

УДК 681.3

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

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины  
ул. Советская, 104, 246000 Гомель, Республика Беларусь

## **Инструментальная система имитации обработки информации и анализа характеристик надежности опасного производства**

*Изложены способ формализации и методика построения имитационных моделей вероятностных технологических процессов опасного производства с помощью системы моделирования агрегатного типа имитации.*

**Ключевые слова:** имитация, надежность, способ формализации, моделирование.

### **Введение**

Вероятностные технологические процессы опасного производства (ВТП ОП) имеют сложную динамику функционирования и поэтому трудно предсказуемы характеристики надежности и безопасности их выполнения. Даже если известны характеристики возникновения отказов функционирования микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ), реализующих ВТП ОП, то зачастую трудно предсказать характеристики надежности и времени реализации ВТП ОП. Известный аналитический аппарат анализа технологических процессов на основе сетевых графиков [1] из-за вероятностного характера параметров  $MTXO_{ij}$  не дает достоверных результатов исследований. Кроме того, очень важной для проектного моделирования ВТП ОП является информация о динамике расхода общих ресурсов, оборудования, исполнителей и материалов предприятия при реализации множества  $\{MTXO_{ij}\}$ .

В таких случаях исследователи вынуждены обращаться к имитационным методам моделирования ВТП ОП. Однако, имитация является весьма ресурсоемкой процедурой и для ее реализации необходимы средства автоматизации имитационного эксперимента (ИЭ) при исследовании вариантов организации ВТП ОП. Проблема ресурсоемкости имитации ВТП ОП возрастает из-за необходимости использования процедур Монте-Карло [2]. Анализ описательных и технологических

© И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. И. Сукач, И. В. Соболев, А. А. Украинец

возможностей известных систем автоматизации имитационного моделирования, приведенный нами в работе [3], позволяет установить возникновение существенных трудностей их использования для анализа динамики развития ВТП ОП. Поэтому актуальна разработка методик построения имитационных моделей (ИМ) ВТП ОП и средств их реализации.

В данной работе излагается: новый способ формализации ВТП ОП на основе комбинации вероятностных сетевых графиков (*ВСГР*) с процедурами Монте-Карло; методика построения ИМ *ВСГР* на основе агрегатного способа имитации *МТХО<sub>ij</sub>*; возможности системы имитационного моделирования (*СИМ*) вероятностных технологических процессов производства, реализующей агрегатный способ имитации ВТП ОП.

### Формальные модели функционирования технологического процесса опасного производства

Для описания состава и структуры ВТП ОП используем аппарат сетевого планирования в виде *ВСГР*. Все работы *ВСГР* представляют собой микротехнологические операции (*МТХО<sub>ij</sub>*). Наличие связи между *МТХО<sub>ij</sub>* в *ВСГР* будем описывать с помощью событий *СОВ<sub>i</sub>* и *СОВ<sub>j</sub>*, являющихся узлами *ВСГР*. При этом времена выполнения *МТХО<sub>ij</sub>*( $\tau_{ij}$ ) и сами направления связей между *СОВ<sub>i</sub>* являются вероятностными. В таких ситуациях алгоритм расчета и анализа реализаций сетевых графиков [1] не обеспечивает получения достоверной информации. Поэтому предлагается заменить *ВСГР* с помощью известной процедуры Монте-Карло [2] на последовательность *СГР<sub>l</sub>* 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 *СОВ<sub>j</sub>*, связанного с событиями *СОВ<sub>i</sub>* и *СОВ<sub>k</sub>* с помощью *МТХО<sub>ij</sub>* и *МТХО<sub>jk</sub>* соответственно, определяются ранние и поздние сроки их свершения ( $t_{pil}$  и  $t_{pil}$ ) по формулам:

$$\begin{aligned} t_{pjl} &= \max_i \{ t_{pil} + \tau_{ij} \}, \\ t_{\Gamma jl} &= \min_k \{ t_{\Gamma kl} - \tau_{jk} \}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\tau_{ij}$  и  $\tau_{jk}$  — длительности выполнения *МТХО<sub>ij</sub>* и *МТХО<sub>jk</sub>* в *l*-й реализации *ВСГР*;  $t_{pil}$  и  $t_{\Gamma kl}$  — ранние и поздние сроки свершения соответственно *СОВ<sub>i</sub>* и *СОВ<sub>k</sub>*.

Расчет  $t_{pjl}$  начинается от исходного события *СОВ<sub>1</sub>* и оканчивается завершающим событием *СОВ<sub>n</sub>*, а вычисление  $t_{\Gamma jl}$  начинается в обратном порядке от завершающего события *СОВ<sub>n</sub>* и заканчивается исходным событием *СОВ<sub>1</sub>*. Рассчитываются также резервы свершения событий ( $R_{il} = t_{\Gamma il} - t_{pil}$ ).

Аналогичным образом для каждой  $MTXO_{ij}$  по известным расчетным формулам [1] вычисляются статистики реализации  $MTXO_{ij}$ : раннее начало их свершения ( $t_{PHijl} = t_{Pil}$ ); позднее начало свершения  $MTXO_{ij}$  ( $t_{ПНijl} = t_{Пjl} - \tau_{ijl}$ ); раннее окончание ( $t_{POijl} = t_{Pil} + \tau_{ijl}$ ); позднее окончание ( $t_{ПОijl} = t_{Пjl}$ ). Критический путь  $l$ -й реализации  $BCGP_l$  составляет последовательность  $\{SOB_i\}$ , у которых резервы свершения равны нулю ( $R_{il} = 0$ ), и  $\{MTXO_{ij}\}$ , связывающих эти  $SOB_i$ . В результате  $N$  реализаций  $BCGP_l$  ( $l = \overline{1, N}$ ) для каждого  $SOB_i$  формируются выборки объема  $N$  статистик его свершения:  $\{t_{Pil}\}$ ,  $\{t_{Пil}\}$ ,  $\{R_{il}\}$ . Аналогичным образом определяются выборки статистик реализации  $MTXO_{ij}$ :  $\{t_{PHijl}\}$ ,  $\{t_{ПНijl}\}$ ,  $\{t_{POijl}\}$ ,  $\{t_{ПОijl}\}$ . Для определения наиболее вероятного критического пути в  $BCGP$  используется множество критических путей, найденное в ходе имитации каждой реализации  $BCGP_l$  ( $\{KRP_l\}$ ). С помощью этого множества формируется граф реализаций критических путей  $BCGP$  ( $GRKRP$ ). По всем перечисленным выборкам объема  $N$  определяются оценки математических ожиданий и выборочных дисперсий  $S^2$ : ( $\bar{t}_{Pi}, \bar{t}_{Пi}, \bar{R}_i, S^2 t_{Pi}, S^2 t_{Пi}, S^2 R_i$ ) и ( $\bar{t}_{PHij}, S^2 t_{PHij}, \bar{t}_{ПНij}, S^2 t_{ПНij}, \bar{t}_{POij}, S^2 t_{POij}, \bar{t}_{ПОij}, S^2 t_{ПОij}$ ). Усредненные статистики свершения  $\{SOB_i\}$  и  $\{MTXO_{ij}\}$ , входящие в  $GRKRP$ , можно использовать при анализе динамики реализации  $BCGP_l$ , оценках надежности и безопасности реализации ВТП ОП.

Специфика исследования ВТП ОП такова, что исследователю обычно недостаточно исследований временных показателей реализации  $BCGP$  и необходима модификация этих методик. Расширением аппарата формализации  $BCGP$  для исследования ВТП ОП 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 ( $KOM_{rij}$ ). Поскольку все эти характеристики требований  $MTXO_{ij}$  являются вероятностными, то необходимо задание соответствующих функций их распределения:  $F_{1ij}(\tau)$ ,  $F_{2ij}(C)$ ,  $F_{3rij}(V)$ ,  $F_{4rij}(mt)$ ,  $F_{5rij}(KOM)$ .

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  $BCGP$  необходимо задать: функцию распределения длины интервалов  $\tau_{BOij}$  между соседними отказами  $h$ -го типа выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $\Phi_{1hij}(\tau_{BO})$ ); функцию распределения длины интервалов  $\tau_{BOij}$  восстановления работоспособности  $MTXO_{ij}$  ( $\Phi_{2hij}(\tau_{BO})$ ); 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 ( $C_{BOij}$ ) из-за восстановления работоспособности  $MTXO_{ij}$  при появлении опасных отказов  $h$ -го типа ( $\Phi_{3hij}(C_{BO})$ ); функцию распределения дополнительной стоимости выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $C_{ABij}$ ) при ликвидации аварий, возникших по вине  $MTXO_{ij}$  ( $\Phi_{4hij}(C_{AB})$ ).

При выполнении особенно ресурсоемких  $MTXO_{ij}$  в результате имитации *BCGP* исследователю желательно получить графики расхода общих ресурсов предприятия. С этой целью перед имитацией выполнения  $MTXO_{ij}$  длительностью  $\tau_{ijl}$  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 ею ресурсов предприятия. При каждом выделении и использовании ресурсов для  $MTXO_{ij}$  фиксируется соответствующая статистика расхода и возврата ресурсов, оборудования и исполнителей. По завершении имитации *BCGP* формируются диаграммы расхода и изменения во времени выполнения *BCGP* ресурсов, оборудования и исполнителей. В качестве общих параметров *BCGP* перед его имитацией необходимо задать имеющиеся у предприятия множества: размеров ресурсов  $r$ -го типа общего пользования  $\{V_{Or}\}$ ; материалов  $r$ -го типа, расходуемых безвозмездно при реализации *BCGP*  $\{mt_{or}\}$ , множество комплектующих деталей  $r$ -го типа  $\{KOM_{or}\}$ . Задаются также списки наличных у ВТП ОП индивидуального пользования: оборудования  $\{SOBO_{or}\}$ , исполнителей  $\{SISP_{or}\}$ , ресурсов  $\{SRES_{or}\}$ .

Особенностью методики формализации *BCGP* является то, что вычисление статистик реализации  $\{SOB_i\}$  и  $\{MTXO_{ij}\}$  осуществляется в двух режимах имитации. В режиме прямой имитации (модельное время  $t_0$  растет от нуля до момента завершения  $l$ -й реализаций *BCGP*  $T_{zi}$ ) вычисляются  $\{t_{pil}\}$ , а в режиме инверсной имитации (модельное время  $t_0$  уменьшается от  $T_{zi}$  до нуля) определяются  $\{t_{pil}\}$  и  $\{R_{il}\}$ .

Кроме того, в режиме прямой имитации фиксируется статистика расхода и возврата ресурсов, оборудования и исполнителей предприятия. По завершении инверсной имитации определяются и запоминаются критические пути каждой реализации *BCGP* ( $KRP_l$ ).

## Имитационные модели агрегатного способа имитации реализаций вероятностных сетевых графиков

Взаимодействие  $MTXO_{ij}$  с  $SOB_i$  в составе  $BCGP$  представим двумя типами агрегатов, связанных между собой с помощью множества действительных и фиктивных сигналов ( $Sgd$  и  $Sgf$ ). Агрегаты-четыреполюсники ( $ATOP_{ij}$ ) имеют по два типа входов и выходов и имитируют выполнение  $MTXO_{ij}$ . Агрегаты-многополюсники  $ASOB_i$  с числом входов ( $b_i$ ) и числом выходов ( $m_i$ ) имитируют свершение событий  $SOB_i$ . Процесс моделирования  $BCGP$  начинается в режиме прямой имитации с агрегата  $ASOB_1$  и завершается выполнением агрегата  $ASOB_m$ , имитирующим завершающее событие в  $l$ -й реализации  $BCGP$ . Затем происходит переход на режим инверсной имитации от  $ASOB_m$  до выполнения  $ASOB_1$ , имитирующем исходное событие. Происходит переход на режим прямой имитации уже следующей ( $l + 1$ ) реализации  $BCGP$ . Процесс имитации  $BCGP$  завершается после реализации  $N$  переходов с режима инверсной имитации на режим прямой имитации. Выходы  $ASOB_i$  возможны двух типов: одиночные, формирующие только действительные сигналы ( $Sgd$ ); «кустовые», формирующие только один сигнал  $Sgd$  и  $(d_k - 1)$  фиктивных сигналов ( $Sgf$ ). Число разветвлений ( $d_k$ )  $k$ -го кустового выхода ( $BK_{ijk}$ ) может быть различным, но только один  $Sgd$  из этого выхода формируется по вероятности ( $P_{ijkl}$ ). Все входы  $ASOB_i$ , также как и выходы, нумеруются. Поэтому при адресации сигнала указывается не только номер события ( $j$ ), но и номер входа этого события ( $r$ ). Как видим, сигналы имеют сложную структуру:  $Sgd = (TS, i, k, d_k, (P_{ijkl}), j, r)$ , где  $TS$  — тип  $Sgd$  для  $ATOP_{ij}$  ( $IP$  — входной прямой,  $OP$  — выходной прямой,  $II$  — входной инверсный,  $OI$  — выходной инверсный);  $i, j$  — номера  $ASOB_i$ , посылающего на  $ATOP_{ij}$  сигнал  $Sgd$ , и  $ASOB_j$ , получающего  $Sgd$  от  $ATOP_{ij}$ ;  $k$  и  $d_k$  — номер и типы выхода ( $d_k$  — количество разветвлений сигналов в  $BK_{ijk}$ );  $\{P_{ijkl}\}$  — вероятность формирования на  $l$ -м разветвлении сигнала  $Sgd$ ;  $r$  — номер входа  $Sgd$  в  $ASOB_j$ .

На входы агрегата-четыреполюсника  $ATOP_{ij}$  поступают  $Sgd$  типа  $IP$  в режиме прямой имитации и типа  $II$  в режиме инверсной имитации  $BCGP$ . После имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  на выходах  $ATOP_{ij}$  формируются  $Sgd$  типа  $OP$  в режиме прямой имитации и  $OI$  в режиме инверсной имитации, поступающих соответственно на входы  $ASOB_j$  и выходы  $ASOB_i$ . С приходом самого последнего  $Sgd$  на входы  $ASOB_i$  срабатывает «спусковая функция» агрегата, что означает фиксацию ( $t_{pil}$ ) и формирование всех выходных сигналов  $ASOB_i$ . Рассылка сигналов осуществляется согласно таблицы коммутации агрегатов, сформированной исследователем до постановки серий ИЭ. Затем  $ASOB_i$  ожидает прихода на один из его выходов в режиме инверсной имитации первого сигнала. В этот момент определяется ( $t_{pii}$ ) и формируются инверсные сигналы со всех входов агрегата

$ASOB_j$ , которые инициируют работу агрегатов  $ATOP_{ij}$ . Сам же агрегат  $ASOB_j$  переходит в режим ожидания прихода последнего входного сигнала в режиме прямой имитации уже  $(l + 1)$  реализации  $BCGP$  согласно процедуре Монте-Карло [2].

Агрегат  $ATOP_{ij}$  вначале ожидает прихода от  $ASOB_i$   $Sgd$  типа  $IP$ , переводящего агрегат в активное состояние. В этом состоянии по функциям распределения  $F_{1ij}(\tau)$ ,  $F_{2ij}(C)$ ,  $F_{3rij}(V)$ ,  $F_{4rij}(mt)$ ,  $F_{5rij}(KOM)$  формируются конкретные значения запросов  $ATOP_{ij}$  на выделение ресурсов времени, стоимости и ресурсов системы ( $\tau_{ijl}$ ,  $C_{ijl}$ ,  $V_{rij}$ ,  $mt_{rij}$ ,  $KOM_{rij}$ ). По спискам определяются потребности агрегата на индивидуальные ресурсы, оборудование и исполнителей предприятия. Если на момент активизации  $ATOP_{ij}$  при запросах ресурсов предприятия какой-либо из заказов не может быть выполнен, то агрегат ожидает их освобождения до выполнения заказа. Одновременно с выделением ресурсов они закрепляются за агрегатом. Формируется и накапливается статистика расхода ресурсов, оборудования и исполнителей для последующего вывода графиков и временных диаграмм. После выполнения всех заказов агрегат  $ATOP_{ij}$  переходит в состояние имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  длительностью ( $\tau_{vijl}$ ). По завершении имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  агрегат  $ATOP_{ij}$  возвращает все ресурсы предприятию и переходит в режим ожидания прихода  $Sgd$  типа  $II$  от  $ASOB_j$  при инверсной имитации  $BCGP$ . Восстанавливается запомненное ранее значение  $\tau_{vijl}$ , имитируется выполнение  $ATOP_{ij}$  в режиме инверсной имитации длительностью  $\tau_{vijl}$ , и агрегат  $ATOP_{ij}$  формирует сигнал  $Sgd$  типа  $IO$ , поступающий на соответствующий выход  $ASOB_i$ . Сам же агрегат  $ATOP_{ij}$  переходит в состояние ожидания прихода  $Sgd$  типа  $IP$  при следующей реализации  $BCGP$ .

### **Состав и возможности системы автоматизации моделирования на основе агрегатного способа имитации**

Постановка серий ИЭ с помощью агрегатных ИМ  $BCGP$  автоматизирована в специализированной системе имитационного моделирования (СИМ)  $BCGP$ . СИМ  $BCGP$  состоит из следующих подсистем:

- параметризованных заготовок агрегатов  $\{ASOB_i\}$  и  $\{ATOP_{ij}\}$ , позволяющих компоновать структуру ИМ  $BCGP$  на основе идеи «детского конструктора» ( $PS.AGREG$ );
- формирования ИМ  $BCGP$  из элементарных ИМ  $ATOP_{ij}$  и  $ASOB_i$  ( $PS.FORMSG$ );
- реализации ИЭ с ИМ  $BCGP$  согласно процедуры Монте-Карло, обеспечивающей имитацию  $N$  реализаций  $BCGP$  ( $PS.MONTEK$ );
- обработки статистики ( $PS.OBRABOT$ ) и визуализации результатов ИЭ ( $PS.VIZIAL$ );

- анализа результатов моделирования и принятия решений (*PS.RECHEN*);
- управляющей программы моделирования агрегатов (*UPMA*).

Для построения вариантов *ИМ ВСГР* достаточно использовать две универсальные программы выполнения функций агрегатов  $АТОР_{ij}$  и  $ASOB_i$ . Обе эти программы моделей являются реентерабельными, обслуживая одновременно все элементы *ИМ ВСГР* последовательно в режимах прямой и инверсной имитации. В подсистеме *PS.AGREG* кроме программ-заготовок  $АТОР_{ij}$  и  $ASOB_i$  находятся программы готовых *ИМ ВСГР*, верифицированные и требующие только «запитки» исходной информацией о параметрах и структуре *ВСГР*. Программы  $АТОР_{ij}$  и  $ASOB_i$  можно использовать в качестве «заготовок» при создании новых *ИМ ВСГР*, состав которых отличается от *ИМ ВСГР*, имеющих в библиотеке подсистемы *PS.AGREG*. Подсистема *PS.FORMSG* организует: ввод исходной информации о структуре *ИМ ВТП ОП*; проверку правильности описания сигналов и структуры *ВСГР*; поиск ошибок коммутации в *ВСГР*; верификацию функционирования вновь разрабатываемых *ИМ ВТП ОП*. Подсистема *PS.MONTEK* включает в себя: библиотеку процедур формирования случайных величин по функциям вероятностей их распределения (*LIB.GREB*); программу, реализующую алгоритм организации вычислений согласно процедуры Монте-Карло и вычисление оценок математических ожиданий и выборочных дисперсий статистик моделирования *ВСГР*; библиотеку подпрограмм реализации единичных жребиев имитации (*LIB.GREB*). *PS.OBRABOT* автоматизирует этап формирования статистик и откликов имитации *ВСГР*. Она представляет собой адаптацию известного пакета статистического анализа данных *STATISTIKA* [4] для данной предметной области исследований. *PS.VIZIAL* формирует: временные диаграммы использования ресурсов, оборудования и исполнителей предприятия за время реализации *ВСГР*; графики расхода материалов, комплектующих деталей и финансовых средств предприятия за время имитации *ВСГР*; граф критических путей каждой реализации *ВСГР*. *PS.RECHEN* включает в себя набор подпрограмм, реализующих классические процедуры принятия решений в условиях неопределенности и риска [5].

Управляющая программа моделирования агрегатов (*UPMA*) организует инициализацию агрегатов  $ASOB_i$  и  $АТОР_{ij}$  на основе механизмов обслуживания событий. Модельное время  $t_0$  изменяется способом до ближайшего события. Особенностью реализации алгоритма *UPMA* является сочетание прямого и инверсного режимов изменения модельного времени  $t_0$  с запуском программы перехода на очередную реализацию *ВСГР* согласно процедуре Монте-Карло. *UPMA* просматривает списки иницилируемых агрегатов, пересылает сигналы от одного агрегата к другому, управляет сбором статистики имитации, контролирует моменты срабатывания спусковых функций у агрегатов  $ASOB_m$ , имитирующих завершающие события, и переключение имитации на инверсное изменение модельного времени  $t_0$ .

## Методика использования системы имитационного моделирования вероятностных сетевых графиков

Исследование ВТП ОП с помощью методик их формализации и построения ИМ *ВСГР* требует автоматизации с помощью *СИМ ВСГР* следующих 9 этапов.

1. Формирование структуры *ВСГР*, описывающего динамику развития во времени *ВТПП*.
2. Подготовка исходной информации о моделируемом ВТП ОП.
3. Задание параметров  $MTXO_{ij}$  и запись их в базу данных *СИМ ВСГР*.
4. Составление таблиц коммутации агрегатов  $ASOB_i$  и  $ATOP_{ij}$ .
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 [2].
8. Обработка результатов ИЭ и формирование интегральных откликов ИМ *ВСГР*. Формирование и визуализация результатов имитации.
9. Анализ результатов моделирования и принятие проектных решений.

Структура *ВСГР* на этапе 1 задается следующей последовательностью действий. На основании анализа ВТП ОП формируются таблицы структур  $ATOP_{ij}$  и  $ASOB_i$ . Создается таблица коммутации агрегатов друг с другом, состоящая из типовых сигналов  $Sgd$ . Элементы  $(i, k, d_k, P_{ij})$  определяют с какого выхода  $ASOB_i$  формируются сигналы на  $ATOP_{ij}$ , а элементы  $(j, r)$  указывают на какой вход  $ASOB_j$  поступит затем  $Sgd$  с  $ATOP_{ij}$ . Все элементы описания этих таблиц упорядочены по возрастанию номеров  $ATOP_{ij}$ . Фактически таблица коммутации агрегатов содержит информацию об организации связи  $(ASOB_i, ATOP_{ij}, ASOB_j)$  при прямой имитации *ВСГР* (слева направо) и  $(ASOB_j, ATOP_{ij}, ASOB_i)$  при инверсной имитации (справа налево) *ВСГР*. Эти же сигналы  $Sgd$  формируются при заполнении таблицы коммутации агрегатов. Очевидно, что этап 1 автоматизировать практически невозможно.

На этапе 2 организуется либо натурный эксперимент (НЭ), либо используются экспертные значения параметров реализации  $ATOP_{ij}$ . Основную трудность в подготовке исходной информации составляет определение вероятностных характеристик параметров  $ATOP_{ij}$ . Для облегчения действий исследователя на этом этапе используются подсистемы *PS.AGREG* и *PS.FORMSG*.

На этапе 3 с помощью подсистемы *PS.FORMSG* осуществляется запись параметров  $ATOP_{ij}$  в информационную базу данных *СИМ*. Ввод исходной информации контролируется и сопровождается выводом на дисплей результатов этого контроля для устранения ошибок в описании *ВСГР*. Технология взаимодействия исследователя автоматизирована и предполагает использование набора «меню» в режиме «вопрос-ответ». По завершении этапа 3 синтаксические ошибки в *ВСГР* уже исправлены.



На этапе 4 таблицы коммутации агрегатов  $ASOB_i$  с  $АТОР_{ij}$  проверяются на соответствие входов и выходов четырехполюсников  $АТОР_{ij}$  с соответствующими входами и выходами многополюсников  $ASOB_i$ . Фактически идет семантическая отладка  $BCGP$  в обоих режимах имитации (прямой и инверсной). Все выявленные несоответствия сообщаются подсистемой  $PS.FORMSG$  исследователю и в режиме диалога ИМ исправляются. На этапе 5 происходит начальный запуск базового варианта ИМ  $BCGP$  первой его реализации. Далее  $PS.MONTEK$  позволяет исследователю просмотреть переходы агрегатов из состояния в состояние с автоматической документацией результатов комплексной отладки  $BCGP$ . Таким образом, достигается автоматизация процедуры верификации ИМ  $BCGP$  в обоих режимах имитации.

На этапе 6 осуществляется испытание и исследование свойств ИМ  $BCGP$ . Все шаги реализации этого этапа стандартизованы и реализуют известные методики испытания ИМ сложных систем [3]. Вначале оценивается ошибка имитации ( $\varepsilon_n \%$ ), означающая максимальный процент ошибок откликов ИМ  $BCGP$ . Затем оценивается длина переходного режима имитации ( $T_{ПП}$ ), означающая максимальное время стабилизации того из откликов ИМ  $BCGP$ , который последним переходит в установившееся состояние. Важным шагом испытания ИМ  $BCGP$  является проверка «устойчивости» режима имитации (когда амплитуды откликов не возрастают при увеличении времени моделирования ( $T_u$ ) на порядок). Завершающим шагом испытания ИМ  $BCGP$  являются: проверка чувствительности откликов ИМ к изменениям параметров моделирования и проверка адекватности ИМ. Методика реализации этих проверок изложена в работе [3].

На этапе 7 организуется серия многопрогонных ИЭ согласно процедуре Монте-Карло. Каждый ИЭ представляет собой  $l$ -ю реализацию  $BCGP$ . Итогом реализации данного этапа является формирование выборок статистик реализации  $АТОР_{ij}$ ,  $ASOB_i$  и множества критических путей  $\{KRP_l\}$ . В результате обработки статистики имитации (на этапе 8), накопленной в базе данных  $СИМ$ , формируются усредненные значения и дисперсий статистик имитации  $BCGP$ , выводятся на печать диаграммы усредненных расходов ресурсов, стоимости реализации  $BCGP$ , коэффициентов использования оборудования и загрузки исполнителей предприятия. Вывод графиков изменения этих статистик стандартизован и осуществляется по запросам исследователя. Как видим, получение информации о динамике развития  $ВТПП$  начиная с этапа 3 автоматизировано. Для автоматизации действий исследователя на этапе 9 в составе  $СИМ BCGP$  имеется подсистема  $PS.RECHEN$ , реализующая известную методику принятия решений в условиях неопределенности и риска [5].

## Заключение

Предложенные способ формализации ВТП ОП с помощью  $BCGP$ , методика построения ИМ  $BCGP$  на основе агрегатного способа имитации  $\{MTXO_{ij}\}$  и инструментальная система имитации  $BCGP$  позволяют автоматизировать наиболее трудоемкие этапы проектного моделирования  $ВТПП$  и таким образом оперативно

организовать проектное моделирование вариантов организации ВТП ОП. Высокий уровень автоматизации исследований, универсальный характер представления ВТП ОП с помощью *ВСГР* и простота описания ИМ *ВСГР* обеспечивают *СИМ ВСГР* перспективу развития и использования при проектном моделировании *ВТП* опасного производства.

1. Жогаль С.И., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие — Гомель: БелГУТ, 1999. — 109 с.
2. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: Учебное пособие — Гомель: БелГУТ, 1999. — 102 с.
3. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. — М.: Радио и связь. 1988. — 232 с.
4. Боровиков В.П., Боровиков И.П. STATISTIKA — статистический анализ и обработка данных в среде Windows. — М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1998. — 608 с.
5. Максимей И.В., Левчук В.Д., Жогаль С.П. и др. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений. — Гомель, БелГУТ, 1999. — 150 с.

Поступила в редакцию 28.09.2004