

УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИМИТАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

А.В. КЛИМЕНКО

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
Советская, 104, Гомель, 246028, Беларусь*

*Поступила в редакцию 7 февраля 2012*

Приводятся теоретическое обоснование и технология применения динамических имитационных моделей для анализа функционирования вероятностных производственных систем. Предложена методика решения задач проектного моделирования рациональной структуры технологического цикла при наличии элементов потенциально опасного производства.

*Ключевые слова:* имитационные модели, вероятностные производственные системы, анализ функционирования, средства автоматизации моделирования, технология применения.

### Введение

Объектом исследования в работе являются производственные системы с вероятностными параметрами функционирования при наличии условий потенциальной техногенной опасности и их математические модели [1].

Управление производственной системой в контексте данной работы понимается в смысле упреждения конфликтных ситуаций в функционировании вероятностного технологического процесса. Упреждение достигается с помощью сопряженного аппаратно-программного комплекса, состоящего из средств аппаратного сопряжения с производственной системой и параллельно действующей ЭВМ.

Для разработки алгоритмических моделей управляемых производственных систем (УПС) используются следующие процедуры.

1. Декомпозиция технологического цикла по уровням иерархии технологических операций при детальном представлении алгоритма имитации компонентов.

2. Использование библиотеки агрегатов, состоящей из ограниченного числа типов агрегатов, с помощью которой при изменении состава параметров агрегатов возможно представление любой структуры технологического цикла.

3. Параметризация имитационных моделей, позволяющая проектировщику выполнять компоновку модели из ограниченного состава агрегатов в различных вариантах организации технологического цикла. В состав параметров входят параметры настройки на конфигурацию и параметры для постановки серии имитационных экспериментов.

Для описания динамики проектирования структуры технологического цикла используется представление УПС в виде вероятностного сетевого графика (ВСГР). При реализации предложенного автором подхода используется разработанная в составе авторского коллектива объектно-ориентированная среда проектного моделирования GraphModel.

Проектное моделирование структуры УПС осуществляется многократно экспертом-технологом по единой технологии. Используя функциональные возможности разработанной объектно-ориентированной среды, эксперт-технолог составляет содержательное описание технологического процесса производства.

Как правило, выполняется следующая последовательность действий: определяются управляющие переменные, выбирается состав контролируемых характеристик, детализируется режим функционирования технологического цикла, определяется технологическая схема УПС с учетом описания внешней среды. С использованием объектно-ориентированной среды GraphModel в автоматическом режиме составляются таблицы коммутации операций и последовательность их выполнения. Список запросов ресурсов для выполнения каждой технологической операции формируется в процессе моделирования в интерактивном режиме и фиксируется в базе данных имитационных моделей для дальнейшей обработки.

### **Методика решения задач проектного моделирования вероятностных производственных систем**

Для принятия проектных решений необходимо, прежде всего, определить цели исследования управляемых производственных систем. Реализация этого шага требует выполнения следующих действий:

- определения критериев качества функционирования технологического цикла;
- определения задач исследования УПС с помощью имитационных моделей;
- конкретизации обобщенного критерия качества для решения поставленных задач исследования.

На данном этапе разработки программного инструментария в качестве задач исследования рассматривались следующие:

- выбор рационального набора технологических процессов из множества выполняемых на данном предприятии по критериям минимальной стоимости их реализации и максимальной стоимости выпускаемой продукции предприятия;
- определение пропускной способности управляемой производственной системы для используемого состава оборудования, набора ресурсов и списка исполнителей;
- оценка снижения пропускной способности оборудования предприятия при заданных вероятностях выполнения ремонтных работ, возникновения аварийных ситуаций из-за некачественного ремонта при использовании изделия после его проведения;
- нахождение «узких мест» технологического цикла производства из-за сбоев оборудования и дополнительных затрат на ликвидацию отказов оборудования;
- определение математических ожиданий и дисперсий интегральных откликов расхода ресурсов, материалов, комплектующих и оборудования.

При проектном моделировании структуры технологического цикла УПС используется метод экспертных оценок. В процессе проектирования вводятся функции распределения запросов ресурсов для каждой технологической операции, устанавливаются диапазоны изменения запросов ресурсов и параметров моделирования. При этом выделяются три типа переменных: функционирования компонентов модели УПС, используемые в качестве исходной информации для «запитки» моделей; эталоны поведения ветвей технологического при верификации алгоритмов модели; характеристики сравнения проектируемых структур при проверке адекватности модели.

Перевод формального описания УПС в имитационную модель [2] осуществляется на основе формируемой в интерактивном режиме базы данных элементов модели и библиотек агрегатов-компонентов имитационных моделей [3].

Таким образом, использование объектно-ориентированной среды GraphModel при проектном моделировании оптимальной структуры технологического цикла управляемых производственных систем позволяет отделить задачу проектирования от методов и средств определения оптимальных параметров технологического цикла с последующим вынесением таких методов в соответствующую базу знаний.

### **Пример задачи оптимизации структуры технологического цикла на имитационной модели вероятностной производственной системы**

В соответствии с тестовым примером проведено составление технологической схемы реализации (ТСП) производственного цикла группой экспертов предприятия и специалистов в

области прикладной математики для обеспечения достоверного описания взаимодействия этапов производственного процесса с течением времени его реализации.

Технологическая схема реализации содержит описание элементов процесса, условия и параметры их взаимодействия. Эти данные служат исходной информацией для построения исходной математической модели, которая является отображением технологической схемы вероятностного технологического процесса производства. Установлено, что реализация предложенной методики исследования вероятностных производственных систем (ВПС) достигается последовательностью следующих двенадцати шагов.

Шаг 1. Составление технологической схемы реализации для выполнения  $h$ -го варианта организации ВПС множеством технологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$ . Технологическая схема реализации содержит описание элементов процесса, условия и параметры их взаимодействия.

Шаг 2. Подготовка исходной информации для имитационного моделирования  $h$ -го варианта ВПС в виде двух таблиц.

1. Таблица запросов ресурсов предприятия множеством технологических операций ( $\{MTXO_{ij}\}$ ), элементами которой являются:

- количество устройств всех типов оборудования индивидуального пользования  $\{n_{1r1ij}\}$ ;
- количество типов ресурсов индивидуального пользования  $\{n_{3r3ij}\}$ ;
- количество исполнителей ( $n_{5ij}$ );
- количество бригад исполнителей ( $n_{6ij}$ ).

Запросы ресурсов  $MTXO_{ij}$ , имеющих вероятностную природу, задаются с помощью соответствующих функций распределения:

- времени и стоимости выполнения операций  $F_{1ij}(\tau)$  и  $F_{2ij}(s)$ ;
- расхода комплектующих изделий и материалов  $\{F_{3r3ij}(ko)\}$  и  $\{F_{4r4ij}(mt)\}$ .

2. Таблица надежностных характеристик оборудования.

Из-за возможных отказов  $k$ -го устройства оборудования дополнительно задаются характеристики надежности его функционирования в виде таблицы функций распределения вероятностей значений времени:

- безотказного функционирования  $\Phi_{1k}(\tau_{BO})$ ;
- восстановления работоспособности  $\Phi_{2k}(\tau_{VO})$ ;
- ликвидации аварий оборудования  $\Phi_{3k}(\tau_{AV})$ .

Для случаев ликвидации отказов оборудования дополнительно задаются:

- вероятность возникновения аварий при отказах оборудования  $P_{AVK}$ ;
- функции распределения вероятностей значений дополнительной стоимости операции ликвидации аварии  $\Phi_{4k}(\Delta s)$ .

Эти данные служат исходной информацией для построения имитационной модели полумарковского процесса, являющегося отображением технологической схемы производственного цикла.

Шаг 3. Перевод технологической схемы реализации в полумарковскую модель, отображающую функционирование технологического цикла, в результате чего формируется таблица коммутации  $\{MTXO_{ij}\}$ , согласно графовой структуре их реализации в составе  $h$ -го варианта вероятностного технологического процесса производства.

Шаг 4. Инициализация имитационной модели и ввод исходной информации в виде таблиц на основе множеств  $G_h = \{F_{1ij}(\tau); F_{2ij}(s); F_{3r3ij}(ko); F_{4r4ij}(mt)\}$  и  $Z_h = \{\Phi_{1kh}(\tau_{BO}); \Phi_{2kh}(\tau_{VO}); \Phi_{3kh}(\tau_{AV}); P_{AVKh}; \Phi_{4kh}(\Delta s)\}$ .

Шаг 5. Задание числа реализаций процедуры Монте-Карло ( $N_M$ ).

Шаг 6. Постановка серий имитационных экспериментов и усреднение статистик имитации на основе стандартных пакетов обработки статистики.

Параметрами  $h$ -го варианта имитационной модели (ИМ) является множество ресурсов предприятия:

$$X_h = (\{n_{1r1h}^0\}; \{n_{3r3h}^0\}; n_{5h}^0; n_{6h}^0),$$

где  $\{n_{1r1h}^0\}$  – общее число устройств оборудования индивидуального использования  $r_1$  типа;  $\{n_{3r3h}^0\}$  – общее число ресурсов индивидуального использования  $r_3$  типа;  $n_{5h}^0$  – число индивидуальных исполнителей  $n_{6h}^0$  – число бригад исполнителей.

Шаг 7. Анализ структуры  $h$ -го варианта организации ВПС (задача 1).

Определение вектора откликов, компонентами которого являются:  $Y_{1h} = T_{kph}$  – критическое время реализации  $h$ -го варианта организации ВПС;  $Y_{2h} = C_{\Sigma h}$  – суммарная стоимость реализации технологического цикла;  $Y_{3h} = mt_{\Sigma hr4}$  – суммарный расход материалов  $r_4$  типа;  $Y_{4h} = ko_{\Sigma hr5}$  – суммарный расход комплектующих деталей  $r_5$  типа;  $Y_{5h} = P_{BПh}$  – вероятность отказа оборудования в суточном цикле выполнения  $MTXO_{ij}$ .

Расчет эффективности варианта организации ВПС осуществляется на основе обобщенного критерия качества, который подлежит минимизации и имеет следующий вид:

$$\min_h L_h = \sum_{j=1}^5 \delta_{jh} \cdot Y_{jh}^*,$$

где  $0 \leq \delta_{jh} \leq 1$ ;  $\sum_{j=1}^5 \delta_{jh} = 1$  – весовые коэффициенты важности  $j$ -го отклика для лица, принимающего решение;  $Y_{jh}^*$  – значения  $j$ -х компонентов вектора откликов, нормированные максимальными значениями среди возможных вариантов организации ВПС.

Получаемые при этом интегральные графики изменения стоимости, расхода материалов и комплектующих изделий позволяют прогнозировать их потребности в процессе реализации цикла технологического цикла ВПС.

Шаг 8. Поиск «узких мест» в организации ВПС (задача 2).

Для каждого  $h$ -го варианта ВПС по технологической схеме реализации формируется вероятностный сетевой график (ВСГР). Далее заменой технологических операций  $MTXO_{ij}$  на агрегаты технологических операций  $\{ATOP_{ij}\}$  имитационной модели и заменой событий ВСГР на соответствующие агрегаты-имитаторы событий  $\{ASOB_i\}$  формируется имитационная модель ВСГР. После  $N_M$  реализаций ИМ ВСГР формируется граф критических путей  $h$ -го варианта ВСГР ( $GRKRP_h$ ).

В общем случае с помощью  $GRKRP_h$  определяются:

- минимальное значение  $T^- = T_{kp \min h}$  с вероятностью  $P_{1h}$ ;
- максимальное значение  $T^+ = T_{kp \max h}$  с вероятностью  $P_{2h}$ ;
- наиболее вероятное значение  $T^* = T_{kph}$  с вероятностью  $P_{3h}$ .

Шаг 9. Определение минимального состава ( $\min X_h$ ) ресурсов (задача 3), при котором возможна реализация ВПС, осуществлялось на основе метода пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом возможных вариантов реализации технологического цикла при наличии сбоев оборудования.

Шаг 10. Определение максимального состава ( $\max X_h$ ) ресурсов (задача 4), при котором отсутствует конкуренция  $MTXO_{ij}$  за ресурсы ВПС, осуществлялось методом пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом сбоев оборудования.

Шаг 11. Выбор рационального состава ресурсов (задача 5) при наличии конкуренции  $MTXO_{ij}$  за ресурсы ВПС выполнялся на основе метода пошаговой реструктуризации имитационной модели ВСГР с учетом интенсивности сбоев оборудования.

Шаг 12. Сравнение вариантов организации ВПС (задача 6) осуществлялось на основе одноименного сравнения значений обобщенных откликов  $L_n$  имитационной модели и анализа требований к исходному и текущему составу ресурсов ВПС, надежности функционирования устройств оборудования. При этом установлено, что наличие конкуренции операций за оборудование и ликвидация последствий отказов оборудования увеличивает фактическое время и стоимость выполнения операций по отношению к запланированным величинам ( $\tau_{\Phi ij} > \tau_{ij}; S_{\Phi ij} > S_{ij}$ ).

### Обсуждение результатов

Опираясь на результаты апробации, необходимо отметить, что разработанный метод и программное обеспечение для исследования производственных систем с вероятностными характеристиками позволяют:

- обеспечить возможность повышения надежности производственных систем за счет построения рациональной структуры технологического цикла с учетом выбранного критерия качества его функционирования;
- снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на производстве на основе выбранной рациональной структуры технологического цикла на стадии проектирования;
- обеспечить резервирование потенциально опасных технологических операций при проведении пуско-наладочных работ и монтажа технологических линий, имеющих определенный срок предварительной эксплуатации;
- снизить себестоимость работ при осуществлении проектирования новых производственных объектов;
- обеспечить возможность упреждения конфликтных ситуаций в функционировании технологического цикла производства.

Все вышперечисленное в совокупности позволяет повысить уровень надежности и безопасности функционирования промышленных предприятий, а также конкурентоспособность выпускаемой ими продукции.

### Заключение

Таким образом, разработанные алгоритмы программ-имитаторов, которые реализованы в виде конечного набора элементов для моделирования компонентов технологического цикла, дают возможность оперативного построения имитационных моделей с привлечением специалистов конкретных предметных областей.

Полученные в процессе апробации практические оценки функционирования объектов исследования дают основания для обеспечения поддержки принятия управленческих решений при выполнении оценки надежности технологического цикла производства и оценке уровня безопасности функционирования предприятий. При этом предложенные библиотеки элементов имитационных моделей позволяют исследовать широкий класс исследуемых объектов ограниченным количеством основных компонентов модели, что дает возможность сократить время проектного моделирования на стадии разработки проекта и уменьшить стоимость проектного моделирования новых технологических объектов.

Данная разработка выполнялась в рамках следующих государственных программ научных исследований и тем, соответствующих приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь «Методы мониторинга окружающей среды, прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций техногенного и природного характера», утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь 17 мая 2005 года № 512.

1. Государственной программы научных исследований «Научные основы и инструментальные средства информационных и космических технологий» (ГПНИ «Информатика и кос-

мос») в 2011 – 2012 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20111552; задание «Информатика и космос 1.3.06»).

2. Государственной комплексной программы научных исследований «Научные основы информационных технологий и систем» (ГКПНИ «Инфотех») в 2009 – 2010 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20090462; задание «Инфотех 54»).

3. Государственной программы прикладных научных исследований «Разработка и обоснование системы мер для снижения рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь» (ГППИ «Снижение рисков чрезвычайных ситуаций») в 2006 – 2008 годах (Гомельский инженерный ин-т МЧС РБ; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20061381; задание «СРЧС 16»).

4. Государственной комплексной программы научных исследований «Научные основы информационных технологий и систем» (ГКПНИ «Инфотех») в 2006 – 2008 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы И.В. Максимей, ГР № 20061846; задание «Инфотех 44»).

5. Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Повышение надежности технических систем и обеспечение экологической безопасности территорий и населения в чрезвычайных ситуациях» (ГПОФИ «Надежность и безопасность») в 2004 – 2005 годах (Гомельский инженерный ин-т МЧС РБ; рук. темы В.С. Смородин, ГР № 20033706; задание «Надежность и безопасность 44»).

6. ХД 11-116 «Разработка алгоритмов функционирования динамических имитационных моделей вероятностных технологических систем» в 2011 – 2012 годах (Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины; рук. темы В.С. Смородин).

При выполнении разработки использовалось стандартное программное обеспечение, а также специальное программное обеспечение, разработанное на кафедре математических проблем управления учреждения образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины» в составе авторского коллектива.

## **APPLICATION OF DYNAMIC IMITATION FOR INCREASING OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF PROBABILISTIC PRODUCTIVE SYSTEMS**

A.V. KLIMENKO

### **Abstract**

A theoretical ground over and technology of application of dynamic simulation models are brought for the analysis of functioning of the probabilistic productive systems. Methodology of decision of tasks of project design of rational structure of technological cycle is offered at presence of elements potentially dangerous production.

### **Список литературы**

1. *Смородин В.С., Максимей И.В.* Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства. Гомель, 2007.
2. *Тамм Б.Г., Пуусепи М.Э., Таваст Р.Р.* Анализ и моделирование производственных систем. М., 1987.
3. *Смородин В.С.* // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). 2007. №1. С. 105–110.