



УДК 681.3

**ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СЛУЧАЙНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОПАСНЫХ  
ПРОИЗВОДСТВ**

**И.В. МАКСИМЕЙ, В.С. СМОРОДИН, Е.И. СУКАЧ**

Обосновывается актуальность использования имитационных моделей случайных технологических процессов опасных производств (ТПОП). Предлагается способ формализации представления ТПОП на основе применения процедуры Монте-Карло и методика построения их имитационных моделей. Описаны возможности системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного типа. Приведен пример применения САИМ.

**ВВЕДЕНИЕ**

В качестве объекта исследования рассматриваются технологические процессы опасных производств (ТПОП), которые имеют иерархическую структуру такого вида.

На верхнем уровне иерархии ТПОП реализуется последовательностью технологических операций  $\{ТХО_i\}$  ( $i = \overline{1, n_0}$ ,  $n_0$  — количество различных ТХО<sub>i</sub>). На следующем уровне ТХО<sub>i</sub> представлена последовательностью микротехнологических операций  $\{МТХО_{ij}\}$  ( $j = \overline{1, n_1}$ ,  $n_1$  — количество МТХО<sub>ij</sub> в ТХО<sub>i</sub>). При этом МТХО<sub>ij</sub> выполняются на оборудовании, при функционировании которого могут возникать отказы, приводящие к аварийной ситуации на производстве. Случайный характер возникновения отказов оборудования определяет ТПОП как случайный процесс. При детерминированном характере взаимодействий  $\{ТХО_i\}$  друг с другом удобно представить ТПОП моделью типа сетевого графика (СГР). Разработан аппарат анализа параметров СГР [1]. Из-за вероятностного характера возникновения отказов может видоизменяться сама последовательность реализации ТХО<sub>i</sub>. Поэтому ТПОП необходимо представлять с помощью вероятностного сетевого графика  $\{ВСГР_i\}$ , в котором связи между ТХО<sub>i</sub> могут иметь вероятностную структуру. Кроме того, вероятностными могут быть сами параметры выполнения ТХО<sub>i</sub>. Особенностью реализации каждой ТХО<sub>i</sub> является то, что состав последовательности выполняемых

МТХО<sub>ij</sub> может быть различным и зависит от состояния аварийной обстановки ТПОП. В такой ситуации аналитические модели типа СГР зачастую применять нельзя, поскольку аппарат сетевого планирования ориентирован на детерминированную структуру ТПОП.

Исходя из изложенного выше, в качестве выхода из положения приходится прибегать к имитационному моделированию случайных ТПОП. Однако имитация представляет собой ресурсоемкую процедуру, требующую использования системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ). Анализ возможностей существующих САИМ, проведенный в работе [2], позволил установить, что разработка и использование имитационных моделей ТПОП обычно сопряжены с большими ресурсными затратами. Поэтому актуальна разработка САИМ, ориентированной на имитационное моделирование ВСГР. В данной статье предлагается новый способ формализации случайных ТПОП; методика построения имитационной модели (ИМ) ВСГР на основе агрегатного способа имитации; структура и технологические возможности САИМ, разработанной авторами; пример использования САИМ при анализе ВСГР гипотетического ТПОП.

#### ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ТПОП

Предполагается, что во время выполнения {МТХО<sub>ij</sub>} часть элементов функционирует на высоконадежном оборудовании, а остальные элементы — на оборудовании, где могут возникнуть отказы с известной вероятностью ( $P_{OT\ ij}$ ). Некоторые из отказов оборудования легко восстанавливаются, а при выполнении отдельных МТХО<sub>ijk</sub> с вероятностью ( $P_{AB\ ijk}$ ) могут возникать аварии в ТПОП. Связи между {МТХО<sub>ijk</sub>} на нижнем уровне иерархии ТПОП будем описывать с помощью ВСГР<sub>i</sub>, в котором работами являются МТХО<sub>ijk</sub>, а событиями SOB<sub>ij</sub> и SOB<sub>ik</sub> — узлы ВСГР<sub>i</sub> ( $i$  означает их принадлежность к ТХО<sub>i</sub> верхнего уровня иерархии ТПОП).

Времена выполнения МТХО<sub>ijk</sub> ( $\tau_{ijk}$ ) и направления связей между SOB<sub>ij</sub> являются вероятностными. Поскольку аналитический аппарат расчета параметров СГР<sub>i</sub> [1] из-за вероятностного характера МТХО<sub>ijk</sub> нельзя использовать, то предлагается применить известную процедуру метода Монте-Карло [3], согласно которой ВСГР<sub>i</sub> заменяется последовательностью детерминированных СГР<sub>il</sub> ( $l = \overline{1, N}$ ,  $N$  — число реализаций ВСГР<sub>i</sub>). Для каждой  $l$ -й реализации ВСГР<sub>i</sub> можно использовать известную методику расчета параметров СГР<sub>i</sub> [1].

Согласно этой методике каждое SOB<sub>ij</sub> связывается с двух сторон с помощью работ МТХО<sub>ijfj</sub> и МТХО<sub>ijjk</sub>. На рис. 1 кружками обозначены события, а стрелками — работы (микротехнологические операции). В левых секторах этих кружков указаны ранние сроки свершения событий ( $t_{Plij}$ ), в правых — поздние ( $t_{Пij}$ ). Верхние секторы означают идентификаторы событий, в нижних указаны резервы свершения событий ( $R_{ij}$ ). У работ и со-

бытий индексы означают:  $l$  — номер реализации согласно процедуре Монте-Карло;  $i$  — номер ТХО $_i$ ;  $f, j, k, s$  — номера событий в сетевом графике ТПОП. Ранние и поздние сроки свершения событий определяются по формулам

$$t_{Plif} = \max_f \{t_{Plir} + \tau_{lir}\}; \quad t_{Plif} = \min_s \{t_{Plis} + \tau_{lis}\}, \quad (1)$$

где  $\tau_{lif}$  и  $\tau_{lis}$  — длительности выполнения МТХО $_{lif}$  и МТХО $_{lis}$  в  $l$ -й реализации ВСГР $_i$  для ТХО $_i$ ;  $t_{Plif}$  и  $t_{Plis}$  — ранние и поздние сроки свершения событий соответственно SOB $_{lif}$  и SOB $_{lis}$ .

Список условных обозначений

Обозначение	Содержание обозначения	Обозначение	Содержание обозначения
ТПОП	Технологические процессы опасных производств	SP.INR SP.OBR SP.ISP	Списки детерминированных параметров МТХО $_{ijk}$ (ресурсов, оборудования или исполнителей)
ТХО $_i$	Технологические операции $i$ -го типа	P $_{OTijk}$ , P $_{Aijk}$	Вероятности возникновения отказов и аварий при выполнении МТХО $_{ijk}$
МТХО $_{ij}$	Микротехнологические операции $j$ -го типа в составе ТХО $_i$	$\tau_{BO}$ , $\tau_{VO}$	Интервалы между соседними отказами и восстановлениями работоспособности оборудования ТПОП
ВСГР $_i$	Вероятностный сетевой график $i$ -го типа	$c_O$ , $c_A$	Стоимости ликвидации отказов и аварий на ТПОП
САИМ	Система автоматизации имитационного моделирования	$c_{sr}(t)$ , KO $_{sr}(t)$ , mt $_{sr}(t)$	Суммарные расходы финансовых средств $r$ -го типа комплектующих изделий и материалов на момент реализации
SOB $_{lij}$	Событие $j$ -го номера в $l$ -й реализации сетевого графика $i$ -го типа	АТОР $_{ijk}$	Агрегат-четыреполюсник, имитирующий выполнение МТХО $_{ijk}$
$t_{Plif}$ , $t_{Plis}$	Ранние и поздние сроки свершения событий для $l$ -й реализации ВСГР $_i$	АСОБ $_{ij}$	Агрегат-многополюсник, имитирующий свершение событий SOB $_{lij}$
$R_{lij}$	Резервы свершения событий $j$ -го типа в $l$ -й реализации ВСГР $_i$	Sg $_d$ , Sg $_f$	Сигналы действительные и фиктивные
KRP $_{li}$	Для $l$ -й реализации критический путь в ВСГР $_i$	LIB.AGREG	Библиотека процедур агрегатов
GRKRP	Граф реализации критических путей	PS.FORMSG PS.MONTEK	Подсистемы САИМ: формирования ИМ и процедуры Монте-Карло
$\tau_{lij}$ , $c_{lij}$	Времена и стоимости выполнения микротехнологических операций	PS.OBRABOT PS.VIZUAL PS.RESH	Подсистемы САИМ: обработки статистики имитации, визуализации результатов, принятия решений
$F_{1ijk} \div$ $F_{8ijk}$	Функции распределения значений параметров МТХО $_{ijk}$	UPMA	Управляющая программа моделирования агрегатов

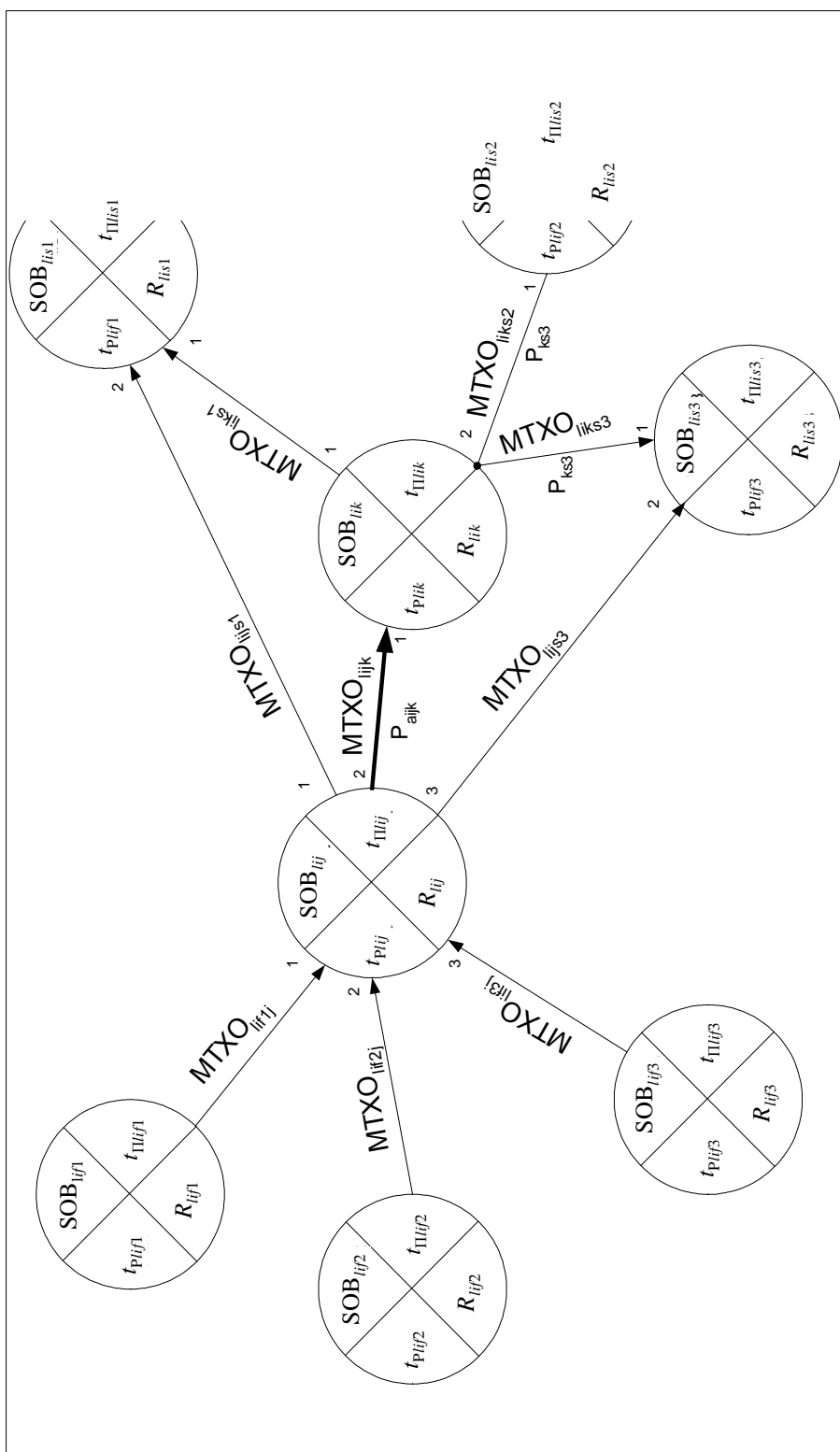


Рис. 1. Фрагмент ВСГР, варианта ТПОП

Расчет  $t_{Plj}$  начинается от исходного события  $SOB_{li1}$  и оканчивается завершающим событием  $SOB_{lin}$ , а определение  $t_{Plj}$  начинается в обратном порядке от  $SOB_{lin}$  и завершается событием  $SOB_{li1}$ . Резервы свершения событий

$$R_{lij} = t_{Plj} - t_{Plj} . \quad (2)$$

Для каждой  $MTXO_{ijk}$  определяются статистики времени их выполнения по формулам

$$\begin{aligned} t_{PH\ lij} &= t_{Plj} \text{ (раннее начало); } t_{ПН\ lij} = t_{Plj} - \tau_{ijk} \text{ (позднее начало);} \\ t_{PO\ lij} &= t_{Plj} + \tau_{ijk} \text{ (раннее окончание); } t_{ПО\ lij} = t_{Plj} + \tau_{ijk} \text{ (позднее окончание).} \end{aligned} \quad (3)$$

Для каждой  $l$ -й реализации  $BCP_i$  определяется критический путь ( $KRP_{li}$ ), состоящий из последовательности сочетания пар работа–событие  $\{MTXO_{ijk}, SOB_{lik}\}$  и формируемый из событий с нулевыми резервами времени их свершения ( $R_{lik} = 0$ ). В результате всех реализаций  $BCP_i$  для каждого  $SOB_{lik}$  формируются выборки объема  $N$  статистик реализаций событий:  $\{t_{Plj}\}, \{t_{Plj}\}, \{R_{lij}\}, l = \overline{1, N}$ . Аналогично для каждой  $MTXO_{ijk}$  формируются выборки объема  $N$  статистик реализаций микротехнологических операций  $\{t_{PH\ lij}\}, \{t_{ПН\ lij}\}, \{t_{PO\ lij}\}, \{t_{ПО\ lij}\}, l = \overline{1, N}$ . По этим выборкам формируется множество критических путей, которое затем представляется графом реализации критических путей  $\{GR.KRP\}$ . Согласно процедуре Монте-Карло [3] по выборкам объема  $N$  определяются оценки математических ожиданий и выборочных дисперсий перечисленных статистик моделирования  $BCP_i$ .

Первой особенностью данной методики формализации ТПОП является то, что вычисление  $t_{Plj}$  осуществляется в режиме прямой имитации (когда модельное время  $t_0$  растет от 0 до момента свершения  $SOB_{lin}$  ( $T_{Zli}$ ), а определение  $t_{Plj}$  производится в режиме инверсной имитации, когда  $t_0$  уменьшается от  $T_{Zli}$  до 0).

Вторая особенность — введение в описание  $MTXO_{ijk}$  дополнительных параметров их выполнения: время выполнения ( $\tau_{ijk}$ ); требуемые объемы общих ресурсов производства  $r$ -го типа ( $V_{rijk}$ ); стоимость выполнения микротехнологической операции ( $C_{ijk}$ ); количество материалов  $r$ -го типа ( $mt_{rijk}$ ); требуемое число комплектующих деталей  $r$ -го типа ( $КО_{rijk}$ ).

Поскольку любой из этих параметров может иметь вероятностную природу, то для моделирования  $l$ -й реализации процедуры Монте-Карло конкретных их значений ( $\tau_{ijk}, V_{rijk}, c_{ijk}, mt_{rijk}, КО_{rijk}$ ) необходимо задавать

соответствующие функции распределения. Воспользуемся общепринятым обозначением функции вероятностей распределения значений параметра:  $F_{1ijk}(\tau)$ ;  $F_{2rijk}(V)$ ;  $F_{3ijk}(C)$ ;  $F_{4rijk}(mt)$ ;  $F_{5rijk}(KO)$ . Здесь индексы соответствуют условным распределениям (индивидуальные для  $ТХО_i$ , в составе которой находится  $МТХО_{ijk}$ ). Причем под обозначениями  $F_1 - F_5$  можно понимать либо стандартные типы распределения, либо табличное распределение вероятностей значений этих параметров.

Кроме вероятностных параметров для выполнения любой  $МТХО_{ijk}$  может понадобиться указание множества детерминированных параметров, характерных для данной микротехнологической операции, которые необходимо задать с помощью соответствующих списков: ресурсов индивидуального использования ( $SP.INR_{ijk}$ ); оборудования ( $SP.OBR_{ijk}$ ); исполнителей ( $SP.ISR_{ijk}$ ). Отметим, что все указанные потребности общих и индивидуальных ресурсов в ходе моделирования  $ВСГР_i$  закрепляются за  $МТХО_{ijk}$  на время имитации ее выполнения и затем возвращаются системе распределения ресурсов ТПОП для их закрепления на время выполнения других микротехнологических операций. Эта особенность формализации ресурсов и использование их при прямой имитации ТПОП позволяет отобразить конкуренцию соседних  $МТХО_{ijk}$  за общие и индивидуальные ресурсы и зафиксировать статистику расхода этих ресурсов, материалов, комплектующих изделий и оборудования для последующего анализа динамики реализации  $ВСГР_i$  по данным имитации.

Третья особенность формализации ТПОП — задание упомянутых ранее характеристик надежности и безопасности реализации  $МТХО_{ij}$  на оборудовании, их реализующем ( $P_{OTijk}$  и  $P_{ABijk}$ ). Здесь также используется задание остальных вероятностных характеристик микротехнологических операций с помощью следующих функций вероятности распределения значений:

- длин интервалов между соседними отказами работоспособности оборудования  $h$ -го типа, на котором реализуется  $МТХО_{ijk}$  ( $F_{6hijk}(\tau_{BO})$ );
- интервалов восстановления работоспособности этого оборудования ( $F_{7hijk}(\tau_{BO})$ );
- дополнительной стоимости выполнения  $МТХО_{ijk}$  при ликвидации опасных отказов ( $F_{8hijk}(C_O)$ );
- дополнительной стоимости выполнения  $МТХО_{ijk}$  ( $F_{9hijk}(C_D)$ ) из-за ликвидации аварий, возникающих с вероятностями  $P_{ABijk}$ .

Перед выполнением  $МТХО_{ijk}$  сначала при  $l$ -й реализации  $ВСГР_i$  разыгрываются конкретные значения перечисленных параметров их реализации, затем формируются запросы на ресурсы ТПОП, и по мере выделения этих ресурсов имитируется выполнение  $МТХО_{ijk}$ . Из-за конкуренции

МТХО<sub>ljk</sub> за общие ресурсы и появления опасных отказов функционирования ТПОП фактическое время имитации МТХО<sub>ljk</sub> ( $\tau_{\Phi ljk}$ ) может быть существенно больше времени  $\tau_{ljk}$ , разыгранного по функции распределения  $F_{ljk}(\tau)$ . После завершения имитации МТХО<sub>ljk</sub> все общие ресурсы, оборудование и исполнители возвращаются системе распределения ресурсов ТПОП.

Четвертая особенность формализации — возможность передачи событию SOB<sub>lik</sub> внутри сигнала  $Sg_d$  на выходе МТХО<sub>ljk</sub> информации о том, что при имитации этой микротехнологической операции моделируется событие «авария свершилась». В этом случае в составе сигнала формируется признак истинности булевого типа  $\pi_{ik}$ , который становится равным 1. По этому признаку корректируется работа алгоритма выработки действительных сигналов на кустовом выходе №2 SOB<sub>lik</sub> (см. рис. 1). Таким образом все  $Sg_d$  в случае аварий при выполнении МТХО<sub>ljk</sub> могут указанным способом помечаться и влиять на формирование состава действительных и фиктивных сигналов на выходе событий в ВСГР<sub>i</sub>.

В ходе имитации ВСГР<sub>i</sub> формируются статистики суммарных расходов во времени: финансовых средств ( $c_{sr}(t)$ ), материалов  $r$ -го типа ( $mt_{sr}(t)$ ), комплектующих изделий  $r$ -го типа ( $ко_{sr}(t)$ ). По этим статистикам формируются соответствующие графики их изменения в ходе имитации  $l$ -й реализации ВСГР<sub>i</sub>. В ходе имитации ВСГР<sub>i</sub> для каждой  $l$ -й реализации формируется диаграмма использования оборудования, исполнителей и коэффициентов использования ресурсов ТПОП. Возможность формирования указанных графиков и диаграмм в ряде случаев может помочь исследователю при принятии проектных решений и анализе поведения компонентов ТПОП.

## ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ВСГР РЕАЛИЗАЦИИ ТПОП

Согласно изложенной методике формализации ТПОП, основными компонентами ВСГР<sub>i</sub> являются два типа элементов: МТХО<sub>ljk</sub> и SOB<sub>lij</sub>. Поэтому ИМ ВСГР<sub>i</sub> представим состоящей из агрегатов двух типов, которые взаимодействуют друг с другом с помощью множества сигналов. Агрегат «микротехнологическая операция» (АТОР<sub>ijk</sub>) представляет собой четырехполюсник, имитирующий выполнение МТХО<sub>ljk</sub> в ВСГР<sub>i</sub>, имеет два входа и два выхода. Агрегаты-события (ASOB<sub>ij</sub>) являются многополюсниками с  $k_j$  входами и  $b_j$  выходами. Выходы у ASOB<sub>ij</sub> бывают одиночными и «кустовыми». Сигналы из «кустовых» выходов формируются двух типов: один действительный ( $Sg_d$ ), разыгрываемый по вероятности ( $P_{jkf}$ ) и другой ( $d_k - 1$ ) фиктивных сигналов ( $Sg_f$ ). Все входы агрегата ASOB<sub>ijk</sub> также нумеруются. Поэтому при адресации сигнала указывается:

- тип сигнала (IP — входной прямой; OP — выходной прямой; II — входной инверсный; OI — выходной инверсный);
- адрес события, принимающего сигнал ( $j$  — номер события,  $r$  — номер входа события  $j$ );
- адрес события, отправляющего сигнал ( $i$  — номер события-отправителя сигнала,  $k$  — номер выхода события,  $d_k$  — тип события (для одиночного выхода  $d_k = 1$ , для «кустового» выхода  $d_k$  — число разветвлений «кустового»);  $\{ P_{jkf} \}$  — вектор вероятностей формирования на  $k$ -м «кустовом» выходе действительного сигнала по направлению  $f$ ).

При имитации выполнения МТХО<sub>ijk</sub> агрегат АТОР<sub>ijk</sub> в режиме прямой имитации ВСГР<sub>i</sub> по функциям распределения формирует фактические значения параметров ее реализации ( $\tau_{lijk}$ ,  $c_{lijk}$ ,  $V_{rlijk}$ ,  $mt_{rlijk}$ ,  $КО_{rlijk}$ ), а по спискам определяются запросы на индивидуальные ресурсы, оборудование и исполнителей (SP.INR<sub>lijk</sub>, SP.OBR<sub>lijk</sub>, SP.ISR<sub>lijk</sub>). Если же при выполнении МТХО<sub>ijk</sub> на ненадежном оборудовании предусмотрена возможность возникновения опасных отказов с вероятностью  $P_{OTijk}$ , то в  $l$ -й реализации по соответствующим функциям распределения агрегат АТОР<sub>ijk</sub> формирует фактические значения параметров надежности выполнения МТХО<sub>ijk</sub> ( $\tau_{BOlijk}$ ,  $\tau_{VOlijk}$ ,  $c_{VOlijk}$ ,  $\tau_{Alijk}$ ). Если по жребью сформирована ситуация «возник отказ» оборудования  $h$ -го типа, то время имитации выполнения МТХО<sub>ijk</sub> увеличивается на время восстановления

$$\tau_{BPijk} = \tau_{lijk} + \tau_{VOlijk} \quad (4)$$

Стоимость выполнения МТХО<sub>ijk</sub> также увеличивается, а именно:

$$c_{lijk} = c_{lijk} + c_{VOlijk} \quad (5)$$

При этом разыгрывается по вероятности  $P_{Alijk}$  жребий «возникла авария», согласно которому стоимость и длительность выполнения МТХО<sub>ijk</sub> также дополнительно увеличиваются

$$c_{lijk} = c_{lijk} + c_{Alijk}; \quad \tau_{BPijk} = \tau_{BPijk} + \tau_{ABlijk} \quad (6)$$

По завершении временного интервала длительностью  $\tau_{Blijk}$  агрегат АТОР<sub>ijk</sub> формирует  $Sg_d$  типа OP, поступающий на  $r$ -й вход агрегата ASOB<sub>lik</sub>, и переходит в режим ожидания повторного запуска его сигналом типа II (при этом величина кванта времени имитации агрегата ( $\tau_{Blijk}$ ) запоминается для учета ее в режиме инверсной имитации). После имитации выполнения в режиме инверсной имитации ВСГР<sub>i</sub> длительностью  $\tau_{Blijk}$  агрегат АТОР<sub>ijk</sub> возвращается в режим ожидания его активизации сигналом  $Sg_d$  типа IP, но уже при  $(l + 1)$ -й реализации ВСГР<sub>i</sub>.



Многополюсник агрегат  $ASOB_{ij}$  в режиме прямой имитации ожидает прихода на все его входы последнего сигнала  $Sg_d$  типа ОР от агрегата  $АТОР_{irj}$ . В этот момент срабатывает «спусковая функция» агрегата, что приводит к фиксации раннего срока свершения события ( $t_{PIij}$ ) и формированию со всех выходов агрегата  $ASOB_{ij}$  серии сигналов типа  $Sg_d$  и  $Sg_f$ , поступающих на соответствующие входы агрегатов  $АТОР_{ijs}$ .

Рассылка агрегатом  $ASOB_{ij}$  сигналов  $Sg_d$  осуществляется согласно таблице коммутации агрегатов, которая задается исследователем до начала имитации  $BCP_i$ . После отправки всех выходных сигналов агрегат  $ASOB_{ij}$  переходит в режим ожидания сигналов от  $ASOB_{ij}$  в режиме инверсной имитации  $BCP_i$ . Приход самого первого сигнала на выходы агрегата  $ASOB_{ij}$  определяет значение позднего срока свершения события ( $t_{PIIij}$ ). В этой ситуации агрегат  $ASOB_{ij}$  со всех своих входов формирует сигналы  $Sg_d$  типа II, поступающие на соответствующие инверсные входы  $АТОР_{ijf}$  согласно таблице коммутации агрегатов, а сам агрегат  $ASOB_{ij}$  переходит в режим ожидания сигналов на его входы в режиме прямой имитации, но уже  $(l + 1)$ -й реализации  $BCP_i$  по методу Монте-Карло [3].

## СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТПОП

Серию имитационных экспериментов, отображающих реализации  $BCP_i$ , предлагается организовать с помощью специализированной САИМ ТПОП. САИМ ТПОП состоит из следующих компонентов:

- библиотеки типовых ИМ агрегатов  $АТОР_{ijk}$  и  $ASOB_{ij}$  (LIB.AGREG);
- подсистемы формирования ИМ  $BCP_i$  из агрегатов (PS.FORMMSG);
- управляющей программы моделирования агрегатов (UPMA);
- подсистемы реализации имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло (PS.MONTEK);
- подсистемы обработки статистики имитации  $BCP_i$  и визуализации результатов моделирования (PS.OBRABOT и PS.VIZUAL);
- подсистемы анализа результатов моделирования и принятия решений (PS.RESH).

Рассмотрим назначение и функциональные возможности каждого компонента САИМ ТПОП.

LIB.AGREG содержит два типа универсальных реентерабельных программ  $АТОР$  и  $ASOB$ , обслуживающих все элементы  $BCP_i$  последовательно в двух режимах имитации (вначале все агрегаты функционируют в режиме прямой имитации, а затем — инверсной). За время постановки ими-

тационных экспериментов для каждой  $l$ -й реализации ВСГР <sub>$i$</sub>  программы АТОР и АСОБ циклически переходят в различные состояния под управлением UPMA. Программы АТОР и АСОБ можно использовать в качестве «заготовок» для конструирования новых ИМ ВСГР <sub>$i$</sub> , не имеющих в LIB.AGREG.

PS.FORMSG организует ввод исходной информации, проверяет правильность описания состава сигналов и структуры ИМ ВСГР, сообщает исследователю список ошибок коммутации сигналов в модели, организует верификацию функционирования вновь разрабатываемых моделей.

PS.MONTEK содержит библиотеку процедур моделирования случайных величин, программу реализации процедуры статистических испытаний и вычисления оценок математических ожиданий и дисперсий откликов моделирования.

PS.OBRABOT автоматизирует все операции обработки статистики моделирования ВСГР <sub>$i$</sub> , являясь при этом результатом адаптации известного пакета СТАТИСТИКА [4] в среде САИМ ТПОП.

PS.VIZUAL формирует временные диаграммы использования ресурсов и оборудования ТПОП, а также графики расхода во времени имитации суммарных финансовых затрат, материалов и комплектующих изделий для каждой  $l$ -й реализации ВСГР <sub>$i$</sub> .

UPMA организует переходы агрегатов из состояния в состояние, обеспечивает сочетание прямого и инверсного способов изменения модельного времени  $t_0$  с реализацией процедур метода статистических испытаний. В функции UPMA входит: реализация агрегатного способа имитации, вычисление статистик функционирования агрегатов АСОБ и АТОР, формирование файлов статистики имитации, контроль за окончанием имитации, инициализация начального и завершающего событий в ВСГР <sub>$i$</sub> .

Подсистема PS.RESH состоит из двух библиотек процедур анализа результатов имитации LIB.ANIMIT, принятия решений LIB.RESH. Первая библиотека содержит процедуры вычисления значений обобщенного отклика по значениям компонент вектора откликов путем «свертки» к скаляру по заданному вектору весовых коэффициентов важности компонент вектора откликов в ИМ (PR.SVERT); выделения главной компоненты в векторе откликов (PR.GLCOM); слежения за входом контролируемого параметра ИМ в стационарный режим имитации (PR.STACR); поиска узкого места в структуре ВСГР <sub>$i$</sub>  (PR.UZMES). Вторая библиотека содержит процедуры, реализующие известные алгоритмы принятия решений в условиях неопределенности и риска. Они реализуют выбор рационального состава ресурсов, оборудования и исполнителей ТПОП согласно известным типам оценок (усредненной, оптимистической, пессимистической, нейтралитета и Севиджа) [5]. Процесс принятия решений по результатам имитации ВСГР <sub>$i$</sub>  предполагает последовательное использование одной из процедур библиотеки LIB.ANIMIT, а затем — любой процедуры библиотеки LIB.RESH.

Методика использования САИМ ТПОП — это последовательное выполнение действий исследователя. С помощью PS.FORMSG формируются таблицы структуры агрегатов АМТХО и АСОБ, а затем создается таблица

коммутации агрегатов. При этом структура сигналов  $Sg_d$  формируется исследователем в режиме диалога при составлении описания ВСГР<sub>r</sub>. На следующем этапе имитационного моделирования ВСГР<sub>i</sub> проводится серия натурных экспериментов на реальном ТПОП (или же его прототипе). Если же проводится проектирование новой структуры ТПОП, то обычно используются экспертные данные о параметрах и характеристиках надежности функционирования оборудования, используемого при выполнении МТХО<sub>ijk</sub>. Результат данного этапа исследований ТПОП — сформированные базы данных о ВСГР<sub>i</sub>. Таблицы коммутации агрегатов при их создании проверяются на соответствие входов и выходов многополюсников АСОВ<sub>ijk</sub> четырехполюсникам АТОР<sub>ijk</sub>. На следующих этапах исследований организуется серия из  $N$  реализаций имитационных экспериментов с ИМ ВСГР<sub>i</sub>. В итоге имитации в базе данных САИМ ТПОП формируется множество выборок объема  $N$  статистик реализации ВСГР<sub>i</sub>, по которым определяется множество критических путей  $\{KRP_1\}$ . Завершается серия модельных экспериментов вычислением средних значений и дисперсий характеристик ВСГР<sub>i</sub>, а также формированием по  $\{KRP_1\}$  вероятностного графа критических путей  $\{GRKRP\}$ . На последнем этапе исследований используется подсистема PS.RESH, в которой применяются классические критерии принятия решений в условиях неопределенности и риска [5]. Таким образом, САИМ ТПОП позволяет решить следующие задачи проектного моделирования ТПОП:

1. Определение суточной пропускной способности вариантов ТПОП ( $v_i$ ) и оценка суммарной стоимости их реализации ( $c_{oi}$ ) при заданном составе ресурсов, исполнителей и оборудования.

2. Нахождение наиболее вероятного критического пути в технологии реализации опасного производства и выделение опасных траекторий реализации ТПОП.

3. Определение вероятности возникновения аварийной ситуации в ТПОП ( $P_{оав}$ ) и оценка величины потерь пропускной способности ( $\Delta v_i$ ), а также дополнительных затрат ( $\Delta c_{zi}$ ) из-за ликвидации чрезвычайных ситуаций в ТПОП при заданных характеристиках надежности и безопасности выполнения МТХО<sub>ijk</sub>.

4. Выбор из множества выполняемых на предприятии ТПОП рационального варианта по критериям минимальной стоимости и максимальной пропускной способности ТПОП.

## ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ АГРЕГАТНЫХ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТПОП

**Содержательное описание ТПОП.** Рассматривается вариант той части ТПОП, которая реализуется ТХО<sub>i</sub> и состоит из взаимодействующих друг с другом тридцати МТХО<sub>ijk</sub>. Графовая структура связей МТХО<sub>ijk</sub> внутри ТХО<sub>i</sub> приведена на рис. 2. Каждая МТХО<sub>ijk</sub> имеет полный набор параметров вероятностной природы. Известно, что при реализации нескольких

МТХО<sub>ijk</sub> возможно возникновение аварий ТПОП с вероятностями  $P_{Aijk}$ . На случай возникновения аварий в ТПОП предусмотрено несколько разветвлений выполнения ВСГР<sub>i</sub>, которые могут реализоваться либо вероятностным, либо детерминированным способом при свершении некоторых событий в местах «кустовых» выходов. Требуется определить граф критических путей в ТПОП и оценить пропускную способность варианта ТПОП при заданных значениях вероятностных параметров МТХО<sub>ijk</sub>.

**Формальное описание ТПОП.** В качестве аппарата формализации используется ВСГР<sub>i</sub> (рис. 2). Для простоты в описании событий и работ опущена пара индексов (*li*). Поэтому в качестве идентификаторов событий выступают их номера *j* внутри ТХО<sub>i</sub>. «Кустовые» выходы имеются у событий 4, 6, 10, 11 из-за того, что существует ненулевая вероятность возникновения аварий в ТПОП при выполнении соответственно МТХО<sub>24</sub> ( $P_{A24}$ ), МТХО<sub>36</sub> ( $P_{A36}$ ), МТХО<sub>5,10</sub> ( $P_{A5,10}$ ), МТХО<sub>8,11</sub> ( $P_{A8,11}$ ). У «кустовых» выходов для простоты предусмотрено только два разветвления (основная и резервная ветви последовательностей МТХО<sub>ijk</sub>) с вероятностями  $P_{Aik}$  (рис. 2).

Например, у SOB<sub>4</sub> имеется два входа и три выхода, поступающие соответственно с у SOB<sub>1</sub> и SOB<sub>2</sub> и формируемые на выходе SOB<sub>4</sub> при срабатывании спусковой функции в режиме прямой имитации. Как видно из рис. 2, с выходов 1 и 3 у события SOB<sub>4</sub> формируются только действительные сигналы, подаваемые соответственно на SOB<sub>3</sub> и SOB<sub>5</sub>. В то же время с «кустового» выхода 2 у SOB<sub>4</sub> с вероятностью  $P_{46}$  формируется один действительный сигнал, поступающий на вход 2 SOB<sub>6</sub> и один фиктивный, поступающий на вход 2 SOB<sub>7</sub>. Аналогичным образом организованы входы и выходы сигналов у остальных SOB<sub>j</sub>. Каждый действительный сигнал с выхода SOB<sub>j</sub> инициирует выполнение соответствующего МТХО<sub>jk</sub>. После имитации выполнения МТХО<sub>jk</sub> этот сигнал поступает на соответствующие входы последующих SOB<sub>k</sub>.

Процесс постепенной инициализации МТХО<sub>jk</sub> идет от начального события SOB<sub>1</sub> и завершается конечным событием SOB<sub>14</sub>. При этом в режиме прямой имитации функций МТХО<sub>jk</sub> и событий SOB<sub>j</sub> фиксируются ранние сроки свершения событий ( $t_{Pj}$ ). При свершении события SOB<sub>15</sub> начинается режим инверсной имитации выполнения МТХО<sub>jk</sub> в обратном порядке (справа налево), в ходе которой у каждого SOB<sub>j</sub> формируются поздние сроки свершения событий ( $t_{Пj}$ ). При этом вычисляются по формуле (3) резервы свершения событий ( $R_j$ ). Как только срабатывает спусковая функция в режиме инверсной имитации у SOB<sub>1</sub>, начинается имитация ВСГР<sub>i</sub> на (*l* + 1)-й его реализации по методу Монте-Карло снова в режиме прямой имитации.

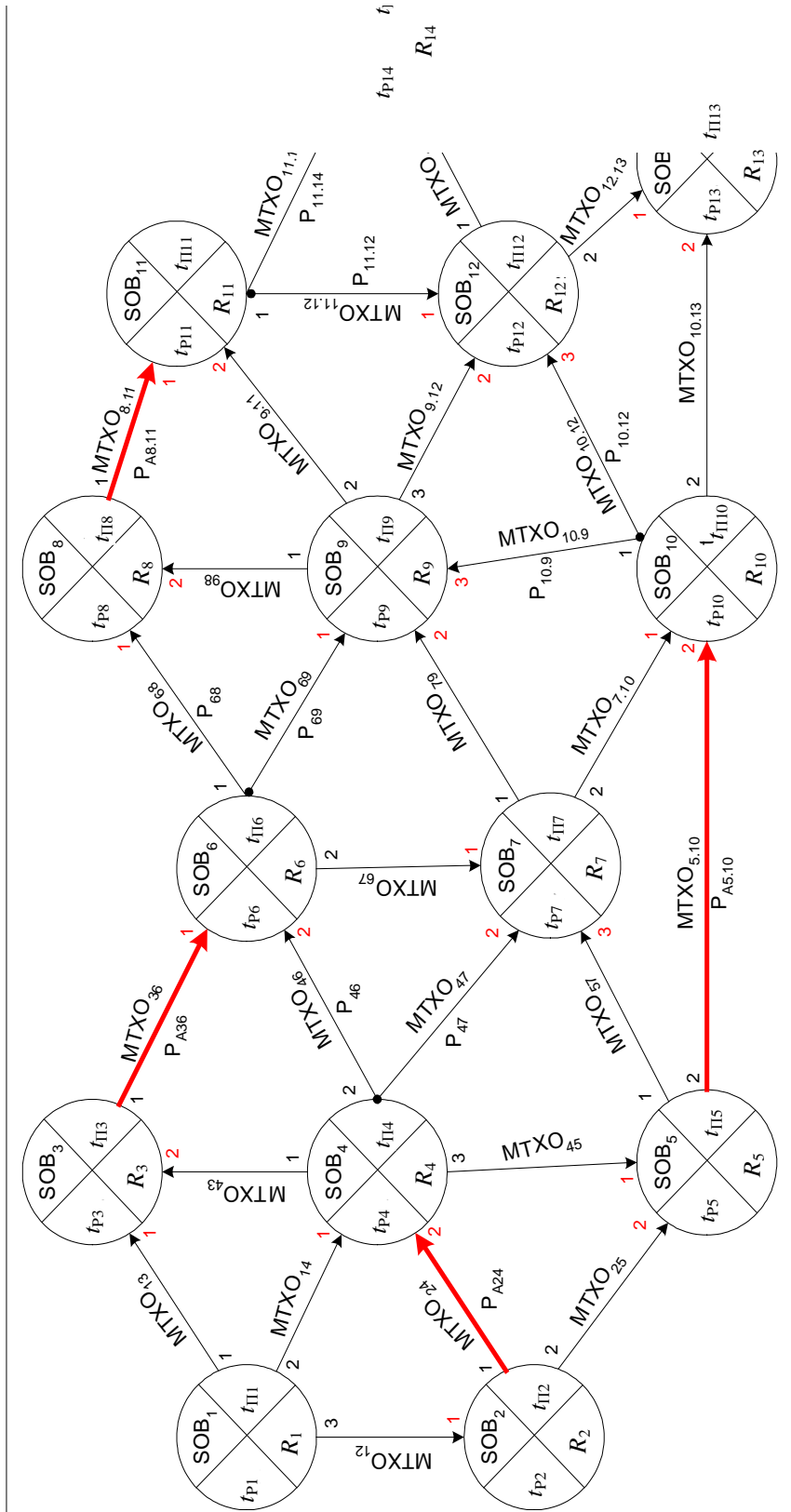


Рис. 2. Пример описания ВСГР<sub>i</sub> варианта ТПОП

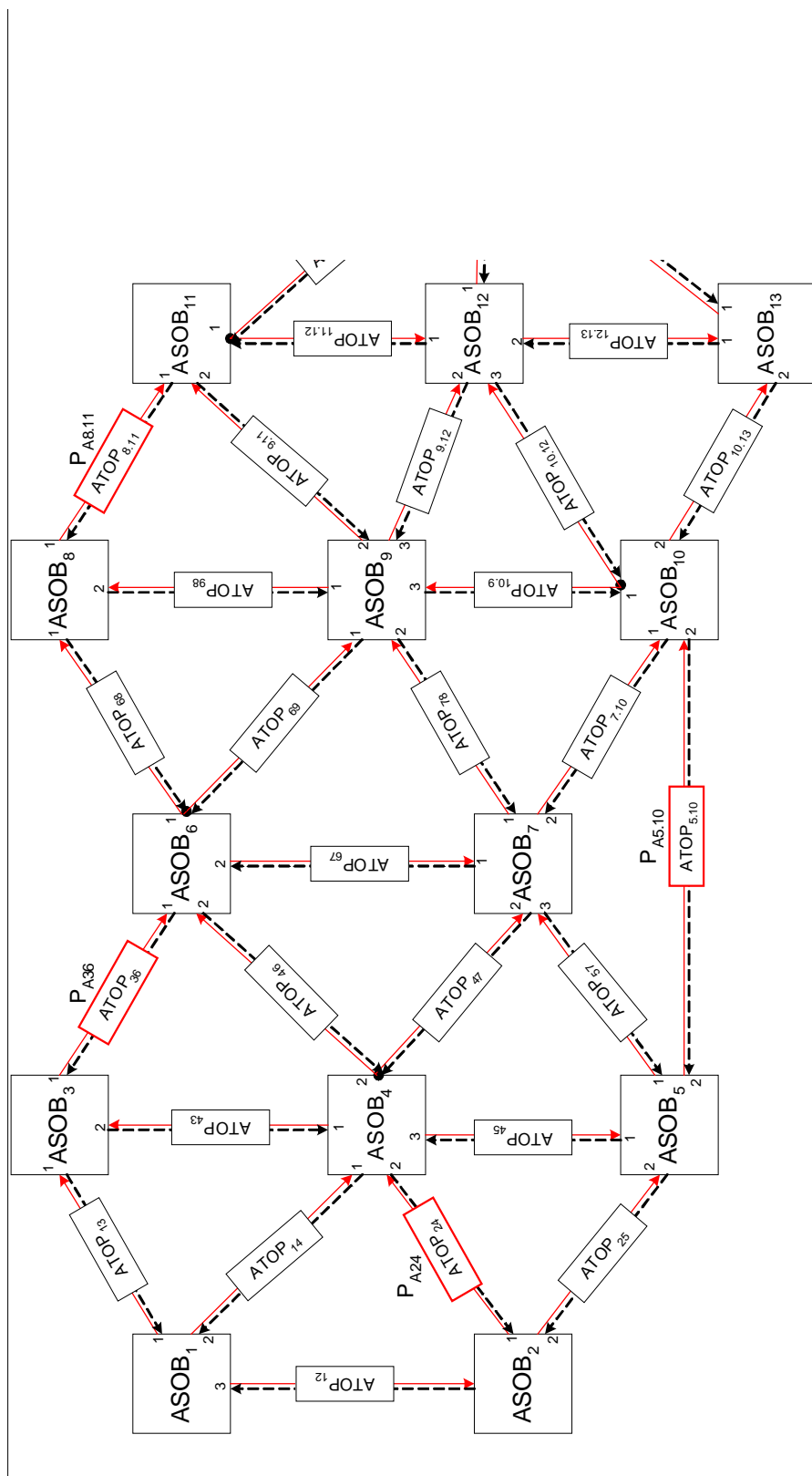


Рис. 3. Реализация ВСГР<sub>1</sub> в среде САИМ ТПОП множеством агрегатов

**Имитационная модель ТПОП.** Поскольку параметры реализации  $MTXO_{jk}$  являются случайными величинами, а вероятности разветвлений у «кустовых» выходов  $SOB_j$  не равны нулю, то аналитическая модель  $ВСГР_i$  (рис. 2) не может дать достоверного решения поставленной задачи проектного моделирования ТПОП. Это обстоятельство определило необходимость применения агрегатной ИМ варианта ТПОП. Для автоматизации процесса имитации этой ИМ можно использовать САИМ ТПОП. На рис. 3 приведен пример построения такой ИМ на основе использования типовых программ агрегатов  $ASOB_j$  и  $АТОР_{jk}$ . Компоновка ИМ ТПОП достигается путем замены  $SOB_j$  на агрегаты  $ASOB_j$  и  $MTXO_{jk}$  на  $АТОР_{jk}$ . У многополюсника  $ASOB_1$  нет входов, а у многополюсника  $ASOB_{14}$  нет выходов. Имитация реализаций  $ВСГР_i$  в режиме прямой имитации осуществляется слева направо сигналами, направления движения которых указаны сплошными стрелками. В обратном порядке (справа налево) пунктирными стрелками — движение сигналов при инверсной имитации реализации  $ВСГР_i$ . Сравнивая рис. 2 и рис. 3, убеждаемся в простоте перехода от  $ВСГР_i$  к ИМ ТПОП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ формализации ТПОП, возможности САИМ ТПОП и методика перехода от  $ВСГР_i$  к ИМ  $ВСГР_i$  позволяют оперативно выбирать рациональный вариант организации ТПОП и оценивать надежность и безопасность реализации ТПОП, структура которого задана в виде  $ВСГР_i$ . Высокий уровень автоматизации исследований, простота перехода от описания  $ВСГР_i$  к ИМ ТПОП обеспечивают изложенным методикам и САИМ ТПОП возможность широкого практического использования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жогаль С.П., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Уч. пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 109 с.
2. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. — М.: Радио и связь, 1988. — 222 с.
3. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: Уч. пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 103 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. пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П. Жогаль и др. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 150 с.

Поступила 30.09.2004