УДК 519.61

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ[1]

Ю.И. Бродский

Делается попытка ввести формализованное описание моделей некоторого класса сложных систем. Ключевыми понятиями этой формализации являются понятия компонент, которые могут образовывать комплекс и комплекса, состоящего из компонент, но на некотором более высоком уровне абстракции могущем восприниматься как единая компонента. В результате сложную систему можно рассматривать, начиная с одной компоненты на самом высоком уровне абстракции, и кончая фракталом компонент, на уровне максимально подробного моделирования. Степень подробности ограничивается лишь желанием разработчика модели. Предлагаются методы анализа и синтеза многокомпонентных моделей, ориентированные на распределенные и параллельные вычисления. Устанавливается связь объектно-событийного моделирования и моделирования средствами классических динамических систем.

Введение

Важным направлением развития имитационного моделирования является моделирование сложных систем. Например, Н.П. Бусленко [1] дает следующее определение: «Сложная система — составной объект, части которого можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 10-07-00176-а.

между собой заданными отношениями». Будем рассматривать системы, которые можно представить как совокупность отдельных относительно независимых друг от друга объектов, лишь время от времени взаимодействующих между собой. Обычно возможности и характеристики этих объектов хорошо известны исследователю, целью же построения имитационной модели является экспериментальное получение характеристик системы в целом.

Задача синтеза модели из компонент – нетривиальная, однако вполне решаемая (обычно эвристически) инженерная задача (например, [2]). В основе решения этой задачи лежит идея так или иначе дать компонентам возможность проявить себя, время от времени синхронизируя их деятельность, и наблюдать, что происходит с системой в целом. При этом возникает ряд теоретических вопросов, от решения которых существенно зависит качество синтезируемой модели:

- Не может ли оказаться у моментов синхронизации объектов точек накопления? При наличии хотя бы одной такой точки, модель зациклится, причем распознать подобный цикл будет весьма непросто.
- Какая должна быть дисциплина доступа объектов к характеристикам системы в целом? Не будут ли возникать систематические ошибки моделирования из-за постоянного места тех или иных объектов в списке просмотра в процессе организации вычислений? Например, в мире ковбоев, как известно, всегда прав тот, кто выстрелил первым.
- Допустим ли асинхронный вызов методов различных объектов (что было бы очень заманчиво для распределенных и параллельных вычислений)? Этот вопрос тесно связан с предыдущим: если два метода выполняются параллельно, они не должны изменять одни и те же характеристики модели, иначе результат их деятельности будет неопределен. Если же вводить жесткую дисци-

плину работы с характеристиками системы, например, «каждый метод изменяет только свои характеристики и не имеет права изменять чужие» — необходимо обоснование выполнимости этого требования, как в свое время это было сделано Дейкстрой для требования обходиться в программах без оператора goto.

- Наконец, как связано объектно-событийное моделирование с классическим описанием моделей системами дифференциальных уравнений?

В настоящей работе мы попытаемся ответить на эти вопросы. Например, можно выделить класс моделей (назовем их регулярными), для которого на данные вопросы имеется ответ в желательном для распределенного моделирования русле.

Динамические системы

В основе моделей представленных динамическими системами, лежит гипотеза о замкнутости. Мы изучаем влияющие друг на друга характеристики, или как их еще называют, внутренние переменные $X_1, X_2, \dots$, некоторого явления. Наконец, на некотором X_n нам начинает казаться, что выбранных нами характеристик достаточно чтобы описать данное явление полностью, или же с интересующей нас точностью, или хотя бы то, что интересует нас в этом явлении (например, Дж. Форрестеру [3] хватило пяти внутренних переменных для описания в некотором приближении всей мировой динамики). Утверждение, что характеристик $X_1, X_2, \dots, X_n$ достаточно, чтобы полностью описать интересующее нас явление, и есть гипотеза о замкнутости нашей модели. Из нее непосредственно следует, что если теперь нас интересует изменение выбранных нами внутренних переменных во времени, – то ему не от чего зависеть, кроме как от самих этих переменных, и мы получаем обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\frac{dX_i}{dt} = F(X_1,...,X_n), i = 1,...,n\ .$$

Гипотеза о замкнутости лишь говорит, что правые части нашей системы зависят от тех же самых переменных, но не проясняет их вид. Определить вид правых частей – одна из задач построения модели. При конструировании правых частей обычно оказывается, что полностью независимой от внешнего по отношению к ней мира модель не может быть, и эта ее зависимость проявляется именно во внешних переменных. Внешние переменные – это то, что в данной модели мы не моделируем явно (потому что не хотим, или быть может, не умеем), а принимаем как заданные извне параметры, постоянные или же меняющиеся во времени (в том числе это могут быть и внешние управления). Внешние переменные – это вся информация о внешнем по отношению к ней мире, известная нашей модели.

Отношение между внутренними и внешними переменными модели устанавливает гипотеза об инвариантности. Она утверждает, что внутренние переменные модели зависят от внешних, но не наоборот.

Приняв эти гипотезы, мы на каждом i-м шаге моделирования зная состояние системы (т. е. ее внутренние переменные) $\vec{X}_i$ а также внешние переменные $\vec{a}_i$ и интервал моделирования Δt, можем вычислить следующее $i+1$ состояние нашей модели: $\vec{X}_{i+1} = \vec{F}(\vec{X}_i, \vec{a}_i, \Delta t)$. Вычислив очередное состояние модели, и узнав из внешнего по отношению к ней мира $\vec{a}_{i+1}$, мы можем продолжить процесс моделирования далее.

Объектный анализ

Через всю историю науки проходят два способа описания явлений – как взаимосвязь некоторых глобальных характеристик, и как совокупность отдельных атомов, взаимодействующих между собой. Волна интереса к объектному представлению в информатике усилилась в 80-х годах XX века, как отклик на потребности с одной стороны моделирования сложных систем, а с другой – автоматизации проектирования таких систем. Появились объектно-ориентированные языки программирования, в которых класс объектов трактуется как:

- набор характеристик (данные, связанные с объектами этого класса);
- методы (функциональности объектов этого класса);
- события (некоторые сочетания характеристик, на которые объекты этого класса должны реагировать определенным образом, поскольку они «так устроены»).

Кроме того, в этих языках реализованы такие идеи как наследование объектами свойств и полиморфизм, облегчающие задачу построения новых объектов на основе готовых, а также инкапсуляция, открывающая пользователю функциональность объекта и скрывающая детали ее реализации.

Отметим, что объект в указанном выше смысле вполне может рассматриваться и как классическая математическая конструкция. Действительно, определяемое в объектном анализе понятие класса объектов, является частным случаем понятия «рода структуры» в бурбаковском формализме [4], [5].

Связь между динамическими и объектными моделями

В системе дифференциальных уравнений в каждый момент времени каждая переменная зависит от каждой. Покажем, что при определенных условиях, с любой степенью точности такую систему можно приблизить совокупностью объектов, взаимодействующих друг с другом лишь в конечное число моментов времени – событий, а в промежутках между событиями независимых друг от друга.

Рассмотрим задачу Коши для динамической системы

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x},t),\ \vec{x}(0) = \vec{x}_0,\ t \in [0,T] \quad (1)$$

Пусть функция f в правой части достаточно «хорошая», например, удовлетворяет условию Липшица по совокупности своих переменных. Будем называть системой событий $\{t_n\}$ разбиение отрезка $[0,T]$ точками $0 = t_0 < t_1 <,...,< t_n = T$. Будем называть разбиением $\{A\}$ вектора $\vec{x}$ некоторое произвольное разбиение его компонент на два подвектора $\vec{x}^1$ и $\vec{x}^2$. Через $\vec{x}_0(t)$ будем обозначать решение задачи Коши (1). Через $\vec{x}_{\{A\},\{t_n\}}(t)$ будем обозначать склеенное решение следующих задач Коши на отрезках $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 0,...,n-1$:

$$\begin{aligned} &\dot{\vec{x}}^1 = f^1(\vec{x}^1, \vec{x}^2 \equiv \vec{x}^2(t_i), t),\ \vec{x}^1(t_i); \\ &\dot{\vec{x}}^2 = f^2(\vec{x}^1 \equiv \vec{x}^1(t_i), \vec{x}^2, t),\ \vec{x}^2(t_i). \end{aligned} \tag{2}$$

Очевидно, $\vec{x}_{\{A\},\{t_n\}}(t)$ - непрерывная функция, так как ее производная кусочно-непрерывна. Таким образом, мы разбили исходную систему (1), где все переменные всегда зависят от всех, на два объекта $\vec{x}^1$ и $\vec{x}^2$, которые взаимодействуют между собой лишь в конечное число моментов времени – событий. В промежутках же между событиями эти объекты независимы друг от друга.

Теорема о приближенной декомпозиции системы (1) на два подобъекта [6]:

Пусть функция f в правой части (1) удовлетворяет условию Липшица по совокупности своих переменных. Тогда для любого разбиения $\{A\}$ компонент вектора $\vec{x}$ на два подвектора $\vec{x}^1$ и $\vec{x}^2$, и для любого числа $\varepsilon > 0$, найдется конечная система событий $\{t_n\}$, такая что если $\vec{x}_0(t)$ - решение исходной задачи Коши (1), а $\vec{x}_{\{A\},\{t_n\}}(t)$ - решение задач Коши системы (2), то для этих решений будет справедлива оценка:

$$\max_{t\in[0,T]} \left| \vec{x}_0(t) - \vec{x}_{\{A\},\{t_n\}}(t) \right| \le \varepsilon \quad .$$

Доказательство. Возьмем последовательность разбиений отрезка $[0,T]$ на n равных частей. Пусть этим разбиениям соответствуют решения $\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}$ системы (2). Из выполнения условий Липшица для функции f, $|f(\vec{x},t)-f(\vec{x}_0,0)|\le const|\vec{x}|+constT$ следует оценка: $-const-conste^{constT}\le\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}\le const+conste^{constT}$, или окончательно, $|\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}|\le const,\forall\, n$, т.е., семейство функций $\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}$ равномерно ограничено на $[0,T]$. Отсюда и из условия Липшица следует еще одна оценка:

$$\left|f(\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\},t)\right|\le const,\forall\, n \qquad (3)$$

Далее, пусть $t,\tau\in[0,T]$ и $t<\tau$, оценим разность $|\{\vec{x}_n^1(\tau),\vec{x}_n^2(\tau)\}-\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}|$. Предположим, что на интервал (t,τ) попало $k\ge 0$ точек из нашего разбиения отрезка $[0,T]$ на n равных частей, $t_1,...,t_k$. Обозначим $t_0=t$ и $t_{k+1}=\tau$, тогда

$$\{\vec{x}_n^1(\tau),\vec{x}_n^2(\tau)\}-\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}=$$
$$=\sum_{i=0}^{k}(\{\vec{x}_n^1(t_{i+1}),\vec{x}_n^2(t_{i+1})\}-\{\vec{x}_n^1(t_i),\vec{x}_n^2(t_i)\}).$$

На каждом из отрезков $[t_i,t_{i+1}], i=0,...,k$, функция $\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}$ дифференцируема, поэтому из (3) следует $|\{\vec{x}_n^1(t_{i+1}),\vec{x}_n^2(t_{i+1})\}-\{\vec{x}_n^1(t_i),\vec{x}_n^2(t_i)\}|\le const(t_{i+1}-t_i)$, суммируя это неравенство по i от 0 до k, получаем $|\{\vec{x}_n^1(\tau),\vec{x}_n^2(\tau)\}-\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}|\le const(\tau-t),\forall\, n$. Последняя оценка означает равностепенную непрерывность семейства функций $\{\vec{x}_n^1(t),\vec{x}_n^2(t)\}$ на $[0,T]$. Следовательно, по теореме Арцела [7], из этого семейства можно выделить равномерно сходящуюся подпоследовательность, которую также будем обозначать $\left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}$. Пусть ее предел – функция $\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\}$.

Рассмотрим оператор $\Phi(x) = x(t) - \int_0^t f(x(\tau), \tau) d\tau$ и попробуем оценить величину $\left\|\Phi\left(\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\}\right)\right\|_{C[0,T]}$. Построим аналогичный оператор и для декомпозированной системы (2).

Обозначим $t^*(t) = \max\left\{t_j : t_j \in \{t_n\}, t_j \le t\right\}$,
$J(t) = j : 0 \le j < n; t_j = t^*(t)$.

Положим

$$\Psi(\{x^1, x^2\}) = \{x^1(t), x^2(t)\} -$$

$$- \int_{t^*(t)}^{t} \{f^1(x^1(\tau), x^2(t^*(t)), \tau), f^2(x^1(t^*(t)), x^2(\tau), \tau)\} d\tau -$$

$$- \sum_{j=1}^{J(t)} \int_{t_{j-1}}^{t_j} \{f^1(x^1(\tau), x^2(t_{j-1}), \tau), f^2(x^1(t_{j-1}), x^2(\tau), \tau)\} d\tau .$$

Так как $\left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}$ - решение системы (2), то $\Psi\left(\left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}\right) = 0$, поэтому справедлива следующая оценка:

$$\left\|\Phi\left(\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\}\right)\right\| = \left\|\Phi\left(\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\}\right) - \Psi\left(\left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}\right)\right\| \le$$

$$\le \left\|\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\} - \left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}\right\| +$$

$$+ \sum_{i=0}^{n} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left| f\left(\left\{\vec{x}_*^1(\tau), \vec{x}_*^2(\tau)\right\}, \tau\right) -\right.$$

$$\left. - \left\{f^1\left(\left\{x_n^1(\tau), x_n^2(t_i)\right\}, \tau\right), f^2\left(\left\{x_n^1(t_i), x_n^2(\tau)\right\}, \tau\right)\right\}\right| d\tau .$$

Отсюда, и из равностепенной непрерывности семейства функций $\left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}$ и условия Липшица, следует оценка:

$$\left\|\Phi\left(\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\}\right)\right\| \le \max_{t \in [0,T]} \left|\left\{\vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t)\right\} - \left\{\vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t)\right\}\right| +$$

$$+ \; const \max_{t\in[0,T]} \left| \left\{ \vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t) \right\} - \left\{ \vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t) \right\} \right|.$$

Так как эта оценка верна для всех n, а $\left\{ \vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t) \right\}$ равномерно сходится к $\left\{ \vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t) \right\}$, заключаем что $\Phi\left(\left\{ \vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t) \right\}\right) = 0$, т.е., $\left\{ \vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t) \right\}$ - решение исходной системы (1). Но тогда, в силу единственности решения системы (1), справедливо: $\left\{ \vec{x}_*^1(t), \vec{x}_*^2(t) \right\} = \vec{x}_0(t)$. Следовательно, последовательность $\left\{ \vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t) \right\}$ равномерно сходится к $\vec{x}_0(t)$, и, стало быть, начиная с некоторого номера N, при всех $n \geq N$ будет справедливо:

$$\max_{t\in[0,T]} \left| \vec{x}_0(t) - \left\{ \vec{x}_n^1(t), \vec{x}_n^2(t) \right\} \right| \leq \varepsilon \;,$$

что и завершает доказательство утверждения. ■

Компонента - элементарная сложная модель

Перейдем теперь к описанию основной конструкции предлагаемой концепции моделирования. Назовем ее компонентой. Компонента – это в некотором смысле «элементарная» сложная система. Основой конструкции компоненты будет объект объектного анализа, но понятия связанные с динамическими системами мы также будем использовать. Опишем «устройство» компоненты.

Характеристики.

Компонента, как и объект, имеет характеристики. Как и в случае динамических систем, эти характеристики мы будем разбивать на внутренние и внешние. Внутренние характеристики – это то, что компонента моделирует, внешние – это то, что она знает о внешнем мире. Предполагается справедливой гипотеза о замкнутости модели-компоненты – знаний о внешнем мире (значений внешних переменных), собственного состояния (значений внутренних переменных) и продолжительности шага моделирования достаточно для вычисления внутренних переменных в следующий момент времени.

Методы.

Компонента, как и объект, имеет методы. Излагаемая концепция компоненты различает два типа методов: один тип реализует функциональности, т. е. то, что компонента умеет делать, эти методы будем называть элементами. Другой тип методов прогнозирует наступление событий, об этих методах говорится в следующем пункте.

Функциональность компоненты удобно структурировать следующим образом: Считается, что компонента реализует один или несколько параллельно выполняющихся процессов. Процесс состоит в чередовании элементов – алгоритмически элементарных методов. По отношению к модельному времени некоторые элементы выполняются мгновенно, это сосредоточенные или быстрые элементы. Выполнение других элементов занимает определенное время. Если при этом элемент для любого промежутка времени Δt выдает некий результат, такой элемент называется распределенным или медленным. Может оказаться и так, что выполнение элемента занимает определенное модельное время, но результат его действия наступает лишь в конце, после полного выполнения элемента, т. е. никаких промежуточных результатов за время меньшее полного времени выполнения нет. Такие элементы называются условно-распределенными. Вообще говоря, условно-распределенные элементы можно не рассматривать как отдельный класс, а моделировать парой: пустой распределенный элемент, за которым идет сосредоточенный, выдающий результат.

Частью предлагаемой концепции является жесткая дисциплина работы методов с фазовыми переменными модели: каждый метод имеет право изменять только «свои» переменные. В рамках этой концепции, конфликт доступа возникающий, когда методы A и B вычисляют одну и ту же характеристику $x = x_A$ и $x = x_B$, может быть разрешен, например, введением метода C, который получая на входе в качестве параметров x_A и x_B, вычисляет на их основании искомую характеристику x, устраняя тем самым не только конфликт доступа к ней, но и очевидно, имевшую место неоднозначность ее вычисления. Принятая дисциплина доступа к характеристикам позволяет вызывать параллельно те методы, которые в модельном времени выполняются одновременно.

Порядок чередования элементов в процессе определяется наступлением событий.

События.

Содержательно, события – это то, что нельзя пропустить при моделировании динамики системы – точки синхронизации различных ее функциональностей.

Формально событие – функция внутренних и внешних переменных (следствие гипотезы о замкнутости компоненты). Используя внутренние и внешние характеристики компоненты, она прогнозирует время наступления соответствующего события. Если это время равно нулю – значит, событие уже наступило. События управляют чередованием элементов в процессе.

Чередование элементов в процессе.

Для каждой упорядоченной пары элементов $\{A, B\}$, если между ними возможен переход, ему должен соответствовать метод-событие $\mathrm{E}_{\{A,B\}}$, прогнозирующий время этого перехода. Если метод $\mathrm{E}_{\{A,B\}}$ возвращает ноль — время перехода уже наступило. Процесс перехода должен быть однозначным. Одновременное наступление событий $\mathrm{E}_{\{A,B\}}$ и $\mathrm{E}_{\{A,C\}}$ говорит лишь о том, что разработчик модели упустил из вида этот случай, которому, быть может, должен соответствовать переход $\{A,D\}$.

Выполнение компоненты.

Опишем, как функционирует компонента. Считается, что для компоненты задан некий шаг моделирования Δt по умолчанию.

В момент t в начале каждого шага моделирования вызываются все методы прогноза событий для всех процессов компоненты.

Если есть наступившие события, в соответствии с ними выбираются новые текущие элементы.
а) Если среди текущих элементов есть мгновенные (не занимающие модельного времени) – они выполняются. В этом случае считается, что выполнился шаг моделирования нулевой длины. Повторяется вызов прогнозов наступления событий (т. е. возвращаемся к пункту 1).
б) Если мгновенных элементов нет, повторяется вызов прогнозов событий, (возвращаемся к пункту 1).

Если наступивших событий нет – выбирается минимальное значения прогноза события t^*. Если $t^* \geq \Delta t$ - моделирование идет со стандартным шагом Δt, если же нет, в качестве шага моделирования берется t^*. С выбранным шагом времени вызываются все распределенные элементы. Этим заканчивается очередной шаг моделирования.

Может возникнуть вопрос, а не окажется ли у множества событий точек накопления, при предлагаемой системе выбора шага моделирования? Отчасти на него отвечает теорема о приближенной декомпозиции системы дифференциальных уравнений. Например, если элементы компоненты описаны дифференциальными уравнениями и все правые части этих дифференциальных уравнений удовлетворяют условию Липшица – точек накопления не будет.

Комплексы компонент

Компоненты могут объединяться в комплекс, при этом (необязательно) может оказаться, что некоторые компоненты явно моделируют внешние переменные некоторых других компонент. Здесь разрешается одной компоненте моделировать характеристики, являющиеся внешними переменными многих компонент, но не разрешается неоднозначность, когда одна чья-то внешняя переменная моделируется многими компонентами. Такая неоднозначность, впрочем, может быть легко преодолена, введением новой компоненты, получающей в качестве внешних переменных значения упомянутой характеристики, вычисленные различными компонентами, и моделирующей в качестве своей внутренней переменной уже единственное «окончательное» значение этой характеристики.

Будем обозначать действие компоненты формулой

$$\vec{x}_{i+1} = \vec{F}(\vec{x}_i, \vec{a}_i, \Delta t) .$$

Это означает, что, зная внутренние переменные $\vec{x}_i$, внешние переменные $\vec{a}_i$ предыдущего шага и задав шаг моделирования по умолчанию Δt, мы получаем внутренние переменные следующего шага моделирования $\vec{x}_{i+1}$, при этом про интервал модельного времени τ между шагами i и $i+1$ можно лишь сказать, что он лежит в пределах $0 \le \tau \le \Delta t$.

Пусть имеется N моделей, описываемыми компонентами $\vec{x}^k{}_{i+1} = \vec{F}^k(\vec{x}^k{}_i, \vec{a}^k{}_i, \Delta t)$, $k = 1,...,N$. Эти системы будут трактоваться как подмодели единого комплекса и обозначаться A_k, $k = 1,...,N$. Содержательно основанием объединения компонент в комплекс является предположение, что некоторые компоненты явно вычисляют характеристики, являющиеся внешними переменными некоторых других компонент.

Для каждой из $N(N-1)$ пар $(A_i, A_j), i \neq j$, можно построить матрицу коммутации $Q_{i,j}$ размера $n_i \times m_j$, где n_i - размерность вектора $\vec{a}^i$ компоненты A_i, а m_j - размерность вектора $\vec{x}^j$ компоненты A_j. На пересечении p-й строки ($1 \leq p \leq n_i$) и q-го столбца ($1 \leq q \leq m_j$) этой матрицы стоит 1, если внешняя переменная a_p^i компоненты A_i зависит от внутренней переменной x_q^j компоненты A_j; и 0 – в противном случае. Задание матриц $Q_{i,j}$, $1 \leq i, j \leq N; i \neq j$, которые будут называться матрицами коммутации, полностью решает вопрос информационного синтеза комплекса из компонент. Здесь следует заметить, что при фиксированном i, и при $1 \leq j \leq N; i \neq j$, наличие единицы в фиксированной строке более чем в одной из матриц $Q_{i,j}$, также как и наличие в одной строке более одной единицы, свидетельствовало бы о моделировании одной величины несколькими способами, и, следовательно, ставило бы вопрос о согласованности таких моделей (например, включение в комплекс компоненты-интегратора). Поэтому в дальнейшем исключим этот случай. С другой стороны, наличие нескольких единиц в столбце матрицы $Q_{i,j}$, а также, при фиксированном j, и при $1 \leq i \leq N; i \neq j$, наличие единицы в фиксированном столбце более чем одной из матриц $Q_{i,j}$, говорит о том, что внутренняя переменная одной из компонент используется в качестве внешней переменной более чем одной компоненты, что не противоречит нашей концепции, и должно быть разрешено.

В заключение данного раздела следует отметить, что комплекс, изнутри состоящий из многих компонент, вовне может проявляться в качестве единой компоненты.

Введем следующую операцию объединения компонент комплекса:

- Внутренними переменными комплекса объявляется объединение внутренних переменных всех его компонент.
- Процессами комплекса объявляется объединение всех процессов его компонент.
- Методами комплекса объявляется объединение всех методов его компонент.
- Событиями комплекса объявляется объединение всех событий его компонент.
- Внешними переменными комплекса объявляется объединение всех внешних переменных его компонент, из которого исключаются все те переменные, которые моделируются явно какими-либо компонентами.

В результате описанной операции объединения, комплекс становится компонентой, со всеми вытекающими отсюда последствиями. Этот факт позволяет строить модель как фрактальную конструкцию, сложность которой (и соответственно подробность моделирования) ограничивается лишь желанием разработчика.

Заметим, что из способа синтеза компонент в комплекс (коммутация внутренних переменных одних компонент с внешними других) и принятой для каждой компоненты гипотезы об инвариантности, следует, что на уровне различных компонент конфликтов по поводу доступа к характеристикам комплекса быть не может. На уровне отдельной компоненты, как уже упоминалось выше, методы проектируются таким образом, что между ними тоже не может быть конфликтов доступа. Разрешимость задачи подобного проектирования, по крайней мере для регулярных моделей, следует из доказанной выше теоремы о приближенной декомпозиции системы дифференциальных уравнений.

Заключение

Предложен способ синтеза сложных моделей, решающий поставленные во введении вопросы в желательном для распределенных вычислений ключе, по крайней мере, для класса регулярных моделей. Вполне обоснованно можно вводить жесткую дисциплину доступа к характеристикам модели — каждый метод имеет право изменять лишь свои собственные характеристики. Такая дисциплина позволяет вызывать методы параллельно.

Изложенные принципы синтеза сложных систем реализованы в инструментальной системе распределенного имитационного моделирования. В настоящее время создан макет рабочей станции для этой системы http://simul.ccas.ru/Distr.

Литература

1. *Бусленко Н.П.* Сложная система //Статья в Большой Советской Энциклопедии, 3-е изд., М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.
2. *Бродский Ю.И., Лебедев В.Ю.* Инструментальная система имитации MISS М.: ВЦ АН СССР, 1991, 180 с.
3. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. М.: Физматгиз. 1978. 168 с.
4. *Бурбаки Н.* Теория множеств. М.: Мир. 1965. 456 с.
5. *Павловский Ю.Н., Смирнова Т.Г.* Введение в геометрическую теорию декомпозиции М.: Фазис, 2006, 169 с.
6. *Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И.* Имитационное моделирование М.: Изд. центр «Академия», 2008, 236 с.
7. *Колмогоров А.Н., Фомин С.Г.* Элементы теории функций и функционального анализа. М.: «Наука», 1972, 496с.