

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

В. С. СМОРОДИН, А. В. КЛИМЕНКО

**ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ

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(076)
ББК 32.973.26-02:30-06с51я73
С 516

Рецензенты:

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

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

Сморodin, В. С.

С 516 Проектное моделирование вероятностных технологических процессов: моделирование управляемых комплексов: практ. рук-во / В. С. Смородин, А. В. Клименко ; М-во образования РБ, Гом. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2014. – 48 с.
ISBN 978-985-439-869-3

В настоящем издании рассматриваются способы и средства анализа, проектирования сложных технических систем, которые используются при создании конструктивного математического и программного аппарата анализа управляемых технологических процессов производства на основе имитационного моделирования, и управления ими.

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

УДК 004. 94:004.383.4:62(076)
ББК 32.973.26-02:30-06с51я73

ISBN 978-985-439-869-3

© Смородин В. С., Клименко А. В., 2014
© УО «Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины», 2014

Содержание

Введение.....	4
1 Моделирование управляемых технологических комплексов...	5
1.1 Особенности моделирования.....	5
1.2 Структура имитационной модели системы управления технологическим процессом производства.....	8
2 Технология имитации управляемых производственных систем	12
2.1 Система автоматизации имитационного моделирования систем управления комплексами.....	12
2.2 Построение имитационной модели системы управления	17
3 Анализ функционирования имитационных моделей систем управления	19
3.1 Апробация средств и технологии имитационного моделирования систем управления	19
3.2 Анализ динамики использования ресурсов системы управления агрегатами имитационной модели.....	21
4 Технологические процессы с параллельно-последовательной организацией.....	23
4.1 Особенности формализации ТПП с различной скоростью выполнения технологических операций.....	23
4.2 Моделирование управляемых комплексов с помощью имитационных моделей агрегатного типа.....	27
5 Методика содержательного описания управляемых технологических систем на основе ВТПП	33
5.1 Этапы описания управляемых технологических систем	33
5.2 Формализация управляемых технологических систем на основе аппарата сетевого планирования	37
Список использованных источников	40
Перечень условных обозначений и сокращений.....	41
Приложение А Схема формального описания управляемой технологической системы	42
Приложение Б Пример построения модели для анализа динамики управления оборудованием.....	45

Введение

Имитационное моделирование, как известно, является широко признанным методом решения сложных задач системного анализа, оптимизации и проектирования систем управления технологическими процессами.

При осуществлении анализа дискретных технологических процессов в зависимости от уровня их сложности и организованности, а также от качественных характеристик отдельных операций используется достаточно много математических методов (теория массового обслуживания, аппарат сетевого планирования, теория расписаний и др.).

Для реальных технологических процессов, характеризующихся нарушениями выполнения технологического цикла, случайными отклонениями во времени от графика, возникновением аварийных ситуаций, задача анализа и управления вероятностными технологическими процессами усложняется и не решается известными методами.

Вместе с тем интенсивное развитие новых вычислительных технологий для такого рода задач с применением специализированных программных средств зачастую не облегчает на практике решение данной проблемы в силу необходимости привлечения к ее решению квалифицированных математиков-программистов.

На практике управляемые технологические процессы производства представляют собой множество взаимосвязанных технологических операций, характеристики выполнения и порядок следования которых являются вероятностными.

Связи между ними также могут быть случайными, поэтому в основу анализа подобных производственных систем положено сочетание идей метода имитационного моделирования, методики сетевого планирования и процедур метода Монте-Карло на базе создания специализированных динамических имитационных моделей [1, 2].

В настоящем издании рассматриваются способы и средства анализа, проектирования и управления сложными техническими системами, которые используются при создании конструктивного математического и программного аппарата анализа управляемых технологических процессов производства на основе имитационного моделирования.

1 Моделирование управляемых технологических комплексов

1.1 Особенности моделирования

Управляемые технологические комплексы представляют собой сложно-структурированную систему, в основу которой положена комбинация управляемых технологических систем [3], которые, в свою очередь, состоят из взаимосвязанных вероятностных технологических процессов производства (ВТПП).

Имитационное моделирование подобных объектов осуществляется на основе агрегатной системы автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства [4]. При построении моделей объекта исследования используются пять основных исполнительных элементов агрегатной системы автоматизации моделирования ($ISPF_{ij}$, $INDS_{ij}$, $CORF_{ij}$, $LICV_{ij}$, $UNIV_{ij}$), которые обеспечивают построение базовой имитационной модели управляемого комплекса. Анализ условий инициализации основных исполнительных элементов и временных диаграмм выполнения их алгоритмов позволил представить эти пять элементов с помощью единой программы имитации.

Все элементы базовой программы имитации являются двухполюсниками и ожидают своего запуска действительными сигналами Sgd_{ij} от любого элемента синхронизации ($SLAST_{jh}$ или $SFIRST_{js}$). При активизации элементы расходуют ресурсы ВТПП, активизируют оборудование ВТПП, управляя таким образом функционированием ВТПП. По завершении имитации выполнения элементов формируется выходной сигнал, поступающий на соответствующий вход j -го элемента синхронизации. Программы имитаторов элементов модели отличаются характером использования оборудования (индивидуального и общего пользования) и различным составом ресурсов ВТПП. Наличие большого числа однотипных имитаторов функций исполнительных элементов с различным составом используемых ими ресурсов и набором оборудования определяет необходимость представления их функционирования универсальной реентерабельной программой агрегата-исполнителя, формирующей управляющие воздействия на оборудование ВТПП и расход ресурсов системы управления ($AGUPRV$). Программа агрегата $AGUPRV$ может функционировать соответственно в пяти режимах: исполнения, индикатора,

корректировки вектора переменных управления $\{U_K\}$, ликвидации аварийной ситуации и универсального воздействия на ВТПП. Каждому номеру элемента-исполнителя вероятностного процесса соответствует уникальный номер ij агрегата-исполнителя, формируемый на входе агрегатами-синхронизаторами $AGSINCM_i$ на входе (i) и номера на выходе (j) агрегата-исполнителя. В базе данных имитационной модели ($BDIM$) для каждого агрегата отведены две области: место для функций распределения параметров ВТПП (область 1); место для конкретного заказа ресурсов и оборудования в l -й реализации ИМ системы управления (СУ) ВТПП.

Таким образом, на l -й реализации процедуры Монте-Карло ИМ СУ ВТПП представляет собой детерминированную модель с фиксированными временами использования ресурсов ВТПП, постоянными стоимостями C_{ijl} и временами τ_{ijl} функционирования агрегатов-исполнителей $AGUPRV_{ijl}$.

Анализ временных диаграмм выполнения алгоритмов $SLAST_i$ и $SFIRST_j$ позволил представить эти два типа синхронизаторов СУ ВТПП также с помощью двух единых программ имитации. Оба типа синхронизаторов являются многополюсниками, с различным числом входов, куда поступают сигналы Sgd_{ij} и Sgf_{ij} . В режиме 1 реализуется ожидание срабатывания спусковой функции синхронизатора. На выходах этих многополюсников в режиме срабатывания спусковой функции по единым алгоритмам формируются действительные (Sgd_{ij}) и фиктивные (Sgf_{ij}) сигналы, которые одновременно инициируют выполнение агрегатов-исполнителей. Функционирование синхронизаторов, у которых спусковая функция формируется по последнему Sgf_{ij} , имитируется агрегатом $AGSLAST_j$, который имеет единый алгоритм и поэтому является реентерабельной программой. Для каждой копии этого агрегата номера j в $BDIM$ отводится место под рабочие массивы имитации и статистик имитации. Для синхронизаторов $SFIRST_j$, спусковая функция которых формируется по первому Sgd_{ij} , отображая собой законченную логическую схему «или», имитация функционирования осуществляется агрегатами $AGSFIRST_j$, у которых алгоритм формирования выходных сигналов аналогичен приведенному выше. Поэтому $AGSFIRST_j$ также реализуется единой реентерабельной программой агрегатов, а для каждой копии агрегата с

номером j в $BDIM$ отводится место под рабочие массивы имитации и накопление статистик имитации.

Поскольку с помощью агрегата-исполнителя $AGUPRV_{ij}$ имитируются все пять исполнительных элементов, то указателем для выбора варианта работы алгоритма его реентерабельной программы является переменная «тип агрегата» ($type_{ij}$, $i, j = \overline{1,5}$). Существует различие этих агрегатов в использовании оборудования и ресурсов ВТПП. При имитации функций элемента-исполнителя ВТПП ($type_{ij} = 1$) может использоваться весь состав ресурсов ВТПП; для элементов-индикаторов ($type_{ij} = 2$) оборудование ВТПП не используется. Из ресурсов ВТПП всегда используются только времена (τ_{ij}) и стоимости (C_{ij}) выполнения операции. В функции агрегата второго типа входит фиксация значений компонентов вектора $\{U_j\}$ и формирование в выходном сигнале признака «был выход U_j за допустимые пределы» ($ps_{ij} = '10'$). Агрегат $AGUPRV_{ij}$ ($type_{ij} = 1$) используется при имитации функции элемента-исполнителя и расходует весь набор ресурсов и оборудования ВТПП. При этом возможны исключительные ситуации при появлении аварии оборудования в теле сигнала, поступающего на вход агрегата-синхронизации ($ps_{ij} = '10'$); при выходе $\{U_j\}$ за допустимые пределы ($ps_{ij} = '10'$); при совпадении этих ситуаций ($ps_{ij} = '11'$) и нормальном безаварийном выполнении функций ($ps_{ij} = '00'$). Остальные типы агрегатов $AGUPRV_{ij}$ ($type_{ij} = 3$ – при корректировке $\{U_j\}$; $type_{ij} = 4$ – при ликвидации аварии с помощью резервной операции; $AGLAST_{ij}$ – при ликвидации аварии и корректировке $\{AGFIRS_{ij}\}$) имеют алгоритмы функционирования аналогичные агрегатам со значением $type_{ij} = 1$ и поэтому также используют все ресурсы и оборудование ВТПП.

Таким образом, учитывая особенности взаимодействия компонентов системы управления, исследователь имеет возможность планировать работу исполнительных элементов, как по времени реализации алгоритма, так и в зависимости от операционной обстановки.

1.2 Структура имитационной модели системы управления технологическим процессом производства

Изложенный выше алгоритм выполнения исполнительных элементов и элементов синхронизации СУ ВТПП позволяет применить агрегатный способ их реализации. Агрегаты взаимодействуют между собой с помощью сигналов активизации и операторов пуска, продолжения или останова. Одиночные алгоритмы выполнения агрегатов системы управления определили возможность представления множества элементов каждого типа множеством версий следующих агрегатов:

- $AGISPOL_{ij}$ – имитатор исполнительных элементов управления $F_{1i}(t_0)$, $CORF_{ij}$, $LICV_{ij}$, $UNIV_{ij}$, $INDS_{ij}$;
- $AGSINH_i$ – имитатор элементов синхронизации $SLAST_i$ и $SFIRST_i$;
- $AGINSU_i$ – имитатор элементов $INSU_{0i}$, инициирующих входные воздействия на систему управления;
- $AGFISU_j$ – имитатор элементов $FISU_{j0}$, имитирующий завершение цикла функционирования СУ ВТПП.

Данные агрегаты представляют собой реентерабельные программы имитационных моделей элементов системы управления ВТПП. Каждой версии агрегатов в базе данных имитационной модели ($BDIM$) отведено место для хранения параметров элементов системы управления, сбора статистики имитации и определения откликов моделирования. Доступ к элементам базы данных $BDIM$ осуществляется по индексам соответствующих агрегатов имитационной модели (ij для $AGISPOL_{ij}$, i для $AGSINH_i$; i для $AGINSU_i$; $AGFISU_{10}$ для $AGFISU_j$). В базе данных $BDIM$ хранится информация следующих типов:

- $AGFISU_{10}$ – запросы ресурсов ВТПП (имеющие вероятностную природу и представляющие собой функции распределения) агрегатами-имитаторами функций исполнительных элементов;
- ODZ_{ij} – детерминированные запросы ресурсов (представляющие собой множество списков) агрегатами имитационной модели системы управления;
- ONZ_{ij} – надежность характеристики функционирования оборудования, обеспечивающего реализацию технологического процесса производства;

- OZR_{ij} – оперативная информация текущего заказа ресурсов ВТПП агрегатом с индексом ij в l -й реализации процедуры Монте-Карло, формируемого на основе соответствующих функций распределения;
- OST_{ij} – статистика использования агрегатом с индексом ij ресурсов и оборудования;
- OTL_{ij} – область хранения откликов имитационного моделирования динамики управления ВТПП.

Выделение места в $BDIM$ под копии агрегатов с индексом ij позволило использовать по одной реентерабельной программе для агрегатов каждого типа. Таким образом, для имитации динамики управления ВТПП достаточно библиотеки из пяти реентерабельных программ агрегатов $AGISPDL_{ij}$, $AGSINH_i$, $AGISPF_{34}$, $AGISPF_{27}$ и управляющей программы моделирования (УПМ). Имитационная модель системы управления ВТПП представляет собой подмножество реентерабельных программ-имитаторов функций агрегатов $\{AGISPF_{56}$, $AGSINH_i$, $AGINSU_m$, $AGFISU_m\}$, работающих в совокупности с соответствующей базой данных модели. Данные агрегаты представляют собой ядро имитационной модели и в совокупности с базой данных являются уникальной частью системы управления ВТПП. Кроме того, в состав имитационной модели входят: управляющая программа моделирования, программа сбора и накопления статистики имитации ($PSTATIST$), блок начального запуска агрегатной имитационной модели ($BZAPS$), блок завершения имитации ($BZAVR$), процедура Монте-Карло ($PR.MONTEK$), блок анализа статистики имитации ($BANAZ$) и блок визуализации результатов имитации ($BVIZUAL$).

В качестве входной информации, используемой блоком $BZAPS$, вводятся таблицы, характеризующие состав и структуру имитационной модели системы управления ВТПП:

- состав параметров имитационной модели системы управления;
- множество запросов ресурсов ВТПП агрегатами-исполнителями;
- порядок коммутации элементов синхронизации имитационной модели системы управления;
- множество надежностных характеристик оборудования ВТПП.

Объединение уникальной и универсальной частей в имитационной модели системы управления ВТПП осуществляет одна из версий системы автоматизации моделирования (САИМ-2) вероятностных технологических процессов производства, реализующая агрегатный

способ имитации. Система автоматизации моделирования состоит из следующих компонентов:

- библиотеки агрегатов-имитаторов функционирования перечисленных ранее агрегатов (*LIB.AGRBG*);
- подсистемы, реализующей функционирование уникальной части ИМ СУ ВТПП (*PS.FORMUNIC*);
- подсистемы реализации имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло (*PR.MONTEK*);
- подсистемы функционирования универсальной части имитационной модели системы управления (*PS.FORMUNIV*), осуществляющей взаимодействие с блоками *BZAPS*, *BZAVR*, *BANAZ*;
- информационной базы системы моделирования (*IBDSM*), в которую входят все библиотеки и *BDIM*;
- подсистемы обработки файлов статистик имитации (*PS.OFST*), в которую входит блок визуализации результатов имитации (*BVIZUAL*).

Программы агрегатов-имитаторов состоят из активностей. Подпрограмма каждой активности, реализованной на языке Object Pascal в среде системы программирования Delphi 5.0, завершается операторами сбора статистики и взаимодействия агрегатов, которые реализуются УПМ. Сбор статистики стандартизован с помощью операторов сбора статистики. По каждому оператору сбора статистики в момент модельного времени t_0 собирается информация о состояниях агрегатов и текущем состоянии *BDIM*. После фиксации статистики формируются соответствующие записи в файл статистики, который представляет собой протокол взаимодействия агрегатов в ходе имитации СУ ВТПП.

Ввод исходной информации осуществляется операторами описания исходной информации в следующей последовательности шагов. На *первом шаге* указывается количество агрегатов синхронизации, задается состав и структура агрегатов синхронизации $AGSINH_i$. Для каждого агрегата указывается число входов (a_i) и выходов (b_i). Структура каждого кустового выхода определяется оператором структуры, в котором указывается номер выхода (k_i), тип кустового выхода ($type_i$), количество разветвлений (d_{ki}), информация для формирования сигналов на l -х разветвлениях выхода k_i . Ориентируясь на непрофессионального пользователя, операторы структуры агрегатов синхронизации задаются в диалоговом режиме с использованием оконной технологии системы программирования Delphi 7.0.



Рисунок 1.1 – Состав и структура варианта имитационной модели системы управления

Перечисленные подсистемы представляют собой систему обработки файлов статистики имитации (*PS.OFST*), куда входят *PS.STATIST*, *BZAPS*, *BZAVR* и *PR.MONTEK* и ядро имитационной модели *PS.FORMUNIC* из четырех типов агрегатов (*AGISPO_{ij}*, *AGSINH_i*, *AGINSU_m*, *AGFISU_n*).

2 Технология имитации управляемых производственных систем

2.1 Система автоматизации имитационного моделирования систем управления комплексами

Имитационная модель СУ ВТПП реализуется на основе одной из версий системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) для обеспечения исследований режима управления функционированием вероятностных процессов. С помощью модели, полученной в среде САИМ, исследователь имеет возможность: определить начальные значения констант системы управления ВТПП и состав ресурсов предприятия для обеспечения функций управления (задача 1); выбрать алгоритмы модификации СУ ВТПП на случай возникновения аварий в ходе реализации резервных исполнителей (задача 2); выбрать оборудование ВТПП, обладающего необходимой надежностью функционирования и удовлетворительными временами восстановления его работоспособности (задача 3); определить ценовую политику на основе стоимостных показателей реализации управляющих воздействий на оборудовании ВТПП (задача 4).

Решение любой из перечисленных задач возможно на основе следующей технологии использования одной из версий САИМ, которая реализуется при выполнении следующей последовательности этапов исследования.

1. Ввод в базу данных ИМ СУ ВТПП исходной информации о структуре системы управления с корректировкой возникающих ошибок описания элементов-исполнителей и элементов синхронизации управляющих воздействий на оборудование вероятностных процессов.

2. Задание начальных значений ресурсов ВТПП согласно плану постановки серий имитационных экспериментов на основе использования процедуры Монте-Карло.

3. Составление матриц $\|\gamma_{ij}\|$ переключения резервных исполнителей на случай выхода из строя оборудования ВТПП для каждого кустового выхода элементов синхронизации третьего типа, отображаемых агрегатами $AGLAST_{ij}$ и $AGFIRS_{ij}$.

4. Составление матриц $\|\beta_{ij}\|$ использования исполнителей корректировки значений компонентов вектора $\{U_K\}$ для кустовых выходов четвертого типа у агрегатов синхронизации.

5. Составление матриц $\|\theta_{ij}\|$ использования универсальных управляющих элементов $AGUPRV_{ij}$ для кустовых выходов 4-го типа на случай возникновения отказов оборудования ВТПП и выхода $\{U_K\}$ за допустимые границы.

6. Выбор состава коэффициентов важности откликов имитации δ_l (на основе априорной информации о СУ ВТПП) и стратегий управления, который осуществляется следующим образом. Поскольку варианты организации СУ будут отличаться составом множества параметров $\{X\}$ агрегатов-исполнителей, то общее число m вариантов СУ ВТПП определяется количеством элементов множества $\{X\}$. В качестве целевой функции в простейшем случае используем взвешенную сумму типа:

$$\min L = \sum_{l=1}^n \delta_l \cdot Q_l, \quad (2.1)$$

где Q_l – приведенные к одному типу нормированные значения l -й составляющей множества откликов ИМ $\{\bar{Y}_l\}$;

$\{Y_1\}$ – вектор усредненных значений коэффициентов растяжения времени выполнения исполнителей из-за отказов и ликвидации аварий $\{\bar{\rho}_{ij}\}$; $\bar{\rho}_{ij} = \bar{\tau}_{Bij} / \bar{\tau}_{ij}$; $\bar{\tau}_{Bij}$ – среднее значение критического времени использования ij -х исполнителей;

$\{Y_2\}$ – вектор стоимостных показателей реализации СУ ВТПП, состоящий из трех компонентов (суммарной стоимости при безотказной работе оборудования ВТПП (Y_{21}), стоимости восстановительных работ (Y_{22}) и ликвидационных операций (Y_{23}));

$\{Y_3\}$ – вектор суточного расхода предприятием материалов и комплектующих изделий;

$\{Y_4\}$ – вектор коэффициентов использования ресурсов ВТПП;

$\{Y_5\}$ – вектор коэффициентов использования места на общих ресурсах ВТПП;

$\{Y_6\}$ – вектор использования индивидуального оборудования;

$\{Y_7\}$ – вектор значений времени реализации операций управления ВТПП;

$$\sum_{l=1}^7 \delta_l = 1, \delta_l \leq 10 \text{ – весовые коэффициенты важности значе-}$$

ний l -й составляющей множества откликов из СУ ВТПП.

Нормируем значения l -х составляющих множества откликов модели путем их деления на максимальное значение каждой составляющей вектора во всех вариантах имитации СУ ВТПП. В результате все Q_l окажутся безразмерными величинами, изменяющимися в интервале $[0,1]$ и требующими минимизации. При использовании целевой функции (6.1) задача выбора с помощью ИМ СУ рационального варианта состава ресурсов и надежности характеристик оборудования ВТПП сводится к тому, что вариант организации СУ, который обеспечивает минимум показателя L , будет считаться рациональным.

7. Составление плана имитационных экспериментов на основе применения процедуры Монте-Карло, обеспечивающего получение статистик имитации с заданным уровнем доверия.

8. Проведение серий имитационных экспериментов, в ходе которых определяется статистика для вычисления откликов имитации $\{Y_l\}$.

9. Приведение откликов к одному масштабу и типу с последующим расчетом интегрального показателя (6.1) и формирование матрицы решений.

10. Использование одного из классических критериев принятия решений для выбора рационального состава ресурсов вероятностного процесса.

Технология использования версии САИМ-2 ВТПП ориентирована на пользователя, не являющегося профессионалом по программированию и имитации. Поэтому не предполагаются изменения исследователем состава и структуры агрегатов. Построение и использование ИМ системы управления реализуется в следующей последовательности этапов.

На *этапе 1* задаётся структура имитационной модели системы управления с помощью операторов подсистемы *PS.FORMSG*.

На *этапе 2* реализуется натурный эксперимент с целью получения исходной информации для последующей проверки адекватности имитационной модели реальной системе управления. Для параметров СУ ВТПП, измерение значений которых трудно организовать, используются экспертные оценки. Основную сложность в подготовке исходной информации составляет определение вероятностных характеристик исполнительных элементов. В случаях, когда не удаётся найти аналитический вид аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления (стандартная для всех типов параметров агрегатов).

На *этапе 3* осуществляется верификация базового варианта имитационной модели. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и имитаторов оборудования. После задания числа реализаций имитационных экспериментов (N), формулирования условий фиксации и обработки статистики имитации САИМ-2 ВТПП формирует управляющие справочники и массивы хранения статистики имитации, используемые в дальнейшем при организации имитационного эксперимента. Исследователю предоставляется возможность в режиме «пошагового» выполнения просмотреть переходы агрегатов из состояния в состояние с автоматической документацией этого просмотра. В результате автоматизируется процесс верификации ИМ СУ ВТПП, хотя не существует формальных способов верификации сложных систем.

На *этапе 4* реализуются процедуры испытания и исследования свойств ИМ СУ ВТПП. Обычно это многошаговая процедура использования стандартных методик испытания сложных систем, в процессе которой реализуются следующие этапы испытания. Вначале оценивается ошибка откликов имитации $\{Y_k\}$. Определяется длина переходного периода имитации (T_{pp}), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех переходит в установившееся состояние. Далее имитационная модель проверяется на «устойчивость», т. е. на отсутствие такой ситуации, когда у любого из откликов Y_k возможен рост амплитуды его изменений с ростом модельного времени t_0 из-за появления редких ситуаций, имеющих место в реальной системе.

Проверяется «чувствительность» откликов к изменениям параметров имитации. Каждая составляющая векторов параметров ИМ $\{X_k\}$ изменяется в диапазоне от минимального (X_k^-) до максимального (X_k^+) значений, остальные X_r ($r \neq k$) устанавливаются

в середине интервалов их изменения. Вычисляются приращения компонентов векторов откликов ΔY_h в процентах. Если $\Delta Y_h < \varepsilon$, то считают, что отклик ИМ СУ ВТПП не чувствителен к вариациям параметра. Те параметры X_k , изменения которых не влияют ни на один из откликов модели, можно в дальнейшем из рассмотрения исключить. Последним шагом этапа является проверка адекватности модели реальной системе управления. Исследователь должен определить отклик, который в реальной системе выбирается в качестве контролируемого. При этом реализуется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений h -го отклика ИМ и реальной СУ ВТПП по критерию Стьюдента.

На *этапе 5* организуется серия ИЭ согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый ИЭ представляет l -ю реализацию ИМ СУ ВТПП. По окончании N экспериментов осуществляется усреднение откликов \bar{Y}_h и расчёт дисперсий откликов S_{yh} по выборке откликов $\{Y_{hl}\}$ каждой реализации, где $l = \overline{1, N}$.

На *этапе 6* подсистема *PS.OFST* анализирует статистику реализации ИЭ, хранящуюся в базе данных *IBDSM*. Вторичная обработка статистики имитации *PS.OFST* позволяет построить интегральные диаграммы и графики использования ресурсов и оборудования, по которым определяются диапазоны расхода ресурсов в каждом варианте организации управления ВТПП. Вывод графиков изменения статистик и откликов имитации стандартизован и осуществляется с помощью блока *BVISUAL*. На следующем шаге с помощью блока *BRESH* осуществляются анализ результатов имитации вариантов организации системы управления и принятие проектных решений. Для этой цели реализуются известные методики анализа данных на основе классических критериев принятия решений в условиях неопределённости и риска.

Отметим, что технология имитации СУ ВТПП определяется теми обстоятельствами, что в файле статистики базы данных *IBDSM* хранится два вида статистики имитации: статистика исследования на ИМ каждого варианта системы управления и интегральная статистика функционирования всех вариантов организации СУ ВТПП. Эта статистика формируется в ходе реализации серии из N экспериментов с ИМ путём N -кратного записывания в файл статистики результатов имитации. Очевидно, что в файле содержится необозримый объём информации, которую необходимо представить в удобном виде для анализа динамики моделирования

компонентов системы управления. При организации вторичной обработки файла статистики имитации возникают следующие проблемы. Во-первых, это технология обработки выборок большого объёма N статистик реализации событий в ИМ СУ ВТПП: по этим выборкам формируются функции распределения моментов срабатывания спусковых функций элементов синхронизации и времен ожидания активизации этих элементов ($F_{1i}(t_0)$ и $F_{2i}(\tau_{ijl})$). В итоге всё множество выборок статистик имитации заменяется соответствующими функциями распределения. Во-вторых, возникает проблема анализа множества графиков суммарного расхода ресурсов ВТПП из-за того, что количество замеров времён срабатывания элементов и интервалов времени ожидания их выполнения в каждой реализации различно. Значения статистик имитации могут существенно отличаться, и в каждой реализации модели они индивидуальны. При наложении графиков друг на друга возникает ситуация, когда в каждой точке измерения формируется выборка объёма N значений суммарного расхода ресурсов, и мы снова приходим к проблеме замены этих выборок функциями распределения и вычисления оценок математических ожиданий и выборочных дисперсий. В итоге графики суммарного расхода ресурсов r -го типа представляют собой функцию, построенную по средним значениям с указанием диапазонов их изменения. В-третьих, возникает проблема анализа множества временных диаграмм использования ресурсов и оборудования ВТПП, аналогичная описанной выше.

2.2 Построение имитационной модели системы управления

На рисунке 2.1 показано поступление в СУ ВТПП извне сигналов интенсивности $\lambda_{01} \div \lambda_{04}$. При функционировании генератора $AGINSU_{01}$ с высокой вероятностью возможен выход $\{U_j\}$ за допустимые диапазоны его изменений, а при выполнении генератора $AGINSU_{02}$ возможен отказ оборудования с высокой вероятностью появления аварии в СУ ВТПП. У агрегата $AGLAST_1$ имеется три входа, номера которых указаны на рисунке 2.1, и три выхода.



Рисунок 2.1 – Блок-схема тестового варианта имитационной модели системы управления ВТШП

3 Анализ функционирования имитационных моделей систем управления

3.1 Апробация средств и технологии имитационного моделирования систем управления

Апробацию метода, средств и технологии имитационного моделирования СУ ВТПП начнем с этапа испытания имитационной модели СУ ВТПП. Отметим, что апробацию проходит только та ветвь технологии, которая используется при проектном моделировании. Использование агрегатного способа имитации обусловило ситуацию, когда в модели нет очередей запросов к агрегатам поскольку в ИМ СУ ВТПП отсутствует переходный период ($T_{pp} = 0$).

Связи агрегатов друг с другом осуществляются с помощью сигналов мгновенно в модельном времени, и поэтому этапа «разгона» ИМ в начальное состояние нет.

Из-за использования достаточно простой логики и отсутствия вероятностных переходов между агрегатами следует, что «редких», событий в модели не будет. Поэтому отпадает необходимость в оценке «устойчивости» имитации. На основании вышеизложенного констатируем, что из общей методики испытания сложных систем на этапе испытания ИМ СУ ВТПП остается выполнить следующие шаги:

- определение числа реализаций в процедуре Монте-Карло при постановке серий ИЭ с ИМ СУ ВТПП;
- оценку погрешности имитации СУ ВТПП;
- исследование «чувствительности» откликов к изменениям параметров ИМ СУ ВТПП.

На *первом шаге* процедуры *PR.TOCHN* подсистемы *PS.ISPITAN* определялась точность имитации СУ ВТПП. Для начала число «прогонов» ИМ СУ ВТПП в ходе одного ИЭ было установлено равным $N_1 = 30$. Каждый «прогон» ИМ СУ ВТПП осуществляется с записью интегральной статистики имитации в базу данных ИМ.

С помощью t -статистики были определены доверительные интервалы среднего значения по формуле:

$$Y_n = \bar{Y}_n \pm t_{0,05} \sqrt{\frac{D_n}{N_1 - 1}}, \quad (3.1)$$

где $t_{0,05}$ – значения распределения Стьюдента при вероятности ошибки $P = 0,05$ и $N_1 = 30$ числе степеней свободы,

D_n – выборочная дисперсия вычисления по результатам каждого имитационного эксперимента (ИЭ).

Использование зависимости (3.1) позволяет оценить ошибку имитации с достоверностью $\beta < 0,95$ по формуле:

$$\varepsilon_n \% = \frac{0,75L}{\bar{Y}_n} \sqrt{\frac{D_n}{N_1 - 1}} \cdot 100 \% . \quad (3.2)$$

PR.CHUVS подсистемы *PS.ISPITAN* оценивалась «чувствительность» откликов ИМ СУ ВТПП к изменениям параметров моделирования при числе реализаций $N_1 = 30$.

Далее определялся коэффициент «чувствительности» отклика, как величина приращения откликов при изменении компоненты X_q на всём диапазоне её изменения по формуле:

$$\delta Y_n = \frac{|Y_n^+ - Y_n^-| \cdot 2}{|Y_n^+ + Y_n^-|} \cdot 100 \% . \quad (3.3)$$

На третьем шаге необходимо определить число реализаций N ИМ СУ ВТПП согласно процедуре Монте-Карло, задав вычисленное значение N процедуре *PR.MONTEK* 2-й версии САИМ-2. Расчетная формула для числа реализаций ИМ (объема выборки откликов имитации Y_n) равна:

$$N > \frac{S}{d^2(1-\alpha)} , \quad (3.4)$$

где $\alpha = 0,05$ – коэффициент значимости;

$d = \frac{S}{4}$ – точность имитации.

Расчеты по формуле (3.4) путем сравнения со значением N_1 , полученным в имитационном эксперименте, определили необходимость задания $N \geq 320$ экспериментов. Учитывая небольшой расход ресурса ЭВМ для постановки одной реализации, было принято решение, что $N = 320$ в тех случаях, когда необходима высокая точность имитации.

3.2 Анализ динамики использования ресурсов системы управления агрегатами имитационной модели

Ввиду вероятностного характера запросов ресурсов ВТПП агрегатами имитационной модели СУ ВТПП аналитически невозможно определить тройку этих статистик имитации ($\tau_{10l}, \tau_{cikl}, \Delta\tau_{rell}$). Поэтому одной из первых задач исследования СУ ВТПП с помощью вариантов имитационной модели СУ ВТПП является задача исследования динамики использования агрегатами ИМ ресурсов ВТПП. Для решения этой задачи в процессе имитации функционирования СУ ВТПП использовался способ построения и анализа временных диаграмм (ВД) использования агрегатами ресурсов ВТПП. Пример построения ВД одного цикла функционирования одной реализации ИМ СУ ВТПП приведены на рисунках 3.1 и 3.2. На рисунках 3.1 и 3.2 построены ВД использования агрегатами модели следующих ресурсов ВТПП:

- оборудования ВТПП индивидуального пользования;
- индивидуального пользования;
- исполнителей ВТПП;
- оборудования общего пользования;
- ресурсов общего пользования;
- координаты изменения модельного времени, где указаны t_j – моменты активизации агрегатов $AGFIRST_j$ и $AGLAST_j$;
- интервалы захвата агрегатами $AGISPF_{i1j1} \div AGUPRN_{i2j2}$ ($\tau_{i1j1} \div \tau_{i2j2}$) в масштабе модельного времени t_0 .

Интервалы использования агрегатами $AGISPF_{i1j1} \div AGUPRN_{i2j2}$ и $AGISPF_{56}$ ресурсов ВТПП свыше $t_{10} = 27$ на ВД заштрихованы. Максимальный из заштрихованных интервалов использования ресурсов ВТПП равен интервалу релаксации СУ ($\Delta\tau_{rell}$). Внутри прямоугольника длиной, равной фактическому времени функционирования агрегата-исполнителя номера ij , указан шифр этого агрегата. На ВД показаны моменты срабатывания спусковых функций агрегатов синхронизации (t_j). При построении ВД рассматривался такой вариант имитации функционирования СУ ВТПП, когда ресурсы всегда представляются агрегатами-исполнителями в моменты их активизации, поскольку отсутствует конкуренция агрегатов за ресурсы ВТПП (вариант организации 1). Поэтому вероятность отказа предоставления R -го ресурса ($R = \overline{1,6}$) агрегата $P_{OTR} = 0$ в варианте 1.

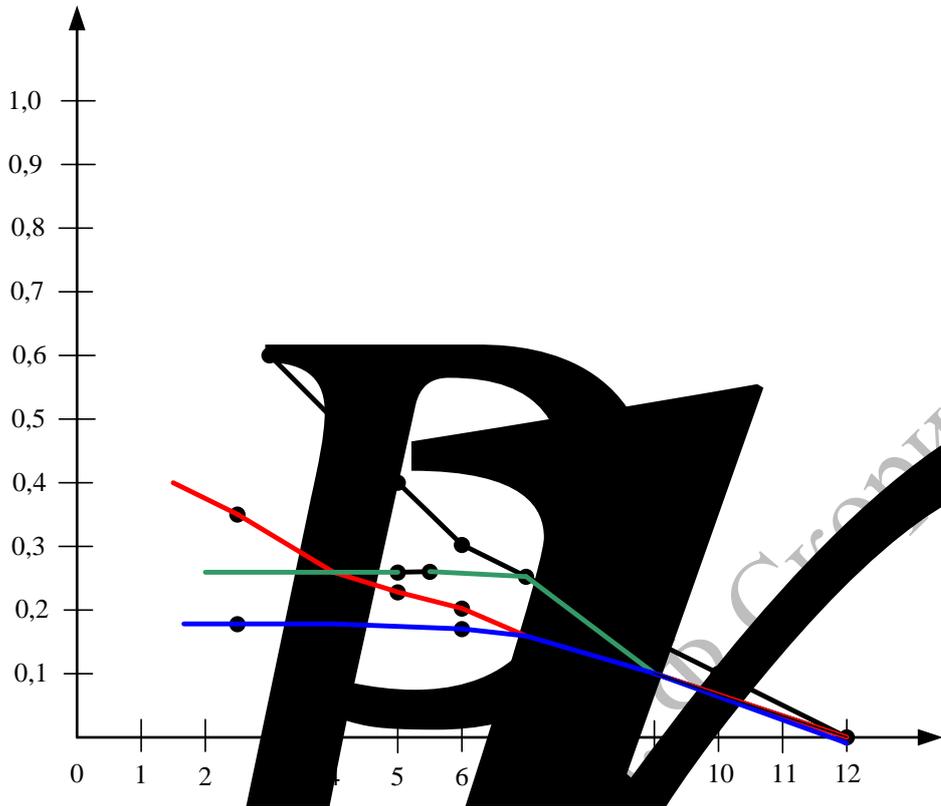


Рисунок 3.1 – Графики изменения вероятности конфликта элементов СУ за ресурсы ВТПП

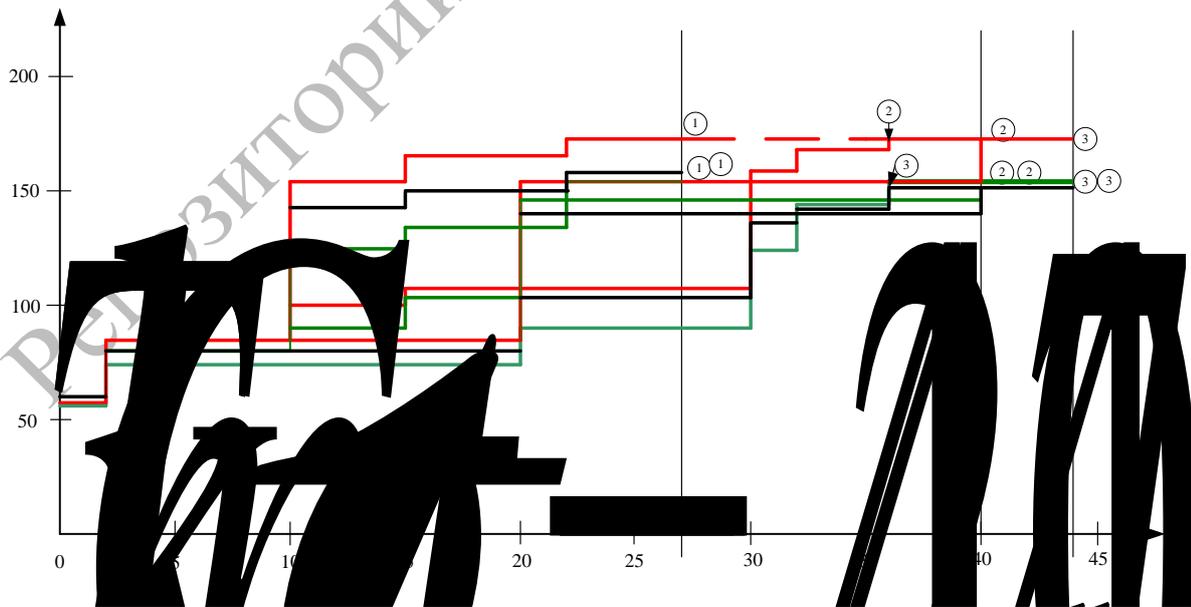


Рисунок 3.2 – Графики увеличения откликов ИМ СУ ВТПП

4 Технологические процессы с параллельно-последовательной организацией

4.1 Особенности формализации ТПП с различной скоростью выполнения технологических операций

На рисунке 4.1 приведена типовая блок-схема связей человеко-машинной системы управления ВТПП. Особую роль в организации связей этой системы играет база данных моделей управления (БДМУ), обеспечивающая синхронизацию процессов, протекающих с различным темпом, хранение статистик исследования и использование информации о состоянии компонентов СС. Воздействие на оборудование ВТПП осуществляется с двух сторон. Осведомительная информация о состоянии компонентов ВТПП к исследователю или эксперту-технологу поступает через оборудование ВТПП.

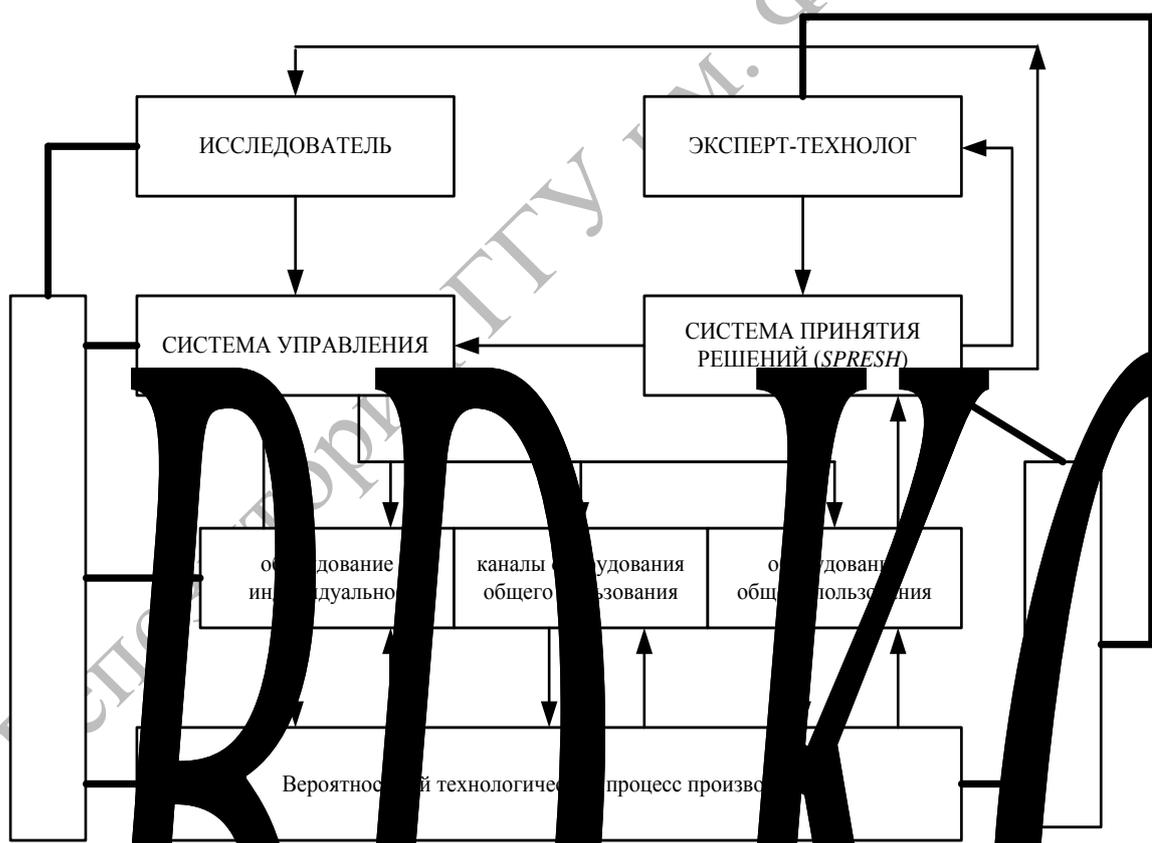


Рисунок 4.1 – Блок-схема связей человеко-машинной системы управления ВТПП

Все управляющие воздействия на компоненты ВТПП также синхронизируются через оборудование (общего или индивидуального

пользования). В качестве промежуточного звена между оборудованием ВТПП и человеком используются либо система управления (СУ) ВТПП (в режиме исследования поведения ВТПП), либо система оперативного принятия решений (*SPRESH*) в режиме автоматического регулирования поведения ВТПП. Кроме того, СУ ВТПП и *SPRESH* через содержимое БДМУ контролируют состояние оборудования СУ ВТПП и *SPRESH*, обеспечивая выработку своевременных управляющих действий на ВТПП. *SPRESH* и СУ обычно реализуемые на управляющей ЭВМ, являются основным звеном управления. В случае проектного моделирования обычным ВТПП используется система управления, а в тех случаях, когда в ВТПП имеет место высокая скорость протекания операций для дополнительного контроля быстро протекающими процессами используется *SPRESH*. В простых ситуациях функции СУ и *SPRESH* совпадают. Поэтому в таких случаях используется только СУ ВТПП.

Сам же ВТПП имеет в общем случае иерархическую структуру, представленную на рисунке 4.2. Многоярусный ВТПП исследователи представляют комбинацией полумарковских моделей h -го уровня иерархии (ПММ _{h}).

На рисунке 4.2 показано, что на самом верхнем уровне детализации ВТПП представляется полумарковской моделью ПММ₁, состоящей из шести технологических операций (TXO_k) $k = \overline{1,6}$. На втором уровне детализации каждая TXO_k , в свою очередь, представляет собой полумарковскую модель ПММ₂, состоящую из микротехнологических операций ($MTXO_{ki}$). Наконец, каждая TXO_{ki} состоит из последовательно выполняемых процедур (PR_{kj}). Более сложную структуру имеет второй тип ВТПП (рисунок 4.3).

Как видно из рисунка 4.3, на самом верхнем уровне управления весь ВТПП представлен вероятностным сетевым графиком (ВСГР₁), поскольку он имеет графовую структуру. В нем узлами являются события SOB_i , а ветвями служат микротехнологические операции ($MTXO_{ij}$), в которых номера соответствуют событиям, наступающим после свершения событий i и j .

На втором уровне иерархии управления для описания каждой $MTXO_{ij}$ могут использоваться либо полумарковские модели ПММ_{2ij}, либо вероятностные сетевые графики ВСГР_{2ij}, либо последовательность процедур PR_{sij} .

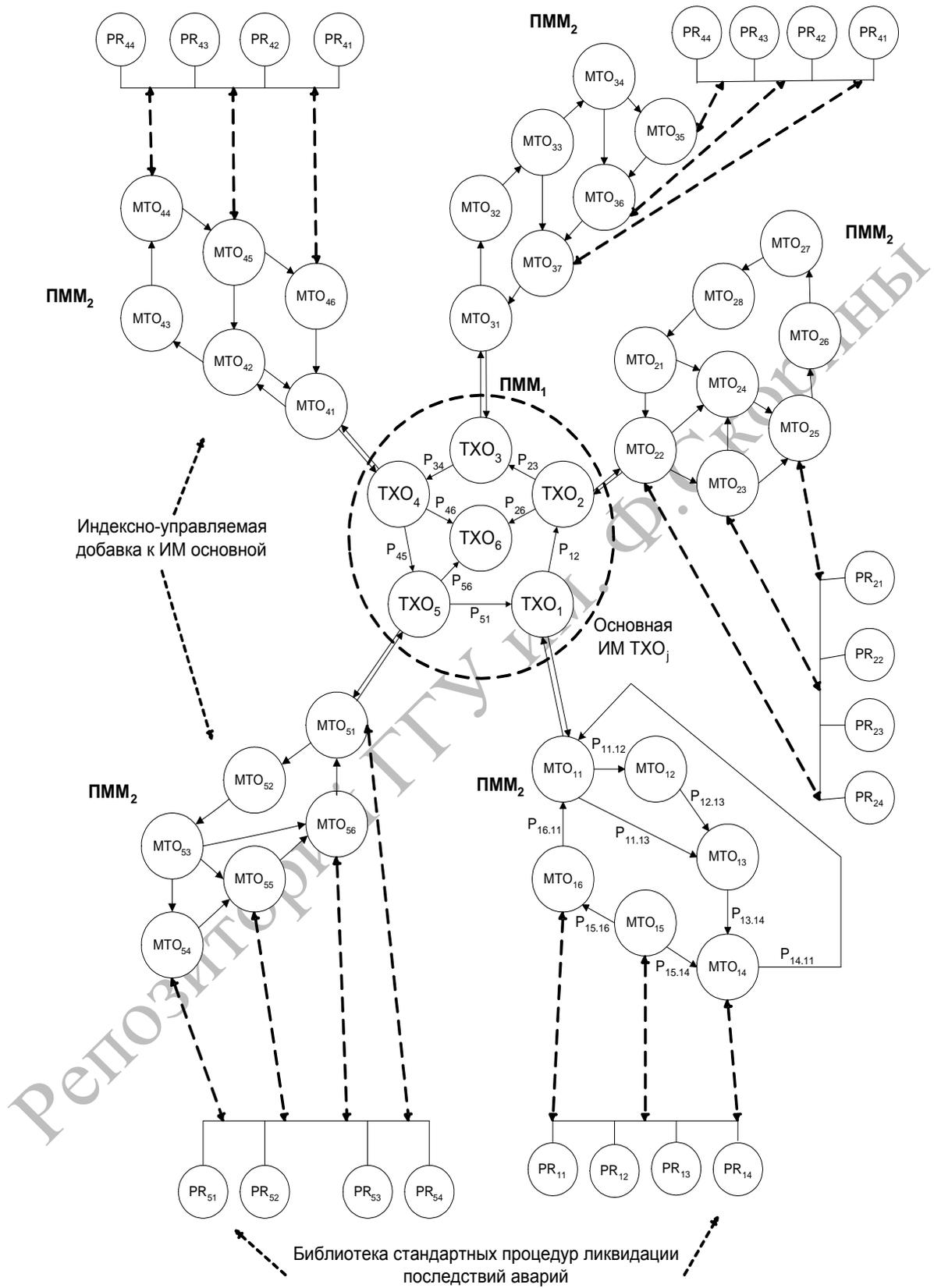


Рисунок 4.2 – Структура ВТЩ первого типа, представленного иерархией полумарковской модели (ПММ_h)

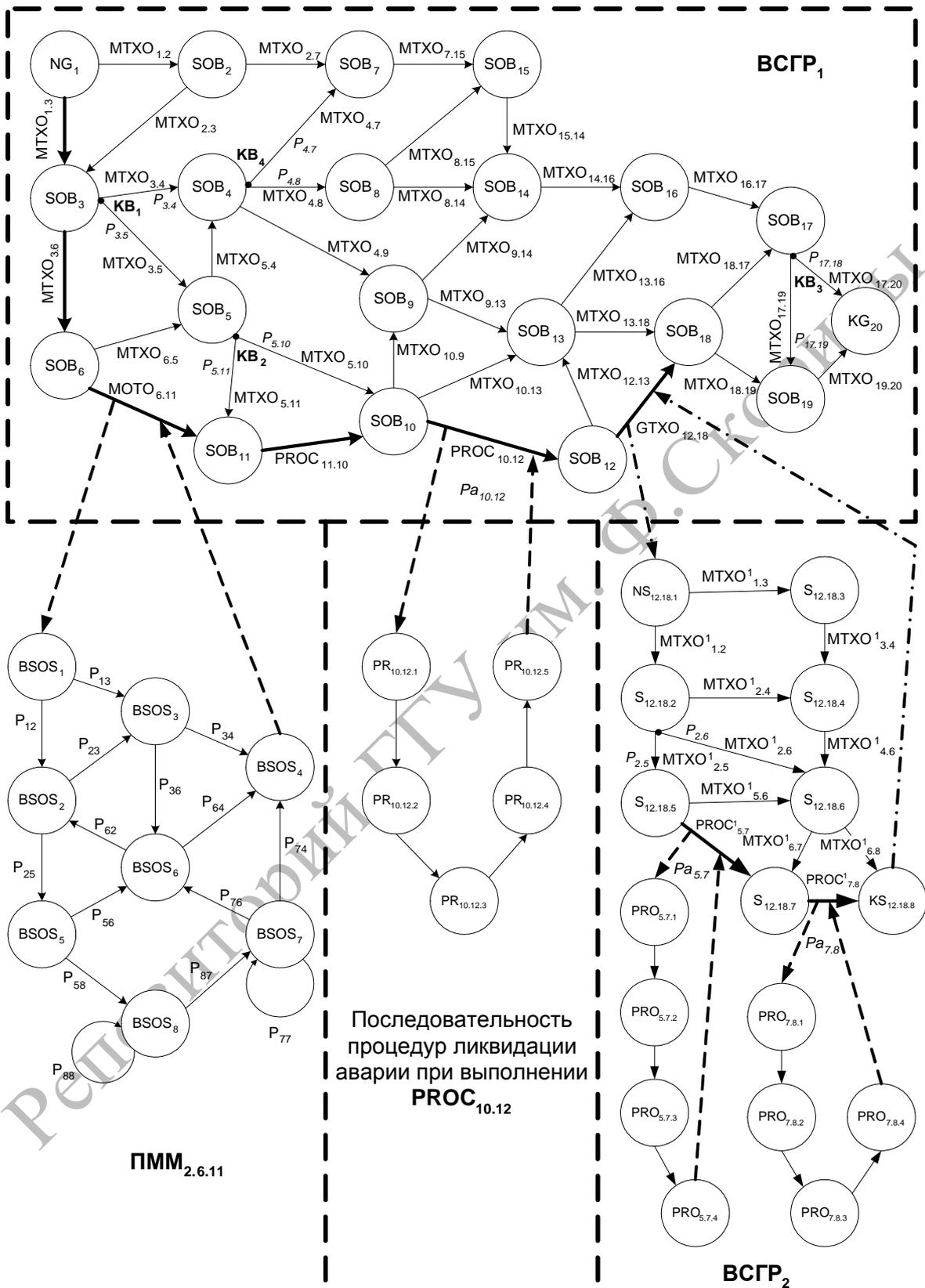


Рисунок 4.3 – Структура ВТПП второго типа, представленного двумя типами ИМ (ВСТР_h и ПММ_h)

4.2 Моделирование управляемых комплексов с помощью имитационных моделей агрегатного типа

Метод исследования вероятностных технологических процессов производства (ВТПП) состоит в поэтапном использовании агрегатно-процессного способа формализации, создания и испытания имитационных моделей (ИМ) для проектного моделирования ВТПП. В основе метода лежит использование правил формализации, которые являются средствами малой автоматизации и позволяют облегчить реализацию имитационной модели на основе библиотеки универсальных агрегатов. В качестве типовых при формализации ВТПП предлагается использовать следующие пять правил.

1. **Декомпозиция ВТПП** по уровням иерархии микротехнологических операций ($МТХО_{ij}$) при детальном представлении алгоритма имитации компонентов ВТПП. Каждому компоненту ВТПП ($МТХО_{ij}$) соответствует свой тип агрегата-имитатора её функций при квазипараллельном его выполнении в модельном времени имитации. Сложный алгоритм выполнения этих агрегатов стандартизован таким образом, что любая $МТХО_{ij}$ представляется одинаковым набором параметров этого процесса.

2. **Использование библиотеки агрегатов**, состоящей из ограниченного числа типов агрегатов, с помощью которой, меняя состав параметров этих агрегатов, возможно представление любой структуры ВТПП. Часть параметров ИМ ВТПП отображает влияние внешней среды и оборудования ВТПП, а другая часть параметров отображает выполнение соответствующей $МТХО_{ij}$. Каждому параметру одной ИМ ВТПП могут соответствовать несколько откликов других подмоделей ВТПП. Поэтому для достижения соответствия ИМ ВТПП реальным технологическим процессам необходимо реализовать несколько итераций ИЭ. Агрегаты в библиотеке представляют собой «заготовки», которые после «запитки» модели превращаются в версии агрегатов микротехнологических операций ($МТХО_{ij}$).

3. **Параметризация имитационной модели ВТПП** позволяет разработчику ИМ компоновать их из ограниченного состава агрегатов в различных вариантах ВТПП. Все параметры ИМ ВТПП можно представить двумя группами: настройки ИМ на конкретную конфигурацию ВТПП; изменяемой по составу в ходе исследования динамики развития ВТПП. С помощью первой группы параметров конструктор

модели ВТПП задает варианты структуры ВТПП. Варьируя параметры второй группы, исследователь ставит серию ИЭ уже на фиксированной конфигурации ВТПП.

4. *Использование процедуры Монте-Карло* для постановки ИЭ, поскольку все запросы $MTXO_{ij}$ ресурсов ВТПП являются, в общем случае, смесью вероятностных и детерминированных величин. Для достижения требуемой достоверности имитации β необходимо N раз реализовать ИЭ, причем один цикл имитации представляет собой одну реализацию ИМ ВТПП.

5. Для описания динамики взаимодействия компонентов ВТПП осуществляется *использование аппарата сетевого планирования* в сочетании с процедурой Монте-Карло. В результате вместо обычного сетевого графика (СГР) используются имитационные модели вероятностных сетевых графиков (ВСГР) динамики выполнения ВТПП. По структуре описание ВТПП с помощью ВСГР похоже на описание СГР. Различие состоит в том, что вместо обычно детерминированного времени выполнения $MTXO_{ij}$ (τ_{ij}^*) каждая микротехнологическая операция ВТПП представляется группой запросов ресурсов ВТПП, необходимых для её выполнения и представляющих собой вероятностные величины, которые описываются с помощью соответствующих функций распределения.

На рисунке 4.4 приведена блок-схема этапов реализации предлагаемого метода исследования ВТПП с помощью имитационных моделей ВСГР. Для принятия проектного решения в общем случае исследователю необходимо последовательно реализовать 20 этапов. Для любого принятия решения он должен вначале создать ИМ ВТПП (этапы 1–14), а затем эксплуатировать готовую параметризованную ИМ ВТПП (этапы 15–20). Для разработки ИМ ВТПП исследователь должен быть профессионалом в программировании и прикладной математике и владеть методикой имитационного моделирования на основе агрегатно-процессного способа имитации сложных систем. Для эксплуатации готовой параметризованной ИМ ВТПП исследователю не нужна высокая квалификация по прикладной математике, поскольку используется готовая ИМ, отлаженная, верифицированная, прошедшая все этапы испытания. Исходя из этих соображений мы предполагаем, что первые четырнадцать этапов метода реализуются только тогда, когда исследуется новая структура ВТПП по единой методике. Само же проектное моделирование конкретного ВТПП, выполняемое на этапах 14–20, осуществляется многократно по единой технологии эксплуатации ИМ ВТПП и принятия проектных решений.

Поэтому, если на этапе 20 определяется, что результаты моделирования не удовлетворяют исследователя, ему необходимо повторить

все этапы реализации метода, начиная с самого начала. Если же модель реализована неверно и результат верификации ИМ ВСГР отрицателен, то разработчик модели должен вернуться на один из предыдущих этапов, начиная с этапа 4. В том случае, когда по результатам испытания установлено на этапе 12, что версия ИМ ВСГР не верна, разработчик программы должен либо вернуться к этапу 11 и повторить испытания, либо повторить разработку начиная с этапа 3.

Только проверенная на адекватность ИМ ВСГР катализируется в библиотеку готовых ИМ ВТПП. Если адекватность ИМ не достигнута, разработчик вынужден вернуться на этапы 1 и 2. На каждом этапе разработки и эксплуатации ИМ ВСГР необходимо выполнить следующий объем работ.

На *этапе 1* технолог предприятия составляет содержательное описание технологического процесса предприятия. Как правило, выполняется следующая последовательность действий: определяются управляющие переменные, выбирается состав контролируемых характеристик ВТПП, детализируется режим функционирования ВТПП, определяется технологическая схема ВТПП за счет описания внешней среды. Таким образом, в содержательном описании хранятся таблицы коммутации $MTXO_{ij}$ и последовательность их выполнения в ходе реализации ВТПП. Составляется список запросов ресурсов ВТПП для выполнения каждой $MTXO_{ij}$. Уточняются цели моделирования ВТПП, определяется состав задач, которые необходимо решить с помощью разрабатываемой ИМ ВТПП. Для определения значений запросов ресурсов $MTXO_{ij}$ и составления таблиц исходной информации осуществляется мониторинг характеристик функционирования ВТПП.

Этап 2 проводится только в том случае, когда необходимо исследовать существующий ВТПП и имеется прототип устройств оборудования предприятия. При проектном моделировании ВТПП прототипа нет, и поэтому вместо измерения запросов ресурсов используется метод экспертных оценок. В особых случаях результатом этапа 2 является наличие функций распределения запросов ресурсов предприятия каждой $MTXO_{ij}$. Устанавливаются также диапазоны изменения запросов ресурсов и параметров моделирования. Выделяются три типа переменных функционирования реальных компонентов ВТПП, используемые в качестве: исходной информации для «запитки» ИМ ВТПП ($type = 1$); эталонов поведения ветвей ВТПП при верификации алгоритмов ИМ ВТПП ($type = 2$); характеристик сравнения при проверке адекватности ИМ ($type = 3$).

На *этапе 3* ВТПП формализуется на основе аппарата сетевого планирования. Из-за вероятностного характера запросов ресурсов

предприятия известные сетевые графики (СГР) непосредственно нельзя использовать. Поэтому используется комбинация СГР с процедурой Монте-Карло. Результатом такой модификации методов сетевого планирования и метода Монте-Карло являлись вероятностные сетевые графики (ВСГР), представляющие собой внутри одной реализации процедуры Монте-Карло обычных СГР, заново формируемых перед началом имитации l -й реализации ВСГР.

На *этапе 4* осуществляется перевод формального описания ВТПП в имитационную модель в виде ВСГР. Уточняется результат декомпозиции ВТПП. Проводится информационная стыковка алгоритмов агрегатов ИМ. Уточняется взаимодействие агрегатов с управляющей программой моделирования (УПМ). На этапе 4 разработчик ИМ ВСГР обычно выполняет следующую последовательность действий: обеспечивает внутреннюю и внешнюю синхронизацию компонентов ИМ, используя для этой цели аппарат описания ВСГР; описывает поведение компонент при появлении конфликтных ситуаций с помощью агрегатов-имитаторов событий; уточняет состав исходной информации путем анализа на непротиворечивость таблиц заказа $MTXO_{ij}$ ресурсов ВТПП и таблиц коммутации агрегатов $MTXO_{ij}$ и агрегатов-событий; устанавливает контроль за ходом имитации путем установки внутрь агрегатов стандартных операторов сбора статистики.

На *этапе 5* реализуются алгоритмы агрегатов-имитаторов $MTXO_{ij}$ и событий. Из-за использования аппарата сетевого планирования имитационная модель реализуется автоматически за счет использования системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ). Использование САИМ облегчает проверку достоверности схемы модели, а также сама технология замены описателей агрегатов типовыми описателями САИМ. Отметим отсутствие кодировки программы модели, поскольку структура программ описывается универсальным составом программ агрегатов-имитаторов $MTXO_{ij}$ и событий SOB_j . Отпадает также необходимость в автономной отладке алгоритмов агрегатов. Поэтому на этапе 5 основной является комплексная отладка программ ИМ ВСГР.

На *этапе 6* разрабатываются компоненты двух библиотек. Во-первых, это создание библиотеки параметризованных заготовок агрегатов $AGMTXO_{ij}$ и $AGSOB_i$. Каждая программа агрегата-имитатора микротехнологических операций запрограммирована таким образом, что достаточно правильно описать структуру таблиц и справочников агрегатов, для того чтобы было обеспечено правильное функционирование программ агрегатов. Поскольку эти программы являются

реентерабельными, то при разработке библиотеки агрегатов обеспечивается информационная стыковка с базой данных модели, где хранится информация по каждой версии агрегатов. Во-вторых, это создание библиотеки параметризованных имитационных моделей вариантов ВСГР. Каждый вариант ВСГР, проводящий комплексную отладку, для своего последующего использования требует замены формальных описателей на фактические адреса исходной информации, а также указания адресов накопления статистики имитации ИМ ВСГР. Любая модификация состава и структуры ВСГР приводит к появлению в библиотеке «заготовок» ИМ ВСГР новой версии ИМ ВСГР. Поэтому перед использованием данной версии необходим этап настройки этой программы ИМ ВСГР на конкретную структуру и состав ВТПП, который осуществляет САИМ автоматически по технологии.

На *этапе 6* осуществляется постановка натуральных экспериментов с прототипами ВТПП, если они существуют. В случае проектного моделирования ВТПП прототипов нет, и поэтому исследователи должны сконструировать исходную информацию о структуре ВТПП таким образом, как будто они получены при натуральных экспериментах. Очевидно, что в этом случае используются только экспертные данные или результаты частичного имитационного моделирования.

В обоих случаях на *этапе 7* уточняются значения тех переменных имитации, которые в дальнейшем используются для верификации и испытания ИМ ВСГР, а также для проверки адекватности ИМ реальному ВТПП.

На *этапе 8* осуществляется перевод формального описания ВСГР в конкретную ИМ ВТПП. Возможны два случая: структура ВТПП настолько стандартна, что в библиотеке параметризованных «заготовок» имеется готовая ИМ ВСГР, для которой необходимо лишь указать адреса фактических запросов агрегатов-ресурсов ВТПП; вариант ИМ ВТПП создается впервые, и поэтому необходимо модуль верифицировать, испытать и проверить её адекватность реальному ВТПП. В первом случае осуществляется вызов из библиотеки «заготовок» варианта ИМ ВСГР, который требует последующей «запитки» исходной информации о составе запросов агрегатами ресурсов ВТПП. Во втором случае выполняется ряд действий, аналогичных шагам этапа 5. В обоих случаях исследователь имеет в своём распоряжении «заготовку» конкретного варианта ВСГР, который необходимо испытать на последующих этапах метода.

На *этапе 9* осуществляется «запитка» варианта ИМ ВСГР исходной информации. Здесь необходимо конкретизировать информацию

в таблицах запросов агрегатами $AGMTXO_{ij}$ ресурсов ВТПШ и содержимое таблицы коммутации агрегатов $AGSOS_i$. Указывается также состав статистики и адреса её хранения, состав откликов имитации и целевая функция имитационного моделирования, список переменных верификации, полученных в ходе натурных экспериментов на этапе 7.

На *этапе 10* приводится верификация конкретного варианта ИМ ВСГР. Здесь нет никакой неопределённости в описании программы ИМ ВСГР и задании исходной информации для проведения этапа. В общем случае методики верификации не существует, и поэтому качество и продолжительность этапа зависит от сложности ВТПШ и опыта разработчика ИМ.

На *этапах 11–14* ИМ ВСГР подвергается испытанию, в ходе которого разработчик ИМ должен выполнить набор стандартных процедур испытания ИМ. Вначале определяется точность имитации (ε_n) конкретного варианта ВСГР. Затем определяется длина переходного периода имитации (T_{pp}) и оценивается устойчивость имитации. Проверяется наличие такой ситуации, когда при увеличении времени имитационного моделирования T_{im} ($T_{im} > T_{pp}$) на порядок разность соседних амплитуд откликов имитации меньше ошибки имитации ($|Y_{it} - Y_{it+1}| \leq \varepsilon_n$). Далее оценивается значение коэффициентов чувствительности откликов имитации к вариациям параметров моделирования ($\gamma_i \leq \varepsilon_n$). Если же для какого-либо отклика i коэффициент чувствительности меньше точности имитации ВТПШ, то это означает, что для данного варианта ИМ ВТПШ этот отклик можно не рассматривать. Когда все отклики $\{Y_i\}$ не «чувствуют» изменения m -го параметра моделирования, то это означает, что данный параметр можно исключить из моделирования. Когда ИМ ВСГР не проходит все этапы испытания, то на этапе 11 осуществляется выбор направления дальнейших исследований. Если ИМ ВСГР не верно, разработчик модели вынужден вернуться на повторение этапов 2 и 3. Если же результаты испытания ИМ ВСГР оказались удовлетворительными, выполняется процедура проверки адекватности ИМ ВСГР на этапе 13. Если же прототипа ИМ нет, то этап 13 проверки адекватности опускается, и на этапе 14 осуществляется каталогизация в библиотеку варианта ИМ, который прошел все этапы испытания.

С *этапа 15* начинается цикл использования отлаженной и готовой к эксплуатации ИМ ВСГР. Поэтому на этапе 15 осуществляется вызов из базы данных САИМ программы варианта ИМ ВСГР. Задаются параметры ИМ ВСГР. В итоге оперативной памяти ЭВМ

находится вариант ИМ ВСГР, готовый к постановке серии ИЭ, в котором каждый вариант имитации представляет собой l -ю реализацию процедуры Монте-Карло.

На *этапах 16 и 17* проводится N раз имитации ВСГР с записью статистики в базе данных ИМ ВСГР. Отметим, что в поле статистики, отведённом в базе данных модели, находятся результаты имитации всех N реализации ИМ ВСГР в виде выборок. Поэтому на *этапе 18* осуществляется вторичная обработка статистики программой *STAIM*. При этом осуществляется усреднение результатов имитации и определение точности моделирования откликов имитации. С помощью программы *STAIM* формируются графики изменения суммарного расхода ресурсов и стоимости выполнения ВТПП согласно технологии. В итоге для следующего этапа в базе данных модели находятся результаты имитации варианта ИМ ВСГР, готовые для выполнения следующего этапа.

На *этапах 19–20* осуществляется эксплуатация результатов имитационного моделирования и принятие решений. Если результаты моделирования не удовлетворят исследователя, то он должен либо определить ошибку динамики имитации, либо устранить ошибку в описании объекта и целей имитации и повторить весь цикл исследований.

5 Методика содержательного описания управляемых технологических систем на основе ВТПП

5.1 Этапы описания управляемых технологических систем

На *этапе 1* составляется содержательное описание ВТПП на основе использования следующих принципов.

1. **Обоснование структуры и выбор состава компонентов ВТПП.** Для реализации этого принципа необходимо изучение поведения тех TXO_i , представление функционирования которых важно для данного исследования. Каждая TXO_i реализуется соответствующей последовательностью микротехнологических операций $\{MTXO_{ij}\}$. При этом TXO_i могут изучаться независимо друг от друга. Для этого достаточно задать граф реализации TXO_i множеством $\{MTXO_{ij}\}$. По возможности следует заранее определить типовой состав ресурсов, оборудования, комплектующих изделий и материалов, исполнителей, стоимости выполнения $\{MTXO_{ij}\}$. Весьма важно определиться с оценками качества реализации ВТПП.

2. Декомпозиция ВТПП. Ранее мы установили, что ВТПП имеет иерархическую структуру. Вначале ВТПП представляется множеством $\{TXO_i\}$, задаваемым соответствующими графами $GRTO$ на верхнем уровне иерархии его описания. Количество TXO_i в $GRTO$ может быть различно. Одни и те же TXO_i могут входить в различные типы ВТПП. На втором уровне декомпозиции каждая TXO_i может быть представлена соответствующим графом $GRTO_{ij}$, представляющим собой запись порядка, ее реализации последовательностью микротехнологических операций $\{MTXO_{ij}\}$. Здесь также одни и те же $MTXO_{ij}$ могут входить в различные TXO_i и ВТПП. Степень детализации TXO_i и $MTXO_{ij}$ определяется следующими возможностями: доступностью для изучения исследователем алгоритмов реализации функций $MTXO_{ij}$, выделением типовых функций TXO_i , установлением взаимосвязей по управлению и информации компонент ВТПП. В итоге каждый ВТПП представляется в виде двух графов (верхнего уровня – $GRTO$ и нижнего уровня – GTO_{ij}). Возможны комбинации на каждом из уровней описания ВТПП двух способов описания этих графов. При первом способе описания узлами являются либо TXO_i или $MTXO_{ij}$, а ребрами – возможные переходы от одного узла к другому (вероятностные или детерминированные). Этот способ назовем «полумарковским описанием» графа. При втором способе узлами являются события, а ребрами задаются TXO_i и $MTXO_{ij}$. Причем выходы из узлов могут быть вероятностными или детерминированными. Некоторые TXO_i могут выполняться на различных рабочих местах (PM_{kj}). Возможна специализация PM_{kj} по выполнению на них $MTXO_{ij}$. В цехах и участках предприятия возможно выполнение различных $MTXO_{ij}$. Важно учесть последовательный характер выполнения $MTXO_{ij}$, относящихся к одной и той же TXO_i и правильное чередование операций разборки и сборки элементов изделий с выполнением ремонтных операций. Многофункциональный режим реализации $MTXO_{ij}$ на PM_{kj} имеет своей целью достижение максимальной загрузки оборудования и состава рабочей силы, закрепленных за этими PM_{kj} . Таким образом, вместо исследования сложно организованного ВТПП предлагается исследовать характеристики поведения каждой TXO_i с помощью анализа реализаций графа GTO_{ij} и затем следует исследование графа верхнего уровня ВТПП путем имитации выполнения $GRTO_i$.

3. Выделение видов функциональных связей компонентов. В графах $GTXO_{ij}$ и $GRTO_i$ устанавливаются наличие детерминированных и вероятностных переходов и источники для определения вероятностных переходов. Для первого примера ВТПП возможно также

установление кроме управляющих еще и информационных связей между некоторыми операциями ремонта изделий, включая межцеховые и внутрицеховые технологические связи, отображающие подготовительные действия для реализации $MTXO_{ij}$, связанных с ремонтом, а также выполнения разборочных и сборочных операций над элементами изделия. Для каждой i -й технологической карты (TK_i) определяются траектории движения составных частей изделия при реализации TXO_i на рабочих местах участков и цехов предприятия. Каждому элементу блок-схемы ВТПП первого типа (TXO_i), содержащейся в TK_i , сопоставляется свое подмножество $MTXO_{ij}$.

4. Установление целей исследования ВТПП. Реализация этого принципа требует выполнения следующих действий: выделения критериев качества функционирования h -го варианта ВТПП (W_{bf}), определения задач исследования ВТПП с помощью ИМ; конкретизации обобщенного критерия W_{bf} задач исследования ВТПП. В качестве первоочередных типовых задач предлагаются задачи:

- определение пропускной способности ВТПП при заданном составе PM_k , наборе ресурсов, оборудования, списке исполнителей и стоимости его реализации (C_f);

- нахождение узких мест в заданной TK_i технологии реализации ВТПП;

- при заданных вероятностях выполнения ремонтных работ и вероятностях возникновения аварийных ситуаций из-за некачественного ремонта $MTXO_{ij}$ ситуаций при использовании изделия после его ремонта, определение вероятностей возникновения аварий в ходе эксплуатации всего изделия и оценка возникновения из-за этого потерь пропускной способности ΔV_{nf} и дополнительных затрат ΔC_{nf} на ликвидацию отказов оборудования;

- выбор из множества выполняемых на данном предприятии ВТПП рационального для предприятия набора технологических процессов по критериям минимальной стоимости их реализации и максимальной пропускной способности предприятия;

- определение математических ожиданий и дисперсий у интегральных откликов расхода ресурсов, материалов, оборудования и рабочей силы.

Обычно выбор рационального варианта организации ВТПП осуществляется на основе компромисса между значениями: величины загрузки $MTXO_{ij}$, пропускной способности ВТПП, стоимости

реализации ВТПП, вероятности возникновения аварий, потерь на ликвидацию последствий аварий в ходе функционирования ВТПП или же при эксплуатации некачественно отремонтированных изделий.

5. Выдвижение гипотез о характере реализации $MTXO_{ij}$ и их взаимодействия. Во-первых, это гипотезы о возможности представления ВТПП на каждом из уровней детализации в виде полумарковского процесса. Во-вторых, это гипотеза о возможности представления функциональной зависимости $MTXO_{ij}$ в виде ВСР. В-третьих, это возможность объединения различных TXO_{ij} на одних и тех же площадях участков и цехов предприятия.

6. Определение состояния ВТПП. При реализации этого принципа возможны различные подходы. Предлагается определять состояния ВТПП как суперпозицию состояний $MTXO_{ij}$, входящих в этот процесс и связанных друг с другом согласно двухъярусному графу их выполнения, на основе усредненных показателей потерь при реализации в очередях к $MTXO_{ij}$ и вычисления усредненных значений коэффициентов их использования.

7. Определение откликов моделирования. Согласно этому принципу необходимо иметь ввиду, что качество ВТПП может оцениваться с различных сторон. С точки зрения администрации предприятия ВТПП считается хорошо организованным при высоком коэффициенте использования PM_{ki} ($\bar{\eta}_{ki}$). В высокой пропускной способности ВТПП (\mathcal{Q}_{fi}) заинтересована администрация предприятия и организации, пользующиеся услугами предприятия. Поскольку ресурсы, состав оборудования, рабочей силы и материалов обычно у предприятия ограничены, то предприятие заинтересовано в снижении их количества по каждому типу ресурсов. Пользователи услуг предприятия, ремонтирующего изделия, требуют высокого качества ремонта компонентов изделия для достижения минимальной вероятности возникновения аварийной ситуации при эксплуатации вновь отремонтированного изделия. Очевидно, что потери на ликвидацию последствий некачественного ремонта предприятием должны быть минимальными. Наконец, поскольку любое предприятие, реализующее производственный цикл согласно установленным технологиям (зафиксированным в иерархическом графе TXO_i), должно быть экономически сбалансированным, то для его администрирования важным откликом модели является среднесуточная стоимость реализации ВТПП. Все перечисленные аспекты интересов администрации предприятия и пользователей продукции

предприятия в ряде случаев могут быть взаимоисключающими. Поэтому при выборе компромиссных решений для анализа качества вариантов организации ВТПП необходимо уделять особое внимание определению откликов модели и коэффициентов их важности в целевой функции качества организации технологического процесса.

8. **Установление функций $MTXO_{ij}$ при реализации ВТПП.** Следование этому принципу предполагает, что для каждой $MTXO_{ij}$ устанавливаются списки связей непосредственного и информационного взаимодействия. При этом определяется множество стандартных и уникальных функций реализации ВТПП.

Получение ответов соответственно по каждому из перечисленных выше пунктов в итоге позволяет составить текст содержательного описания ВТПП на предприятии.

5.2 Формализация управляемых технологических систем на основе аппарата сетевого планирования

На третьем этапе метода исследования ВТПП осуществляется формализация ВТПП с помощью комбинации методов сетевого планирования и метода статистических испытаний. Из-за вероятностного характера запросов $MTXO_{ij}$ ресурсов предприятия в сетевом графике (СГР) после выполнения завершающего события SOB_n добавляется процедура Монте-Карло, которая после l -й реализации СГР возвращает имитацию к исходному событию SOB_1 . Только после выполнения N реализаций ($l = 1, N$) имитация ВТПП завершается. После добавления процедуры Монте-Карло к СГР получаем ИМ модель ВТПП в виде вероятностного сетевого графика (ВСГР). Как видим, для описания состава и структуры ВТПП используем аппарат сетевого планирования в виде ВСГР. Все работы с ВСГР представляют собой микротехнологические операции ($MTXO_{ij}$). Наличие связи между $MTXO_{ij}$ в ВСГР будем описывать с помощью событий SOB_i и SOB_j , являющихся узлами ВСГР. При этом времена выполнения $MTXO_{ij}$ (τ_{ij}) и сами направления связей между SOB_i являются вероятностными. В таких ситуациях алгоритм расчета и анализа реализаций сетевых графиков не обеспечивает получения достоверной информации. Поэтому предлагается заменить ВСГР с помощью известной процедуры Монте-Карло на последовательность СГР _{l} с детерминированными параметрами, полученными в ходе l -й реализации ВСГР,

длиной N . При такой замене уже можно использовать методику расчета параметров l -й реализации ВСГР. Для каждого SOB_j , связанного с событиями SOB_i и SOB_k с помощью соответственно $MTXO_{ij}$ и $MTXO_{jk}$ определяются ранние и поздние сроки их свершения (t_{Rjl} и t_{Pjl}) по формулам:

$$t_{Rjl} = \max\{t_{Ril} + \tau_{ijl}\}; t_{Pjl} = \min\{t_{Pkl} - \tau_{jkl}\}, \quad (5.1)$$

где τ_{ijl} и τ_{jkl} – длительности выполнения $MTXO_{ij}$ и $MTXO_{jk}$ в l -й реализации ВСГР;

t_{Pil} и t_{Pkl} – ранние и поздние сроки свершения соответственно SOB_i и SOB_k .

Расчет t_{Rjl} начинается от исходного события SOB_1 и оканчивается завершающим событием SOB_n , а вычисление t_{Pjl} начинается в обратном порядке от завершающего события SOB_n и заканчивается исходным событием SOB_1 . Рассчитываются также резервы свершения событий ($R_{il} = t_{Pil} - t_{Ril}$).

Аналогичным образом для каждой $MTXO_{ij}$ по известным расчетным формулам (9.1) вычисляются статистики реализации $MTXO_{ij}$: раннее начало их свершения ($t_{RNijl} = t_{Ril}$); позднее начало свершения $MTXO_{ij}$ ($t_{PNijl} = t_{Pjl} - \tau_{ijl}$); раннее окончание ($t_{ROijl} = t_{Ril} + \tau_{ijl}$); позднее окончание ($t_{POijl} = t_{Pjl}$). Критический путь l -й реализации ВСГР_{*l*} составляет последовательность $\{SOB_i\}$, у которой резервы свершения равны нулю ($R_{il} = 0$), и $\{MTXO_{ij}\}$, связывающих эти SOB_i . В результате N реализаций ВСГР_{*l*} ($l = 1, N$) для каждого SOB_i формируются выборки объема N статистик его свершения: $\{t_{Ril}\}$, $\{t_{Pil}\}$, $\{R_{il}\}$. Аналогичным образом определяются выборки статистик реализации $MTXO_{ij}$: $\{t_{RNijl}\}$, $\{t_{PNijl}\}$, $\{t_{ROijl}\}$, $\{t_{POijl}\}$. Для определения наиболее вероятного критического пути в ВСГР используется множество критических путей, найденное в ходе имитации каждой реализации ВСГР_{*l*} ($\{KRP_l\}$). С помощью этого множества формируется граф реализаций критических путей ВСГР ($GRKRP$). По всем перечисленным выборкам объема N определяются оценки математических ожиданий и выборочных дисперсий S^2 : ($\bar{t}_{Ri}, \bar{t}_{Pi}, \bar{R}_i, S^2 t_{Ri}, S^2 t_{Pi}, S^2 R_i$) и ($\bar{t}_{RNij}, S^2 t_{RNij}, \bar{t}_{PNij}, S^2 t_{PNij}, \bar{t}_{ROij}, S^2 t_{ROij}, \bar{t}_{POij}, S^2 t_{POij}$). Усреднённые статистики свершения $\{SOB_i\}$ и $\{MTXO_{ij}\}$, входящие в $GRKRP$, можно использовать при анализе динамики реализации ВСГР_{*l*}, оценках надежности и безопасности реализации ВТПП.

Специфика исследования ВТПП такова, что исследователю обычно недостаточно исследований временных показателей реализации ВСГР

и необходима модификация этих методик. Расширением аппарата формализации ВСГР для исследования ВТПП является добавление в описании параметров $MTXO_{ij}$ характеристик использования $MTXO_{ij}$: общих ресурсов r -го типа объема (V_{rij}), стоимости их выполнения (C_{ij}), материалов r -го типа в количестве (mt_{rij}), комплектующих деталей r -го типа в количестве (ko_{rij}). Поскольку все эти характеристики требований $MTXO_{ij}$ являются вероятностными, то необходимо задание соответствующих функций их распределения:

$$F_{1ij}(\tau), F_{2ij}(C), F_{3rij}(V), F_{4rij}(mt), F_{5rij}(ko). \quad (5.2)$$

Некоторые $MTXO_{ij}$ для своего выполнения требуют выделения дополнительных характеристик в виде списков запросов: ресурсов индивидуального использования ($SP.INR_{ij}$), оборудования ($SP.OBR_{ij}$) и исполнителей ($SR.ISP_{ij}$). Для имитации отказов функционирования $MTXO_{ij}$ необходимо указание характеристик надежности и безопасности их реализации. При описании $MTXO_{ij}$ перед имитацией ВСГР необходимо задать: функцию распределения длины интервалов τ_{BOij} между соседними отказами h -го типа выполнения $MTXO_{ij}$ ($\Phi_{1hij}(\tau_{BO})$); функцию распределения длины интервалов τ_{VOij} восстановления работоспособности $MTXO_{ij}$ ($\Phi_{2hij}(\tau_{VO})$); вектор распределения вероятностей того, что при выполнении $MTXO_{ij}$ отказ h -го типа окажется опасным и приведет к возникновению аварийной ситуации ($\{P_{hij}\}$); функцию распределения дополнительной стоимости (C_{VOij}) из-за восстановления работоспособности $MTXO_{ij}$ при появлении опасных отказов h -го типа ($\Phi_{3hij}(C_{VO})$); функцию распределения дополнительной стоимости выполнения $MTXO_{ij}$ (C_{AVij}) при ликвидации аварий, возникших по вине $MTXO_{ij}$ ($\Phi_{4hij}(C_{AV})$).

При выполнении особенно ресурсоемких $MTXO_{ij}$ в результате имитации ВСГР исследователю желательно получить графики расхода общих ресурсов предприятия. С этой целью перед имитацией выполнения $MTXO_{ij}$ длительностью τ_{ijl} осуществляется серия запросов на выделение общих ресурсов, материалов и комплектующих деталей. После выделения общих ресурсов формируется вторая серия запросов на индивидуальные ресурсы, оборудование и исполнителей. Выделение ресурсов предприятия на время выполнения $MTXO_{ij}$ осуществляется на основе конкуренции $MTXO_{ij}$ за эти ресурсы. При отсутствии необходимых ресурсов имитируется дополнительное ожидание выполнения $MTXO_{ij}$ до полного выделения затребованных ресурсов.

Список использованных источников

1. Смородин, В. С. Метод динамической имитации вероятностных производственных систем / В. С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2012. – № 2. – С. 96–101.
2. Смородин, В. С. Синтез динамической структуры вероятностных производственных систем / В. С. Смородин // Доклады БГУИР. – 2012. – № 2 (64). – С. 77–82.
3. 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.
4. Смородин, В. С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В. С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 105–110.
5. Смородин, В. С. Синтез структуры технологического цикла управляемых производственных систем / В. С. Смородин // Проблемы физики, математики и техники. – № 2 (11). – 2012. – С. 108–111.
6. Ерофеева, Е. А. Автоматизированная система разработки прогнозного графика движения поездов на Белорусской железной дороге / Е. А. Ерофеева, А. А. Ерофеев // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Сер. Наука и транспорт. – 2011. – № 1. – С. 59–65.

Перечень условных обозначений и сокращений

БД	База данных
БДМ	База данных модели
ВСГР	Вероятностный сетевой график
ВТПП	Вероятностный технологический процесс производства
ВТП ОП	Потенциально опасный вероятностный технологический процесс
ВТП1	Вероятностный технологический процесс с последовательной организацией технологического цикла
ВТП2	Быстротекущий вероятностный технологический процесс
ВТП3	Вероятностный технологический процесс с параллельно-последовательной организацией технологического цикла
ИМ	Имитационная модель
ИЭ	Имитационный эксперимент
НЭ	Натурный эксперимент
ПММ	Полумарковская модель
ПО	Программное обеспечение
ПТКИ	Программно-технологический комплекс имитации
САИМ	Система автоматизации имитационного моделирования
САМ	Система автоматизации моделирования
СГР	Сетевой график
СМ	Система моделирования
СМО	Система массового обслуживания
СС	Сложная система
СУ	Система управления
ТП	Технологический процесс
УПМ	Управляющая программа моделирования
ЯМ	Язык моделирования

Приложение А

(обязательное)

Схема формального описания управляемой технологической системы

Методика выполнения проектного моделирования

Формальное описание управляемой технологической системы проводилось при осуществлении пуско-наладочных работ по международному инновационному проекту «Создание производства для нанесения стеклоэмалей», выполняемых на РУП «Гомельское ОАО «Электроаппаратура»».

В соответствии с тестовым примером выполнено описание управления технологической линией эмалирования при испытании программного обеспечения комплекса имитации «SimTRP.exe».

Для описания управления технологической линией эмалирования введено понятие «цикл» работы. Термин «цикл» подразумевает производственную фазу, в течение которой линия эмалирования производит готовые детали.

Технологическая линия эмалирования считается готовой к производственной фазе или пуску «цикла» только после завершения этапа «предварительного разогрева». Во время предварительного разогрева все «горячие» участки линии эмалирования доводятся до режимной температуры. Система имеет два рабочих режима: автоматический и ручной.

Рабочие режимы

Имеются два оперативных режима: автоматический и ручной.

Автоматический – для нормального функционирования линии эмалирования.

Ручной – для запуска и остановки отдельных пользовательских узлов, сохраняя при этом активными устройства блокировки безопасности (например, минимальный уровень в насосе).

Выбор режима осуществляется с помощью главного переключателя или локального переключателя на панели оператора. Локальное переключение с панели оператора действует как отдельная утилита. Главный переключатель касается всех узлов. Правила для настройки режимов следующие:

Часы внутри программируемого логического контроллера (ПЛК) управляют автоматическим пуском в соответствии с установленным графиком.

Ручной пуск и обслуживаемые участки

В случае отсутствия данных в графике начала пуск предварительного нагрева осуществляется вручную нажатием кнопки «Пуск цикла».

Подвергаемые предварительному разогреву участки линии эмалирования: предварительное обезжиривание, обезжиривание и сушка.

На панели оператора определяются температура конца подогрева, по достижении которой линия эмалирования готова к началу производства.

Состояние «Линия эмалирования готова» сигнализируется сообщением на панели оператора и световыми сигналами.

Чтобы остановить процесс нагрева, необходимо нажать кнопку «Остановка цикла» или «Конец цикла».

Пуск технологического цикла

Состояние «Линия эмалирования готова» сигнализируется:

- индикатором на панели оператора;
- загорается зелёная лампочка на световой башенке.

Пуск цикла авторизован, если линия эмалирования находится в состоянии «Линия эмалирования готова».

Для начала цикла нажать кнопку «Пуск цикла» более чем на три секунды; процедура запуска автоматизирована и предполагает:

- активации автоматической реинтеграции уровней ванны;
- насосы пандусов туннеля включены.

Во избежание одновременного пуска всех насосов и клапанов предварительной обработки, необходимо ввести задержку времени на несколько секунд между пуском двух разных насосов.

Состояние «цикл выкл» сигнализируется:

- индикатором на панели оператора;
- загорается синяя лампочка на световой башенке.

Приложение Б (обязательное)

Пример построения модели для анализа динамики управления оборудованием

Система управления использует специальное оборудование, состоящее из множества устройств индивидуального пользования r_1 -го типа общим числом $\{n_{1r1}\}$. В составе СУ ВПС имеются множества технических устройств синхронизации типа «И» ($\{SINCH_j\}$), сложных устройств синхронизации типа «ИЛИ» ($\{SINCHR_j\}$), сложных исполнительных элементов ($\{ISPOL_{ij}\}$), активизируемых устройствами синхронизации i -го типа, которые после реализации исполнительных функций, активизируют j -е устройства синхронизации.

В суточном интервале функционирования СУ возможно несколько циклов управления ВПС, которая имеет графовую структуру. Начинается цикл управления состоянием с номера 0 и завершается состоянием с номером n . Число исполнительных элементов в системе управления равно m . Каждый исполнительный элемент ($ISPOL_{ij}$) идентифицируется номерами элементов синхронизации (i – на входе и j – на выходе элемента) и при этом использует следующие ресурсы предприятия:

- время и стоимость выполнения (τ_{ij}, s_{ij});
- материалы и комплектующие изделия (mt_{ij}, KO_{ij});
- количество исполнителей (n_{5ij});
- количество r_3 типов ресурсов индивидуального пользования $\{n_{3r3ij}\}$;
- количество r_1 типов устройств оборудования $\{n_{1r1ij}\}$.

Эксперту-технологу известна графовая структура системы управления. Используемые в СУ ВПС устройства оборудования имеют встроенные средства индикации и управления, поэтому с помощью имитационной модели системы управления имеется возможность в нужные моменты времени посылать на устройства оборудования команды переключения устройств на режимы одиночного и группового

резервирования, перевода на профилактику и ликвидации аварий на оборудовании.

При выполнении исполнительных функций системы управления используется оборудование, в котором могут возникнуть отказы функционирования. Поэтому технолог должен знать надежность характеристики функционирования k -го устройства оборудования:

$$Z = \{ (\Phi_{1kh}(\tau_{BO}); \Phi_{2kh}(\tau_{VO}); \Phi_{3kh}(\tau_{AV}); P_{abk}; \Phi_{4kh}(\Delta s) \},$$

которые представляют собой соответственно функции распределения вероятностей значений интервалов безотказной работы (τ_{BOk}), интервалов восстановления функционирования устройств (τ_{VOk}), интервалов ликвидации аварии (τ_{AVk}), вероятность возникновения аварии (P_{ABK}), стоимости ликвидации аварий (Δs_k).

При проектном моделировании СУ ВПС эксперт-технолог должен знать качественный состав имеющихся ресурсов предприятия для построения имитационной модели в виде множества параметров:

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

где компонентами являются множества устройств r_1 -го типа, ресурсов индивидуального пользования r_3 -го типа и исполнителей (n_{5h}^0) в h -м варианте ИМ системы управления.

Кроме того, эксперт-технолог, с помощью функций распределения вероятностей значений, должен задать множество запросов вероятностных и детерминированных ресурсов предприятия исполнительными элементами СУ:

$$G_1 = \{ F_{1ij}(\tau); F_{2ij}(s); F_{3ij}(KO); F_{4ij}(mt) \}.$$

Для отображения динамики реализации запросов ресурсов в ИМ СУ эксперт-технолог должен указать множество их использования исполнительными элементами:

$$G_2 = \{ \{ n_{5ij} \}, \{ n_{3r3ij} \}, \{ n_{1r1ij} \} \}.$$

Таким образом, для исследования системы управления ВПС с помощью имитационной модели требуется задание имеющейся комбинации ресурсов предприятия в виде множества (E4.2) и исходных значений переменных имитации G_{1h} , G_{2h} и Z_h соответственно в виде множеств (B4.1), (B4.3), (B4.4) для каждого h -го варианта организации имитационной модели.

Откликами ИМ СУ ВПС являются следующие переменные:

$Y_{1h} = T_{циклh}$ – время цикла реализации h -го варианта ИМ СУ ВПС;
 $Y_{2h} = C_{\Sigma h}$ – суммарное время реализации имитационной модели;
 $Y_{3h} = KO_{\Sigma hr3}$ – суммарный расход комплектующих r_3 -го типа;
 $Y_{4h} = mt_{\Sigma hr4}$ – суммарный расход материалов r_4 -го типа;
 $Y_{5h} = P_{ОТК СУ}$ – вероятность отказа оборудования в суточном цикле управления ВПС;

$Y_{6h} = T_{REh}$ – время реактивности h -го варианта ИМ СУ.

В качестве обобщенного критерия качества функционирования СУ ВПС в h -м варианте используется целевая функция:

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

где $0 \leq \delta_{jh} \leq 1$;

$\sum_{j=1}^5 \delta_{jh} = 1$ – весовые коэффициенты важности j -го отклика для лица, принимающего решение;

Y_{jh}^* – значения j -х компонентов вектора отклика, нормированные максимальными значениями среди возможных вариантов организации системы управления.

Как видно из примера, с помощью имитационной модели системы управления технологическим комплексом можно решить три задачи, которые являются актуальными для предприятия:

- анализа динамики управления оборудованием технологического цикла;
- определения времени запаздывания в цикле управления оборудованием (Y_{6h}).
- оценки уровня надежности и безопасности функционирования производства.

Производственно-практическое издание

**Сморodin Виктор Сергеевич,
Клименко Андрей Валерьевич**

ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ КОМПЛЕКСОВ

Практическое руководство

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

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

Подписано в печать 13.03.2014. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография. Усл. печ. л. 2,8.
Уч.–изд. л. 3,1. Тираж 15 экз. Заказ 165.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013.
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.
Ул. Советская, 104, 246019, Гомель.