

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

В. С. СМОРОДИН, А. В. КЛИМЕНКО

**ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Гомель 2014

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

В. С. СМОРОДИН, А. В. КЛИМЕНКО

**ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Практическое руководство

для магистрантов специальности
1-31 80 09 «Прикладная математика и информатика»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2014

УДК 004. 94 : 004.383.4 : 62
ББК 26–018 : 30–06 с 51
С 516

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор К. А. Бочков;
кандидат физико-математических наук, доцент Д.С. Кузьменков

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Сморозин, В. С.

С 516 Проектное моделирование вероятностных технологических
процессов: моделирование систем управления: практ. рук-во /
В. С. Смородин, А. В. Клименко; М-во образования РБ,
Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ
им. Ф. Скорины, 2014. – 48 с.
ISBN XXX-XXX-XXX-XXX-X

Целью практического руководства является оказание
помощи магистрантам при использовании методов
динамического имитационного моделирования для реализации
процедур проектирования систем управления технологическим
циклом производства.

Адресовано магистрантам специальности 1-31 80 09
«Прикладная математика и информатика»

**УДК 004. 94 : 004.383.4 : 62
ББК 26–018 : 30–06 с 51**

ISBN XXX-XXX-XXX-XXX-X © Смородин В. С., Клименко А. В., 2014
© УО «Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2014

Содержание

1 Способы исследования технологических процессов производства	
1.1 Особенности моделирования технологических процессов производства	
1.2 Методы и средства имитационного моделирования вероятностных технологических процессов.....	
1.3 Темы для реферирования	
1.4 Вопросы для самоконтроля.....	
2 Метод анализа функционирования вероятностных производственных систем.....	
2.1 Способы формализации последовательных технологических процессов производства и особенности их функционирования	
2.2 Имитационное моделирование последовательно организованных вероятностных технологических процессов	
2.3 Темы для реферирования	
2.4 Вопросы для самоконтроля.....	
3 Имитация функционирования технологических процессов с последовательной организацией	
3.1 Агрегаты-имитаторы оборудования и ресурсов производственной системы.....	
3.2 Программные средства автоматизации проектного моделирования последовательных технологических процессов	
3.3 Темы для реферирования	
3.4 Вопросы для самоконтроля.....	
4 Моделирование систем управления вероятностными технологическими процессами.....	
4.1 Системы управления как субъект исследования сложных технологических комплексов	
4.2 Формализация систем управления вероятностных технологических процессов производства	
4.3 Темы для реферирования	
4.4 Вопросы для самоконтроля.....	
Список использованных источников	

Введение

Эффективным средством решения актуальных проблем анализа функционирования и синтеза оптимальной структуры производственных систем с вероятностными параметрами их функционирования является системный анализ объектов исследования [1]. При этом под вероятностными параметрами функционирования понимаются характеристики надежности функционирования оборудования, используемого в ходе реализации технологического цикла производства и характеристики выполнения технологических операций.

Следует отметить, что многообразие существующих сложных технологических систем, в ходе реализации которых могут изменяться параметры их функционирования и структура технологического цикла, а также сложность практических задач, возникающих при оценке уровня надежности и безопасности функционирования потенциально опасных промышленных объектов, требуют разработки специфических подходов и новых технических решений при оптимизации структуры производственных систем на стадии их проектного моделирования.

В настоящем издании излагается гибкий математический аппарат для реструктуризации моделей вероятностных производственных систем (ВПС), позволяющий представить функционирование объекта исследования в виде конечного множества имитационных моделей.

В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей. Подобное представление обеспечивает получение в процессе имитации результирующей структуры технологического цикла, которая содержит оптимизированные схемы резервирования технологических операций в рамках заданного критерия качества функционирования объекта.

Предложенные в издании алгоритмы функционирования систем управления могут использоваться в качестве составных элементов систем анализа функционирования существующих технологических объектов при автоматизации технологических процессов и производств, разработке и автоматизации систем проектирования новых технологических объектов.

1 Способы исследования технологических процессов производства

1.1 Особенности моделирования технологических процессов производства

На современном этапе развития науки и техники любое производство основывается на реализации технологических процессов производства (ТПП). Обычно каждый ТПП состоит из множества реализаций микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$), где i, j – номера состояний или событий в ТПП. Возможны три способа реализации ТПП, соответствующих порядку следования микротехнологических операций: последовательный, параллельно-последовательный и параллельный. В зависимости от характера использования ресурсов предприятия операциями $MTXO_{ij}$ технологические процессы можно разделить на два класса: детерминированные (ДТПП) и вероятностные (ВТПП). Исторически ДТПП были изучены первыми и притом всесторонне в силу простоты технологий их исследования, использовавших три типа формализации.

Очень простые по составу и структуре детерминированные процессы удавалось формализовать на основе теории массового обслуживания. Одноуровневые технологии предполагают представление $MTXO_{ij}$ в виде приборов системы массового обслуживания (СМО), на вход которой поступают запросы на выполнение $MTXO_{ij}$. Наиболее подходят для исследования аппаратом СМО поточное производство ремонта изделий, конвейерные линии, используемые при промышленном производстве продукции. Основные ограничения состоят в том, чтобы характеристики использования операциями $MTXO_{ij}$ ресурсов предприятия были детерминированными величинами, а для вероятностных типов ресурсов необходимо удовлетворение предпосылок использования для формализации аппаратом СМО. Целью моделирования с помощью аналитических моделей СМО является определение времени T_{kp} реализации ТПП и множества статистик обслуживания очередей на входе приборов СМО, отображающих обслуживание во

времени выполнения $MTXO_{ij}$. Отметим, что другие характеристики использования ресурсов предприятия множеством $\{MTXO_{ij}\}$ не вычисляются. Как видим, возможности моделирования ТПП аппаратом СМО существенно ограничены.

В тех случаях, когда ТПП имеют графовую структуру выполнения $MTXO_{ij}$, применяется аппарат сетевого планирования. В основе исследования ТПП лежит построение сетевого графика (СГР), составляемого технологом предприятия из технологической схемы выполнения $MTXO_{ij}$. Процесс исследования ТПП с помощью СГР разбивается на три стадии: подготовка исходных данных, построение СГР, анализ СГР и прогноз характеристик ТПП. На первой стадии выявляются все взаимосвязи продолжительности $MTXO_{ij}$. Взаимосвязи между операциями представляются в виде матрицы следования $\|\alpha_{ij}\|$, отображающей графовую структуру ТПП. Оцениваются продолжительности работ $MTXO_{ij}$ τ_{ij} , которые должны быть постоянными величинами. Целью имитационного моделирования является нахождение времени реализации ТПП, которое называется критическим, и поиск критического пути (той последовательности $MTXO_{ij}$, которая определяет максимальное время выполнения всех операций). На СГР кроме $MTXO_{ij}$ выделяются события SOB_i и SOB_j . Поэтому номера $MTXO_{ij}$ означают номера событий на входе и на выходе операции. Расчет времени свершения событий и интегральных характеристик СГР осуществляется по известным методикам в три этапа. На первом этапе рассчитываются наиболее ранние сроки свершения событий t_{pj} в направлении от исходного к завершающему событию. Для любого события i ранний срок свершения равен длине максимального из путей к данному событию от исходного по формуле $t_{pj} = \max(t_{pi} + \tau_{ij})$. На втором этапе рассчитываются поздние сроки свершения событий t_{ni} . Расчет также ведется последовательно, но уже в обратном порядке, переходя от завершающего к исходному событию. Поздний срок завершающего события равен его раннему сроку. Времена свершения любых других событий определяются из соотношения $t_{nj} = \min(t_{ni} - \tau_{ij})$. Это означает, что от позднего срока всех j -х событий, следующих за i -м событием, вычитаются продолжительности работ, связывающих i -е событие с j -м и выбирается минимальная величина. Расчет

завершается вычислением t_{ni} начального события. На третьем этапе рассчитываются резервы времени выполнения событий $R_i = t_{ni} - t_{pi}$. Далее приступают к анализу параметров СГР, который включает в себя определения критического пути, нахождение критического времени T_{kr} , определение полного и частного резервов СГР. Расчеты ведутся согласно известной методике. Отметим, что, согласно известным методикам анализа СГР, других параметров $MTXO_{ij}$ не имеет. Как только времена τ_{ij} становятся случайными величинами, изложенная методика применения СГР для исследования ТПП не пригодна. Тем более, не подходят классические способы анализа ТПП, когда кроме времени каждая $MTXO_{ij}$ для своего выполнения требует еще ресурсов и оборудования предприятия.

Для более сложно организованного ТПП используются модели теории принятия решений. Процесс составления расписания выполнения $MTXO_{ij}$ состоит из упорядочения во времени множества требований $MTXO_{ij}$ на обслуживающих приборах с учетом длительностей и ограничений на порядок выполнения операций с целью оптимизации заданной целевой функции анализа ТПП. К сожалению, время реализации известных алгоритмов решения большинства задач теории расписаний растет быстро с ростом числа требований (n) и числа приборов (m). Детерминированные модели используются для представления практических ситуаций, в которых длительности предполагаются известными на этапе составления расписаний и не изменяются в процессе его реализации. На практике информация о длительности операций бывает неполной и недостаточно достоверной на этапе составления расписаний, и возникают трудности, когда заранее заданная длительность $MTXO_{ij}$ при реализации расписания существенно отличается от заданной.

Второй тип ВТПП представляют собой все те процессы, которые можно исследовать на основе имитационных моделей, построенных на основе приборов массового обслуживания с управлением. Рассмотрим два примера ВТПП второго типа: технологические процессы услуг почтовой связи (ТП УПС) и технологические процессы сборочно-разборочного производства (ТП СРП) при ремонте изделий сложной структуры. Общим в этих вероятностных технологических процессах производства является технология обслуживания компонентами ТПП множества поступающих запросов на ресурсы предприятия.

ТП УПС по своей сути являются вероятностными, поскольку характер поведения клиентов является случайным и динамика взаимодействия структурных подразделений почтовой связи заранее не предсказуема. Это обстоятельство обуславливает наличие следующих особенностей реализации ТПП УПС.

1. Все типы УПС функционально независимы друг от друга, хотя и объединены по месту расположения и подчинения единому руководству.

2. Каждый вид УПС обеспечен своим набором ресурсов, необходимых для его реализации.

3. Имеет место иерархия подчиненности структурных подразделений почтовой связи и иерархия использования имитационных моделей УПС. Существуют четыре уровня этой иерархии: отделение почтовой связи (ОПС); районные узлы почтовой связи (РУПС); областные предприятия почтовой связи (ОППС), которым подчинено множество РУПС; республиканское отделение «Белпочта», управляющее всеми ОППС. Это обстоятельство обуславливает необходимость использования последовательности ИМ УПС на каждом из уровней иерархии моделей.

4. Сложный и многофункциональный характер взаимодействия технологических операций, реализующих УПС i -го типа с помощью последовательности $\{MTXO_{ij}\}$, которые уникальны по своей структуре и описываются соответствующими графами GRF_i . Это означает, что каждая УПС i -го типа обладает одним графом GRF_i для всех структурных подразделений ОПС.

5. Существует объективная трудность измерения характеристик поведения клиентов для построения моделей УПС. При этом нарушается свойство ординарности входного потока требований, что не позволяет использовать модели СМО.

6. Существует технологическая иерархия реализации УПС, а времена обслуживания запросов клиентов на $MTXO_{ij}$ не описываются экспоненциальными законами распределения.

7. В каждом ОПС на одном рабочем месте обычно совмещено несколько $MTXO_{ij}$, относящихся к разным видам УПС. В зависимости от структуры ТПП в иерархии предоставления услуг почтовой связи могут выполняться несколько операций с одними и теми же функциями распределения.

Технологические процессы сборочно-разборочного производства (ТП СРП) обычно обслуживают несколько изделий сложной

структуры, поступающих на предприятие группами одновременно. Отремонтированные изделия покидают предприятие тем же способом.

Целью исследования таких предприятий является оценка пропускной способности предприятия и поиск оптимального состава рабочих мест при различных интенсивностях поступления изделий и требуемых ресурсов для выполнения ремонтных операций.

Особенностью объекта исследования является:

- разделение технологических потоков ремонтируемых изделий на несколько уровней иерархии с различной технологией ремонта изделий;

- наличие в ВТПП трех типов операций (расщепление технологических потоков, сборка нескольких потоков в единую линию, ремонтные операции);

- цеховая структура рабочих мест, которые специализированы по $MTXO_{ij}$;

- привязанность ресурсов предприятия к рабочим местам и ограниченный состав ресурсов на предприятии, а также ограниченный состав ремонтных бригад исполнителей, выполняющих ремонтные операции на соответствующих рабочих местах;

- общие ресурсы используются частично на время выполнения ремонтных операций и затем снова возвращаются для их использования, но уже следующей $MTXO_{ij}$.

В практике проектного моделирования исследователям приходится рассматривать ВТПП третьего типа (ВТППЗ), которые отличаются следующими особенностями:

1. Графовый характер технологии выполнения $MTXO_{ij}$ при реализации ВТППЗ. Выполнение одной группы $\{MTXO_{ij}\}$ не может быть начато до тех пор, пока не будет выполнена предыдущая группа микротехнологических операций, что отображается в структуре графа $GRMTXO$ выполнения $MTXO_{ij}$.

2. Каждая $MTXO_{ij}$ для своего выполнения требует не только затрат времени τ_{ij} , но и целый набор ресурсов предприятия ($\{RES_k\}$) разного типа и назначения, причем количество ресурсов предприятия обычно ограничено.

3. Время выполнения $MTXO_{ij}$ является случайной величиной, задаваемой функцией распределения $F_{1ij}(\tau)$ произвольного типа.

4. Некоторые $MTXO_{ij}$ используют различное количество материалов mt_{ij} и комплектующих изделий ko_{ij} , являющихся случайными величинами, описываемыми соответствующими функциями распределения $F_{3ij}(ko)$ и $F_{4ij}(mt)$.

5. Для своего выполнения $MTXO_{ij}$ требует финансовых затрат, и поэтому стоимости C_{ij} выполнения $MTXO_{ij}$ также являются случайными величинами, описываемыми соответствующими функциями распределения $F_{2ij}(C)$.

6. Каждая $MTXO_{ij}$ для своего выполнения требует предоставления детерминированного количества используемых ресурсов:

- исполнителей (ISP_{ij}) и бригад исполнителей ($BRISP_{ij}$);
- индивидуальных ресурсов ($RESIND_{ij}$), ресурсов общего пользования ($RESOB_{ij}$), индивидуального оборудования ($OBIND_{ij}$), оборудования общего пользования ($OBOP_{ij}$).

7. При функционировании оборудования общего и индивидуального пользования могут возникать отказы функционирования, требующие восстановления его работоспособности. Причем, некоторые отказы могут приводить к авариям с известными вероятностями P_{ij}^{ok} . Характеристики надежности функционирования оборудования являются вероятностными величинами, определяемыми по соответствующим функциям распределения:

- интервалы безотказной работы устройства ($F_{1ij}(\tau_{BO})$);
- интервалы восстановления функционирования оборудования ($F_{2ij}(\tau_{VO})$);
- интервалы времени τ_{av} ликвидации аварий ($F_{3ij}(\tau_{AV})$).

Фактическая длительность τ_{ij}^f выполнения каждой $MTXO_{ij}$ является случайной величиной, зависящей не только от наличия ресурсов предприятия в момент ее активизации, но и от надежностных характеристик оборудования ВТППЗ, на которых она реализуется.

8. Структура ВТППЗ также может быть вероятностной. Это означает, что после свершения группы $\{MTXO_{ij}\}$ по вероятности p_k может следовать одна из групп последующих $\{MTXO_{jn}\}$.

Первой особенностью ВТППЗ третьего типа является скорость протекания их во времени. Вероятностные технологические процессы производства по скорости протекания во времени и реактивности их как объектов управления разделим на три группы: быстро протекающие ВТППЗ (1 группа); процессы реального времени ВТППЗ (2 группа); медленно протекающие ВТППЗ (3 группа). Динамика управления каждой группы ВТППЗ различна.

Второй особенностью ВТППЗ является иерархический характер организации ВТППЗ и вероятностный характер управления каждым уровнем иерархии организации ВТППЗ. Собственно ВТППЗ состоит из множества микротехнологических операций $\{MTXO_{ij}\}$, структура связей которых определяется вероятностным сетевым графиком (ВСГР). Внутри имитационной модели (ИМ) существуют три уровня автоматического управления развитием ВТППЗ:

- одиночное резервирование оборудования при достижении его критической наработки;
- ликвидация аварий с помощью последовательности агрегатов-имитаторов процедур $\{APROC_k\}$;
- технологическое резервирование для случая коррекции состава $\{AMTXO_{ij}\}$ при возникновении аварий.

Вне ИМ с помощью системы *SPRESH* реализуется три уровня внешнего управления:

- планового управления в начале каждого имитационного эксперимента (ИЭ) путем указания параметров вариантов модели в h -м варианте $\{X_{oih}\}$ (количество исполнителей; состав индивидуального и общего пользования оборудования; количество материалов и комплектующих изделий; значения характеристик надежности и ремонта оборудования; состава ресурсов; величины наработки устройств, после которых вероятность отказа многократно повышается);
- оперативного управления имитацией развития ВТППЗ, которое предполагает контроль за состоянием ВТППЗ с помощью анализа множества индикаторов $\{ind_r\}$ за состоянием оборудования для проверки условия $Q_{fr} > Q_{or}$, что приводит к одиночному резервированию (сюда же относятся и реакция со стороны эксперта-технолога (θ_3), направленная на вмешательство в ИМ ВТППЗ со стороны эксперта-технолога посредством внешнего воздействия системы *SPRESH* на ИМ ВТППЗ, а также на реальный ВТППЗ);

– анализа информации, формируемой системой *SPRESH* и принятие решений *EXPERT*ом на основе как откликов ИМ ВТППЗ каждой l -й реализации ИМ ВСГР, так и интегральных откликов после N реализаций ИМ ВСГР (согласно процедуре Монте-Карло).

Третьей особенностью ВТППЗ является наличие оборудования, которое может отказать с известной вероятностью, с заданными надежностными характеристиками.

Каждое r -е устройство оборудования (индивидуального и общего пользования) обладает порогом наработки (Q_{0r}), превышение которого приводит либо к отказу его функционирования, либо к появлению аварии в ВТППЗ. Для ВТППЗ это обстоятельство особенно важно. Поэтому для ВТППЗ 2-го типа должен осуществляться непрерывный мониторинг составом индикаторов достижения устройствами этого порога и автоматический переход на резервирование. Для ВТППЗ важно наличие резервного оборудования, которое включается немедленно, а затем осуществляется непрерывный контроль над ситуацией и при наличии возможности переход на групповое резервирование устройств оборудования.

Четвертой особенностью ВТППЗ является высокая цена возникновения аварии в ВТППЗ. Это обстоятельство определяет необходимость немедленного перехода на профилактику случаях, когда остановка технологического процесса возможна.

В тех случаях, когда аварии избежать не удастся, допускается автоматическая ликвидация аварии последовательностью процедур, которые имитируются соответствующими агрегатами-имитаторами.

Каждый из этих агрегатов-имитаторов обладает собственным оборудованием, набором исполнителей и ресурсами для ликвидации аварии. Более того, после возникновения аварии меняется состав выполняемых операций за счет включения в имитационной модели механизмов технологического резервирования.

Как видно, структура ВТППЗ, характер использования ресурсов $MTXO_{ij}$ и надежностные характеристики оборудования не позволяют использовать аналитические модели. Кроме того, важной особенностью ВТППЗ является то, что сами $MTXO_{ij}$ не являются инициаторами их выполнения. Поэтому нельзя воспользоваться аппаратом транзакций, как это имеет место при исследовании ВТПП2. Активизация выполнения $MTXO_{ij}$ определяется свершением событий, которые обуславливаются завершением группы

предшествующих операций. Как видим, инициаторами активизации групп $MTXO_{ij}$ является граф связей, характеризующий ВТППЗ. Поэтому имитационные модели, построенные на основе использования транзактного способа имитации, нельзя использовать для исследования ВТППЗ, и нужен способ активизации групп $MTXO_{ij}$ с помощью вероятностного сетевого графика (ВСГР) [2].

1.2 Методы и средства имитационного моделирования вероятностных технологических процессов

Исследование динамики развития ВТППЗ оказалось возможным только на основе агрегатного способа имитации. Первой появилась публикация, в которой сообщалось о возможности применения одной из версий для исследования третьего типа ВТПП. В работе указано на наличие известных трудностей построения и использования программно-технологического комплекса имитации (ПТКИ), реализованного на основе транзактно-процессного способа имитации. Рассматривались при этом простейшие случаи ВТППЗ, была определена актуальность разработки нового метода имитации и возможность модификации ПТКИ для его реализации. Второй появилась работа, в которой предлагалась новая методика постановки имитационных экспериментов при оценке пропускной способности ВТППЗ. Причем, данная методика предполагала новый способ имитации ВТППЗ на основе использования вероятностного сетевого графика (ВСГР) как имитационной модели ВТПП. Предлагался агрегатный способ реализации ИМ ВСГР. Эта методика была применена при анализе и прогнозе характеристик надежности реализации ВТППЗ. Методика предполагала использование ИМ агрегатного типа и модификацию методики ИЭ с помощью агрегатных моделей ВСГР на основе использования метода статистических испытаний. Для реализации этой методики был разработан инструментарий имитационного моделирования как возможное расширение ПТКИ на случай исследования дискретных вероятностных технологических процессов производства. При использовании этого инструментария возникла новая технология проектного моделирования ВТППЗ. Практическое применение этой технологии определило актуальность разработки новой

инструментальной системы имитации, обработки информации и анализа характеристик надежности опасного производства. Здесь имеет место полный отход от попыток реализации динамики функционирования ВТППЗ транзактно-процессным способом имитации и разработка системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) на основе агрегатного способа имитации сложных систем.

Переход на агрегатный способ имитации ВТППЗ определил актуальность разработки универсальной системы формализации ВТППЗ на основе комбинации методов сетевого планирования, метода статистических испытаний и методов организации квазипараллелизма агрегатным способом имитации. Далее эта формализация была распространена на случаи моделирования опасного производства с использованием теории принятия решений. Новая формальная модель ВТПП на основе вероятностного сетевого графика (ВСГР) позволила разработать новый способ моделирования агрегатами ВТППЗ, который был распространен на случай, когда ВТППЗ относится к опасному производству. Для реализации данного способа формализации с помощью агрегатов, в случае возникновения чрезвычайных ситуаций на производстве, была разработана соответствующая технология имитационного моделирования агрегатных моделей. Далее эта технология была доработана до такой степени детализации, что позволила разработать имитационные модели ВТППЗ на случай исследования вообще опасного производства. Для реализации этой методики для случаев исследования на ИМ ситуаций при возникновении чрезвычайных ситуаций на производстве была разработана специальная технология имитации ситуаций с помощью агрегатных моделей. Практическое применение этой технологии позволило обобщить ее на случай построения, испытания и использования ИМ ВТППЗ опасного производства. Апробация технологии использования агрегатных моделей позволила разработать с ее помощью систему выбора стратегий реагирования на возникновение аварий в технологических процессах опасного производства с помощью ИМ. Большую роль в реализации ВТППЗ опасного производства играют системы управления таким производством. В некоторых работах приводится методика и практическая реализация исследований имитационного моделирования систем управления опасного производства с помощью агрегатных моделей. Здесь обсуждаются проблемы сбора статистики имитации ВСГР в моделях с агрегатным способом имитации и

предлагаются технологии организации оперативного контроля с помощью статистики имитации за реализацией ВТППЗ опасного производства. Весь комплекс последовательной разработки методик, средств и технологий реализации позволил разработать единую методику исследования ВТППЗ с помощью агрегатного способа имитации.

Опыт разработки, апробации методик, средств их реализации и технологий имитационного моделирования с помощью агрегатного способа имитации позволил установить ряд проблем, возникающих при имитационном моделировании ВТППЗ.

Выполненный выше анализ методов имитационного моделирования ВТПП определил необходимость автоматизации построения и использования программ-имитаторов за счет использования специализированных языков имитационного моделирования и систем моделирования (СМ), реализующих эти языки имитации. Кроме языка моделирования (ЯМ) в составе СМ должны быть:

- программные средства, обеспечивающие трансляцию программ ИМ, отладку и верификацию ИМ, реализацию ИЭ;
- механизм управления программными средствами, реализованного в виде интерпретатора команд или многооконной интегрированной среды имитации.

К ЯМ обычно представляются следующие требования:

- ИМ, реализованная с помощью ЯМ, должна быть близким представлением ВТПП, включая взаимодействие во времени между компонентами, а динамика использования ресурсов предприятия должна отображаться встроенными объектами ЯМ;
- возможность постановки серии ИЭ и ИМ любого размера;
- кодировки программ ИМ желательно осуществлять на распространенном языке программирования;
- наличие встроенных инструментов верификации программ ИМ, которые можно отключить на этапе эксплуатации ИМ;
- автоматический сбор и обработка динамической статистики имитации в отдельных ИЭ;
- наличие средств экспорта результатов ИЭ в известные пакеты программ статистической обработки данных.

Традиционно первой СМ, которая была использована при автоматизации имитационного моделирования, является GPSS. Среди многочисленных модификаций наибольшими возможностями описания динамики развития ВТПП в настоящее время обладает

GPSS World. Однако необходимость отображения ряда особенностей технологических аспектов обслуживания устройствами запросов $MTXO_{ij}$ не позволяет использовать стандартную версию GPSS World и возникает необходимость ее модификации. Однако это невозможно из-за уникального синтаксиса всех версий GPSS. Неудобно реализовать и эксплуатировать ИМ ВТПП в среде других систем имитационного моделирования. Например, наиболее известные инструментальные средства имитации (GPSS World, AnyLogic, Arena, Extend, SIAM-II, Powersim, Stella) имеют следующие недостатки:

- для детального описания ВТПП необходимо на профессиональном уровне знать языки моделирования уникального синтаксиса или языки программирования Java, который в настоящее время используется исключительно квалифицированными программистами (AnyLogic), или структур данных и методов управления ими, которые применяются только при реализации больших программных проектов (SLX); невозможность создания адекватных решаемой задаче классов статических и динамических объектов (GPSS World, SLAM-II); сложная система обозначений System Dynamics и ограниченная поддержка дискретного моделирования (Powersim, Stell);

- наличие технических проблем, если модель надо интегрировать в информационную систему пользователя (GPSS World, AnyLogic, Arena); анализ качества реализации функций ВТПП в условиях существующего состава динамических объектов обычно проводится специалистами проблемной области, которые зачастую не обладают необходимыми навыками организации имитации и обработки результатов ИЭ в среде CM (AnyLogic, Extend, SLAM-II);

- слабая распространенность из-за высокой цены, узкой специализации, отсутствия обучения в ВУЗах (GPSS World, AnyLogic, Arena, Extend, SLAM-II, Powersim, Stell).

Предполагается, что пользователь в одном лице представляет и разработчика, и исследователя, и потребителя, периодически решающего задачи эксплуатации ИМ. Однако в реальности серьезные ИМ создаются научными коллективами, в которых имеется разделение труда. Новые информационные технологии как раз направлены на согласование коллективной работы. Поэтому появилось семейство программно-технологических комплексов имитации (ПТКИ), построенных на базе системы моделирования MISIS, о которых мы ранее упоминали.

Все эти ПТКИ разработаны на единой технологической платформе в виде двух версий, реализующих транзактно-процессный способ имитации, и предназначенных для исследования и проектного моделирования:

- ПТКИ УПС, позволяющий исследовать ВТПП первого типа производства услуг почтовой связи;

- ПТКИ СРП, позволяющий исследовать технологические процессы ремонта изделий сложной структуры, которые также можно отнести к первому типу ВТПП.

Как уже упоминалось выше все это комплексы реализованы на единой технологической платформе в среде системы моделирования MISIS. Несмотря на ряд достоинств этих комплексов и самой СМ MISIS, необходимо отметить, что ВТПП второго типа трудно моделировать с помощью средств, реализующих транзактно-процессный способ имитации. Это замечание можно сделать о возможности использования СМ, основанных на основе языка GPSS и его модификаций.

1.3 Темы для реферирования

1.3.1 Моделирование как метод научного познания

1.3.2 Использование моделирования при исследовании и проектировании сложных систем

1.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Моделирование непрерывных случайных величин
- 2) Формальная модель объекта
- 3) Моделирование случайных векторов
- 4) Непрерывно-детерминированные модели (D-схемы)

2 Метод анализа функционирования вероятностных производственных систем

2.1 Способы формализации последовательных технологических процессов производства и особенности их функционирования

В ряде случаев для вероятностных ТПП бывает трудно выделить отдельные технологические операции и определить порядок их следования. Данная ситуация имеет место либо из-за недостаточной изученности производства (что обычно случается при первоначальном проектном моделировании ВТПП), либо в силу сложной многофункциональной зависимости микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$). Однако, для таких случаев может оказаться, что интегральные состояния ВТПП как результат многочисленных взаимодействий $MTXO_{ij}$ представляют собой последовательную цепь событий. Подобные технологические процессы обычно называются последовательными.

Объектом имитации является вероятностный ВТПП, о поведении которого известны только состав его интегральных состояний и условия перехода из i -го состояния $SOST_i$ в j -е $SOST_j$. Основная доля переходов ВТПП из состояния в состояние может быть представлена как полумарковский процесс. Длительности τ_{ij} нахождения ВТПП в состоянии j могут быть представлены полумарковской моделью (при условии перехода из состояния i в состояние j). Известен также расход ресурсов вероятностного ВТПП в каждом состоянии ($j = \overline{1,10}$).

Граф переходов состоит из десяти узлов, каждый из которых является представителем связи соответствующего процесса-имитатора состояния ($PR.SOST_{ij}$, $i, j = \overline{1,10}$) с остальными процессами. Процесс $PR.UZEL$ связан двояким образом: стандартным образом (по матрице $\|p_{ij}\|$) и нестандартным образом с остальными типами процессов. Как видим, в графе переходов ВТПП имеется всего 10 состояний (от $PR.SOST_1$ до $PR.SOST_{10}$). Поскольку функции всех узлов полумарковской модели ($UZEL_i$) одинаковы, то их можно

объединить одним и тем же процессом *PR.UZEL*, который является реентерабельной программой и обеспечивает последовательное функционирование всех десяти узлов. Для каждого из процессов состояний также необходима соответствующая реентерабельная программа [3].

На рисунке 2.1 приведена схема взаимодействия процессов при переходе вероятностного технологического процесса производства из состояния в состояние. На данном рисунке также показано взаимодействие остальных процессов-имитаторов функций устройств оборудования с процессами состояний *PR.SOST_{ij}*.

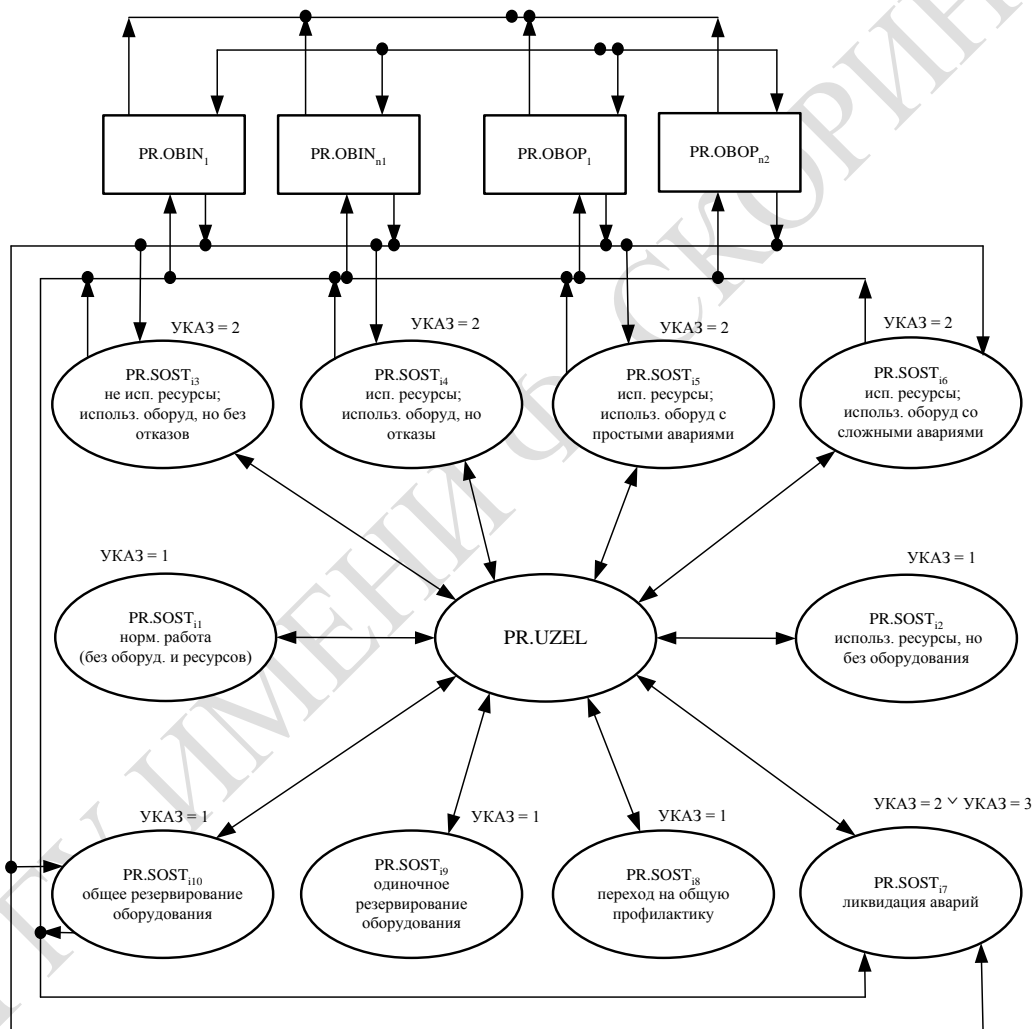


Рисунок 2.1 – Схема взаимодействия процессов ВТПП

В основе метода исследования лежит представление последовательных ВТПП в виде полумарковских моделей (ПММ). При этом переход производственной системы из состояния *i* в

состояние j определяется матрицей вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$, а времена нахождения ВТПП в каждом из состояний определяются функцией условного распределения $F_{1ij}(\tau)$ времени нахождения системы в состоянии j при переходе в него из состояния i .

Перед началом исследования задается вектор вероятностей начальных состояний v_0 и вектор вероятностей завершающего состояния v_k . Начальное состояние (i_0) разыгрывается по жребию 1-го типа с помощью вектора v_0 . Аналогичным образом разыгрывается конечное состояние (i_k) по вектору v_k , $k = \overline{1, N}$. В ряде случаев, особенно при малой вероятности достижения конечного состояния (p_k) бывает трудно моделировать редкие события. Поэтому стараются задать функцию $F_0(v)$ распределения количества смен состояний, по которой разыгрывается число (v_l) смен состояний в l -й реализации ППМ. При выполнении условия $v_l = 0$ определяется момент окончания моделирования ПММ.

На *этапе 1*, используя аппарат описания полумарковских процессов осуществляется формализация последовательных ВТПП, определяются состояния ВТПП. Каждый раз при изменении состава состояний заново формируется матрица $\|p_{ij}\|$ вероятностей перехода ВТПП из состояния в состояние, определяются значения векторов вероятностей начального (v_n) и завершающего состояний (v_k). На *этапе 2* разрабатываются алгоритмы процессов, имитирующих состояния последовательного ВТПП. Далее на *этапе 3* эти алгоритмы реализуются с помощью разработанной для этой цели первой версии системы автоматизации моделирования (САИМ). Полученную таким образом программу ИМ последовательного ВТПП на *этапе 4* верифицируют по методикам. Здесь возможны возвраты на предыдущие три этапа метода в зависимости от результатов определения ошибок (формализации, алгоритмизации и программирования алгоритмов). На *этапе 5* выполняется два вида работ. Вначале либо проводят натурные эксперименты (НЭ) с реальным ВТПП, либо используют экспертные данные для задания вероятностных характеристик ПММ и характеристик надежности функционирования оборудования ВТПП. Затем осуществляется задание исходной информации для построения ПММ исследуемых ВТПП, называемое в дальнейшем «запиткой» ИМ ВТПП.

Испытание и исследование свойств имитационной модели осуществляется на *этапе 6*. Реализуется этап следующей последовательностью шагов. На шаге 6.1 оценивается точность имитации; затем, на шаге 6.2, оценивается длина переходного периода имитации (T_{ppim}); исследуется «устойчивость» имитации на шаге 6.3. Исследование свойств имитационной модели, состоящих в оценке «чувствительности» откликов имитации, проводится на шаге 6.4. Наконец, на шаге 6.5, проверяется адекватность ИМ ВТПП.

Для ликвидации выявленных ошибок динамики имитации при отрицательном результате каждого шага испытания имитационной модели возможен возврат на четвертый или пятый этапы исследований. Этапом 6 завершается разработка варианта ИМ ВТПП. При удачном окончании этапа испытания имитационная модель каталогизируется в библиотеку моделей первой версии САИМ. На последующих этапах исследователь использует каталогизированную ИМ, которая ранее была верифицирована, а затем удачно прошла этап испытания. При этом дополнительной разработки программного продукта не предусматривается.

Изменение параметров моделирования и определение режимов выполнения программ обработки результатов имитации осуществляется путем задания значений элементов соответствующих массивов исходных данных реализации режимов имитации и вторичной обработки статистики. На *этапе 7* проводится серия имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло (статистики и отклики усредняются). Для этой цели в базе данных (БД) ИМ результаты каждой реализации имитационной модели ВТПП запоминаются в соответствующих файлах статистики. При этом в ходе имитации вариантов ИМ исследователю формируется оперативная статистика моделирования.

На *этапе 8* осуществляется вторичная обработка статистики имитации, накопленной в базе данных модели. Согласно процедуре Монте-Карло осуществляется усреднение статистик и откликов имитации. Результаты расчетов могут быть выведены на монитор компьютера или распечатаны. Анализ полученной интегральной статистики осуществляется на *этапе 9*. В ходе реализации *этапа 9* определяется значение целевой функции путем пересчета обобщенных откликов и их нормировки. Осуществляется выбор рационального варианта организации и определение используемых ресурсов в каждом состоянии последовательного ВТПП. Наконец, на *этапе 10*, принимаются проектные решения на основе использования

классических критериев качества принятия решений в условиях неопределенности и риска. При этом пользователю предоставляется возможность завершить исследование на *этапах 7–10* или возвратиться на один из предыдущих этапов. Если результаты исследования ВТПП на имитационной модели его частично не удовлетворяют, то выполняется возврат на любой из *этапов 6–9*. В том случае, когда результаты анализа ВТПП кардинально не устраивают пользователя, он может вернуться на любой из этапов создания имитационной модели (*этапы 1–6*). В этом случае необходима ее модификация, которая осуществляется с привлечением специалистов по программированию и имитации.

Отметим, что откликами имитации ИМ ВТПП согласно процедуре Монте-Карло являются:

– усредненные по всем реализациям времена и стоимости нахождения ВТПП в j -х состояниях

$$T_{pj}^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{plj}; \quad T_{Cj}^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N C_{plj}; \quad (2.1)$$

– общее значение времени и стоимости реализации ВТПП

$$T_{p0}^0 = \sum_{j=1}^{10} T_{pj}^0; \quad T_{C0}^0 = \sum_{j=1}^{10} T_{Cj}^0; \quad (2.2)$$

– общие значения времен восстановления и ликвидации аварий в процессе реализации ВТПП

$$T_{VO} = \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{VOLj}; \quad T_{AV} = \sum_{j=1}^{10} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{AVlj}. \quad (2.3)$$

После усреднения результатов имитации формируются *интегральные статистики* имитации согласно процедуре Монте-Карло:

- графиков расхода комплектующих изделий (GKO_0) и материалов (GMT_0);
- диаграмм изменения остатка на общих ресурсах и оборудовании ($DIOR_{k0}$ и $DIOB_{k0}$);
- диаграмм изменения использования индивидуальных ресурсов и оборудования ($DIIR_{k0}$ и $DIIO_{k0}$).

Целью имитации ВТПП является минимизация компонентов вектора (T_{p0} , T_{C0} , T_{B0} , T_{A0}). Тот вариант h -й организации ВТПП является лучшим, у которого меньшее значение функционала, вычисляемого по формуле:

$$W_{0h} = \alpha_1 T_{p0}^* + \alpha_2 T_{C0}^* + \alpha_3 T_{B0}^* + \alpha_4 T_{A0}^*, \quad (2.4)$$

где $0 \leq \alpha_i \leq 1$ – весовые коэффициенты важности ($\sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$),

T_{C0}^* , T_{p0}^* , T_{B0}^* , T_{A0}^* – нормированные значения стоимости, времени выполнения, времени восстановления функционирования и времени ликвидации аварии.

2.2 Имитационное моделирование последовательно организованных вероятностных технологических процессов

В соответствии с рисунком 2.1, нахождение ВТПП в каждом из десяти состояний можно представить взаимодействием двух процессов $PR.UZEL$ и $PR.SOST_{ij}$ ($i, j = 1, 10$). Вначале $PR.SOST_{ij}$ ожидает активизации процессом $PR.UZEL$. В момент модельного времени t_0 при запуске $PR.SOST_{ij}$ процессом $PR.UZEL$ передается номер следующего состояния (j). По таблице $TPSOST[ij]$ признаков использования ресурсов в состоянии ij определяется строка признаков ($\pi_{R_{1ij}} \div \pi_{R_{9ij}}$) текущего использования ресурсов. Если $\pi_{R_{Sij}} = 1$, то ресурс номера S заказывается для имитации состояния S_{ij} . В противном случае (при $\pi_{R_{Sij}} = 0$) заказ ресурса не производится. Далее фиксируется время ожидания выполнения состояния ij (τ_{wij}), формируется таблица заказа ресурсов $TZRES[ij]$. Параллельного использования ресурсов нет и, следовательно, нет конкуренции за ресурсы. Ведется только учет расхода ресурсов, предполагая при этом, что для реализации ВТПП ресурсов достаточно. Сформировав строку заказа ресурсов ($R \leq 9$) в $TZRES[ij]$, фиксируется список ресурсов, использование которых в состоянии ij необходимо отобразить и учесть это наличие ресурсов в таблице $SPRES$. Далее осуществляется запуск процессов-имитаторов функций оборудования индивидуального использования.

На следующем шаге алгоритма имитации иницируются процессы-имитаторы оборудования индивидуального пользования. Затем иницируются процессы-имитаторы общего пользования

ресурсов в ij -м состоянии. Процесс имитации при этом переходит в состояние ожидания окончания работы оборудования. Если какой-либо процесс-имитатор оборудования не завершил имитацию, то происходит автостоп процесса $PR.SOST_{ij}$. При каждом завершении имитации своей работы процессы-имитаторы оборудования ($PR.OBIN$ и $PR.KAN$) через управляющую программу моделирования (УПМ) возобновляют работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$. Как только имитация завершена всеми устройствами-имитаторами оборудования, алгоритм процесса по таблице ресурсов $TZRES[ij]$ выбирает функцию распределения $F_{10ij}(\tau)$ длительностей нахождения в состоянии ij . С помощью жребия 3-го типа разыгрывается время τ_{ijl} нахождения процесса в состоянии ij при l -м использовании функции распределения. Определяется момент активизации по времени состояния ij ($t_{aktij} = t_0 + \tau_{ijl}$). Проверяется ситуация: устройства оборудования закончили имитацию раньше момента перехода процесса по времени, разыгранном по функции распределения $F_{10ij}(\tau)$. Если $t_0 \leq t_{akt}$, то определяется величина остатка времени имитации ($t_{ost} = t_{akt} - t_0$). Далее осуществляется имитация нахождения в состоянии ij с помощью оператора квазипараллелизма $WAIT(ij, t_{ost}, D_4, M_i)$. По окончании этой имитации в момент $t'_0 = t_0 + t_{ost}$ УПМ активизирует $PR.SOST_{ij}$, после чего фиксируется статистика τ_{wij} нахождения ВТПП в состоянии ij и осуществляется учет использования ресурсов оборудования. На этом очередной квант выполнения алгоритма процесса $PR.SOST_{ij}$ завершается и производится запуск процесса $PR.UZEL$. Для розыгрыша следующего номера состояния процесса стандартным способом используется матрица $\|p_{ij}\|$ вероятностей переходов модели ВТПП. При этом процесс $PR.UZEL$ возобновляет работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$, переходит в ожидание запуска $PR.UZEL$, и выполнение алгоритма повторяется согласно описанной выше последовательности процедур.

Для тех случаев, когда после состояния ij необходим нестандартный переход на экстремальные состояния, формируется первый указатель ситуации в виде переменной связи с $PR.UZEL$ ($UKAZ = 1$). В тех состояниях, во время имитации которых имела место авария на оборудовании, формируется второй указатель

ситуации в виде переменной связи с $PR.UZEL$ ($\pi_{AV} = 1$). Во всех остальных ситуациях указатели обнуляются ($\pi_{AV} = 0$ и $UKAZ = 0$).

Имитация переходов ВТПП из состояния в состояние в процессе $PR.UZEL$ осуществляется следующим образом. В момент модельного времени t_0 происходит запуск процесса процедурой Монте-Карло l -й реализации ИМ ВТПП. С помощью справочника полумарковской модели $SPMM$ определяются состояния полумарковской модели ВТПП.

При очередном использовании ПММ восстанавливается начальное состояние ПММ в l -й реализации: номер предыдущего состояния ПММ (π_{AV}), указатель на возможность перехода ПММ, розыгрыш по матрице переходных вероятностей ($UKAZ$). Далее повторяется цикл розыгрыша номера следующего состояния ПММ по матрице $\|p_{ij}\|$, который затем многократно выполняется для случая, когда $V_l > 0$ (т. е. при повторном запуске ПММ). По матрице $\|p_{ij}\|$ для существующего номера текущего состояния (i) формируется номер следующего состояния (j), который запоминается в справочнике $SPMM$. Далее с помощью процедуры выбора осуществляется либо стандартный запуск процессов номера $0 \leq j \leq 6$ (согласно матрице $\|p_{ij}\|$), либо нестандартный запуск процессов ($j \geq 7$). Такими процессами, включаемыми по значениям характеристик предыдущего состояния ($UKAZ$) и указателя на наличие аварийной ситуации ($\pi_{AV} = 1$), являются имитаторы состояний: ликвидации аварий ($PR.SOST_{i7}$); перехода на общую профилактику ($PR.SOST_{i8}$); одиночного резервирования ($PR.SOST_{i9}$); общего резервирования оборудования ($PR.SOST_{i10}$). Подобным образом активизируется один из процессов номера ($j = 1 \div 10$). Далее следуют проверки условия завершения l -й реализации и выполнения условия $l \leq N_M$, где N_M – количество реализаций ИМ ПММ. Если условия завершения l -й реализации имитации согласно процедуре Монте-Карло не выполняются, то процесс $PR.UZEL_j$ останавливается и переходит в состояние ожидания повторного запуска процессом $PR.SOST_{ij}$. Если в ходе имитации процесса $PR.SOST_{ij}$ одним из процессов $PR.OBIN_{r1}$ или $PR.OBOP_{r2}$ был выработан признак «произошла авария», то этот факт указывается в переменной связи

($\pi_{AV} = 1$). Вторая глобальная переменная связи процессов $PR.UZEL_j$ и $PR.SOST_{ij}$ принимает значение $UKAZ = 1$, показывая, что по завершении $PR.SOST_{ij}$ имитации переходит на стандартную смену процессов, согласно матрице переходных вероятностей $\| p_{ij} \|$.

Во всех остальных случаях в глобальной переменной связи $UKAZ$ содержится заказ на переход к нестандартным состояниям ПММ: ликвидации аварий ($PR.SOST_{i7}$), перехода на общую профилактику ($PR.SOST_{i8}$), одиночного резервирования ($PR.SOST_{i9}$) или общего резервирования оборудования ($PR.SOST_{i10}$).

В базе данных процесса $PR.UZEL_j$ (TBD) хранится информация о структуре полумарковского процесса: по адресу α_4 хранится матрица вероятности перехода ПММ из состояния в состояние $\| p_{ij} \|$; по адресу α_2 хранится функция распределения $F_0(v)$ числа смен состояний ПММ, по которой формируется число v_l смен состояний ПММ в l -й реализации; по адресу α_3 находится вектор вероятностей переходов в конечное состояние ($v_k = \{ p_{k1}, \dots, p_{km} \}$); по адресу α_1 находится вектор вероятностей начального состояния ($v_{0H} = \{ p_{01}, \dots, p_{0m} \}$).

2.3 Темы для реферирования

2.3.1 Информационные модели при управлении

2.3.2 Модели в адаптивных системах управления

2.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Классификации языков моделирования
- 2) Машинный эксперимент
- 3) Перспективы развития методов и средств моделирования систем в свете новых информационных технологий
- 4) Дискретно-стохастические модели (Р-схемы)

3 Имитация функционирования технологических процессов с последовательной организацией

3.1 Агрегаты-имитаторы оборудования и ресурсов производственной системы

Функционирование оборудования в ВТПП моделируется путем отображения взаимодействия процесса $PR.SOST_{ij}$ с процессами-имитаторами оборудования трех типов: индивидуального использования ($PR.OBIN_{r_1}$), общего использования ($PR.OBOP_{r_2}$), моделирования использования каналов на общем оборудовании ($PR.KAN_{r_1}$). Предполагается, что в каждом ij -м состоянии ПММ устройства-имитаторы оборудования индивидуального и общего использования (соответственно номера r_1 и r_2) могут находиться в ИМ ВТПП в четырех состояниях: нормальной работы, самовосстанавливающегося отказа функционирования, приводящего к аварии простого отказа функционирования, сложного отказа функционирования. Вначале очередного цикла использования процесс $PR.OBIN_{r_1}$ находится в ожидании инициализации его процессами $PR.SOST_{ij}$. Запоминается номер состояния ij , захватившего оборудование индивидуального использования номера r_1 , и устанавливается признак «нормальная работа» оборудования ($\pi_{zak} = 0$). Из справочника $SPZR$ выбирается строка, содержащая следующую информацию: количество n_{1ij} устройств типа $R=1$, используемых в состоянии ij , адреса α_{1ij} характеристик функционирования оборудования, адреса β_{1ij} конкретных времен использования оборудования в l -й реализации по процедуре Монте-Карло. Далее из таблицы $TZRES$ запросов ресурса для $R=1$ по адресу α_{1ij} выбирается величина заказа времени τ_{ijkl} использования ресурса в l -й реализации ПММ.

Из базы данных $BDOB_1$ для ресурса $R=1$ определяется функция распределения $F_{11r_1}(\tau)$ интервала времени безотказной работы ресурса с номером r_1 . По этой функции распределения разыгрывается значение k -го интервала безотказной работы устройства в l -й

реализации ПММ (τ_{BOKl}). Определяется момент возможного отказа устройства $t'_{OT} = \tau_{BOKl} + t_0$ и проверяется условие наступления отказа устройства r_1 (т.е. выполняется ли неравенство $\tau_{BOKl} < \tau_{ijl}$). Если отказ не наступает, то это означает нормальное функционирование устройства r_1 ($SOST=1$). При $SOST=1$ в таблице $TSVM_1$ устанавливаются в нуль значения дополнительных стоимостей реализации ВТПП из-за отказов оборудования ($\Delta C_{VO} = 0$; $\Delta C_{AV} = 0$; $\Delta C_{\tau_{AV}} = 0$). Время имитации выполнения процесса равно заказанному значению $\tau_{wait} = \tau_{ijl}$. Учитывается время наработки устройства, путем суммирования в таблице $SISPRES_1$ значений τ_{wait} и подсчета числа фактического использования устройства оператором $WAIT(\tau)$, по его окончании процесс $PR.SOST_{ij}$ активизируется с помощью оператора продолжения $CONT(ij)$. При этом процесс $PR.OBIN_n$ фиксирует автоматическую остановку, означающую, что процесс готов к выполнению заказов другого процесса $PR.SOST_{ij}$, и переходит в состояние ожидания запуска последующего цикла его использования. Если же во время проверки устанавливается возможность отказа функционирования ($SOST_n = 2$), то осуществляется розыгрыш по функции распределения $F_{12n}(\tau)$ длительности интервала восстановления τ_{VOKl} и по функции распределения $F_{13n}(\Delta C)$ стоимости восстановления работ ΔC_{VOKl} . Запоминается ΔC_{VOKl} в таблице $TSVM_1$ и вычисляется время недоработки устройства в исправном состоянии из-за отказа, которое также запоминается в этой таблице. Далее, на основании информации базы данных $BDOB_1$, определяется возможность срабатывания жребия вероятности p_{avn} простой аварии и p_{savn} сложной аварии. После проверки значений этих двух вероятностей определяется тип состояния отказа: простой отказ ($SOST=2$), простая авария ($SOST=3$) или сложная авария ($SOST=4$). В случае простого отказа функционирования вычисляется новое время имитации использования устройства, которое является суммой недоработанного времени ($\Delta\tau$), времени восстановления (τ_{VOKl}) и повторного выполнения заказа. Формируется время функционирования оборудования по формуле: $\tau_{wait} = \tau_{ijl} + \tau_{VOKl} + \tau_{AVkl} + \Delta\tau$. Далее алгоритм функционирования выполняется аналогично нормальному циклу имитации работы

устройства индивидуального пользования. В случае сложной аварии из таблицы $BDOB_1$ выбирается функция распределения дополнительной стоимости ликвидации $F_{16\eta}(\Delta C)$. По этой функции распределения разыгрывается величина дополнительной стоимости ликвидации аварии ΔC_{AVkl} , которое заносится в таблицу $TSVN[r_1]$; там же запоминается признак состояния «сложная авария» ($\pi_{AV} = 3$). Формируется остаток времени $\Delta\tau_1 = \tau_{VOKl} + \Delta\tau$ работы оборудования до вызова последовательности процедур $\{PR.PROC_k\}$ и имитируется выполнение этих операций. Далее из таблицы $TOBPR_1$ выбирается список процедур $SPPR$, в котором указывается количество элементов списка (m_1) и номера (k_r) процессов процедур ликвидации аварии. В цикле длиной m_1 иницируется запуск процесса $PR.PROC_{k_r}$, после завершения которого выполняется повторение имитации операции функционирования оборудования индивидуального пользования.

Процесс $PR.OBOB_{r_2}$ в начале l -й реализации процедуры Монте-Карло иницируется соответствующей подпрограммой. Далее очищается содержимое таблицы $TSVM_1$, относящееся к устройству с номером r_2 , и выбирается функция распределения $F_{11r_2}(\tau)$ длительности времени безотказной работы устройства. По функции $F_{11r_2}(\tau)$ разыгрывается значение времени τ_{BOKl} при k -й длительности времени безотказной работы устройства в l -й реализации ВТПП. В таблице связи $TSVM_2$ с $PR.SOST_{ij}$ устанавливается признак «нормальный режим» ($REG_{r_2} = 1$). Учитывается в индикаторах устройства (ind_{r_2}) и в справочнике $SISPRES_2$ время наработки устройства номера r_2 (T_{nr}). Там же подсчитывается число переходов устройства номера r_2 в рабочее состояние. Имитируется интервал времени безотказной работы длительностью τ_{BOKl_2} , во время которого процесс $PR.OBOB_{r_2}$ номера r_2 находится в состоянии работоспособности. С вероятностью $P_{OTK_{r_2}}$ имитируется наличие отказа функционирования процесса номера r_2 . Если отказа не происходит, то возобновляется цикл имитации следующего интервала времени работоспособности устройства с номером r_2 . При отказе устройства разыгрывается тип отказа: простой отказ ($REG_{r_2} = 2$), простая авария ($REG_{r_2} = 3$) или сложная авария ($REG_{r_2} = 4$). При

обычном отказе ($REG_{r_2} = 2$) из базы данных выбираются значения функций распределения $F_{12r_2}(\tau)$ и $F_{13r_2}(\Delta C)$ для определения длительности восстановления работоспособности устройства с номером r_2 и стоимости этого восстановления. По этим функциям разыгрываются k -е значения времени и стоимости восстановления τ_{VOKl} и ΔC_{VOKl} в l -й реализации ПММ. В таблице $TSVM_2$ учитываются значения этих характеристик. Далее имитация продолжается аналогично режиму нормальной работы $PR.OBOB_{r_2}$. В случае простой аварии ($REG_{r_2} = 3$) из базы данных выбираются значения функций распределения $F_{14r_2}(\tau)$ и $F_{15r_2}(\Delta C)$ для определения длительности восстановления работоспособности устройства и стоимости этого восстановления. По этим функциям распределения разыгрываются значения времени и стоимости восстановления τ_{ABkl} и ΔC_{ABkl} в l -й реализации ПММ. Учитываются также в таблице $TSVM_2$ значения этих характеристик. Далее имитация продолжается аналогично режиму нормальной работы $PR.OBOB_{r_2}$. В том случае, когда отказ функционирования устройства с номером r_2 приводит к сложной аварии ($REG_{r_2} = 4$), из базы данных выбирается функция распределения $F_{16r_2}(\Delta C)$ стоимости операции, по которой затем разыгрывается стоимость запуска последовательности процессов ликвидации аварии ($\{PR.PROC_k\}$). Далее из таблицы $TOBPR_2$ выбирается список процессов-имитаторов процедур ликвидации сложной аварии $SPPR_2$. По этому списку в цикле последовательно запускается каждый процесс $PR.PROC_k$. По его окончании глобальная переменная связи ($\pi_{av} = 1$) с $PR.SOST_{ij}$ указывает на факт наличия состояния ликвидации сложной аварии ($SOST = 4$) при имитации функций $PR.OBOB_{r_2}$.

Процесс $PR.KAN_{r_2}$ находится в состоянии ожидания его запуска процессом $PR.SOST_{ij}$. При активизации распаковывается строка оператора ожидания запуска $PR.KAN_{r_2,k}(r_2, k, ij)$: здесь k – номер канала устройства с номером r_2 , ij – индекс процесса $PR.SOST_{ij}$. Далее в таблице $TSVM_2$ устанавливается признак «нормальная работа» ($\pi_{AV} = 0$). Из таблицы $TZRES$ по значениям ij и r_2 определяется размер требуемого места V_{Rijl} на общем ресурсе с

номером r_2 . Из таблицы $TRFO$ связи $PR.KAN_{r_2}$ с $PR.OBOB_{r_2}$ определяются номер режима (REG_{r_2}) функционирования устройства с номером r_2 и значение τ_{akt} момента следующей активизации процесса. Определяется длительность $\tau_{ijl} = V_{Rijl} \cdot \theta_2$ использования ресурса r_2 по величине размера ресурса. Далее ведется поиск нужного индекса ij в таблице состояния каналов $TBKAN[r_2, S]$. Если $PR.OBOB_{r_2}$ находится в рабочем состоянии, то имитируется время выполнения процесса $PR.KAN_{r_2}$ длительностью τ_{ijl} . Ведется учет времени и стоимости наработки канала k -го номера на устройстве оборудования общего пользования. В том случае, когда $PR.OBOB_{r_2}$ находится в нерабочем состоянии, процесс $PR.KAN_{r_2}$ ожидает перехода $PR.OBOB_{r_2}$ в рабочее состояние ($REG_{r_2} = 1$). После завершения имитации использования места на $PR.OBOB_{r_2}$ процесс $PR.KAN_{r_2}$ инициирует продолжение процесса $PR.SOST_{ij}$, после чего $PR.KAN_{r_2}$ переходит в состояние ожидания его запуска [4].

Временные диаграммы алгоритма выполнения процессов-имитаторов оборудования при отказах и авариях приведены на рисунке 3.1.

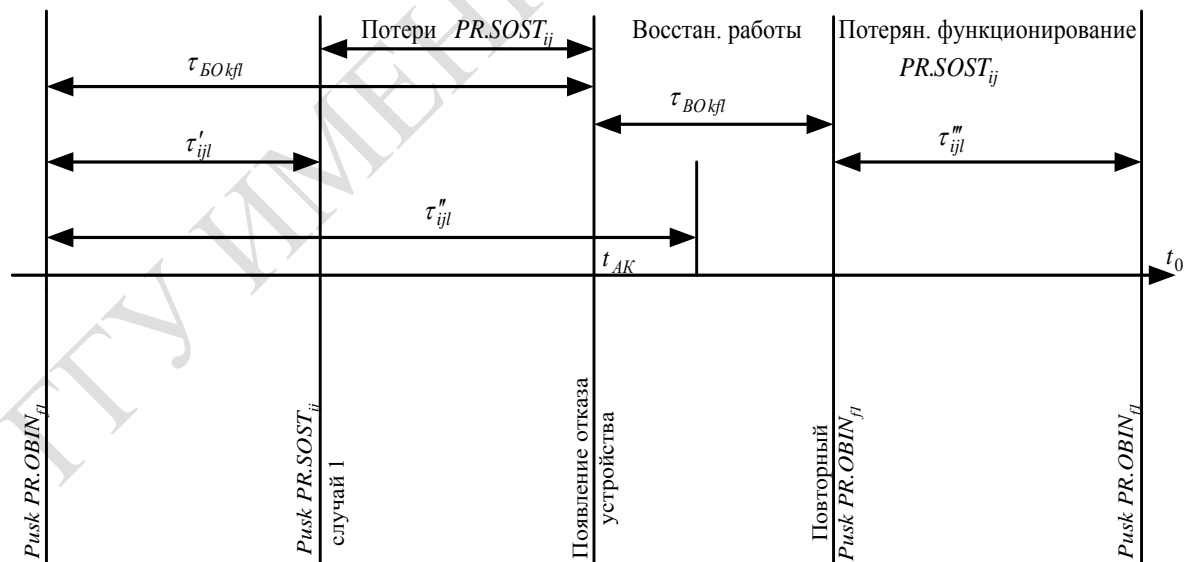


Рисунок 3.1 – Временная диаграмма алгоритма выполнения агрегата $PR.OBIN_{r_1}$ или $PR.OBOB_{r_2}$ при простых отказах

3.2 Программные средства автоматизации проектного моделирования последовательных технологических процессов

Для реализации ИМ ВТПП последовательного типа используется первая версия системы автоматизации моделирования (САИМ). Технология использования САИМ реализуется последовательностью следующих этапов создания, испытания и использования ИМ ВТПП.

На *этапе 1* задается структура ВТПП. Вначале формируется таблица параметров $PR.SOST_{ij}$. Создается таблица коммутации процессов, в которой все элементы упорядочены по возрастанию номеров процессов. Структура сигналов Sgd формируется в режиме диалога. Для отображения специфики переходов ПММ из состояния в состояние задаются: матрица вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$, векторы вероятностей начального и конечного состояний ПММ $\{v_0\}$ и $\{v_k\}$, функция распределения количества смен состояний $F_0(v_l)$. Для отображения надежностных характеристик оборудования ВТПП задаются матрицы: времени наработки оборудования $\|Q_{nr_{ij}}\|$; нахождения функций условного распределения времени пребывания ВТПП в текущих состояниях $\|F_{1ij}(\tau)\|$; функций условного распределения стоимости выполнения ВТПП $\|F_{2ij}(C)\|$; вероятностей возникновения аварий на оборудовании номера k в j -м состоянии $\|P_{avkj}\|$; длительностей безотказной работы k -го устройства оборудования $\|F_{3ij}(\tau_{BO})\|$; длительностей интервала восстановления работоспособности номера k $\|F_{4ij}(\tau_{VO})\|$; интервалов ликвидации аварийной ситуации на устройстве k в j -м состоянии ВТПП $\|F_{5ij}(\tau_{AV})\|$.

На *этапе 2* организуется натурный эксперимент для получения исходной информации и последующей проверки адекватности ИМ реальному ВТПП. Для тех параметров ПММ, которые трудно измерить, используются экспертные оценки их значений. Основную трудность в подготовке исходной информации представляет определение вероятностных характеристик $PR.SOST_{ij}$. В тех случаях, когда не удается найти аналитический вид для аппроксимирующих

функций распределения, используется табличная форма их представления, которая стандартизована для всех типов параметров.

На *этапе 3* осуществляется запись параметров $PR.SOST_{ij}$ в базу данных модели (BDM). При каждой записи значений параметров происходит их преобразование во внутреннее представление, контроль корректности вводимых значений и вывод результатов контроля для устранения ошибок в описании ВТПП. Взаимодействие исследователя с САИМ осуществляется путём использования программы «меню» в режиме «вопрос–ответ». В итоге этих операций синтаксические ошибки описания ПММ будут исправлены.

На *этапе 4* таблицы коммутации $PR.SOST_{ij}$ с $PR.UZEL_j$ проверяются на соответствие входов и выходов процессов. Любое дублирование немедленно фиксируется, и формируется соответствующее сообщение исследователю на дисплей. По окончании этапа исследователю выдаётся структура таблиц коммутации, в которой отсутствуют синтаксические ошибки.

На *этапе 5* происходит инициализация и верификация базового варианта ИМ. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и оборудования ВТПП. Указываются условия окончания имитации, число реализаций процедуры Монте-Карло, условия хранения и обработки информации, места хранения результатов ИЭ. Проводится начальный запуск имитации базового варианта ИМ. При этом имеется возможность в режиме «пошагового» выполнения рассмотреть переходы всех процессов из состояния в состояние с автоматической документацией этого просмотра. В результате обеспечивается верификация ИМ ВТПП. Несмотря на то, что не существует формальных процедур верификации ПММ, в составе САИМ имеются средства автоматизации наиболее трудоёмких процедур верификации ВТПП.

На *этапе 6* осуществляется испытание и исследование ИМ. Все шаги этого этапа стандартизованы на основе известных методик испытания ИМ сложных систем. Вначале оценивается ошибка имитации (P_{AV2k}), представляющая собой максимальный процент ошибок откликов модели. Определяется длина переходного периода имитации (T_{Sim}), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех других переходит в установившееся состояние. Важной процедурой испытания является проверка «устойчивости» режима имитации. Проверяется отсутствие переходов ИМ ВТПП в такой режим, когда у любого из откликов ИМ

возможен рост амплитуды его изменения с ростом модельного времени P_{AV1k} . Следующим шагом испытаний ИМ является проверка «чувствительности» откликов к изменениям параметров моделирования. Каждая составляющая вектора параметров модели (X_k) изменяется в диапазоне от минимального (X_k^-) до максимального (X_k^+) значений, а остальные компоненты вектора параметров C_{AV2k} устанавливаются в середине интервала (τ_{AV2k}). Определяется приращение компонентов вектора откликов ΔY_h % и проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов меньше ε %, то считают что ИМ не чувствительна к вариациям вектора параметров. Те параметры C_{AV1k} , которые оказались не «чувствительными», можно в дальнейшем исследовании исключить.

Последним шагом этапа испытания является проверка адекватности ИМ. Сравниваются средние значения откликов имитационной модели и реального ВТПП. При этом используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений h -го отклика ИМ и реального ВТПП, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента.

На *этапе 7* организуется серия многопрогонных ИЭ согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый ИЭ представляет l -ю реализацию ИМ. После завершения N реализаций ИМ ВТПП в базе данных уже сформированы выборки статистик l -х реализаций. После завершения N опытов на ИМ из статистик имитации вычисляются отклики имитаций. Кроме того, к концу этапа 7 в базе данных САИМ хранятся графики использования материалов и комплектующих изделий, а также диаграммы использования ресурсов и оборудования ВТПП.

На *этапе 8* с помощью подсистемы *PS.OBRABOT* из выборок, хранящихся в базе данных, формируются графики и диаграммы, определяются математические ожидания и дисперсии откликов имитации. С помощью подсистемы *PS.VIZUAL* графики и диаграммы выдаются на печать.

На *этапе 9* все диаграммы использования ресурсов ВТПП сопоставляются в едином масштабе изменения модельного времени t_0 . По этим графикам и временным диаграммам определяются диапазоны расхода ресурсов ВТПП. Результатом сопоставления

является отбраковка тех режимов, которые требуют много ресурсов для своей реализации.

Наконец, на *этапе 10*, с помощью подсистемы τ_{AV1k} анализируются варианты организации ВТПП, при этом попутно решаются следующие задачи его проектного моделирования:

1. Оценка времени реализации ВТПП при имеющихся составе ресурсов и структуре матрицы переходов из состояния в состояние.

2. Оценка стоимости организации вариантов ВТПП и определение регрессионной зависимости стоимости и времени их реализации.

3. Анализ влияния надёжных характеристик оборудования ВТПП на время и стоимость реализации технологического цикла.

4. Определение вероятностных характеристик реализации ВТПП при известной структуре и надёжности оборудования.

3.3 Темы для реферирования

3.3.1 Программное моделирование информационных систем

3.3.2 Методология машинного моделирования

3.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Общие вопросы моделирования
- 2) Стратегическое планирование экспериментов
- 3) Тактическое планирование экспериментов
- 4) Непрерывно-стохастические модели (Q-схемы)

4 Моделирование систем управления вероятностными технологическими процессами

4.1 Системы управления как субъект исследования сложных технологических комплексов

Системы управления вероятностными технологическими процессами производства представляют собой совокупность следующих типов компонентов: элементов синхронизации вероятностного процесса, исполнительных элементов, сигнально-индикаторных элементов и элементов для передачи управляющих воздействий [5]. В зависимости от цели управления вероятностным процессом исследователем формируется соответствующая блок-схема взаимодействия этих компонентов, которая является уникальной для каждой конкретной системы управления (СУ) ВТПП. Эта блок-схема формируется из вышеперечисленных стандартных компонентов СУ, в связи с чем необходимо отметить ряд связанных с этим существенных особенностей.

Первой особенностью систем управления является вероятностный характер взаимодействия компонентов сложной системы между собой (и, соответственно, вероятностный характер послыки СУ управляющих сигналов на систему приема индикаторной информации от ее компонентов). При этом управляющие сигналы в такой сложной системе и обратные индикаторные сигналы могут быть групповыми во временном потоке взаимодействий системы управления и производственной системы. Это означает нарушение ординарности потока сигналов управления в обоих направлениях. Функции распределения значений интервалов между соседними поступлениями сигналов могут быть произвольными, причем на практике удается построить только табличные функции распределения, не поддающиеся, как правило, аппроксимации стандартными распределениями. Эти обстоятельства не позволяют рассматривать СУ ВТПП как системы массового обслуживания.

Второй особенностью является наличие ограничений на ресурсы при отображении динамики взаимодействия компонентов СУ с элементами СС. При этом необходимо отметить сложно организованный характер их взаимодействия. Как правило, любое

управляющее воздействие на сложную систему является результатом анализа ситуации в сложной системе и состояния системы управления вероятностным процессом, выполненным путем алгоритмической обработки индикаторной информации. Это обстоятельство определяет необходимость синхронизации компонентов СУ ВТПП с поведением элементов сложной системы. Синхронизация организуется с помощью нескольких типов стандартных элементов управления: объединения управляющих потоков (SBOR), разделения или умножения управляющих воздействий (RAZD), выполнения функциональных действий (ISFD), распределения общих ресурсов (RASP), индикации состояний (INDS) и сигнализации завершения функций (SIGN). Возможность компоновки любой схемы управления или регулирования поведением СС с помощью сочетания различных типов элементов и сигналов, поступающих от комбинаций перечисленных стандартных элементов СУ ВТПП, является ее *третьей особенностью*.

Четвертой особенностью систем управления является необходимость совмещения результатов технологического моделирования с данными имитации взаимодействия функций компонентов системы управления для основных элементов сложной системы. Под технологическим моделированием подразумевается имитация функций системы управления и согласование во времени динамики взаимодействия компонентов СС для осуществления прогноза результатов этого взаимодействия. Функциональное моделирование обычно используется при регулировании ВТПП, в ходе которого стремятся ограничить значения переменных управления U_n ($n = \overline{1, N}$), для того, чтобы они находились в заданных диапазонах их изменения ($\Delta i_{nj} \leq \Delta i_{n\text{exp}}$, где $\Delta i_{n\text{exp}}$ – экспертное значение границы диапазона регулирования состояний ВТПП).

Пятой особенностью является наличие двух типов элементов синхронизации. Первый тип синхронизаторов представляет собой алгоритмически организованную схему совмещения сигналов типа «и», которая на выходе вырабатывает сигналы только после прихода на ее входы самого позднего синхронизирующего сигнала. Второй тип синхронизаторов является алгоритмически организованной схемой совмещения сигналов типа «или», которая вырабатывает на выходе сигналы после прихода на один из ее входов первого из входящих сигналов. *Шестой особенностью* СУ ВТПП является специфика информационного содержания выходных сигналов для

синхронизаторов обоих типов. При этом различаются три типа сигналов:

- формируемые в результате нормального выполнения ($Sign_{nor}$) элементов ISPL (когда не было отказов функционирования оборудования, используемого исполнительным устройством);

- формируемые ISPL в случаях, когда имел место отказ функционирования оборудования (обозначаемые $Sign_{ot}$);

- формируемые в случаях, когда имела место авария функционирования оборудования ($Sign_{avr}$);

- формируемые ISPL в случаях, когда имел место выход контролируемой переменной за границы допустимых значений ($Sign_{dp}$);

- формируемые ISPL в случае совпадения отказов оборудования и выхода контролируемого параметра за границы диапазона его изменений ($Sign_{otdp}$).

Алгоритмы элементов-синхронизаторов реагируют на все сочетания входных сигналов, активизируя на выходах исполнительных устройств операции, которые ликвидируют последствия отказов и аварий на устройствах и корректируют значения множества глобальных переменных управления $\{U_j, j = \overline{1, N}\}$. Таким образом, хотя система управления вероятностным процессом организована достаточно сложным образом, она формируется при этом ограниченным набором типов составляющих элементов. Поэтому моделирование таких систем, как правило, возможно лишь с использованием имитации. Отметим также, что имитация систем управления вероятностными процессами представляет собой ресурсоемкий способ исследования, который требует для реализации имитационных моделей соответствующих программных средств автоматизации имитационного эксперимента.

Метод состоит в поэтапном применении агрегатного способа формализации, создании и испытании имитационных моделей динамики управления оборудованием ВТПП, разработке и эксплуатации типовых имитационных моделей систем управления. Метод основывается на использовании правил формализации процессов в сложных системах для модифицированного агрегатного способа имитации. Предлагаемые правила формализации содержательного описания СУ ВТПП являются средствами малой автоматизации, позволяющие облегчить реализацию имитационных

моделей систем управления на основе библиотеки универсальных агрегатов-имитаторов элементов СУ и оборудования ВТПП.

системы с оборудованием ВТПП. Исследование динамики взаимодействия системы управления с оборудованием реализуется за одиннадцать этапов.

На *этапе 1* осуществляется формализация СУ ВТПП на основе агрегатного способа имитации для представления функций различных цепей управления СУ ВТПП и отображения связей с устройствами-имитаторами оборудования с помощью системы управляющих сигналов, индикаторных сигналов и путем использования глобальных переменных регулирования состоянием ВТПП. Удалось выделить два типа элементов синхронизации и пять типов элементов, исполняющих операции воздействия на устройства оборудования. Для отображения связи системы управления с внешней средой ВТПП предложено использовать универсальные агрегаты-инициаторы ($AGINSU_{ij}$) функционирования СУ ВТПП. В качестве элементов, на которых завершается выполнение различных цепей управления, инициированных внешними воздействиями, используются специальные агрегаты завершения управляющих воздействий ($AGFISU_{ij}$).

На *этапе 2* осуществляется разработка алгоритмов компонентов СУ ВТПП. Каждый тип агрегатов представляет собой сложным образом организованные схемы с универсальным алгоритмом формирования сигналов управления на основе инициализации их работы соответствующими входными сигналами. Агрегаты, имитирующие элементы синхронизации СУ ВТПП, являются многополюсными, остальные типы агрегатов являются двухполюсными (с одним входным и одним выходным сигналами).

Программирование и отладка алгоритмов агрегатов осуществляется на *этапе 3* с помощью системы автоматизации моделирования. Программы агрегатов-имитаторов основных элементов СУ ВТПП после завершения отладки помещаются в библиотеку САИМ-2. Отладка алгоритмов агрегатов автоматизирована за счет средств системы автоматизации моделирования. Все программы агрегатов являются реентерабельными, что существенно сокращает объем имитационных моделей, хранящихся в библиотеке САИМ-2, и экономит объем оперативной памяти программы имитационной модели.

На *этапе 4* осуществляется верификация ИМ СУ ВТПП. Верификация является неформальной процедурой и каждый раз

должна учитывать состав и структуру системы управления. Универсальный характер типов агрегатов существенно облегчает отладку алгоритмов функционирования элементов ИМ СУ. Однако верификация имитационной модели является процедурой уникальной. Поэтому объем работ на четвертом этапе зависит от сложности структуры и состава СУ ВТПП.

Для получения исходной информации о составе и структуре реальной системы управления на *этапе 5* проводятся натурные эксперименты с компонентами СУ или элементами всего комплекса, включающего в себя ВТПП, систему управления с элементами ее связей с внешней средой и оборудованием. Натурный эксперимент на реальном ВТПП проводится согласно плану экспериментов с помощью средств обработки реальной статистики, имеющихся в САИМ-2. В ходе НЭ формируется информация, необходимая для «запитки» имитационной модели, собирается статистика для проверки адекватности модели реальной системе управления. Результаты натурального эксперимента запоминаются в базе данных САИМ-2 и в дальнейшем используются на последующих этапах исследования СУ ВТПП.

На *этапе 6* параметризованные модели агрегатов снабжаются фактической информацией, хранящейся в базе данных САИМ-2. Кроме того, осуществляется «запитка» имитационной модели исходной информацией, которая была получена на этапе 5. С помощью средств САИМ-2 эта операция автоматизирована. В результате «запитки» информацией универсальные заготовки ИМ превращаются в версию ИМ СУ ВТПП, для которой необходимо провести испытание и исследование свойств полученной имитационной модели.

На *этапе 7* реализуется серия исследований технологических свойств ИМ и испытание вариантов имитационных моделей СУ ВТПП. Этап реализуется следующей последовательностью шагов: оценка точности ε , оценка длины переходного периода T_{pp} , проверка «устойчивости имитации», оценка чувствительности откликов η_n к модификациям параметров модели, проверка адекватности ИМ реальной СУ ВТПП. Если в имитационной модели на этапе 7 выявляются ошибки, то предусмотрен возврат на этап верификации. При повторной верификации, в случае выявления характера ошибок, возможен возврат на любой из этапов 1-3. Таким образом, версия ИМ СУ ВТПП, которая прошла этап испытания, помещается в библиотеку

имитационных моделей. Она готова для дальнейшего использования на этапах эксплуатации (от этапа 8 до этапа 11).

На *этапе 8* осуществляется серия N имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло. Каждый ИЭ представляет собой одну реализацию процедуры Монте-Карло, в ходе которой осуществляется имитация агрегатной модели с последующей записью статистики имитации в базе данных модели.

Обработка статистики имитации и вычисление откликов моделирования осуществляется на *этапе 9*. Исходная статистика имитации, записанная N раз на этапе 8, считывается из базы данных имитационной модели, и затем отклики модели усредняются. Результаты обработки статистики, полученные на этапе 9, также запоминаются в базе данных имитационной модели.

На *этапе 10* проводится комплексный анализ статистики имитации динамики управления оборудованием ВТПП. Отделение этапа имитации от этапа анализа результатов имитации позволяет оперативным образом исследовать различные стратегии организации управления ВТПП.

Как видим, исследование динамики управления в СУ ВТПП разделено на три последовательных этапа: на этапе 8 осуществляется собственно имитация СУ ВТПП и запись полученной информации в базу данных, на этапе 9 выполняется статистическая обработка результатов имитации и на этапе 10 проводится анализ результатов моделирования.

Наконец, на *этапе 11*, осуществляется принятие проектных решений по составу и структуре СУ ВТПП. При этом используются классические процедуры принятия решений в условиях неопределенности и риска.

В зависимости от результатов анализа данных ИЭ, исследователь либо удовлетворяется полученной информацией и завершает использование модели, либо, при отрицательном результате анализа, возвращается на любой из предыдущих этапов для ликвидации неточностей или исправления ошибок в структуре имитационной модели системы управления ВТПП.

4.2 Формализация систем управления вероятностных технологических процессов производства

Анализ особенностей СУ ВТПП позволил установить, что имитационное моделирование взаимодействия элементов систем управления и компонентов оборудования вероятностных процессов производства [2] можно осуществить на основе составления блок-схем синхронизации их функционирования. Элементами такой синхронизации являются:

– синхронизатор первого типа $SLAST_k$ ($k = \overline{1, N}$) взаимодействия нескольких микротехнологических операций $MTXO_{ij}$ (i и j – номера синхронизаторов соответственно на входе и выходе $MTXO_{ij}$), функционирующий по логической схеме совпадения «и»;

– синхронизатор второго типа $SFIRST_k$ ($k = \overline{1, N}$) взаимодействия нескольких $MTXO_{ij}$, функционирующий по логической схеме совпадения «или»;

– элементы $INDS_{0j}$ СУ ВТПП, являющиеся инициаторами цикла его функционирования с интенсивностью λ_{0j} и формирования воздействий на вероятностный процесс через устройства оборудования (здесь j – номера элементов-синхронизаторов $MTXO_{ij}$, которые иницируется данными элементами);

– элементы $INDF_{0i}$ СУ, на которых завершаются цепочки управления выполнением функций ВТПП (где i – номер индикатора-предшественника данному элементу);

– исполнитель $ISPF_{ij}$ функциональных действий микротехнологических операций $MTXO_{ij}$, иницируемый синхронизатором номера i и посылающий сигнал на синхронизатор номера j ;

– исполнитель $CORF_{ij}$ функциональных действий, корректирующий вектор глобальных переменных U_k при выходе за границы допустимых значений его компонентов; здесь i и j – номера элементов синхронизации соответственно на входе и выходе $CORF_{ij}$;

– исполнитель $LICV_{ij}$ функциональных действий, ликвидирующий последствия аварии оборудования ВТПП, имевшей

место перед его выполнением, и приводящий СУ ВТПП в нормальное состояние (i и j – номера элементов синхронизации соответственно на входе и выходе $LICV_{ij}$);

– универсальный элемент-исполнитель $UNIV_{ij}$, который может одновременно корректировать значения компонентов вектора U_k и ликвидировать последствия аварий на оборудовании ВТПП;

– индикатор состояний оборудования $INDS_{ij}$ вероятностного процесса; в отличие от остальных элементов управляющих воздействий на ВТПП не посылает.

Взаимодействие исполнительных элементов с вероятностным процессом осуществляется с помощью множества устройств оборудования индивидуального ($OBIN_{r_1}$) и общего ($OBOR_{r_2}$) пользования (r_1 и r_2 – номера устройств соответственно индивидуального и общего пользования). Исполнительные элементы СУ ВТПП с индексом ij представляют собой двухполюсники, на входы которых приходят сигналы от элементов синхронизации $SLAST_i$ или $SFIRST_i$, а на выходах формируются сигналы, поступающие на аналогичные элементы синхронизации с номером j .

Связи между элементами СУ осуществляются с помощью комбинации сигналов $\{Sgn_{ij}\}$ сложной структуры, каждый из которых идентифицируется следующими характеристиками:

– индексом ij , показывающим направление его передачи (от i -го к j -му исполнительному элементу);

– булевым признаком pt_{ij} прихода сигнала в момент времени t_{ij} , принимающим значение $pt_{ij} = 1$ в момент прихода; в остальные моменты модельного времени t_{mod} (для $t_{mod} \leq t_{ij}$ $pt_{ij} = 0$) элемент синхронизации находится в состоянии ожидания сигнала;

– признаком ps_{ij} типа сигнала, принимающим одно из четырех значений ($ps_{ij} = '00'$ – нормальное выполнение исполнительного элемента перед посылкой сигнала на один из входов элемента синхронизации; $ps_{ij} = '01'$ – во время выполнения исполнительного элемента имела место ликвидация аварии на устройствах оборудования; $ps_{ij} = '10'$ – произошел выход компонентов переменной управления U_j за допустимые границы диапазона значений; $ps_{ij} = '11'$ – обе чрезвычайные ситуации имели место одновременно).

Для выполнения исполнительного элемента вероятностного процесса с индексом ij в общем случае требуются затраты десяти типов ресурсов (RES) системы:

– множества устройств оборудования $\{OBIN_{r_1}\}$ индивидуального пользования ($RES = 3$); индекс r_1 означает номера устройств оборудования индивидуального пользования, предоставляемого в полное распоряжение исполнительного элемента на время выполнения управляющего воздействия на вероятностный процесс;

– множества устройств оборудования $\{OBOP_{r_2}\}$ общего пользования ($RES = 2$), где r_2 – номера устройств, использующих часть ресурса на устройстве размером $RESI_{r_3}$ совместно с другими исполнительными элементами $ISPL_{ij}$ в течение времени выполнения соответствующего управляющего воздействия UV_{ij} ;

– множества ресурсов индивидуального пользования $\{RESI_{r_3}\}$ ($RES = 3$), где r_3 – номера ресурсов, которые выделяются $ISPL_{ij}$ на время выполнения воздействия UV_{ij} ;

– множества ресурсов общего пользования $\{RESO_{r_4}\}$ ($RES = 4$), где r_4 – номера ресурсов, на которых для $ISPL_{ij}$ отводится место размером V_{4r_4} на время выполнения воздействия UV_{ij} и которое одновременно используется другими элементами $ISPL_{kl}$;

– множества специалистов-исполнителей $\{IS_{r_5}\}$ ($RES = 5$), где r_5 – номера специалистов, индивидуально выделенных $ISPL_{ij}$ на время выполнения управляющего воздействия UV_{ij} ;

– множества бригад исполнителей $\{BRIG_{r_6}\}$ ($RES = 6$), где r_6 – номера бригад, выделенных $ISPL_{ij}$ на время выполнения воздействия;

– множества используемых материалов $\{mt_{r_7}\}$ ($RES = 7$) номера r_7 , выделенных $ISPL_{ij}$ на время выполнения UV_{ij} ;

– множества комплектующих изделий $\{ko_{r_8}\}$ ($RES = 8$) номера r_8 , выделенных $ISPL_{ij}$ на время выполнения воздействия UV_{ij} ;

– стоимости $\{c_{ij}\}$ нормального выполнения $ISPL_{ij}$ ($RES = 9$) любого типа за время выполнения UV_{ij} ;

– времени выполнения $\{\tau_{ij}\}$ управляющего воздействия UV_{ij} ($RES = 10$) для каждого исполнительного элемента $ISPL_{ij}$.

Все перечисленные характеристики ресурсов могут задаваться как детерминированные величины (в виде списков номеров ресурсов или устройств оборудования) или как вероятностные запросы, задаваемые с помощью соответствующих функций распределения.

Под нормальным выполнением исполнительного элемента понимается случай, когда во время выполнения операции управления не происходит отказов оборудования индивидуального и общего пользования. Каждое устройство оборудования номера r , в свою очередь, может находиться в следующих состояниях: безотказного функционирования длительностью τ_{BO_r} , восстановления его работоспособности длительностью τ_{VO_r} и ликвидации аварии длительностью τ_{AV_r} , которая возникает на оборудовании r -го номера с вероятностью P_{avr} после возникновения отказа его функционирования. При восстановлении функционирования оборудования номера r и ликвидации аварии оборудования ВТПП стоимость выполнения технологического цикла, предусмотренного алгоритмом исполнителя, увеличивается соответственно на значения ΔC_{1r} и ΔC_{2r} .

В общем случае параметры выполнения алгоритма элементов-исполнителей $(\tau_{ij}, C_{ij}, \{ko_{r8ij}\}, \{mt_{r7ij}\}, V_{r4}'' , V_{r2}'))$ являются случайными величинами. Списки номеров оборудования, ресурсов, индивидуальных исполнителей и бригад исполнителей являются детерминированными характеристиками для ij -го исполнительного элемента. Параметры функционирования оборудования $(\tau_{VO_r}, \tau_{BO_r}, \tau_{AV_r})$ также являются случайными величинами. Стоимость выполнения алгоритма исполнительных элементов с вероятностью P_{avr} увеличивается на значения ΔC_{1r} и ΔC_{2r} соответственно, являющиеся случайными. Все перечисленные ранее случайные величины перед имитацией должны быть заданы в виде соответствующих функций распределения, которые имеют следующие целевые назначения:

– определяют расход ресурсов ВТПП исполнительным элементом с индексом ij

$$F_{1ij}(\tau), F_{2ij}(C), F_{3rij}(ko), F_{4rij}(mt), F_{5rij}(V'); \quad (4.1)$$

– задают надежностные характеристики устройств номера r ;

$$F_{7r}(\tau_{BO}), F_{8r}(\tau_{VO}), F_{9r}(\tau_{AV}), F_{10r}(\Delta C_1), F_{11r}(\Delta C_2), P_{avr}. \quad (4.2)$$

Таким образом, с помощью функций распределений (4.1) и (4.2) описываются вероятностные характеристики поведения

соответственно исполнительных элементов системы управления и устройств ВТПП. Детерминированные запросы ресурсов каждым исполнителем задаются перед имитацией с помощью множества списков

$$\{r_{1ij}\}, \{r_{2ij}\}, \{r_{3ij}\}, \{r_{4ij}\}, \{r_{5ij}\}, \{r_{6ij}\} \quad (4.3)$$

и определяют индивидуальность каждого исполнительного элемента системы управления.

Элементы синхронизации $SLAST_j$ и $SFIRST_j$ функционируют в следующих режимах: ожидания прихода сигналов от исполнительных элементов $ISPL_{ij}$; срабатывания спусковой функции и инициализации на выходах управляющих сигналов. Если длительность нахождения элементов синхронизации СУ в режиме ожидания может быть произвольной и зависит от операционной обстановки, то режим срабатывания спусковой функции и инициализации управляющих сигналов на выход не имеют продолжительности. Алгоритм выработки управляющих сигналов обоими типами элементов идентичен: оба типа операторов синхронизации ($SLAST_i$ и $SFIRST_i$) являются генераторами сигналов при срабатывании спусковой функции и многополюсниками с различным числом входов (a_i) и выходов (b_i). Допускается любое число входов с номером r , где $r = \overline{1, a_i}$, и выходов с номерами k ($k = \overline{1, b_i}$).

4.3 Темы для реферирования

4.3.1 Моделирование распределенных автоматизированных систем и информационных сетей

4.3.2 Моделирование систем управления в реальном масштабе времени

4.4 Вопросы для самоконтроля

- 1) Классификация систем
- 2) Особенности статистической обработки результатов ЭВМ
- 3) Параметры и характеристики системы
- 4) Сетевые модели (N-схемы)

Список использованных источников

1. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 544 с.
2. Смородин, В. С. Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В. С. Смородин, И. В. Максимей. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. – 369 с.
3. Смородин, В. С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В. С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 105–110.
4. Смородин, В. С. Синтез структуры технологического цикла управляемых производственных систем / В. С. Смородин // Проблемы физики, математики и техники. – № 2 (11). – 2012. – С. 108–111.
5. Ерофеева, Е. А. Автоматизация диспетчерского управления поездной работой на Белорусской железной дороге / Е. А. Ерофеева, А. А. Ерофеев // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту (Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport). – 2012. – № 40. – С. 185–191.

Производственно-практическое издание

Сморodin Виктор Сергеевич
Клименко Андрей Валерьевич

**ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:
МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

Практическое руководство

для магистрантов специальности
1-31 80 09 «Прикладная математика и информатика»

Редактор *В. И. Шкредова*
Корректор *В. В. Калугина*

Подписано в печать __. __. 2014. Формат издания 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. __, __.
Уч.-изд. л. __, __. Тираж 15 экз. Заказ ____.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
ЛИ №02330/0549481 от 14.05.2009.
Ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель