

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ СРОКОВ ДИНАМИЧЕСКИ ФОРМИРУЕМОГО ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

**Аксенов К.А., Ван Кай, Рыжкова Н.Г., Аксенова О.П.**

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: wiper99@mail.ru*

---

В статье рассматриваются задачи строительного холдинга, связанные с планированием сроков реализации проекта при использовании ресурсов компании для нескольких возводимых объектов. Современные методы анализа и динамического моделирования бизнес-процессов часто сталкиваются с объектами, в которых количество элементов составляет сотни, а то и тысячи. Производственные и бизнес-процессы, организационно-технические системы относятся к процессам преобразования ресурсов. Для моделирования таких объектов требуется все больше вычислительных ресурсов и машинного времени. В связи с этим является актуальным выявление и использование новых принципов построения и анализа мультиагентных моделей процессов преобразования ресурсов. С применением продуктов семейства BPsim была разработана имитационная модель строительного холдинга China Wan Bao Engineering Corp. Модель строительного холдинга «Wan Bao» состоит из 128 операций, 90 ресурсов, 11 агентов (задача строительства 5 многоэтажных зданий). Метод мультиагентного планирования портфеля проектов основан на интеграции мультиагентной модели процесса преобразования ресурсов, операционного анализа вероятностных сетей, метода критического пути и метода PERT.

---

Ключевые слова: мультиагентное моделирование, планирование, проект, портфель проектов, PERT.

## **MULTI AGENT SIMULATION AND PROBABILISTIC APPROACH APPLICATION FOR DYNAMIC PORTFOLIO SCHEDULING IN CONSTRUCTION**

**Aksyonov K.A., Wang Kai, Ryzhkova N.G., Aksyonova O.P.**

*Ural Federal University named after First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002, Ekaterinburg, street Mira, 19), e-mail: wiper99@mail.ru*

---

In this work is considered the building company scheduling tasks for deployment of several buildings. Current methods of analysis and dynamic simulation of business processes frequently face the objects that contain hundreds and even thousands of elements. Industrial and business processes can be defined as multi-agent resources conversion processes. Simulation of such objects constantly requires more and more computational resources and processing time. Due to this an important problem emerges – a problem of detection and application of new approaches to analysis and improvement of multi-agent models of resources conversion process. Simulation model of construction corporation “China Wan Bao Engineering Corp.” has been designed with BPsim tools. The model consists of 128 operations, 90 resources, 11 agents for construction of 5 buildings. Method of multi agent scheduling of projects portfolio base on multi agent resources conversion process model, operation analysis of probability networks, Critical Path Method (CPM) and Project Evaluation and review Technique (PERT).

---

Key words: multi-agent simulation, scheduling, project, portfolio, PERT.

### **Введение**

Планирование сроков проекта и отдельных работ является неотъемлемым элементом организации строительного производства. Определение сроков всего проекта зависит от суммы средств, выделяемых на строительство, интересов заказчика, возможностей строительной организации. Для руководства строительной компании на этапе заключения договора с заказчиком важно определить сроки, в которые компания действительно может реализовать проект, чтобы избежать штрафных санкций и дополнительных расходов. В

дальнейшем при возведении объекта необходим мониторинг сроков выполнения отдельных работ и корректировка дальнейших этапов с учетом изменения возможного времени, объема ресурсов, определения соотношения используемых ресурсов.

### **Мультиагентная модель строительного холдинга**

С применением системы BPsim.MAS ([www.bpsim.ru](http://www.bpsim.ru)) была разработана имитационная модель (ИМ) строительного холдинга CHINA WANBAO ENGINEERING Corp. (BEIJING XIANGFU.LTD), которая состоит из 128 операций, 90 ресурсов, 11 агентов (задача строительства многоэтажных зданий). Для устранения «узких мест» было проведено совершенствование мультиагентной модели с помощью реинжиниринга и применения процедур свертки/развертки модели [1].

Применение процедур свертки/развертки обеспечило проведение анализа загрузок цепочек операций и построение параллельных веток операций к цепочкам, загрузка которых превышает допустимую (возникают очереди). Реинжиниринг операций позволил снять их перегрузку и сократить общее время выполнения. Данные экспериментов исходной модели согласуются со статистикой работы холдинга «Wan Bao» [1-2; 6].

Для анализа и совершенствования плана (поиска более эффективного плана) используется метод мультиагентного планирования строительных работ [1], основанный на интеграции следующих подходов: мультиагентной модели процесса преобразования ресурсов [4], операционного анализа вероятностных сетей [6; 8-9], технологии программных агентов субподряда [3] и метода критического пути [7].

### **Интеграция метода PERT с мультиагентным имитационным моделированием**

С целью оценки математического ожидания и дисперсии времени реализации всего проекта с учетом воздействия на строительные работы различных внешних и внутренних факторов был использован метод PERT [7; 10]. Метод PERT ориентирован на анализ проектов, для которых продолжительность всех или некоторых работ не удается определить точно. Применение метода позволяет получить оценки [5]:

- 1) ожидаемого времени выполнения работы;
- 2) ожидаемого времени выполнения проекта;
- 3) значения вероятности, с которой проект может быть выполнен за указанное время.

Для определения указанных выше числовых характеристик этапа работ (работы  $j$ ) были определены путем проведения имитационных экспериментов с двумя моделями субподряда [2] три временные оценки:

$t_o$  – оптимистическая оценка продолжительности работы  $j$ , рассчитывается для случая, когда условия проведения работы наиболее благоприятные [5; 7]. В контексте модели

строительства данную оценку получаем с помощью имитационной модели «Субподряд 2» (в модели «Субподряд 2» на каждом последующем такте происходит пересмотр возможности отказа от привлечения субподряда [2]), в условиях средней загрузки строительного холдинга;

$t_n$  – пессимистическая оценка длительности работы  $j$ , определяется для случая, когда процесс развивается по наиболее неудачной схеме [5; 7]. Данную оценку получаем с помощью имитационной модели «Субподряд» (в модели «Субподряд» чужие средства привлекаются в случае нехватки своих средств на выполнение всей операции от ее начала и до ее окончания [2]), в условиях, соответствующих ситуации максимальной загрузки строительного холдинга;

$t_{не}$  – наиболее вероятная продолжительность работы  $j$ , которая учитывает нормальный ход событий [5; 7]. Данную оценку получаем с помощью имитационной модели «Субподряд» [2], в условиях средней загрузки строительного холдинга.

Распределение фактической длительности выполнения работы описывается  $\beta$ -распределением [10]. Согласно [7] для подмножества критических работ  $S$  вычисляются доверительные границы длительности проекта по следующей формуле [7]:

$$T_{C,S} = \sum_{j \in S} (t_e)_j \pm K \sqrt{\sum_{j \in S} (v_e)_j},$$

где  $t_e$  – математическое ожидание для  $\beta$ -распределения  $t_e = (t_o + 4t_{не} + t_n)/6$ ;  $K$  – константа, зависящая от степени достоверности ( $K = 3$  для степени достоверности 99,7%,  $K = 2$  для степени достоверности 95%);  $v_e$  – дисперсия для  $\beta$ -распределения  $v_e = [(t_n - t_o)/6]^2$ .

### **Задача планирования экспериментов для оценки возможности строительства дополнительного объекта**

Условия работы и ресурсный потенциал рассматриваемой компании накладывают ограничение на количество одновременно возводимых зданий – параллельно реализуются, как правило, 4 объекта. Задача заключается в моделировании, анализе полученных результатов и выводе о возможности и целесообразности для принятия решения о начале строительства пятого объекта. Для ее решения необходимо учитывать возможные стадии реализации уже осуществляемых проектов, их масштаб и замещение завершаемых объектов вновь поступающими.

С учетом специфики проектов существенными для анализа являются 3 стадии строительства: подготовка территории и закладывание фундамента; возведение стен и строительство крыши; отделочные работы. Компания специализируется на строительстве двух видов зданий – бизнес-центры и жилые здания. Рассмотрим возможные ситуации на момент возникновения необходимости принятия решения о возведении нового пятого объекта.

Для определения общего количества возможных ситуаций воспользуемся формулами комбинаторики. Всего 4 объекта, каждый из которых может реализовываться на одной из трех выделенных стадий, обозначим их 1, 2, 3 (примем обозначения *n* – начальная стадия, *c* – средняя стадия, *k* – конечная стадия). Следовательно, элементами пространства элементарных исходов данного опыта являются комбинации 1 1 1 1 (реализация всех объектов осуществляется на первой стадии), 1 1 1 2 (три объекта реализуются на первой стадии, один на второй), и т.д. Причем исходы 1 1 1 2, 1 1 2 1, 1 2 1 1, 2 1 1 1 идентичны, т.к. описывают одну и ту же ситуацию – три объекта реализуются на первой стадии, один на второй, т.е. порядок в наборах не важен. Это означает, что производится выбор из трех элементов (стадий) четыре раза (для описания 4-х объектов) без упорядочения с повторениями (в исходе 1 1 1 2 первая стадия «повторяется» 3 раза). Для подсчета общего количества исходов воспользуемся формулой сочетаний с повторениями:

$$\bar{C}_3^4 = C_{3+4-1}^4 = C_6^4 = \frac{6!}{4!2!} = 15$$

Эти исходы перечислены ниже.

1 1 1 1

Все объекты находятся на первой стадии строительства

1 1 1 2

1 1 1 3

1 1 2 2

1 1 2 3

1 1 3 3

1 2 2 2

1 2 2 3

1 2 3 3

1 3 3 3

2 2 2 2

2 2 2 3

2 2 3 3

2 3 3 3

3 3 3 3

Все объекты находятся на последней стадии строительства

При данном подходе рассматриваются только стадии объектов. Введем еще один параметр, отражающий реальные условия деятельности анализируемой компании – тип объектов строительства. Для этого расширим множество, описывающее стадии строительства отдельных объектов путем указания типа здания (бизнес-центр или жилое здание):

1б, 2б, 3б – здание бизнес-центра, находящееся соответственно на первой, второй или третьей стадии строительства;

1ж, 2ж, 3ж – здание жилое, находящееся соответственно на первой, второй или третьей стадии строительства.

Строительство бизнес-центра требует больше времени и ресурсов по сравнению с жилым зданием. Исходом в данном опыте будет, например, комбинация 1б 2б 3ж 3ж – один из бизнес-центров находится на первой стадии строительства, другой бизнес-центр – на второй стадии, два объекта жилых зданий – на третьей. В данном случае общее количество исходов будет равно

$$\bar{C}_6^4 = C_{6+4-1}^4 = C_9^4 = \frac{9!}{4!5!} = 126$$

Проведения полученного количества экспериментов требует больших временных и ресурсных затрат. С целью выявления наиболее реалистичных ситуаций был проведен дополнительный анализ деятельности холдинга, показавший, что из всего количества одновременно возводимых объектов не более двух бизнес-центров, т.е. исходы вида 1б 1б 1б 1б, 2ж 1б 1б 1б и т.д. невозможны. В этом случае для подсчета общего количества исходов выделим следующие подмножества:

1) все 4 здания жилые. Так как в этом случае исходы отличаются только стадиями объектов, то для данного пункта общее количество исходов было рассмотрено выше

$$\bar{C}_3^4 = 15 ;$$

2) среди объектов 1 бизнес-центр и 3 жилых здания. Так, для одной и той же ситуации в части трех жилых зданий возможны три комбинации с учетом стадий 4-го объекта – бизнес-центр. Например, 1ж 1ж 1ж (3 жилых здания находятся на первой стадии строительства) результирующими комбинациями будут являться: 1с 1с 1с 1в, 1с 1с 1с 2в, 1с 1с 1с 3в. Количество всех возможных комбинаций для трех зданий средней этажности:

$$\bar{C}_3^3 = C_{3+3-1}^3 = C_5^3 = 10$$

Каждая часть расширяется тремя вариантами (стадиями) для четвертого объекта высокой этажности. В результате получаем количество исходов, равное  $10 \cdot 3 = 30$ .

3) среди объектов 2 бизнес-центра и 2 жилых здания. В этом случае для двух пар объектов средней и высокой этажности возможны различные комбинации по стадиям. Таким

образом, их количество равно  $\bar{C}_3^2 \cdot \bar{C}_3^2 = (C_4^2)^2 = \left(\frac{4!}{2!2!}\right)^2 = 36$ .

Следовательно, общее количество комбинаций с учетом не более 2 возводимых объектов высокой этажности равно  $15 + 30 + 36 = 81$ .

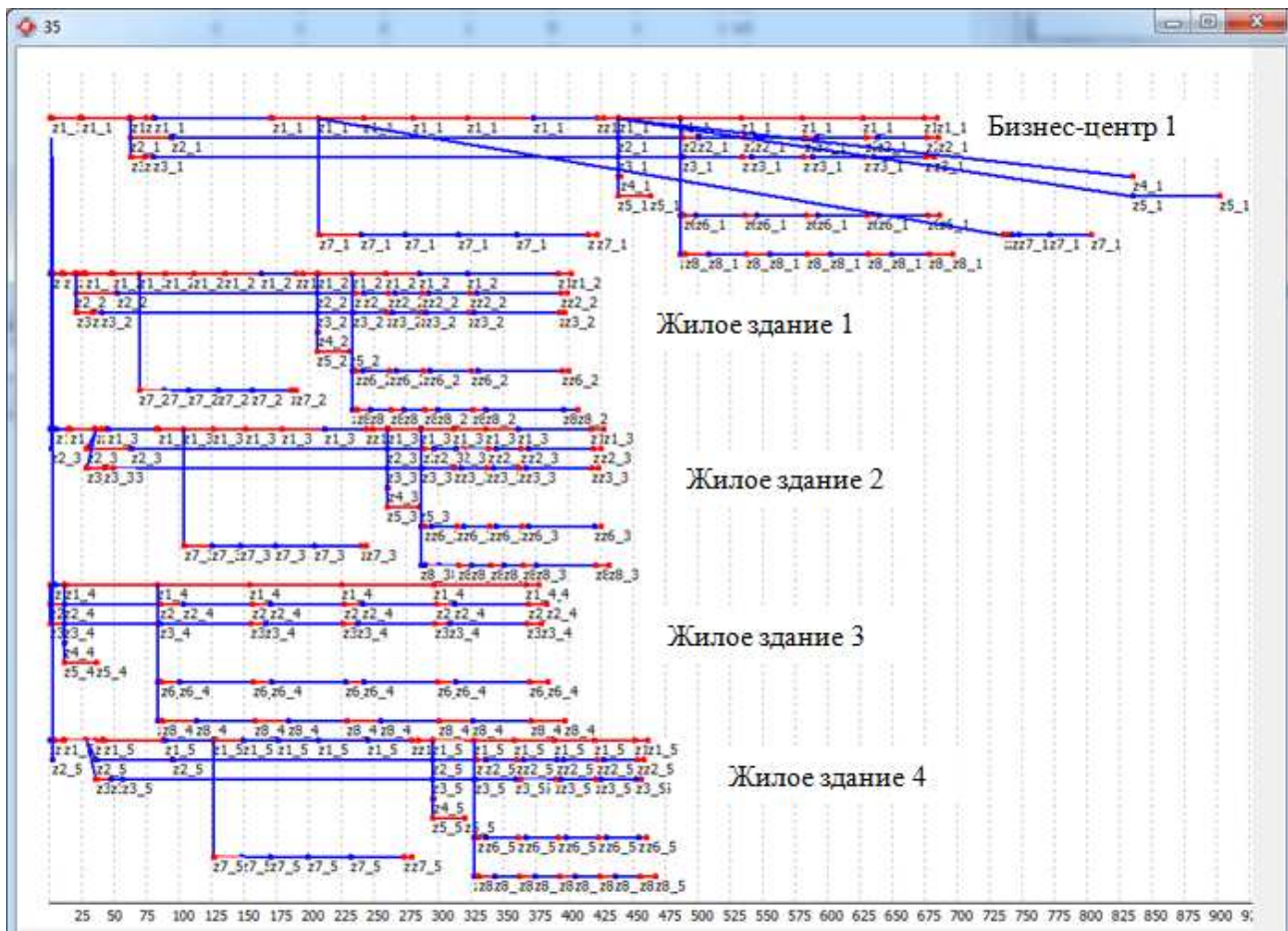
Следующий аспект деятельности компании, который влияет на сроки и окупаемость портфеля проекта, это – привлечение услуг сторонних компаний и индивидуальных

предпринимателей для выполнения части работ. На основе проведенного анализа были выделены две модели субподряда [2]. Тогда в условиях применения каждой из моделей субподряда возможен 81 вариант для этапов и масштабности возводимых объектов, следовательно, их общее количество увеличивается в 2 раза:  $81 \cdot 2 = 162$ . Новый пятый объект также может быть двух видов – высокой или средней этажности, и реализовываться в условиях одной из двух моделей субподряда. Таким образом, общее количество возможных ситуаций  $162 \cdot 2 = 324$ .

Для полноты эксперимента нужно учесть, что завершающиеся объекты переходят в новые. В противном случае получается ситуация, когда все ресурсы используются для уменьшающегося количества объектов, что не соответствует реальной ситуации – помимо нового объекта, параллельно должны возводиться 4 здания.

### **Программная реализация метода мультиагентного имитационного планирования строительных работ**

Метод мультиагентного планирования строительных работ [1] программно поддерживается с помощью комплекса программ семейства BPsim ([www.bpsim.ru](http://www.bpsim.ru)). Для системы динамического моделирования ситуаций BPsim.MAS был разработан программный модуль планирования экспериментов и анализа результатов экспериментов. На рис. 1 показано средство визуализации сетевой модели портфеля проектов (объектов строительства).



**Рис. 1. Средство визуализации сетевой модели портфеля 5 объектов строительства.**

С помощью мультиагентной имитационной модели строительного холдинга и комплексов программ VPSim была проведена оценка математического ожидания (1503 дня) и дисперсии (96 дней) на основе ситуации холдинга «Wan Bao» и исходных данных 2006 года, в условии появления нового (пятого) объекта строительства.

### **Заключение**

Применение мультиагентного имитационного моделирования и метода PERT позволило дополнить оценкой доверительных границ длительности работ метод мультиагентного планирования. Эффект от внедрения составляет 4,6 млрд юаней.

**Исследования поддержаны грантом РФФИ №12-07-31045.**

### **Список литературы**

1. Аксенов К.А., Аксенова О.П., Ван Кай Планирование портфеля проектов в строительстве на основе мультиагентного имитационного моделирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2012. – № 6 (162). – С. 171-174.

2. Аксенов К.А. [и др.] Применение мультиагентной системы принятия решений в управлении строительным холдингом // Вестник УрФУ. Серия «Экономика и управление». – 2012. – № 5. – С. 106-117.
3. Аксенов К.А. [и др.] Разработка и применение системы поддержки принятия решений в управлении строительным холдингом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2011. – № 4 (128). – С. 53-60.
4. Аксенов К.А. Модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов и системный анализ организационно-технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 6. – С. 38-45.
5. Афанасьев М.Ю., Багриновский К.А., Матюшок В.М. Прикладные задачи исследования операций. – М. : ИНФРА-М, 2006. – 352 с.
6. Ван Кай [и др.] Использование аппарата операционного анализа вероятностных сетей для определения среднего количества приборов обслуживания мультиагентной модели // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/103-6290> (дата обращения: 22.05.2012).
7. Исследование операций / под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М. : Мир, 1981. – Т. 2. – 677 с.
8. Литвин В.Г., Аладышев В.П., Винниченко А.И. Анализ производительности мультипрограммных ЭВМ. – М. : Финансы и статистика. – 1984. – 159 с.
9. Томашевский В., Жданова Е. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М. : Бестселлер, 2003. – 416 с.
10. Clark С.Е. The PERT Model for Distribution of an Activity Time // Operations Res. – 1962. – № 10. – Р. 405-406.

**Рецензенты:**

Поршнеv Сергей Владимирович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиоэлектроники информационных систем, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Доросинский Леонид Григорьевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных технологий, ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.