



# OSTIS-2011

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 007.003;007.008;65.0

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

И.В. Максимей (mpu@gsu.by),  
В.С. Смородин (mpu@gsu.by; smorodin@gsu.by)  
В.А. Короткевич (korotkevich@gsu.by),  
А.В. Клименко (klimenko@gsu.by)

*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,  
г.Гомель, Республика Беларусь*

Рассмотрено новое направление интеллектуализации методов системных исследований в области объектно-ориентированного проектирования и анализа сложных динамических систем с вероятностными параметрами их функционирования. В качестве иллюстрации предложена реализация метода и программных средств автоматизации процесса проектного моделирования рациональной структуры управляемых производственных систем, при которой осуществляется разделение процесса проектирования от методов решения задач, которые могут быть вынесены в соответствующую базу знаний.

*Ключевые слова:* анализ функционирования, вероятностные параметры, потенциально опасное производство, синтез рациональной структуры, управляемые производственные системы, объектно-ориентированное проектирование.

### Введение

Проявляющаяся в последнее время тенденция к использованию некоторых общесистемных принципов и методов исследований в различных областях знаний приводит к унификации системного подхода при решении конкретных задач науки и практики. Данная тенденция дает основания рассчитывать в дальнейшем на создание необходимой базы, позволяющей исследователю работать с системами любой степени сложности, вне зависимости от ее физической сущности или ограниченности рамками определенной формализации.

Средством реализации таких возможностей являются математические модели сложных динамических систем (СДС) и моделирование процесса их функционирования. В данном контексте к сложным динамическим системам относятся производственные и экономические объекты, вычислительные сети, программное обеспечение сложных систем управления, системы энергообеспечения и другие системы, призванные обеспечивать безопасность жизнедеятельности производства.

Широкое развитие при исследовании и управлении сложными динамическими системами (а также протекающими в них процессами) на основе разработки программных средств автоматизации в настоящее время получило имитационное моделирование на ЭВМ [Бусленко, 1977], [Максимей, 1988]. Это обстоятельство обусловлено тем, что размерность решаемых задач, а также невозможность формализации сложных систем в рамках аналитических методов исследований не позволяют использовать классические методы исследования операций, классические и конструктивные методы оптимизации [Шеннон, 1978].

Учитывая, что круг проблем, решаемых с использованием имитационного моделирования во многих областях человеческой деятельности, достаточно важен и широк, возникают веские основания для совершенствования этого метода исследований как в области развития его теоретических основ, так и в области разработки соответствующих программных средств

(например, для обеспечения поддержки принятия обоснованных решений с использованием электронно-вычислительной техники).

Следует заметить, что хотя в настоящее время в мире разработано и используется более семисот **языков моделирования**, обладающими удобством и быстротой программирования (GPSS, Q-GERT, GASP IV, SIMULA 67, C++ Sim и др.), они *требуют от пользователя основательных знаний языков программирования и обеспечивают меньше возможностей* по сравнению с универсальными языками программирования. С другой стороны, использование при разработке имитационных моделей **проблемно-ориентированных систем и средств моделирования**, которых насчитывается всего несколько десятков (например, DOSIMIS-3, Process Charter 1.0.2 (компания Scitor, Менло-Парк, шт. Калифорния), Powersim 2.01 (фирмы Modell Data AS, Берген, Норвегия), Extend+BRM (компания Imagine That!, Сан-Хосе, шт. Калифорния), Arena (фирмы Systems Modeling) и др.), не требует от пользователя знаний языков программирования, однако эти системы и средства *позволяют моделировать лишь относительно узкие классы сложных динамических систем* [Клейнен, 1978], [Прицкер, 1987].

Существующее противоречие между универсальностью средств имитационного моделирования (*широта класса моделируемых систем*) и гибкостью (*легкость описания конкретной системы*) обращается против пользователя либо высокой степенью сложности языка моделирования, либо узкой областью применимости данных средств (при наличии большого числа ограничений на условия применения). Кроме того, существующие средства моделирования обладают ограниченными возможностями моделирования систем управления, которые являются неотъемлемой частью СДС, а также слабо ориентированы на учет «человеческого фактора» при принятии экспертных решений.

Эти и некоторые другие проблемы обусловили новую фазу развития имитационного моделирования, связанную с построением гибких и универсальных систем, *позволяющих имитировать результаты человеческой деятельности при принятии решений*, поскольку в существующих средствах моделирования логика систем управления закладывалась либо в алгоритм имитационной модели (GPSS, SLAM II и др.), либо ограничивалась достаточно скромными средствами ее формализации (такими, например, как выбор приоритетов (ПОДСИМ (МГТУ, Москва), GPSS), заполнение таблиц решений (DOSIMIS-3 (Магдебург, ФРГ)) или запросы к оператору) [Емельянов, 1998].

Таким образом, интеллектуализация процесса имитационного моделирования призвана решить названные выше проблемы, способствовать расширению научной базы моделирования и сделать имитационное моделирование эффективным средством для проектировщиков, специалистов-экспертов различных предметных областей и системных аналитиков.

Системный подход, как известно, получил применение в системотехнике в связи с необходимостью исследования больших реальных систем, когда сказалась недостаточность, а иногда ошибочность принятия каких-либо частных решений. На возникновение системного подхода повлияли увеличивающееся количество исходных данных при разработке, необходимость учета сложных стохастических связей в системе и воздействий внешней среды. Причинами его использования явились требования универсальности имитационных моделей относительно классов моделируемых СДС, легкости модификации моделей, моделирования сложных систем управления совместно с управляемым объектом (включая использование имитационной модели при управлении в реальном масштабе времени).

Вместе с тем, как показывает практика проводимых научных исследований в области моделирования сложных систем (и имитационного в частности), многообразие условий функционирования и уникальность каждой СДС приводит к тому, что разрабатываемые всякий раз системы моделирования (СМ) (системы управления (СУ)) являются уникальными, негибкими и нетиражируемыми. Это приводит к большим потерям времени и средств при проектировании СДС, низкой эффективности и большому количеству ошибок на всех стадиях проектирования и их функционирования, что, в свою очередь, определяется несовершенством соответствующих математических моделей.

Ввиду того, что сложная система, в зависимости от уровня знаний о ней, целей исследования и точки зрения аналитика, может быть одновременно и сложной и простой, то, принимая во внимание множество трактовок признаков сложных систем ([Бусленко, 1973], [Касти, 1982] и другие), зачастую противоречивых, в качестве общих требований, которым

должны удовлетворять системы моделирования и системы управления СДС, можно выделить следующие [Кьюсиак, 1991]:

1. Единство подхода к решению задач управления и моделирования на всех их стадиях.
2. Адаптируемость к изменению внешних и внутренних условий функционирования СДС.
3. Открытость по отношению к наращиванию функциональных возможностей.
4. Простота и понятность для пользователя.

Выполнение подобных условий разработки систем управления и моделирования требует соблюдения ряда принципов [Тамм, 1987], таких как совместная работа проектировщиков и пользователей систем, структурированность подхода, ориентированность описания на решение определенного класса задач управления или моделирования (принцип ориентированности), единственность системы для решения всех задач проблемной области (принцип интеграции), разделение системы принятия решений и информационной базы с вынесением в нее данных и знаний о предметной области, перенесение конкретных характеристик СДС при принятии решений в соответствующие базы данных и базы знаний.

Как нетрудно заметить, названные и аналогичные требования вполне укладываются в концепции объектно-ориентированного программирования [Буч, 1994], использование которого широко поддерживается в настоящее время наличием объектно-ориентированных языков программирования (таких, например, как C++, Object Pascal и др.).

При этом широкое распространение интегрированных объектно-ориентированных сред программирования (таких как C++ Builder и Delphi Client-Server ) естественным образом обеспечивает как возможности объектно-ориентированного анализа, так и возможности объектно-ориентированного проектирования сложных систем, что можно было бы обозначить как относительно новое направление в системологии [Клир, 1990], порожденное развитием объектно-ориентированного программирования и появлением языков программирования, ориентированных на обработку событий (например, C++ и Object Pascal в составе интегрированных сред).

Одним из направлений интеллектуализации методов системных исследований в области объектно-ориентированного анализа и проектирования сложных динамических систем с вероятностными параметрами их функционирования [Смородин, 2007а] является разработка методов и средств интеллектуального имитационного моделирования вероятностных производственных систем (ПС) и систем управления ПС.

Данное направление объединяет в себе:

*кибернетический подход к анализу сложных динамических систем на основе имитационного моделирования, позволяющий исследовать их структурные характеристики;*

*объектно-ориентированный анализ на основе использования интегрированной объектно-ориентированной среды программирования Delphi 5.0 Client-Server;*

*объектно-ориентированное проектирование сложных процессов и систем на базе интегрированной объектно-ориентированной среды программирования C++ Builder в совокупности с XML-технологией.*

Реализация кибернетического подхода средствами имитации обусловлена тем, что имитационная модель позволяет достаточно легко отражать все виды связности системы, обеспечивать исследование закономерностей ее функционирования, а также выявлять новые, непредвиденные свойства СДС. При этом под сложной динамической системой в рамках названного направления понимаются СДС, включающие встроенные и (или) внешние системы управления, а также специалистов-экспертов (лиц, принимающих решения (ЛПР) в составе человеко-машинного комплекса имитации СДС).

Применяемый объектно-ориентированный анализ СДС основан на объектном подходе к предмету исследования и представляет собой метод идентификации в задачах исследования взаимодействующих объектов имитационной модели, которые являются физическими компонентами СДС и характеризуются соответствующим набором атрибутов (детерминированных и вероятностных). Отношения между объектами представляют собой результат работы механизма, управляющего изменением состояния объектов с течением времени посредством использования системы принятия решений (*SPRESH*). В соответствии с основными концепциями объектно-ориентированного программирования (классы, инкапсуляция, наследование и т.д.) [Буч, 1994] при выполнении объектно-ориентированного

анализа СДС реализованы следующие основные компоненты данного подхода: абстрагирование, ограничение доступа, модульность и иерархия.

*Абстрагирование* при анализе СДС поддерживается средствами объектно-ориентированного программирования (ООП) языков Object Pascal и C++: наличием описания классов объектов, что позволяет отделить существование объекта СДС от его поведения [Abelson, 1985] и, в конечном счете, отделить имитационные модели предмета исследования (абстракция сущности объекта) от конкретных математических методов его анализа (абстракция поведения объекта). На уровне конкретики имитационной модели поведение объектов модели обеспечивается описанием классов объектов, а действия над ними обеспечиваются процедурами и методами описанных классов на основе использования объектно-ориентированного языка C++ интегрированной среды программирования C++ Builder, что позволило, например, осуществить *объектно-ориентированное проектирование* динамической структуры технологического цикла при наличии элементов потенциальной опасности [Сморозин, 2006], , [Гончаров и др., 2008]. *Ограничение доступа* к объекту (в ООП «инкапсуляция») и *модульность* имитационной модели обеспечивают возможность вносить изменения в модели, сохраняя при этом их надежность и минимизируя временные затраты на процесс внесения таких изменений.

В качестве иллюстрации данного подхода рассмотрим реализацию метода и программных средств автоматизации процесса проектного моделирования рациональной структуры управляемых производственных систем (УПС) при наличии элементов потенциальной опасности, при которой осуществляется разделение проектирования динамической структуры технологического цикла от методов решения задач проектирования, которые могут быть вынесены в соответствующую базу знаний.

## **1. Метод исследования структуры технологического цикла**

Метод исследования управляемых производственных систем с параллельно-последовательной организацией технологического цикла состоит в поэтапном использовании агрегатно-процессного способа формализации, создания и испытания имитационных моделей вероятностных сетевых графиков. В основе метода лежит использование процедур создания моделей, которые являются средствами малой автоматизации моделирования и позволяют реализовать реализацию имитационной модели на основе библиотеки универсальных агрегатов.

Для разработки имитационных моделей 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.

При описании динамики проектирования структуры технологического цикла используется представление УПС в виде вероятностного сетевого графика. Для принятия проектного решения в общем случае исследователю необходимо было последовательно выполнить 20 этапов реализации метода, схема которого представлена на рисунке 1. При этом исследователь должен быть профессионалом в области программирования и прикладной математике, а также владеть методикой имитационного моделирования на основе агрегатно-процессного способа имитации сложных систем [Максимей, 2009].

В предложенном подходе используется разработанная в составе авторского коллектива объектно-ориентированная среда GraphModel. Проектное моделирование структуры УПС осуществляется многократно по единой технологии экспертом-технологом. 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.

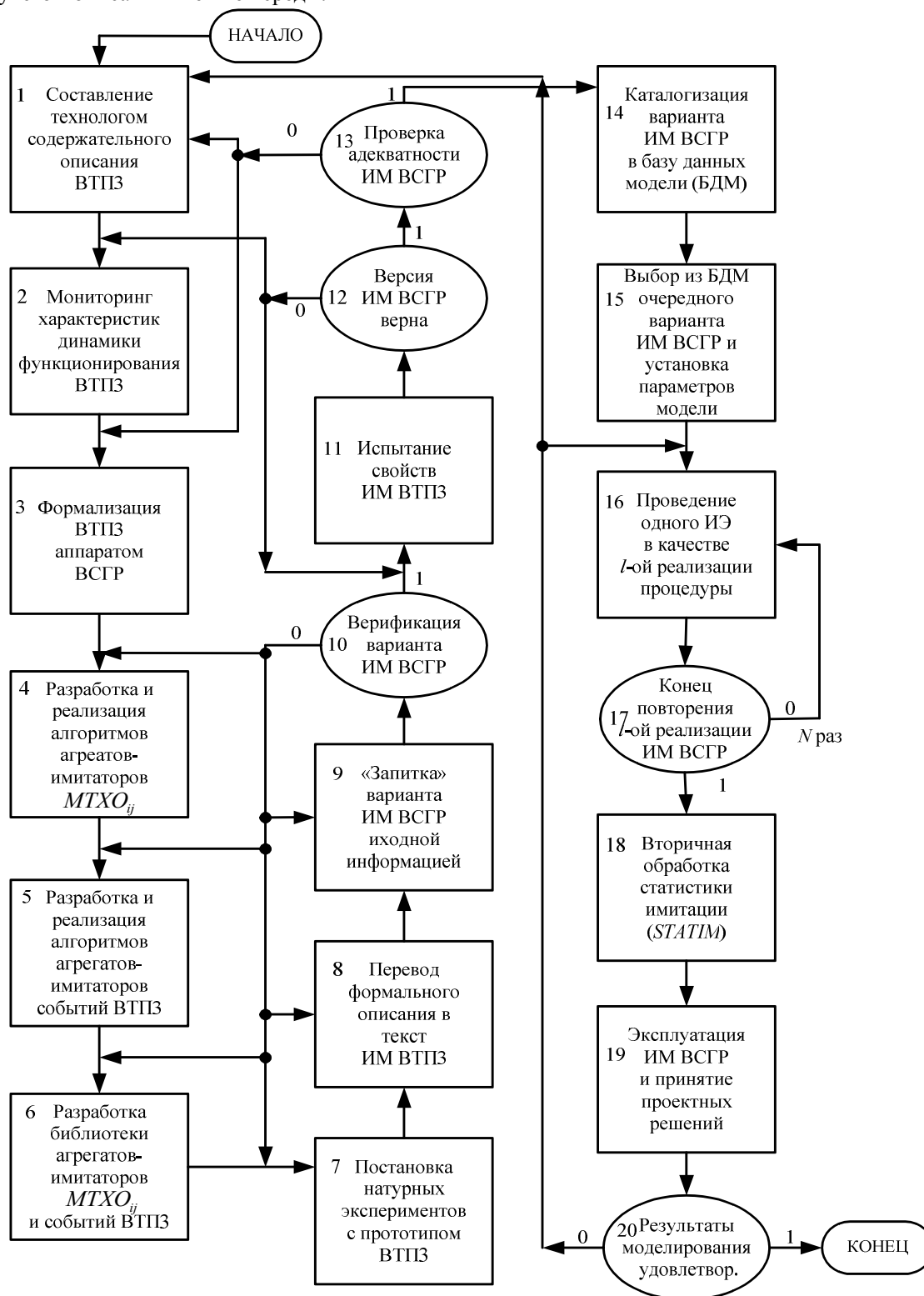


Рисунок 1 – Схема реализации метода исследования

С использованием объектно-ориентированной среды GraphModel (рисунок 2) в автоматическом режиме составляются таблицы коммутации операций и последовательность их выполнения.

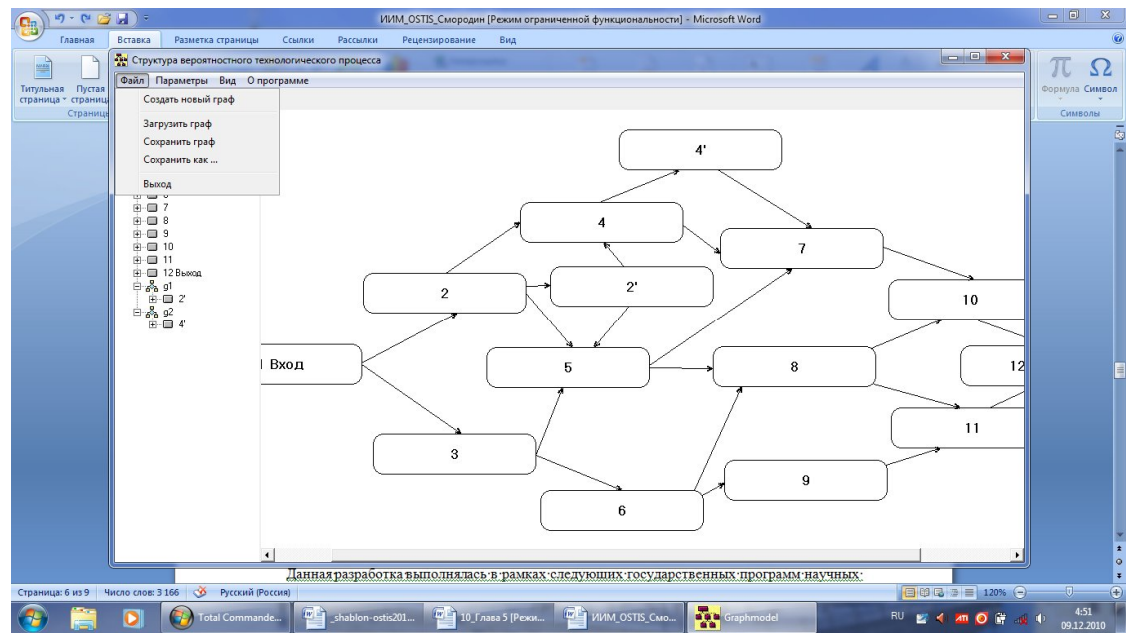


Рисунок 2 – Интерфейс приложения для проектирования структуры УПС

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 (рисунок 3).

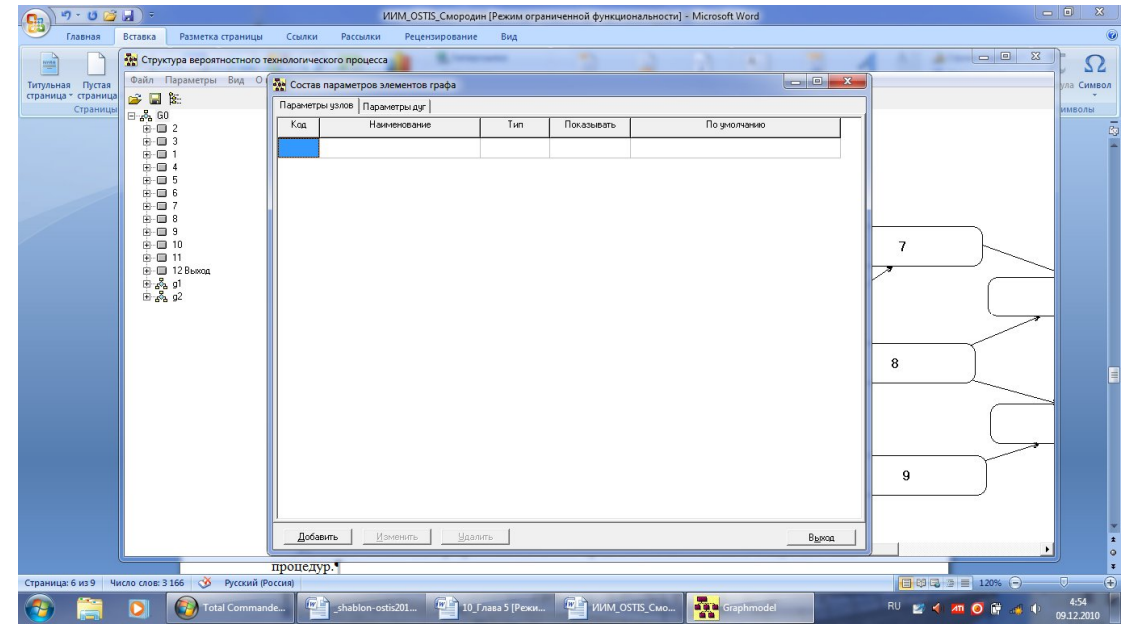


Рисунок 3 – Окно настройки параметров элементов структуры графа

## **2. Методика принятия проектных решений на основе среды GraphModel**

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;
- конкретизация 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 осуществляется на основе формируемой в интерактивном режиме базы данных элементов модели и библиотек агрегатов-компонентов имитационных моделей [Сморodin, 2007b].

Таким образом, использование объектной-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.

### **Заключение**

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

1. 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»);
2. 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»);
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 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»).

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.

### Библиографический список

[Бусленко, 1973] Бусленко, Н.П. Лекции по теории больших систем / Н.П. Бусленко, В.В. Калашников, Н.Н. Коваленко. – М.: Сов. радио, 1973. – 439 с.

[Бусленко, 1977] Бусленко, В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / В.Н. Бусленко. – М.: Наука, 1977. – 239 с.

[Буч, 1994] Буч, Г. Объектно-ориентированное программирование / Г. Буч. – М.: ИВК, 1994. – 456 с.

[Гончаров и др., 2008] Гончаров, А.Н. Проектное моделирование вероятностных технологических процессов: курс лекций по спецкурсу для студентов специальности 1-31 03 03-01 «Прикладная математика (науч.-произв. деятельность)» специализации 1-31 03 03-01 05 «Исследование операций и системный анализ» / А.Н. Гончаров и [др.]; М-во образования РБ. – Гомель: ГГУ им. Ф.Скорины, 2008. – 129 с.

[Емельянов, 1998] Емельянов, В.В. Введение в интеллектуальное имитационное моделирование сложных дискретных систем и процессов. Язык РДО. / В.В. Емельянов, С.И. Ясиновский. – М.: Анвик, 1998. – 427 с.

[Касти, 1982] Касти, Дж. Большие системы / Дж. Касти. – М.: Мир, 1982. – 216 с.

[Клейнен, 1978] Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании / Дж. Клейнен. – М.: Статистика, 1978. – 564 с.

[Клир, 1990] Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач: Пер. с англ. / Дж. Клир. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.

[Кьюсиак, 1991] Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака; Пер. с англ. А.П. Фомина; Под ред. А.И. Дашенко, Е.В. Левнера. – М.: Наука, 1991. – 544 с.

[Максимей, 1988] Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.: ил.

[Максимей, 2009] Максимей, И.В. Имитационное моделирование сложных систем: учебное пособие. В 3 ч. Ч. 1. Математические основы / И.В. Максимей. – Минск: «Изд. центр БГУ», 2009. – 263 с.

[Прицкер, 1987] Прицкер, А. Введение в имитационное моделирование и язык СЛЭМ-II / А. Прицкер. – М.: Мир, 1987. – 647 с.

[Смородин, 2006] Смородин, В.С. Методика контроля и принятия решений при имитационном моделировании технологических процессов опасного производства / В.С. Смородин // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 5. – С. 79–91.

[Смородин, 2007a] Смородин, В.С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В.С. Смородин, И.В. Максимей; М-во образования РБ. – Гомель: ГГУ им. Ф.Скорины, 2007. – 369 с.

[Смородин, 2007b] Смородин, В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В.С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2007. – № 1. – С. 105–110.

[Тамм, 1987] Анализ и моделирование производственных систем / Б.Г. Тамм, М.Э. Пуусепп, Р.Р. Таваст; Под общ. ред. Б.Г. Тамма. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.

[Шеннон, 1978] Шеннон, Р. Имитационное моделирование – искусство и наука / Р. Шеннон – М.: Мир, 1978. – 418 с.

[Abelson, 1985] Abelson, H. Structure and Interpretation of Computer Programs / H. Abelson and G. Sussman // Cambridge, MA: The MIT Press. – 1985. – 126 p.