

Заключительный раздел

«Если кажется, что работу сделать легко, это непременно будет трудно. Если на вид она трудна, значит выполнить ее абсолютно невозможно» (*Теорема Стакмайера*)

В основе исследования сложных систем с использованием математического моделирования лежит системный подход, конечной целью которого является системное проектирование, направленное на построение системы с заданным качеством. В свою очередь системное проектирование базируется на результатах системного анализа, позволяющего выявить причинно-следственные связи между параметрами и характеристиками исследуемой системы и реализуемого с использованием математических моделей, которые позволяют прогнозировать эффект, достигаемый при изменении структурно-функциональных параметров системы и параметров нагрузки.

Одним из основных требований, предъявляемых к модели, является ее *адекватность* реальной системе, которая достигается за счет использования моделей с различным уровнем детализации, зависящим от особенностей структурно-функциональной организации системы и целей исследования.

Процессы функционирования реальных систем практически невозможно описать полно и детально, что обусловлено существенной сложностью таких систем. Основная проблема при разработке модели состоит в нахождении компромисса между простотой ее описания, что необходимо для её исследования математическими методами, и необходимостью учета многочисленных особенностей, присущих реальной системе. Попытка построить единую универсальную модель сложной системы, несомненно, обречена на неудачу ввиду ее необозримости и невозможности расчета.

Моделирование технических систем в общем случае предполагает выполнение следующих основных этапов:

- формулировка целей моделирования;
- разработка концептуальной модели;
- разработка математической модели;
- параметризация модели;
- выбор методов моделирования;
- выбор средств моделирования;
- проверка адекватности модели (верификация модели);
- проведение экспериментов на модели (расчет характеристик);
- анализ результатов моделирования.

На этапе *определения и формулирования целей моделирования* определяется объект моделирования, формулируются задачи анализа и синтеза, выявляются наиболее важные характеристики, подлежащие

исследованию, формулируются требования к качеству функционирования в виде ограничений, налагаемых на характеристики системы, и формулируется критерий эффективности, определяются требования к точности результатов моделирования и форме их представления.

Основное *назначение концептуальной модели* – выявление наиболее существенных аспектов структурно-функциональной организации, учет которых необходим для получения требуемых результатов. В концептуальной модели обычно в словесной форме приводятся сведения о природе и параметрах элементарных явлений исследуемой системы, о степени их взаимодействия, выявляются параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на исследуемые характеристики системы. Одна и та же система может представляться различными концептуальными моделями, которые строятся в зависимости от целей исследования, сформулированных на предыдущем этапе. Например, одна концептуальная модель может отображать временные аспекты функционирования системы, другая – надежность, третья – масса-габаритные аспекты построения системы.

Концептуальная модель служит основой для разработки математической модели в терминах конкретного математического аппарата.

Создание *математической модели* преследует две основные цели:

- 1) дать формализованное описание структуры и процесса функционирования системы для однозначности их понимания;
- 2) попытаться представить процесс функционирования системы в виде, допускающем аналитическое исследование системы с использованием методов, разработанных в рамках данного математического аппарата.

В связи с тем, что состав и номенклатура системных и модельных параметров и характеристик, в общем случае, различается, возникает необходимость установления соответствия между значениями системных и модельных параметров и характеристик, которое выполняется на этапе *параметризации модели*.

Выбор метода моделирования зависит от многих факторов, в том числе от целей моделирования, сложности исследуемой системы, требований к номенклатуре исследуемых характеристик, требований к точности получаемых результатов и т.д. При исследовании и проектировании технических систем, таких как вычислительные системы и сети, наиболее эффективным оказывается использование комбинированного подхода, предполагающего совместное применение аналитических и имитационных методов, что позволяет во многих случаях гарантировать достоверность получаемых результатов. С использованием аналитических методов, применяемых на этапах анализа свойств и синтеза оптимальной системы, решаются задачи, связанные с формированием требований к структурным и функциональным параметрам, обеспечивающим заданное качество функционирования системы, однако получаемые при этом результаты могут иметь значительную погрешность. Имитационные методы, основан-

ные на использовании специализированных языков моделирования, таких как GPSS, позволяют выполнять исследование систем практически любой сложности с любой степенью детализации и должны применяться на заключительном этапе детального анализа спроектированной системы.

Технические и программные *средства моделирования* выбираются с учетом ряда факторов, к которым относятся достаточность и полнота средств для реализации концептуальной и математической модели, доступность средств, простота и легкость освоения технических и программных средств моделирования, наличие методики применения средств для моделирования систем определенного класса. После выбора средств моделирования разрабатывается программная модель.

Проверка адекватности модели исследуемой системе (верификация модели) заключается в анализе ее соответствия исследуемой системе, проявляющегося в близости значений модельных и системных характеристик. Отличие модели от исследуемой системы связана с тем, что обычно модель является упрощенным и идеализированным отображением системы, которое обусловлено идеализацией внешних условий и режимов функционирования, не учитывающей в модели несущественных, по мнению исследователя, факторов и параметров, отсутствием точных сведений о внешних воздействиях и о некоторых конкретных нюансах организации системы, введением ряда упрощающих предположений и допущений. На практике верификация модели обычно проводится путем экспертного анализа разумности результатов моделирования. В случае выявления неадекватности модели исследуемой системе необходимо выполнить корректировку модели.

В процессе проверки адекватности модели необходимо определить область применения модели, то есть оценить диапазон изменения параметров, при котором точность результатов моделирования находится в допустимых пределах.

Исследования на моделях заключаются в *проведении экспериментов*, в процессе которых определяются характеристики системы при разных значениях структурно-функциональных параметров и параметров нагрузки. Большая номенклатура исходных параметров и широкий диапазон их изменения требует предварительного планирования выполняемых на модели экспериментов (расчетов). Планирование направлено на уменьшение количества и длительности экспериментов при условии обеспечения достоверности и полноты результатов моделирования. В случае большой размерности исследуемой системы и многочисленной номенклатуры структурно-функциональных и нагрузочных параметров, изменяющихся в больших пределах, количество экспериментов и соответственно время, затраченное на моделирование, могут оказаться настолько большими, что полученные в конечном счёте результаты потеряют свою актуальность.

Особую значимость планирование экспериментов приобретает при использовании методов имитационного моделирования, характеризующихся большими затратами ресурсов ЭВМ в процессе моделирования.

Одной из основных проблем имитационного моделирования является нахождение компромисса между временем моделирования и затратами памяти ЭВМ, на которой проводится моделирование. Это связано с тем, что имитационное моделирование предъявляет повышенные требования как к производительности, так и к памяти ЭВМ для проведения имитационных экспериментов. Время, затрачиваемое на проведение одного эксперимента с моделью средней сложности даже на высокопроизводительных ЭВМ может достигать нескольких десятков минут и, в некоторых случаях, нескольких часов, а потребность в оперативной памяти ЭВМ – десятков и сотен гигабайт. Причём с увеличением числа проводимых имитационных экспериментов соответственно возрастает время моделирования. Все это обуславливает высокую стоимость имитационного моделирования и требует тщательного планирования имитационных экспериментов с целью сокращения затрат на моделирование.

Анализ результатов моделирования направлен на выявление свойств, присущих исследуемой системе, и включает в себя следующие этапы:

1) обработка результатов для последующего анализа и использования; на этом этапе выделяются наиболее важные, с точки зрения исследователя, результаты, которые представляются в форме, наиболее удобной для изучения свойств исследуемой системы;

2) определение зависимостей характеристик от параметров системы путем варьирования исходных параметров структурно-функциональной организации и нагрузки с целью выявления и формулирования свойств исследуемой системы;

3) принятие решения о работоспособности исследуемой системы и выработка рекомендаций по наиболее эффективной и рациональной организации проектируемой или модернизируемой системы, которые могут быть использованы в дальнейшем при решении задач синтеза в процессе системотехнического проектирования.

Синтез оптимальной системы направлен на построение системы, наилучшим образом соответствующей своему назначению. Решение задачи синтеза связано с определением зависимостей характеристик функционирования системы от параметров, которые представляются сложными математическими конструкциями. При этом возможность получения приемлемых результатов в процессе решения задач синтеза из-за их сложности и большой трудоемкости с учетом специфических особенностей реальных систем превосходит возможности математических методов оптимизации, и задача синтеза в общем виде оказывается математически неразрешимой. Для того, чтобы снизить сложность задачи синтеза, процесс проектирования разделяют на последовательность этапов, на каждом из которых решаются частные задачи синтеза – определяются параметры, связанные с отдельными аспектами структурно-функциональной организации системы, с использованием тех или иных моделей.