

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Автомобили»

Г. А. Дыко

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности 1-37 80 01 «Транспорт»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2022

УДК 656.07-025.13(075.8)

ББК 39.1я7

Д87

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Тракторы и автомобили» УО «Белорусский
государственный аграрный технический университет»,
зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *Г. И. Гедройць*;
ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения
«Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси,
канд. техн. наук *А. Г. Выгонный*

Дыко, Г. А.

Д87 Методология проектирования транспортных средств : учебно-методическое пособие для обучающихся по специальности 1-37 80 01 «Транспорт» : в 2 ч. / Г. А. Дыко. – Минск : БНТУ, 2022. – Ч. 1. – 48 с.
ISBN 978-985-583-809-9 (Ч. 1).

В учебно-методическом пособии приведено содержание учебной программы, материалы лекций и список информационных источников.

Рекомендуется для магистрантов специальности 1-37 80 01 «Транспорт» второй ступени получения высшего образования при изучении дисциплины «Методология проектирования транспортных средств».

УДК 656.07-025.13(075.8)

ББК 39.1я7

ISBN 978-985-583-809-9 (Ч. 1)

ISBN 978-985-583-505-0

© Дыко Г. А., 2022

© Белорусский национальный
технический университет, 2022

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина преподается с целью сформировать у магистрантов теоретические подходы и знания по современным методам проектирования транспортных средств, их систем, узлов и механизмов. Ознакомить их с технологиями, применяемыми при проектировании, в том числе с особенностями моделирования транспортных средств, со структурой систем автоматизированного проектирования (САПР) сложных объектов, назначением и содержанием составляющих частей САПР.

В результате освоения дисциплины магистрант должен:

– знать особенности и свойства сложных систем, принципы системного подхода к сложным объектам, стадии проектирования транспортных средств и возможности их автоматизации, структуру САПР транспортного средства, методы оптимизации проектных решений, основы метода конечных элементов, иметь представление об интегрированных системах автоматизированного проектирования и производства транспортных средств;

– уметь моделировать транспортное средство на разных проектных стадиях, выбирать основные параметры транспортного средства и выполнять его общую компоновку.

В первой части учебно-методического пособия представлен лекционный материал по первым четырем темам учебной программы. По остальным темам лекции будут изложены во второй части.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ

Тема 1. Введение.

Цель и задачи дисциплины, содержание учебной программы и учебного плана.

«Жизненный» цикл транспортного средства: создание, производство, обращение, эксплуатация. Особенности проектирования транспортных средств. Программные комплексы при проектировании.

Тема 2. Системный подход к проектированию транспортных средств.

Понятие о сложной системе и системном подходе. Целостность системы. Определение границ системы и ее элементов. Комплексная оценка сложных систем.

Принцип модульного проектирования. Порядок выбора и расчета основных параметров и характеристик гидро- и пневмоприводов. Методология проектирования гидро- и пневмоприводов.

Тема 3. Начальные стадии проектирования транспортных средств.

Поиск технических решений. Выбор рациональных вариантов технического решения: последовательный анализ, метод Порето, метод ветвей и границ и др.

Тема 4. Моделирование транспортных средств при проектировании. Подходы к проектированию отдельных видов транспортных средств.

Описание проектируемого транспортного средства. Этапы формирования математических моделей. Имитационное моделирование.

Подходы к проектированию транспортных средств, оснащенных гидромеханическими передачами (ГМП): преимущества и недостатки ГМП, особенности проектирования одно- и двухпоточных ГМП.

Проектирование транспортных средств, оснащенных объемными гидropередачами: методики выбора и расчета параметров основных узлов объемных гидropередач.

Подходы к проектированию направляющих и регулирующих аппаратов, используемых в гидро- и пневмосистемах транспортных средств.

Подходы к проектированию направляющих и регулирующих аппаратов, используемых в гидро- и пневмосистемах транспортных средств: расчет и выбор параметров направляющих и регулирующих

аппаратов (дресселей, распределителей, клапанов и т. д.), прочностной расчет деталей, расчет основных статических характеристик.

Тема 5. Основные параметры и общая компоновка транспортных средств.

Параметры масс. Удельная материалоемкость. Удельная грузоподъемность. Полная масса автомобиля и ее предельное значение. Осевые нагрузки. Габаритные ограничения. Грузовместимость.

Компоновочные схемы грузовых автомобилей и перспективы их развития. Определение основных параметров компоновки автомобиля. Колесная формула и ее определение, рекомендуемые значения коэффициента сцепного веса. Распределение осевых нагрузок.

Методические основы выполнения компоновки автомобиля. Размещение основных агрегатов. Рабочее место водителя.

Тема 6. Состав и структура САПР транспортных средств.

Виды обеспечений САПР: структура системы, назначение обеспечений. Основные особенности и черты САПР.

Организация проектирования, внедрения и эксплуатации систем автоматизированного проектирования. Информационное обеспечение этапов жизненного цикла GALS-технологии.

Тема 7. Оптимизация проектных решений транспортных средств.

Задачи структурной и параметрической оптимизации. Математическое описание задачи оптимизации. Ограничения, накладываемые на оптимизируемые параметры. Подготовительные операции к решению задачи оптимизации. Выбор управляемых и неуправляемых параметров. Понятие о целевой функции. Размерность пространства проектирования. Стратегия поиска.

Выбор критериев эффективности. Частные и общие критерии. Преимущества стоимостных критериев. Компромиссное решение. Выбор начального приближения, области поиска, точности поиска оптимума, метода оптимизации, условий прекращения поиска.

Тема 8. Основы метода конечных элементов.

Понятие о методе конечных элементов. Матрица жесткости. Параметры и типы конечных элементов. Нагрузки и виды напряжений.

Этапы работы программы метода конечных элементов. Структура пре- и постпроцессорной обработки при решении задачи методом конечных элементов.

Тема 9. Интегрированные системы автоматизированного проектирования транспортных средств.

Недостатки традиционного процесса проектирования и производства. Организация интегрированных автоматизированных систем. Автоматизированные системы производственного планирования, управления производством, технологической подготовки производства.

Комплексные системы САПР/АСТПП, основанные на поверхностном и твердотельном моделировании. Обзор структуры и содержания современных программных пакетов трехмерного моделирования.

Основные модули интегрированных систем и их возможности.

Интегрированные системы автоматизированного проектирования и технологической подготовки производства, применяемые в современном автомобилестроении.

Тема 1. Введение

1.1. «Жизненный» цикл транспортного средства и место проектирования в этом цикле

В соответствии с образовательным стандартом ОСВО 1-37 01 02-2013, транспортные средства – это наземные средства для перевозки грузов и пассажиров, размещения специального оборудования, включающие все виды автотранспортных средств, мотоциклы и приравненные к ним механические транспортные средства, вагоны поездов, трамваев и метрополитена. Автотранспортные средства – транспортные средства, включающие автомобили, автопоезда, прицепы, полуприцепы, предназначенные для перевозки пассажиров и грузов.

«Жизненный» цикл транспортного средства (ТС) – это совокупность взаимосвязанных процессов создания и последовательного изменения состояния ТС: от формирования исходных требований к нему до завершения эксплуатации ТС. Этот цикл делят на стадии, устанавливаемые в нормативно-технической документации (НТД) и характеризующие конкретным состоянием ТС, видом предусмотренных действий (работ) по отношению к ТС и их результатом.

Стадии «жизненного» цикла ТС – создание, производство, обращение и эксплуатация.

Процесс проектирования ТС – это составная часть его создания, сложный и длительный процесс, в котором участвуют конструкторы, дизайнеры, расчетчики, ученые, испытатели, специалисты в об-

ластях производства и эксплуатации. Сложность процесса проектирования обусловлена сложностью конструкции ТС, многообразием нормативных требований и ограничений к ней и ведет к высокой стоимости и длительности всей стадии создания.

Рассмотрим названные стадии «жизненного» цикла.

I. *Создание транспортного средства* начинается с предпроектных исследований и завершается собственно созданием новой модели ТС. При подготовке к проектированию нового ТС определяют принципиальную возможность и целесообразность его создания. Необходимость в новом ТС должна следовать из потребностей потенциальных покупателей, экономических и технических возможностей его создания. Требуется глубокий анализ названных потребностей и возможностей, а также учет достижений современной науки и уровня развития смежных отраслей (например, производства материалов, электронных компонентов и др.).

Выявление потребностей в новой модели ТС проводится с помощью поисковых исследований, базирующихся на фундаментальных исследованиях, опыте применения аналогичных ТС, ретроспективном анализе и прогнозах развития типа транспортных средств, к которому относится новая модель.

Разработка новой модели ТС для ее создателей должна быть в определенной степени мотивирована. Мотивация может вытекать из прогнозируемого спроса на данное ТС, возможности повышения эффективности работы фирмы-производителя или группы фирм. Потребности, экономика, наука и производство развиваются взаимосвязано. Комплекс этих отношений можно показать в виде схемы. Важным элементом поисковых исследований является создание компьютерных моделей и концептуальных макетов будущего ТС и его частей с определенной степенью упрощения. Модели и макеты позволяют проверить на этом этапе правильность подходов к дизайну ТС, оценить его возможные эксплуатационные характеристики.

Результатом поисковых исследований, проводимых в предпроектный период, является разработка технических требований к ТС и формирование технического задания на проектирование. Работы по созданию ТС представляют законченную стадию, состоящую из следующих этапов: научно-технический поиск, проектирование, изготовление образцов для испытаний, доводка конструкции. Названные этапы взаимосвязаны, частично совмещены, некоторые из них

могут при необходимости повторяться. Этап проектирования включает большое число операций и процедур: от предварительных расчетов и эскизов до уточненных расчетов, моделей (чертежей) деталей, инструкций, технических условий и т. п. Результатом проектирования является комплект проектной документации, содержащей всю необходимую информацию для организации и осуществления производства ТС.

На всех этапах создания изготавливаются макетные, экспериментальные и опытные образцы ТС для проведения их испытаний (исследовательских, доводочных, предварительных и др.). Исследовательские испытания служат для изучения свойств и характеристик ТС. Для доводки конструкции и оценки влияния вносимых в ходе доводки изменений на показатели качества проводят доводочные испытания. После завершения разработки конструкции и изготовления опытных образцов ТС проводятся предварительные контрольные испытания с целью проверки возможности представления образцов на приемочные испытания.

Приемочные испытания являются заключительным этапом стадии создания. По их результатам решается вопрос о целесообразности производства спроектированного ТС. Приемочная комиссия составляет акт приемки опытного образца или опытной партии, в котором содержится рекомендация о постановке на производство и выполнении указаний приемочной комиссии о необходимой доработке конструкции ТС. По результатам испытаний возможна корректировка проектной документации и доработка опытных образцов.

К стадии создания ТС тесно примыкают работы по технологической подготовке производства, хотя относятся они ко второй стадии «жизненного» цикла – производству.

II. *Производство ТС.* Эта стадия включает этапы постановки на производство, установившегося производства и снятия с производства. Постановка на производство включает подготовку производства и освоение производства.

Подготовка производства служит для обеспечения технологического процесса изготовления ТС и может быть начата параллельно со стадией создания. В подготовке производства особенно выделяется технологическая подготовка, во время которой выбираются технология и оборудование, организуется логистика, планируется процесс производства во времени, распределяются работы и т. д.

Освоение производства включает отработку и проверку подготовленных технологических процессов, овладение практическими приемами изготовления продукции с требуемыми показателями и в заданном объеме выпуска.

Установившееся производство начинается после окончательной отработки конструкторской и технологической документации. Решение о производстве принимается по результатам квалификационных испытаний установочной партии.

Снятие с производства выпускаемого ТС осуществляется при несоответствии его технического уровня современным требованиям, низких технологических показателях и показателях качества ТС, отрицательном воздействии ТС на здоровье людей и окружающую среду, отсутствии спроса и заказов, при освоении производства аналогичной более новой модели ТС.

III. Обращение ТС. Так называется стадия «жизненного» цикла ТС от отгрузки его изготовителем до получения потребителем. Эта стадия состоит из следующих этапов: хранение нового ТС на складе готовой продукции, реклама, упаковка, транспортирование к месту продажи, подготовка к продаже.

IV. Эксплуатация ТС. На данной стадии реализуется, поддерживается и восстанавливается качество ТС. Эксплуатация включает в себя такие этапы: ввод в эксплуатацию, использование по назначению, техническое обслуживание и ремонт, модернизация и хранение.

Снятие с эксплуатации с последующей утилизацией проводится тогда, когда ТС вследствие морального или физического износа перестает отвечать предъявляемым требованиям, когда становится нецелесообразным или невозможным дальнейшее применение ТС и его ремонт. Снятие ТС с эксплуатации оформляется документально в установленном порядке.

Стадии «жизненного» цикла ТС взаимосвязаны и взаимообусловлены. Степень учета этих связей влияет на уровень качества и технического совершенства создаваемых ТС.

1.2. Особенности проектирования транспортных средств

Проектирование – это процесс составления описания, необходимого для создания еще несуществующего объекта (или несуществующего алгоритма функционирования объекта). Процесс проектирова-

ния осуществляется преобразованием первичного описания (в виде технического задания (ТЗ)), оптимизацией характеристик объекта и алгоритма его функционирования, устранением некорректности ТЗ и последовательным представлением все более детального представления проектируемого объекта на стадиях разработки проекта [1].

В ходе проектирования выполняют технические и экономические расчеты, схемы, графики, макеты, создают компьютерные модели объекта. Также составляются пояснительные записки, спецификации, сметы, калькуляции и описания. Проект реализуется в соответствии с планом, который можно представить в виде логической схемы построения проекта. Такая схема отражает очередность выполнения проектных процедур и операций.

Проектная процедура представляет собой формализованную совокупность действий, выполнение которых заканчивается принятием проектного решения (под проектным решением понимается промежуточное и конечное описание объекта, необходимое и достаточное для дальнейшего хода проекта или его окончания). Проектная процедура состоит из элементарных проектных операций с установленным порядком их выполнения и направлена на достижение локальной цели проектирования.

Проектная операция – действие или совокупность действий, являющихся частью проектной процедуры.

Алгоритм проектирования – совокупность предписаний в виде схемы выполнения проекта.

Примерами проектных процедур могут служить такие сложные действия, как расчет параметров трансмиссии ТС, построение кинематической схемы коробки передач и др. Примеры проектных операций – решение системы алгебраических уравнений, описание статического положения механизма при заданных нагрузках, создание чертежа (модели) элемента конструкции и т. д.

Последовательность выполняемых при проектировании процедур называется маршрутом проектирования. Типовой маршрут – это маршрут, одинаковый при проектировании многих объектов одного вида. Проектные процедуры опираются на язык проектирования как средство лингвистического и графического описания проектируемого объекта.

Результатом проектирования является окончательное проектное решение, удовлетворяющее ТЗ и необходимое для производства

объекта. По завершении проекта получают проектные документы, проект в целом. Проектные документы – это документы, выполненные по определенной форме и представляющие проектные решения по создаваемому объекту. Проект – это совокупность проектных документов в соответствии с установленным перечнем, в которых представлен результат проектирования.

Современное проектирование характеризуется полномасштабным применением САПР (систем автоматизированного проектирования). Автоматизация проектных работ по сравнению с традиционным подходом к выполнению проекта требует полной формализации алгоритмов решаемых задач, однозначности толкования терминов, строгости в определении понятий, четкости классификаций. Автоматизация позволяет создать эффективные технологии проектирования и, по сути, применять совершенно новую методологию для проектных работ.

Теоретической базой для проектирования служат общая теория технических систем, динамика систем, системный подход, исследование операций, теория надежности, экономико-математические методы, методы прикладной математики, теория принятия решений, теория информации и др.

Проектирование ТС – это творческий процесс, трудно поддающийся формализации, а потому и автоматизации. Но наряду с творческими задачами проектирование включает в себя много рутинных операций, автоматизация которых возможна и необходима. Это дает существенное сокращение времени выполнения таких операций при росте точности действий и качества проекта. Решения творческих задач при проектировании ТС и сложных технических объектов вообще делятся на эвристические и систематические.

Эвристическими решениями называются те, для получения которых используется мыслительная деятельность человека. Эти решения нельзя получить логически из опыта.

Систематические решения получают в результате использования методов, стимулирующих творческую деятельность (например, метод мозгового штурма, морфологический метод, инверсия алгоритмы решения изобретательских задач и др.). Эти методы являются систематизированными эвристическими приемами, основаны на логике и используют заранее определенную последовательность действий и операций (технология проектирования).

Сокращение сроков создания машин, повышение их технико-экономических показателей требуют комплексного подхода к проектированию. Этот подход учитывает взаимосвязь систем и элементов ТС, взаимодействие ТС с окружающей средой и основывается на стратегии достижения нужного результата. Такую стратегию может обеспечить системный подход, являющийся направлением методологии научного познания, в основе которого лежит изучение сложных объектов как систем.

Характерные особенности современного проектирования ТС:

- 1) применение системного подхода;
- 2) использование стратегии достижения конечного результата;
- 3) высокая степень формализации и типизации проектных операций и процедур;
- 4) автоматизация проектирования на всех этапах на основе САПР;
- 5) создание баз данных для проекта.

Различают два вида проектирования – внешнее и внутреннее. Внешнее проектирование представляет собой научно-технический поиск и прогнозирование во время предпроектных исследований. На основе анализа запросов потребителей, научно-технических достижений при производстве и в конструкциях ТС, а также прогресса в смежных областях обосновывается необходимость создания ТС и формируется замысел новой модели. Возможность ее разработки и производства должна подтверждаться наличием финансовых и технологических ресурсов. Конечной целью внешнего проектирования является разработка ТЗ на новый объект. Для количественного обоснования критериев эффективности и технических требований к конструкции проводят моделирование и исследование альтернативных вариантов реализации технических решений, удовлетворяющих ТЗ. В ходе внешнего проектирования конкретизируются разные аспекты нового ТС, прежде всего во время его будущей эксплуатации. Часто внешнее проектирование называют этапом научно-исследовательских работ.

Внутреннее проектирование – это выполнение собственно проекта ТС, начиная с опытно-конструкторских работ и завершая разработкой рабочего проекта. Этот вид проектирования проводит конструкторская (проектная) фирма или аналогичное подразделение фирмы-производителя. На начальных этапах создания нового объекта имеет место итерационный процесс поочередного выполнения

процедур внутреннего и внешнего проектирования, включая, кроме вышеназванных этапов, еще корректировку ТЗ, оценку выполнимости проекта, прогноз материальных и временных затрат на проектирование и изготовление объекта.

В ходе внутреннего проектирования разрабатываются техническое предложение (обосновывается целесообразность создания новой модели), эскизный проект, технический проект, рабочий проект. Если при проектировании решение задач высоких иерархических уровней предваряет решение задач более низких уровней, то проектирование называется нисходящим. Если же раньше проводятся работы низших уровней иерархии объекта, то это восходящее проектирование. У каждого из двух видов есть достоинства и недостатки. При нисходящем проектировании системный объект разрабатывают в условиях, когда его элементы еще не определены, об их свойствах и параметрах можно только предполагать. При восходящем проектировании, наоборот, элементы проектируют раньше объекта, и, значит, предположительную информацию имеем о ТС в целом.

В практике создания ТС применяют оба вида проектирования, но чаще используется восходящее проектирование. Так создают модификации базовой модели, создают семейство ТС.

Тема 2. Системный подход к проектированию транспортных средств

2.1. Понятие о сложной системе и системном подходе. Целостность системы, определение границ системы и ее элементов

Идея системного подхода по существу проста – следует рассматривать любой объект, явление или процесс как систему и во взаимосвязи с другими объектами, явлениями или процессами, оказывающими влияние на них.

Сущность системного подхода раскрывается также через его принципы, понятия и свойства сложной системы (СС).

Понятия, относящиеся к сложным системам: элементы системы, свойства элементов, связи между элементами, ограничения системы. С точки зрения функционирования СС выделяют, кроме связей и свойств, отношения, регулирование, контроль, стабильность, эквивалентность, надежность и др. С точки зрения взаимоотношений

СС – изолированность, централизацию, децентрализацию, оптимальность и т. д. С точки зрения развития – рост, эволюцию, обучение, самообучение.

С позиций системного подхода большинство объектов и явлений следует рассматривать как целостную систему. В самом широком смысле система – это совокупность объектов, обладающих связями между собой, общими свойствами и связями между свойствами. Эти объекты представляют собой элементы системы. Элемент – это минимальный компонент системы, предел ее дробления. Элемент рассматривается без дальнейшего его деления, как единое целое.

Свойства элементов – это определенные их качества. Связи соединяют элементы и их свойства в систему, в системный процесс. Они определяют порядок функционирования, взаимодействия элементов. Связи между элементами могут быть обусловлены взаимными ограничениями на действия друг друга. Если функционирование элементов происходит независимо друг от друга, то связи между ними отсутствуют.

Связи между элементами системы могут быть жесткими (чаще они имеют место в технических системах) и гибкими, которые меняются в процессе функционирования.

Также выделяют связи первого, второго и третьего порядка. Связи первого порядка – это функционально необходимые связи. Связи второго порядка – это дополнительные связи, которые не являются функциональными, но они улучшают работу системы. Связи третьего порядка являются избыточными. Их еще называют противоречивыми.

Функционально необходимые связи представляют собой системообразующие связи, которые совместно со связями развития составляют связи управления.

Связи управления позволяют установить важную характеристику системы. В системе подсистемы любого уровня управляемы извне, с более высокого уровня. И должны дать результат, необходимый для этой подсистемы.

При высоком уровне организации управления сложными процессами особое значение имеют обратные связи. Регулирование на основе обратной связи не требует полной информации о поведении объекта, т. е. система управления может быть эффективной и в случае, если объект управления – «черный ящик».

Обратная связь означает воздействие результатов управления на процесс в системе (рис. 2.1). При наличии обратной связи на вход СС подается информация с ее выхода, что позволяет корректировать, улучшать функционирование процесса.

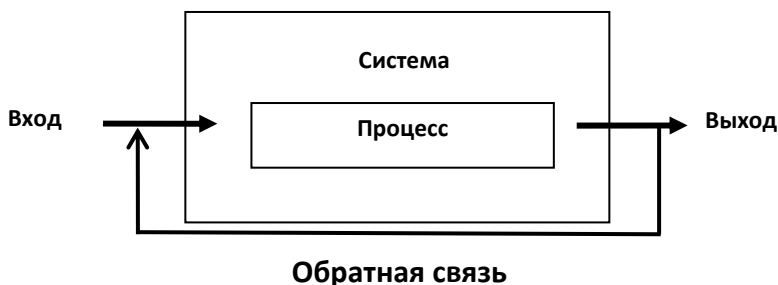


Рис. 2.1. Обратная связь для регулирования функционирования сложной системы

Ограничения СС складываются из двух частей: целей и принуждающих связей. Ограничения влияют на работу системы и в существенной степени определяют ее функционирование.

Существует достаточно много классификаций СС. Первая классификация – по свойствам элементов системы. Различают материальные и абстрактные системы. Материальные СС состоят из искусственных и естественных элементов. Абстрактные системы состоят из элементов-символов.

Вторая классификация – по признаку происхождения систем. Различают естественные и искусственные системы. Естественные СС возникают в естественных процессах и явлениях (климат, почва и др.). Некоторые естественные системы могут быть адаптивными. В них происходит постоянное приспособление к изменяющейся окружающей среде. Если естественные системы обмениваются регулярным образом веществом или энергией с окружающей средой, то они называются открытыми системами. При отсутствии таких обменов системы являются закрытыми. Искусственные СС создаются человеком. Они могут также быть открытыми, закрытыми и адаптивными. Чаще искусственные системы – открытые. Закрытость СС означает постоянство входа и возможность статистического прогноза информации на выходах из системы.

Третья классификация систем основывается на признаке сложности и исходя из особенностей поведения СС. Различают три класса систем – простые, сложные и очень сложные, по количеству элементов, входящих в СС. Увеличение числа элементов и усложнение связей внутри системы часто приводит к качественным скачкам. Еще по степени сложности взаимосвязей различают детерминированные и вероятностные системы. Возможен качественный переход от детерминированных СС к вероятностным и далее последовательное усложнение вероятностных систем.

По особенностям поведения систем (бихевиористический подход к классификации) различают СС с пассивным и активным поведением. У активных систем поведение может быть нецеленаправленным и целенаправленным. Целенаправленное поведение СС бывает без обратной связи и с обратной связью. Различают непредсказуемое и предсказуемое поведение системы с обратной связью.

Во многих технических системах взаимосвязи элементов обусловлены их структурой, например, конструкцией механизма. Особенно сложно управлять системой, в которой одним из элементов является человек.

Особенности системного подхода отражаются в его принципах, следующих из свойств системы. Выделяют такие принципы:

1. Сложный объект необходимо рассматривать как систему элементов, а не единым целым.

2. При изучении или создании СС разбивается на подсистемы (декомпозиция системы). Подсистемы являются автономными, т. е. они имеют свои цели, относительно слабо связаны с другими подсистемами по сравнению с внутренними связями в самих подсистемах. Связи, существующие между элементами системы, способны усиливать действия отдельных подсистем. Из-за этого система в целом может приобретать новые свойства, не присущие подсистемам.

3. Структурная упорядоченность СС следует из свойства делимости системы и наличия вертикальных и горизонтальных связей. Вертикальные связи определяют уровни системы и их иерархию. Смысл иерархической структуры состоит в относительной самостоятельности уровней и подчиненности более низких уровней более высоким. Горизонтальные связи – это связи между элементами одного уровня. Они обеспечивают выполнение определенной функции.

4. Целевая ориентация СС заключается в необходимости организации отдельных частей системы для реализации общей цели системы в целом. Эффективность управления системой тем выше, чем выше согласованность между частными целями подсистем и их соответствие общей цели.

В направленности подсистем и отдельных элементов на цель всей системы реализуется принцип целостности СС.

Названные принципы являются только основными. С развитием системного подхода могут появляться новые принципы, отражающие установленные позднее особенности новых СС и применение к ним данного подхода. Системный подход существенно преобразовал традиционные способы научного исследования и изучения сложных явлений и объектов, что позволяет проводить это более результативно. Особенностью системного подхода является также комплексное рассмотрение явления или объекта на основе комплекса их свойств и характеристик. Комплексность в изучении СС повышает объективность и уточняет влияние и роль каждого элемента и подсистемы.

Схематично системное исследование можно представить состоящим из нескольких этапов:

1. Четкая формулировка цели исследования за счет изучения внутренней структуры и свойств объекта, создания его адекватной модели, выявления нерешенных проблем. Это позволяет в последующем найти эффективные пути решения проблем.

2. Формирование системной характеристики объекта, т. е. выделение таких его свойств, которые связаны с целью исследования.

3. Создание модели объекта, адекватно отражающей реальный объект.

4. Проведение самого исследования модели как сложной системы (разбиение СС на части – декомпозиция, выделение элементов и связей в подсистемах, изучение отдельных подсистем и их последующий синтез, оценка адекватности системы как модели объекта, анализ результатов исследования и эффективности выбранного направления решения задачи).

Сложная система, моделирующая реальный объект, является отражением реальности, абстракцией объекта. Главное требование к модели – ее адекватность. Можно сказать, модель – это упрощенная конструкция реального объекта, его огрубление. Это инстру-

мент для изучения и создания объекта. С помощью модели можно более точно отразить реальное явление, чем через непосредственное ее восприятие. Степень приближенности модели к объекту – это не отказ от точного отображения объекта, а прием, позволяющий удолетворительно добиться цели исследования.

При системном подходе к решению сложной проблемы реализуется структурная организация исследования, широко используются количественные методы и другие формальные средства. Формализация выступает как способ представления логики функционирования процесса, углубления знаний о его природе. Формализация – это инструмент для получения знания об изучаемом процессе, позволяющий применять математические методы и компьютерные технологии. При формализации выделяется главное и отбрасывается второстепенное.

Формальные аспекты системного подхода развиваются в теории систем. Оптимизацией структуры систем занимается системотехника. Конструктивность системного подхода заключается в том, что он направляет рассмотрение сложных объектов через изучение их моделей и дает способы их комплексного исследования.

2.2. Комплексная оценка сложных систем.

Принцип модульного проектирования

Рассмотрим данный подраздел на примере автоматизированного проектирования узлов и механизмов транспортных средств, базирующегося на системном подходе. Развитие компьютерных средств, прогресс прикладной математики, кибернетики, теории сложных систем, системного анализа, математической теории эксперимента и системного программирования и других сфер знаний позволили разработать эффективные методы исследования и проектирования сложных объектов, объединенные под общим названием «методология проектирования сложных систем».

Традиционные теории технического направления (теория механизмов и машин, теория автоматического управления и др.) изучают внутренние свойства объектов, но не рассматривают задачи структурного (архитектурного) плана.

Сущность системного подхода к проектированию заключается в рассмотрении проектируемого объекта как сложной системы, по-

строении его математической модели, исследовании его свойств с помощью математического моделирования и решения задач анализа и синтеза проектируемой СС. Основная цель системного подхода к проектированию – это сокращение сроков, затрат на проведение проектных работ и улучшение их качества. Процесс проектирования при системном подходе расчленяется на уровни. Это касается и самого объекта.

На высшем уровне используется наименее детализированное представление, отражающее только самые общие черты и особенности создаваемой СС. С понижением уровня рассмотрения и разработки степень подробности возрастает, и система рассматривается отдельными подсистемами (блоками). Такой иерархический подход позволяет на каждом уровне формулировать и решать задачи приемлемой сложности, так как в таком случае задача большой размерности разбивается на последовательно решаемые задачи малой размерности.

На каждом уровне процесс автоматизированного проектирования (АП) представляется как решение совокупности конкретных задач. Этот процесс на каком-то уровне можно представить схемой, показанной на рис. 2.2.

Проектирование механизма (агрегата) ТС как СС начинается с синтеза (формирования) его структуры. Исходный вариант структуры генерируется, а затем он оценивается с точки зрения удовлетворения требованиям работоспособности. Для каждого варианта структуры составляется модель системы. Эта модель анализируется, проверяются условия окончания оптимизации и принимается решение по завершению или продолжению процесса оптимизации. Все это называется параметрической оптимизацией механизма. После завершения оптимизации и положительной проверки выполнения условий работоспособности переходят к завершающей процедуре на данном уровне – оформлению технической документации и требований (числовым значениям выходных параметров механизма), необходимых для проработки на следующем уровне проектирования.

Если после проведения оптимизации параметров условия работоспособности механизма не выполняются, то выполняется генерация нового варианта структуры механизма и его оценка (структурная оптимизация). При неудачной оптимизации могут быть пересмотрены технические требования на разработку механизма на данном уровне, и происходит возврат на предыдущий уровень проектиро-

вания. Такая схема соответствует типовой последовательности процедур при проектировании механизма. На практике могут иметь место отклонения от такой схемы (например, если структура механизма задана, то не выполняется ее синтез).

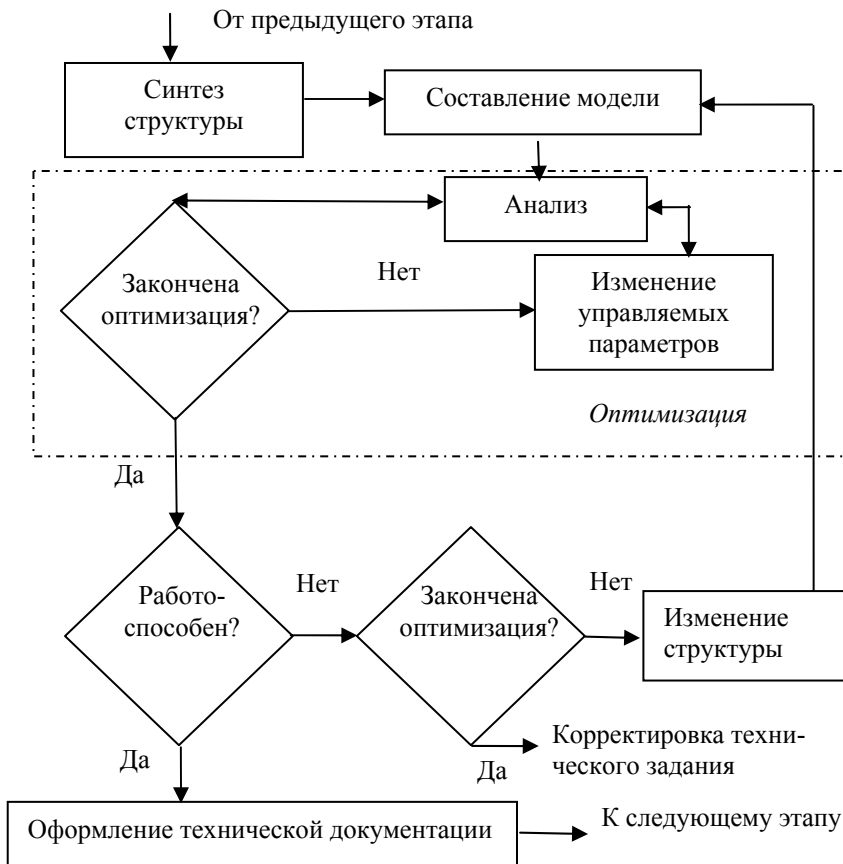


Рис. 2.2. Схема процесса автоматизированного проектирования на этапе проекта

Процесс автоматизированного проектирования носит итерационный характер, и процедуры по приведенной схеме выполняются многократно.

В основе иерархического подхода к проектированию лежит разделение описаний объекта по степени детализации его свойств и характеристик. На каждом уровне иерархии рассматриваются свои элементы и своя система.

На верхнем (№ 1) уровне (рис. 2.3) проектируемый сложный механизм S – это система из n взаимосвязанных и взаимодействующих элементов S_i . Каждый элемент этого уровня является сложной системой на более низком уровне (№ 2) и состоит из m элементов S_{ij} . На практике часто элементы S_{ij} выделяют по функциональному признаку.

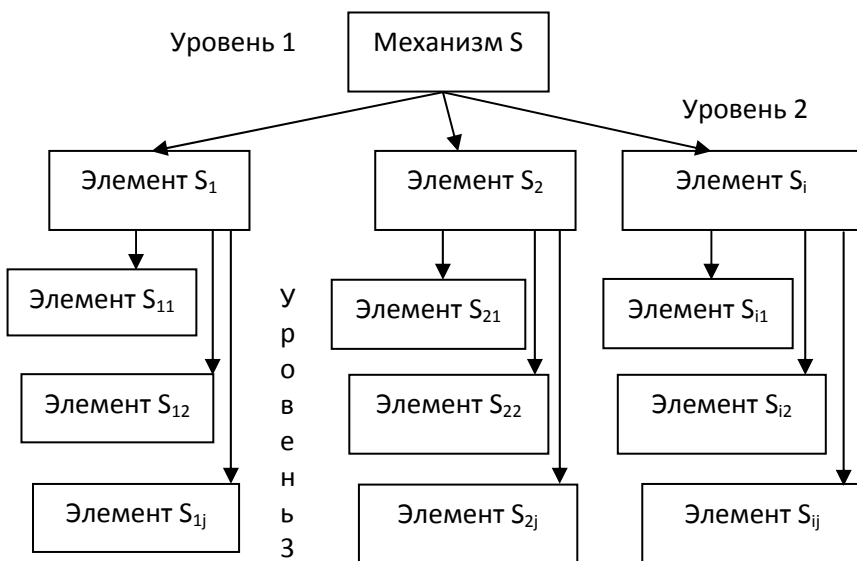


Рис. 2.3. Детализация описания объекта по уровням иерархии

Такое разделение проектируемого объекта на всех уровнях его иерархии продолжается до получения на каком-то уровне элементов, которые не могут быть разделены. Эти элементы называются базовыми по отношению к создаваемому механизму.

Тема 3. Начальные стадии проектирования транспортных средств

3.1. Поиск технических решений

На начальных этапах проектирования (техническое предложение, эскизный проект) осуществляется выбор вариантов узлов ТС и транспортного средства в целом. На этих этапах закладывается основа нового транспортного средства и определяются его технико-экономические показатели. Алгоритмы методов автоматизированного поиска и выбора технических решений (ТР) не являются четкими и однозначными и не обеспечивают целенаправленного движения от формализованного технического задания к улучшенному ТР. Создание четкого алгоритма прямого синтеза ТР требует знания свойств всего пространства технических решений для включения его в компьютерную программу синтеза информации о получении наилучшего варианта ТР.

Для сложных объектов, таких как ТС, пространство ТР оказывается слишком широким – сотни и тысячи вариантов. Изучить такой объем информации с приемлемой степенью детализации за приемлемое время не представляется возможным. Поэтому нельзя сформулировать удобный для применения четкий алгоритм изучения вариантов нового ТС и прямого целенаправленного выбора лучшего из этих вариантов.

Задачу синтеза ТР можно решать также методом проб и ошибок. На первом этапе рассматриваются концептуальные решения (концепт-кары), признаки качества которых еще неизвестны. Затем на втором этапе эти концепт-кары анализируются и оцениваются. Задача определения оптимального ТР может решаться с помощью созданной компьютерной программы, которая использует исходную информацию о том, где может находиться оптимальное решение. Признаки качества найденного ТР названная программа проверит по заложенным в нее критериям оценки. В случае неудовлетворительного решения программа сгенерирует новый вариант ТР из набора допустимых значений параметров и признаков и оценит его. Процесс поиска будет продолжаться до получения оптимального технического решения.

Метод синтеза ТР, основанный на компьютерном поиске в пространстве возможных вариантов и их анализе, называется итеративным (или непрямым) методом синтеза ТР. Этот метод не требует от конструктора знания всех свойств пространства решений для проектируемой модели ТС. Компьютерный поиск базируется на эвристических методах, которым присуща определенная общность, состоящая в разделении решения задачи на этапы и последовательном выполнении этих этапов. К основным этапам относят: точную формулировку задачи, декомпозицию задачи на составные части, поиск альтернативных способов решения выделенных частей задачи, выбор способов преобразования неудовлетворительного решения, выработку единого критерия отбора альтернативных решений, выбор перспективных ТР.

3.2. Подсистема поиска аналогов

Под аналогом проектируемого транспортного средства понимается реально существующее ТС или известное техническое решение, показатели качества и признаки которого удовлетворяют требованиям технического задания. Подсистема поиска аналогов позволяет выбирать:

– варианты ТС, показатели качества которых удовлетворяют неравенствам:

$$a_n \geq a_{ТЗ} \text{ или } a_n < a_{ТЗ},$$

где a_n – значения показателей качества найденных вариантов ТС;

$a_{ТЗ}$ – значения требований ТЗ;

– варианты ТС, имеющих требуемые функциональные, конструктивные или технологические признаки;

– варианты ТС, удовлетворяющих условиям предыдущих двух пунктов;

– варианты узлов ТС, удовлетворяющих условиям предыдущих трех пунктов.

Подсистема поиска аналогов содержит следующие информационные массивы:

- перечень наименований или номеров ТС-аналогов;
- список показателей качества по данному классу ТС;
- список классификационных признаков.

В перечень аналогов включаются те ТС, на которые имеется техническая документация. Список показателей качества и классификационных признаков состоит из показателей и признаков, относящихся к ТС в целом и к отдельным элементам ТС. Основой для выбора классификационных признаков является классификация данного класса ТС.

В качестве модели для выбора допустимых аналогов используется матрица соответствий в виде морфологической таблицы, в которой по горизонтали записаны наименования ТС, а по вертикали – показатели качества и признаки. В поле матрицы в колонке по каждому ТС стоят значения показателей, и делается отметка о наличии того или иного признака (рис. 3.1).

Названия ТС	Показатели качества и классификационные признаки					
1						
2						
3			Значение 1	Значение 2		
4						
5						
6						

Рис. 3.1. Матрица соответствий подсистемы поиска аналогов

Для поиска аналогов необходимо иметь ТЗ, содержащее требуемые показатели качества и их значения, а также классификационные признаки. Их количество и ранжирование могут быть произвольными и определяются особенностями решаемой задачи.

Подсистема предоставляет пользователю следующую информацию:

- наименования ТС-аналогов;
- список показателей качества и их значения для найденных аналогов;

- данные о наличии документации, адрес ее нахождения и т. д.;
- список требований ТЗ, которым не удовлетворяют найденные аналоги;
- ссылки на графические изображения аналогов и их элементов, которые располагаются в отдельном каталоге, входящем в состав подсистемы поиска.

Возможны случаи, в которых нельзя найти аналог, в полной мере удовлетворяющий по показателям качества требованиям ТЗ. Тогда для улучшения некоторых показателей выбранного аналога используют специальную подсистему оптимизации показателей. Иногда подсистему поиска аналогов целесообразно представлять в виде нескольких подсистем, одна из которых может базироваться на информации о ТР, содержащихся в разных информационных источниках, в том числе в патентах. Значения показателей качества таких ТР определяются с помощью экспертных методов оценки.

3.3. Подсистема синтеза технических решений

Данная подсистема обеспечивает решение следующих задач:

- синтез допустимых ТР из узлов высоких уровней иерархии;
- синтез допустимых ТР с использованием элементов всех уровней иерархии;
- синтез ТР с заданными узлами или элементами.

Методы синтеза базируются на возможности описания пространства ТР с помощью набора показателей и признаков, каждый из которых может принимать несколько значений. Показатели не должны быть обязательно материальными элементами или иметь числовые значения. Это могут быть любые признаки, по которым проектируемое ТС отличается от других аналогичных ТС. Комбинируя между собой различные значения показателей, можно получить разные варианты ТР.

Процесс проектирования можно упростить, если создаваемое ТС разделить на части (подсистемы) и искать ТР для этих частей. Затем, комбинируя между собой полученные варианты ТР подсистем ТС, можно синтезировать разные варианты ТР для транспортного средства в целом. В реальных ТС допустимы не любые сочетания параметров. Есть недопустимые сочетания.

Подсистема синтеза ТР состоит из следующих информационных массивов: дерева ТР, списка технических требований и набора классификационных признаков. Дерево ТР строится на основе любой информации о ТР для создаваемого ТС. Сюда могут включаться данные о некоторых ТР из информационных массивов подсистемы поиска аналогов. Список требований и признаков имеет такой же вид, как и в подсистеме поиска аналогов.

Моделью подсистемы поиска ТР является матрица соответствий между подсистемами ТС и их признаками с одной стороны и техническими требованиями с другой. Подсистема представляет пользователю такую информацию:

- описание допустимых вариантов ТР;
- ссылки на аналоги по отдельным элементам ТР, содержащимся в базе данных подсистемы поиска аналогов;
- список технических требований и классификационных признаков, которым соответствуют полученные варианты ТРЖ;
- список технических требований, которые не могут быть выполнены.

Большинство эвристических приемов использует информацию, необходимую для программирования и применения приема: параметры пространства переменных, шаг изменения переменных. В конкретной подсистеме для обеспечения комплексной проработки синтезированных вариантов ТР используются модули компьютерной графики с целью построения общего вида каждого варианта решения на основе типовых элементов ТС.

Возможен другой вариант подсистемы синтеза ТР, отличающийся от вышеописанного. Этот вариант позволяет решать задачи: выбор конструктивных вариантов структурных элементов ТС, синтез компоновочной схемы ТС, преобразование компоновочной схемы в ТР. Подсистема использует информационные массивы: набор геометрических форм элементов и частей, набор конструктивных схем вариантов решений, список технических требований, данные по материалам. Такая подсистема обеспечивает синтез вариантов компоновки ТС, с помощью которых описываются эскизные представления ТР. Полученные эскизы подлежат дальнейшей конструктивной проработке и детализации решения.

3.4. Выбор рациональных вариантов ТР

При большом количестве вариантов ТР выбор оптимального варианта простым перебором затруднителен, а иногда и просто невозможен. Для поиска оптимальных решений с помощью эвристических приемов применяются комбинаторные алгоритмы. Они основаны на организации множества генерируемых вариантов в виде древовидных (ярусных) графов. При числе параметров, равном 15–20, и числе значений каждого параметра 3–5, количество вариантов решений составляет 10^8 – 10^{12} .

Генерация множества решений технической задачи относится к области дискретного программирования [2, 3]. Для сокращения перебора возможных вариантов ТР применяют специальные методы. Например, метод отсечения (последовательный анализ), метод Порето и др.

В связи с дискретностью параметров технического объекта и нелинейными ограничениями на область допустимых решений эти методы являются самыми универсальными и дают наиболее оптимальное решение. Другие методы оказываются нерациональными из-за необходимости большого объема предварительной работы по изучению свойств пространства решений. Скажем, методы случайного поиска не гарантируют низкую вероятность потери лучших решений задачи.

Рассмотрим упомянутые методы.

Метод отсечения (последовательный анализ). Отсечение перспективных вариантов в процессе их последовательной генерации основано на правиле доминирования. В соответствии с данным правилом первый вариант решения будет предпочтительнее второго, если взвешенная оценка суммы показателей первого больше аналогичной оценки второго. Второй вариант ТР оказывается бесперспективным уже на одном из промежуточных шагов поиска, дальше его не следует рассматривать.

Схема работы метода такова. Пусть на $(k - 1)$ -м шаге поиска решения определено множество перспективных вариантов $X_{k-1}^> = \{X_1^{k-1}, X_2^{k-1}, \dots, X_i^{k-1}\}$. Каждый из этих вариантов характеризуется k -параметрами. На следующем k -м шаге каждый из полу-

ченных ранее перспективных вариантов X_i^{k-1} используется для построения новых вариантов ТР, число которых составит $(n - k)$ (здесь n – число вершин древовидного графа ТР). При этом новые варианты описываются $(k + 1)$ параметрами. В результате получаем расширенное множество вариантов ТР:

$$\hat{X}_k^> = \{X_1^k, X_2^k, \dots, X_{(n-k)}^k\}.$$

Из последнего множества отбираются группы вариантов, номер которых заканчивается одним и тем же номером вершины графа. По правилу доминирования в каждой группе выделяются по одному наиболее предпочтительному варианту. Выбранные варианты образуют множество $\hat{X}_{k,p}^{\wedge}$ перспективных вариантов после k -го шага поиска. В дальнейшем описанная процедура повторяется до тех пор, пока на n -м шаге из множества $\hat{X}_n^>$ не будет выделен единственный оптимальный вариант X_{opt}^n .

Пример. Рассмотрим метод последовательного анализа на примере задачи о кратчайшем замкнутом маршруте. Древовидный граф для этой задачи представлен на рис. 3.2.

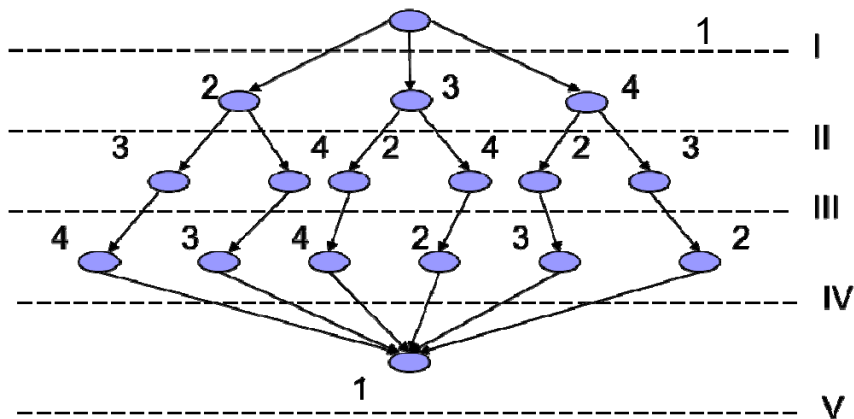


Рис. 3.2. Древовидный граф для задачи о кратчайшем замкнутом маршруте

Весовые коэффициенты участков возможных вариантов маршрута пусть будут равны: $C_{12} = C_{21} = 9$, $C_{13} = C_{31} = 10$, $C_{14} = C_{41} = 4$, $C_{32} = C_{23} = 6$, $C_{24} = C_{42} = 8$ и $C_{34} = C_{43} = 7$.

Применяя метод отсечения, после второго шага, когда три начальных варианта маршрута принимаются перспективными, получаем решение, которое удобно свести в таблицу (рис. 3.3). Из нее следует, что кратчайшему маршруту соответствует вариант с длиной в 26 условных единиц. Реализация метода отсечения бесперспективных вариантов маршрута позволила сократить количество просматриваемых и анализируемых вариантов по сравнению с полным их перебором.

Λ X_1	O 1	Λ X_2	O 2	Π	Λ $X_{2,p}$	O 3	Λ X_3	O 4	Π	Λ $X_{3,p}$	O 5	Λ X_4	O 6
1,2	9	1,2,3	15	+	1,4,3	11	1,4,3,2	17	+	1,4,3,2	17	1,4,3,2,1	26
1,3	10	1,4,3	11	+	1,2,3	15	1,2,3,4	22	-	1,4,2,3	18	1,4,2,3,1	28
1,4	4	1,2,4	17	-	1,4,2	12	1,4,2,3	18	+				
		1,3,4	17	-									
		1,3,2	16	-									
		1,4,2	12	+									

Рис. 3.3. Решение задачи о кратчайшем маршруте

В общем случае решение задачи таким методом уменьшает объем перебора в $\frac{(n-1)!}{2^n}$ раз. Для задач очень большой размерности использование метода отсечения сопряжено с существенными трудностями.

Метод Порето. Для сужения области поиска оптимальных ТР применяется также алгоритм выделения множества точек Порето. Таковыми точками являются точки пространства решений $x_n \in X$ (X – пространство решений, x_n – точки Порето), для которых выполняется условие:

$$\sum_{i=1}^m W_i \cdot \Phi_i(x_n) \leq \Phi(x),$$

где $i = 1, \dots, m$ – число точек Порето;

W_i – весовые коэффициенты, значения которых положительны;

$\Phi_i(x)$ – частные критерии оптимальности ТР.

Точки Порето представляют собой перспективные варианты ТР. Для существования области Порето, которой принадлежат одно-

именные точки, необходимо, чтобы $\sum_{i=1}^m W_i \cdot \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_n} = 0$. Т. е. следует го-

ворить о комплексной целевой функции $\Phi = \sum_{i=1}^m W_i \cdot \Phi_i$, позволяю-

щей при ее пошаговой минимизации одним из известных градиентных методов получить точки множества Порето, т. е. найти оптимальные ТР. Последовательность работы метода:

– начальное множество точек Порето ($x_n^i, i = 1, \dots, m$) получают минимизацией каждого из частных критериев Φ_i в предположении, что множество коэффициентов W_i соответствует вектору, все компоненты которого равны нулю за исключением одного, равного 1;

– на следующем шаге поиска определяются весовые коэффициенты W_{m+k} , которые в соответствии с принципом Порето обеспечивают компромисс между частными критериями Φ_i . Через m экстремальных точек, соответствующих $\Phi_{i \min}$, проходит так называемая компромиссная поверхность Порето. Найденный вектор весовых коэффициентов представляет собой нормаль к поверхности Порето и используется при последующей минимизации целевой функции для получения дополнительной точки Порето ($m + 1$), в которой критерий оптимальности равен Φ_{m+1} . Если окажется, что $\Phi_{m+1} < \Phi_{i \min}$, то уже из этой точки определяется точка ($m + 2$) и в ней рассчитывается целевая функция Φ_{m+2} (при этом находится вектор весовых коэффициентов);

– вышеописанная процедура итеративно повторяется при использовании новых точек Порето вместо исходных одноименных точек.

Комплексная целевая функция $\Phi = \sum_{i=1}^m W_i \cdot \Phi_i$, называемая также

критерием оптимальности (или эффективности) применяется для многокритериальных оценок ТР и в тех случаях, когда весовые коэффициенты W_i выбираются экспериментально или посредством экспертных оценок. Частные критерии Φ_i не могут быть оптимизированы по одним и тем же параметрам объекта (скажем, ТС).

Значения весовых коэффициентов частных критериев могут быть определены экспертами на основе их коллективного опыта и знаний. При экспертизе должны быть решены три вопроса: подбор экспертов, процедуры их работы и процедуры обработки мнений экспертов. Подбор экспертов часто основывается на принципе «снежного кома».

Вначале составляется список специалистов, каждый из которых является бесспорным кандидатом в экспертную группу (нулевой тур). Далее (I тур) каждый из них предлагает по своему усмотрению новых кандидатов в эксперты. Из числа последних отбираются специалисты, которым в следующем туре также предлагается назвать своих кандидатов. Число туров обычно не более 3–4.

В качестве процедуры работы экспертов часто рекомендуется известный метод Дельфи. Принцип этого метода состоит в том, что эксперты анонимно заполняют опросные листы, а организаторы экспертизы стремятся выявить общее мнение экспертов с минимальным разбросом их оценок (так называемое согласованное мнение). Это мнение достигается благодаря нескольким турам, в процессе которых позиции экспертов, как правило, сближаются. В последующих турах экспертам дается возможность учесть информацию о результатах предыдущих туров и внести коррективы в свои новые оценки. Организаторам допустимо после первых двух туров заменить последующие туры дискуссией. Применение данного метода позволяет сохранить принцип анонимности на начальной стадии экспертизы (1 и 2 туры), а в последующем реализовать преимущества дискуссии (немедленная обратная связь, быстрое достижение взаимопонимания экспертами, возможность выступать несколько раз и уточнять или изменять свою точку зрения с учетом мнений других экспертов). Такая методика применялась в свое время при решении ряда вопросов многокритериальной оптимизации в задачах автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

Тема 4. Моделирование транспортных средств при проектировании

4.1. Описание проектируемого автомобиля

Применение принципов декомпозиции и иерархичности при проектировании ТС позволяет структурировать представление о создаваемом транспортном средстве. При этом выделяются иерархические уровни, узлы, детали, элементы деталей ТС, его выходные параметры, показатели эффективности и показатели качества. Выходными параметрами проектируемого ТС являются именно показатели эффективности и качества. Показатели эффективности – это количественная оценка степени соответствия ТС его целевому назначению. Они позволяют проанализировать такие важные характеристики, как производительность, экономичность, надежность, стоимость, материалоемкость, энергоемкость и др. По показателям качества судят о правильности функционирования ТС как системы. Они служат для оценки на разных уровнях иерархии ТС.

Если компоновка ТС определена, то его выходные параметры зависят только от внутренних и внешних параметров. К внутренним параметрам относятся параметры элементов ТС, а к внешним – параметры внешней среды, которые влияют на функционирование ТС как объекта.

При переходе от одного уровня проектирования к другому внутренние параметры могут стать выходными и, наоборот, выходные параметры могут стать внутренними.

В общем случае, если рассматривать ТС как систему, то зависимость его свойств от внутренних и внешних параметров можно представить зависимостью:

$$\vec{Y} = \vec{F}(\vec{X}, \vec{Q}), \quad (4.1)$$

где $\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – вектор выходных параметров;

$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор внутренних параметров;

$\vec{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_l)$ – вектор внешних параметров.

Данное выражение – это математическая модель ТС (или объекта вообще), которая позволяет определить выходные параметры объ-

екта по известным значениям векторов \vec{X} и \vec{Q} . Математическую модель по формуле (4.1) удается получить только для простейших объектов. При проектировании сложных объектов (таких как ТС) данную модель используют только на некоторых этапах (предпроектных исследованиях, верхнем уровне функционального проектирования, когда выбираются параметры типоразмерных рядов ТС, на этапе параметрического синтеза после выбора компоновки и др.).

Для описания сложного технического объекта применяют математическую модель в виде системы уравнений $L\vec{V}(\vec{Z}) = \vec{\phi}(\vec{Z})$.

Здесь L – некоторый оператор; \vec{V} – вектор фазовых переменных (координат) системы; \vec{Z} – вектор независимых переменных, включающий в общем случае пространственные координаты; $\vec{\phi}(\vec{Z})$ – вектор функции независимых переменных.

Фазовые переменные описывают физическое или информационное состояние объекта. Изменение этих переменных во времени выражают переходные процессы в объекте. Вид фазовой переменной зависит от физической природы конкретного процесса. В механических системах фазовыми переменными являются сила и скорость, в электрических системах – сила тока и напряжение, в гидравлических – расход жидкости и давление, в тепловых – тепловой поток и температура.

Внутренние параметры в моделях i -го иерархического уровня становятся выходными параметрами в моделях более низкого ($i - 1$) уровня. Так, передаточные числа трансмиссии являются внутренними параметрами ТС, и в то же время это выходные параметры самой трансмиссии при ее проектировании.

Выходные параметры и фазовые переменные, фигурирующие в модели одной из подсистем, часто оказываются внешними параметрами в описаниях других подсистем. Например, тяговое сопротивление ТС – это его выходной параметр, а для автомобиля-тягача – это внешний параметр. Угловая скорость и крутящий момент на полуоси ТС представляют собой его фазовые координаты, а для дифференциала – это внешние параметры.

Большинство выходных параметров ТС представляет собой функционалы фазовых координат:

$$\vec{Y} = \vec{F}[\vec{V}(\vec{Z})].$$

Для определения вектора выходных параметров \vec{Y} необходимо при заданных векторах \vec{X} и \vec{Q} решить систему уравнений и по полученным результатам вычислить \vec{Y} . Примерами выходных параметров, определяемых по изложенной схеме, являются тяговая мощность, тяговый КПД, производительность ТС, амплитуды колебаний рамы ТС (водителя на сиденье) и др.

4.2. Этапы формирования математических моделей

После выбора рациональных вариантов решения технической задачи и соответствующих значений основных параметров проектируемого ТС возникает задача его детализации, проектирования узлов и деталей, связей между ними. Это внутреннее проектирование.

Процесс детализации проекта ТС соответствует переходу от одного уровня внутреннего проектирования к другому. На каждом из этих уровней применяются методы математического моделирования. Они являются средствами определения характеристик, свойств и состояния проектируемого ТС или его части.

Вид используемых математических моделей зависит от объекта проектирования. На каждом уровне внутреннего проектирования преобладают разные виды конструкторских работ, которым соответствуют свои зависимости между входом и выходом объекта (его узлов или деталей) с учетом граничных условий и свои математические модели разной степени детализации. Поэтому целесообразно создавать в САПР единую иерархическую систему математических моделей. Модель на конкретном уровне иерархии получается объединением моделей более низкого иерархического уровня.

Во всех математических моделях различают данные трех типов: 1) об элементах самого объекта; 2) о свойствах элементов; 3) об отношениях между элементами и между свойствами. При проектировании объекта абстрагирование происходит по двум направлениям: по глубине декомпозиции объекта и по степени детализации описания элементов и свойств и отношений между ними. По глубине декомпозиции сложный объект А можно рассматривать как единое целое, как систему взаимосвязанных элементов одного уровня или как многоуровневую иерархическую систему. По степени абстрагирования объект может моделироваться на уровнях структурных

(методами теории графов, теории множеств), логических (методами математической логики) и количественных свойств и отношений (методами функционального анализа, теории дифференциальных уравнений, математической статистики и др.).

4.2.1. Модели структурного уровня

На этом уровне моделируется состав объекта из элементов определенного уровня структурирования. Структурные модели применяются на ранних этапах проектирования объекта. Типологической моделью служит ориентированный граф $G(V, E)$, составление которого базируется на описании состава (множество элементов V) и способа действия объекта (множество ребер E) (рис. 4.1). Вершинами орграфа v_i (элементами объекта) являются обычно функционально законченные части объекта, например, узлы ТС, а ребрами e_j – информационные связи между элементами [6].

i	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
v_1		1		1	1
v_2			1	1	
v_3		1		1	
v_4			1		1
v_5	1				

Рис. 4.1. Матрица смежности

При описании объекта и его частей часто используются вероятностные характеристики функционирования. Основой применяемого математического аппарата при моделировании служит теория динамических систем, теория массового обслуживания и др. Проектирование на структурном уровне представляет собой процесс направленного перебора формализованных отношений структуры объекта и алгоритмов его функционирования методами моделирования на компьютере.

Структурная модель полностью раскрывает внутреннюю структуру объекта, анализ которой позволяет решить следующие задачи на раннем этапе проектирования: установить четкость структуры (компоновки ТС), определить нагруженность и степень значимости

элементов в процессе работы объекта, оценить последствия возможных отказов элементов.

Пример. Пусть структурные отношения между элементами множества V описываются матрицей смежности $[C_{ij}]_V = [n \times m]$.

Строки и столбцы матрицы соответствуют вершинам орграфа структурной модели, а ее элемент – числу ребер, направленных от вершины v_i к вершине v_j .

Отношения между элементами множеств V и E , т. е. между вершинами и ребрами орграфа, описываются в виде матрицы инцидентности $[a_{ij}]_{V,E} = [n \times m]$ (рис. 4.2), строки которой соответствуют вершинам орграфа (рис. 4.3), а столбцы – ребрам орграфа. При этом a_{ij} элемент равен 1, если v_i – начальная вершина ребра e_j . И элемент матрицы равен -1 , если v_i – конечная вершина ребра e_j .

	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}
v_1	1	-1	1	1						
v_2			-1			1	1	-1		
v_3							-1	1	1	-1
v_4				-1	1	-1			-1	1
v_5	1			-1						

Рис. 4.2. Матрица инцидентности

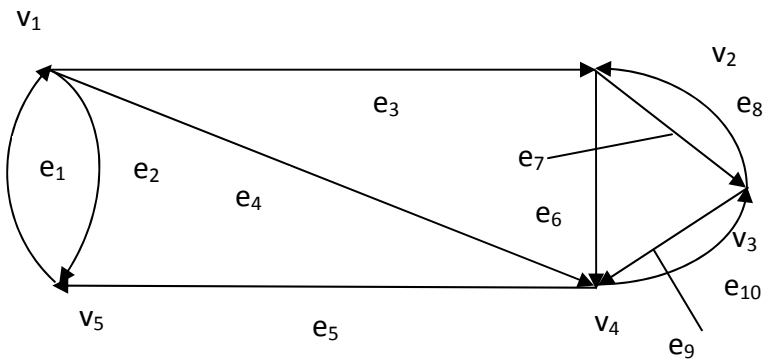


Рис. 4.3. Ориентированный граф (орграф)

С помощью подобных матриц можно выразить и другие бинарные отношения, например, отношения между элементами и объектом в целом. На структурном этапе моделируются связи, обусловленные отношениями принадлежности объектов, их элементов и свойств к определенным множествам, отношениями иерархической подчиненности, а также отношениями инцидентности, смежности и порядка.

4.2.2. Модели логического уровня

На логическом уровне моделирования каждому множеству или структурному графу соответствует набор логических отношений между входящими в них элементами, представленными в виде логических переменных. Логические отношения отражают причинно-следственные связи, которые описывают последовательные изменения состояния объекта с учетом состояний других объектов.

Пример. Рассмотрим модель определенного цифрового устройства при логическом проектировании. Логическая схема устройства показана на рис. 4.4.

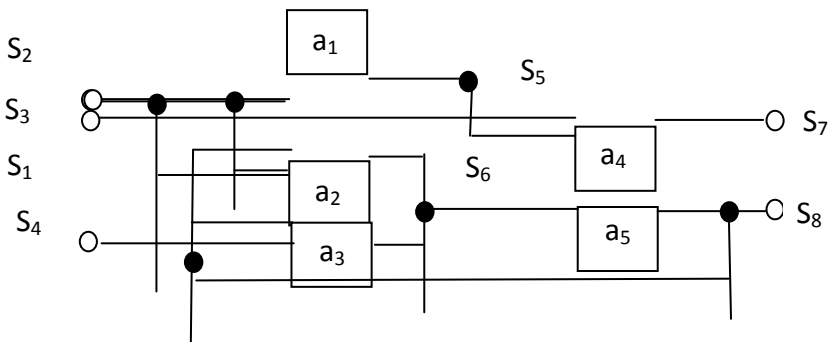


Рис. 4.4. Логическая схема цифрового устройства

Подмножество $A = \{a_1, a_2, \dots, a_5\}$ — элементы устройства; подмножество $S = \{s_1, s_2, \dots, s_8\}$ — сигналы (логические переменные).

Дуальный орграф данного устройства может иметь вид рис. 4.5.

Ребра такого графа отражают причинно-следственные связи между двумя названными подмножествами вершин, соответствующих статическому (подмножество A) и динамическому (подмноже-

ство S) описаниям устройства. Различие между входами и выходами элементов устанавливается с помощью направлений ребер: выходной сигнал логического элемента выходит из вершины, а входной сигнал направлен к вершине, т. е. элементу.

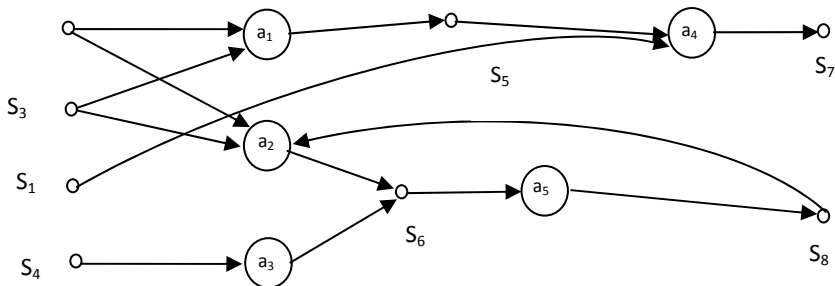


Рис. 4.5. Дуальный орграф цифрового устройства

Каждый дуальный орграф можно описать матрицей $B = [A \times S]$, определяющей отношения инцидентности элементов и сигналов (рис. 4.6).

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
a ₁		1	1		-1			
a ₂		1	1			-1		1
a ₃				1		-1		1
a ₄					1		-1	
a ₅						1		-1

Рис. 4.6. Матрица, соответствующая дуальному орграфу

Число строк матрицы равно числу элементов. Число столбцов равно числу сигналов. Элемент матрицы $b_{ij} = 1$, если сигнал s_j является входным для элемента a_i . Элемент $b_{ij} = -1$, если сигнал s_j является выходным для элемента a_i .

На основе биорграфа цифрового устройства составляется система уравнений вида:

$$\begin{aligned} W(n) &= F[X(n), Y(n)]; \\ Y(n) &= G[X(n), Y(n)]; \\ Y(n) &= P[Y(n-1)], \end{aligned}$$

где $W(n) = \{w_1(n), w_2(n), \dots, w_k(n)\}$ – множество выходных переменных, относящихся к n -му дискретному моменту времени;

$X(n) = \{x_1(n), x_2(n), \dots, x_i(n)\}$ – множество входных переменных, относящихся к n -му дискретному моменту времени;

$Y(n) = \{y_1(n), y_2(n), \dots, y_i(n)\}$ – множество внутренних переменных, определяющих состояние устройства в n -ый дискретный момент времени;

$Y'(n) = \{y'_{1}(n), y'_{2}(n), \dots, y'_{q}(n)\}$ – множество внутренних переменных, используемых для активации элементов в n -ый дискретный момент времени;

$Y(n - 1)$ – множество внутренних переменных, относящихся к $(n - 1)$ -му дискретному моменту времени;

F, G, P – множества логических функций.

Логическая модель устройства, описываемая этой системой уравнений, является статической. В ней все элементы безынерционны. В действительности все элементы таких устройств инерционны, в результате чего изменения сигналов на входах и внутри устройства происходят неодновременно. Имеет место переходной процесс (ПП), который исследуется с помощью динамической модели устройства, например, вида рис. 4.7.

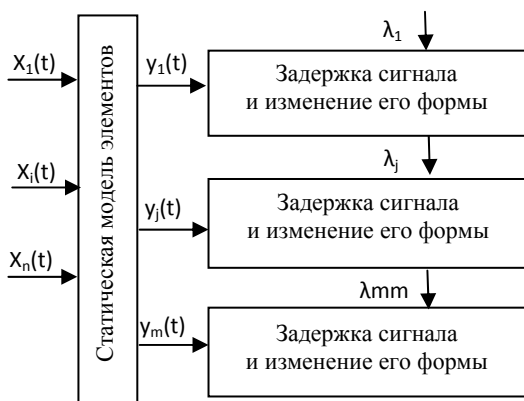


Рис. 4.7. Динамическая логическая модель устройства:

τ_j – временные задержки срабатывания элементов; $y_j(t)$ – внутренние переменные устройства, активирующие элементы памяти (выходные сигналы для элементов); $x_i(t)$ – входные переменные (входные сигналы для элементов); λ_j – внешние факторы (например, температура, напряжение тока источника питания и др.)

В этой модели учитывается неодновременность срабатывания элементов устройства и разброс величин динамических параметров (в виде временных задержек сигналов) логических элементов. Модель позволяет исследовать устройства, в которых динамические свойства логических элементов можно представить временной задержкой выходного сигнала относительно входного воздействия. Точность ПП, воспроизводимых с помощью такой динамической модели, во многом зависит от точности описания задержек времени срабатывания элементов в модели.

4.2.3. Модели количественного уровня

На данном уровне моделирования каждому элементу множества (булевой матрицы) или логической переменной соответствует алгебраическая или количественная переменная. Логические отношения переходят в количественные уравнения, неравенства и т. п.

Если на структурном и логическом уровнях моделирования учитывались структурные и причинно-следственные связи в ТС при абстрагировании от природы действующих факторов, то количественные модели характеризуют функциональные, вещественные, энергетические и пространственные связи.

Функциональные связи определяют взаимосвязь между элементами и свойствами ТС.

Вещественные связи обусловлены физическими и химическими свойствами, а также отношениями между ними.

Энергетические связи характеризуют энергетическую сторону функционирования ТС. Эти связи обычно выражаются через ОДУ и ДУЧП.

При количественном моделировании важным фактором является состав и полнота описания элементов ТС. Количественные соотношения, определяющие связи между переменными параметрами элементов проектируемого ТС, называются компонентными уравнениями.

Вид и способ получения таких уравнений во многом зависит от глубины структурирования объекта. Полученные модели условно делят на два класса – макромоделли и микромоделли.

Макромоделли. Если при создании модели не учитывается внутренняя структура частей объекта и закономерности их функционирования, а цель моделирования – адекватно предсказать реакцию

части (или элемента) по реакции ее модели, то такая модель называется макромоделью (второе название – аппроксимирующая модель). Эта модель адекватно аппроксимирует поведение части или объекта в целом. Поэтому этот класс моделей еще называется адекватными моделями [6].

Основные подходы к получению макромоделей:

1. *Огрубление микромоделей объекта.* Из исходной подробной модели последовательно исключаются отдельные элементы до тех пор, пока входные и выходные характеристики объекта не станут отличаться от начальных значений на заданную величину. Оставшиеся элементы образуют макромодель определенной точности, которая в % описывает степень адекватности модели. Если требуемая адекватность модели достигается при огрублении исходной модели не более, чем на 15–20 %, то в таком случае задача моделирования практически не упрощается.

2. *Аппроксимация внешних характеристик объекта.* При таком подходе исследуются внешние реакции объекта для построения его макромоделей. Параметрами модели являются входные и выходные величины, передаточные числа, КПД и т. п. При этом внутренняя структура макромоделей не совпадает со структурой реального объекта.

3. *Формирование табличных массивов.* Результаты исследования объекта оформляются в виде массива табличных данных, содержащих информацию о входных и выходных переменных объекта на разных режимах функционирования. Возможно уменьшение объема вычислений, т. е. решение сложных нелинейных уравнений заменяется выбором нужных данных из табличного массива с применением интерполяции. При этом увеличение точности описания реального объекта в модели ведет к росту массива табличных данных, а сама процедура создания табличных массивов может быть автоматизирована.

4. *Применение математических выражений и уравнений.* Данный подход основан на получении аналитических выражений связи выходных и входных параметров объекта. Эти выражения могут включать полиномы и логические функции И/ИЛИ при написании алгоритма, а также функции распределения вероятности для описания, например, вариаций времени задержки срабатывания элементов.

5. *Использование математических методов редукции.* В отличие от первого подхода, основанного на удалении отдельных элементов, в этом случае подвергается сокращению математическая модель объ-

екта. Разными способами формально понижают порядок описываемой системы уравнений, что также можно автоматизировать.

6. *Комбинированные подходы*. При разработке макромоделей реального объекта и его элементов используются разные сочетания вышеперечисленных методов, при моделировании объекта применяются макромоделли разного типа.

Модели на микроуровне отражают внутренние взаимосвязи объекта с точностью до минимальных элементов структуры [6]. Минимальные элементы не имеют своей структуры и находятся на самом нижнем уровне иерархии объекта. Микромоделирование называют еще детальным моделированием.

Модели на микроуровне позволяют решать широкий круг задач. Объектами являются отдельные детали и узлы, рассматриваемые как непрерывная (сплошная) среда: фрикционные пары, рама, кузов автомобиля и т. д. Эти объекты имеют бесконечное число степеней свободы. Физические процессы, протекающие в них, описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [6].

На микроуровне решается, например, задача определения напряженного состояния деталей. Математическое описание этой задачи может быть получено из общего квазигармонического уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + q = 0, \quad (4.2)$$

где x, y, z – пространственные координаты;

φ – искомая непрерывная функция;

$k_{x,y,z}$ – коэффициенты;

q – внешнее воздействие.

Расчет напряженного состояния деталей сводится к расчету продольных, крутильных и поперечных колебаний стержней, валов, балок. Для двухмерной задачи (на плоскости) при $k_x = k_y = \text{const}$ уравнение (4.2) сводится к

$$k_x \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + q = 0.$$

4.3. Имитационное моделирование

Сложные реальные системы можно исследовать с помощью аналитических и имитационных математических моделей. В аналитических моделях поведение СС представляется в виде функциональных соотношений или логических функций. Наиболее качественное и полное исследование можно провести, если получены явные зависимости, связывающие искомые параметры с параметрами СС и начальными условиями. Но такой случай может иметь место для сравнительно простых СС [3].

Для многих же СС приходится идти на упрощение модели реального объекта или явления. Упрощение позволяет описать поведение СС и взаимодействие между ее элементами для изучения отдельных свойств и особенностей СС.

Для создания аналитических моделей существует необходимый математический аппарат (алгебра, функциональный анализ, теория вероятностей и математическая статистика, теория массового обслуживания и др.). Во многих случаях можно достаточно быстро получать информацию о функционировании СС. Это способствует широкому и успешному применению аналитических моделей в технической области.

Но если явления и процессы в СС сложны и многообразны, то аналитическая модель становится слишком приближенным и грубым представлением реального объекта, и рекомендуется использовать имитационное моделирование.

В имитационных моделях поведение элементов СС описывается набором алгоритмов, которые при активации в компьютерной программе реализуют действия, происходящие в реальном объекте. Моделирующие алгоритмы позволяют по данным о начальном состоянии СС и фактическим значениям параметров реализовать на компьютере функционирование модели объекта.

Анализ опыта применения имитационного моделирования показывает, что имитационную модель можно рекомендовать применять в следующих случаях:

1. Если не существует законченной постановки исследовательской задачи и идет процесс изучения проектируемого объекта. Модель при этом является средством изучения объекта или явления.

2. Если есть аналитические методы, но их математические процедуры сложны и трудоемки, а имитационное моделирование позволяет решить задачу.

3. Когда при моделировании необходимо вести контроль процесса функционирования модели за период времени.

4. Когда имитационное моделирование – это единственный метод исследования СС из-за невозможности изучения функционирования объекта в реальных условиях.

5. Когда нужно контролировать протекание процессов в СС путем замедления или ускорения функционирования модели на компьютере.

6. При подготовке специалистов и освоении новой техники, когда на имитационной модели можно получить навыки по эксплуатации нового объекта.

7. Когда изучаются новые процессы в СС, о которых мало или ничего не известно. В этом случае имитация на компьютере позволяет проверить новые алгоритмы управления и функционирования объекта до проведения испытаний реального образца.

8. Когда значение имеет последовательность событий в СС, и когда модель применяется для прогнозирования возможных отказов объекта при его будущей эксплуатации.

Достоинствами имитационного моделирования являются:

1. Возможность описания работы элементов СС при высокой степени детализации.

2. Отсутствие ограничений на вид зависимостей между параметрами ИМ и параметрами внешней среды.

3. Возможность исследования динамики взаимодействия элементов СС во времени и пространстве.

Имитационные модели наряду с достоинствами имеют недостатки:

1. Разработка такой модели обходится дороже создания аналитической модели и требует больших затрат времени.

2. Иногда имитационная модель неточно отражает реальное функционирование объекта, хотя внешне это может не проявляться.

Сущность имитационного моделирования. Термин «имитационное моделирование» означает, что рассматриваются математические модели, с помощью которых на компьютере имитируется функционирование СС, или можно сказать, что проводятся компьютерные испытания. Имитация – это реализация численного метода

решения системы уравнений, описывающих функционирование модели СС в течение определенного периода времени. Время может быть задано или сформироваться в ходе имитации.

Имитация на компьютере представляет собой разработку модели, ее тестирование и применение модели в ходе компьютерных испытаний. При этом решаются следующие задачи: оценка эффективности различных принципов функционирования СС, сравнение вариантов структуры системы, определение степени влияния изменений параметров системы и начальных условий имитации на показатели эффективности СС.

Понятие о модельном времени. При реализации имитационной модели (ИМ) используются три представления времени: реальное время объекта, работа которого имитируется, модельное время, по которому организуется синхронизация событий в модели объекта и компьютерное время имитации, показывающее затраты времени компьютера на выполнение моделирования. С помощью модельного времени реализуется квазипараллельная работа элементов ИМ. Приставка «квази» в данном случае отражает последовательный характер появления событий в ИМ, которые для реального объекта происходят одновременно у разных элементов.

При работе реального объекта в нем выполняются функциональные действия (ΦD_{ij} , где i – номер элемента, j – номер действия) с элементами (\mathcal{E}_i). Ряд ΦD_{ij} происходит параллельно, и появляются параллельные события. Чтобы обеспечить имитацию параллельных событий в модели вводится переменная t_0 , называемая модельным временем. Также вводится понятие упрощенного функционального действия $\Phi D'_{ij}$, которое совершается элементами в ИМ при неизменном значении модельного времени. Действие $\Phi D'_{ij}$ в модели описывается в общем случае некоторым алгоритмом AL_{ij} . Этот алгоритм включает оператор, реализующий в модели действие $\Phi D'_{ij}$, и оператор M_{ij} , осуществляющий изменение временной координаты t_i на интервал τ_{ij} . Пару величин (AL_{ij} , τ_{ij}) часто называют ij -ой активностью ИМ и обозначают $A\mathcal{E}_{ij}$. Каждая активность – это запись функционирования элемента \mathcal{E}_i модели СС. Реализация конкретной активности ведет к появлению в модели события S_{ij} .

Если на компьютере имитировать функционирование только одного элемента, то выполнение его активностей можно было бы осуществить последовательно, и после выполнения каждой актив-

ности следовало бы только пересчитать время t_i . Реальная СС включает определенное количество элементов, которые часто работают одновременно (или параллельно). Модельное время позволяет реализовать квазипараллельную работу элементов. Модельное время может быть изменено двумя способами: с помощью фиксированных интервалов и переменными интервалами. Процедура изменения модельного времени предусматривает выполнение следующих действий:

- выбор событий в модели, которые должны совершиться при одном и том же времени t_0 в пределах установленного интервала;
- выполнение функциональных действий (инициализация активностей), имеющих одинаковое время выполнения;
- наращивание модельного времени на интервал по окончании выполнения всех одновременных действий и совершения событий, к которым эти действия приводят;
- проверка условий окончания моделирования либо по завершению времени имитации, либо по выполнению других событий в модели.

Организация процедуры изменения t_0 выполняется управляющей программой моделирования, которая выполняет названные проверки и запускает активности элементов. Способ изменения модельного времени с фиксированным шагом является более экономичным по времени за счет группового «обслуживания» совершения событий в модели. Применяется в случаях, если события при работе модели равномерно распределены по времени моделирования и если событий очень много и они появляются группами. Во всех других случаях способ переменных шагов (от события к событию) более предпочтителен и экономичен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Высоцкий, М. С. Грузовые автомобили / М. С. Высоцкий, Л. Х. Гилелес, С. Г. Херсонский. – М. : Машиностроение, 1995. – 256 с.
2. САПР. Системы автоматизированного проектирования : учебное пособие для ВТУЗов : в 9 кн. / под ред. И. П. Норенкова. – Минск : Высш. школа, 1988. – Кн. 1. – 123 с.
3. Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей. – М. : Радио и связь, 1988. – 180 с.
4. Хокс, Б. Автоматизированное проектирование и производство / Б. Хокс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 320 с.
5. Дементьев, Ю. В. САПР в автомобиле- и тракторостроении: учебник для вузов / Ю. В. Дементьев. – М. : Академия, 2004. – 220 с.
6. Молибошко, Л. А. Компьютерные модели автомобилей / Л. А. Молибошко : учебник. – Минск: Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2012. – 295 с.
7. Руктешель, О. С. Автоматизация проектирования автомобилей : учеб.-метод. пособие для студ. спец. 1-37 01 02 / О. С. Руктешель, Г. А. Дыко, Л. А. Молибошко. – Минск : БНТУ, 2005. – 44 с.
8. Автоматизация проектирования автомобилей: лабораторные работы по программному пакету ADAMS по дисц. «Автоматизация проектирования автомобилей» для студ. спец. 1-37 01 02 «Автомобилестроение (по направлениям)» / О. С. Руктешель [и др.]. – Минск : БНТУ, 2009. – 88 с.
9. Руктешель, О. С. САПР узлов и механизмов автомобилей : учеб.-метод. пособие / О. С. Руктешель, Г. А. Дыко, С. А. Сидоров. – Минск : БНТУ, 2012. – 64 с.
10. Химмельблау, Д. Прикладное математическое программирование / Д. Химмельблау. – М. : Мир, 1975. – 84 с.
11. Петренко, А. И. Основы автоматизации проектирования / А. И. Петренко. – Киев: Техніка, 1982. – 65 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ.....	4
Тема 1. Введение	6
Тема 2. Системный подход к проектированию транспортных средств	13
Тема 3. Начальные стадии проектирования транспортных средств	22
Тема 4. Моделирование транспортных средств при проектировании	32
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	47

Учебное издание

ДЫКО Геннадий Александрович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности 1-37 80 01 «Транспорт»

В 2 частях

Часть 1

Редактор *Н. А. Костешева*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской, Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 14.10.2022. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,88. Уч.-изд. л. 2,26. Тираж 100. Заказ 942.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.