

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_{ij}*; 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_{ij}*). Наличие связи между *МТХО_{ij}* в *ВСГР* будем описывать с помощью событий *СОВ_i* и *СОВ_j*, являющихся узлами *ВСГР*. При этом времена выполнения *МТХО_{ij}*(τ_{ij}) и сами направления связей между *СОВ_i* 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_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 *СОВ_j*, связанного с событиями *СОВ_i* и *СОВ_k* с помощью *МТХО_{ij}* и *МТХО_{jk}* соответственно, определяются ранние и поздние сроки их свершения (t_{pil} и $t_{\pi il}$) по формулам:

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

где τ_{ij} и τ_{jk} — длительности выполнения *МТХО_{ij}* и *МТХО_{jk}* в *l*-й реализации *ВСГР*; t_{pil} и $t_{\pi kl}$ — ранние и поздние сроки свершения соответственно *СОВ_i* и *СОВ_k*.

Расчет t_{pjl} начинается от исходного события *СОВ₁* и оканчивается завершающим событием *СОВ_n*, а вычисление $t_{\pi jl}$ начинается в обратном порядке от завершающего события *СОВ_n* и заканчивается исходным событием *СОВ₁*. Рассчитываются также резервы свершения событий ($R_{il} = t_{\pi il} - t_{pil}$).

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 τ_{BOij} между соседними отказами h -го типа выполнения $MTXO_{ij}$ ($\Phi_{1hij}(\tau_{BO})$); функцию распределения длины интервалов τ_{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 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 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 $АТОР_{ij}$. 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 $АТОР_{ij}$ 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 $АТОР_{ij}$ на выделение ресурсов времени, стоимости и ресурсов системы (τ_{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 $АТОР_{ij}$ 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 $АТОР_{ij}$ переходит в состояние имитации выполнения $MTXO_{ij}$ длительностью (τ_{vijl}). По завершении имитации выполнения $MTXO_{ij}$ агрегат $АТОР_{ij}$ возвращает все ресурсы предприятию и переходит в режим ожидания прихода Sgd типа II от $ASOB_j$ при инверсной имитации $BCGP$. Восстанавливается запомненное ранее значение τ_{vijl} , имитируется выполнение $АТОР_{ij}$ в режиме инверсной имитации длительностью τ_{vijl} , и агрегат $АТОР_{ij}$ формирует сигнал Sgd типа IO , поступающий на соответствующий выход $ASOB_i$. Сам же агрегат $АТОР_{ij}$ 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 $\{АТОР_{ij}\}$, позволяющих компоновать структуру $ИМ BCGP$ на основе идеи «детского конструктора» ($PS.AGREG$);
- формирования $ИМ BCGP$ из элементарных $ИМ АТОР_{ij}$ 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