

European Commission
TEMPUS

The article deals with the creation of simulation models for modern learning tools – simulators based on software and hardware platform as in the training of specialists in production, as well as in teaching students at the university.

М. Д. ГАММЕР, С. П. КОЛЕСНИКОВ, Г. В. КОЛЕСОВ, Тюменский государственный нефтегазовый университет, НИИ Электронных образовательных ресурсов

УДК 621.74

ИМИТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТЕНДА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Реалистичное поведение имитируемой модели зависит от качества реализации математической модели. Под математической моделью понимается система математических соотношений, описывающих с требуемой точностью изучаемый объект и его поведение (что и определяет соответствие поведения реальной системы и поведения модели).

Реалистичное поведение имитируемой модели зависит от адекватности и универсальности используемой математической модели. Под адекватностью понимается способность модели отражать заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Универсальность модели определяется количеством параметров, учитываемых в процессе имитации.

Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью (точность определяется как степень совпадения значений выходных величин модели и объекта). В настоящее время применяются следующие способы определения адекватности [1–3]: экспертный метод; экспериментальный метод – результат единичного непосредственного измерения или результат статистической обработки нескольких измерений; результат расчета на основе корреляционных зависимостей; результат определения с помощью общих теорий на основе принятых допущений и аксиом (сравнение с данными «хорошо» себя зарекомендовавшей «похожей» модели).

Реализация математической модели требует определенных вычислительных ресурсов, определяемых количеством машинного времени и объемом оперативной памяти, необходимой для реализации модели. В качестве меры обычно применяется FLOPS (Floating point Operations Per Second) –

величина, используемая для измерения производительности компьютеров, показывающая, сколько операций с плавающей запятой в секунду выполняет данная вычислительная система.

Создание имитационной модели включает в себя следующие этапы:

- Содержательное описание объекта или процесса.
- Построение формализованной схемы.
- Построение математической модели.
- Исследование, тестирование и корректировка математической модели.
- Программная реализация.
- Оптимизация и профилирование программы.

Содержательное описание объекта или процесса обобщает все сведения о физической природе имитируемой системы, ее количественных характеристиках, характер взаимодействия как между отдельными элементами, так и с внешней средой. Кроме этих сведений, нужно в общем виде сформулировать постановку прикладной задачи. Постановка задачи должна содержать полный перечень зависимостей, подлежащих оценке, по результатам моделирования должны быть определены требования и ограничения.

Рассмотрим следующий пример содержательного описания процесса. Необходимо создать математическую модель для имитатора стенда для проведения испытаний насосных установок. Для составления списка необходимых приборов и средств измерения, а также требований к испытаниям насосной техники был проведен анализ видов испытаний насосов, за основу был взят отечественный стандарт ГОСТ 6134-58. В результате исследования был получен список необходимых контрольно-измерительных приборов (ваттметр, вольтметр, амперметр, тахометр, барометр, манометр, ваку-

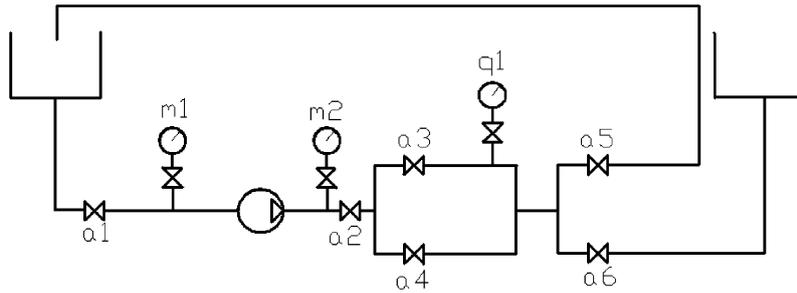


Рис. 1. Гидравлическая схема: $a1, a2, a3, a4, a5, a6$ – задвижки; $m1$ – мановакуумметр; $m2$ – вакуумметр; $q1$ – расходомер

умметр, мановакуумметр, термометр, секундомер, ареометр), арматуры и инвентаря (вентили игольчатые высокого давления, вентили для манометров, задвижки), инструментов и материалов. Требования к точности математической модели – данные испытаний насоса Д200, полученные в ходе имитации, не должны отличаться от паспортных данных этого насоса более чем на 5%, так как иначе у обучаемого может сложиться не правильное понимание. В качестве жидкости следует использовать воду со стандартной плотностью и т. д.

Следующий этап – построение формализованной схемы (основанной на точной математической формулировке задачи). Затруднения и ошибки при моделировании систем обычно возникают именно на этом этапе, так как в этом процессе участвуют коллективы разных специальностей: специалисты в предметной области и специалисты в области моделирования.

Для разделения сложной проблемы на более простые, частные проблемы может быть выполнена декомпозиция модели. При создании математической модели имитаторов чаще всего применяют функциональную и структурную декомпозиции. Функциональная декомпозиция базируется на анализе функций системы. Основанием разбиения на функциональные подсистемы служит общность функций, выполняемых группами элементов. Структурная декомпозиция основывается на другом признаке – на связях между элементами, существующих в системе (информационных, логических, иерархических, энергетических и т. п.).

Пример построения формализованной схемы. Имитация процессов, происходящих при испытаниях насосов, фактически является имитацией гидравлической схемы (рис. 1), а также ранее указанных контрольно-измерительных приборов и вспомогательного оборудования. Декомпозиция модели может быть произведена путем выделения в отдельные модели самого насоса Д200, трубопровода, контрольно-измерительных приборов.

Переходя непосредственно к построению математической модели имитаторов, стоит отметить их

специфику. Как правило, математические модели имитаторов отличаются тем, что результатом является не конечное состояние системы, а протекание процесса, при этом учитывается множество факторов, таких, как износ оборудования, специально генерируемые аварии, ошибки датчиков, неточность измерительных приборов и т. д.

На сегодняшний день существует огромное количество методов построения моделей, значительно различающихся как по масштабу, так и по классу решаемых задач, и описать их все в рамках данной статьи просто невозможно. Вместо этого предлагается рассмотрение моделей имитаторов с точки зрения масштаба (микро-, макро- и мета уровень) и класса решаемых задач (деформация, теплоперенос, акустика, радиоволны, химия, электромагнитные процессы и т. д.).

Микроуровень:

- Уровень элементарных частиц (нуклон, 10^{-13} см и меньше) – физика элементарных частиц, квантовая механика; квантовая теория поля; квантовая статистическая физика; квантовая теория; квантовая оптика и т. д.

- Уровень ядер (10^{-12} см) – ядерная физика.

- Уровень атомов (10^{-8} см) – атомная физика.

- Уровень молекул – молекулярная физика.

Макро-уровень:

- Уровень «элементов» – например, метод дискретного элемента, метод конечных элементов и т. д.

Мета-уровень:

- Уровень системы (аналитические, статистические и т. д.).

Приведенная классификация не направлена на то, чтобы показать, что построение математической модели должно основываться на применении только одного из указанных типов моделей, наоборот, чаще всего применяется комбинация из разных моделей. Например, могут применяться модели различных уровней абстрагирования, мета-модели могут оперировать «показаниями» макро-моделей; макро-модели, в свою очередь, могут использовать результаты микромоделей; также в одном имитаторе могут одновременно присутство-



Рис. 2. Условная демонстрация влияния «масштаба модели» на ее универсальность

вать и детерминированные, и статистические модели.

В целом с «увеличением масштаба» снижается универсальность, но также снижаются и требования к необходимым вычислительным ресурсам. В настоящее время наибольшее распространение в имитаторах получили аналитически-статистические модели уровня «системы» и модели, основанные на методе конечных элементов, конечных объемов и т. д. (рис. 2).

Для демонстрации сказанного выше можно рассмотреть пример построения математической модели имитации гидравлической схемы.

На первом этапе рассчитывается суммарное перекрытие нагнетательного трубопровода $\Sigma r = r_1 + r_2 + r_3$, где r_1, r_2 и r_3 – соответственно перекрытие в задвижках a_2, a_3, a_4 и a_5, a_6 . Суммарное перекрытие трубопровода задвижками a_3, a_4 и a_5, a_6 необходимо рассматривать как параллельное соединение трубопроводов:

$$r_1 = a_2,$$

$$r_2 = \left(\frac{1}{\sqrt{a_3}} + \frac{1}{\sqrt{a_4}} \right)^{-2},$$

$$r_3 = \left(\frac{1}{\sqrt{a_5}} + \frac{1}{\sqrt{a_6}} \right)^{-2},$$

$$\Sigma r = a_2 + \left(\frac{1}{\sqrt{a_3}} + \frac{1}{\sqrt{a_4}} \right)^{-2} + \left(\frac{1}{\sqrt{a_5}} + \frac{1}{\sqrt{a_6}} \right)^{-2}.$$

Если сумма сопротивлений a_3 (a_5) и a_4 (a_6) меньше половины максимального перекрытия, то принять итоговое сопротивление участка равным 0. На втором этапе, зная подачу насоса (при полностью перекрытом нагнетательном трубопроводе подача равна 0, при полностью открытом – максимальна), по аппроксимированным кривым харак-

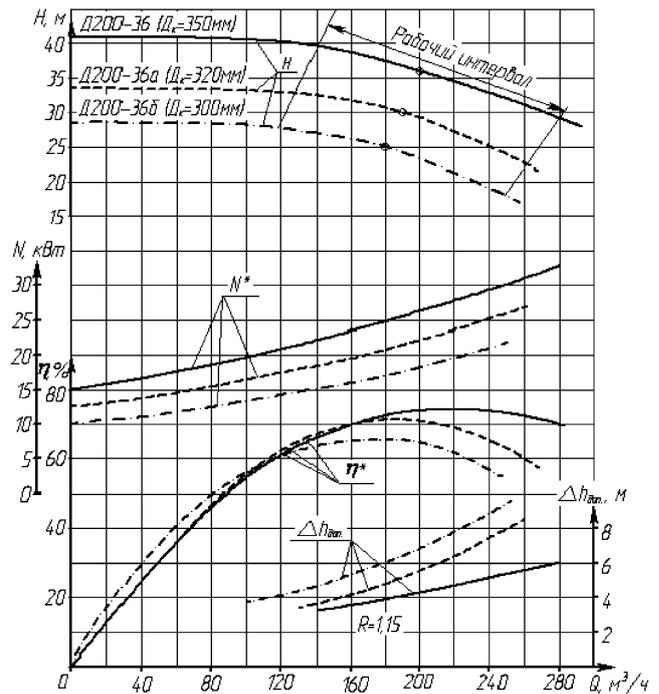


Рис. 3. Характеристики насоса Д200–36. Частота вращения вала 1450 об/мин, жидкость – вода, плотность 1000 кг/м³

теристик насоса (рис. 3) определяются напор, мощность, к.п.д. и кавитационный запас. На третьем этапе, зная кавитационный запас и характер изменения манометрического и вакуумметрического давления, полученный в ходе эксперимента, определяются поправочные коэффициенты напора, к.п.д. и мощности. На четвертом этапе корректируются значения напора, к.п.д, мощности и т. д. с учетом полученных коэффициентов. Проверяется условие подачи насоса. На пятом этапе рассчитывается распределение потока жидкости (подачи) в гидросистеме. Например, для задвижек a_3 и a_4 распределение потока жидкости рассчитывается по формуле:

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \sqrt{\frac{a_3}{a_4}}.$$

Расход жидкости в одной из ветвей гидравлической сети будет равен

$$Q_3 = \frac{Q}{1 + \sqrt{\frac{a_3}{a_4}}}.$$

На шестом этапе изменяются показания виртуальных измерительных приборов. На седьмом этапе происходит обработка вторичных данных: изменение звукового сопровождения; расчет процессов, происходящих при пуске и остановке двигателя; определение I, U , оборотов двигателя, возможности перелива жидкости из верхнего бака в нижний и т. д.

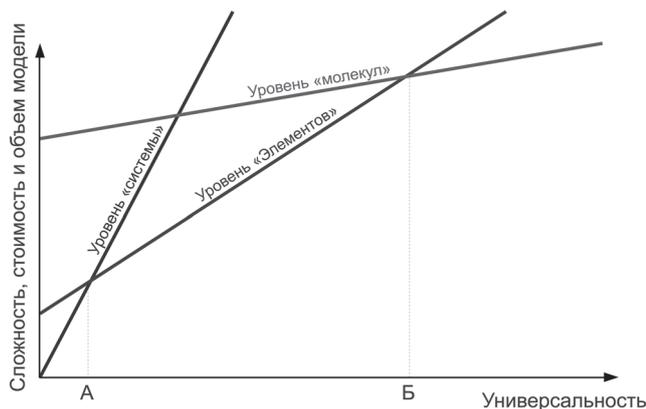


Рис. 4. Условное изображение возрастания сложности модели от требуемой универсальности

Данный пример показывает как достоинства, так и недостатки статистических и аналитических моделей уровня «системы» [4, 5]. В качестве достоинства можно отметить быстроту построения (при наличии всех необходимых статистических данных), легкость последующей реализации и т. д. К недостаткам можно отнести следующее: нет так называемой «физики процесса», т. е. модель работает точно в пределах имеющихся статистических данных. Любое расширение универсальности модели, например, имитация гидроударов, учет примесей и вязкости, имитация вибрации, химических и электрохимических реакций, усталостный износ и т. д., фактически заставит «подняться на уровень вверх» и перейти на моделирование на уровне «элементов». Такой переход очевиден, так как дальнейший учет различных факторов будет значительно увеличивать ее сложность, объем, а следовательно, и стоимость. Условные точки А и Б на рис. 4 показывают необходимость перехода на другой уровень при увеличении универсальности модели.

Построение статистических и аналитических моделей уровня «системы» основано на применении имитационного моделирования, особенно таких его разделов, как функциональные модели (отображающие физические и информационные процессы, происходящие в моделируемом объекте), структурные модели (отображающие геометрические свойства объекта) и коммутационные модели (отображающие соединения в моделируемом объекте.). Как правило, такие модели не являются универсальными и создаются под конкретный имитатор каждый раз заново, т. е. возможность повторного использования маловероятна.

Отдельного рассмотрения требуют модели уровня «элементов» как наиболее перспективные и универсальные на данный момент, допускающие повторное использование, т. е. могут быть исполь-

зованы в процессе автоматизированного создания имитаторов. Следует отметить, что модели уровня «элементы» могут быть естественным образом объединены для моделирования нескольких различных физико-химических механизмов в одной модели (в области физического моделирования имеется понятие (рубрика) – мультифизика). Частным случаем этого определения является система дифференциальных уравнений более чем с одной независимой переменной различных физических размерностей. До определенной степени понятие «мультифизика» условно; возможны его разные трактовки [4, 5].

Перечень классов задач, решаемых при помощи метода конечных элементов (МКЭ) с возможностью моделирования сразу нескольких различных физико-химических механизмов в одной модели, достаточно широк.

После построения математической модели системы обычно выполняется ее предварительное изучение, выделение наиболее существенных характеристик, экспериментальный и теоретический анализ модели, сопоставление результатов решения с известными данными о системе, корректировка модели и т. д. Сопоставление результатов имитации с известными данными о реальной системе, как правило, происходит с использованием следующих подходов:

- среднее относительное отклонение:

$$S_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^{(э)} - x_i^{(м)}}{x_i^{(м)}} \right);$$

- максимальная относительная ошибка (отклонение):

$$S_2 = \max \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^{(э)} - x_i^{(м)}}{x_i^{(м)}} \right);$$

- средняя квадратичная ошибка:

$$S_3 = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \left[\frac{x_i^{(э)} - x_i^{(м)}}{x_i^{(м)}} \right]^2 \right]^{0,5}.$$

После построения математической модели и ее проверки выполняется программная реализация. Реализация математической модели на языке программирования сама по себе может быть достаточно тривиальной задачей, а может оказаться и достаточно сложной задачей. После выполнения программной реализации, как правило, определяют ее экономичность, т. е. необходимые для функционирования вычислительные ресурсы.

Пример оценки [6, 7] затрат вычислительных ресурсов при расчете программной реализации

Замеры времени выполнения модели

Номер замера	Время выполнения, с
1	0,016000
2	0,015000
3	0,016000
4	0,015000
5	0,016000
6	0,016000
7	0,015000
8	0,016000
9	0,015000
10	0,016000
11	0,016000

модели тренажера станка-качалки. Результаты теста LINPACK для компьютера Intel Core 2 Quad

Q8300 2.5 GHz равны 27.28 Gflops/s. Замеры времени выполнения модели приведены в таблице.

$FLOPS_{max} = (27.28 \times 0,016000) = 0,43$ Gflops (количество операций для одного полного просчета модели).

$F = 27,28 / 0,43 = 64,15$ (количество расчетов модели в секунду).

Например, заданная частота «реального времени» определена как 60 Гц, значит, $C = 64,15 / 60 = 1,07$. $C > 1$ означает, что модель является экономичной и может работать в заданных условиях «реального времени» на заданном оборудовании. Оптимизация модели не требуется. Допускается уменьшение вычислительной мощности компьютера на 7%.

Литература

1. Гаммер М. Д., Сызранцев В. Н., Колесов В. И. Компьютерные имитационные тренажеры в открытом профессиональном образовании // Открытое образование. 2009. № 5.
3. Гаммер М. Д., Сызранцев В. Н., Колесов В. И., Гильманов Ю. А. Опыт проектирования распределенных тренажерных систем для обучения студентов нефтегазового направления // Изв. вузов. Нефть и газ. Тюмень. ТюмГНГУ. 2009. № 3. С. 103–108.
4. Гаммер М. Д., Сызранцев В. Н., Колесов В. И., Гильманов Ю. А. Опыт создания и использования компьютерных имитационных тренажеров в ТюмГНГУ // Материалы докладов 3-й междунар. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли в образовании». Тюмень: ТюмГНГУ, 2008.
5. Гаммер М. Д., Колесов В. И. Распределенные тренажерные системы. Новые образовательные технологии в вузе // Сб. материалов 6-й междунар. метод. конф., 2–5 февраля 2009 г. Ч. 1. Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ». 2009. С. 165–167.
6. Сызранцев В. Н., Гаммер М. Д. Компьютерные тренажеры для обучения студентов нефтегазового направления // Бурение и нефть. 2006. № 10. С. 34–36.
7. Сызранцев В. Н., Гаммер М. Д. Разработка и внедрение компьютерных тренажеров на кафедре МОНИП в ТюмГНГУ // Сб. уч.-метод. материалов. Тюмень: ТюмГНГУ. 2005. С. 134–138.