

УДК 519.711.3:004.65

Способ формирования моделей сложных технических объектов в системах  
управления базами моделей

The creation method of models of complex technical objects in a model base  
management system

И.И. Семенова

I.I. Semenova

В работе обозначены проблемы представления моделей сложных технических объектов в автоматизированных системах. Предложен альтернативный способ представления, а также концепция системы управления базами моделей с учетом многокомпонентности и многовариантности моделей.

Problems of models representation of complex technical objects in the automated systems are designated in the article. The alternative method of representation, and also fundamental principles of model base management system, taking into account concepts of multi-component and multi-variant model, are offered.

### **Введение**

Сегодня без использования результатов математического моделирования (имитационного моделирования) не обходятся ни в одной ведомственной отрасли. Особенно, когда речь идет о выборе режимов эксплуатации сложных технических объектов (СТО), которые отличаются высокой стоимостью по созданию и поддержке и повышенными требованиями к безопасности эксплуатации. При работе с подобными объектами предпочитают отрабатывать все возможные варианты эксплуатации на макетах. Это могут быть испытательные стенды, тренажеры, математические модели.

В современных условиях ведутся активные работы в области автоматизации построения моделей сложных технических объектов (СТО), на рынке информационных технологий появляются новые пакеты, которые решают задачи по управлению математическими моделями с той или иной степенью автоматизации. Успешность использования подобных пакетов в производственной отрасли зависит от легкости и скорости в освоении его инженерным персоналом, от полноты функций, поддерживаемых в данных пакетах, от скорости перенастройки модели на соответствующие условия эксплуатации изучаемого объекта без потери информации о других возможных условиях, а также от возможности проведения сравнительного анализа результатов моделирования для различных режимов эксплуатации СТО с выбором оптимального варианта по заданным критериям. Все это требует тщательного анализа способов представления моделей и их описания в автоматизированных системах моделирования. Если обратиться к примеру описанного далее фрагмента модели оценки перехода в предельное состояние трубопровода в условиях равномерной

коррозии (самой простой для математического представления), то лицу, принимающему решения (ЛПР), в общем случае необходимо рассмотреть 22 модификации или варианта модели, если включить в модель 1 зависимость, учитывающую влияние катодной защиты на трубопровод, то получим 44 модификации, если учесть 3 зависимости, описывающие различные виды износа изоляции, то получим 132 модификации и т.д. В результате ЛПР нужно держать в голове весь структурный уровень представления модели, что может привести к ошибкам в управлении из-за сложности технических объектов, находящихся в зоне ответственности управляющего персонала предприятий.

Данная работа посвящена анализу способов представления моделей, заложенных в современных пакетах математического моделирования, предлагается альтернативный способ представления моделей для пакетов математического моделирования, а также концепция построения системы управления базами моделей с учетом многокомпонентности и многовариантности моделей СТО.

### **Понятия многокомпонентности и многовариантности**

На протяжении своего жизненного цикла СТО непрерывно модифицируются под влиянием различных процессов, природных явлений и множества случайных факторов, включающих особенности персонала и потребителей. Это требует непрерывной адаптации структуры существующих математических моделей СТО для решения новых задач. Существующие модели можно эффективно адаптировать к новым задачам путём реконфигурации связей между их компонентами.

Возможности реконфигурации моделей существенно зависят от формы их представления. *Модель, форма которой заранее предусматривает те или иные способы её «настройки» на конкретные структурные модификации, соответствующие единичным объектам моделирования, будем называть многовариантной моделью.*

Очевидно, что многообразие возможных конфигураций зависит от уровня детализации, на котором определяются компоненты многовариантной модели. *Если модель составляется из достаточно «мелких» типовых компонентов, связанных логическими функциями И, ИЛИ, НЕ, то её компоненты можно, как известно, перестраивать в любые схемы, реализующие любые заданные алгоритмы.* Но следует иметь в виду, что наименьшие компоненты модели определяются не произвольно и не формально, т. к. они должны иметь содержательную *объектную* интерпретацию. Также необходимо учитывать, что способы соединения компонентов тоже ограничиваются не формализуемыми требованиями, они должны сохранять интерпретируемость модели в целом и её адекватность задачам моделирования. Неопределённости, возникающие при решении таких не формализуемых вопросов, устраняются ЛПР в процессе моделирования. Поэтому построение и

использование многовариантных моделей не может быть полностью автоматизировано, и концепция многовариантности моделей не сводится только к формально-комбинаторным вопросам выбора и компактной технической реализации набора компонентов, характеризуемого большим числом абстрактных вариантов их соединения.

Следовательно, инструменты, предоставляющие средства автоматизации построения моделей, должны быть адаптированы под нужды ЛПР. Проанализируем возможности реализации многовариантных моделей на примере двух современных пакетов математического моделирования с различными подходами к структурному описанию моделей.

### **Анализ структурного представления моделей в пакете имитационного моделирования AnyLogic 5.3.1**

Основными строительными блоками при формировании модели в AnyLogic являются активные объекты, которые позволяют моделировать любые объекты реального мира [1].

Формирование модели в AnyLogic включает в себя описание следующих иерархически взаимосвязанных компонентов: в основе иерархии лежит «Проект» (сохраняется в виде отдельного файла), который содержит два подчиненных узла «Модель» и «Эксперименты». «Модель», в свою очередь, связана с набором поименованных «пакетов», каждому из которых подчинены «Классы активного объекта» и «Классы данных». «Классы активного объекта» связаны с такими узлами как «Код», «Анимации», «Функции». Узлу «Эксперименты» подчинены конкретные поименованные эксперименты, каждому из которых подчинены узлы «Набор исходных параметров», «Точность модели» и «Правила останова модели».

При данном способе формирования модели уравнения и параметры модели определяются в узлах «Код», «Набор исходных параметров», «Правила останова модели», «Функции». Внутри этих узлов идет последовательное описание соответственно уравнений в форме Коши, параметров и неравенств с условием останова.

Например, при моделировании процесса равномерной коррозии трубопровода в структуре активного объекта указываются наружный и внутренний радиусы трубы, их значения в процессе запуска эксперимента меняются, тем самым, демонстрируя влияние внутренней и наружной коррозии на стенку трубы (рис. 1). Если изменить модель так, что трубопровод будет подвергаться только внутренней коррозии, то необходимо изменить структуру активного объекта, а именно в свойствах элемента, отвечающего за наружный радиус, указать в качестве вида уравнения «нет уравнения» вместо «Интеграл или накопитель». Далее, необходимо сделать текущим эксперимент, который подходит для данного варианта, поправить, в случае необходимости, условия останова модели, значения параметров и точность вычислений. Далее для анализа

результатов работы необходимо запустить вариант модели, которая предварительно проходит этап генерации.

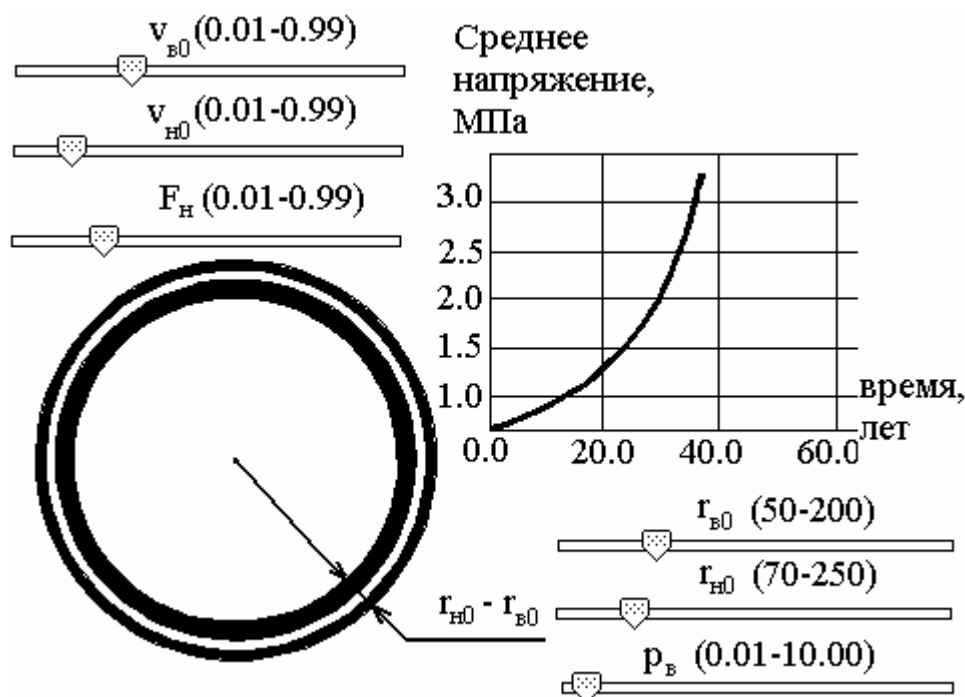


Рисунок 1 – Результат моделирования в AnyLogic,

где  $v_{н0}$ ,  $v_{в0}$  – скорости наружной и внутренней коррозии ненапряженного металла (мм/год),  $r_{в0}$  и  $r_{н0}$  – исходные внутренний и наружный радиусы трубы (мм),  $p_v$  – внутреннее давление агрессивной среды (МПа),  $F_H$  – коэффициент использования несущей способности (безразм.).

С одной стороны, древовидная структура, заложенная в способ, охватывает все нюансы формирования модели. С другой стороны, для объектов, характеризующихся сменами режимов и условий эксплуатации, модели которых многовариантны, описанный способ приводит к избыточности хранения данных о модели и к необходимости большого количества перенастроек для перехода от одного варианта модели к другому либо к потерям информации об уже реализованных вариантах модели.

### Анализ структурного представления моделей в пакете MathCad

Структура описания модели ориентирована на способ описания постановки задачи и порядка ее решения с выводом результатов. Основное правило – порядок появления переменных параметров сверху - вниз, т.е. если один параметр или функция ссылается на другой, то этот параметр необходимо описать до ссылки на него [2].

MathCad содержит мощный интерпретатор, который позволяет описывать зависимости в естественном для математиков виде.

Для реализации всех вариантов многокомпонентной модели необходимо их описать в отдельных документах. Что приводит к избыточности и путанице. Другой способ – описать все возможные узлы

многокомпонентной модели в одном документе, и для каждого варианта изменять ход решения задачи и способ вывода результатов. Недостаток такого подхода в том, что история изменений не сохраняется, и при необходимости воспроизвести старый эксперимент необходимо отменить все поправки в ходе решения, которые были сделаны.

### **Альтернативный способ представления моделей для пакетов математического моделирования**

Подобную многовариантную и многокомпонентную структуру удобно формализовать посредством языка морфологических графов (МГ), аналогичных тем, что используются для автоматизации структурного синтеза систем [3]. Так, на рис. 2 представлен фрагмент многоярусного МГ модели оценки скорости равномерной коррозии магистрального трубопровода. МГ представляет собой т. н. И-ИЛИ дерево: любой возможный вариант сборки модели однозначно задаётся поддеревом, включающим корневую вершину, всех её потомков (И-типа), и последующим присоединением к каждому И-потомку одного из его ИЛИ-потомков, и к каждому ИЛИ-потомку – всех его И-потомков и т.д. Узлы И-типа графически представляются в виде прямоугольников, а узлы ИЛИ-типа – в виде овалов. Выбор поддерева продолжается до тех пор, пока все включённые в него потомки самого нижнего уровня не окажутся листьями, т. е. известными функциями времени или константами (на рис. 2 пример выбора варианта модели обозначен более жирными линиями).

Причем необходимо в структуру заложить понятие многослойности или уровней представления модели по степени абстрагирования. В типовой модели объекта можно выделить следующие взаимосвязанные уровни представления (слои), которые позволят упростить работу с моделью и облегчить ее восприятие для ЛПР на предприятиях. *Схемное представление* – графическое представление реального объекта с текстово-графическими и условными описаниями компонент модели для специалистов ведомственной отрасли. *Структурное представление* – представление реального объекта с текстовыми описаниями для специалистов ведомственной отрасли. *Математическое представление* – описание изучаемых объектов с помощью математической символики. *Алгоритмическое представление* – наборы точных предписаний, которые задают вычислительный процесс, начинающиеся из совокупности возможных для данного алгоритма исходных данных и направленные на получение полностью определяемого этими исходными данными результата. *Процедурное представление* – при котором математическая символика интерпретируется в виде процедур с входными и выходными параметрами, описанными на языке программирования высокого уровня. *Внутримашинное представление* – совокупность взаимосвязанных процедур, описанных на языке программирования высокого уровня, после

компиляции, представляющих собой файл/набор файлов, готовых для запуска модели на компьютере.

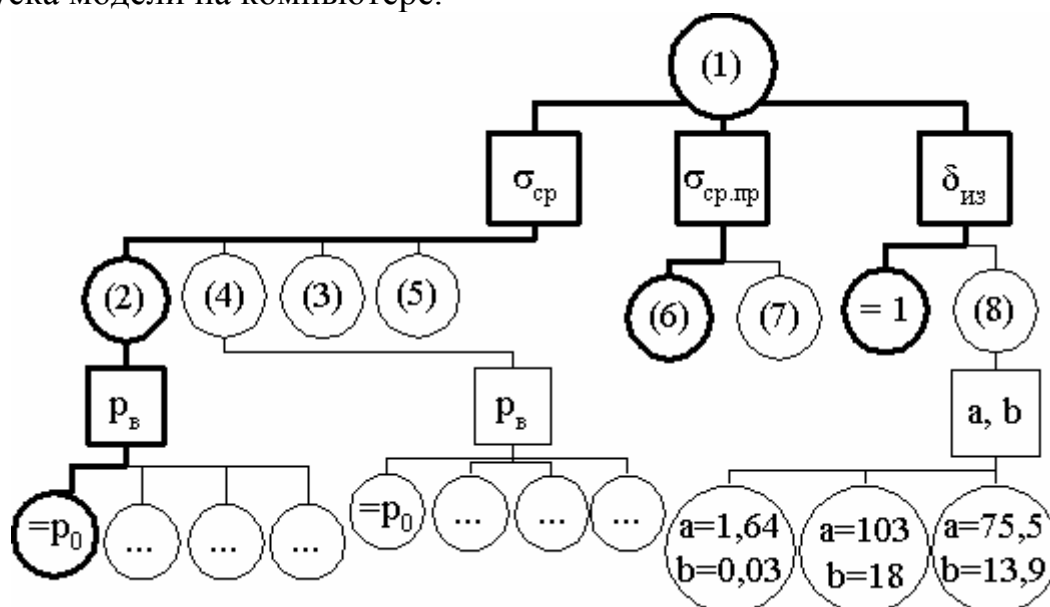


Рисунок 2 – Фрагмент модели для оценки скорости равномерной коррозии магистрального трубопровода,

где  $p_0$  – постоянное внутреннее давление (МПа),  $\delta_{из}$  – варьируемый коэффициент влияния изоляционного покрытия на скорость наружной коррозии в случае стопроцентной целостности покрытия (безразм.), а и b – коэффициенты, определённые для конкретного вида изоляционного покрытия по эмпирическим данным (безразм.),

$$\begin{cases} v_n(t) = \frac{dr_n(t)}{dt} = -\delta_{из} \cdot v_{н0} \cdot \exp\left[\frac{\sigma_{ср}(t) \cdot V}{R \cdot T(t)}\right], \\ v_b(t) = \frac{dr_b(t)}{dt} = v_{в0} \cdot \exp\left[\frac{\sigma_{ср}(t) \cdot V}{R \cdot T(t)}\right], \end{cases} \text{ при } \sigma_{ср}(t) \leq \sigma_{ср.пр}, \quad (1)$$

где  $v_n(t)$ ,  $v_b(t)$  – скорости наружной и внутренней коррозии напряженного металла (мм/год),  $V$  – молярный объем металла ( $\text{см}^3/\text{моль}$ ),  $R=8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная,  $T(t)$  – абсолютная температура (К),  $r_n(t)$  и  $r_b(t)$  – внутренний и наружный радиусы трубы в момент времени  $t$  (мм). Среднее напряжение в стенке трубы  $\sigma_{ср}(t)$ , измеряемое в МПа, является функцией от времени  $t$  (годы), которая определяется в зависимости от модификации объекта (трубы). Решением задачи является значение  $t = t_{пр}$ , при котором нарушается условие  $\sigma_{ср}(t) \leq \sigma_{ср.пр}$ . Варьируемые компоненты  $\sigma_{ср}(t)$ , предельный уровень напряжения  $\sigma_{ср.пр}$  и  $\delta_{из}$  определяются следующим образом.

Среднее напряжение в толстостенных трубах под действием внутреннего и наружного  $p_n(t)$  давлений:

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{p_{\text{в}}(t) \cdot r_{\text{в}}^2(t) - p_{\text{н}}(t) \cdot r_{\text{н}}^2(t)}{r_{\text{н}}^2(t) - r_{\text{в}}^2(t)}, \quad (2)$$

Толстостенные трубы под действием продольной силы  $Q$  (ньютоны):

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{Q/\pi}{r_{\text{н0}}^2 - r_{\text{в}}^2(t)}, \quad (3)$$

Толстостенные трубы с продольной силой и внутренним давлением:

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{p_{\text{в}}(t) \cdot r_{\text{в}}^2(t) + Q/(3 \cdot \pi)}{r_{\text{н0}}^2 - r_{\text{в}}^2(t)}, \quad (4)$$

Тонкостенные трубы, работающие под внешним давлением сжатия:

$$\sigma_{\text{ср}}(t) = \frac{p_{\text{н}}(t) \cdot r_{\text{н}}(t)}{r_{\text{н}}(t) - r_{\text{в}}(t)}, \quad (5)$$

Предельный уровень напряжения с учетом коэффициента несущей способности:

$$\sigma_{\text{ср.пр}} = \sigma_{\text{ср}}(0)/F_{\text{н}}, \quad (6)$$

Для тонкостенных труб предельный уровень напряжения:

$$\sigma_{\text{ср.пр}} = \frac{(1 + m_{\sigma}) \cdot \sigma_{\text{T}}}{3 \cdot \sqrt{1 - m_{\sigma} + m_{\sigma}^2}}, \quad (7)$$

где  $m_{\sigma}$  – отношения главных напряжений,  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести (МПа).

Влияние изоляции на скорость наружной коррозии:

$$\delta_{\text{из}} = \exp\left(-\frac{a \cdot \delta}{1 + b \cdot \delta}\right), \quad (8)$$

где  $\delta$  – исходная толщина изоляционного покрытия (мм).

### Концепция системы управления базами моделей

Понятие система управления базами моделей (СУБМ) принято к использованию в системах поддержки принятия решений (СППР), а именно, является одной из подсистем, но описанные в литературе подходы к формированию баз моделей и проектированию СУБМ пока не описаны в рамках единой теории, как это произошло с базами данных и СУБД. Описание моделей СТО с учетом многовариантности и многокомпонентности дали толчок к созданию концепции СУБМ, которая будет по своей сути наследовать цели и задачи современных автоматизированных систем моделирования, но при этом в СУБМ должна быть заложена идея безызыбочности, версионности с возможностями поиска в наборах моделей СТО. Кроме того, разработка ядра для хранения и манипулирования моделями позволит частично унифицировать порядок проектирования баз моделей.

**СУБМ** – программный комплекс (система), предназначенный для автоматизации ввода в базу моделей, обработки и анализа многокомпонентных моделей для различных предметных областей с

поддержкой функций адаптивного поиска по компонентам и вариантам моделей в базе моделей. СУБМ предназначена также для организации эффективного доступа ЛПР к содержащимся в базе моделей конкретным моделям и результатам проведенных экспериментов по выбранной модели.

**Параметр модели** – атомарная, неделимая характеристика многокомпонентной модели, которая на уровне математического представления может принимать определенное постоянное значение (неварьируемый параметр) либо определяться по одному из компонентов в наборе родственных компонент (это приводит к многовариантности моделей, а сам параметр считается варьируемым).

**Компонент модели** – самостоятельные «типовые» блоки многокомпонентной модели, имеющие содержательную объектную интерпретацию, и на математическом уровне представленные как функциональные зависимости от параметров модели или других компонент модели более низкого уровня иерархии.

**Базовые принципы, которые должны быть реализованы в СУБМ:** безизбыточность хранения компонентов модели; сохранение истории работы с моделью по желанию пользователя; организация поиска по выполненным экспериментам; построение дерева версионности моделей; проверка физического смысла сформированного варианта модели; контроль размерностей; семантический контроль; возможность останова эксперимента в любой момент времени; синтаксический контроль моделей СТО; привязка к схемному представлению моделей всех последующих слоев (структурный, математический, алгоритмический и т.п.); перекомпиляция модели только в случае изменения ее структуры (или варианта реализации); описание ограничений при выборе варианта модели (взаимоисключающие связи); настройка интерфейса под требования пользователя (создание образа для пользователя); непрерывное развитие моделей путем добавления в БМ новых типовых компонентов; контроль логической корректности хода эксперимента (контроль выхода параметров за пределы области применимости моделей); определение критериев эффективности для выбора варианта модели из множества возможных; контроль логической корректности хода эксперимента (контроль прямого хода модельного времени); контроль точности вычислений.

Общий порядок формирования модели сложного технического объекта в предлагаемой концепцией системе будет сводиться к следующему набору действий:

- Выбор технического объекта, модель которого будет строиться.
- Определение границ изменений режимов и условий работы, в которых находится изучаемый объект.
- Построение морфологического графа (И-ИЛИ дерева) на схемном уровне.
- Описание ограничений при выборе варианта модели.



- Привязка к узлам графа компонент и параметров модели.
- Построение математического уровня представления.
- Построение алгоритмического уровня представления (адаптация под требования записи моделей в конкретном программном продукте, выполняющаяся автоматически).
- Задание исходных значений параметров модели, задание граничных условий и правил останова работы модели.

В результате работа с моделью, сформированной подобным образом, будет сведена к тому, чтобы выбрать вариант модели путем последовательных щелчков мыши по узлам морфологического графа на схемном уровне представления, а также при необходимости изменить значения исходных параметров. Историю работы с моделью можно хранить в базе данных, которая будет привязана к конкретной многовариантной модели.

Предложенная структура представления моделей легко адаптируется под анализ так называемых режимов эксплуатации СТО, можно в пакете предусмотреть возможность создания именованных вариантов модели в рамках одной многовариантной, если отдельные варианты рассматриваются чаще других.

В пакете должна быть заложена функция сравнения результатов реализованных экспериментов в рамках одной многовариантной модели. При этом в результате должны быть отображены отличия в выбранном варианте модели (в значениях параметров, в граничных условиях и т.п.). Такой механизм позволит сократить время поиска необходимых результатов и даст возможность ЛПР быстро восстановить картину проведенных экспериментов, спустя некоторое время, так как со временем память о выполненных работах стирается, и часто возникает потребность в восстановлении знаний для продолжения работ через какой-либо промежуток времени.

Если переходить к вопросу разработки архитектуры СУБМ, то ее можно реализовать в двух видах:

- как дополнительный комплекс к основной системе математического моделирования, включающий в себя подсистему хранения баз моделей, интерфейс с реализацией И-ИЛИ дерева по вводу, редактированию, поиску в наборе моделей и транслятор, позволяющий по запросу пользователя преобразовать выбранный вариант модели в совместимый с используемой системой моделирования код;

- как полнофункциональную СУБМ, которая будет наследовать весь функционал возможностей по решению задач математического моделирования, с отличием в подходе к формированию и хранению моделей СТО.

### **Заключение**

Описанное в работе формализованное представление многовариантной

структуры в виде МГ или изоморфных ему математических конструкций (формальных языков) позволяет реализовать интеллектуальный интерфейс между системой управления моделями СТО и её пользователем.

Разработка системы управления базами моделей для оценки состояния сложных технических объектов, в частности, трубопроводных транспортных сетей, с учетом предложенного способа представления модели позволит расширить область использования математических моделей на производстве, сократить время на ввод и анализ каждой отдельной модификации модели, сократить время на поиск нужной модификации модели. ЛПР необходимо будет лишь выбрать на схемном или структурном уровне вариант модели и ввести числовые значения начальных параметров модели, чтобы запустить процесс расчета, который по цепочке включает в работу все взаимосвязанные слои модели.

Предложенный подход к описанию моделей СТО позволяет комплексно решать проблему структурной идентификации задач практического управления в целях повышения эффективности и безопасности современных СТО.

#### **Список литературы**

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5.– СПб.: изд-во БХВ-Петербург, 2005.– 400 с.
2. Дьяконов В. MathCad 2001: специальный справочник.– СПб.: Питер, 2002.– 832 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов.– М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 360 с.