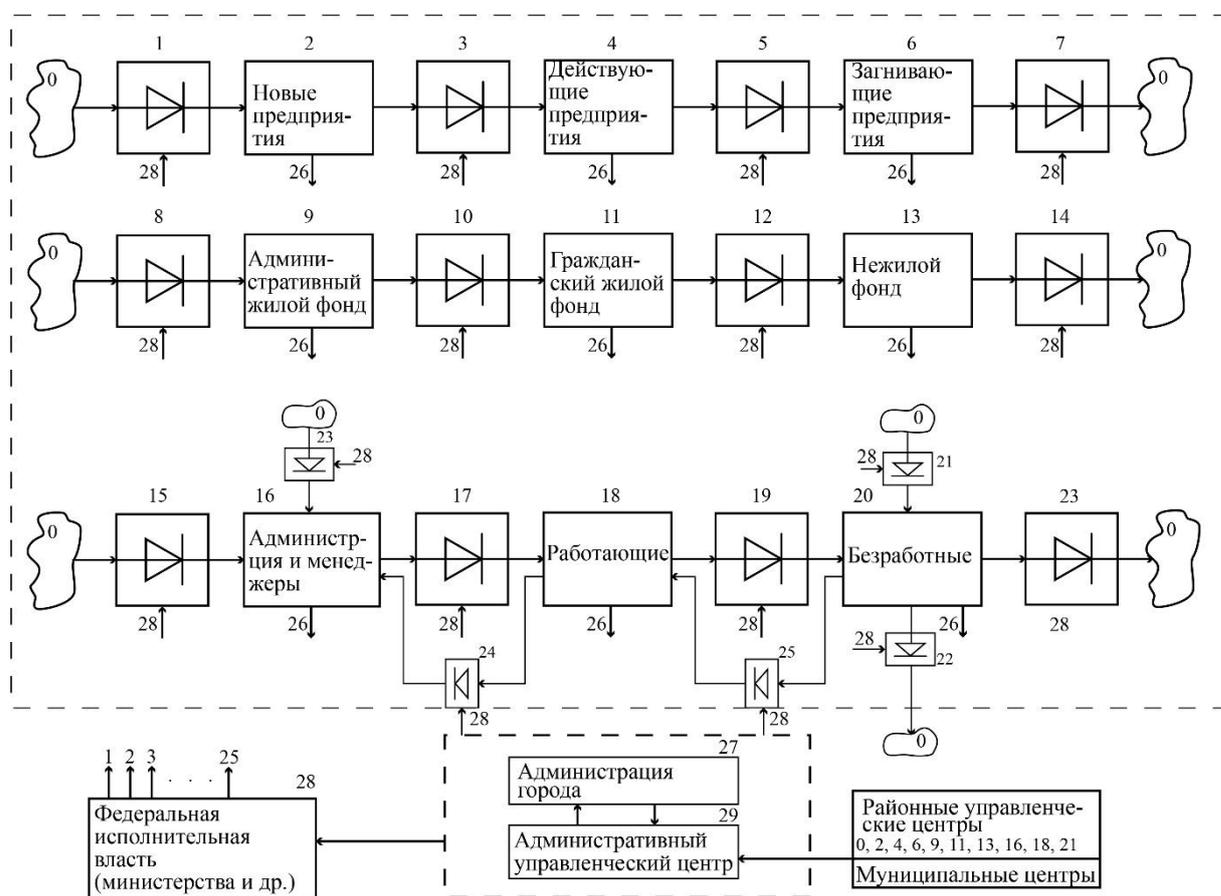


Рис. 1.4 – Город как КФС

Для решения этих проблем прежде всего необходима модель, достаточно удобная для исследований и прогнозирования городского

хозяйства. Одна из таких моделей, построенная на основе модели Дж. Форрестера, представлена на рис. 1.4. Где обозначено:

- 0 – окружающая город среда;
- 1,3,5,7,8 10,12,14,15,16,17,19,21,22,23,24,25 – управляемые «вентили»;
- 26 – предприятия;
- 9,11,13 - жилые дома;
- 16,18,20 – население;
- 27,28,29 – управление городом.

В этой модели принят ряд допущений, в том числе спорных. Однако эта модель проста, конкретна и удобна для исследований. Предлагается, что город связан с окружающей средой, но не изменяет ее; город слабо зависит от исторической эпохи и социального строя; избранные три подсистемы превалируют над всеми остальными; город - автономная замкнутая система. Несмотря на значительное упрощение реальной системы «город» в ее модели, представленной на рис. 1.4 уже просматриваются сложные противоречивые процессы, изучение которых представляет большой интерес. Так, чем больше строится жилых домов, тем привлекательнее город для притока рабочей силы. Но чем больше жилищное строительство, тем меньше промышленных предприятий и, следовательно, рабочих мест, что снижает привлекательность города; чем больше коммунальные и культурные расходы на душу населения, тем привлекательнее город. Но чем больше эти расходы, тем больше налоги на население и, следовательно, меньше привлекательность города. Отдельные подсистемы КФС «город» физически разнородны, содержат много неопределенных факторов, обладают множеством экономических, социологических, технических связей.

Эти и другие факторы характеризуют современные ситуации и создают многокритериальность решения любой проблемы городского строительства.

Городское хозяйство гетерогенно. Компоненты города - строительство, население, транспорт, коммуникации и т.д. – представляют собой физически разнородные области, каждая из которых включает самостоятельное

множество объектов, дисциплин, теорий. Появился важный ограничивающий фактор - **охрана окружающей среды**, в котором множество неопределенностей.

Пример 1.3. Система ориентации и стабилизации межпланетной космической станции (СОиС МКС) (рис.1.5)

Для представления об МКС достаточно рассмотреть функциональную схему ее системы ориентации и стабилизации (СОиС) (рис. 1.5).

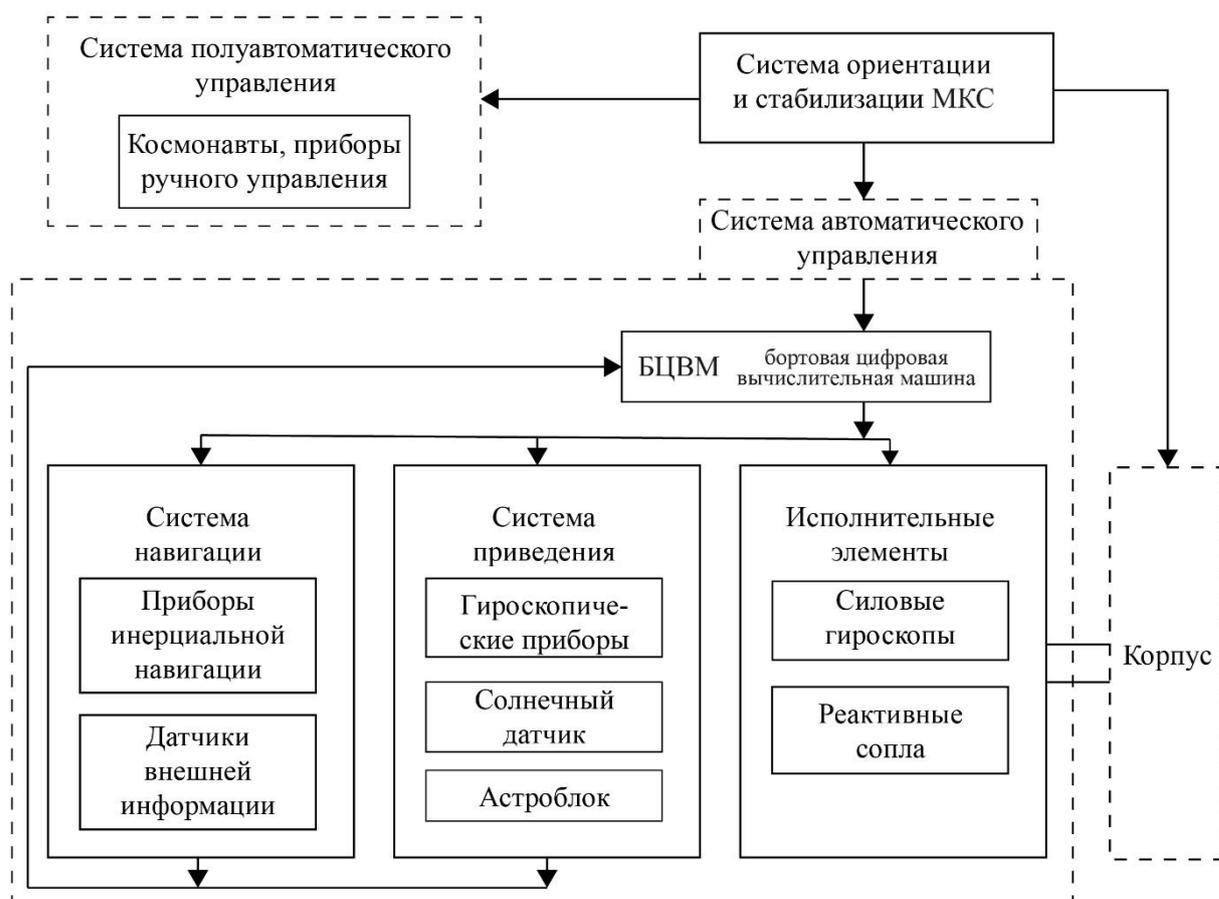


Рисунок 1.5 – СОиС МКС

СОиС является только одной из подсистем МКС, которая, помимо системы стабилизации и ориентации, включает системы энергоснабжения, терморегулирования, телеметрии, стартовую, жизнедеятельности космонавтов и т.д. При создании и эксплуатации такой системы неизбежно вступают в противоречия требования: высокой точности стабилизации и ориентации при минимизации веса, габаритов, энергоресурсов, высокой надежности и длительности работы при минимуме затрат на аппаратные и

программные средств и т.д. Таким образом, и в этом примере имеет место физическая разнородность подсистем, многоцелевой характер СоИС МКС, многомерность и многосвязность её внутренних систем управления.

Пример 1.4. Навигационный модуль в СоИС

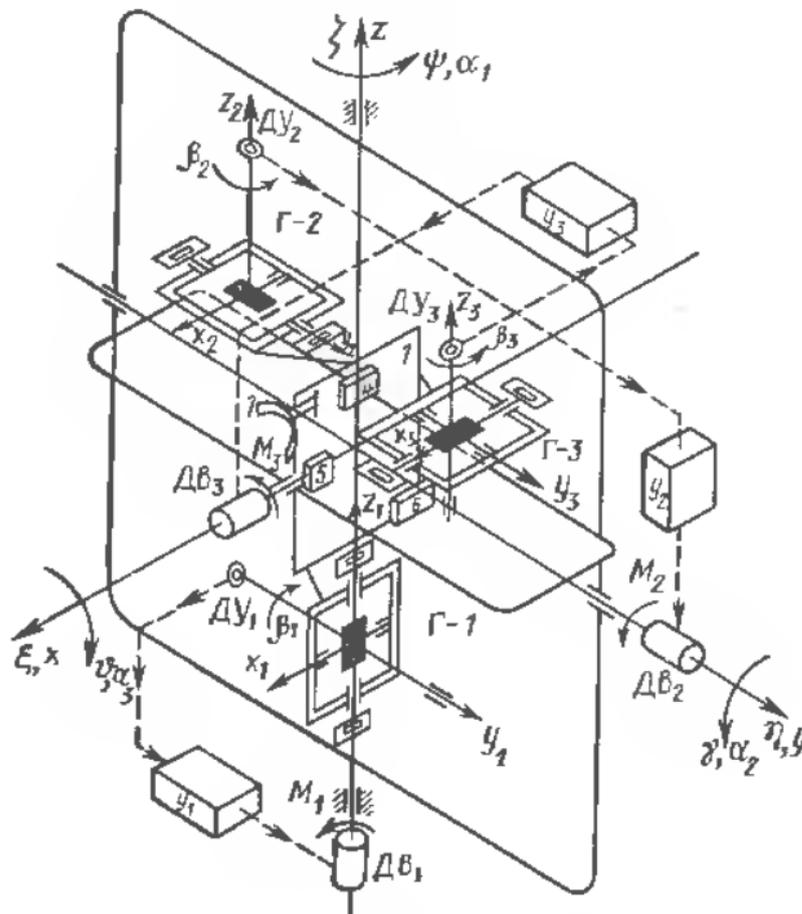


Рисунок 1.6 – Навигационная подсистема СоИС МКС

(1 – платформа; гироскопические чувствительные элементы (ЧЭ) – Г-1, Г-2, Г-3; акселерометры – 4, 5, 6; измеряющие линейные усилители ЛА по осям ξ, η, ζ ; оптический пеленгатор 7; датчики углов (ДУ-1, ДУ-2, ДУ-3), усилительно-преобразующие цепи (У-1, У-2, У-3); исполнительные устройства – двигатели с редукторами (Дв-1, Дв-2, Дв-3); ось рысканья – φ, γ – ось крена, ψ – ось тангажа; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – углы стабилизации; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – углы стабилизации, M_1, M_2, M_3 – управляющие моменты)

На рис. 1.6 представлена гиropлатформа, которая с одной стороны является модулем СоИС, одного из мультиагентов МКС, а с другой стороны содержит все признаки КФС: гетерогенность (механические, электронные, оптические пневматические составляющие), многокритериальность при проектировании и производстве (точность, вес, габариты и т.д.), неопределённость по исходным данным и др.

Проектирование и производство приведенных примеров КФС также, как и многих других невозможны без применения современных информационных технологий (ИТ). Подтверждением этого обстоятельства являются работы научно-исследовательских центров в РФ и за рубежом (Роскосмос, NASA, ESA, CNSA), в частности – построение САПР в ИТ СУПТ, СУНВГА проектирования распределённых геоинформационных систем, выполненное А.Ю. Гришенцовым. Многочисленные системы ИТ в виде САПР, АСТПП, ГПС и т.д. представлены на рис. 1.7 с соответствующими англоязычными аналогами.

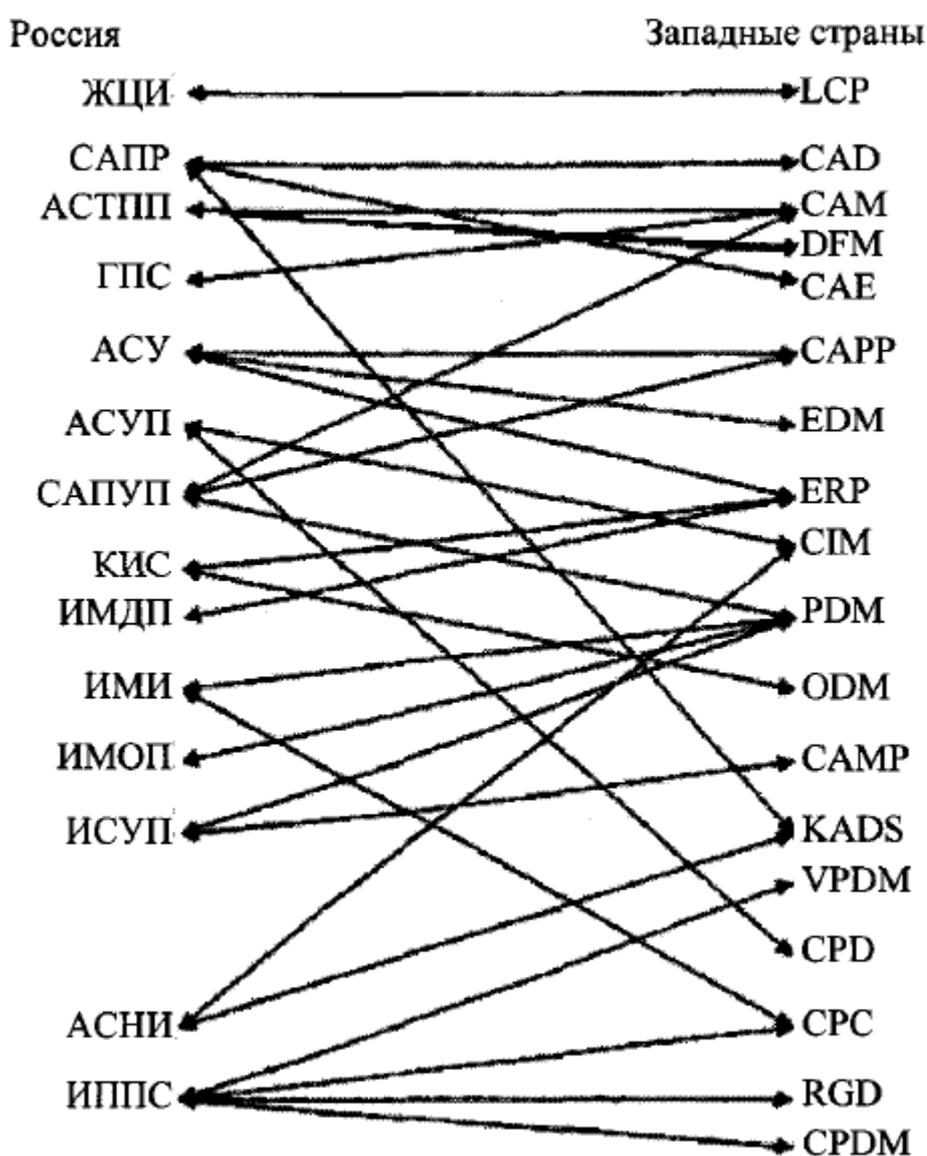


Рисунок 1.7 – Соотношение между аббревиатурами
 Непосредственное применение этих средств ИТ в проектировании и производстве КФС обычно требует решения задачи выбора инструментов ИТ.

Их адаптации к конкретным объектам, что часто сводится к разработке компонент математического, лингвистического, программного и информационного обеспечений соответствующих инструментов ИТ.

Важной особенностью разработки ИТ для КФС является необходимость построения **имитаторов**, как составляющих математического моделирования. Такие имитаторы применяются как на начальных этапах проектирования и производства КФС, так и при замене их «испытаний» ввиду «единичности экземпляров КФС». В любом случае создаваемая КФС заменяется её **имитатором**, реализованном средствами математического моделирования ИТ КФС, на котором проводятся эксперименты особенно в начале процесса проектирования и производства.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения понятий: «КФС», «Встроенная система», «Многоагентность», «сложная система».
2. Перечислите принципиальные признаки КФС.
3. Покажите принадлежность к КФС следующих объектов:
 - Система управления «Природа – Техногеника»,
 - Система «Город»
 - Межпланетная Космическая Станция
 - Навигационный прибор
4. Приведите «свой» пример КФС.
5. Какие средства информационных технологий применяются в создании КФС?

Литература

1. Винер Н. Кибернетика, М., «Сев. Радио», 1958г.
2. Четрок Б.Е.: https://ru.wikipedia.org/wiki/Четрок,_Борис_Евсеевич
3. Ракеты и люди. Википедия - <http://ru.wikipedia.Org/wiki/Спутник-3>
4. Словарь ОТТ - терминов. URL: <https://digital.gov.ru/uploaded/files/ott-y-terminah-i-ponyatiyah.doc>
5. Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И. Системы управления «Природа - Техногеника», СПб, «Политехника», 2013г., 202с.
6. Киберфизические системы в экологической безопасности и геомониторинга автотранспорта, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019 г.
7. Гришевцов А.Ю., Коробейников А.Г. Средства интероперабельности в распределённых геоинформационных системах // РАН, «Журнал радиоэлектроники», №3, 2015 г.

Глава 2. Традиционный процесс проектирования и производства и его цифровизация.

Соответствующий комплекс участников разработки КФС включает множество отдельных предприятий, каждое из которых проектирует и производит отдельные подсистемы («агенты») или элементы КФС.

Традиционный процесс проектирования практически не меняется и остаётся актуальным до сих пор, не смотря на развитие, происходящее в экономической и производственных сферах.

Например, разработку командных приборов осуществляет предприятие «НИИ КП»; встраиваемых вычислительно-управляющих приборов «Электроавтоматика», а летательные аппараты как КФС в виде подсистем. В качестве иллюстрации на рис. 2.1 приведены приборостроительные предприятия Санкт-Петербурга, продукция которых входила в соответствующие КФС.

Приборостроительные предприятия

	Новая Эра		Мариион
	НИПКП "Терминал"		Гипросвязь СПб
	Рекоид		Дальняя связь
	Вибратор		Красногвардеец
	ЛОМО		Лентелефонстрой
	Светлана		Позитрон
	Штурманские приборы		Управляющая компания "Ленинец-Бытовая" техника
	Российский институт радионавигации и времени		НИИ "Гиркоид"
	РНИИ "Электронстандарт"		Институт радиовещательного приема и акустики им.А.С.Попова
	Взлет		Электроаппарат
	Завод "Электронульт"		Электромеждоборудование
	Радиоавионика		Корпорация "Аэрокосмическое оборудование"
	Ленинградский электрохимический завод		НПК "Северная заря"
	Объединенный авиаприборостроительный консорциум		Техприбор
	Интелтех		Мощная Аппаратура Радиовещания и Телевидения
	Пирометр		Завод "Мезон"
	Завод по производству Систем Программного Управления		Российский институт мощного радиостроения
	НИИ Командных приборов		НПО "Азимут"
	ЦНИИ РТК		НПО "Электроавтоматика"

Рисунок 2.1 – Предприятия – подсистемы КФС
 Концепция, облик КФС в целом разрабатывается, как правило,
 Головным предприятием, которое осуществляет координацию, целеуказание,

декомпозицию КФС на подсистемы оценки функционирования КФС в целом. Предприятия – разработчики подсистем (агентов) КФС ведут соответствующие процессы проектирования и производства согласно с техническими заданиями от головного предприятия. В любом случае на каждом предприятии существуют определенные традиции. Многолетняя практика выработала традиционный процесс проектирования, который, в обобщенном виде, представлен на рис 2.2.

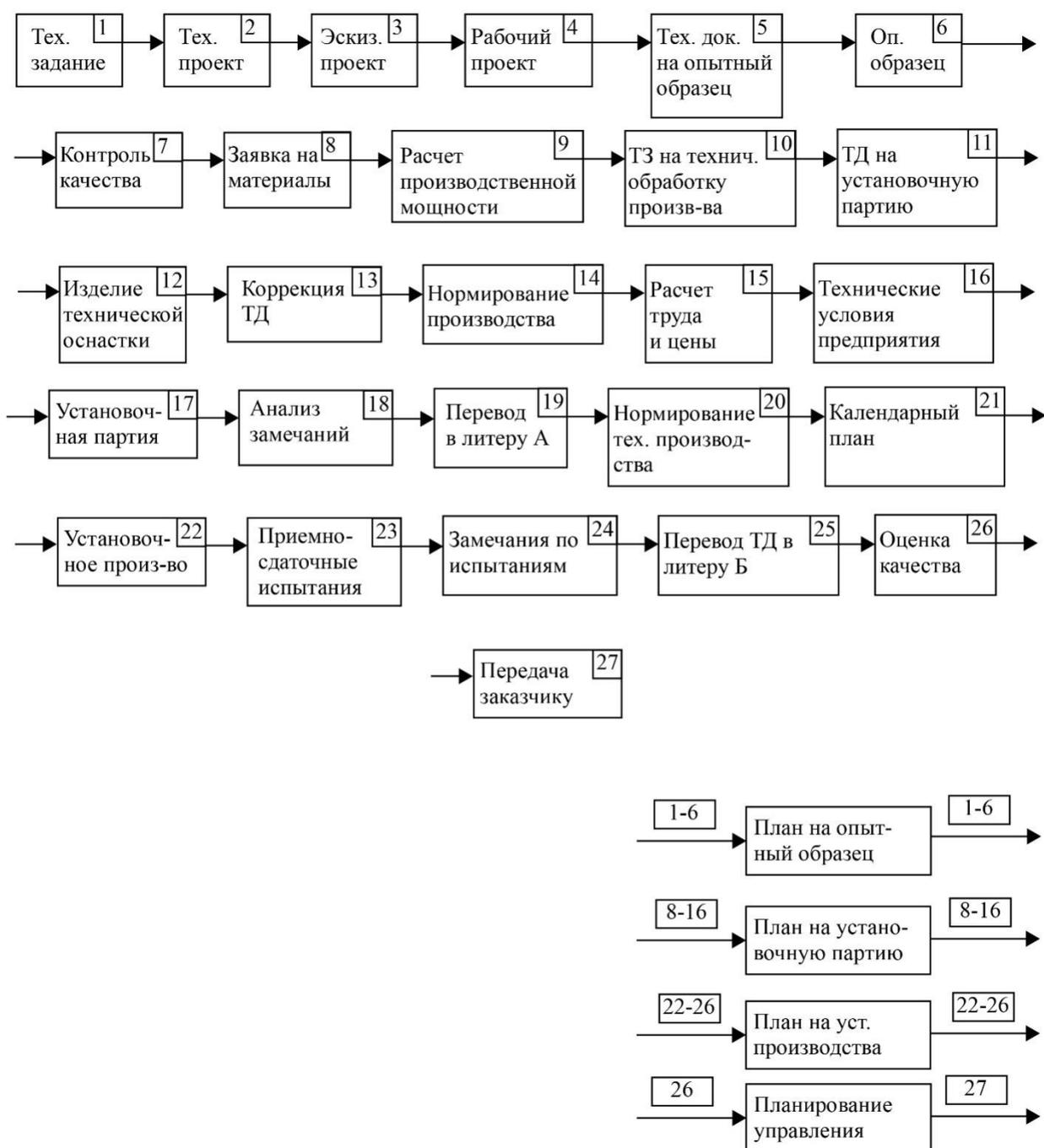


Рисунок 2.2 – Традиционный процесс проектирования и производства

Традиционный процесс проектирования включает множество проектных и производственных процедур, объединенных в следующие этапы:

1. Техническое задание – исходный документ на проектирование технического объекта (изделия). ТЗ устанавливает основное назначение разрабатываемого объекта, его технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предписание по выполнению необходимых стадий создания документации (конструкторской, технологической, программной и т.д.) и ее состав, а также специальные требования.

2. Аванпроект – предварительный план создания изделия, включающий расчеты, чертежи, макеты и прочую необходимую информацию.

3. Эскизный проект – совокупность документов, содержащих принципиальные решения и дающих общее представление об устройстве и принципе работы разрабатываемого объекта, а также данные, определяющие его назначение, основные параметры и габаритные размеры. Лабораторно – отработочные испытания применяются на этом этапе;

4. Рабочий проект – совокупность текстовых и графических документов, обеспечивающих реализацию принятых в утвержденной проектной документации технических решений, необходимых для производства. Испытания макетов и прототипирование сопровождают этот этап;

5. Техническая документация на опытный образец - совокупность документов, содержащих в себе информацию об опытном образце, его особенностях и свойствах;

6. Опытный образец – работающая модель устройства или детали в дизайне, конструировании, моделировании. Испытания опытных образцов - обязательная процедура;

7. Контроль качества – проверка совокупности свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением;

8. Заявка на материалы;
9. Расчет производственных мощностей - расчет затрат, которые понесет исполнитель в ходе создания изделия;
10. Техническая подготовка производства - на этом этапе устанавливается, при помощи каких технологических методов и средств, способов организации производства должно изготавливаться данное изделие, окончательно определяется его себестоимость и эффективность производства.
11. ТД на техническую оснастку - совокупность приспособлений для установки и закрепления заготовок и инструмента, выполнения сборочных операций, транспортирования заготовок, полуфабрикатов, деталей или изделий. Использование оснастки позволяет осуществлять дополнительную или специальную обработку и/или доработку выпускаемых изделий;
12. Изготовление технической оснастки;
13. Коррекция ТД по результатам испытаний;
14. Нормирование производства - с целью сокращения срока заказа материалов расчет норм начинается при согласовании технического проекта. На основании карты предварительного заказа металлов, составляемой ОГК отдел материальных нормативов, рассчитывает нормы расхода материалов на оригинальные детали. Окончательный расчет норм производится после разработки конструкторской документации. Таким образом, работа разделена на два этапа. Это позволяет ОМТС своевременно комплектовать план материально-технического снабжения и формировать заявки на централизованные поставки материалов;
15. Расчет затрат труда и цены;
16. Технические условия предприятия;
17. Установочное производство – первая промышленная партия, изготовленная в период освоения производства с целью подтверждения готовности производства к выпуску продукции с установленными требованиями и в заданных объемах. Проводятся заводские и межведомственные испытания;

18. Анализ замечаний по результатам испытаний;
19. Перевод ТД а «литеру А»;
20. Нормирование технологических процессов - назначение технически обоснованных норм времени на продолжительность выполнения операций.
21. Календарный план – полный комплекс работ, содержащий сроки начала и окончания процесса проектирования и производства;
22. Серийное производство – тип производства, характеризующийся ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых или ремонтируемых периодически повторяющимися партиями, и сравнительно большим объемом выпуска;
23. Приемо-сдаточные испытания – эти испытания проводятся на соответствие продукции некоторым, наиболее важным требованиям стандарта. Эти испытания проводятся для каждой партии изделий на определенном числе отбираемых из этой партии образцов;
24. Замечания по испытаниям;
25. Перевод ТД в «литеру Б»;
26. Оценка качества – это выбор показателей, определение их действительного значения и сопоставление их с базовыми показателями. При выборе потребительских свойств и показателей важно выбрать такие показатели, которые имеют решающее значение;
27. Передача заказчику.

Каждый этап проектирования и производства представляет множество процедур и операций, выполняемых многочисленными коллективами проектировщиков и производственников с применением соответствующего оборудования, инструментария в инфраструктуре предприятия.

Важно отметить, что нарушение любого из шагов проектирования и производства может повлечь за собой дополнительные финансовые расходы или перенос сроков сдачи проекта в целом, что в некоторых случаях может повлечь за собой вплоть до юридической ответственности. Особенностью

проектно-производственных процедур является повышенный контроль качества на каждом шаге путём – испытаний (прототипирования), что в случае КФС сводится к имитации на основе математического моделирования.

«Цифровизация» традиционного процесса проектирования и производства подразумевает сквозное «движение» математических моделей от технического задания до опытных образцов изделия и выполнение проектных и производственных процедур на основе этих моделей

Основные инструменты обеспечивающие такое движение в виде АСНИ, САПР, АСТПП, ГПС, АСУТ (см. рис 1.7, 2.3) применяются на предприятиях в большом многообразии инструментария информационных технологий (ИТ):

- САПР (CAD/CAM CATIA, UNIGRATH, PROENG;
- Solid Work, Solid Edgo ... PTC ...);
- АСТПП (Technomatrix, PLM, NX CAM ...);
- ГПС (CAMExpress ...).

Применение аддитивных технологий проектирования и изготовления добавило к этим средствам ИТ 3-D принтер и соответствующее программное обеспечение наряду с соответствующими материалами (рис. 2.4). ИТ проектирования интегрируются с ИТ управления процессом проектирования и производства на основе общей базы знаний (рис 2.5, 2.6).



Рис. 2.3: АСНИ – автоматизированная система научных исследований; АСУТ – автоматизированная система утилизации



Рисунок 2.4 - Адаптивные технологии

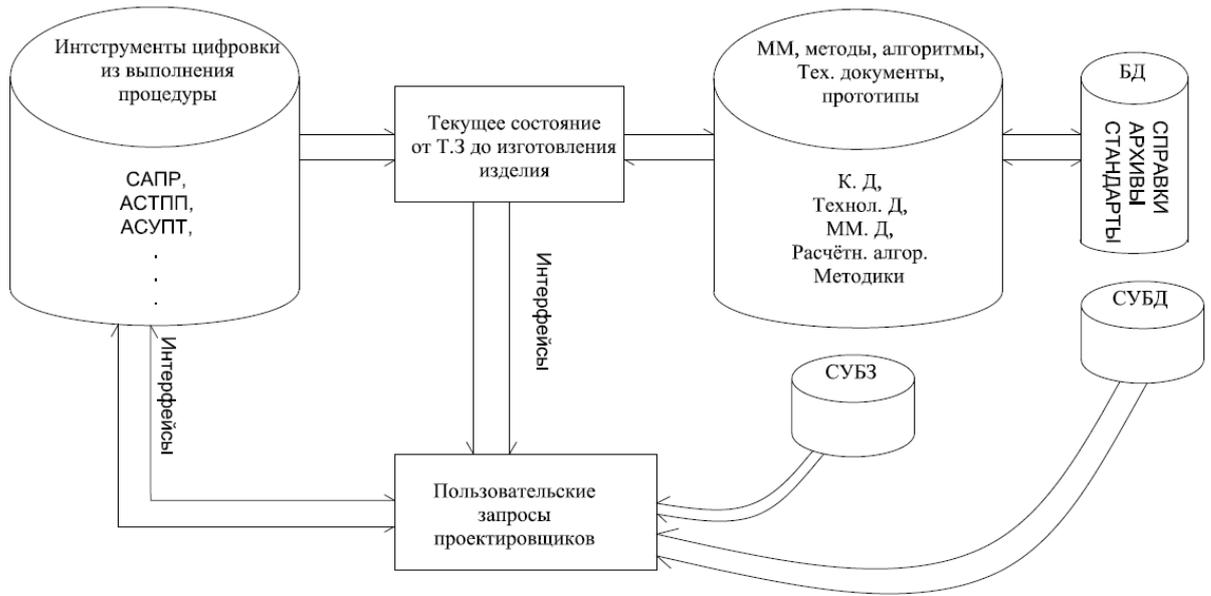


Рисунок 2.5 - Взаимодействие с БЗ

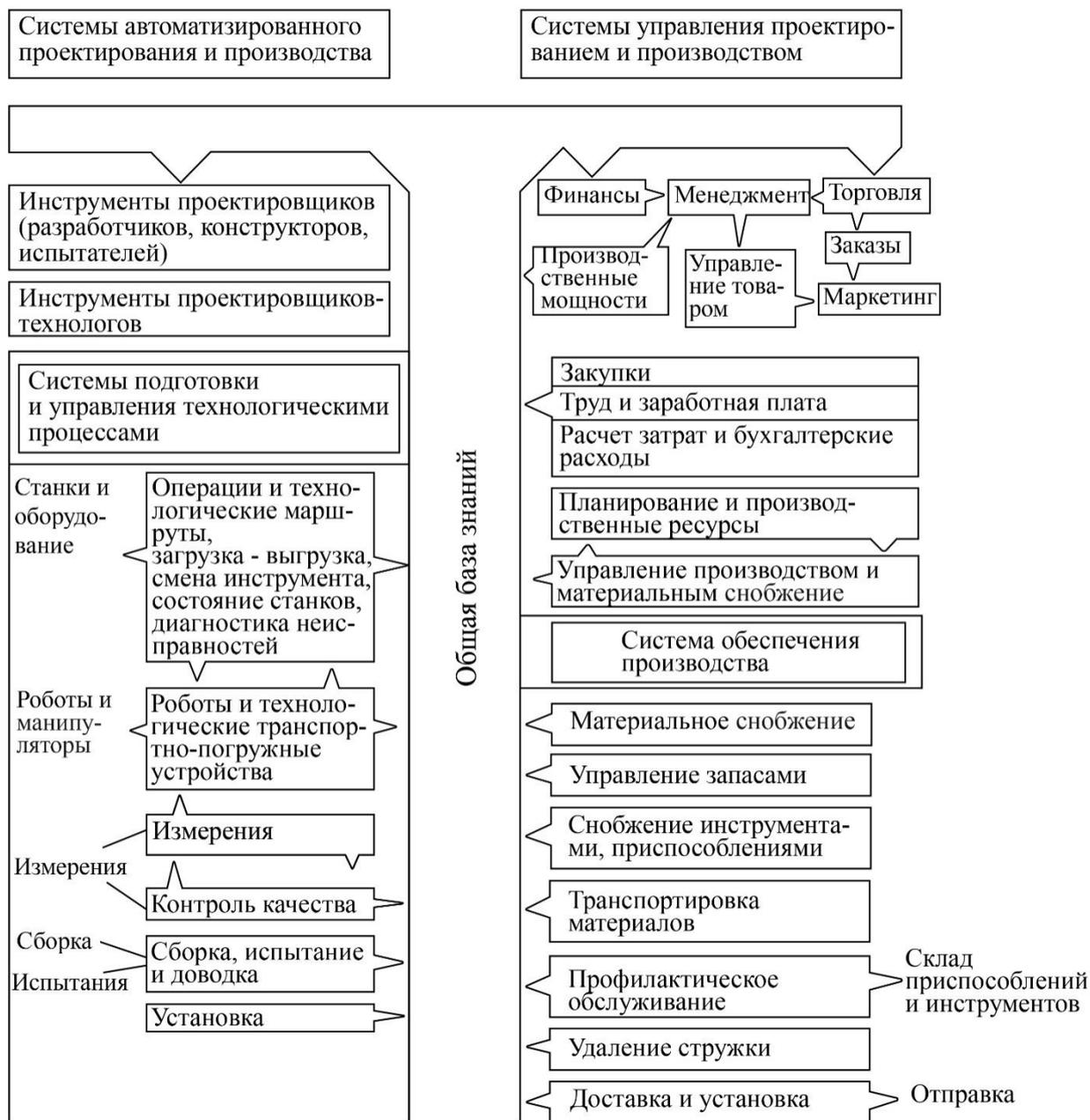


Рисунок 2.6 - Интеграция ИТ процессов проектирования и производства
 Остановимся подробнее на процессе проектирования, представленном на рис. 2.7:

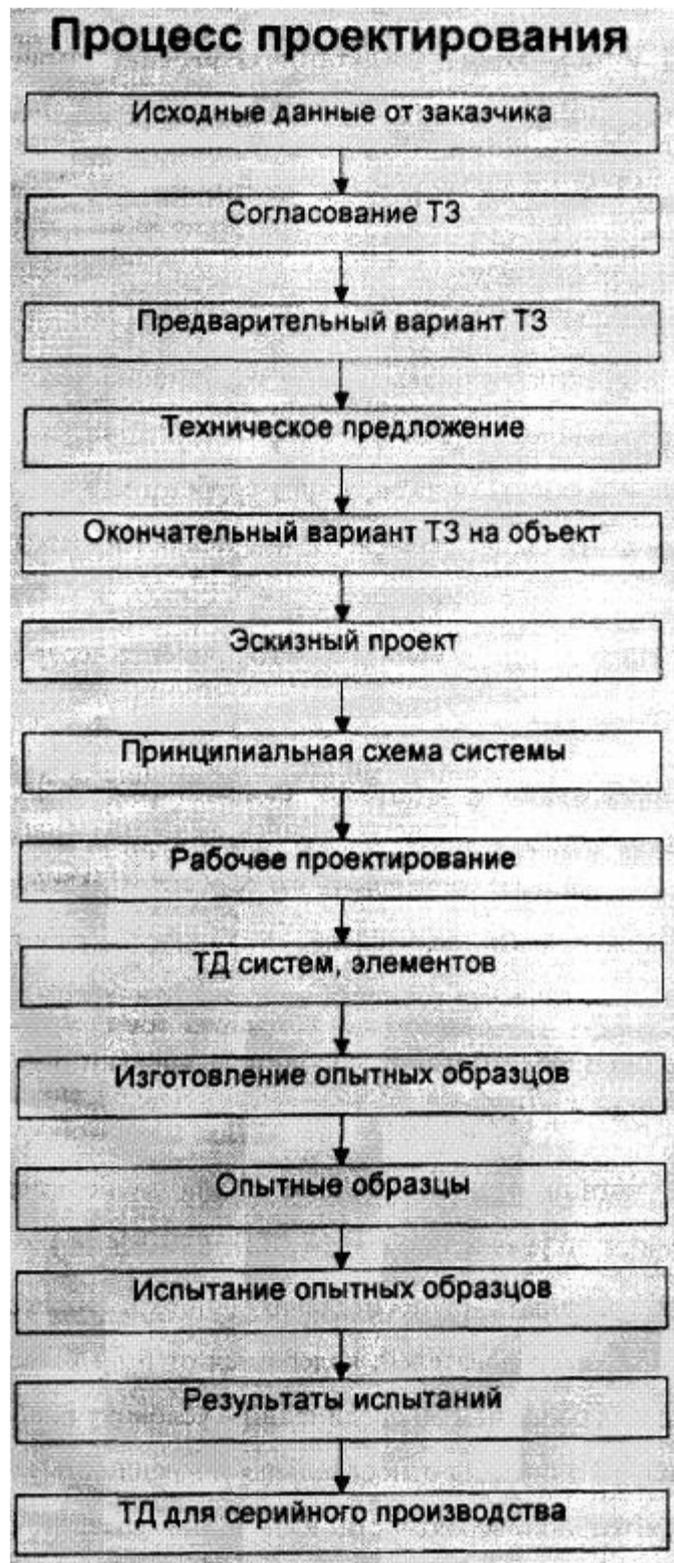
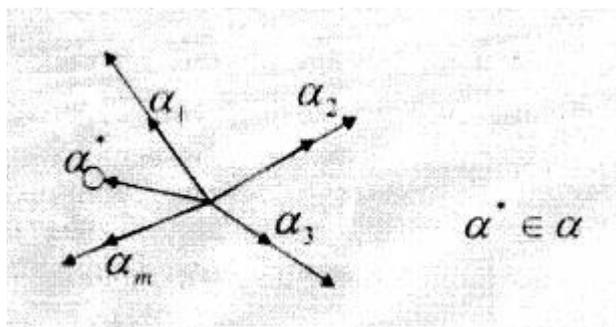


Рисунок 2.7 – Этапы процесса проектирования

Выбор оптимальных проектных решений является основной задачей во всем процессе проектирования и производства.

Представим, что множество проектных решений α в метрической СК представляют собой некоторую систему:



Задача проектирования: выбрать в множестве α такое α^* , составляющие которого α_1^* , α_2^* , ..., такие что α^* является наилучшим по заданным критериям. Эта задача в общем случае не достижима, поэтому при проектировании решаются компромиссные задачи. Проектировщики стремятся найти такое множество проектных решений, которое с одной стороны удовлетворяет требованиям ТЗ, а с другой стороны не противоречит основным критериям.

Для решения компромиссной задачи привлекаются математические методы и алгоритмы.

Во всем процессе проектирования и производства существуют понятия проектной процедуры, проектной операции и проектного решения.

Проектные процедуры - часть процесса проектирования, состоящая из ряда проектных операций над исходными данными и заканчивающаяся проектным решением.

Проектные операции - действия проектировщиков над исходными или промежуточными данными внутри проектной процедуры.

Проектное решение - окончательный или промежуточный результат проектирования.

Весь процесс проектирования строится из проектных процедур и соответственно проектных решений. Именно проектные решения несут ответственность за соответствие объекта ТЗ. Ошибки проектных решений приводят к значительным финансовым и моральным потерям предприятия.

В проектировании КФС, в отличие от отдельных устройств и агрегатов с акцентированием на конструкторские и технологические этапы, наибольший

вес приобретают начальные этапы, включающие процедуры формирования функциональных, структурных, логических схем и звеньев между подсистемами и мультиагентами. Выполнение этих процедур связано с построением математических моделей, имитаторов на основе методов и алгоритмов моделирования расширения спектра критериев от традиционных для САУ – устойчивости, качества, точности до достаточно полного набора условий работоспособности КФС (управляемости, наблюдаемости, надежности, веса, габаритов и т.п.). Ошибки в проектных решениях на этих этапах создания КФС стремятся минимизировать в наибольшей степени.

Проектное решение - функция от множества параметров.

W – Обобщенный критерий, по которому производится проектирование (основной функционал), можно представить в виде:

$$(1) W(\alpha) = \Phi(f_1(\alpha), f_2(\alpha), \dots, f_n(\alpha))$$

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ – множество проектных решений

$f_1(\alpha), f_2(\alpha), \dots, f_n(\alpha)$ – требования ТЗ (устойчивость, управляемость, наблюдаемость, точность, вес, габариты, надежность и др.)

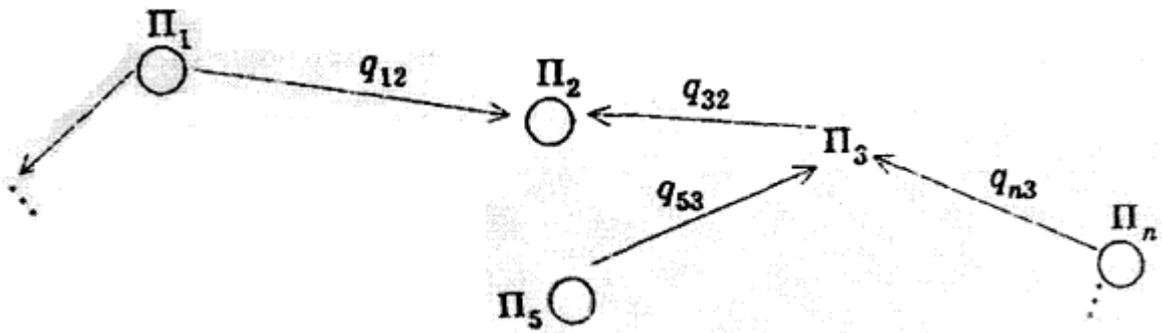
В частности,

$\max_{\alpha} \{W\}$ – максимум функционал, может представляться как прибыль;

$\min_{\alpha} \{W\}$ – минимум функционал, как себестоимость изделия.

С целью совершенствования самого процесса проектирования и наилучшего выбора и расположения инструментария ИТ КФС, проводится формализация этого процесса с дальнейшим его моделированием.

Процесс проектирования можно представить графом из проектных процедур, Π_i , и связей между ними q_{ij} .



Формализация процесса проектирования сводится к построению математических моделей их «движения» от ТЗ до получения опытного образца при обязательном лингвистическом и программном обеспечении этого процесса.

Представление такой формализации с позиции теории множеств может быть в виде обобщённых функций G_1, G_2, G_3, G_4 . Процесс проектирования представляется в виде:

$$G_1 = (V, R, W), \text{ где:}$$

V – множество процедур проектирования,

R – множество связей,

W – правила построения связей.

Лингвистическое обеспечение, G_2 , включает преобразования (трансляторы), языков проектирования:

$$G_2 = (L_{ТЗ}, L_{КД}, L_{ГП}, \dots, U_{ГП}, U_{КД}, \dots), \text{ где:}$$

$L_{ТЗ}$ – язык ТЗ, $L_{КД}$ – язык КД, $L_{ГП}$ – язык гибридного производства,

$U_{ГП}$ – преобразователь $L_{КД}$ в $L_{ГП}$;

$U_{КД}$ – преобразователь $L_{СП}$ в $L_{КД}$; $L_{СП}$ – язык схемотехнического проектирования

«Движение» моделей проектируемого объекта представляется функцией:

$$G_3 = (M, O, K), \text{ где:}$$

M – модели, O – операции над моделями, K – критерии.

Выполнение проектных процедур представляется функцией:

$G_4 = (A, C, M, T, R)$, где:

A, C – исходные данные и ограничения,

M – модели (прототипы) объекта,

T – решающие процедуры,

R – проектные решения.

Автоматизация или по современной терминологии **цифровизация** проектирования сводится к наполнению функций G_1, G_2, G_3, G_4 и разработки или адаптации ИТ, доведению их до уровня работоспособного инструментария проектировщика.

Инструментарий проектирования и производства КФС в целом (головное предприятие) и предприятий-разработчиков подсистем включает инструменты имитационного моделирования (имитаторы), схемотехнического, конструкторского, технологического проектирования. Этот инструментарий, расширенный на производственные процедуры, при наличии лингвистического обеспечения связей между инструментами ИТ и составляет содержание цифровизации проектирования и производства КФС.

На рис. 2.8. представлено распределение инструментов ИТ для цифровизации проектирования и производства КФС:

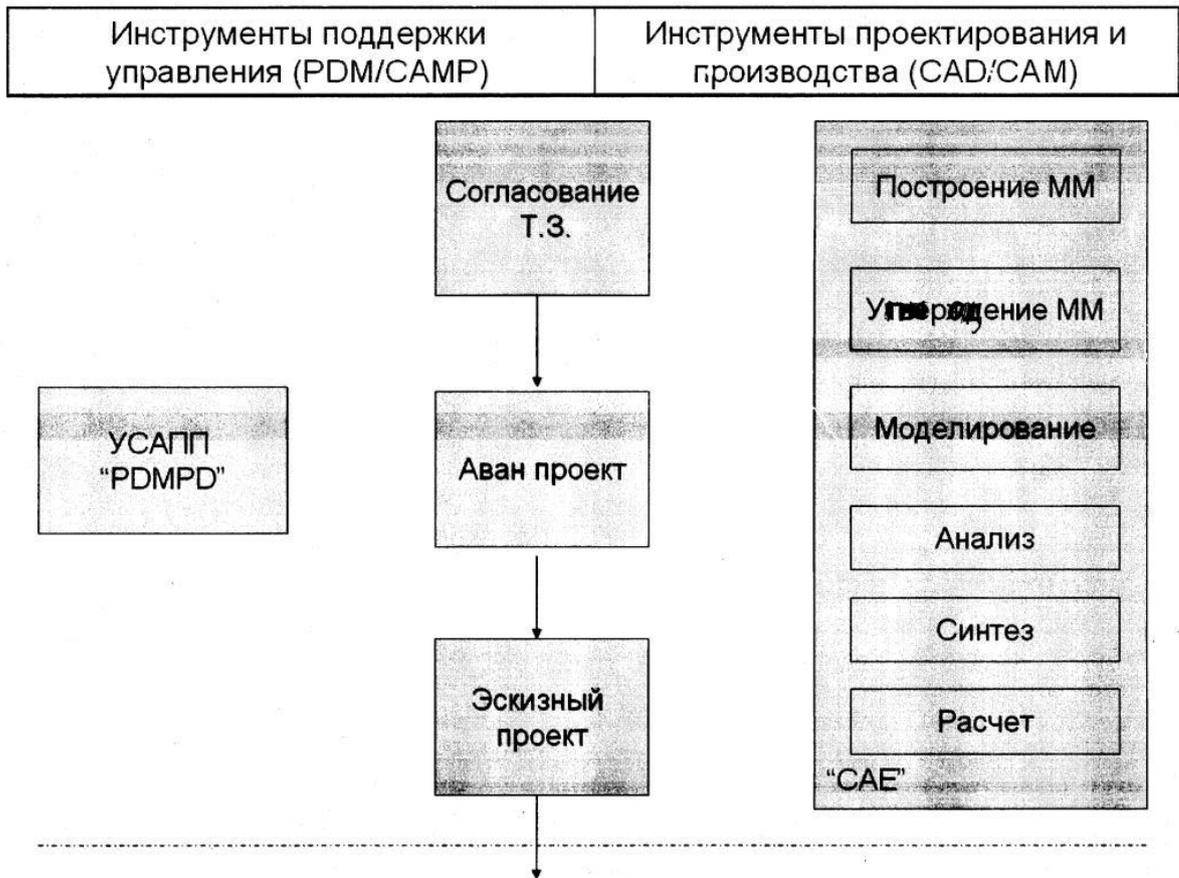


Рисунок 2.8 – Распределение инструментов проектирования и производства

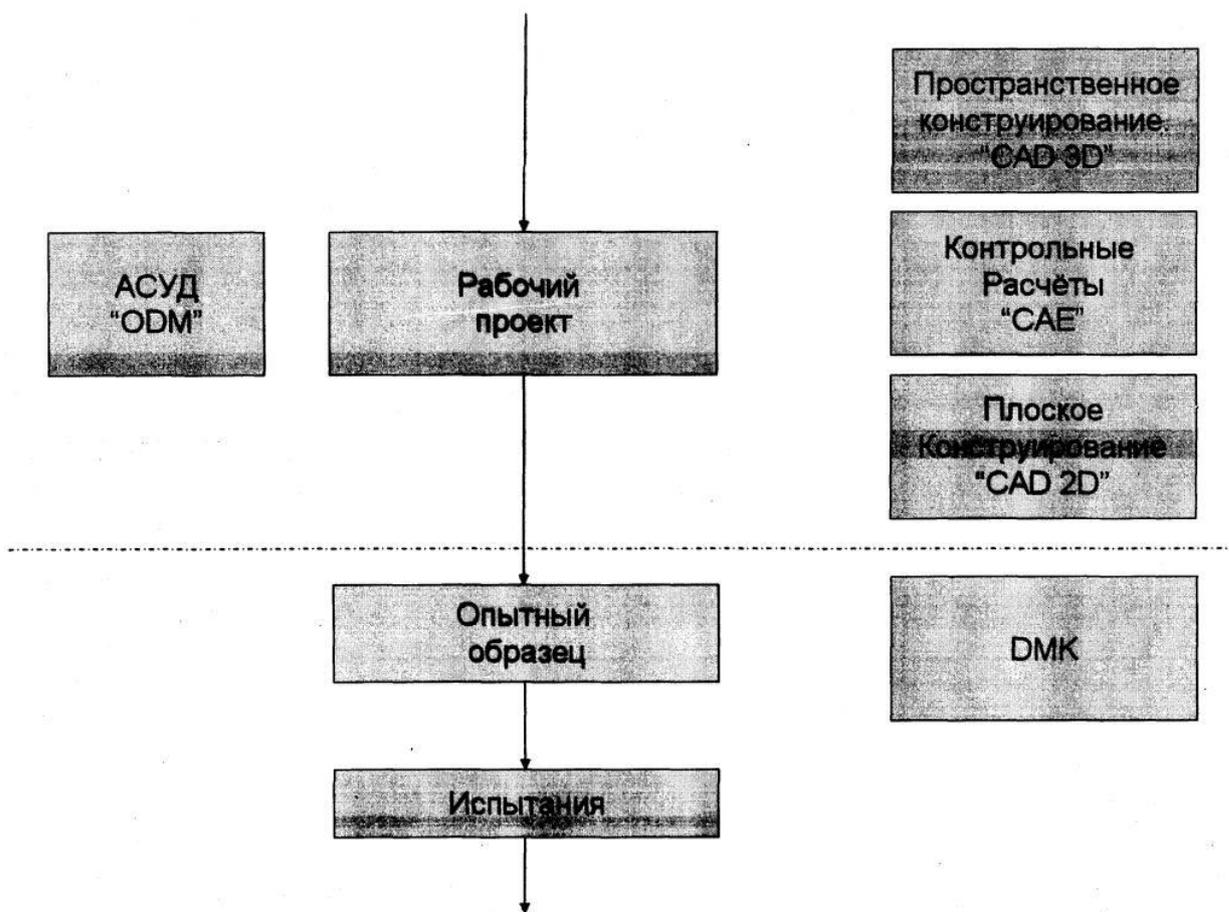


Рисунок 2.8 (продолжение) – Распределение инструментов проектирования и производства

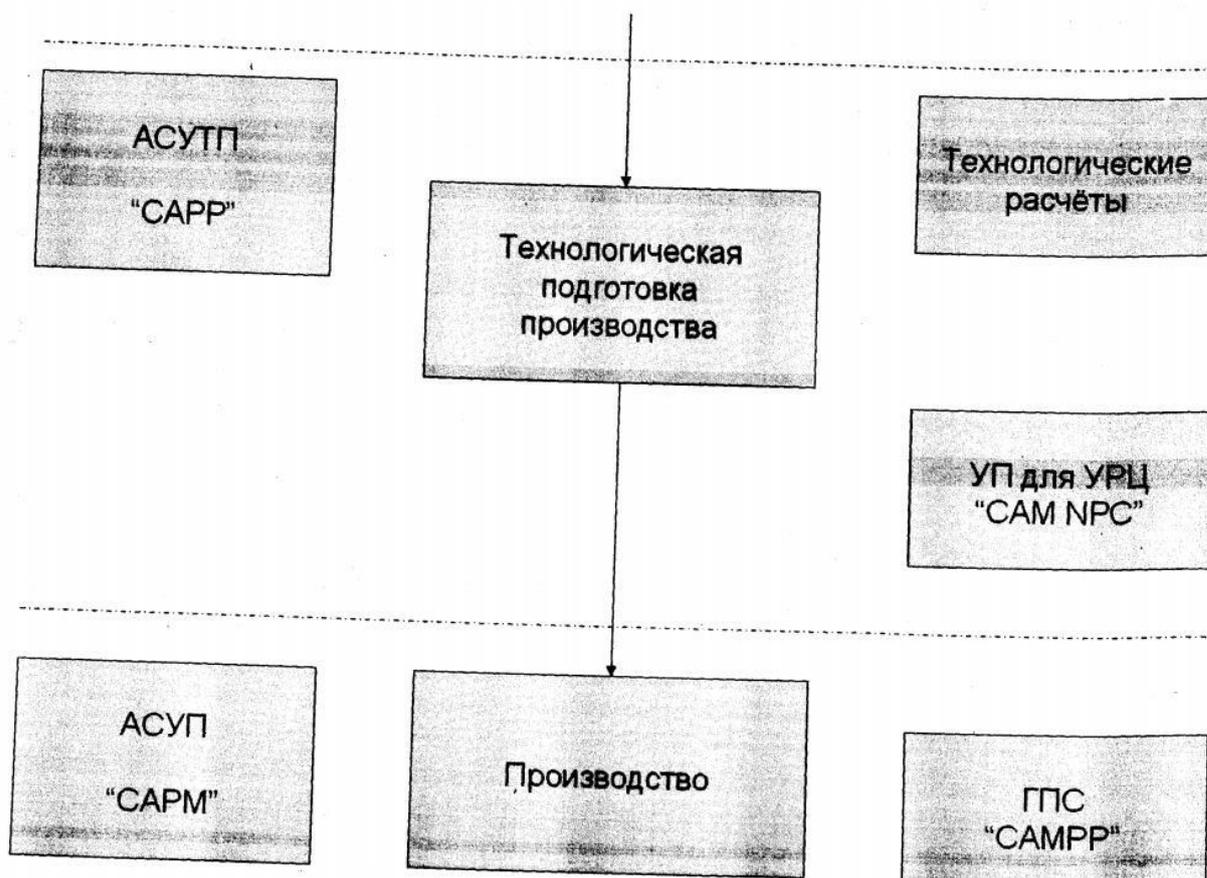


Рисунок 2.8 (продолжение) – Распределение инструментов проектирования и производства

Появившиеся в последнее время понятие «Индустрия 4.0» представляет собой эволюционное развитие информационных технологий (ИТ) и применение ИТ от ТЗ до выпуска готового изделия. Соответствующая концепция была предложена К. Швабом как средство повышения конкурентоспособности промышленности Германии путём внедрения киберфизических систем в процессы производства. В этой связи отметим сложившиеся тенденции в развитии ИТ.

Развитие науки и техники и соответственно производительных сил обеспечивают в настоящее время реализацию «машинно-ориентированных» идей, методов и алгоритмов, которые были созданы в 70 - 80-х годы прошлого века. Недостаточный уровень аппаратно-программной поддержки в то время приводил к разработке и усовершенствованию математических методов и алгоритмов моделирования, искусственного интеллекта, взаимодействия

автоматов и других средств кибернетики. В настоящее время эти базовые методы и алгоритмы могут быть реализованы, что приводит к новому всплеску «машинной революции» 70 - 80-х г.г., - повторению полной замены человека системами АСНИ, САПР, АСТПП, ГПС, АСУ и т.п. Разница в множестве «кибернетических публикаций» того времени и аналогичных в настоящее время часто сводится лишь к замене терминов «автоматизация», «интеграция», «сквозная автоматизация» и т.п. на новые термины - «цифровизация», «Индустрия 4.0», «интернет вещей» и т.п.

По существу, дело сводится к прогрессу орудий труда как самой подвижной составляющей производительных сил. Действительно, орудия труда – инструментарий исследователя, проектировщика, производственника, - с прогрессом инфраструктуры информационных технологий (ИТ) изменились существенно, что сделало доступным массовое применение интернета, глобальных и локальных сетей технологий больших данных (Big Data) для решения проектных и производственных задач. В этой связи в перспективе такой инструментарий будет все более интеллектуальным, интегрирующим уже хорошо апробированные и вновь создаваемые инструменты в составные, комплексные и многоцелевые средства. Однако, по-прежнему это всего лишь орудия труда Человека и применять их он должен «по месту и по делу».

Контрольные вопросы

1. Выделите в традиционном процессе проектирования и производства то, что относится к проектированию.
2. Что такое технологическая подготовка производства?
3. Какие «обратные связи» существуют в процессе проектирования и производства?
4. Что собой представляют существующие средства «цифровизации» - АСНИ, САПР, АСТПП, ГПС?
5. Каким образом организуется «движение» цифровой модели от технического задания до опытного образца?
6. Сформулируйте основные проблемы «цифровизации» проектирования и производства.
7. Индустрия 4.0 – революция или дальнейшее развитие информационных технологий?

Литература

1. Цифровая экономика России. URL: <http://www.tadviser.ru>
2. Schwab К. The Fourth Industrial Revolution URL: https://law.unimelb.edu.au/_data/assets/pdf_file/0005/3385454/Schwab-The_Fourth_Industrial_Revolution_Klaus_S.pdf
3. Кастелиани К. Автоматизация решения задач управления; М., МИР, 1982 г., 256с.
4. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009 г., 430с.
5. Сольницев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления. М., «Высш. Школа», 1991 г., 315с.
6. Р.И., Гришанова Л.И. Внедрение систем автоматизации проектирования. СПб. ГЭТУ «ЛЭТИ», 2016 г., 103с.

Глава 3. Подготовка предприятия к внедрению информационных технологий

3.1. Обследование предприятия до внедрения ИТ

Внедрение ИТ при проектировании и производстве КФС на существующих предприятиях происходит путём последовательного выбора, адаптации и практического применения инструментария ИТ с учетом особенностей, традиций, ресурсов каждого предприятия – участника создания КФС.

Решения, возникающие при внедрении ИТ задач, базируются на предварительном обследовании предприятия по состоянию и возможностям эффективного применения инструментария ИТ (цифровизации) на каждой проектной и производственной процедуре. Ввиду принципиального различия ролей головного предприятия, отвечающего за КФС в целом, и предприятий, создающих отдельные агрегаты и устройства, входящие в КФС (мультиагенты), инструментарий ИТ может существенно отличаться. Так для головного предприятия, координирующего процесс проектирования и производства КФС, подчиняющего локальные цели «предприятий – мультиагентов» глобальным целям создания КФС, необходимы такие инструменты, как TechNet, средства управления и координации на основе концепции сетецентризма, имитаторы работы КФС на основе математического моделирования. Предприятия, производящие составляющие подсистемы КФС, акцентируют состав инструментария ИТ на конкретные процедуры и операции схмотехнического, конструкторского и технологического этапов проектирования и производства (см. Гл.2).

В любом случае методология подготовки предприятия к внедрению ИТ-цифровизации одинакова и тесно связана с традиционным для предприятия процессом проектирования и производства.

Традиционный процесс проектирования изделий на ряде предприятий может быть рассмотрен как система, состоящая из двух подсистем: управляющей и управляемой. Функционирование систем осуществляется за счет управляющих воздействий, которые формируются на основе показателей качества, получаемых в результате разработки технического задания (рис. 3.1).

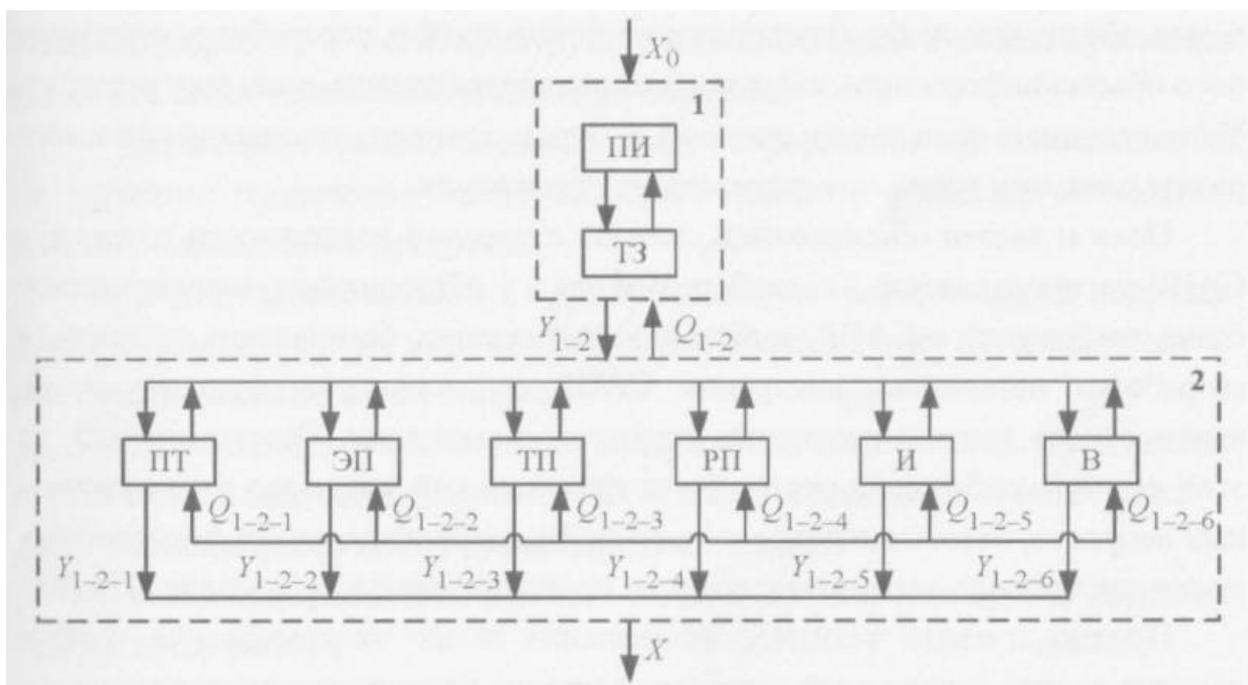


Рисунок 3.1 – Структурно-информационная схема процесса проектирования изделия (ПИ - предпроектные исследования, ТЗ – техническое задание, ПТ – предложение техническое, ЭП – эскизный проект, ТП – технический проект, РП – рабочее проектирование, И – испытания, В – внедрение)

На схеме приняты следующие условные обозначения: 1 – управляющая подсистема; 2 – управляемая подсистема; X_0 – исходная информация; X – информация, представленная технической документацией и опытным образцом объекта проектирования; Y_{1-2} – общее управляющее воздействие; Y_{1-2-1} , Y_{1-2-2} , Y_{1-2-3} , Y_{1-2-4} , Y_{1-2-5} , Y_{1-2-6} – частные управляющие воздействия; Q_{1-2} – общая информация о проектировании; Q_{1-2-1} , Q_{1-2-2} , Q_{1-2-3} , Q_{1-2-4} , Q_{1-2-5} , Q_{1-2-6} – частная информация о проектировании.

Управление разработкой проекта рассматривается как целевое воздействие, при котором объект из множества возможных состояний переходит в такое, которое соответствует заданной цели проектирования.

Цели и задачи обследования связаны с оценкой возможности внедрения *Информационных Технологий* (ИТ) на предприятии. Главной целью такого обследования является разработка требований к ИТ, выбор принципиальных технических решений и разработка программы внедрения ИТ на основании функционально- стоимостного анализа различных вариантов реализации. Соответственно, на этой стадии необходимо рассмотреть значительный комплекс взаимосвязанных вопросов, охватывающих экономические, организационные, технологические и программно-аппаратные аспекты проблемы совершенствования ИТ.

Предполагаемые технические решения и их экономические оценки должны носить вариантный характер, с учетом специфики данного предприятия, но опираться на единую концепцию построения ИТ как инструментария проектировщика.

При анализе автоматизации процесса проектирования определяют: количественные и качественные характеристики управляемой и управляющей подсистем (рис. 3.1), целесообразность внедрения ИТ и степень подготовленности соответствующей подсистемы для ее дальнейшего совершенствования.

Системный анализ процесса проектирования с целью внедрения ИТ удобно разделить на внешний и внутренний:

- основные задачи *внешнего* анализа процесса проектирования следующие: определение ее организационной структуры и перечня проектных процедур, выполняемых в ней; выявление связей между управляющей и управляемой подсистемами (рис. 3.1); построение или корректировка модели управляемой подсистемы;

- на этапе *внутреннего* анализа процесса проектирования (блок 2 на рис. 3.1) решаются задачи построения моделей конкретных проектных

процедур, выделенных в качестве типовых; определение их технико-экономических характеристик с учетом всей входной и выходной документации, а также технологии проектирования и испытаний.

Рассмотрим более подробно *внешний* анализ.

1. Первым шагом *внешнего* анализа процесса проектирования являются:

– раскрытие организационной структуры подразделений предприятия, занятых разработкой схем, конструкторским и технологическим проектированием, а также испытаниями опытных образцов;

– выявление технико-экономической информации об имеющихся на предприятии технических средствах, программно-методических комплексах и пакетах прикладных программ.

При этом прослеживаются пути прохождения информации от подразделения к подразделению, а также производится анализ этих путей для получения ответов на следующие вопросы:

– какие данные передаются по линиям связи локальной вычислительной сети, а какие с помощью документов на бумажных и машинных носителях;

– каковы фактические сроки передачи данных;

– какая информация не находит своих получателей в других подразделениях предприятия.

Информационный анализ целесообразно разбить на следующие операции:

составление перечня проектируемых изделий в целом и их составных частей;

– составление перечня проектных процедур (операций);

– составление полного перечня входной и выходной информации;

– классификация информации;

– выявление избыточной информации и дублирующих связей и циклов.

Техническую документацию классифицируют по следующим видам:

- входная документация;
- выходная документация;
- документация, вырабатываемая в результате выполнения проектных процедур;
- внутренняя документация, используемая исключительно внутри подразделений предприятия.

Результаты анализа удобно заносить в специальные формы, которые затем могут быть закодированы и храниться в памяти ЭВМ.

В результате выполнения первого шага внешнего анализа получают структурную схему управляемой подсистемы с привязкой к конкретным подразделениям предприятия.

2. На втором шаге *внешнего* анализа процесса проектирования:

- рассматриваются проектные процедуры, выполняемые в подразделениях предприятия;

- определяются типы проектных процедур и их количество по типам.

Классификация проектных процедур производится по признакам:

- сходства характера исходных данных и результатов, получаемых при выполнении различных проектных процедур;
- сходства категорий проектировщиков: разработчиков, конструкторов, технологов и испытателей.

Для составления перечня типовых проектных процедур анализируется проектная документация, входящая в проект. При этом учитываются такие технико-экономические характеристики, как:

- временные и финансовые затраты;
- объемы и виды информации, переработанной в процессе выполнения проектной процедуры.

На данном этапе обследования не требуется знать характеристики проектных процедур с точностью большей, чем это необходимо для их

качественного предварительного сравнения по вкладу в процесс проектирования.

3. Третьим шагом *внешнего* анализа является построение информационной модели системы проектирования, которая, по существу, представляет собой интегральное отображение результатов, полученных на предыдущих шагах.

На данном шаге целесообразно использовать итеративный процесс последовательного приближения. Каждая итерация такого процесса связана с получением информации об объекте и процессе проектирования при различной степени их дифференциации, например:

- на первой итерации может быть получена информация об объекте в целом без его расчленения;

- на второй итерации – о структурной схеме объекта; на третьей – о связях составных частей объекта и т. д.

Информационная модель также является основой для создания модели предметной области для обследуемого процесса проектирования.

Далее рассмотрим *внутренний* анализ процесса проектирования: на этом этапе уточняется и детализируется информация о процессе проектирования, полученная на этапе внешнего анализа.

1. Первым шагом внутреннего анализа является выделение из каждой группы:

- проектных процедур, полученных в результате классификации на этапе внешнего анализа;

- типовых проектных процедур, называемых проектными процедурами-представителями.

Выбор таких процедур осуществляется, как правило, экспертным путем.

2. На втором шаге для всех процедур-представителей определяются:

- количественные оценки;

- временные оценки.

Такие оценки осуществляются либо экспертным путем, либо методом хронометражных наблюдений (при этом последний позволяет получить более точные данные о проектных процедурах по сравнению с методом экспертных оценок).

На этом этапе также уточняются структура и объем информации, используемой в процессе проектирования, в том числе и нормативно-справочной документации. Эти сведения впоследствии используются при разработке баз данных ИТ (САПР, АСТПП и др.).

Вся информация, полученная в результате внутреннего анализа, заносится в специальные формы, которые затем кодируются и хранятся в памяти ЭВМ.

Таким образом, внутренний анализ завершается получением интегральных характеристик по трудоемкости, длительности и ряду других параметров выполнения типовых проектных процедур-представителей. На основе внешнего и внутреннего анализа оценивается стратегия внедрения ИТ. При этом выявляют:

- объекты автоматизации (проектные процедуры);
- состояние технических средств автоматизации проектных процедур;
- уровень автоматизации проектных процедур;
- уровень унификации и стандартизации конструкторско-технологических решений.

В части составляющей ИТ – САПР по результатам дается принципиальная оценка необходимости разработки новой САПР либо совершенствования существующих инструментов САПР. При этом необходимо оценить уровень подготовленности предприятия по следующим показателям:

- обеспеченность специалистами, имеющими опыт работы с инструментами САПР;
- наличие необходимых технических средств САПР;

- возможность финансирования работ по САПР;
- соответствие организационной структуры предприятия условиям применения САПР.

Оценка стратегии внедрения САПР или совершенствования имеющихся на предприятии инструментов САПР завершается выдачей исходных данных для разработки технического задания на внедрение САПР, которое формируется в соответствии с ГОСТ 34.602–89.

Эффективность системного анализа процесса проектирования в целях внедрения САПР в значительной степени зависит от организации работ по его обследованию (рис. 3.2). Для проведения работ на данном этапе формируется рабочая группа, которая руководствуется приказом руководителя предприятия, в котором должны быть определены:

- состав обследуемых подразделений, занятых проектированием конкретных изделий;
- состав исполнителей, участвующих в обследовании;
- обязанности, выполняемые каждым подразделением и исполнителем, проводящим обследование;
- сроки проведения обследования и порядок представления результатов работы.

Обследование выполняется специалистами подразделений предприятия, в число которых включаются:

- системотехники;
- разработчики САПР;
- опытные специалисты по соответствующему направлению техники.

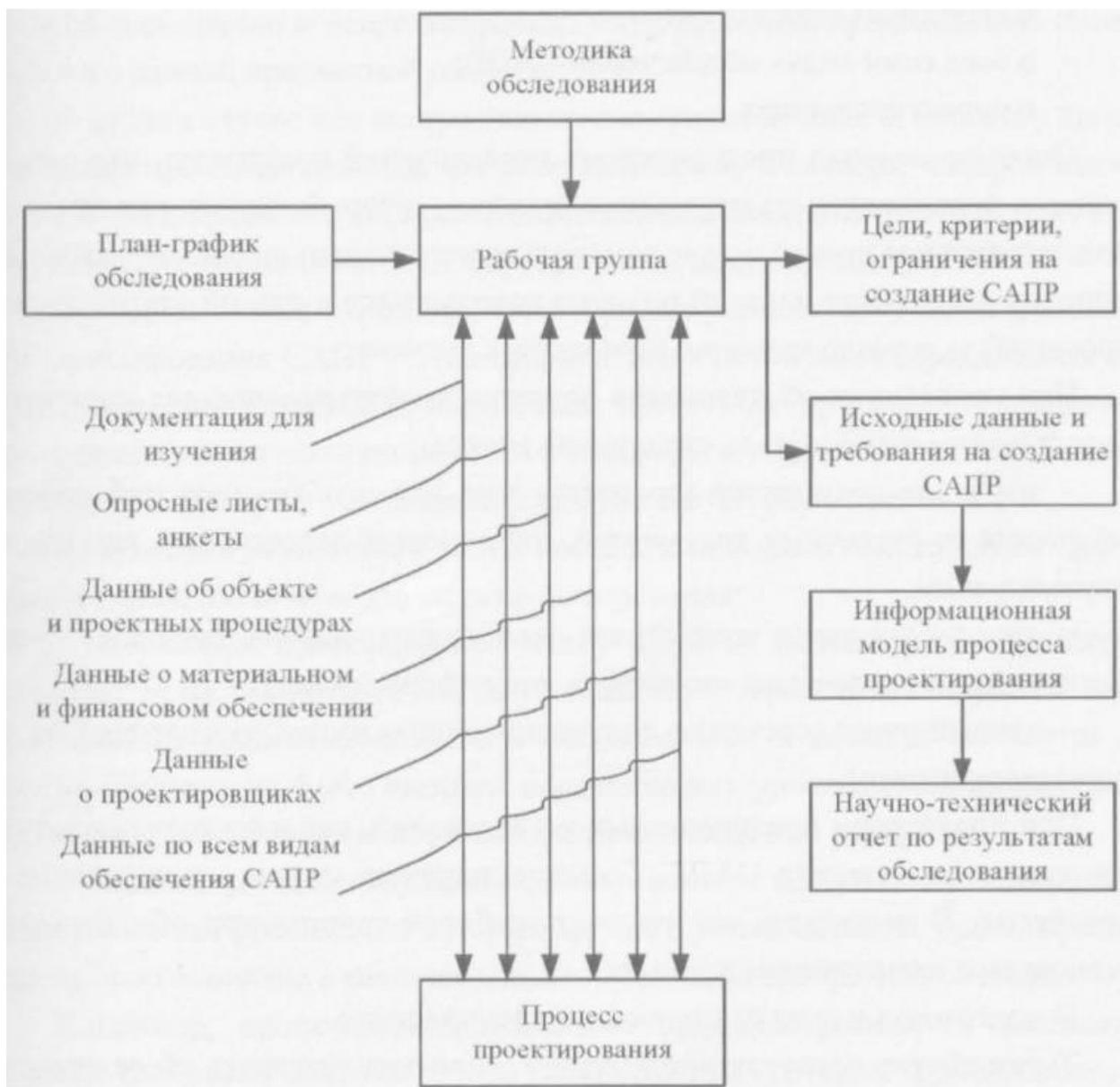


Рисунок 3.2 – Схема организации выполнения системного анализа процесса проектирования

Как справедливо отмечает один из ведущих специалистов в области автоматизации К. Кастеллани: «Исключительно важно, чтобы люди непосредственно на своих рабочих местах ощутили необходимость пересмотра процедур, которыми они пользуются. Тогда разработка задачи будет иметь серьезные шансы на успех, поскольку совместный труд разработчиков и пользователей будет протекать в обстановке сотрудничества и согласия, которая крайне желательна для благополучного выполнения разработки».

3.2. Методика обследования предприятия перед внедрением информационных технологий

При проведении обследования процесса проектирования для получения данных можно использовать следующую методику:

- изучение документов (состоит в том, что необходимая информация выбирается из различных документов, отражающих деятельность проектных подразделений);
- анкетирование (в этом случае необходимые данные получают путем заполнения специалистами соответствующих форм (анкет));
- устный опрос (состоит в получении данных путем проведения бесед с проектировщиками).

При проведении предпроектных исследований, как и на всех последующих стадиях внедрения ИТ, большое значение имеют планирование и управление. В частности, деятельность рабочей группы при обследовании организуется в следующем порядке:

- 1) подготовка и выпуск приказа по предприятию;
- 2) разработка, согласование и утверждение плана-графика обследования;
- 3) сбор данных, проведение опроса;
- 4) анализ результатов обследования;
- 5) моделирование процесса проектирования, в том числе с внедрёнными инструментами ИТ;
- 6) подготовка научно-технического отчета.

Рассмотрим применяемую методику обследования проектно-производственного предприятия, занимающегося проектированием бортовых цифровых ЭВМ (БЦВМ) как подсистем, одного из мультиагентов, КФС.

Функциональная схема процесса проектирования изделий в условиях функционирования ИТ - это инвариантная к объектам, упорядоченная

совокупность информационно связанных проектных процедур и операций, приводящих к составлению описания, необходимого для изготовления и эксплуатации в заданных условиях еще не существующего объекта.

В зависимости от того, в какой последовательности выполняются процедуры и этапы, различают два вида проектирования:

– *восходящее* проектирование (*снизу-вверх*: от частей к целому), которое применяется на тех иерархических уровнях, на которых проектируются типовые объекты, предназначенные для использования в качестве элементов во многих объектах на более высоких иерархических уровнях (например, серийные микросхемы, стандартные ячейки матричных БИС и т. п.);

– *нисходящее* проектирование (*сверху-вниз*: от целого к его частям) применяется на тех уровнях, на которых проектируются объекты, ориентированные на использование в качестве элементов в одной конкретной системе.

Например, проектированию изделий приборостроения (в частности, БЦВМ) свойствен итерационный характер, при котором приближение к окончательному результату осуществляется путем многократного выполнения одной и той же последовательности проектных процедур с корректировкой для этой последовательности данных. Итерации могут охватывать различные части процесса проектирования, включающие как несколько этапов, так и несколько операций.

Схема концептуальной модели процесса проектирования изделий БЦВМ, построенного на базе микропроцессорной техники, представлена на рис. 3.3, из которого видно, что перечень уровней *нисходящего* проектирования изделия (от составления технического задания до выпуска технической документации на проект) содержит следующие вертикальные уровни проектного процесса:

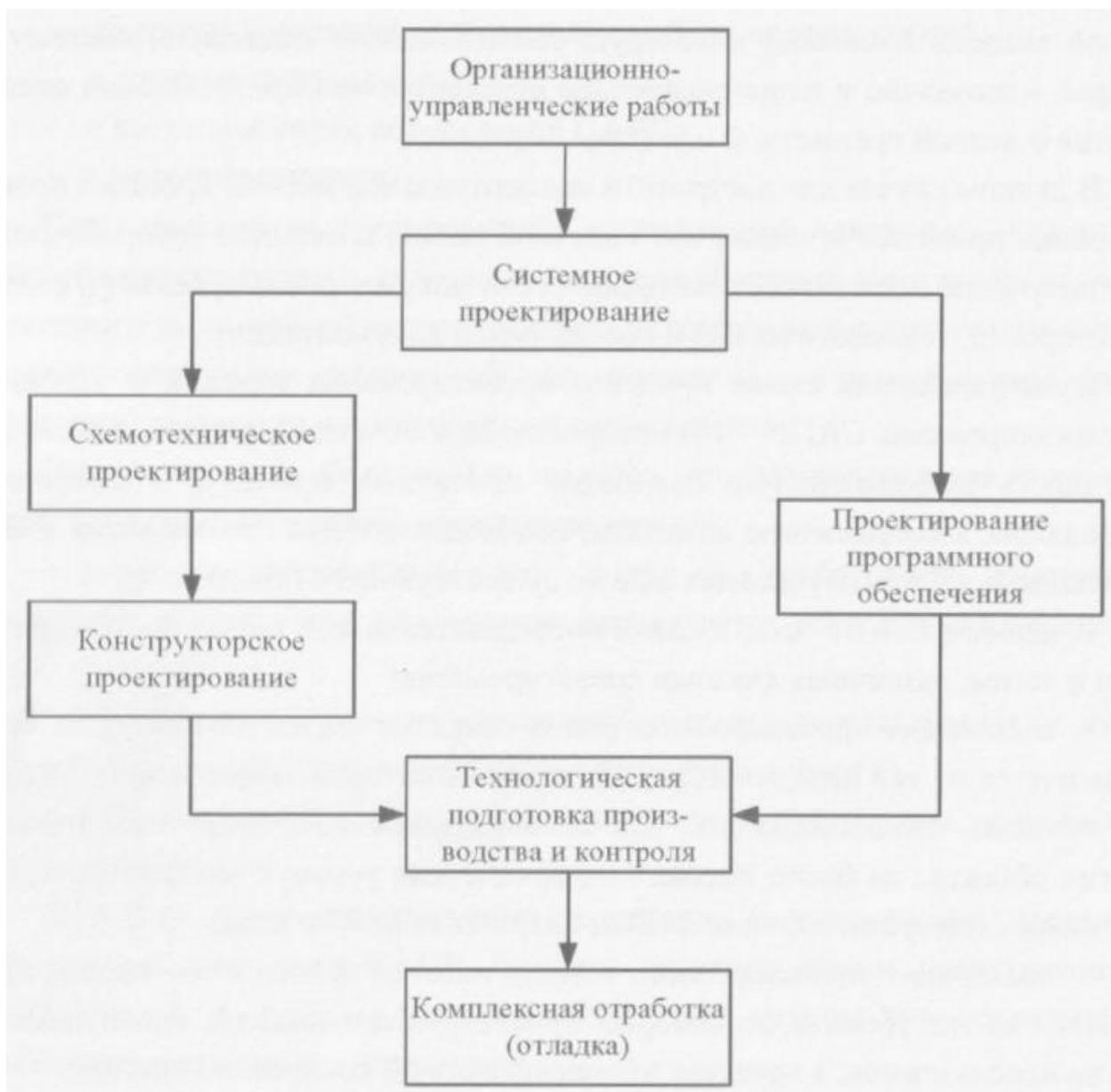


Рисунок 3.3 – Схема концептуальной модели процесса проектирования БЦВМ

1. *Системное проектирование*, включающее два подуровня:

– внешнее проектирование (при котором выбираются основные направления схемотехнических, конструкторских и технологических решений исходя из заданного технического задания и на основе проведенного патентного поиска, накопленного опыта и творческих достижений разработчиков);

– структурное проектирование (заключается в выделении функциональных частей БЦВМ и связей между ними, а также в выборе элементной базы).

2. *Схемотехническое проектирование* позволяет разработать принципиальные схемы отдельных частей БЦВМ и выбрать ее параметры. На этом уровне выполняется математическое моделирование процессов функционирования реальной аппаратуры, что позволяет заменить макетирование этой аппаратуры и провести статистические исследования, связанные с анализом разброса параметров. Соответствующая проектная процедура, так называемый *параметрический синтез* (о котором речь пойдет далее), дает возможность на основе модели устройства выбрать числовые значения параметров устройства для заданной разработчиком структуры.

3. *Проектирование программного обеспечения*, при выполнении которого разрабатывают рабочие программы и конструкторскую документацию на микросхемы памяти.

4. *Конструкторское проектирование*, включающее выбор формы, разработку конструктивов, их компоновку и размещение, трассировку соединений, изготовление конструкторской документации.

5. *Технологическая подготовка производства и контроля*, состоящая в разработке маршрутной и операционной технологии, управляющих программ для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), проверке изделия на технологичность.

6. *Комплексная отработка (отладка)* включает в себя проверку образца изделия на работоспособность, соответствие техническим условиям, разработку эксплуатационной документации.

Рассматривая ИТ с соответствующими САПР, АСТПП как организационно-техническую систему, необходимо к вышеперечисленным уровням проектирования добавить еще один- *организационно-управленческие работы*. На этом уровне (при нисходящем проектировании в рамках текущей и прогнозной координационно-управляющей и организационно-методической деятельности) выпускаются приказы, утверждаются планы-графики, калькуляции, заключаются договоры; при этом каждый документ оформляется по утвержденной форме.

Анализ организационно-управленческих работ рассмотрим на примере обследования эксплуатационно-дистрибьюторского предприятия (рис. 3.4) в связи с тем, что «вес» таких работ на предприятии является наибольшим.

На начальном уровне проектирования (рис. 3.4) решаются типовые задачи для каждой составной части сложного изделия (объекта проектирования). В процессе проектирования *сверху-вниз* изделие наибольшего уровня сложности разбивается (декомпозируется) на составные части (узлы, устройства, компоненты). При этом для каждой составной части изделия, которую требуется спроектировать, формируется частное техническое задание.

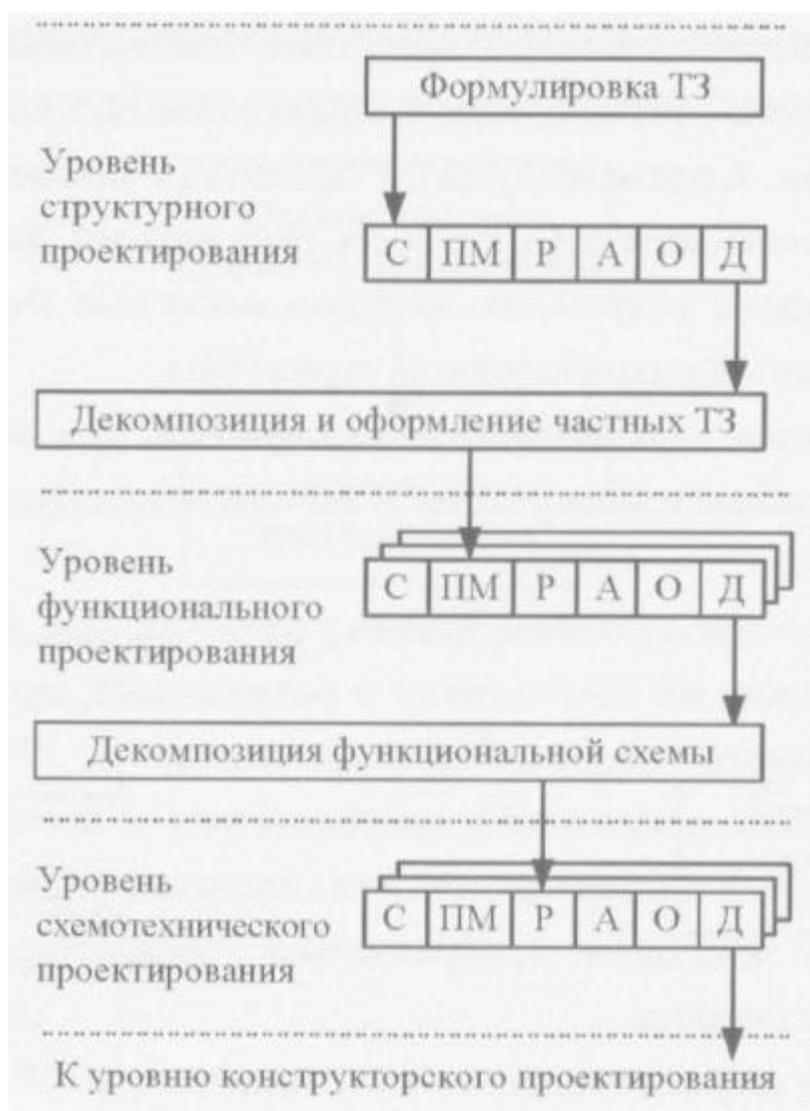


Рисунок 3.4 - Уровни начальных этапов процесса проектирования
(ТЗ - техническое задание, С - синтез, ПМ - построение модели, Р - расчет,
А - анализ, О - оценка, Д - выпуск документации)

На рис. 3.5 представлена схема, позволяющая установить взаимосвязь типовых проектных задач. Вложенность задач одна в другую свидетельствует о рекурсивном выполнении одних и тех же процедур на каждом уровне.

При *синтезе* создаются, а при *анализе* оцениваются проектные решения. Процедуры *анализа* делятся на процедуры одно и многовариантного анализа:

– *одновариантный анализ* для заданных внутренних и внешних параметров состоит в определении значений выходных параметров объекта; в частности, при моделировании подобная задача обычно сводится к однократному решению уравнений, составляющих математическую модель;

– *многовариантный анализ* заключается в исследовании свойств объекта в некоторой области пространства внутренних параметров, что требует при моделировании многократного решения уравнений (многократного выполнения одновариантного анализа).

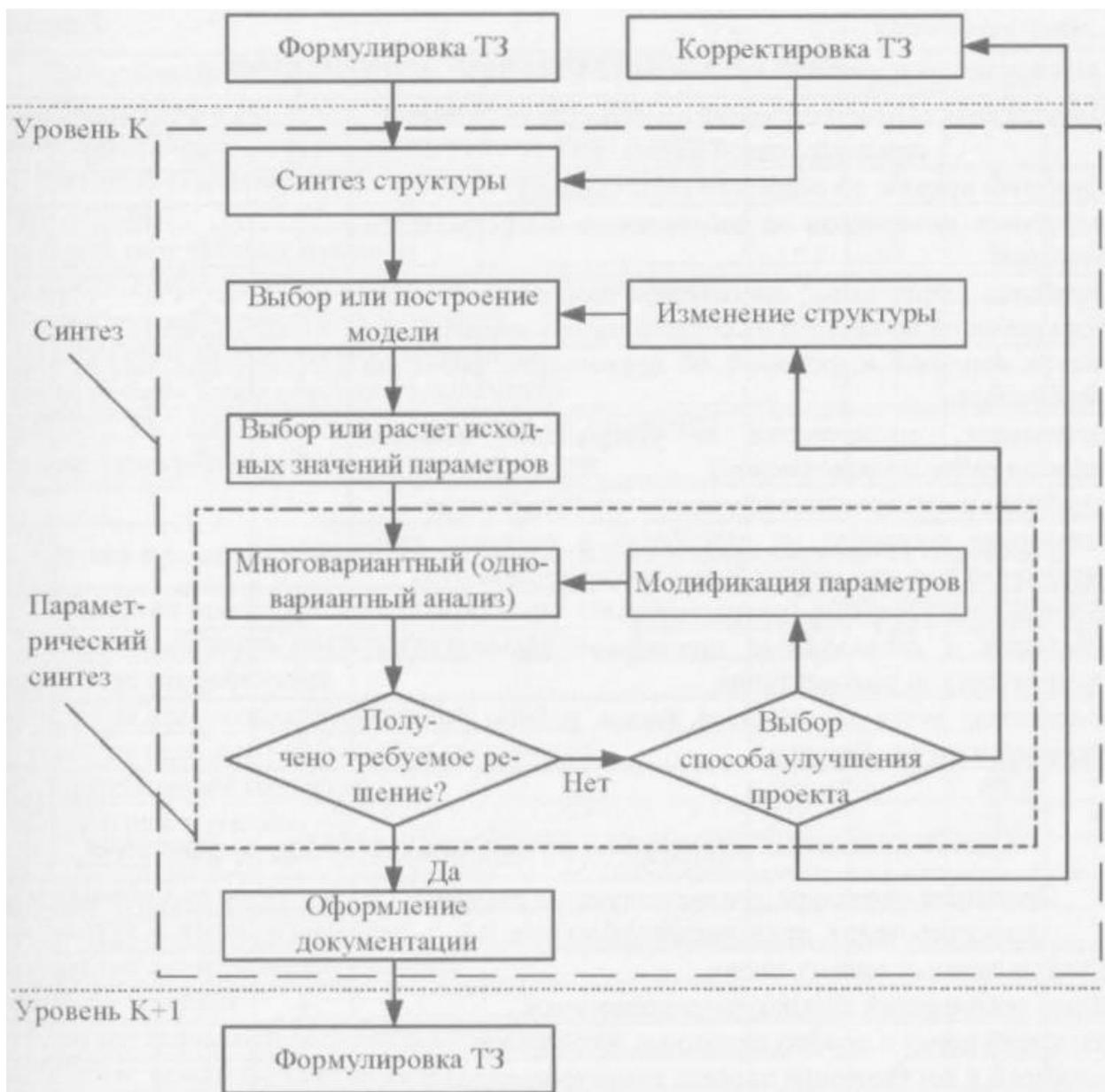


Рисунок 3.5 – Взаимосвязь типовых проектных процедур
(ТЗ - техническое задание)

Процедуры синтеза делятся на процедуры структурного и параметрического синтеза:

- *структурный синтез* (состоит в определении структуры объекта: перечня его составных частей и способа связи этих частей между собой);

- *параметрический синтез* (заключается в определении числовых значений параметров объекта (составных частей) при заданной структуре и условиях работоспособности этого объекта, т. е. требуется найти точку или

область в пространстве внутренних параметров, в которых выполняются те или иные условия (обычно условия работоспособности)).

Состав работ и проектных процедур по всем уровням и этапам проектирования представлен в табл. 3.1 – 3.7 (обозначения стадий проектирования, представленных в таблицах, аналогичны приведенным на рис. 2.6).

Таблица 3.1

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Разработка приказа об открытии темы (заказа)	+	+	-	-
Подготовка материалов по составлению и оформлению договоров	+	+	-	-
Разработка калькуляции, ориентировочной сметной стоимости работ по договору и их согласование с заказчиком	+	+	-	-
Выпуск приказов и указаний об организации работ по теме (заказу)	+	+	+	+
Составление, согласование и утверждение планов-графиков работ по теме (заказу)	+	+	+	+
Разработка и согласование протокола взаимодействия	+	-		-
Заключение договоров на разработку и поставку комплектующих изделий систем и электрорадиоэлементов	-	+	-	-
Заключение договоров с контрагентами	+		-	
Разработка и согласование протоколов номенклатуры конструкторской документации	-	-	+	-
Оформление актов на закрытие этапов работы по теме (технических и финансовых)	+	+	+	+

Таблица 3.2

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Анализ исходных данных заказа	+	+	-	-
Анализ технической литературы и прототипов	+		-	-
Патентный поиск и подбор патентных материалов	+	+	-	-
Разработка и согласование проекта технического задания	+	-	-	-
Выбор и обоснование структурной схемы	+	-	-	-
Разработка схемы деления	+	-	-	-
Математическое описание задач, выбор численных методов решения задач	+	-	-	-
Разработка алгоритмов работы систем и устройств	+	-		-
Определение требований к техническим средствам систем и устройств	+	-	-	-

Таблица 3.3

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Разработка и согласование системы связей	-	+	-	-
Составление перечня электрорадиоэлементов изделия	-	+	+	-
Составление тематических карточек на разработку новых электрорадиоэлементов	-	+	-	-
Разработка алгоритмов микропрограмм микропроцессорных устройств	-	+	-	-
Разработка принципиальных электрических схем и перечней элементов (макетирование, моделирование составных частей изделия)	-	+	+	+
Разработка карт рабочих режимов	-	+	+	+

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Разработка структур микрокоманд и разработка микропрограмм микропроцессорных устройств	-	+	-	-
Разработка схем электрических соединений		+	+	+
Разработка схем электрических подключений		+	+	+
Разработка частных технических заданий на проектирование конструктивно-функциональных модулей	-	-	+	-

Таблица 3.4

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Составление спецификаций	+	+	+	+
Составление ведомости спецификаций	+	+	+	+
Составление ведомости ссылочных документов	+	+	+	+
Расчет драгоценных металлов	-	-	+	+
Расчет цветных металлов	-	-	+	+
Расчет показателей уровня стандартизации и унификации	-	+	+	+
Составление паспорта	-	-	-	+
Составление ведомости упаковки	-	-	-	+
Составление инструкции по упаковке	-	-	-	+
Разработка этикетки	-	-	-	+
Составление ведомости держателей подлинников	-	-	-	+
Составление пояснительной записки	+	+	+	+

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Составление ведомости ЗИП (запасных изделий прилагаемых)	-	-	-	+
Составление инструкции по использованию ЗИП (запасных изделий прилагаемых)	-	-	-	+
Составление формуляра	-	-	-	+
Составление описи	-	-	-	+
Составление карт технического уровня и качества	-	-	+	+
Расчет нормы расхода запасных частей на 100 ч эксплуатации	-	-	-	+
Расчет нормы расхода материалов на 100 ч эксплуатации	-	-	-	+
Разработка сборочных чертежей	-	+	+	+
Разработка габаритных чертежей	-	+	+	+
Разработка чертежей деталей (слоев)	-	+	+	+
Разработка чертежей общего вида	-	+	+	+
Разработка электромонтажных чертежей	-	+	+	+
Разработка монтажных чертежей	-	+	+	+
Разработка упаковочных чертежей	-	+	+	+
Составление ведомости документов на носителях данных	-	+	+	+
Составление данных контроля	-	+	+	+
Составление данных сверления	-	+	+	+
Составление данных фотошаблонов	-	+	+	+
Составление таблиц проверки монтажа электрических схем	-	+	+	+
Теплофизические расчеты	-	-	+	+

Проектная процедура, соответствующая стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Расчеты систем охлаждения	-	-	+	+
Расчеты показателей надежности и радиационной стойкости	-	-	+	+

Таблица 3.5

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Разработка технического задания на программирование	-	-	-	+
Разработка карт распределения памяти микропроцессорных устройств	-	-	-	+
Разработка таблиц данных (рабочих программ)	-	-	-	+
Составление данных программ (на машинных носителях)	-	-	-	+
Составление спецификаций	-	-	-	+
Разработка сборочных чертежей программного обеспечения	-	-	-	+
Разработка комплекта документации по программному обеспечению	-	-	-	+
Разработка методики испытаний программ	-	-	-	+

Таблица 3.6

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Отработка, анализ изделий на технологичность	-	-	+	+
Проектирование перспективных технологических процессов	-	+	+	+
Проектирование элементов производственных систем	-	-	+	+

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Разработка технологической планировки производственных подразделений	-	-	-	+
Определение спецификации рабочих мест	-	-	-	+
Проектирование технологических процессов		+	+	+
Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ (числовым программным управлением)	-	-	-	+
Разработка оснастки, инструмента и мерительного инструмента	-	+	+	+
Разработка средств контроля	-	-	+	+

Таблица 3.7

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Составление руководств по технической эксплуатации	-	-	-	+
Составление регламента технического обслуживания	-	-	-	+
Составление инструкций по проверке, настройке и регулировке	-	-	-	+
Составление программ и методик испытаний	-	-	-	+
Составление инструкций по стыковке	-	-	-	+
Составление инструкций по проверке	-	-	-	+
Составление руководства по использованию эксплуатационных документов	-	-	-	+
Составление инструкций по эксплуатации	-	-	-	+

Этап работы, соответствующий стадии проектирования, представленной на рис. 1.4	Стадия проектирования			
	ПТ	ЭП	ТП	РП
Составление инструкций по техническому обслуживанию	-	-	-	+
Разработка технических условий	-	-	-	+
Проверка работоспособности изделия	-	-	-	+
Проверка изделия на соответствие техническим условиям	-	-	-	+
Анализ результатов испытаний, составление протокола по результатам испытаний	-	-	-	+

После определения перечня этапов проектирования (см. табл. 3.1) и проектных процедур (см. табл. 3.2 – 3.7) для каждого уровня проектирования объекта (см. рис. 3.4) может быть построена матрица (табл. 3.8), столбцы которой определяются количеством и составом проектных процедур, а строки соответствуют характеристикам проектных процедур.

Таблица 3.8

Код проектной процедуры	Код средства автоматизации	Признак автоматизации (0, 1, 2)	Трудоемкость проектной процедуры, чел.-ч	Количество листов документа в формате А4	Стоимость выполнения процедуры, тыс. р.

Как видно из табл. 3.8, по признаку автоматизации проектные процедуры подразделяются на следующие виды:

- код 0: выполняемые вручную;
- код 1: выполняемые путем частичной автоматизации;
- код 2: выполняемые путем полной автоматизации.

Матричное представление проектных процедур, получаемое после заполнения табл. 3.8, дает возможность, наряду с использованием хорошо разработанного аппарата матричных преобразований при формировании

матриц смежности и матриц инцидентий, естественно перейти к методам сетевого анализа на графовых ориентированных и неориентированных структурах.

Предлагаемые К. Штаффом подходы к “внедрению 4.0” могут быть использованы только после проведения обследования предприятия. Изложенная здесь методика является при этом необходимым этапом.

Приведенная методика подготовки предприятия к внедрению ИТ подтверждена практическими результатами внедрения ИТ на предприятиях С. Петербурга, разрабатывающих подсистемы КФС.

Контрольные вопросы

1. Каковы цели и задачи обследования предприятия перед внедрением ИТ?
2. Каков порядок подготовки предприятия к внедрению ИТ?
3. Назовите основные позиции методики обследования проектно-производственного предприятия?
4. Каким образом осуществляется декомпозиция процессов проектирования и производства на отдельные процедуры?
5. Назовите основные стандарты, применяемые при внедрении ИТ.
6. Какого отличие инструментария ИТ головного предприятия КФС и предприятий-мультиагентов.

Литература

1. Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум. М.: “Финансы и статистика”, 2006г., 192с.
2. Сольнищев Р. И., Гришанова Л. И. Внедрение систем автоматизации проектирования: учеб. пособие. Изд-во СПбГЭТУ, 2016г, 110с.
3. <https://www.iso.org/> - официальный сайт международной организации по стандартизации ISO.
4. Внедрение и развитие Индустрии 4.0. Основы, моделирование и примеры из практики. М.: “Техносфера”, 017г., 294с.
5. Материалы из интернет-сайтов по теме 3.

Глава 4. Математические модели в обеспечении информационных технологий

Математические модели (ММ) входят в математическое обеспечение ИТ, которое включает математические модели, методы и алгоритмы, являющиеся фундаментом для построения программного обеспечения.

В основе любого инструментария ИТ и соответствующего пакета прикладных программ лежит пирамида изготовления программного продукта (рис. 4.1).

Математические модели включают: операторные, дифференциальные алгебраические уравнения, графические и другие математические объекты.

Методы представляют собой математические средства решения задач.

Алгоритмы - это последовательности выполнения операций над исходными данными, приводящая к результату. Вычислительный алгоритм - алгоритм с учетом особенностей программирования и «машинной математики».

Математические модели (ММ) КФС на концептуальном уровне назовём «метамоделями КФС». Такие ММ служат для оценок самой концепции создания КФС (см. примеры в главе 1).

На следующих уровнях при решении проектно-производственных задач для подсистем КФС применяются ММ, соответствующие конкретным этапам и процедурам проектирования и производства.

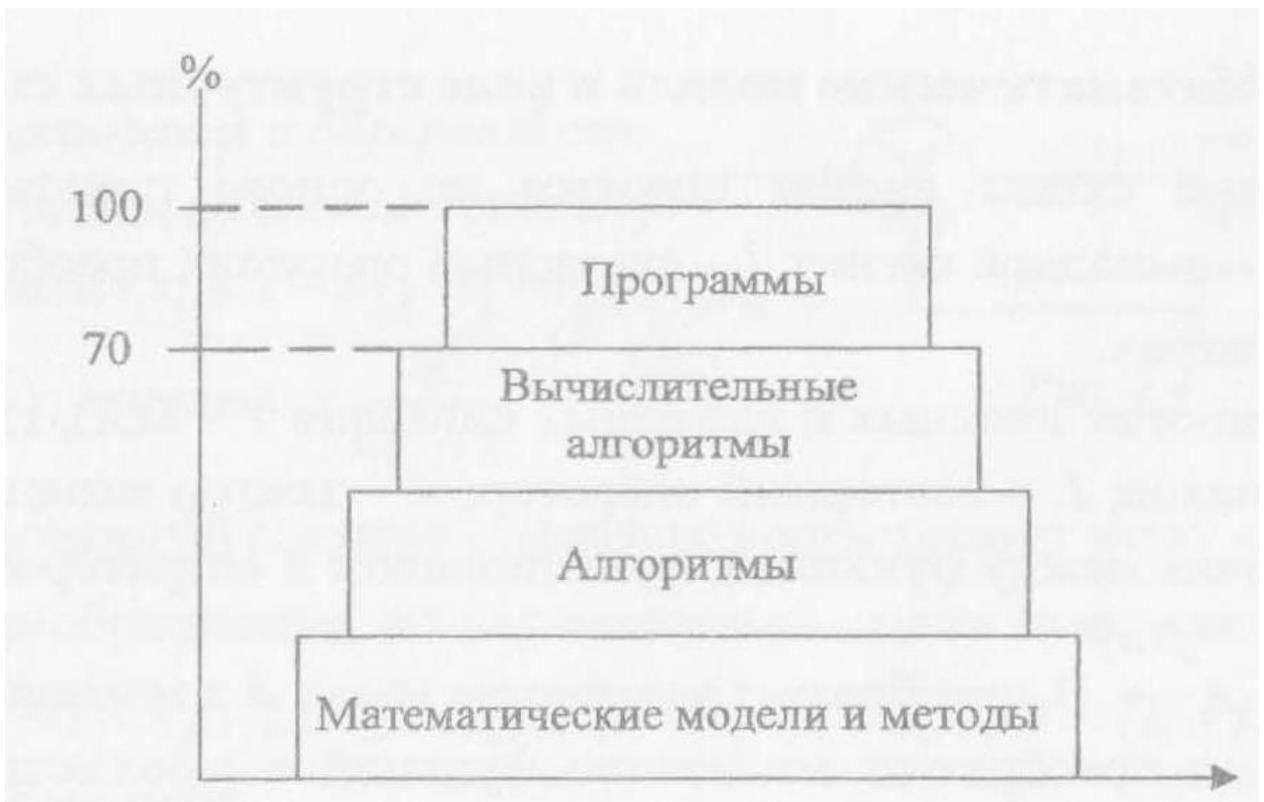


Рисунок 4.1 – Математическое обеспечение

Классификацию математических моделей, удобно представить в виде математических моделей систем, устройств и элементов. При этом системы могут входить в КФС как подсистемы. Например, летательный аппарат (ЛА) - это система (рис. 4.2). В то же время система, ЛА является подсистемой КФС – пилотажно-навигационного – наземного сопроводительного комплекса.

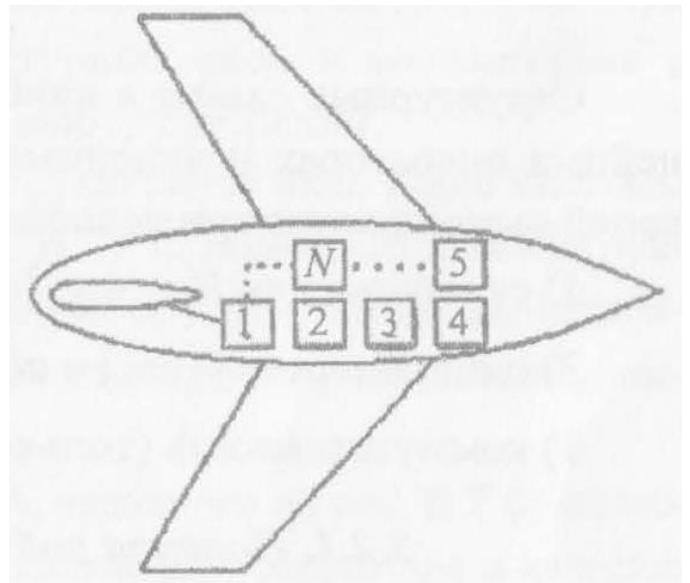


Рисунок 4.2 – Летательный

аппарат как КФС

В системе ЛА можно выделить следующие устройства:

1 — управления рулевыми агрегатами; 2 — преобразующие; 3 — автопилот; 4 — визуализации; 5 — жизнеобеспечения; N- бортовая цифровая вычислительная машина. В устройствах имеются элементы — механические,

электрические, оптические, гидравлические и другие физически разнородные части устройств.

Математические модели (ММ) систем, как множество устройств, объединенных единой целью (например, в ЛА - перевозка грузов и пассажиров), представляются в виде: структурных схем, графов, дифференциальных уравнений, которые позволяют принимать решения на начальных этапах проектирования.

ММ устройств рассматриваются в виде дифференциальных уравнений, алгебраических уравнений и других математических объектов, раскрывающих операторы, составляющие ММ систем; ММ элементов представляются в виде дифференциальных уравнений в частных производных, трансцендентных уравнений, геометрических моделей, которые применяются на последующих этапах проектирования.

При принятии проектных решений «проигрывается» множество ММ на всех этапах, которые продвигаются по «спирали проектирования».

Создание КФС начинается с анализа концепции, качественной оценки с помощью надсистемных моделей, которые на этом уровне назовём **метамоделями**.

Рассмотрим такие ММ на примере СУПТ (см. главу 1)

При разработке метамodelей СУПТ можно использовать законы сохранения в виде уравнений баланса. Уравнения баланса могут представляться уравнениями материального, энергетического баланса, баланса равновесия сил.

Уравнение материального баланса основано на законе сохранения массы вещества и может быть представлено разностью между приходом и расходом

вещества, равной изменению его количества в рассматриваемом объекте. В

стационарном режиме не может происходить ни убыль, ни накопление. В этом случае уравнение материального баланса для n -го количества вещества может быть записано в виде

$$\sum_{i=1}^n (G_i^n - G_i^p) = 0, \quad (4.1)$$

где G_i^n – приход i -го вещества; G_i^p – расход i -го вещества.

С учетом изменения количества вещества в объекте уравнение материального баланса может быть записано в виде

$$\sum_{i=1}^n [G_i^n(t) - G_i^p(t)] = \sum_{i=1}^n \Delta G_i(t),$$

где $G_i^n(t)$, $G_i^p(t)$ – мгновенные значения прихода и расхода i -го вещества соответственно; $\Delta G_i(t)$ – мгновенное значение накопления i -го вещества.

Рассматривая малый промежуток времени Δt от этого уравнения при $\Delta t \rightarrow 0$, перейдем к дифференциальному уравнению:

$$\sum_{i=1}^n \frac{dG_i}{dt} = \sum_{i=1}^n [K_i^n G_i^n(t) - K_i^p G_i^p(t)], \quad (4.2)$$

где K_i^n и K_i^p – коэффициенты пропорциональности.

Решение уравнения (4.2) при известных начальных условиях и коэффициентах K_i^n , K_i^p позволит оценить состояние баланса в КФС во времени.

При определении усреднённых оценок $\Delta G_i(t) = \overline{\Delta G_i}$ можно воспользоваться интегральным уравнением в форме:

$$\overline{\Delta G_i} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \int_0^T [G_i^n(t) - G_i^p(t)] dt \quad (4.3)$$

Материальный баланс в переходном процессе, описывающем смешивающую систему, в которую поступают два потока веществ, а выходит один смешанный поток, может быть выражен как изменение количества вещества, находящегося в резервуаре, например, на участке атмосферы между «трубой» и измерителем загрязняющего вещества, равное разности между количеством притекающих веществ и количеством вытекающего вещества за одно и то же время:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 - Q_3 C_3 = V \frac{dC_c}{dt}, \quad (4.4)$$

где Q_1, Q_2 — потоки поступления в смешивающее устройство 1-го и 2-го потоков веществ соответственно; C_1, C_2 — концентрации веществ в 1-м и во 2-м приходящих потоках; Q_c, C_c — расход вещества из емкости и его концентрация соответственно; V — объем смешивающего устройства.

В установившемся режиме количество вносимого вещества должно быть равно количеству выносимого вещества, т. е.:

$$Q_1 C_1 + Q_2 C_2 = Q_c C_c \quad (4.5)$$

Не менее редко, чем материальный баланс, применяется энергетический баланс, основанный на законе сохранения энергии. В установившемся режиме количество энергии, притекающей в объект, равно количеству энергии, уходящей из него.

Рассмотрим уравнения материального баланса в переходном процессе систем «Природа – Техногеника» без управления (см. рис. 3 в главе 1) согласно уравнению (4.2).

Уравнения материального баланса для **окружающей среды предприятия источника В** представим в виде:

– окружающая среда –

$$\frac{dz_1^i}{dt} = - \sum_{j=1} K_{ij}^{(1)} X_j + \sum_{j=1} K_{ij}^{(1)} Y_j; \quad (4.6)$$

– предприятие – источника ЗВ –

$$\frac{dz_2^i}{dt} = \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} X_j - \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} Y_j - \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} R_j; \quad (4.7)$$

– потребители – окружающая среда

$$\frac{dz_3^i}{dt} = \sum_{j=1} K_{ij}^{(3)} R_j - \sum_{j=1} K_{ij}^{(3)} Y_j; \quad (4.8)$$

В уравнениях (4.6, 4.7, 4.8) обозначено: Z_1^i - масса материалов i -го типа в окружающей среде (т, кг); Z_2^i – масса материалов i -го типа на предприятии;

Z_3^i – материалов i -го типа в потреблении; $\sum K_{ij}^{(1)} X_j$ – масса сырья для производства продукции j -го типа X_j в окружающей среде; $\sum K_{ij}^{(2)} X_j$ – масса сырья для производства продукции X_j на предприятии; $\sum K_{ij}^{(1,2,3)} Y_j$ – масса отходов; $\sum K_{ij}^{(2)} R_j$ – масса продукции предприятия.

Значения коэффициентов $K_{ij}^{(1,2,3)}$ определяются из уравнений связи экспериментально.

Из уравнений (4.6) - (4.8) можно получить частный случай уравнения статики:

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{j=1} K_{ij}^{(1)} X_j = \sum_{j=1} K_{ij}^{(1)} Y_j \\ \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} X_j = \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} Y_j + \sum_{j=1} K_{ij}^{(2)} R_j \\ \sum_{j=1}^n K_{ij}^{(3)} Y_j = \sum_{j=1}^n K_{ij}^{(3)} R_j \end{array} \right] \quad (4.9)$$

Рассмотренные здесь метамоделли СУПТ используются при качественной оценке и моделировании ЗСУПТ.

В общем случае на концептуальном уровне создания КФС метамоделли представляются совокупностью уравнений потоков, включающих помимо материальных, - энергетические и информационные. Уравнения балансов энергетических потоков отображают накопление, передачу и преобразование энергии. Уравнения информационного баланса отображают приём, переработку, передачу и хранение информации.

Разработка целостных метамоделей КФС соответствующих совместному движению всех трех потоков является весьма сложной задачей, подходы к решению которой рассматриваются в общей теории систем Л. Берталанфи, М. Месаровичем, Э. Наппельбаумом, Л. Заде, Д. Поспеловым и др. на основе теории множеств, математической логики, пространства состояний динамических систем.

Задача построения метамоделей в СУПТ значительно упрощается при рассмотрении каждого предприятия — источника ЗВ — с частью природы, прилегающей к этому предприятию.

После принятия концептуального решения с помощью метамоделей следует более детальное представление КФС на уровне систем, которое покажем также на примере СУПТ.

СУПТ состоит из объекта управления (ОУ) и контура управления, под которым в общем случае понимается и управление разомкнутой СУПТ с человеком- оператором и лицом, принимающим решения (ЛПР).

Математические модели СУПТ в общем случае (см. рис. 1.1) чрезвычайно сложны, поскольку они должны включать такие подсистемы, как население, промышленные и сельскохозяйственные предприятия, в том числе предприятия по переработке отходов, жилищно-коммунальное хозяйство, транспорт, природные подсистемы — газовые, жидкостные, твердые с учетом взаимодействия физических полей, диффузий химических соединений. При этом важнейшей проблемой является разработка интерфейсов между математическими моделями различных подсистем и упрощение ММ для инженерных решений.

Объект управления включает потоки ЗВ, распространяющиеся в окружающей природной среде от выхода с источника ЗВ до мест их измерения. Такой объект управления в общем случае описывается операторными уравнениями в классе уравнений с распределенными параметрами:

$$L\{Y(q, \Lambda, t)\} = X(q, t), q \in D, t \in 0, T; \quad (4.10)$$

$$B\{Y(q, \Lambda, t)\} = G(q, t), q \in D^*, t \in 0, T;$$

$$I\{Y(q, t)\} = Y_0(q, t), q \in D, t \in 0;$$

$$D^* \subset D,$$

где L — оператор, действующий из пространства X в пространство Y ; B — оператор краевых условий; I — оператор начальных условий; Y — вектор выходных сигналов (различных ЗВ), распределенных по пространственным параметрам q , и времени t ; X — вектор входных воздействий на ОУ

(продукция предприятия — источника ЗВ, сырье, энергия и т. д.), распределенных по q, t, Λ — параметры ОУ; q — пространственные параметры — координаты в земной системе координат ζ, η, ξ .

Если входное воздействие $X(q, t)$ не находится в нашем распоряжении, то движение этой системы не будет управляемым и возможно лишь пассивное наблюдение за происходящими процессами. В частности, путем математического моделирования на ЭВМ можно получить функцию $Y(t)$. С другой стороны, если входное воздействие включает управление $U(Y, q, t)$, то можно воздействовать на объект управления для достижения основной цели — минимизации ЗВ, поступающих в окружающую природную среду. В этом случае мы вправе выбирать и формировать управление по своему усмотрению — и наиболее эффективно путем построения СУПТ как САУ.

Здесь в отличие от пассивного наблюдения мы можем активно воздействовать на объект управления. С учетом этого система 4.10 примет вид:

$$L\{Y(q, \Lambda, t)\} = X(q, t) + U(Y, q, t), q \in D, t \in 0, T; \quad (4.11)$$

$$B\{Y(q, \Lambda, t)\} = G(q, t), q \in D^*, t \in 0, T;$$

$$I\{Y(q, t)\} = Y_0(q, t), q \in D, t \in 0;$$

$$D^* \subset D,$$

Синтез уравнений $U(Y, q, t)$ сводится к построению закона управления, а оператор $U(Y, q, t)$ в общем случае представляется дифференциальным уравнением.

Раскрытие операторов объектов управления L, B, I в формулах (4.11) приводит к ММ с конкретной привязкой к объекту проектирования. В практике проектирования такие «раскрытия» сводятся к преобразованиям с целью упрощения ММ, выделения главных составляющих адекватных проектируемому объекту.

Предполагается, что такое преобразование приводит к обыкновенным стохастическим дифференциальным уравнениям $m(\text{ОСДУ})$, которые представим в виде:

$$\Phi(Y^{(n)}, Y^{(n-1)}, \dots, Y, \Lambda, X) = 0, \quad (4.12)$$

где Φ - вещественная вектор-функция своих аргументов; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ - вектор искомых фазовых координат системы.

$$\begin{cases} Y^{(1)} = (y_1^{(1)}, y_2^{(1)}, \dots, y_n^{(1)})^T \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ Y^{(n)} = (y_1^{(n)}, y_2^{(n)}, \dots, y_n^{(n)})^T \end{cases} \text{ - векторы из производных от } Y(t);$$

$Y^{(1)}(t), Y^{(2)}(t), \dots, Y^{(n)}(t)$ - случайные функции времени (например, для ЛА (см. рис. 4.2). Y включает углы тангажа, крена, курса, поворота рулей и т. д.); Λ - вектор параметров системы (параметрами являются массы, моменты инерции, коэффициенты усиления, постоянные времени - случайные величины); X - вектор возмущающих воздействий (ветер, атмосферные возмущения и т.д.) - случайных функций времени.

Начальные условия $Y_0, Y_0^{(1)}, \dots, Y_0^{(n-1)}$ случайные величины.

Высокий порядок и многочисленный набор членов уравнений приводят к тому, что задача анализа ММ в виде ОСДУ становится трудноразрешимой. Поэтому на практике необходимо произвести ее упрощения, естественно, при этом не потерять сути.

Упрощение ОСДУ (4.12)

1) избавимся от массива начальных условий (н. у.) путем замены переменных:

$$\begin{aligned} Z &= Y - Y_0 \\ Z^{(1)} &= Y^{(1)} - Y_0^{(1)} \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \\ Z^{(n-1)} &= Y^{(n-1)} - Y_0^{(n-1)} \end{aligned},$$

Тогда при $t=t_0$ получим нулевые н.у. по Z :

$$Z_0 = 0$$

$$Z_0^{(1)} = 0$$

...

$$Z_0^{(n-1)} = 0$$

Переходим от системы (4.12) к системе уравнений

$$\Phi(Z^{(n)}, Z, \mu, X) = 0, \quad (4.13)$$

где μ – расширенный вектор параметров $\mu = (\bar{A}, Z_0, Z_0^1, \dots, Z_0^{n+1})$

2) избавимся от случайных процессов $X(t)$ заменой переменных

$$X_i(t) = \sum_{j=1}^m A_j \sin \Omega_{jt}, \quad (4.14)$$

где Ω_{jt} – случайные величины. Представление 4.14 основано на известных разложениях случайного процесса на сумму известных функций с параметрами случайными величинами.

С помощью замены (4.14) вместо системы (4.13) получаем:

$$\Phi(Z^{(n)}, \dots, Z, \vartheta, X) = 0 \quad (4.15)$$

$$\vartheta = (\mu, A_1, \dots, A_m, \Omega_1, \dots, \Omega_m),$$

где ϑ – новый расширенный вектор параметров.

В уравнении (4.15) случайные процессы заменены на случайные величины. Случайные величины на ЭВМ воспроизводятся генераторами случайных величин.

Наиболее удобной формой ММ для реализации на ЭВМ является форма Коши, -

$$\dot{Y} = F(Y, v, X) \quad (4.16)$$

или для упрощения записи, опуская вектор параметров - v , $\dot{Y} = F(Y, X)$.

Если система (4.15) разрешима относительно старшей производной

$$Z^{(n)} = \Phi(Z^{(n-1)}, Z^{(n-2)}, \dots, Z, v, X), \quad (4.17)$$

то ее можно привести к форме Коши простой заменой переменных:

$$\begin{cases} \dot{Z} = Z_1 \\ \dot{Z}_1 = Z_2 \\ \dots \\ \dot{Z}_n = \Phi(Z_1, Z_2, \dots, Z_n, v, X) \end{cases}, \quad (4.18)$$

где \dot{Z}, Z_1, \dots, Z_n - векторы из первых производных.

В целях дальнейшего упрощения системы (4.18) представляют в линейной форме:

$$\dot{Y} = AY + BX, \quad (4.19)$$

где A, B – $n \times n$ -матрицы из постоянных элементов.

Покажем такую линеаризацию на классической форме путем линеаризации нелинейных функций:

$$F(Y, X): \begin{cases} Y = Y^0 + \bar{Y} \\ X = X^0 + \bar{X} \end{cases},$$

где Y^0, X^0 - основное движение, а \bar{Y}, \bar{X} отклонения от основного движения в предположении, что $|\bar{X}|, |\bar{Y}| \ll |X^0|, |Y^0|$. Тогда, применив разложения в ряд Тэйлора, найдем:

$$F(Y, X) \cong F(Y^0, X^0) + \left. \frac{\partial F}{\partial Y} \right|_{X^0, Y^0} \bar{Y} + \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X^0, Y^0} \bar{X} + \dots$$

Например, если траектория движения ЛА просчитана, то $Y^0(t)$ и $X^0(t)$ известны и можно составить уравнение в малых отклонениях от основного движения:

$$\dot{Y}^0 + \dot{\bar{Y}} = F(Y^0, X^0) + \left. \frac{\partial F}{\partial Y} \right|_{Y^0, X^0} \bar{Y} + \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{Y^0, X^0} \bar{X}. \quad (4.20)$$

Вычитая из (4.20) «основное движение» $\dot{Y}^0 = F(Y^0, X^0)$, полагая

$$\left. \frac{\partial F}{\partial Y} \right|_{Y^0, X^0} = A, \quad \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{Y^0, X^0} = B - \text{ матрица из постоянных элементов,}$$

найдём

$$Y = (Ep - A)^{-1} BX, \quad (4.21)$$

где $p = \frac{d}{dt}$, $E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & & 0 \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & \dots & 1 \end{pmatrix}$ - единичная матрица.

Форма (4.21) удобна для вычислений $Y(t)$ в явном виде.

После декомпозиции КФС на подсистемы (мультиагенты, агенты), каждая из которых может быть объектом проектирования и производства отдельного предприятия, математические модели классифицируются по иерархии система-устройство-элемент.

Например, на рис. 4.3 показана эта иерархия для навигационного прибора летательного аппарата (см. главу 1, пример 4).

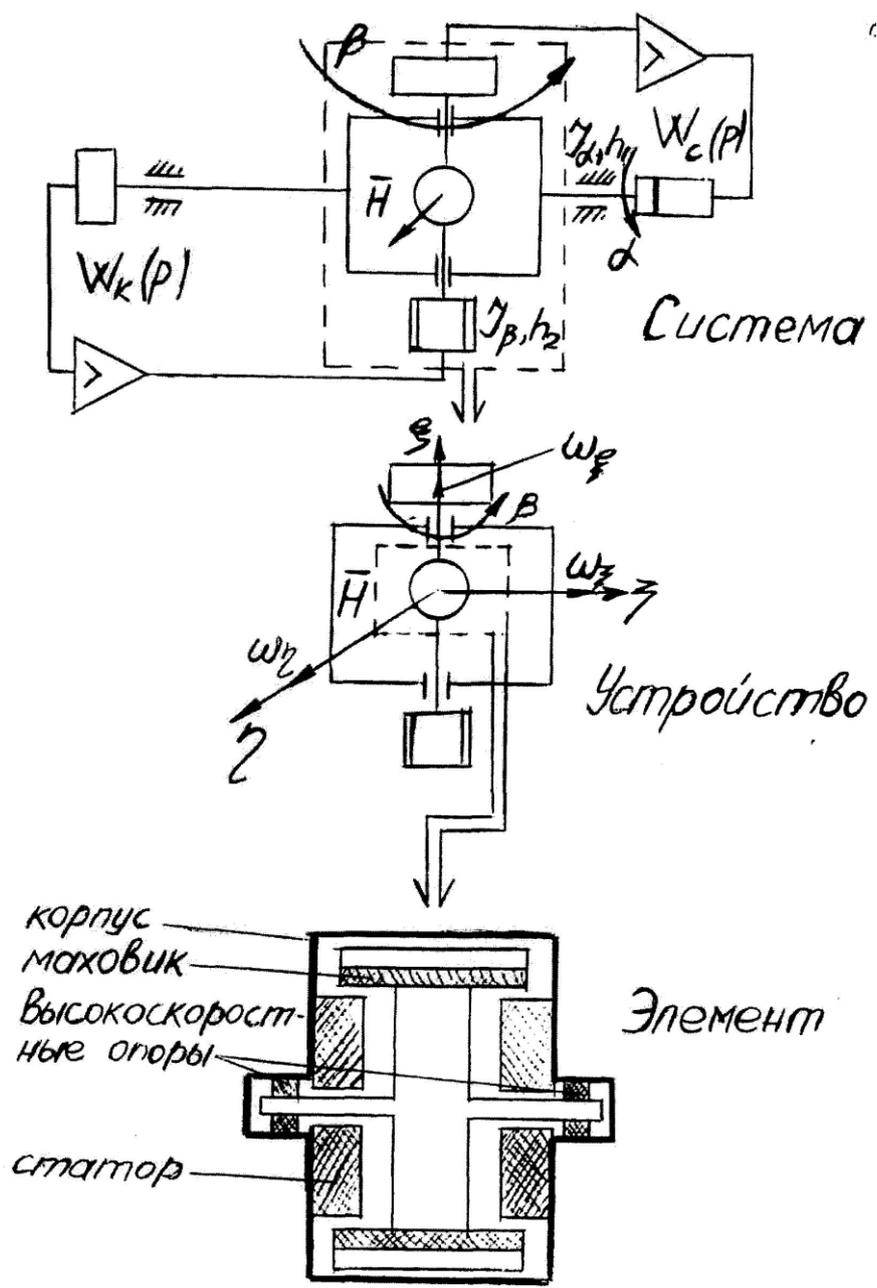


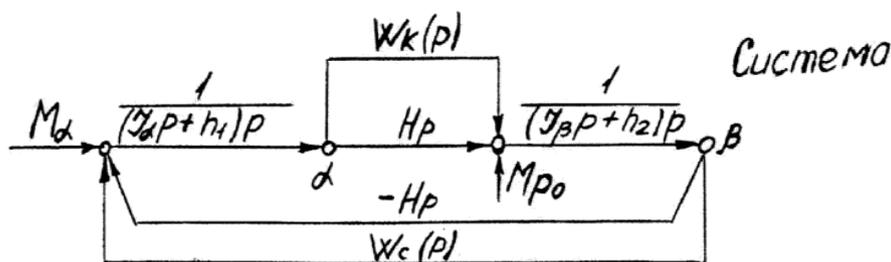
Рисунок 4.3 – Иерархия: система – устройство - элемент

Соответствующие математические модели в этом случае, составленные по отношению только к одной оси стабилизации, имеют вид:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = f(x, y), \quad \varphi(u, x, y) = 0,$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial U}{\partial t}, \quad \varphi(u, x, y) = 0, \quad \text{элемент}$$

$$(\gamma_p^2 + h_p + c)\beta = H(\omega_p \cos \beta - \omega_b \sin \beta) - \\ - \gamma_p \omega_p - M_{TP} \operatorname{sign} \dot{\beta} + M_\Sigma, \quad p = \frac{d}{dt} \quad \text{устройство} \quad (4.22)$$



В уравнениях (4.22) обозначено:

u – давление в воздушном подвесе чувствительного элемента,

x, y – координаты в воздушном подвесе, остальные обозначения приведены в примере 4 главы 1.

ММ элемента используются на конструкторском и технологическом этапах проектирования, а ММ устройства и системы на схемотехническом этапе.

Выбор подходящей ММ из известных часто становится трудной задачей, при решении которой приходится привлекать математические методы для модернизации, дополнения, адаптации ММ к конкретным проектным и производственным процедурам.

Поэтому в составе инструментария ИТ проектирования КФС требуется инструмент «построение ММ».

В этом направлении возможны следующие подходы:

- формирование базы данных из готовых ММ;

- построение ММ в процессе проектирования по мере потребности в них при подготовке проектных решений.

Базы ММ формируются согласно примерной иерархии и классификации, представленных на рис. 4.4 и в табл. 4.1.



Рисунок 4.4 – К построению математических моделей

Таблица 4.1

Класс	Уровни	Признаки ММ	
Системы	Судно, летательный аппарат, турбогенератор, ...	Назначение ММ	Исследование динамики, расчет, конструирование, ...
Устройства	БЦВМ, навигационные приборы, автопилот, ...	Виды ММ	Структурные схемы, графы, дифференциальные, алгебраические уравнения, ...
Элементы	Электродвигатели, подвесы, микропроцессоры, ...	Формы ММ	Операторы, полиномы, формы Коши, Лагранжа, полиномиальные матрицы, ...

На рис. 4.5 представлена процедура построения ММ.



Рисунок 4.5 – Построение ММ

Последовательность построения ММ сводится к следующему:

- поиск подходящей ММ в базе данных;
- формирование новой ММ, если готовой модели не найдено;
- пересылка ММ в «решатель» (см. рис. 4.5).

Под решениями понимается реализованный на ЭВМ пакет программ.

Построение математических моделей на ЭВМ желательно выполнять в аналитической (символьной) форме. Такая форма позволяет при выборе проектных решений «наполнять» символьные выражения конкретными числовыми значениями параметров и тем самым рассматривать широкий круг возможных решений.

В общем случае выбор метода и алгоритмов построения ММ на ЭВМ в аналитическом виде подчиняется зависимости

$$\min\{F = G/H\}, \quad (4.23)$$

где G — количество операций исходного алгоритма, представленных на выбранном языке аналитических преобразований; H — количество операторов этого средства аналитических преобразований. Анализ большого круга методов и алгоритмов показал, что с позицией критерия (4.23), простоты

подготовки исходных данных, «длины» программы, времени «счета» преимущества имеет метод Лагранжа на основе формализма вида:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial R}{\partial q_i} + Q_i, i = \overline{1, n}, \quad (4.24)$$

где T - кинетическая энергия; q_i — обобщенные координаты; Π - потенциальная энергия; R — энергия рассеянная; \dot{q}_i - обобщенные скорости; Q_i — обобщенные силы.

Уравнение (4.24) можно применять к любым системам, где есть перечисленные виды энергии.

Для того чтобы вывести уравнение любого объекта, необходимо проделать в соответствии с уравнением (4.24) следующие основные операции:

1. Составить выражения для энергий T , Π , R и обобщенной силы Q_i .
2. Произвести операции дифференцирования в соответствии с уравнением (4.24).
3. Осуществить приведение подобных членов.

Очевидно, что для сложных объектов эти операции громоздкие и приводят к ошибкам при ручном выводе ММ. Например, ММ летательного аппарата, судна, турбины, навигационного прибора в форме обыкновенных дифференциальных уравнений достигают порядков $n > 20$ с сотнями членов уравнений.

Для электрических схем в качестве обобщенных координат и скоростей выступают заряд и ток. Элементарная электрическая цепь является аналогом механического элемента, а индуктивность L , емкость C , сопротивление R , приложенное напряжение $E(t)$ - аналоги параметров m , $1/k$, h , $F(t)$ механического элемента.

Подготовка соответствующих уравнений Лагранжа (4.24) электрических объектов сводится к определению контуров, назначению в виде обобщенных координат и скоростей соответствующих зарядов и токов, а также обобщенных сил - напряжений. Аналогичная подготовка для пневматических, гидравлических и акустических контуров, входящих в КФС Одним из инструментов ИТ КФС является пакет программ «Построение ММ» позволяет

строить ММ объектов с различной степенью приближения: нелинейные, линейные в 1-м приближении и линейные во 2-м приближении. В этот пакет включена соответствующая подсистема упрощения. Ядро пакета содержит операции дифференцирования, умножения полинома на полином, возведение в степень, приведение подобных членов и другие математические операции, выполняемые символьными вычислениями в аналитической форме. Соответствующий инструмент ИТ содержит проблемно-ориентационный язык(ПОЯ) для пользователей.

Построение ММ можно осуществить в виде структурных схем и графов, а также на основе символьных вычислений на ЭВМ и соответствующего ПОЯ.

Структурные схемы строятся из последовательности операторов l_i, L_i . Для структурных схем со скалярными операторами l_i общего вида

$$l_i = \frac{a_0^i p^n + a_1^i p^{n-1} + \dots + a_n^i}{b_0^i p^m + b_1^i p^{m-1} + \dots + b_m^i} \quad (4.25)$$

последовательность операций построения ММ следующая:

1. Ввод в ЭВМ массивов связей между операторами $MC = (i, j)^{1, N}$, с выхода i -го оператора на вход j -го $\rightarrow (i, j)$; N - количество операторов.

2. Ввод массивов производных числителей в (4.25) $MC_i = (n, n-1, \dots, 0)$, $i = \overline{1, N}$.

3. Ввод массивов производных знаменателей в (4.25) $MZ_i = (m, m-1, \dots, 0)$, $i = \overline{1, N}$.

4. Ввод массивов коэффициентов числителей в (4.25) $MKЧ_i = (a_0^i, a_1^i, \dots, a_n^i)$, $i = \overline{1, N}$.

5. Ввод массивов коэффициентов знаменателей в (4.25) $MKЗ_i = (b_0^i, b_1^i, \dots, b_m^i)$, $i = \overline{1, N}$.

Структурную схему после ввода в ЭВМ ее параметров можно преобразовать в соответствии с правилами преобразования структурных схем.

Построение ММ, заданной в виде графа, осуществляется аналогично структурным схемам, но операторы задаются дугами, а в вершинах графа

размягчаются исходные и выходные переменные операторов. Структура графа задается массивом связей между вершинами графа: $MC = (i, j)_i^N$. Операторы в графах аналогичны операторам в структурной схеме (см. Оператор li) поэтому ввод операторов сводится к формированию массивов: МЧ, МЗ, МКЧ, МКЗ.

В случае векторных операторов приходится формировать полиномиальные матрицы:

$$L(p) = (l_{ij}(p))^{n,m} \quad (4.26)$$

$$\text{где } l_{ij}(p) = a_0^{ij} p^n + a_1^{ij} p^{n-1} + \dots + a_n^{ij}.$$

Такие матрицы используются для линейных векторно-матричных ММ устройств в форме (4.21) или в эквивалентной форме

$$L(p)Y=R(p)X, \quad (4.27)$$

где $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ – вектор искомых переменных; $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – вектор входных воздействий.

$L(p) = (a_{ij}^0 p^n + a_{ij}^1 p^{n-1} + \dots + a_{ij}^n)^{n,n}$ – «полиномиальная матрица собственного движения»;

$R(p) = (r_{ij}^0 p^m + r_{ij}^1 p^{m-1} + \dots + r_{ij}^m)^{m,m}$ – полиномиальная матрица входных воздействий.

В этом случае последовательность операций формирования ММ как в виде структурных схем, так и в виде графов следующая:

- 1) ввод порядков элементов m, n в матрице (4.26) или в матрицах (4.27);
- 2) ввод коэффициентов матрицы $L(p)$, т. е. коэффициенты a_{ij} с соответствующими индексами;
- 3) ввод коэффициентов матрицы $R(p)$.

Часто при вводе полиномиальной матрицы многие элементы оказываются нулевыми (матрица разреженная). В случае разреженных матриц осуществляется ввод в ЭВМ только значимых коэффициентов, нулевые элементы исключаются из массива. Соответствующий инструментарий ИТ

КФС строится с помощью средств аналитических преобразований на ЭВМ - система REDUCE.

Контрольные вопросы

1. Какие составляющие входят в математическое обеспечение ИТ?
2. Приведите примеры ММ КФС на МЕТАУРОВНЕ.
3. Какие формы ММ в виде уравнений состояния существуют?
4. В чём состоит задача упрощения ММ КФС?
5. Какие основные операции построения ММ в аналитическом виде применяются?

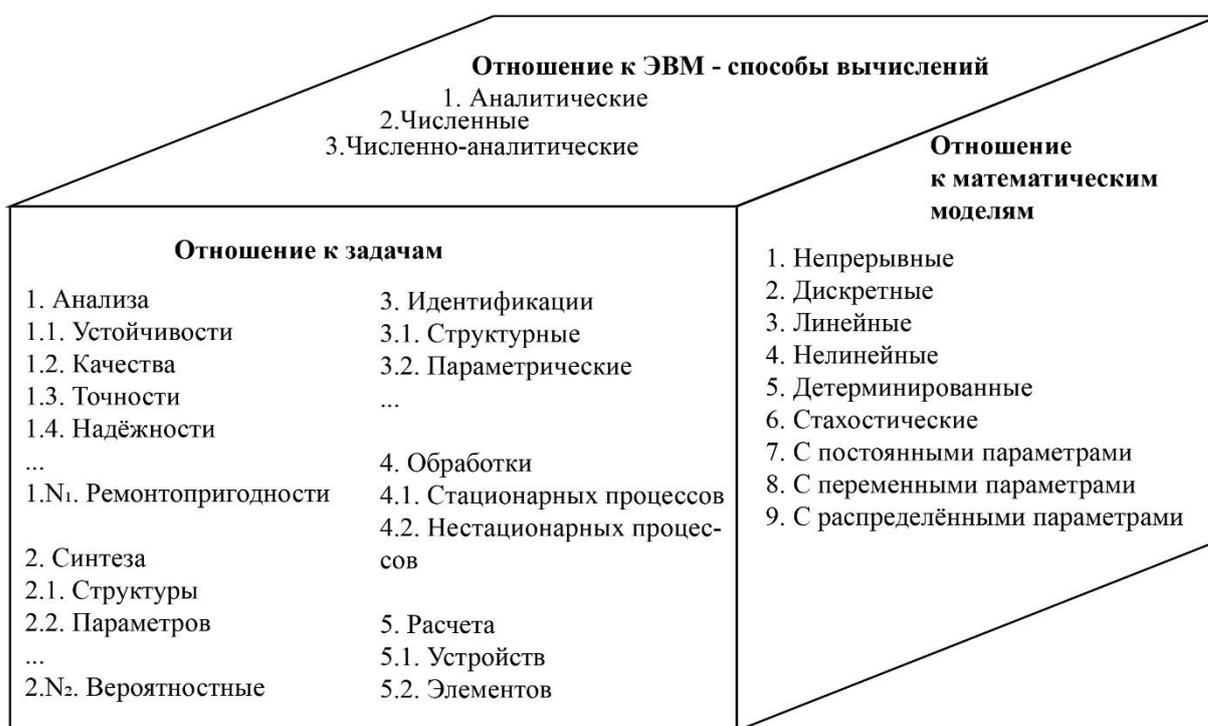
Литература

1. Месарович М., Мако Д., Такахара Я. Теория иерархических многоуровневых систем: пер. с англ./ Под редакцией И.Ф. Шахова, М., Мир, 1973 г.
2. Мягкие вычисления и измерения модели и методы, т. III, —НВ|| Москва, 2017 г.
3. Сольнищев Р. И., Корщунув Г.И. Системы управления «Природа-Техногеника», СПб «Политехника», 2013г.
4. Сольнищев Р. И., Модели и методы принятия решений // Учебное пособие. СПбГЭТУ «ЛЕТИ», 2010г, 100с.
5. Интернет-сайты по теме.

Глава 5. Методы и алгоритмы в обеспечении информационных технологий

Проектные и производственные процедуры создания КФС выполняются на основе методов и алгоритмов, отнесённых к способам вычислений на ЭВМ, задачам проектных и производственных процедур.

Классификация методов и алгоритмов в такой связи можно представить в виде рис. 5.1.



На предпроектном и начальных этапах проектирования КФС применяются имитаторы на основе математического моделирования по математическим моделям (см. глава 4) и эвристические методы. Последние становятся предпочтительными при анализе вариантов функциональных и структурных схем КФС. Существует большой набор пакетов программ, реализующих различные эвристические методы и алгоритмы. В инженерной практике успешно применяется метод платёжной матрицы оценки при концептуальных решениях.

Существо этого метода следующее:

Пусть варианты концептуальных проектов характеризуются 2 векторами:

вектор критериев $K = |K_1, K_2, \dots, K_r| K_i \in K$,

вектор решений $Y = |Y_1, Y_2, \dots, Y_s| Y_j \in Y$,

где: i, j номера вариант наборов составляющих векторов K_i и Y_j .

Вводятся оценочные функции $Z(K, Y)$ согласно табл. 5.1.

Таблица 5.1

		Варианты структур КФС			
		Y_1	Y_2	...	Y_s
КРИТЕРИИ	K_1	$Z_{11}(K, Y)$	$Z_{12}(K, Y)$...	$Z_{1s}(K, Y)$
	K_2	$Z_{21}(K, Y)$	$Z_{22}(K, Y)$...	$Z_{2s}(K, Y)$

	K_r	$Z_{r1}(K, Y)$	$Z_{r2}(K, Y)$...	$Z_{rs}(K, Y)$

Эти функции могут служить для различных оценок, в том числе и по стоимости каждого варианта по каждому критерию (отсюда название «платёжная матрица»).

Расчет функций $Z(K, Y)$ выполняется в зависимости от исходных данных и математических моделей КФС. В частности, это могут быть модели математического баланса (4.6) – (4.9). Полученные в результате расчета $Z_{ij}(K, Y)$ величины заполняют платежную матрицу и при большой размерности $\langle s, r \rangle$, требуются усреднённые оценки. Для облегчения работы по матрице $Z(K, Y)$, вводятся критерии усредняющих оценок:

- 1) Критерий Вальда (критерий минимальных затрат)

$$\min_j \left(\max_i Z_{ij}(K, Y) \right)$$

$$j = 1 \quad i = 1$$

2) Критерий Лапласа (критерий минимума среднеарифметических затрат)

$$\min_{j=1}^s \left\{ (1/r) \times \sum_{i=1}^r Z_{ij}(K_i, K_j) \right\}$$

3) Критерий Сэвиджа (критерий минимаксного риска)

$$\min_{j=1}^s \max_{i=1}^r R_{ij}, \text{ где } R_{ij} = Z_{ij} - \min_{i=1}^r Z_{ij}$$

4) Критерий Гурвица (критерий «пессимизма - оптимизма»)

$$\min_{j=1}^s \left[\alpha \max_{i=1}^r Z_{ij} + (1 - \alpha) \min_{i=1}^r Z_{ij} \right], \text{ где } 0 < \alpha \leq 1;$$

при $\alpha = 1$ – получаем критерий Вальда;

при $\alpha = 0$ – получаем критерий крайнего оптимизма - лучшее стечение обстоятельств.

Также практически оказался эффективным эвристический метод поддержки выбора лицом, принимающим решения (ЛПР).

Алгоритм применения этого метода следующий:

Пусть заданы –

$$P = \{X_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)\}, i=1, N \quad (5.1)$$

-множество возможных решений (возможных заказов, проектов, технических процессов, принятия решений и т.п.),

n - количество характеристик, признаков i-го решения (технические, маркетинговые, социальные, эргономические характеристики)

$$K = (K_1, K_2, \dots, K_m) \quad (5.2)$$

-показатель эффективности => множество критериев формирования П, качество, надежность масса, габариты, удобство технического обслуживания; эргономичность: энергетическая, антропометрическая, биофизическая, эстетическая

$$O = (O_1, O_2, \dots, O_r) \quad (5.3)$$

-множество ограничений формирования П при заданном К (стоимость, мощность, вес, габариты и т.д.)

Эксперты, возможно из ЛПР, формируют коэффициенты приоритеты $\lambda_j, \sum_1^M \lambda_j \leq 1$ отдельных критериев, или U_i -полезность отдельных решений.

Требуется найти $X_i, i=[1,S], S \ll N$, такие, чтобы выполнялось следующее условие:

$$r = \max_{l=1}^r (R), r_l = f(k_{lj}), \text{ где} \quad (5.4)$$

r - определ-я свертка значений критериев

R - множество сверток,

f - функция получения свертки, $j = \overline{1, m}$

Функцию f можно отыскивать множеством известных способов (алгебраические, вероятностные, экстремальные и т.п.).

Наиболее простой способ - аддитивный $\Rightarrow f \Rightarrow \Sigma$,

$$r_l = \lambda_1 K_{l1} + \lambda_2 K_{l2} + \dots + \lambda_m K_{lm}, = 1, N \quad (5.5)$$

Выбор K_{ij} осуществляется на основе статистических методов обработки экспертных оценок, все K_{ij} – относительные величины $\sum_1^M \lambda_i \leq 1$.

В основе алгоритма - ранжирование вариантов решения по предпочтительности (полезности).

$$\begin{cases} \lambda_1 z_{11} + \lambda_2 z_{12} + \lambda_m z_{1m} = \lambda_1 U_1 > U_2 > U_3 \\ \dots \\ \lambda_1 z_{N1} + \lambda_2 z_{N2} + \lambda_m z_{Nm} = \lambda_1 \prod \lambda_1 \leq 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

N – количество вариантов решения, U_1, \dots, U_N - полезность решений,

m - количество критериев,

λ_i - весовые коэффициенты,

$$Z_{i,j} = (Z_{i,j} - Z_{min,j}) / (Z_{max,j} - Z_{min,j})$$

K_{ij} – j -ый критерий i -го варианта,

$$\left| \begin{array}{c} K_{11}, K_{12}, \dots, K_{1m} \\ \dots \\ K_{N1}, K_{N2}, \dots, K_{Nm} \end{array} \right| \begin{array}{l} \downarrow \\ \text{Варианты решений} \\ j \end{array}$$

$\rightarrow i$

подсистем, представляемых передаточными функциями «вход выход». Обычно матрица из передаточных функций преобразуется в полиномиальную матрицу (4.21 – 4.26). Особые трудности возникают при проведении звеньев КФС, представляющих распределённые в пространстве и времени объекты (см. главу 1) к форме «вход-выход».

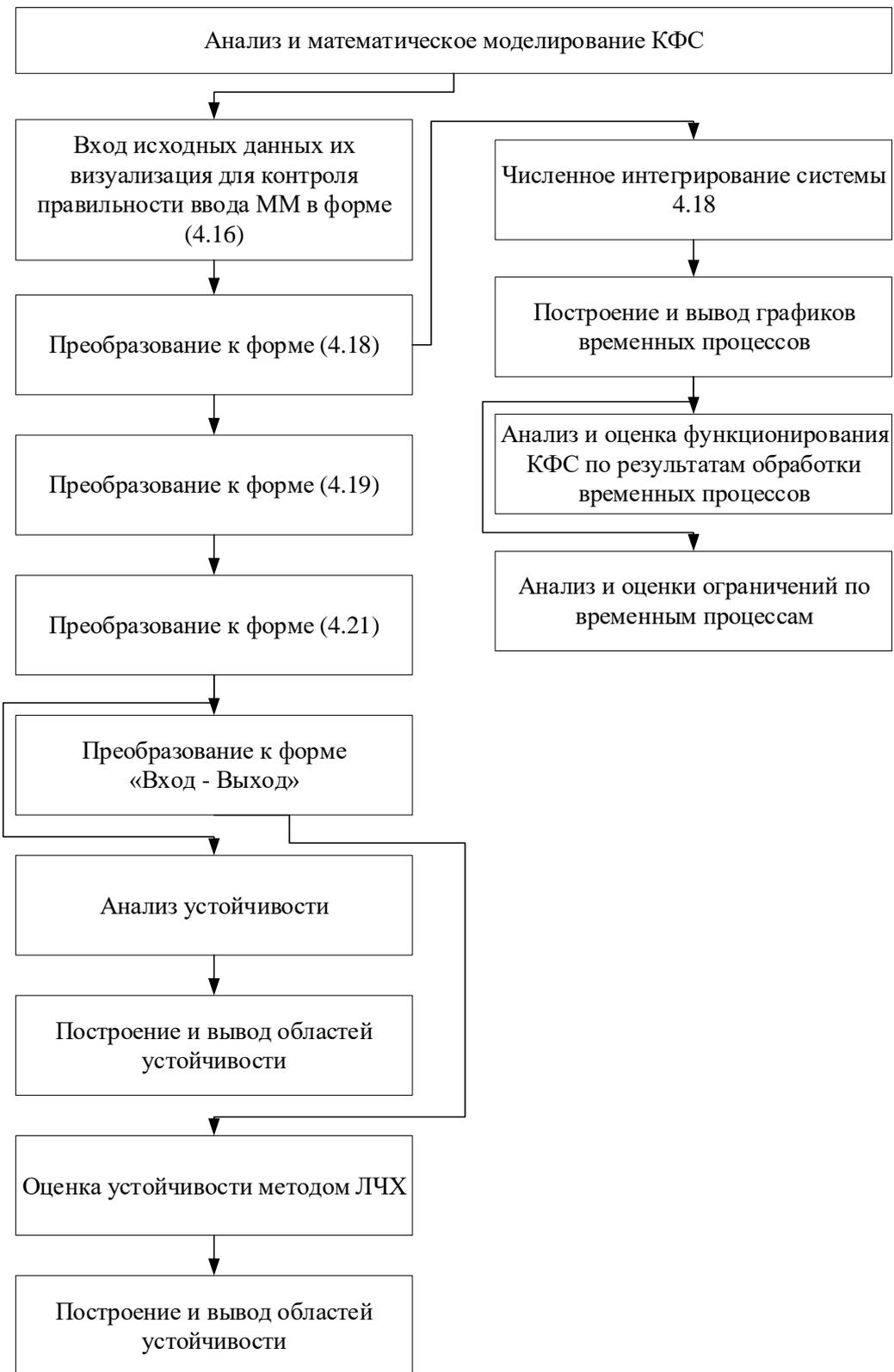
Имитация функционирования КФС на основе метода «переменных состояний» позволяет производить анализ функционирования при постепенном усложнении ММ, в том числе переходу к системе из обобщенных стохастических дифференциальных уравнений (4.12).

Последовательность применения методов и алгоритмов для этих исходных моделей показана в табл. 5.2.

Таблица 5.1



Таблица 5.2



«Машинная ориентация» аналитических методов становится применимой для инженерной практики путём применения средств аналитических вычислений на ЭВМ, - уже упоминавшаяся система REDUCE, а также MAXIMA, MAPLE, SCRATCHPAD, ВИБРАН, АНАЛИТИК и др.

Применение аналитических вычислений при проектировании КФС оказывается полезным на начальных этапах, поскольку получение общих аналитических зависимостей функционирования КФС при заданных требованиях и ограничениях позволяет сразу оценить все возможные траектории, а не отдельные частные решения.

Как было показано в главе 4, аналитические вычисления избавляют пользователя от утомительной работы с полиномиальными матрицами большой размерности, дифференцированием сложных функций, приведением подобных членов и другими математическими итерациями с символьными выражениями. Так при решении дифференциальных уравнений средствами системы REDUCE осуществляется алгебраизация в виде ряда с требуемым количеством членов, необходимым для оценки характеристик КФС.

Однако такие вычисления часто приводят к довольно громоздким конечным выражениям, что затрудняет расчеты и анализ.

Множество **численных методов** решения проектных задач восходит к классическим идеям Эйлера, Коши, Рунге-Кутты, Адамса-Штёрмера, Крылова и многих других ученых. «Машинная ориентация» этих методов породила многочисленные подходы, связанные с выбором шага, порядка, степени точности и других параметров численных методов.

В тоже время при решении конкретных задач часто возникают несоответствия между алгоритмической базой метода и его программной реализацией, например, при анализе жестких систем и точностных оценок прецизионных приборов в составе КФС. Поэтому целесообразно представить основные идеологические подходы к методам численного решения и их алгоритмизации. Наиболее практически применимыми являются методы численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.

Поскольку ММ КФС и их подсистемам обычно сводятся к этому классу ММ (см. 2.4.), то рассмотрим методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений.

Развитие классических методов привело к многочисленным алгоритмам, которые были разработаны ввиду многообразия уравнений (5.9) в системе $\dot{Y} = F(Y, t)$, особенностей функций $F(y, t)$. К таким особенностям в КФС относится свойство жесткости, которое проявляется в наличии двух участков движения с существенно различными характеристиками, причем продолжительность первого участка значительно меньше, чем второго. Например, в СУПТ медленно действующий объект управления с быстродействующей системой регулирования (Пример 1, глава 1) или нутационные колебания чувствительного элемента навигационного прибора при длительном «уходе» оси стабилизации от заданного направления (Пример 4, глава 1).

В дифференциальных уравнениях (5.9) это сказывается наличием пограничного слоя $\tau_{п.о.} \ll T$, где T – заданное время наблюдения и числом обусловленности $\mu(A) = \frac{\max |Re \lambda_i|}{\min |Re \lambda_i|}$, где $A = \frac{\partial F}{\partial Y}$ – матрица Якоби, $Re \lambda_i$ – действительная часть собственных чисел характеристического уравнения $(E - \lambda A) = 0$.

Наиболее распространёнными на основе разложения в ряды Тейлора и аппроксимации подынтегральной функции в формуле Ньютона-Лейбница.

Пусть исходная система задана в форме Коши (4.16). Тогда скалярное уравнение представим в виде:

$$\dot{y} = f(y, t), y_0. \quad (5.9)$$

Решение этого уравнения представим в виде ряда с независимыми коэффициентами:

$$y = \sum_{k=1}^n a_k t^k + a_0 a_0 = y_0. \quad (5.10)$$

Подстановка этого ряда в уравнение (5.9) после разложения его правой части в ряд Тейлора приводит к рекуррентным формулам для неизвестных коэффициентов в (5.10).

$$\begin{aligned}
a_0 &= y_0, \\
a_1 &= f(0, y_0), \\
a_2 &= \frac{1}{2!} \left(\frac{df}{dt} + \frac{df}{dy} a_1 \right), \\
a_3 &= \frac{1}{3!} \left(\frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dt^2} + \frac{df}{dy} a_2 + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dy^2} a_1^2 + \frac{1}{2!} \frac{d^2f}{dydt} a_1 \right), \\
&\dots \dots \dots \dots \dots
\end{aligned} \tag{5.11}$$

В результате получаем решение уравнения (5.9) с точностью $o\left[(t - t_j)^{n+1}\right]$.

$$y(t) = y(t_i) + \sum_{i=1}^n y^{(1)}(t_j) \frac{(t-t_j)^i}{i!} + o\left[(t - t_j)^{n+1}\right]. \tag{5.12}$$

Недостаток этого метода состоит в необходимости вычисления производных высокого порядка и ограниченности промежутка $(t - t_j)$.

Идея перехода к представлению решения $y(t)$ в виде ряда без вычисления производных принадлежит Эйлера и в дальнейшем была развита Коши и Рунге. Вводится шаг численного метода $h = t_{j+1} - t_j$ и вычисляются последовательно коэффициенты $K_i(h)$, тогда численное решение представляется таблицей значений $y(t_j) = y_j, j = \overline{0, n}$ в виде:

$$\begin{aligned}
\overline{y_{j+1}} &= \overline{y_j} + \sum_{i=1}^n p_i K_i(h), \text{ где} & (5.13) \\
K_i(h) &= hf \left[i_j + a_i h y_j + \beta_{i1} K_1(h) + \beta_{i2} K_2(h) + \dots + \beta_{ij-1} K_{i-1}(h) \right] \\
\overline{y_{j+1}} &= \overline{y_j} + K_i(h) \cdot h, \quad K_1(h) = f(y_j, t_j).
\end{aligned}$$

Из этого общего выражения получаются широко известные экстраполяциянные численные методы:

$$\overline{y_{j+1}} = y_j + \frac{h}{2} [K_1(h) + K_2(h)], \quad K_2(h) = f(y_1 K_1(h) \cdot h; t_j + h) \tag{5.14}$$

$$\overline{y_{j+1}} = y_j + K_2\left(\frac{h}{2}\right) h, \quad K_2\left(\frac{h}{2}\right) = f\left(y_j + \frac{h}{2} K_1(h) t_j + \frac{h}{2}\right); \tag{5.15}$$

$$\overline{y_{j+1}} = y_j + \frac{h}{6} (K_1(h) + 2K_2\left(\frac{h}{2}\right) + 2K_3\left(\frac{h}{2}\right) + K_4(h)), \text{ где} \tag{5.16}$$

$$K_3\left(\frac{h}{2}\right) = f\left(y_j + \frac{h}{2} K_2\left(\frac{h}{2}\right) t_j + \frac{h}{2}\right),$$

$$K_4(h) = f(y_j + hK_3\left(\frac{h}{2}\right) t_j + h).$$

Другая идея построения численного решения основана на разложении в интерполяционный полином функций $\dot{y}(t)$ в формуле Ньютона-Лейбница –

$$y_{i+1} = y_i + \int_{t_j}^{t_{j+1}} \dot{y}(t) dt, \text{ где } \dot{y}(t) = f(y, t).$$

Так, интерполяционные методы Адамеа-Штёрмера строятся на представлении подынтегральной функции рядом –

$$\dot{y}(t) = a_0 + a_1(t - t_j) + a_2(t - t_j)(t - t_{j-1}) + \dots \quad (5.17)$$

Тогда коэффициенты $a_0, a_1, a_2 \dots$ определяются в виде:

$$a_0 = \bar{y}(t_j), \quad a_1 = \frac{\bar{y}(t_{j-2}) - 2\bar{y}(t_{j-1}) - \bar{y}(t_j)}{h},$$

$$a_2 = \frac{\bar{y}(t_{j-2}) - 2\bar{y}(t_{j-1}) - \bar{y}(t_j)}{2h^2}, \dots$$

В результате численных значений решения уравнения (5.9) имеют вид:

$$\bar{y}(t_{j+1}) = \bar{y}(t_j) + h\bar{y}(t_j) + \frac{|\dot{y}(t_{j-2}) - \dot{y}(t_j)|h}{2} + \frac{|\dot{y}(t_{j-2}) - 2\dot{y}(t_{j-1}) - \dot{y}(t_j)|5h}{12} + \dots (5.18)$$

Очевидно, что в этих методах необходимо иметь начало таблицы y_{j-1}, y_{j-2}, \dots

Многообразие численных методов в основном сводится к скалярным уравнениям, т.е. для каждого уравнения системы (4.16), $\dot{Y} = F(Y, t)$,

где $\dot{Y} = (\dot{y}_1, \dots, \dot{y}_n)$, $Y = (y_1, \dots, y_n)$, $F(\cdot) = (f_1, \dots, f_n)$ – векторы n -размерности, составляется соответствующее разностное уравнение. Поэтому они обладают присущими скалярным методам недостатками применительно к системам большой размерности. Построением различных разностных схем удается решать задачи за счет выбора шага h и порядка, однако при этом не учитываются свойства правой части уравнения (4.16) и не обеспечивается независимость выбора шага оси устойчивости вычислительного процесса.

Из обобщенной формулы, заменяющей уравнение (5.9), $\sum_{m=0}^r [a_r z_{n+r} - h b_r f(t_{n+r}, z_{n+r})] = 0$ в зависимости от параметров a_r, b_r , гкак частные случаи получаются:

одношаговые методы при $r=1$,

многошаговые при $r>1$,

явные при $b_r=0$,

неявные $b_r \neq 0$.

Моделирование КФС с учетом их особенностей свойства жёсткости, высокой размерности, длительным процессом наблюдения, управления оказалось эффективными матричные методы, предложенные Ю.В. Ракитским.

Существо этих методов основано на построении матрицы $\Phi(A, H)$, заменяющей шаг интегрирования по отношению к уравнению $\dot{Y} = F(Y, t)$, -

$$Y_{k+1} = Y_k + \Phi(A, H) \cdot F(Y_k, t_k),$$

где A – матрица Якоби $\left. \frac{\partial F(Y, t)}{\partial Y} \right|_{t=t_k, Y=Y_k}$.

В этом случае сохраняется вычислительная устойчивость при любом удобном шаге H и вычисляется сразу весь вектор наблюдаемых координат КФС.

Матрица $\Phi(A, H)$ строится по рекуррентному алгоритму –

$$\Phi_{v+1} = \Phi_v(2E + A\Phi_v), v=0, 1, \dots, N-1 \quad (5.19)$$

В качестве функции $\Phi(A, H)$ принимается матричная экспонента e^{AH} , а начальное значение определяется по формуле $\Phi_0 = h \left(E - \frac{Ah}{2} \right)^{-1}$, где h – малый начальный шаг, определённый по требуемой точности вычисления матричной экспоненты.

Аналитические методы для численных методов:

Задача анализа КФС на основе ММ большой размерности упрощается, если привести исходную систему обыкновенных дифференциальных уравнений к явным аналитическим выражениям. Это удаётся сделать для линейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y} &= A * Y, Y(0) = Y_0, \\ \dot{Y} &= A * Y + X, Y(0) = Y_0, \\ A\ddot{Y} + CY &= R(t), Y(0) = Y_0, \dot{Y}(0) = \dot{Y}_0, \\ AY + B\dot{Y} + CY &= R(t), Y(0) = Y_0, \dot{Y}(0) = \dot{Y}_0, \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

где $Y, \dot{Y}, A, B, C, Y_0, \dot{Y}_0$ – соответствующие вектора и матрицы.

Решение этих уравнений имеет известные аналитические формы:

$$Y(t) = e^{At} \cdot Y_0,$$

$$Y(t) = e^{At} \cdot Y_0 + \int_0^1 e^{At} dt \cdot X,$$

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= \cos(\sqrt{A} \cdot t) Y_0 + (\sqrt{A})^{-1} \sin(\sqrt{A} \cdot t) Y_0 + \\ &+ (\sqrt{A})^{-1} \int_0^1 \sin \sqrt{A}(t-r) \cdot R(r) dr, \\ Y(t) &= e^{-\frac{1}{2}A^{-1}Bt} \left[\cos \left(\sqrt{(A^{-1}C) - \frac{1}{4}(A^{-1}B)^2} t - \Phi_0 \right) \right] P_0 + \\ &+ \int_0^1 \cos \left[\sqrt{(A^{-1}C) - \frac{1}{4}(A^{-1}B)^2} (t-r) \right] R(r) dr. \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

Численное решение в этом случае сводится к вычислению функций:

$$\left. \begin{aligned} e^{At} &= E + At + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^3 t^3}{3!} + \dots, \\ \int e^{At} dt &= Et + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^3 t^3}{3!} + \dots, \\ \cos(\sqrt{A} \cdot t) &= E + \frac{A^2 t^2}{2!} + \frac{A^4 t^4}{4!} + \dots, \\ \sin(\sqrt{A} \cdot t) &= \sqrt{A} \cdot t - \sqrt{A} \cdot A \frac{t^3}{3!} + \dots \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

Переход от предыдущего значения $Y(t)$ к последующему $Y(t+H)$ с требуемым для наблюдения шагом H производится путём перемножения матриц $e^{AH}, \int_0^1 e^{At} dt$ на векторы $Y(t), X, R$.

$$\left. \begin{aligned} Y(t+H) &= e^{AH} \cdot Y(t), \\ Y(t+H) &= e^{AH} \cdot Y(t) + \int_0^H e^{At} dr \cdot X_0 \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (5.23)$$

Применение численно-аналитических методов позволяет получить в аналитическом виде зависимость характеристик процессов от параметров проектируемой КФС в виде формул, которые в дальнейшем используются для

анализа параметрического синтеза и расчетных операций схемотехнического проектирования.

Наряду с уже упоминавшимися системами символьных (аналитических) вычислений REDUCE, MAXIMA, АНАЛИТИК автору совместно с группой разработчиков А.С. Пресняк, И.В. Ковтун, и др. построен набор инструментов информационных технологий «ТЕМП», в которых на базе программной системы «СПИН» проводится обработка в аналитической форме исходных данных ММ, ввод в ЭВМ и решение задач моделирования, анализа, синтеза и расчета.

Средства обработки аналитических форм в системе «СПИН» позволяют задавать и обрабатывать такие объекты, как обыкновенные дифференциальные уравнения, полиномиальные матрицы, разностные уравнения, нелинейные зависимости, случайные процессы. Проблемно-ориентированный язык «ТЕМП» предназначен для проектировщиков, решающих задачи моделирования, анализа, синтеза, расчета на начальных этапах проектирования КФС (ранее «сложных систем», «комплексных систем»).

Алгоритмизация численно-аналитических методов сводится к наиболее эффективной интеграции численных и аналитических методов вычислений. Один из таких методов, названных «машинно-аналитическим», был предложен автором и применяется на начальных этапах проектирования.

Принцип действия такого численно-аналитического метода представлен на рис. 5.2.

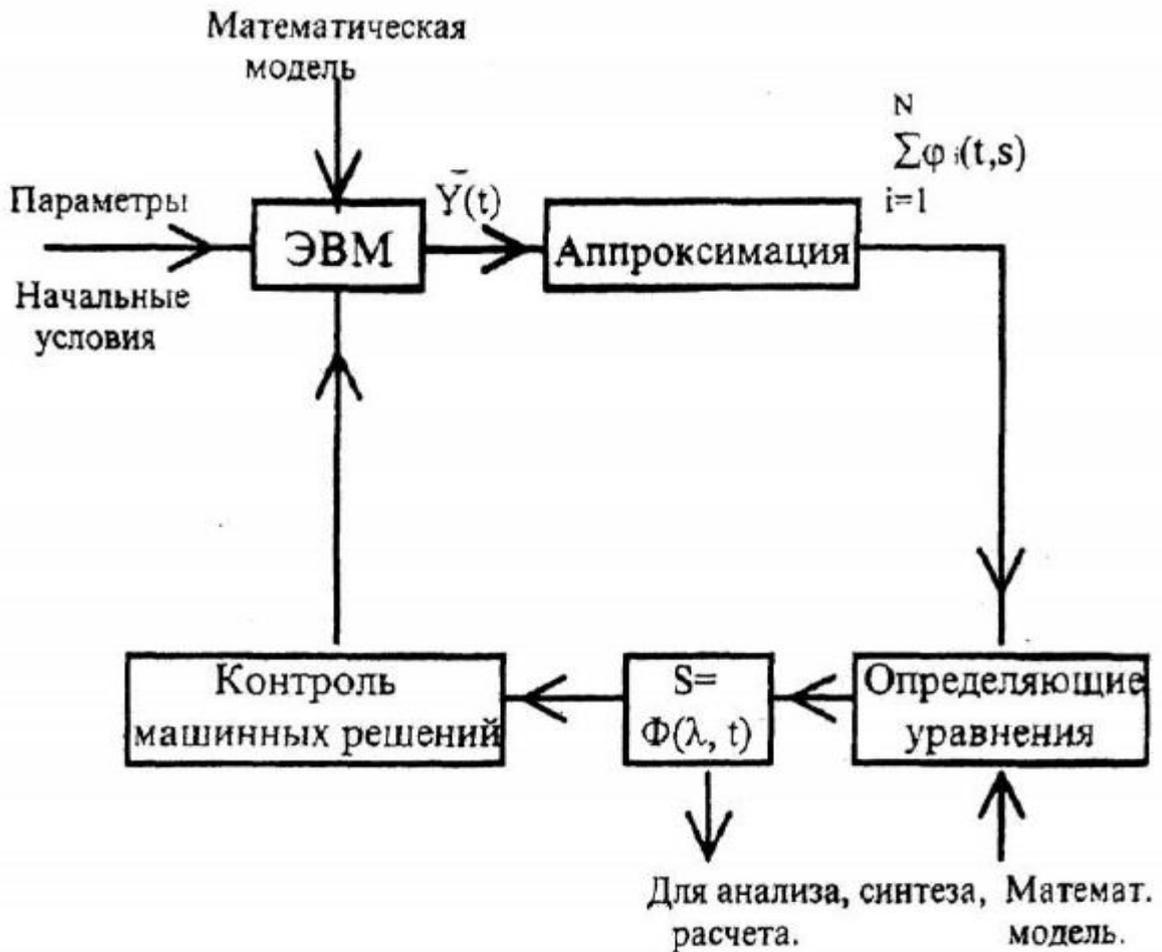


Рисунок 5.2 – Принцип действия численно-аналитического метода

Математическая модель (дифференциальные уравнения) вводятся в ЭВМ в символьном (аналитическом) виде, одновременно вводятся численные значения параметров и начальных (граничных) условий.

На основе численных методов получают численные решения дифференциальных уравнений (4.16), $-\dot{Y} = F(Y, t) - \bar{Y}(t)$.

Следующий шаг – аппроксимация $\bar{Y}(t)$ аналитическими функциями удобными для исследований и наблюдений, например, $a \sin \Omega t$, $ae^{-\eta t}$, $ae^{-\eta t} \cdot \sin \Omega t$, где $S = \langle a, \eta, \Omega \rangle$ - характеристики процессов проводится средствами символьных преобразований в заданной метрике $\min\{\rho = |\bar{Y}(t) - \sum_{i=1}^n \varphi_i(t, S)|\}$.

Далее осуществляется «подстановка» символьных выражений $\varphi_i(t, S)$ в символьную исходную ММ, что связано с операциями дифференцирования, приведения подобных членов, получение определяющих уравнений,

связывающих характеристики процессов, S , с параметрами объектов (в его ММ), λ . Эти уравнения приводятся к форме $S = \Phi(\lambda, t)$ для анализа, синтеза и расчета объекта исследования.

Алгоритмизация этого численно-аналитического метода показана на рис.

5.3.



Рисунок 5.3 – Алгоритм машинно-аналитического метода

Методика применения этого метода, а также примеры решения проектных задач инструментами ИТ на его основе приведены в рекомендуемой литературе. Инструменты ИТ КФС построенные на рассмотренных методах и алгоритмах «Моделирование», «Анализ», «Синтез», «Обработка», «Расчет» апробированы на решении практических задач в составе САПР «Приборы систем управления».

Контрольные вопросы

1. Что такое «Эвристические методы»?
2. Каким образом применяется «ПЛАТЁЖНАЯ МАТРИЦА» к анализу КФС?
3. Перечислите операции алгоритма принятия проектного решения ЛПР?
4. Какие численные методы решения задачи КОШИ вы знаете?
5. Какие символьные (аналитические) вычисления на ЭВМ применяются в ИТ КФС?
6. В чём преимущества численно-аналитических методов?
7. Какая последовательность применения методов ИТ КФС?

Литература

1. Мягкие вычисления и измерения // Модели и методы, т.3, М., «Научная библиотека», 2017г.
2. Сольнищев Р. И. Автоматизация проектирования системы автоматического управления // учебник, М., «ВШ», 315с.
3. Киберфизические системы в экологические безопасности и геомониторинге автотранспорта. СПб. ГЭТУ «ЛЭТИ», 2019г. 148с.
4. Автоматизация проектирования ГПС. / Р.И. Сольнищев, А.Е. Кононюк, Ф.М. Кулаков Л.: Машиностроение, 1990 г., 415 с.
5. Hearn A.C. REDUCE-2, UsersManual, University of Utah, 1973

Глава 6. Оценки процесса проектирования и производства

Макроскопические оценки в процессе проектирования и производства КФС осуществляются по измеряемым выходным переменным, $Y(t) = (y_1 \dots y_n)$.

- Механическим, перемещения, углы поворота;
 - Электрическим, заряды, токи, напряжения;
 - Гидравлическим и пневматически, давление, объемы;
- Соответствующим скоростям и ускорениям.

В то же время физически эти переменные зависят помимо времени t от многих аргументов, т.е

$Y(t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, где λ_i – параметры КФС (массы, моменты инерции, индуктивности, ёмкости, материалы элементов и т.д).

Параметры в общем случае носят вероятностный характер. «Движение» этих параметров λ_i подобно микроскопическому движению молекулы в макроскопическом «объёме» с измеряемыми макроскопическими характеристиками вещества, заполняющего этот объём.

В отличие от «физического» представления при проектировании и производстве измеряемые макроскопические переменные (они же и характеристики), $Y(t, \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ зависят не только от параметров самого объекта, но и от проектно-производственного процесса, в особенности на этапах технологической подготовки производства и испытаний, в том числе от технологического оборудования.

Именно, на этих этапах на «предприятие проектировщика» поступают от «предприятия - изготовителя» (завода), извещения об изменении (ИИ) и предупреждения об изменениях (ПИ), конструкторской документации и, следовательно, параметров изделия. Также ИИ и ПИ часто следуют потоком и носят случайный характер. В соответствии с отмеченными обстоятельствами вероятностные оценки характеристик КФС в процессе их проектирования и производства имеют важное значение в особенности для головного предприятия.

Приведём здесь некоторые базовые понятия прикладной теории вероятностей, которые понадобятся в дальнейшем.

Вероятность – количественная мера возможности данного события $P(Y(t) \in A(t_k < t < t_{k+1}))$.

Случайная функция (С.Ф), -

- $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]$ – функция, значения которой при любом значении аргумента t является случайной величиной (С.В).

Случайная величина в момент времени t_k зависит от конкретной величины случая

$$Y(t_k) = [y_{i,j}(t_k)], j=1, N, i=1, n \text{ (см. рис. 6.1)}$$

Моменты С.В:

Первый - $\bar{y}_i(t_k) = \int_{-\infty}^{\infty} y_i(t_k) \cdot P_k(y_i) dy$ - математическое ожидание,

Второй - $D_{y_i} = \int_{-\infty}^{\infty} (y_i(t_k) - \bar{y}_i(t_k))^2 \cdot P_k(y_i) dy$ – дисперсия,

где $P_k(y_i)$ - плотность вероятности С.В $y_i(t_k)$.

Выбросы С.Ф «задача о выбросах» (см. рис. 6.2) играют важную роль в оценках характеристик КФС по измеряемым переменным $Y(t)$.

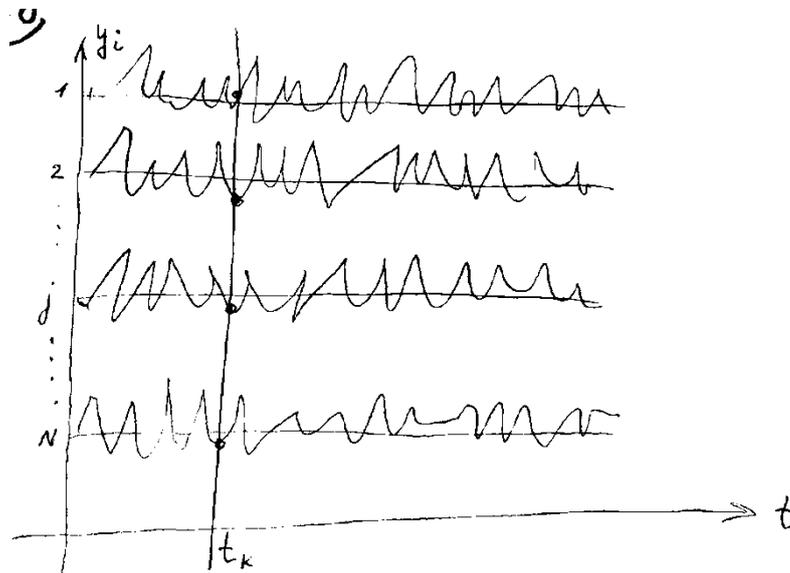


Рисунок 6.1 – Ансамбль реализация

j – номер реализации (опыта) в серии опытов $i^{\text{ой}}$ переменной,

i – номер переменной исследуемого объекта (перемещения, углы поворота, электрические сигналы и другие переменные)

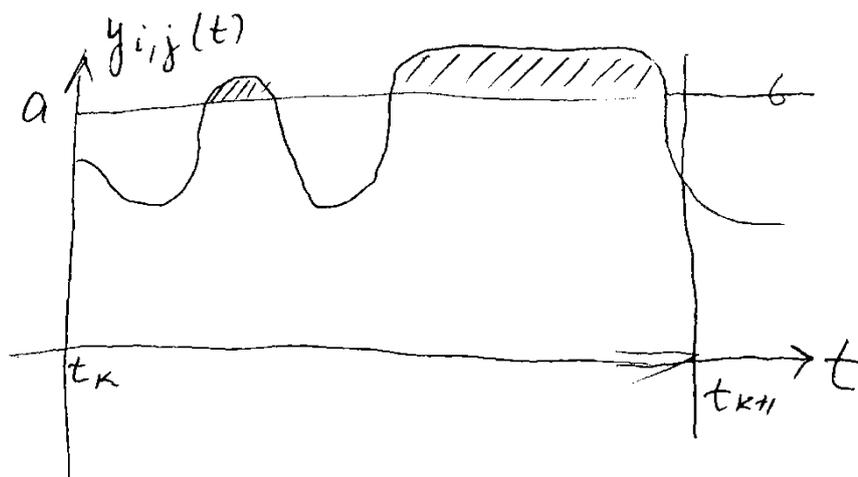


Рисунок 6.2 – Выбросы за заданный предел

$P[y_{ij}(t) < a | t_k < t < t_{k+1}]$ - оценка вероятности выброса за заданный предел,

а.

Приведём примеры КФС и их компонент с вероятностными характеристиками на процедурах проектирования и производства.

1) Система управления «Природа-Техногеника» (СУПТ) представлена в гл. 1 в качестве объекта управления включает источник загрязняющих веществ. На рис. 6.3 представлены такие источники выбросов в атмосферу.

Мониторинг источников загрязнения атмосферы (ИЗА) также как измерительно-преобразовательные звенья СУПТ связан с вероятностными характеристиками (ветер, потоки загрязняющих веществ).

Контрольные замеры «выбросов из трубы» и количества З.В. в заданной точке момента времени не дают детерминированного ответа по величине и времени по отношению к установленной норме.

Процедуры проектирования и производства СУПТ (рис. 6.4) требуют применения вероятностных характеристик для оценки «движения» от Т.З до подготовки производства. Например, уже при предпроектных исследованиях и на начальных этапах проектирования СУПТ требуется концептуальная оценка эффективности замкнутой СУПТ (ЗСУПТ).

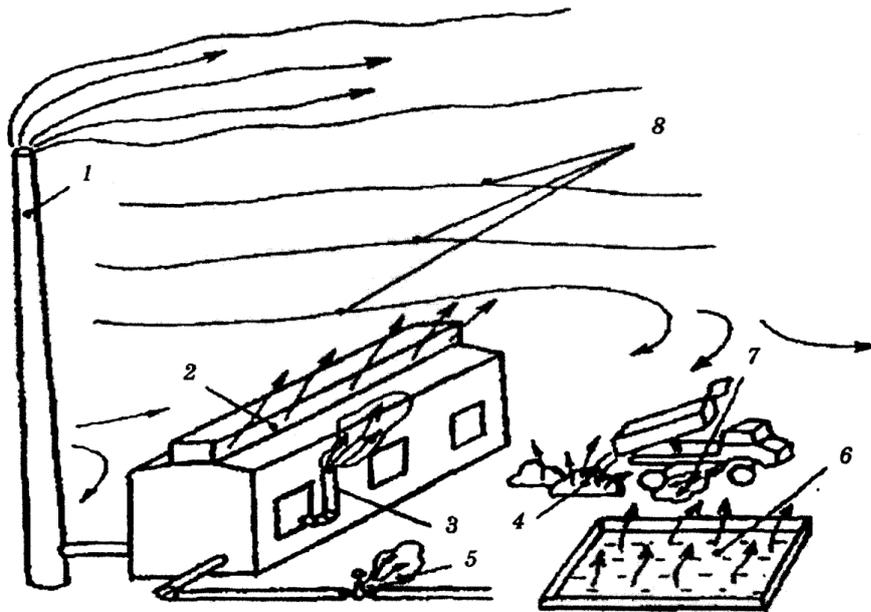


Рисунок 6.3 – Источники загрязнения атмосферы
 1 — высокая дымовая труба; 2 — аэрационный фонарь цеха; 3 — низкая дымовая труба; 4 — пыление при разгрузке сыпучих материалов; 5 — утечки через неплотности оборудования; 6 — испарения с поверхности бассейна; 7 — выхлопная труба автомобиля; 8 — направление движения

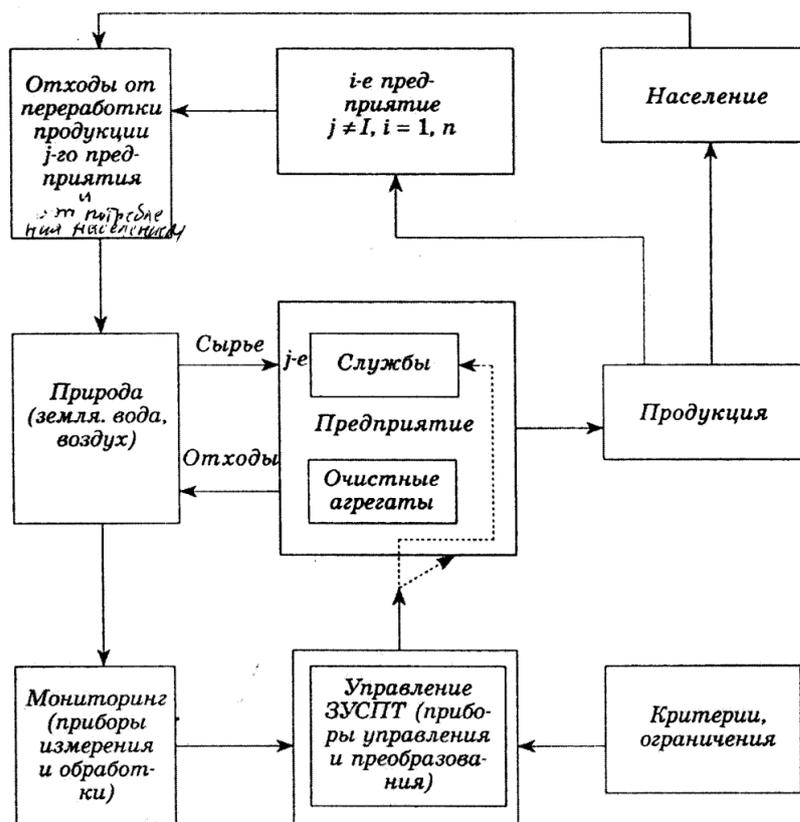


Рисунок 6.4. Замкнутая система управления «Природа-Техногеника»

В системе управления нейтрализацией выхлопных газов автомобилей (СУНВГА) (рис. 6.5), «движение» от ТЗ до подготовки производства также

связано с вероятностными характеристиками оценки проектных и производственных процедур: точность датчиков, влияние помех в передачах сигналов в звеньях СУНВГА, условий эксплуатации СУНВГА на автотранспорте. В этой КФС также, как и в СУПТ требуется концептуальное определение эффективности ЗСУНВГА и более полные оценки «движения» проекта на всех этапах проектирования начиная от структурной схемы (рис. 6.6) до технологической подготовки производства электронных блоков – например, контроллеров – рис. 6.7.

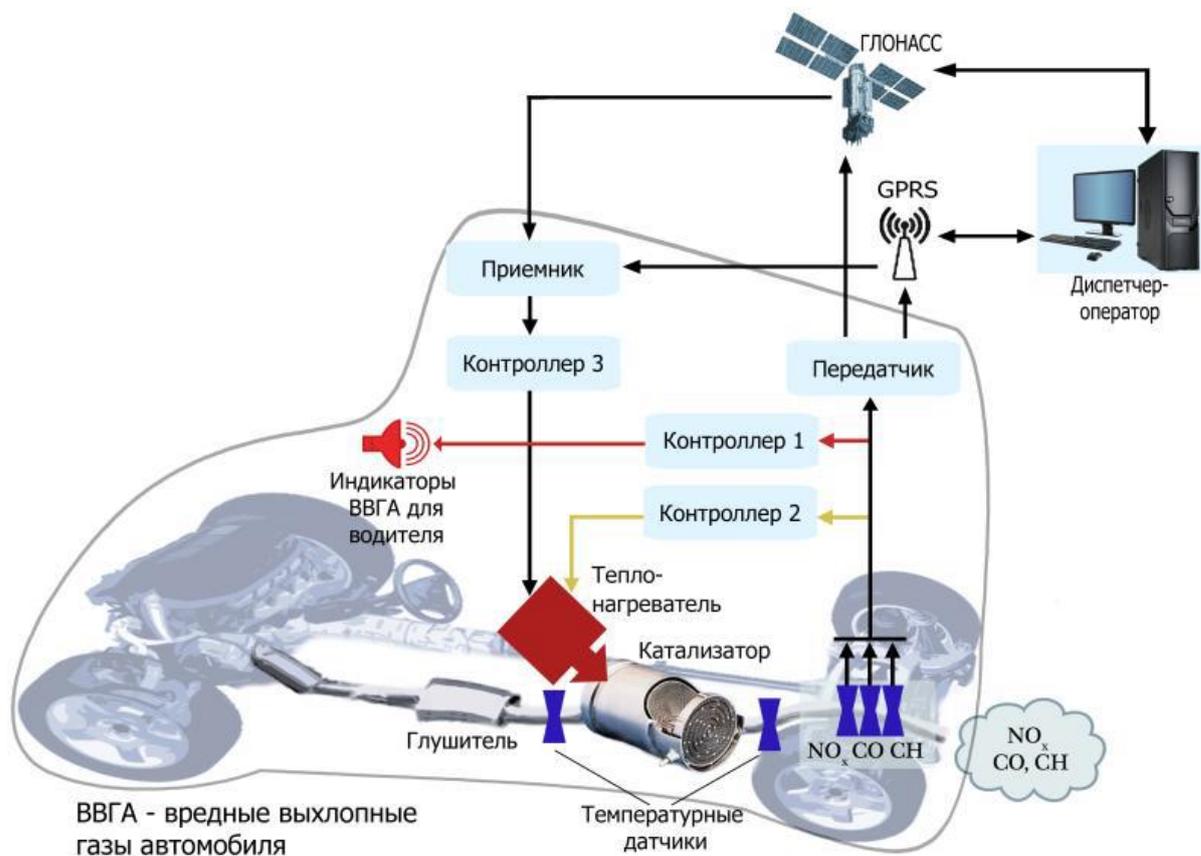


Рисунок 6.5 – Система управления нейтрализацией выхлопных газов автомобилей

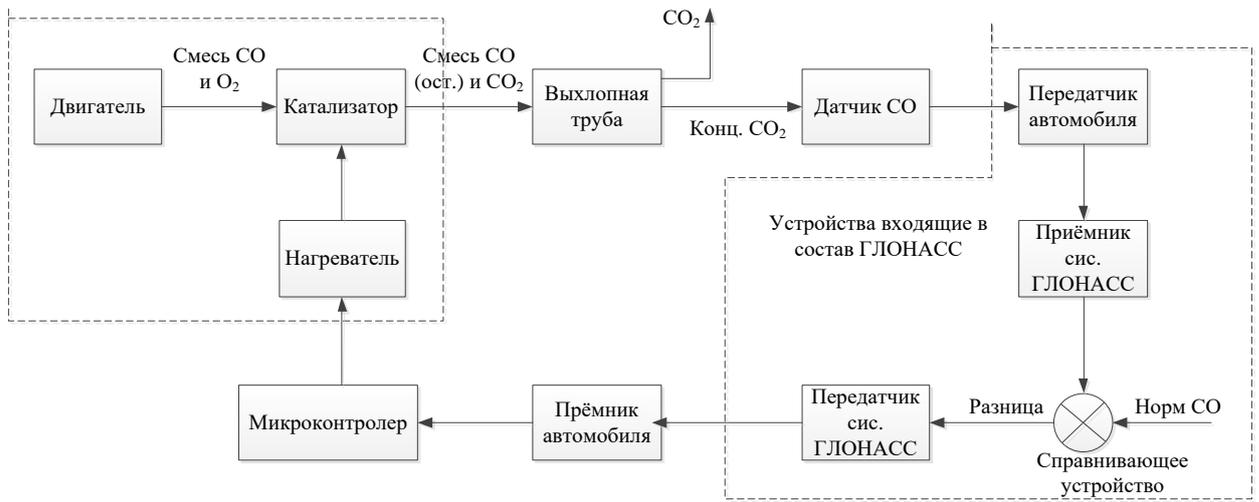


Рис. 6.6 – Структурная схема ЗСУНВГА

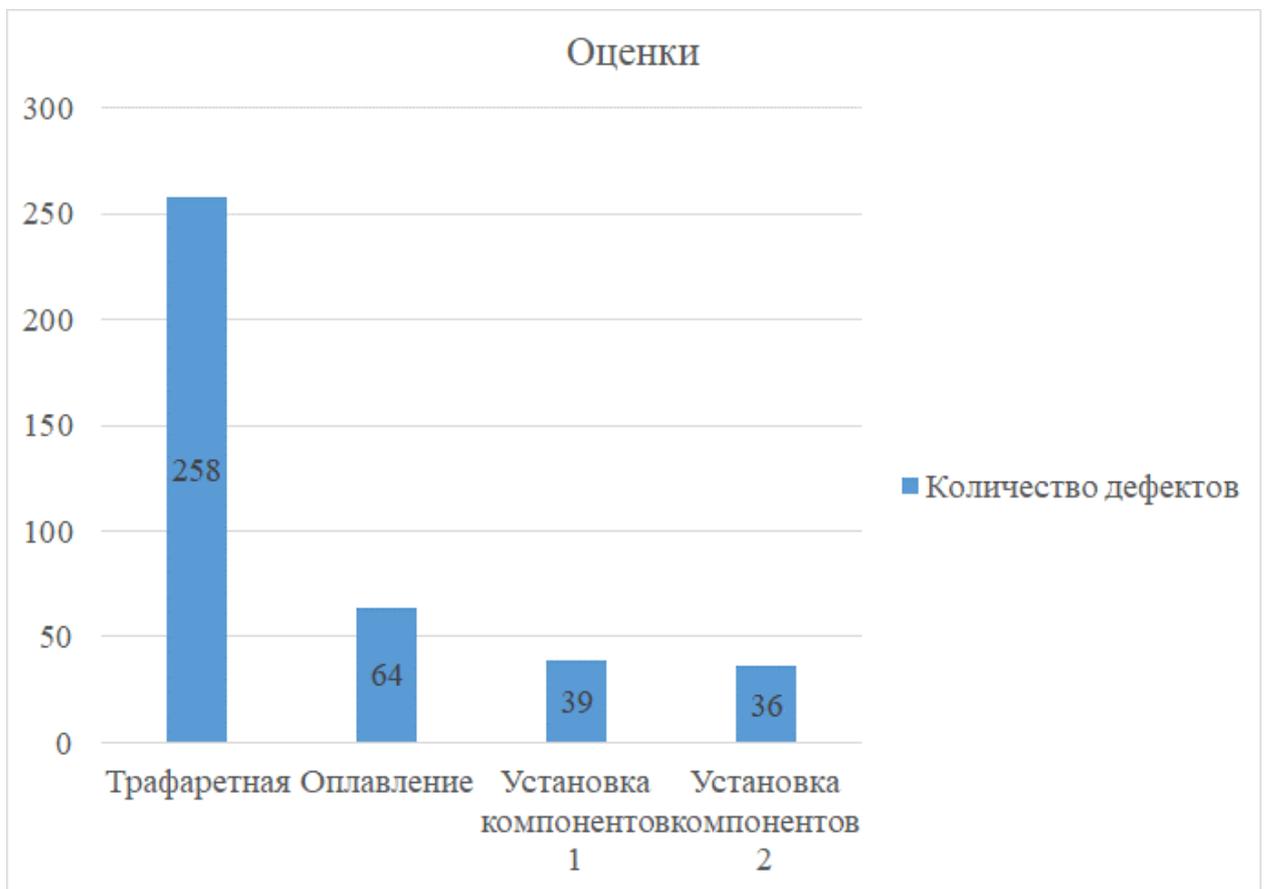


Рис. 6.7 Вероятностные оценки дефектов по этапам производственного процесса электронных блоков в ЗСУНВГА.

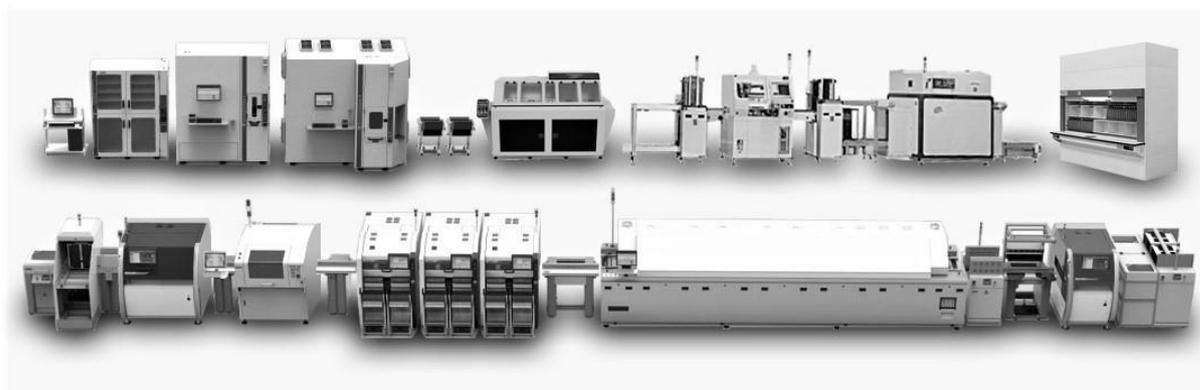


Рисунок 6.8 – Технологическая линия изготовления партии электронных блоков

Естественно, что вероятностные оценки при создании КФС на макроуровне складываются из таких же оценок подсистем, устройств и элементов КФС. Так, изготовление ответственных механических деталей устройств КФС: например, «коленвал автомобиля», - соответствующий штамп изнашивается и требуются вероятностные оценки характеристики износа путем измерения несоответствий размеров по ЕСДП (оценки несоответствий по 6,7 квалитетам).

В точном приборостроении: высокие требования по точностным характеристикам завязаны на все параметры и операции проектно-производственного процесса, особенно возрастают эти требования на этапах технологической подготовки производства и испытаний. На рис. 6.8 в табл. 6.2 приведены несоответствия на типовых операциях изготовления блока навигационного прибора (см. гл. 1, пример 4).

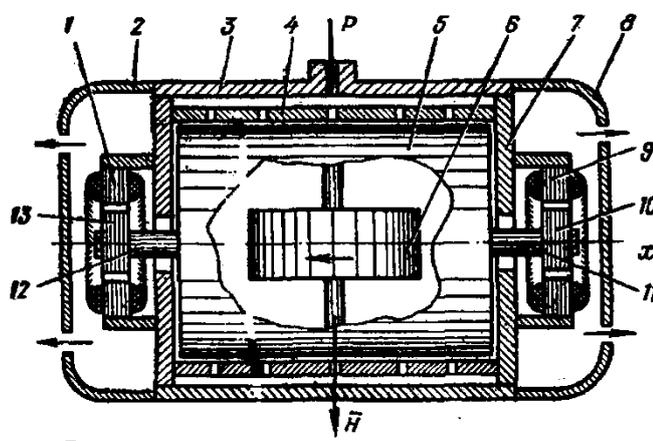


Рисунок 6.8 Принципиальная схема блока навигационного прибора двухстепенного гироскопа с газостатическим подвесом

1, 13 — датчик углов; 2, 8 — крышки; 3, 7 — корпус; 4 — стакан с соплами; 5 — поплавок; 6 — ротор; 9, 10 — датчик моментов; 11, 12 — цапфы

Типовые операции технологической подготовки производства блока навигационного прибора в % к общему объёму операций.

Таблица 6.1

1. Разъемные резьбовые соединения	10,0
2. Сборка давлением (запрессовка, развальцовка и т.п.)	5,0
3. Намоточные операции	3,5
4. Соединение пайкой	5,0
5. Заготовительные операции (заготовка монтажных проводов, изоляционных трубок и т.п.)	1,0
6. Подборка, сортировка, комплектация	2,5
7. Слесарные работы (загибка, обжимка, зачистка)	10,0
8. Механическая обработка в узлах	2,5
9. Электромонтажные работы	10,0
10. Отделочные операции	10,0
11. Контрольные операции	12,5
12. Регулировочные работы	18,0
13. Операции уравнивания	4,5
14. Испытания и прочие работы	5,5

Наибольший процент несоответствий на 4, 7 и 12 операциях, оценки вероятностных характеристик исходят из статистики на этих операциях.

Типовые задачи по применению вероятностных характеристик в проектировании и производстве КФС представляются следующими шагами:

1) Оценки вероятностных характеристик эффективности киберфизических систем на метаровне.

2) Определение вероятностей выхода ординат переменных, заданных в Т.З., за предельные значения и временные превышения этих значений.

3) Контроль несоответствий, оценки надежности, предупреждение брака на ранних этапах проектирования и производства.

4) Оценки состояния технологического оборудования при подготовке производства и процесса производства.

5) Оценки состояния проекта при его движении от Т.З. до монтажа по вероятностным характеристикам выходных переменных.

6) Сокращение трудозатрат на испытания за счет корректировки конструкторской документации и улучшения технологической подготовки производства.

Решение перечисленных задач сводится к построению математических моделей по отношению к вероятностным характеристикам и реализации этих оценок инструментами ИТ КФС.

Наиболее полной характеристикой КФС представляемых стохастическими ММ (4.12) с переменными – случайными функциями и параметрами,

Λ -случайными величинами, являются плотности распределения вероятностей $P_Y(y, \dots, y_n, t)$ и $P_\lambda(\lambda, \dots, \lambda_m)$. Поэтому, вероятностные математические модели (ММ) на этапах проектирования и производства будем считать по отношению к этим переменным и параметрам.

«Сквозной» процесс проектирования и подготовки производства сопровождаемый стохастическими ММ и вероятностными характеристиками укрупненно представлен на рисунке 6.9.

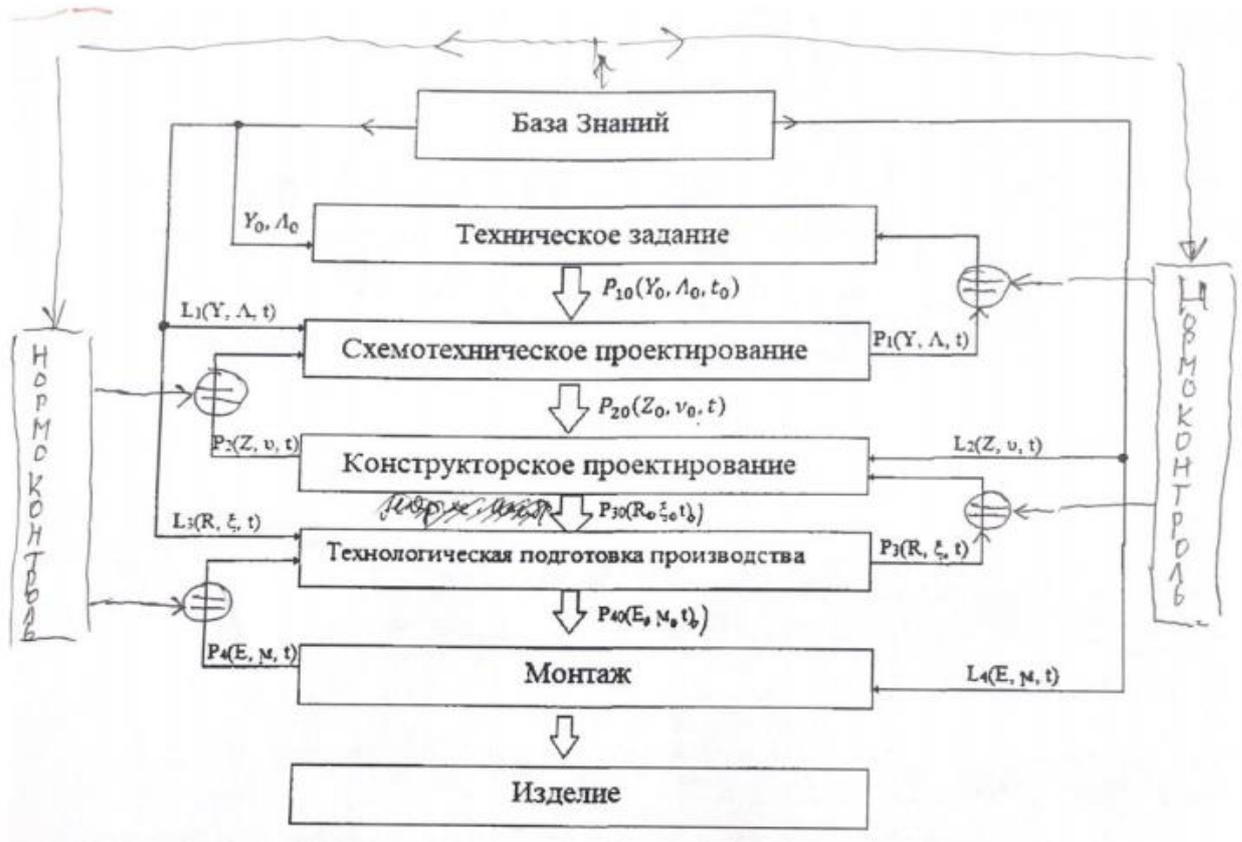


Рисунок 6.9 – Сквозной процесс проектирования и производства с вероятностными характеристиками

На рис. 6.9 обозначено:

L_1, L_2, L_3, L_4 - операторы, (математические модели) объекта проектирования на соответствующих этапах.

$P_{10}, P_{20}, P_{30}, P_{40}$ - начальные значения соответствующих плотностей вероятностей, задаются по априорным данным и корректируют в процессе проектирования и производства.

Начальные плотности вероятности распределения случайных функций (ПВРСФ) $P_{10}(Y_0, \Lambda_0, t_0)$ в виде плотности вероятности распределения случайных величин (ПВРСВ) задаются по априорным данным (Т.З.), $P_{20}(z_0, v_0, t_0)$ – путём «пересчет» ПВРСВ последующих параметров, в v_0 $P_{30}(z_0, \xi_0, t_0)$ по результатам конструкторских расчетов ПВРСВ и как пересчёт последующих параметров, ξ , а также результатов испытаний; ПВРСВ $P_{40}(E_0, \eta_0, t_0)$ как

пересчёт η по предыдущим ПВРСВ ξ , а также данных полученных по техническим характеристикам комплектующих;

Y, Z, R, E – выходные переменные на соответствующих этапах, случайные функции, макропеременные подлежащие измерению (оценке).

Построение ММ по отношению к выходным переменным в виде характеристик случайных функций проводится аналогично выводу уравнений в гл. 4. Однако вместо вектора Y , вводится в качестве выходных переменных вероятностные характеристики, а именно плотности распределения вероятностей С.Ф случайных функций (ПВРСФ) $P(Y, t)$.

Классические операторные уравнения Лагранжа и Гамильтона являются одними из общих операторных уравнений (1). Взяв за основу операторные уравнение Лагранжа (4.24), получим в общем виде дифференциальные уравнения состояния КФС в форме —

$$\Phi(\ddot{Y}, \dot{Y}, Y, X, \Lambda, U, t) = 0, Y \in R^n, \Lambda \in R^m \quad (6.1)$$

или после преобразований, в форме Коши —

$$\dot{Y} = F(Y, X, \Lambda, U, t), Y \in R^{2n}, F = (f_1, f_2 \dots f_{2n}). \quad (6.2)$$

Применяя метод предельных переходов, используемый в статистической физике, по отношению к пучку интегральных кривых $Y_j(t)$ при Y_0 заданных случайных величинах (СВ) с плотностью распределения $P_0(Y_0, t_0)$ перейдем от уравнения (6.2) к дифференциальным уравнениям по отношению к ПВРСФ $P(Y, t)$. Рассматривая для начала единичное уравнение, $\dot{y} = f(y, \lambda, t)$, получим дифференциальное уравнение в частных производных по отношению к ПВРСФ $\bar{P} = f(y, \lambda, t)$:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} - f(y, \lambda, t) \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} - \bar{P} \frac{\partial f(y, \lambda, t)}{\partial y} = 0, \bar{P}_0(y, t_0) \quad (6.3)$$

Для многомерной системы (6.2) соответственно, получим

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial t} - \sum_{j=1}^{2n} f_j(y_1, \dots, y_{2m}, \Lambda, t) \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial y_1} - \bar{P} \sum_{j=1}^{2n} \frac{\partial f_j}{\partial y_1} = 0, P_0(y_1, \dots, y_{2m}, \Lambda, t_0), j = \overline{1, n}, \quad (6.4)$$

где $P = P(y_1, \dots, y_{2m}, \Lambda, t)$ - функция $2m+1$ переменных и параметров $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r)$.

Рассмотрим переход к новым переменным, ПВКФС для метамоделей КФС на основе уравнений (6.3), (6.4).

Исходные метамоделли КФС таких как СУПТ, СУНВГА представляются в виде дифференциальных уравнений первого порядка;

СУПТ, где объектом управления является, например, ТЭЦ:

$$\frac{dY_1}{dt} = K_1^1 X_1 - K_2^1 Y_1, \quad Y_1, \quad \text{где } X_1 - \text{топливо, уголь (сланцы)} [т, кг]. \quad (6.5)$$

Y_1 —выбросы диоксид серы SO_2 (т, кг), K_1^1, K_2^1 - коэффициенты преобразования по расходу топлива и компенсации выбросов соответственно, являющихся функциями параметров СУПТ, Λ .

Построение замкнутой СУПТ (ЗСУПТ) сводится к введению обратной связи через информационно-измерительный, телевизионно-коммутирующий и другие блоки ЗСУПТ на исполнительное устройство, «перекрывающее заслонку» источнику загрязняющих веществ (см. рис. 6.4).

Предварительная оценка концепции ЗСУПТ по уравнению (6.5) для рассматриваемого примера проводится по начальным исходным данным: плотности вероятности выбросов SO_2 в начальный момент времени; коэффициента преобразования, K_1^1 , рассчитанного через параметры λ топливной системы ТТЦ; коэффициента K_2^1 рассчитанного через параметры, λ , природной комбинации и обратной связи с регулятором.

Мета модель СУНВГА, где объектом управления является выхлопная система автомобиля имеет вид:

$$\frac{dY_2}{dt} = K_1^2 X_2 - K_2^2 Y_2, \quad Y_2, \quad \text{где } X_2 - [кг]-\text{топливо,} \quad (6.6)$$

Y_2 — CO (кг) -выбросы, K_1^2, K_2^2 -коэффициенты преобразования по расходу топлива и нейтрализации выбросов соответственно. Оценка концепции СУНВГА по уравнению (6.6) аналогична предыдущему.

Переход к новым переменным $P_Y(Y,t)$ для СУПТ от приведенных дифференциальных уравнений выполняется в виде уравнения (6.3):

$$\frac{\partial P(Y,t)}{\partial t} = (K_1'X - K_2') \frac{\partial P(Y,t)}{\partial Y} + P(Y,t) \cdot K_2', P_0(Y_0, t_0). \quad (6.7)$$

Аналогичные переходы выполняются для метамоделей СУНВГА, и других КФС.

Приведём пример решения задач на основе уравнений (6.3), (6.4), (6.7).

1) Оценка вероятности выхода переменной $Y(t)$, за заданный коридор (предельно допустимый коридор) в течении промежутка времени, T ,

$$\Phi[a < y(t) < b | t_0 < t < T | \lambda_{\min} < \lambda < \lambda_{\max}]$$

Например, если найдено решение уравнения (6.7), то вероятность выхода SO_2 в коридор a, b будет: $\Phi = \int_a^b \int_{t_0}^T P_y(y, \lambda, t) dy \cdot dt$.

В каждый заданный момент времени t для случая нормального закона распределения P_y можно получить численную оценку величины Φ :

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_a^b e^{-\frac{(y_k - \bar{y})^2}{2\sigma^2}} dy = \Phi_1\left(\frac{b - \bar{y}}{\sigma}\right) - \Phi_1\left(\frac{a - \bar{y}}{\sigma}\right),$$

где Φ_1, Φ_2 – Табличные функции, $y_k = y(t_k)$.

Средняя продолжительность выхода за коридор a, b $\bar{\tau}$, в течение данного времени T оценивается по известному в теории случайных соотношению:

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_y}{\sigma_y} e^{\frac{(a - \bar{y})^2}{2\sigma^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{a - \bar{y}}{\sigma}\right) \right].$$

2) Расчет выбросов СУПТ

Исходное уравнение и заданная начальная ПВРСФ имеет вид:

$$\frac{dY_1}{dt} = K_1'X - K_2'Y, Y_0, P_0(Y, t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y_0 - \bar{y}_0)^2}{2\sigma^2}}$$

После перехода к новым переменным $P(Y,t)$, получим:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (K_1'X - K_2'Y) \frac{\partial P}{\partial Y} + P \cdot K_2'. \text{ В случае } X=X_0, Y_0 = \bar{Y}_0, \text{ из решения этого}$$

неоднородного дифференциального уравнения найдем:

$$P_{y_1} = (P_0 - \frac{z}{K_2'}) \cdot e^{-K_2' t} + \frac{z}{K_2'}, \text{ где}$$

$$Z = (K_1' X_0 - K_2' \bar{Y}_0) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} - \text{рассчитывается через исходные данные.}$$

Математическое ожидание количества выбросов в течении заданного промежутка времени T будет:

$$\Phi_{y_1} = (P_0 - \frac{z}{K_2'}) \frac{1}{K_2'} (e^{-K_2' T} - 1) + \frac{2T}{K_2'}.$$

3) Оценка трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЗВ)

Предпроектный анализ перед созданием такой КФС как замкнутая система управления природа-техногеника (ЗСУПТ) включает оценку переноса загрязняющих атмосферу веществ на большие расстояния, в том числе и через границу между государствами, так называемый трансграничный перенос. Рассмотрим вероятностную оценку такого переноса по отношению к диоксиду серы (SO₂), приводящего к «кислым дождям» и выпадению серы (S) на подстилающую поверхность.

Согласно имеющимся данным, выпадение серы вдоль границы РФ с Эстонией происходит примерно с интенсивностью 1 т/км².год. Обозначим поток серы через единичный отрезок границы Y. Тогда общая масса серы выпадения от границы до точки на расстояние l определится из решения уравнения-

$$\frac{dy}{dt} = \lambda \cdot y \cdot y_0; y_0 \text{ и } \lambda - \text{заданные С.В, начальное количество } y_0 \text{ и}$$

интенсивность выпадения серы.

Полагаем, что P(y₀) и P(λ) заданы в соответствии с законом распределения:

$$P_0(y_0, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_1} e^{-\frac{(y_0 - \bar{y}_0)^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$P_0(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_2} e^{-\frac{(\lambda - \bar{\lambda})^2}{2\sigma_2^2}}, \text{ и требуется найти } P_Y(Y, \lambda, t).$$

В соответствии с дифференциальным уравнением (6.3) по исходному уравнению найдём:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = P \cdot \lambda + \frac{dy}{dt} \cdot \lambda \cdot y, P_0(y_0, t_0), \text{ откуда частный интеграл определяется через уравнение } \frac{\partial P}{P \cdot \lambda} = \partial t, P_0; \text{ в виде } P_Y = P_0 \cdot e^{-\lambda t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} \cdot e^{-\left(\frac{y-y_0}{\sigma_1^2}\right)} \cdot e^{-\lambda t}.$$

$$\text{Если } \lambda = \bar{\lambda}, \text{ то } P_Y = P_0 e^{-\bar{\lambda}t},$$

$$\text{если } \lambda - \bar{\lambda} = \sigma_2, \text{ то } P_Y = P_0 e^{-(\bar{\lambda} + \sigma_2)t}.$$

Применительно к решению задачи трансграничного переноса загрязняющих веществ, например (см. рис. 6.1) по отношению к $SO_2(S)$, (количество S в SO_2 известно), задаются следующие величины:

y_0 - количество SO_2 на границе [т, кг], соответственно - $P_0(y_0)$ - плотность распределения вероятности;

λ - коэффициент преобразования рассчитывается через известные параметры переноса (скорость потока, время жизни, протяженности границы);

P_Y – плотность распределения вероятности выбросов SO_2 на промежутке $t_0 < t < T$.

Полагая $T = \frac{l}{V}$ - время переноса от границы на расстояние l со скоростью

$$V, \text{ найдём } \int_0^T P_Y(Y, t) Y(t) dt.$$

Следовательно, можно найти математическое ожидание и среднеквадратичное отношение массы $SO_2(S)$ в точке $l = T \cdot V$. При заданной протяжённости границы, рассчитывается масса $SO_2(S)$ на площади $L \times l$.

Возвращаясь к схеме, представленной на рисунке 6.9, оценки по вероятностным характеристикам $P_2(z, v, t)$, $P_3(z, \xi, t)$, $P_4(E, \eta, t)$ проводятся итерационно с коррекцией начальных значений параметров Λ, v, ξ, η в исходной $L1(Y, \Lambda, t)$ и последующих математических моделях $L_2(z, v, t)$, $L_3(z, \xi, t)$, $L_4(E, \eta, t)$. В предположении, что структурно операторы $L_{i,j=1,4}$ представляются ММ в форме (6.2), а корректируются только параметры (Λ, v, ξ) . Вероятностные оценки «движения процесса проектирования» КФС

сводятся к определению ПВРСФ $Z, R, E - P_2(Z, v, t), P_3(R, \xi, t), P_4(E, \eta, t)$.

Интерактивная процедура расчета и коррекции начальных параметров Λ_0 и начальных плотностей распределения вероятностей $P_{10i} = \overline{1,4}$ производится «снизу - вверх» согласно схеме представлений на рис. 6.9 и начинается с перерасчёта ПВРСВ соответствующих параметров η, ξ, v . Но для этого надо иметь функции связи этих параметров.

В частности, из конструкторских расчетов обычно известны связи последующих параметров через предыдущие.

Например, расчеты веса, моментов инерции, центра тяжести, детали через её размеры.

Из теории вероятностей известна связь ПРСВ y, x с заданной функцией $y = \varphi(x)$, - $P_\lambda = P_v[\varphi^{-1}(v)] \cdot [\varphi^{-1}(v)]'$ (6.8). Поэтому из обычно известных расчетных формул $y = \varphi(x)$ вычисляется искомая плотность вероятности P_λ через заданную P_v

Примерами таких расчетов на нижнем уровне процесса (рис. 6.9) являются следующие:

1) Пусть погрешность изготовления твердого элемента кубической формы имеет нормальное распределение с плотностью

$$P_\eta(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(\eta-\bar{\eta})^2}{2\sigma\eta}}$$

требуется определить плотность вероятности распределения веса элемента $v, P_v(v)$.

Известно $v = \varphi(\eta) = r \cdot \eta^3$, где r - плотность материала, а η - размер каждой стороны. Тогда $\eta = \varphi^{-1}(v) = \sqrt[3]{\frac{v}{r}} \cdot a$

$$[\varphi^{-1}(v)] = \frac{d}{dv} \left(\frac{v^{1/3}}{r^{1/3}} \right) = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{r^{1/3}} \cdot \lambda v^{-2/3} = \frac{1}{3 \cdot \sqrt[3]{r \cdot v^2}}$$

Откуда находим искомую плотность вероятности P_v —

$$P_v = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\left(\frac{\sqrt[3]{\frac{\lambda}{r}} - \bar{\mu}}{2\sigma^2}\right)^2} \frac{1}{3 \cdot \sqrt[3]{r \cdot \lambda^2}}$$

2) Пусть погрешность измерения токовой нагрузки кабеля $\mu_{\max} < \mu < \mu_{\min}$,

сечение кабеля $v = f(\mu) = K \cdot \sqrt{\frac{\mu}{3}}$, плотность вероятности μ задана-

$P_\mu = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(\mu - \bar{\mu})^2}{2\sigma^2}}$. Требуется определить плотность распределения вероятности сечения кабеля.

Согласно (*) получим:

$\mu = f^{-1}(v) = \frac{3v^2}{K^2}$ и плотность распределения вероятности величины сечения кабеля будет

$P_v = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\left(\frac{\frac{3\xi^2}{K^2} - \bar{\mu}}{2\sigma^2}\right)^2} \cdot \frac{6\xi}{K^2}$ и соответствующее математическое ожидание

для выбора сечения кабеля будет $M(\xi) = \int_a^b P_\xi \cdot d\xi$, где a,b—известные допусковые ограничения.

На следующем уровне проводится пересчет R_{30} через R_λ по исходному дифференциальному уравнению (6.2). Предварительно необходимо установить связь ПВРСВ Y_0, Z_0, R_0 с параметрами. Такая связь для скалярного уравнения, полученная из (6.2) при $x=0, v=0$ устанавливается очевидным образом при $t=0, \frac{dy}{dt} = 0, y=y_0$. Если $\frac{dy}{dt} = f(y, \lambda, t), y_0$, то при $t=0 f(y_0, \lambda) = 0$, откуда $y_0 = \varphi(\lambda)$ и $P_{y_0} = P_\lambda \cdot [\varphi(\lambda)] \cdot [\varphi'(\lambda)]'$.

Определение $P(y, \lambda, t)$ в случае параметров λ , заданных ПВРСВ P_λ по исходному уравнению (6.2) осуществляется следующим образом.

Из уравнения (6.3.) переходя, к симметрической форме, вначале для скалярного уравнения $\dot{y} = f(y, \lambda, t)$, получим

$$\frac{dt}{1} = \frac{dy}{f(y, \lambda, t)} = \frac{dP}{P \cdot \frac{df(y, \Lambda, t)}{dy}}$$

Откуда находим уравнение по отношению ПВРСФ P_y :

$$\frac{dP_y}{P_y} = \frac{df(y, \Lambda, t)}{dy} dt, P_{y,0} \tag{6.9}$$

Из этого уравнения после интегрирования следует:

$$P_y = P_0 \cdot e^{\int_{t_0}^T \frac{df(y, \lambda, t)}{dy} \cdot dt}, \quad \text{следовательно} \quad \text{через}$$

квадратуру $\int_0^t \frac{df(y, \lambda, t)}{dy} dt$ получим $P_y = \psi(y, \lambda, t)$.

Если параметр λ – задан вероятностной характеристикой ПВРСВ P_y в виде нормального закона распределения $P_\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\lambda} e^{-\frac{(\lambda - \bar{\lambda})^2}{6\lambda^2}}$, то P_y можно выразить через величины $\bar{\lambda}$ и σ_λ , где $\bar{\lambda}$ – математическое ожидание параметра λ .

На предыдущих уровнях процесса (см. рис. 6.9) задача построения, вычисления и корректировки вероятностных оценок $P_2(R, v, t)$, $P_3(Z, \xi, t)$, $P_4(Y, \Lambda, t)$ сводится к системе из символьных уравнений (6.9), построенных по уравнению многомерной модели КФС (6.4). В ряде работ предложены вероятностные характеристические оценки состояния и производства на основе дискретных и непрерывных марковских цепей. Такие оценки эффективно применяются при анализе математических потоков в КФС, например, в гибких производственных системах (ГПС) на этапах сборки (монтажа) устройств, входящих в ГПС.

Инструментами ИТ КФС на основе рассмотренных моделей и методов вероятностных оценок в процессе проектирования и производства являются средства алгебраических вычислений (REDUCE, «Аналитик» и др.) и пакет программ с проблемно-ориентированным языком «ТЕМП», реализующий численные и численно-аналитические методы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения случайных величин, процессов и их вероятностных характеристик.
2. Приведите примеры КФС, состояние которых требует вероятностных оценок.
3. Какая последовательность применения вероятностных оценок в процессе проектирования и производства КФС?
4. Каким образом через плотность распределения вероятности можно оценить работоспособность КФС?
5. Как рассчитать начальную плотность вероятности по исходным данным?

Литература

1. В. С. Пугачёв. Введение в теорию вероятностей // «Наука», М., 1968г.
2. Автоматизация проектирования ГПС // Р.И. Сольницев, А.Е. Кононюк, Ф.М. Кулаков, Л. «Машиностроение», 1990 г., 415с.
3. Сольницев Р.И., Коршунов Г.И. Системы управления «Природа-Техногеника» Политехника, СПб, 2013, 206 стр.
4. Киберфизические системы в экологической безопасности и геомониторинга автотранспорта // СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019г., 148с.
5. Интернет-сайты по теме

Заключение

Материалы, изложенные в курсе лекций, направлены на изучение и освоение обширной и интересной области информационных технологий (ИТ) разработка и применение инструментов ИТ в создании КФС как нового класса объектов проектирования и производства со всеми их особенностями единичности экземпляров, гетерогенностью, мультиагентностью и т.д.

Важнейшая задача выбора и адаптации инструментов ИТ КФС с привлечением современных средств искусственного интеллекта в том числе рассмотренных в курсе аналитических вычислений на ЭВМ, интеллектуальных звеньев СУПТ, ГП, МКС, исходя из математического обеспечения этих инструментов. Это обстоятельство акцентировано в данном курсе, поскольку адекватность инструментов ИТ решаемой задаче зависит от математических моделей, методов и алгоритмов, заложенных в эти инструменты.

Естественно, освещенные в курсе лекций вопросы не исчерпывают всего спектра разработок, исследований и разработок инструментария ИТ КФС как нового и перспективного направления.

Международный институт инжиниринга в экологии и безопасности человека

<https://iehs.ru>



The International Institute of Engineering in Environmental and Human Safety