

УДК 004.414.041:658.51.012

Т.В. Климова, Е.С. Яшина

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ПРОЕКТА СОЗДАНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ АВТОМАТОВ

Введение. Одной из наиболее важных задач управления проектами является планирование проекта. Календарный план проекта является основой для принятия ряда важных управленческих решений, касающихся планирования операционной деятельности предприятия, распределения ресурсов, выдачи заданий исполнителям, а также планирования других проектов.

Обычно для построения календарного плана проекта используется математический аппарат сетевого планирования [1]. Сетевые модели, реализованные во многих современных пакетах программ для управления проектами, весьма популярны у широкого круга пользователей и специалистов, благодаря своей наглядности. Однако они обладают целым рядом ограничений, затрудняющих решение многих задач. Так, в классической сетевой модели сложно отразить итеративный характер разработки, риски, многие аспекты управления ресурсами. Для преодоления недостатков, присущих классическим сетевым моделям, разными авторами предложен ряд модификаций моделей [2–4]. Вероятностные, альтернативные, ресурсные и другие разновидности моделей существенно расширяют возможности сетевого планирования, однако их применение затруднено тем, что они требуют разработки специального программного обеспечения. Кроме того, каждая из указанных разновидностей моделей предназначена для анализа отдельного аспекта проекта и совместное применение нескольких разновидностей моделей во многих случаях затруднительно.

Для того, чтобы иметь возможность анализировать различные аспекты проекта в одной модели, следует построить модель, используя универсальный математический аппарат. В этом случае для анализа моделей можно будет использовать стандартные математические модели.

В работе [5] обосновано применение моделей, построенных в аппарате теории автоматов, для описания, анализа и моделирования процессов выполнения проекта. Рассмотрим применение этого аппарата для построения модели.

Наиболее известными и распространёнными моделями данного класса являются модели конечных автоматов. Изначально этот математический аппарат был разработан для описания функционирования вычислительных систем, систем автоматического управления, робототехнических комплексов и других процессов и явлений, носящих дискретный характер. Применение такого аппарата для моделирования сложных организационных процессов затруднительно, так как некоторые из этих процессов происходят непрерывно и не могут быть описаны в форме скачкообразной последовательности переходов из одного состояния в другое. Однако и описание организационных процессов исключительно с помощью моделей классической математики также невозможно. Таким образом, математический аппарат, применяемый для построения модели, должен обладать возможностью отображать как непрерывные, так и дискретные процессы.

В последнее время в разных разделах математики большое внимание уделяется интеграции дискретного и непрерывного подходов. Примером могут служить гибридные сети Петри [6], применяющиеся для математического моделирования сложных технологических процессов.

Наиболее широкими возможностями для описания функционирования систем различной природы обладают модели гибридных автоматов [8]. Отличительной особенностью гибридных автоматов является их способность описывать как дискретные, скачкообразные (смена состояний), так и непрерывные процессы. С этой целью отдельным или всем состояниям придаётся некоторое поведение, которое реализует автомат, находясь в данном состоянии. Модели данного класса широко применяются для моделирования не только вычислительных, но и технологических, производственных, организационных процессов. Рассмотрим применение моделей гибридных автоматов для решения задач планирования проектов.

Построение модели плана проекта. Напомним, что автомат или машина состояний представляет собой совокупность состояний

системы, переходов между ними и событий или сигналов, инициирующих переходы [7].

Формально автомат определяется в виде кортежа:

$$A = \langle Q, R, E \rangle \quad (1)$$

где Q – множество состояний системы, среди которых выделяется начальное q_0 ; R – множество переходов; E – множество событий.

Переходы часто понимают как функцию изменения состояний

$$R: Q \times E \rightarrow Q.$$

Тогда состояние q_s является результатом перехода из состояния q_{s-1} по событию e_j

$$r(q_{s-1}, e_j) = q_s, \text{ для } q_s, q_{s-1} \in Q, r \in R, e_j \in E. \quad (2)$$

Функция переходов задаётся таблично или графически.

В качестве события могут выступать внешние сигналы или логические условия, значения которых определяются в ходе моделирования.

Состояние проекта в момент времени t определяется тем, какие работы выполняются в данный момент. Поэтому выполнение проекта можно представить как процесс перехода между состояниями, соответствующими отдельным работам.

Работа может начинаться при выполнении следующих условий: имеются необходимые промежуточные результаты, полученные при выполнении других работ и имеются в необходимом количестве свободные (т.е. не занятые в других работах ресурсы). Последовательность получения промежуточных результатов учитывается при построении функции переходов (так же, как и в классических сетевых моделях).

Для учёта наличия ресурсов будем использовать аппарат профилей загрузки ресурсов, широко применяющийся в планировании [1]. Профиль загрузки ресурса $Res_i(t)$ показывает наличие свободных ресурсов вида i в произвольный момент времени t . Его значение равно разности между максимальным количеством единиц ресурса данного вида и количеством единиц ресурса, занятых в различных работах, а также находящихся в ремонте в данный момент времени. Работа w может начинаться при условии

$$\begin{aligned} & \left(Res_i(t_w^{нач}) \geq r_{iw} \right) \wedge \left(Res_{i+1}(t_w^{нач}) \geq r_{i+1.w} \right) \wedge \\ & \dots \wedge \left(Res_N(t_w^{нач}) \geq r_{Nw} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

где r_{iw} – количество ресурсов вида i , необходимых для выполнения работы w ; $t_w^{нач}$ – время начала работы w .

Выполнению работы w должна предшествовать проверка условия (3).

Рассмотрим модель выполнения отдельной работы, представленную в виде диаграммы состояний автомата. Модель представлена на рис. 1

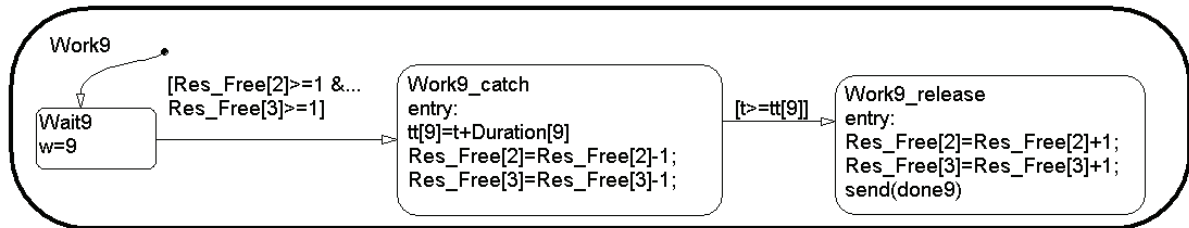


Рисунок 1 - Модель отдельной работы

В начале активным становится состояние *Wait*, в котором система находится, ожидая освобождения нужных ресурсов. После того, как будут выполнены условия, заданные выражением (3), осуществляется, активизируется состояние *Work_catch*, что означает начало выполнения работы. При входе это в состояние выполняется захват ресурсов. Значение профиля свободных ресурсов уменьшается на величину ресурсов, необходимых для данной работы. Одновременно вычисляется момент окончания работы (продолжительность работы, заданная параметром *Duration*, прибавляется к текущему значению времени). Система ожидает наступления момента окончания работы, после чего переходит к состоянию *Work_release*. При входе в это состояние выполняется освобождение захваченных ресурсов (восстанавливаются значения профилей свободных ресурсов) и генерируется событие завершения работы *done*, необходимое для синхронизации с другими работами.

Современные модели теории автоматов допускают использование сложных состояний. Фактически сложное состояние представляет собой модель процесса, описанного вложенной диаграммой. Использование сложных состояний позволяет строить модели процессов, имеющих иерархическую структуру, путём декомпозиции их на подпроцессы и построения моделей этих подпроцессов.

Модель, представленная на рис. 1, представляет собой сложное состояние, которое может быть элементом какой-либо сложной модели, описывающей этап проекта или проект в целом.

Теперь рассмотрим моделирование комплекса работ.

Моделирование последовательных процессов не вызывает особых трудностей. Однако для моделирования параллельных процессов возможностей классических детерминированных конечных автоматов недостаточно. Для этого необходимо использовать недетерминированные автоматы, которые допускают наличие одновременно нескольких активных состояний. Результатом функции переходов для недетерминированного автомата является не отдельное состояние, как в формуле (2), а множество состояний

$$r(\{q_{s-n}, \dots, q_{s-1}\}, e_j) = \{q_s, \dots, q_{s+m}\}, \text{ для } \{q_{s-n}, \dots, q_{s+m}\} \in Q, r \in R, e_j \in E. \quad (4)$$

В случае использования недетерминированных автоматов могут возникнуть сложности с корректной обработкой перехода к работам, следующим вслед за параллельным процессом. С этой целью следует использовать события, которые генерируются по окончании каждой из работ. Следующая работа должна начинаться только после получения всех необходимых для синхронизации событий.

На рис. 2 представлена модель проекта создания приборостроительного изделия, представленная в виде недетерминированного гибридного автомата.

Проект включает 12 этапов: 1) технико-экономическое обоснование; 2) разработка и согласование ТЗ; 3) патентные исследования; 4) определение состава комплекса технических средств; 5) разработка схем электрических принципиальных и чертежей; 6) формирование заказов на покупные комплектующие изделия; 7 – 9) монтаж отдельных блоков и изделия в целом; 10) испытания; 11) разработка эксплуатационной документации; 12) приёмо-сдаточные испытания. Проект рассчитан на 15 недель.

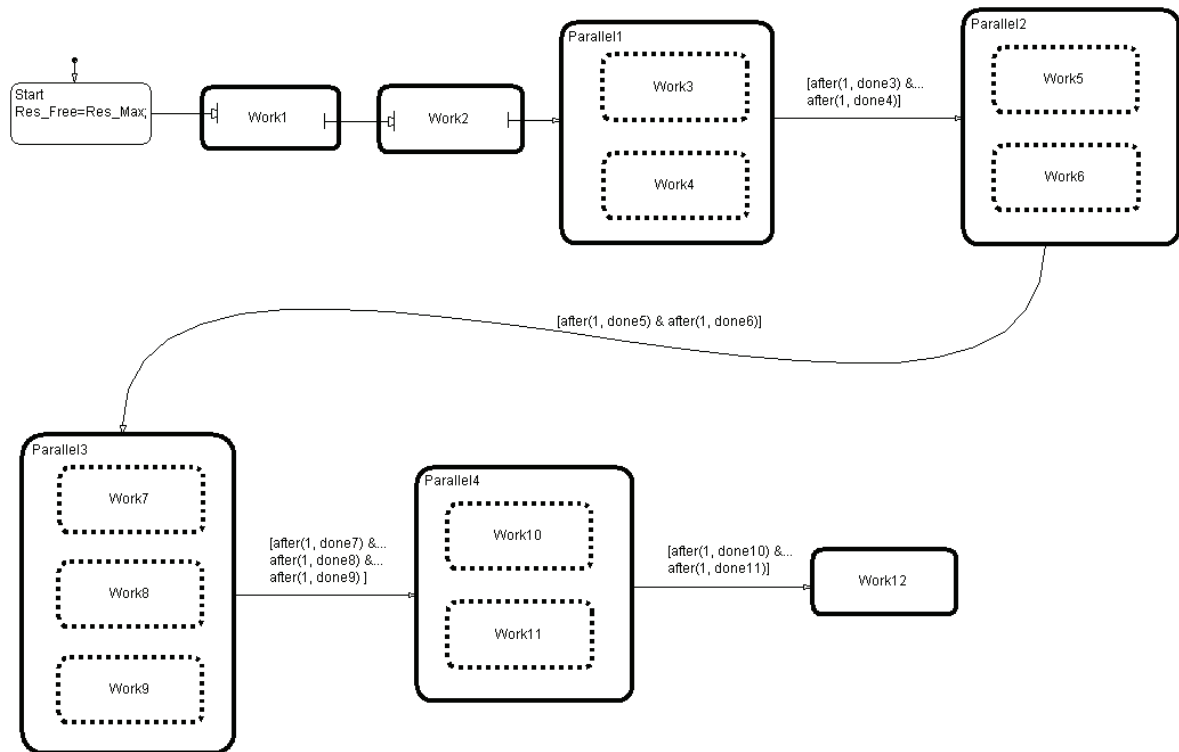


Рисунок 2 - Модель проекта создания приборостроительного изделия

При выполнении проекта используется 4 вида оборудования: компьютеры, осциллографы; монтажные столы; испытательный стенд.

Каждый из этапов представлен вложенной моделью, аналогичной той, что представлена на рис. 1. Данные этапы являются довольно крупными. При необходимости дальнейшей детализации моделей можно использовать более сложные модели с несколькими уровнями декомпозиции дерева работ.

Ряд этапов может выполняться параллельно. Всего имеется 4 параллельных процесса.

Для синхронизации параллельных процессов используются события *done3*, ..., *done11*, которые генерируются по окончании каждой из работ. Переход к следующей работе осуществляется после получения событий завершения каждой из предшествующих параллельных работ.

После выполнения имитационного моделирования мы можем получить сроки начала и окончания каждой из работ и проекта в целом, а также профили загрузки ресурсов. Профили загрузки для всех четырёх видов оборудования показаны на рис. 3.

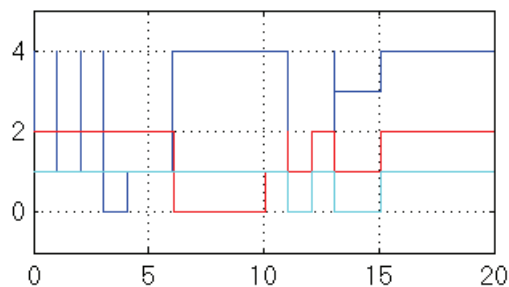


Рисунок 3 - Профили загрузки ресурсов проекта

Отметим, что полученная модель внешне похожа на обычные сетевые модели с работами в узлах. Применение графической нотации для описания состояния проекта позволяет сохранить наглядность, свойственную сетевым моделям, а также упрощает процесс построения и проверки модели.

Моделирование отказов ресурсов. Представленные выше результаты, полученные при моделировании выполнения проекта, могли быть получены и традиционными методами, основанными на сетевом планировании. Ценность моделей теории автоматов состоит в том, что мы можем вводить в модель действия и события, не связанные непосредственно с данным проектом, но влияющие на его выполнение. Можно построить модели, описывающие одновременное выполнение нескольких проектов, а также процессы приобретения, продажи или утилизации ресурсов, процессы поломки ресурсов и т.д. Эти модели, функционируя параллельно с основной, позволят более точно описать условия выполнения проекта и повысить адекватность модели и достоверность получаемых результатов.

В качестве примера рассмотрим модель отказов оборудования, задействованного в проекте. Она представлена диаграммой состояний, представленной на рис. 4.

Модель включает два параллельных сложных состояния *Break1* и *Repair1*, осуществляющих моделирование процесса отказов и процесса ремонта. Отказ приводит к временному уменьшению количества свободных ресурсов определённого вида. В случае отказа должно приостанавливаться выполнение уже начатых работ. Однако это существенно усложняет модель. Поэтому примем предположение, если отказ привёл к тому, что в наличие нет свободных ресурсов, начатые работы завершаются, а новые не начинаются до тех пор, пока отказ не будет ликвидирован. При относительно небольшой продолжительности работ сделанное предположение не существенно

снижает точность результатов и не приводит к потере актуальности модели. Если же даже после отказа свободные ресурсы остаются в достаточном количестве, выполнение работ продолжается. При моделировании используются генераторы случайных чисел, задающие случайные промежутки времени между отказами оборудования (переменная $tx1$) и продолжительность ремонта (переменная $tq1$). Значения указанных переменных в ходе моделирования изменяются случайным образом.

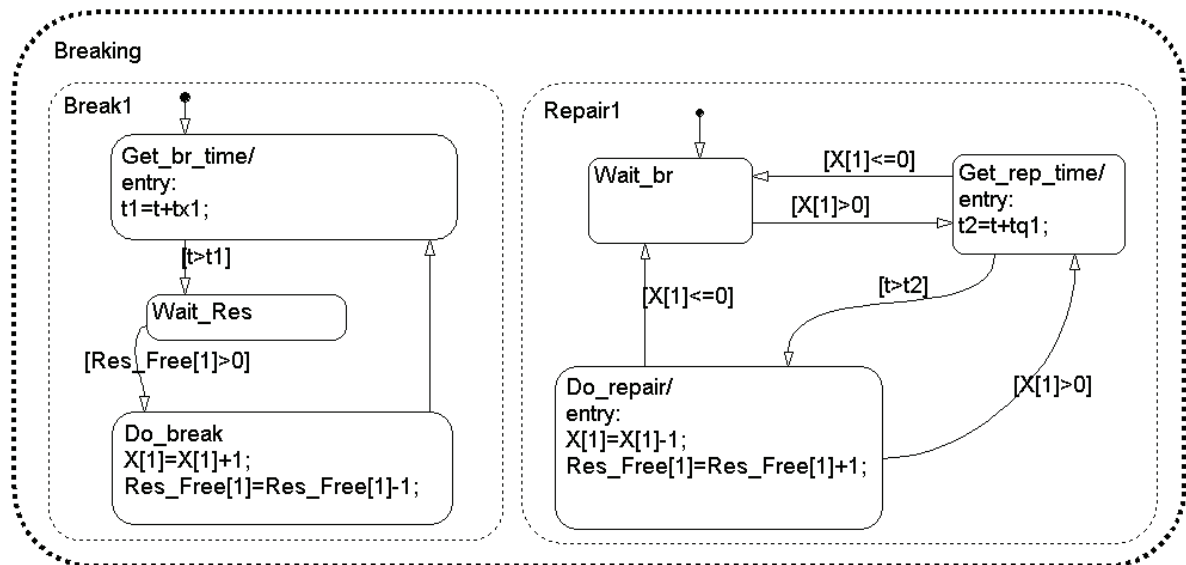


Рисунок 4 - Модель процесса отказов оборудования

Диаграмма *Break1* описывает процесс отказов. При активизации состояния *Get_br_time* вычисляется момент наступления следующего отказа. По достижении этого момента активным становится состояние *Wait_Res*. Выполняется проверка наличия свободных ресурсов (это позволяет избежать необходимости моделирования перерывов в выполнении уже начавшихся работ). Как только свободный ресурс появляется, активизируется состояние *Do_break* и наступает отказ: увеличивается значение переменной X , показывающей количество неисправного оборудования, и уменьшается значение профиля свободных ресурсов Res_Free . После чего вновь активизируется состояние *Get_br_time* и процесс повторяется.

Диаграмма *Repair1* описывает процесс ремонта. Состояние *Wait_br* остаётся активным до тех пор, пока в системе нет отказавшего оборудования. Когда появляется отказ, активизируется состояние *Get_rep_time*, при входе в которое вычисляется момент

окончания ремонта. По достижении этого момента активным становится состояние *Do_repair*, в котором осуществляется моделирование ремонта: уменьшается количество неисправного оборудования и увеличивается значение профиля свободных ресурсов: отремонтированное оборудование вновь может использоваться при выполнении проекта. Если ещё есть неисправное оборудование, вновь активизируется состояние *Get_rep_time* и вычисляется момент окончания следующего ремонта. Если неисправного оборудования нет, система возвращается в состояние *Wait_br*, в котором находится до наступления следующего отказа.

Модели, показанные на рис. 2 и 4 функционируют параллельно. Таким образом удаётся осуществить моделирование процесса выполнения проекта с учётом риска отказов оборудования.

На рис. 5 показаны профили загрузки ресурсов проекта с учётом отказов оборудования, полученные путём совместного имитационного моделирования моделей выполнения проекта и отказа оборудования. Очевидно, что они существенно отличаются от профилей, показанных на рис. 3, и соответствовавших «идеальным» условиям выполнения проекта.

Можно сделать вывод, что отказы оборудования существенно влияют на выполнение проекта, и планы, построенные с учётом данного риска, будут в большей степени соответствовать действительности. Продолжительность проекта также увеличилась и достигла 17 недель.

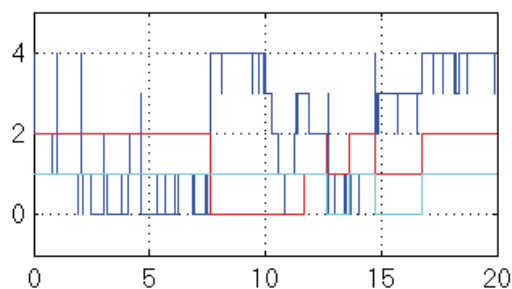


Рисунок 5 - Профили загрузки ресурсов проекта с учётом отказов оборудования

Отметим, что моделирование отказов оборудования не потребовало внесения изменений в основную модель, описывающую проект.

В дальнейшем мы можем наращивать модель, добавляя в неё диаграммы, соответствующие различным процессам. Традиционные модели сетевого планирования такой возможности не предоставляют.

Совместное моделирование нескольких проектов, использующих одни и те же ресурсы, так же не представляет большой сложности. Эту задачу предполагается рассмотреть в дальнейшем.

Заключение

Работа посвящена применению моделей, построенных в математическом аппарате теории автоматов для моделирования процессов выполнения проекта. Обосновано применение для этой цели недетерминированных гибридных автоматов, которые имеют более широкие возможности, чем традиционные методы сетевого планирования.

Построены модели отдельной работы и комплекса работ на примере проекта по созданию приборостроительного изделия. Рассмотрена также задача моделирования отказов оборудования при выполнении проекта. Построена соответствующая модель, которая может функционировать параллельно с основной моделью проекта. Это позволяет повысить адекватность моделей выполнения проекта за счёт учёта рисков отказа ресурсов и других факторов.

Выполнено имитационное моделирование. Результаты моделирования могут использоваться при решении задач календарного планирования проекта, а также распределения ресурсов. Предложенная модель может применяться менеджером проекта для построения детального календарного плана проекта и согласования его с планами операционной деятельности предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов В.С. Проектное управление: модели и методы принятия решений // Менеджмент в России и за рубежом. – 1998, № 6. – С. 105 – 139.
2. Модели управления научно-техническим прогрессом на предприятии. / Н.Б. Мироносецкий, Л.В. Кирина, С.А. Кузнецова и др. – Новосибирск: Наука, СО, 1988. – 153 с.
3. Цхай С.М. Задачи календарного планирования на сети сложной структуры. – Новосибирск, Изд-во Новосиб. ун-та, 1991. – 148 с.
4. Костина Л.П. Метод критического пути в многопроектных разработках с учётом ресурсов // Экономика и математические методы. – 1998. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 140 – 149.

5. Малый В.В., Климова Т.А., Яшина Е.С. Моделирование проектов развития предприятия с использованием математического аппарата гибридных автоматов // Збірник наукових праць ХУПС. – Х: ХУПС, 2007, Вип. 1 (23). – С. 117 – 120.
6. Згуровский М.З., Денисенко В.А. Дискретно-непрерывные системы с управляемой структурой. – Киев: Наукова думка, 1988. – 350 с.
7. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование динамических систем. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
8. Хопкрофт Дж.Э., Мотвани Р., Ульман Дж.Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 528 с.

Получено 07.06.2007 г.