

*И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. И. Сукач, И. В. Соболев*

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, РЕАЛИЗУЮЩАЯ АГРЕГАТНЫЙ СПОСОБ ИМИТАЦИИ**

Излагается подход к формализации вероятностных технологических процессов производства с помощью вероятностных сетевых графиков. Предложена методика построения имитационных моделей на основе комбинации аппарата сетевого планирования с процедурами статистических испытаний. Приведено описание возможностей системы автоматизации моделирования, реализующей агрегатный способ имитации

### ***Введение***

Для исследования динамики реализации технологических процессов производства (ТПП) все чаще используются математические модели (ММ) этих процессов, построенные на основе аппарата сетевого планирования. Этот аппарат исследования сложных систем позволяет с помощью ММ в виде сетевых графиков (СГР) вычислять временные характеристики развития ТПП в тех случаях, когда времена выполнения микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ) и структура СГР являются детерминированными. На практике такая ситуация для реальных ТПП чрезвычайно редка. Вероятностными являются не только длительности выполнения  $MTXO_{ij}$ , но даже сама их последовательность. В таких ситуациях известные методики расчета параметров СГР [1] не позволяют адекватно оценить значения параметров СГР и величины резервов времени свершения событий в СГР. Кроме того, исследователей зачастую интересуют не только временные характеристики выполнения последовательности  $MTXO_{ij}$ , но и расход ресурсов предприятия, степень загрузки оборудования, изменение стоимостных показателей при реализации ТПП. Эти обстоятельства не позволяют использовать аналитические модели типа СГР для анализа эффективности функционирования вероятностных технологических процессов производства (ВТПП), представленных в виде вероятностных сетевых графиков (ВСГР). В таких случаях актуальна имитация выполнения ВСГР. Однако это весьма ресурсо-

емкая процедура и для ее реализации необходимы средства автоматизации имитационного моделирования. Проблема ресурсоемкости имитации возрастает из-за необходимости использования процедуры Монте-Карло [2] при имитации выполнения элементов ВСГР. Анализ возможностей известных систем автоматизации моделирования (САМ), приведенный в [3], позволяет установить наличие больших трудностей при реализации имитационных моделей (ИМ) ВТПП с их помощью. Этими обстоятельствами определяется актуальность разработки нового метода анализа ВСГР и средств его реализации. В данной статье излагается новый подход к формализации ВТПП с помощью ВСГР, методика построения ИМ ВТПП на основе использования комбинации аппарата сетевого планирования, процедуры Монте-Карло и общей методики построения ИМ ВСГР, описания возможностей САМ, реализующей агрегатный способ имитации.

### ***1. Формализация вероятностных технологических процессов***

В качестве объекта исследования рассматривается ВТПП, представляющий собой выполнение последовательности взаимосвязанных микротехнологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$ . Связи между  $MTXO_{ij}$  удобно описывать с помощью вероятностных сетевых графиков (ВСГР), в которых работами являются  $MTXO_{ij}$ , а событиями  $SOB_i$  и  $SOB_j$  – узлы ВСГР. Если параметры выполнения  $MTXO_{ij}$  и направления связей между

$SOB_i$  и  $SOB_j$  являются детерминированными величинами, то можно использовать известные методики анализа динамики выполнения сетевого графика (СГР) [1]. Когда времена выполнения  $MTXO_{ij}$  или же направления связей между  $SOB_i$  являются вероятностными величинами, аналитический аппарат расчета параметров СГР практически нельзя использовать. Поэтому предлагается использовать известную процедуру Монте-Карло [2], согласно которой ВСГР заменяется последовательностью  $\{СГР_h\}$ , где  $h = \overline{1, N}$ ,  $N$  – количество реализаций ВСГР. При такой замене ВСГР на  $\{СГР_h\}$  для каждой его реализации уже можно использовать известные методики расчета параметров СГР<sub>h</sub> [1]. Для каждого  $SOB_j$ , связанного с помощью  $MTXO_{ij}$  и  $MTXO_{jk}$  соответственно с событиями  $SOB_i$  и  $SOB_k$ , определяются ранние и поздние сроки его свершения по формулам

$$\begin{aligned} t_{pjh} &= \max\{t_{pjh} + \tau_{ijh}\} & \text{и} \\ t_{njh} &= \min\{t_{njh} - \tau_{jkh}\}, \end{aligned} \quad (1)$$

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

$t_{pjh}$  и  $t_{njh}$  – ранние и поздние сроки свершения соответственно  $SOB_i$  и  $SOB_k$ .

Расчет  $t_{pjh}$  начинается от исходного события и заканчивается завершающим СГР<sub>h</sub>, а в то время как  $t_{njh}$  начинается в обратном порядке: от завершающего события до исходного  $SOB_i$ . Далее определяются резервы свершения всех событий по формулам

$$R_{ih} = t_{nih} - t_{pjh}. \quad (2)$$

По завершении расчетов параметров СГР<sub>h</sub> в  $N$  реализациях для каждого  $SOB_i$  формируются выборки параметров событий объема  $N$   $\{t_{pjh}\}$ ,  $\{t_{njh}\}$ ,  $\{R_{ih}\}$ ,  $h = \overline{1, N}$ . Аналогичным образом для каждой  $MTXO_{ij}$  по известным формулам рассчитывается четверка выборок объема  $N$  характеристик реализации  $MTXO_{ij}$ : раннее начало их свершения ( $t_{pjh} = t_{pjh}$ ), позднее начало их свершения ( $t_{njh} = t_{njh} - \tau_{ijh}$ ), раннее окончание

( $t_{pjh} = t_{pjh} + \tau_{ijh}$ ), позднее окончание ( $t_{njh} = t_{njh}$ ). По всем перечисленным выборкам объема  $N$  определяются оценки математических ожиданий  $M$  и выборочных дисперсий  $S^2$ . Находится последовательность критических путей в ВСГР, в которой элементами являются множества  $MTXO_{ij}$ , входящих в критические пути каждой его реализации. В итоге формируется граф, состоящий из последовательностей  $\{MTXO_{ijh}\}$ , входящих в критические пути  $\{СГР_h\}$ . Имея усредненные характеристики свершения  $\{SOB_i\}$  и диапазоны выполнения  $\{MTXO_{ij}\}$ , можно в дальнейшем использовать стандартные методики анализа сетевых графиков [1].

Когда исследователю недостаточно исследования по стандартным методикам оценок временных показателей ВСГР, необходима модификация данной методики. Существенным расширением аппарата формализации ВСГР является добавление в описание  $MTXO_{ij}$  характеристик использования каждой  $MTXO_{ij}$ : объема использования общих  $r$ -го типа ресурсов предприятия ( $V_{rj}$ ), стоимости их выполнения ( $C_{ij}$ ), количества материалов ( $mt_{ij}$ ) и количества комплектующих деталей ( $КОМ_{ij}$ ). Для этого необходимо задание функций распределения указанных ресурсов предприятия. Кроме того, для выполнения некоторых  $MTXO_{ij}$  необходимо выделить ресурсы предприятия для индивидуального их использования, оборудование, исполнителей. Эта информация представляет вторую часть параметров  $MTXO_{ij}$ , задаваемую в виде соответствующих списков и закрепляемых за  $MTXO_{ij}$  на время их выполнения ( $\tau_{ijh}$ ). При этом исследователю желательно получить графики: расхода общих ресурсов предприятия, использования оборудования, исполнителей и индивидуальных ресурсов. Кроме того, важно сопоставить эти графики со стоимостью выполнения  $MTXO_{ij}$  и расходом материалов. Для облегчения получения перечисленной информации предлагается вместо аналитических расчетов параметров свершения  $SOB_i$  и  $MTXO_{ij}$  использовать имитацию выполнения ВСГР. При этом перед выполнением  $MTXO_{ij}$ , инициированной

согласно ВСГР, осуществляется розыгрыш по заданным функциям распределений:  $F_{1ij}(\tau)$ ;  $F_{2ij}(C)$ ;  $F_{3rij}(Vr)$ ;  $F_{4ij}(mt)$  конкретных их значений в  $h$ -й реализации  $(\tau_{ijh}, C_{ijh}, Vr_{ijh}, mt_{ijh})$ . Перед имитацией выполнения МТХО<sub>ij</sub> длительностью  $\tau_{ijh}$  происходит запрос на выделение предприятием этих общих ресурсов на время ее выполнения. После этого формируется серия запросов на индивидуальные ресурсы, оборудование и исполнителей. Причем выделение ресурсов предприятия всех типов осуществляется на основе конкуренции МТХО<sub>ij</sub> за эти ресурсы. При отсутствии необходимых ресурсов имитируется дополнительное ожидание выполнения МТХО<sub>ij</sub> до полного выделения затребованных ими ресурсов предприятия.

При каждом выделении и использовании ресурсов фиксируется соответствующая статистика, по которой по завершении имитационного моделирования ВСГР формируются соответствующие диаграммы расхода и изменения во времени выполнения ВСГР оставшихся ресурсов, оборудования и исполнителей.

Вычисление  $t_{pih}$  осуществляется в режиме прямой имитации (когда модельное время  $t_0$  возрастает от 0 до момента выполнения завершающего события в  $h$ -й реализации процедуры Монте-Карло). Расчет  $t_{nih}$  проводится в режиме обратной имитации (когда  $t_0$  уменьшается до нуля).

## 2. Базовые компоненты имитационных моделей вероятностных технологических операций производства

Динамику взаимодействия МТХО<sub>ij</sub> в составе ВСГР представим набором агрегатов, взаимодействующих друг с другом с помощью множества сигналов. Различаем два типа агрегатов: микротехнологические операции (АМТХО<sub>ij</sub>) и события (ASOB<sub>i</sub>). Первый представляет собой четырехполюсник с двумя типами входов и выходов. В режиме прямой имитации процесс моделирования начинается от ASOB<sub>1</sub>, имитирующим выполнение исходного события,

и оканчивается выполнением ASOB<sub>n</sub>, имитирующим завершающее. В режиме обратной имитации процесс моделирования начинается после свершения события ASOB<sub>n</sub>, развертывается в обратном направлении выполнения ВСГР и завершается срабатыванием спусковой функции агрегата ASOB<sub>1</sub>. Вторым типом агрегатов ASOB<sub>i</sub> является многополюсник с различным количеством входов ( $b_i$ ) и выходов ( $k_i$ ). Выходы ASOB<sub>i</sub> могут быть: одиночными и «кустовыми». Выходы второго типа назовем вероятностными кустами (ВКР<sub>ijk</sub>). Разветвлений сигналов ( $d$ )  $k$ -го выхода ВКР<sub>ijk</sub> может быть много, однако должно выполняться условие: сумма вероятностей формирования действительных сигналов равна единице ( $\sum_k P_{ijk} = 1$ ).

Связи между агрегатами осуществляются с помощью сигналов следующей структуры:

$$Sg(TS, i, j, r, k, d, P_{kl});$$

где  $i, j$  – номера исходного и последующего агрегатов-событий (ASOB<sub>i</sub> и ASOB<sub>j</sub>), которые соединяются с помощью АМТХО<sub>ij</sub>; TS – тип сигнала (IP – входной прямой, OP – выходной прямой, II – входной, а OI – выходной обратной), поступающего на АМТХО<sub>ij</sub>;  $r$  – номер входа сигналов в ASOB<sub>j</sub>;  $k$  – номер выхода сигналов из ASOB<sub>i</sub>;  $d$  – тип выходного сигнала ( $d=1$  – одиночный, детерминированный;  $d>1$  – вероятностный, число разветвлений в ВКР<sub>ijk</sub> рождает только один действительный сигнал, а остальные – фиктивные);  $P_{kl}$  – вероятность имитации действительного выходного сигнала по  $l$ -му разветвлению  $k$ -го выхода агрегата-многополюсника ASOB<sub>i</sub>.

На входы агрегатов-четырёхполюсников АМТХО<sub>ij</sub> поступают сигналы типа IP и II. После имитации выполнения МТХО<sub>ij</sub> на выходах АМТХО<sub>ij</sub> формируются сигналы типа OP и OI, при этом АМТХО<sub>ij</sub> переходят в следующие состояния:

$SO_{ijh}$  – ожидание прихода от ASOB<sub>i</sub> сигнала типа IP;

$SI_{ijh}$  – активное состояние, имитирующее в  $h$ -й реализации ВСГР начало

выполнения МТХО<sub>ij</sub>; по функциям распределения  $F_{1\ i,j}(\tau)$ ,  $F_{2\ i,j}(C)$  определяются фактические значения в  $h$ -й реализации параметров МТХО<sub>ij</sub> соответственно  $\tau_{ijh}$  и  $C_{ijh}$ ; по функциям распределения  $F_{3\ r\ i,j}(Vr)$  и  $F_{4\ i,j}(mt)$  – фактические значения запрашиваемых объемов общих ресурсов  $r$ -го типа ( $Vr_{ijh}$ ) и материалов ( $mt_{ijh}$ ); по спискам устанавливаются потребности для выполнения МТХО<sub>ij</sub> ресурсов индивидуального использования, оборудования, исполнителей и комплектующих изделий. Все требуемые для выполнения АМТХО<sub>ij</sub> ресурсы системы заказываются блоку распределения ресурсов ИМ ВСГР. Если на момент запроса свободных ресурсов нет, то АМТХО<sub>ij</sub> ожидает их освобождения. В результате из-за конкуренции МТХО<sub>ij</sub> за ресурсы реальные времена выполнения МТХО<sub>ij</sub> ( $\tau_{eijh}$ ) могут существенно возрасти. Выделенные в распоряжение АМТХО<sub>ij</sub> ресурсы предприятия закрепляются за этим агрегатом и освобождаются только по завершении выполнения МТХО<sub>ij</sub>. Одновременно с выделением и освобождением агрегатом АМТХО<sub>ij</sub> ресурсов, оборудования и исполнителей накапливается статистика имитации динамики их использования, необходимая для формирования диаграмм расхода ресурсов всех типов, материалов, комплектующих изделий. Сформированная в ходе имитации статистика хранится в базе данных системы автоматизации моделирования вероятностных сетевых графиков.

В состоянии  $S_{2ijh}$  имитируется собственно выполнение агрегатом АМТХО<sub>ij</sub> его функций длительностью  $\tau_{eijh}$ , которое предварительно запоминается. По завершении МТХО<sub>ij</sub> агрегат АМТХО<sub>ij</sub> вновь активизируется и переходит в состояние  $S_{3ijh}$ , формируя при этом сигнал типа ОР. Этот сигнал поступает на один из входов агрегата-многополюсника АSOB<sub>j</sub>, а агрегат АМТХО<sub>ij</sub> переходит в состояние  $S_{4ijh}$ , где ожидает запуска сигналом П в инверсном режиме имитации, поступающим от АSOB<sub>j</sub>. С приходом этого сигнала восстанавливается запомненное ранее значение времени выполнения АМТХО<sub>ij</sub> в режиме

прямой имитации ( $\tau_{eijh}$ ) и формируется момент активизации агрегата в инверсном режиме, а сам агрегат переходит в состояние  $S_{6ijh}$ . При активизации АМТХО<sub>ij</sub> в инверсном режиме формируется сигнал ОI и происходит возврат агрегата в состояние  $S_{0ijh}$ .

Агрегат АSOB<sub>i</sub> представляет собой многополюсник с различным числом входов и выходов. В каждом кустовом выходе агрегата по вероятности  $P_{lk}$  формируется только один из действительных сигналов, а остальные выходы ВКР<sub>ijk</sub> формируют фиктивные сигналы. Различие между ними заключается в том, что действительные могут инициировать переход АМТХО<sub>ij</sub> в активные состояния, а фиктивные АSOB<sub>i</sub> не участвуют в активизации АМТХО<sub>ij</sub>. Приход фиктивных сигналов на агрегаты АSOB<sub>i</sub> учитывается при вычислении ранних ( $t_{pih}$ ) сроков свершения АSOB<sub>i</sub>. Во время имитации  $h$ -й реализации ВСГР агрегат АSOB<sub>i</sub> последовательно переходит в следующие состояния. Например, в  $S_{0ih}$  АSOB<sub>i</sub> ожидает прихода первого входного сигнала в режиме прямой имитации, а  $S_{1i}$  – самого позднего, что означает срабатывание «спусковой функции» агрегата и переход его в состояние  $S_{2i}$ . В состоянии  $S_{2i}$  мгновенно в модельном времени ( $t_0$ ) формируются выходные сигналы (действительные и фиктивные) типа IP, поступающие на входы АМТХО<sub>ij</sub>. Рассылка сигналов IP осуществляется согласно таблице коммутации агрегатов, сформированной исследователем до постановки ИЭ. В состоянии  $S_{3i}$  агрегат АSOB<sub>i</sub> ожидает прихода первого выходного сигнала от АМТХО<sub>ij</sub> в режиме инверсной имитации, что переводит агрегат в состояние  $S_{4i}$ . В этот момент фиксируется поздний срок свершения события ( $t_{njh}=t_0$ ). Далее агрегат АSOB<sub>i</sub> из всех своих входов формирует все сигналы типа II, поступающие на инверсные входы агрегатов АМТХО<sub>ij</sub>, связанные со входами АSOB<sub>i</sub>. После посылки инверсных сигналов на агрегаты-четыреполюсники АМТХО<sub>ij</sub> сам агрегат АSOB<sub>i</sub> переходит в состояние  $S_{0i}$  ожидания прихода прямого входного сигнала от МТХО<sub>ij</sub> на его входы в ре-

жиме прямой имитации уже следующей реализации ВСГР согласно процедуре Монте-Карло.

### 3. Состав и структура системы автоматизации моделирования вероятностных ТПП

Для автоматизации процессов построения ИМ и постановки серий ИЭ согласно процедуре Монте-Карло разработана система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства (САМ ТПП), реализующая агрегатный способ имитации выполнения ВСГР. САМ ТПП состоит из следующих компонентов:

- библиотека агрегатов-имитаторов функционирования  $AMTXO_{ij}$  и свершения  $ASOB_i$ ;
- подсистема формирования вероятностного сетевого графика;
- подсистема реализации ИЭ согласно процедуре Монте-Карло;
- подсистема обработки статистики имитации ВСГР;
- подсистема визуализации результатов ИЭ;
- подсистема анализа результатов моделирования и принятия решений;
- управляющая программа моделирования агрегатов;
- информационная база данных.

Функциональное назначение подсистем и библиотек САМ ТПП состоит в следующем. Для построения вариантов ИМ ВСГР достаточно использовать две универсальные программы выполнения функций  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$ . Обе являются реентерабельными, обслуживая одновременно все элементы ИМ последовательно в двух режимах имитации (прямой и инверсной). За время постановки ИЭ для каждой  $h$ -й реализации ВСГР программы  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  циклически переходят из состояния в состояние, а затем в начале каждой реализации снова функционируют с начального состояния.

В библиотеку агрегатов-имитаторов кроме программ  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  входят программы ИМ вариантов ВТПП,

верифицированные и требующие для постановки ИЭ исходной информации о параметрах  $MTXO_{ij}$  и структуре ВСГР. Программы  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  как «заготовки» можно использовать при создании новых ИМ ВТПП, состав и структура которых отличаются от имеющихся в библиотеке. Подсистема формирования сетевого графика организует: ввод исходной информации о структуре ИМ ВТПП; проверку правильности описания сигналов и структуры ВСГР; поиск ошибок коммутации в ВСГР; верификацию функционирования вновь составленных ИМ ВТПП. Подсистема реализации процедуры Монте-Карло включает в себя: библиотеку формирования случайных величин по функциям вероятности их распределения; программу, реализующую алгоритм организации статистических испытаний и вычисления оценок математических ожиданий и выборочных дисперсий; библиотеку подпрограмм реализации единичных жребиев четырех типов. Подсистема обработки статистики автоматизирует этап обработки статистики имитации ИМ ВТПП. Она представляет собой адаптацию известного пакета статистического анализа данных STATISTIKA [4] для данной предметной области исследований. Подсистема визуализации результатов имитации формирует: временные диаграммы использования ресурсов предприятия за время реализации ВСГР; графики расхода материалов, комплектующих изделий и финансовых средств предприятия в течение моделирования ВТПП; граф критических путей, найденных в ходе  $N$  реализаций ВСГР. Подсистема принятия решений включает в себя набор подпрограмм, реализующих процедуры принятия решений в условиях неопределенности и риска, а также в многоцелевых задачах производства. При этом реализуются традиционные методы принятия решений в многокритериальных задачах [5].

В функции управляющей программы моделирования входит управление переходами агрегатов  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  в различные состояния и инициализация подпрограмм обслуживания этих

состояний. Имитация состояний агрегатов осуществляется на основе обслуживания событий. Особенностью реализации алгоритма имитации агрегатов является сочетание прямого и инверсного режимов изменения модельного времени  $t_0$  с запуском программы перехода на очередную реализацию ВСГР согласно процедуре Монте-Карло. Основными функциями управляющей программы моделирования являются: просмотр списков инициализации агрегатов; пересылка действительных сигналов с  $AMTXO_{ij}$  на  $ASOB_i$  и, наоборот, с  $ASOB_i$  на  $AMTXO_{ij}$ ; пересылка фиктивных сигналов с  $ASOB_i$ , минуя  $AMTXO_{ij}$ , непосредственно на  $ASOB_j$ ; управление сбором статистики расхода ресурсов, оборудования и исполнителей; для каждой реализации ВСГР контроль за моментом срабатывания спусковой функции у  $ASOB_k$ , имитирующего завершающее событие и переключение имитации на инверсное изменение модельного времени  $t_0$ . Отметим, что поскольку осуществляется имитация только дискретных ВТПП, то  $t_0$  меняется способом “выбора ближайшего события” [3].

#### **4. Технология использования САМ ТПП**

Она предполагает реализацию следующих этапов исследования ВТПП:

1. Формирование структуры ВСГР, описывающего динамику развития во времени ВТПП.
2. Подготовка исходной информации о моделируемом ВТПП.
3. Задание параметров  $MTXO_{ij}$  и запись их в базу данных САМ ТПП.
4. Составление таблиц коммутации агрегатов  $ASOB_i$  с  $AMTXO_{ij}$ .
5. Инициализация выполнения базового варианта моделирования и верификация ИМ ВСГР.
6. Испытание и исследование свойств ИМ ВСГР.
7. Организация многопрогонных ИЭ на основе процедуры Монте-Карло.
8. Обработка результатов ИЭ и формирование интегральных откликов.

9. Формирование графиков использования ресурсов, материалов, оборудования и исполнителей предприятия.

10. Анализ результатов моделирования и принятие проектных решений.

Рассмотрим кратко состав шагов реализации каждого этапа. На *этапе 1* структура ВСГР задается следующим образом: формируется таблица структур  $AMTXO_{ij}$ ; формируется таблица структуры  $ASOB_i$ ; создается таблица коммутации агрегатов  $AMTXO_{ij}$  с  $ASOB_i$ , состоящая из типовых сигналов  $Sg(i, k, d, l, P, j, r)$ . Здесь элементы  $(i, k, d, l, P)$  определяют, с какого выхода  $ASOB_i$  формируются сигналы,  $(j, r)$  – на какой вход  $ASOB_j$  поступят сигналы с  $AMTXO_{ij}$ . Общее количество  $AMTXO_{ij}$  в ИМ ВСГР задается как  $l_{АТОР}$ . Все элементы в этой таблице упорядочены по возрастанию номеров  $AMTXO_{ij}$ . Фактически таблица коммутации агрегатов  $ASOB_i$  и  $AMTXO_{ij}$  содержит коммутационную информацию о сигналах связи  $ASOB_i \rightarrow AMTXO_{ij} \rightarrow ASOB_j$  (при прямой имитации слева направо) и  $ASOB_i \leftarrow AMTXO_{ij} \leftarrow ASOB_j$  (при инверсной имитации справа налево). Элементы  $Sg$  формируются в режиме диалога при задании структуры ВСГР. Далее  $Sg$  используются при формировании таблицы коммутации агрегатов выходов  $ASOB_i$ , записываются группами по  $ASOB_j$  в порядке возрастания их номеров  $j$ , где величина группы равна количеству выходов  $ASOB_j$  в таблице коммутации. Таблица коммутации выходов хранит выходные сигналы  $ASOB_i$  в виде строк (откуда - куда). Информация о выходных сигналах расположена по возрастанию номеров событий. Причем каждому событию соответствует своя группа строк, содержащих информацию о выходных сигналах. Таким образом, исследователь должен сформировать: таблицу структуры  $AMTXO_{ij}$ , таблицу структуры  $ASOB_i$ , списки параметров  $AMTXO_{ij}$ , таблицу коммутации агрегатов.

На *этапе 2* организуется либо натурный эксперимент (НЭ) на ВТПП, либо используются экспертные значения параметров реализации  $AMTXO_{ij}$ . Основную трудность в подготовке исходной

информации составляет определение вероятностных характеристик параметров АМТХО<sub>ij</sub>. В тех случаях, когда не удается найти аналитического вида для аппроксимирующих функций распределения, они задаются в виде табличных функций распределения. При этом существуют ограничения, означающие, что число интервалов табличной функции распределения не должно превышать 8. Табличная запись функций распределений стандартизована для всех типов параметров.

На *этапе 3* осуществляется запись параметров АМТХО<sub>ij</sub> в информационную базу САМ ТПП. При каждой записи значений параметра АМТХО<sub>ij</sub> происходит ее преобразование во внутреннее представление, контроль корректности описания АМТХО<sub>ij</sub> и вывод результатов этого контроля на дисплей для устранения ошибок в описании ВСГР. Технология взаимодействия исследователя с САМ ТПП предполагает использование набора «меню» в режиме «вопрос – ответ». По завершении этого этапа синтаксические ошибки в ВСГР уже исправлены.

На *этапе 4* таблицы коммутации агрегатов АСОВ<sub>i</sub> с АМТХО<sub>ij</sub> проверяются на соответствие входов и выходов четырехполюсников АМТХО<sub>ij</sub> с соответствующими входами и выходами многополюсников АСОВ<sub>i</sub>. Любое дублирование входов в АМТХО<sub>ij</sub> или АСОВ<sub>i</sub> немедленно фиксируется, и формируется соответствующее сообщение исследователю на дисплей САМ ТПП. Далее осуществляется автоматическая проверка входов в АСОВ<sub>i</sub> как при прямой имитации (слева направо), так и при инверсной (справа налево). Все выявленные несоответствия сообщаются исследователю, и далее в режиме диалога все ошибки коммутации агрегатов исправляются. По окончании этапа исследователю выдается окончательная структура всех таблиц коммутации, в которых отсутствуют синтаксические ошибки.

На *этапе 5* происходит начальный запуск базового варианта ИМ ВСГР первой его реализации. Далее САМ ТПП позволяет исследователю в режиме «поша-

гового выполнения» просмотреть переходы всех агрегатов их состояния в состоянии с автоматической документацией этого процесса. Таким образом достигается автоматизация процедуры верификации ИМ ВСГР в обоих режимах его имитации.

На *этапе 6* осуществляются испытание и исследование свойств ИМ ВСГР. Все шаги этого этапа стандартизованы и реализуют известные методики испытания ИМ сложных систем [3]. Вначале оценивается ошибка имитации ( $\varepsilon_u \%$ ), означающая максимальный процент ошибок откликов ИМ ВСГР, затем длина переходного периода имитации ( $T_{пп}$ ), означающая максимальное время стабилизации того отклика ИМ ВСГР, который позже всех откликов переходит в установившееся состояние. Важным шагом испытания ИМ ВСГР является проверка «устойчивости» режима имитации, в частности, отсутствие перехода ИМ ВСГР в такой режим, когда у любого из откликов модели возможен рост амплитуды его с ростом модельного времени на порядок по сравнению со временем  $T_{пп}$ . Завершающим шагом испытания ИМ ВСГР является проверка чувствительности откликов модели к изменениям параметров моделирования. При этом каждая компонента вектора параметров ИМ ВСГР ( $X_i$ ) меняется в диапазоне от минимального ( $X_i^-$ ) до максимального ( $X_i^+$ ) ее значения, вычисляется приращение компонент вектора откликов  $\Delta Y_i \%$ . При  $\Delta Y_i \% \geq \varepsilon_u \%$  считается, что ИМ ВСГР «чувствительна» к вариациям вектора параметров  $\{X_i\}$ . Те параметры  $X_i$ , для которых все отклики  $Y_j$  оказались «нечувствительными», можно исключить из дальнейшего исследования, а те отклики  $Y_j$ , которые не «чувствуют» изменений всех параметров модели, также исключаются из исследования. В итоге реализации этой процедуры оптимизируется состав параметров и откликов ИМ ВСГР. Последним шагом этапа испытания ИМ ВСГР является проверка адекватности ИМ ВСГР реальному ВТПП. Сравниваются средние значения откликов модели

и реального ВТПП. В качестве контролируемого отклика можно выбрать любой из входящих в концептуальную модель ВСГР. Используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений  $j$ -го отклика ИМ ВСГР и реального ВТПП, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента [5].

На *этапе 7* организуется серия многопрогонных ИЭ согласно процедуре Монте-Карло. Каждый ИЭ представляет собой 1-ю реализацию ВСГР по методу Монте-Карло [2]. Одна реализация ВСГР представляет собой вначале определение ранних сроков свершения событий с фиксацией расхода ресурсов системы в режиме прямой имитации, а затем фиксацию поздних сроков свершения событий в режиме инверсной имитации и определение резервов свершения событий, а также нахождение 1-й реализации графа критических путей в ВСГР. Все статистики имитации ВСГР запоминаются в ИБД САМ ТПП. В итоге реализации данного этапа в ИБД будут сформированы выборки объема  $N$  откликов ВСГР ( $\{t_{piil}\}$ ,  $\{t_{nil}\}$ ,  $\{R_{il}\}$ ,  $\{KPI_{il}\}$ ,  $l = 1, N$ ).

В результате обработки статистики имитации  $N$  реализаций ВСГР на *этапе 8* формируются интегральные отклики, входящие в состав концептуальной модели ИМ ВТПП. Собранные в базе данных модели статистика использования ресурсов, материалов, комплектующих, оборудования, исполнителей и расхода финансовых средств предприятия при выполнении АМТХО<sub>ij</sub> в ходе  $N$  реализаций ВСГР используется для построения графиков их изменения во времени реализации ВТПП. Вывод графиков изменения статистик имитации стандартизован и осуществляется по запросам исследователя, при этом автоматизируется весь процесс получения информации о динамике развития ВТПП.

Для автоматизации *этапа 9* в составе САМ ТПП имеется соответствующая подсистема, которая реализует известные методики анализа данных на основе классических критериев принятия

решений в условиях неопределенности и риска [4].

### **Заклучение**

Предложенная система автоматизации моделирования ТПП и технология ее использования позволяют предприятиям организовать оперативным образом моделирование сложных ВТПП. Высокий уровень автоматизации исследований, универсальный характер структуры ИМ ВСГР и простота описания ВТПП обеспечивают перспективу развития и широкого использования САМ ТПП при проектном моделировании вариантов организации ВТПП. Наличие средств пополнения состава ее библиотек и подсистем позволяют организовать исследования ТПП предприятий различных предметных областей.

1. Жогаль С. П., Максимей И. В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1: Аналитические модели исследования операций: Уч. пособ. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
2. Максимей И. В., Серегина В. С. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2: Методы нелинейного и стохастического программирования: Уч. пособ. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.
3. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 222 с.
4. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTIKA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows. – М.: Информ.-изд. дом «Филинь», 1998. – 608 с.
5. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3: Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: Уч. пособ. / И. В. Максимей, В. Д. Левчук, С. П. Жогаль и др. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.

*Получено 29.09.04.*



***Об авторах***

*Максимей Иван Васильевич*

докт. техн. наук, профессор, зав.  
кафедрой математических проблем  
управления

*Сморodin Виктор Сергеевич*

канд. физ.-мат. наук, доцент,  
доцент кафедры вычислительной  
математики и программирования

*Сукач Елена Ивановна*

доцент кафедры математические  
проблемы программирования

*Соболь И.В.*

*Место работы авторов:*

Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины  
ул. Советская, 104, 246020 Гомель,  
Республика Беларусь,  
тел. 56-42-37  
e-mail: mpu@gsu.unibel.by