

УДК 681.3

И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. И. Сукач,
И. В. Соболев, А. А. Украинцев

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

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 *SOB_i* и *SOB_j*, являющихся узлами *ВСГР*. При этом времена выполнения *МТХО_{ij}*(τ_{ij}) и сами направления связей между *SOB_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 *SOB_j*, связанного с событиями *SOB_i* и *SOB_k* с помощью *МТХО_{ij}* и *МТХО_{jk}* соответственно, определяются ранние и поздние сроки их свершения (t_{pil} и $t_{\pi il}$) по формулам:

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

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

Расчет t_{pjl} начинается от исходного события *SOB₁* и оканчивается завершающим событием *SOB_n*, а вычисление $t_{\pi jl}$ начинается в обратном порядке от завершающего события *SOB_n* и заканчивается исходным событием *SOB₁*. 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 $\{V_{ORr}\}$; 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 $ATOR_{ij}$. 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 $ATOR_{ij}$ вначале ожидает прихода от $ASOB_i$ Sgd типа IP , переводящего агрегат в активное состояние. В этом состоянии по функциям распределения $F_{1ij}(\tau)$, $F_{2ij}(C)$, $F_{3ij}(V)$, $F_{4ij}(mt)$, $F_{5ij}(KOM)$ формируются конкретные значения запросов $ATOR_{ij}$ 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 $ATOR_{ij}$ 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 $ATOR_{ij}$ переходит в состояние имитации выполнения $MTXO_{ij}$ длительностью (τ_{Bijl}). По завершении имитации выполнения $MTXO_{ij}$ агрегат $ATOR_{ij}$ 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_{Bijl} , имитируется выполнение $ATOR_{ij}$ в режиме инверсной имитации длительностью τ_{Bijl} , и агрегат $ATOR_{ij}$ формирует сигнал Sgd типа IO , поступающий на соответствующий выход $ASOB_i$. Сам же агрегат $ATOR_{ij}$ 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 $\{ATOR_{ij}\}$, позволяющих компоновать структуру ИМ $BCGP$ на основе идеи «детского конструктора» (PS.AGREG);
- формирования ИМ $BCGP$ из элементарных ИМ $ATOR_{ij}$ 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 $АSOB_i$. 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 $АSOB_i$ находятся программы готовых *ИМ ВСГР*, верифицированные и требующие только «запитки» исходной информацией о параметрах и структуре *ВСГР*. Программы $АТОР_{ij}$ и $АSOB_i$ можно использовать в качестве «заготовок» при создании новых *ИМ ВСГР*, состав которых отличается от *ИМ ВСГР*, имеющихся 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 $АSOB_i$ 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 $АSOB_m$, 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_{ijl}) 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