

УДК 007; 681.3

**В. С. Смородин**

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины  
ул. Советская, 104, 246000 Гомель, Республика Беларусь

## **Организация контроля и сбора статистики имитационного моделирования технологических процессов опасного производства**

*Предложено использование человеко-машинной системы оперативно-го управления для контроля за развивающимся технологическим процессом опасного производства (ТПОП). Сформулированы особенности имитации ТПОП с помощью вероятностных сетевых графиков. Рассмотрены динамика формирования статистик имитации и особенности их хранения и использования. Предложена технология управления имитацией ТПОП для предотвращения аварий в самом ТПОП.*

**Ключевые слова:** контроль, сбор статистики, имитационная модель, технологические процессы опасного производства, принятие решений.

### **Введение**

При исследовании технологических процессов опасного производства зачастую возникают проблемы контроля и профилактики его функционирования. Для лиц, принимающих решения (ЛПР), при выборе стратегий предотвращения и ликвидации аварий на производстве, на которые трудно реагировать оперативно, очень важно иметь средство программного контроля развития процесса. В таких ситуациях существенную помощь ЛПР может оказать имитационная модель (ИМ) исследуемого ТПОП. В данной работе рассматривается случай, когда ИМ ТПОП используется и на стадии проектного моделирования, и при функционировании ее параллельно с реальным ТПОП. Очевидно, что такая ИМ должна имитировать ТПОП на высоком уровне детализации для того, чтобы адекватно отображать критические ситуации, возникающие в реально функционирующем ТПОП. Идея контроля ТПОП за выходом его параметров за допустимые диапазоны их изменения не нова [1], однако появление средств оперативного построения ИМ ТПОП [2], автоматизирующих трудоемкие этапы технологии контроля ТПОП, позволяет использовать классическую теорию принятия решений по результатам имитационного эксперимента (ИЭ) подобного производства [3].

В работе предлагается использовать для этих целей человеко-машинную систему оперативного управления (ЧМСОУ) ТПОП, которая состоит из следующих компонентов: имитационной модели ТПОП, представляющей собой реализацию вероятностных сетевых графиков (ВСГР) с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного типа [2]; системы принятия решений (*SPRESH*), реализованную в среде САИМ; эксперта-технолога (*EXPERT*), который является специалистом изучаемой предметной области и нередко представляет собой ЛПР. Из-за высокого уровня детализации ИМ ТПОП динамика взаимодействия перечисленных компонентов ЧМСОУ ТПОП реализуется с учетом особенностей организации контроля и сбора статистики ИМ ТПОП, которые и являются предметом данной работы. Актуальность разработки специальной технологии, учитывающей разный временной масштаб функционирования ИМ ТПОП, системы *SPRESH* и компонента *EXPERT*, определяется высокой ценой отказа оборудования ТПОП и необходимостью оперативного вмешательства эксперта-технолога в ход развития технологического процесса с целью предотвращения аварии за счет своевременного перехода на резервное оборудование.

Непредсказуемый характер отказов оборудования ТПОП требует непрерывного слежения за операционной обстановкой в ТПОП и оперативного принятия решений об использовании резервного оборудования. Обычная имитация функционирования ТПОП и анализ результатов имитации после завершения серии ИЭ даже при применении сложных алгоритмов принятия решений не будет эффективной из-за того, что ситуация только фиксируется, и уже поздно что-либо сделать для предотвращения аварий в ТПОП. Выходом из положения может быть имитация реальных ситуаций на ИМ ТПОП с некоторым упреждением по сравнению с реальным ТПОП. В таких случаях *SPRESH* выдает информацию эксперту о возможности возникновения чрезвычайной ситуации по истечении интервала времени  $\tau_{зап}$ , равного времени запаздывания реального ТПОП по сравнению с ИМ ТПОП. Другой трудностью в реализации контроля за ходом ТПОП с помощью ИМ является то, что сама ИМ ТПОП представляет собой реализации ВСГР и должна использоваться на основе процедуры Монте-Карло из-за вероятностного характера параметров реализации микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ), где  $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , а также характеристик отказов и восстановлений работоспособности оборудования.

Таким образом, ЛПР в лице эксперта может использовать кроме интегральной статистики еще и оперативную статистику имитации реализаций ВСГР (согласно процедуре Монте-Карло), а также результаты вторичного анализа статистики имитации по окончании исследования динамики реализации ИМ ТПОП. Кроме того, должна быть предусмотрена возможность автоматического управления процессом имитации в ИМ ТПОП со стороны компонента *SPRESH*. Столь разноплановый характер требований к организации динамики взаимодействия трех компонентов ЧМСОУ определил цель и задачи данной статьи, а также основные аспекты организации и обработки информации ЧМСОУ.

## Состав и структура человеко-машинной системы оперативного управления

Как уже упоминалось, ЧМСОУ состоит из трех компонентов с различным временным масштабом их функционирования. Поэтому особую роль в такой системе играет база данных модели (БДМ), обеспечивающая синхронизацию процессов, протекающих с различным временным темпом, хранение статистики имитации и ее использование на различных этапах исследования ТПОП. Рассмотрим функциональное назначение и структуру компонентов ЧМСОУ (блок-схема взаимодействия которых приведена на рисунке). Как видно из рисунка, *SPRESH* является основным звеном управления ходом имитации ТПОП. С одной стороны, *SPRESH* взаимодействует с ИМ ТПОП, используя алгоритм обработки и анализа критических и аварийных ситуаций в ТПОП. С другой стороны, она формирует и принимает информацию от компонента *EXPERT* для того, чтобы он мог воздействовать на ход имитации ТПОП.

Структурно реализовано взаимодействие трех параллельно функционирующих составляющих *SPRESH*: блока оперативного управления имитацией (БОУИ), который на высоком уровне детализации управляет ходом имитации функций множества имитаторов оборудования и взаимодействием их с множеством имитаторов — технологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$ ; тех частей системы, которые включают плановое управление ходом ИЭ, а также оперативное взаимодействие с ИМ при возникновении критических ситуаций, анализ результатов ИЭ и принятие оперативных решений в начале каждого варианта реализации ВСГР согласно процедуре Монте-Карло; блока принятия информации (ее переработки во внутреннее представление) от компонента *EXPERT* и ее формирования в готовом виде для последующего анализа ЛПР на всех этапах ИЭ (БПИА). В функции БПИА входит также выдача осведомительной информации о текущем составе ресурсов производства и состоянии оборудования ТПОП.

ИМ ТПОП состоит из следующих компонентов: подмодели (ПМ) ВСГР, имитирующей каждую  $l$ -ю реализацию ТПОП (согласно процедуре Монте-Карло); блока реализации одиночного резервирования (ОДРЕЗЕРВ), блока имитации ликвидаций аварии (БЛАВАРИЙ); блока обеспечения технологического резервирования (БЛТРЕЗЕРВ).

*EXPERT* непосредственно взаимодействует с ИМ только через *SPRESH* из-за того, что скорость реакции человека значительно ниже скорости имитации ТПОП на ЭВМ. Поэтому между ними существует буфер, в котором находится информация и для системы *SPRESH*, и для компонента *EXPERT*, содержащаяся в БДМ. Кроме того, эксперту информация о развитии процесса имитации ТПОП нужна в удобном для ее восприятия виде специалистом той предметной области, к которой относится ТПОП. Помимо этого, ряд технологических аспектов имитации, математического анализа данных и программирования могут являться для эксперта-технолога не существенными и даже излишними при наблюдении за ТПОП с помощью ИМ ВСГР. Входной информацией для эксперта являются следующие воздействия *SPRESH*: отображение состояния индикаторов оборудования  $i_1$ , информация об управляющих воздействиях *SPRESH* на ИМ ВСГР  $i_2$ ;



графики использования ресурсов и диаграммы использования оборудования и исполнителей  $i_4$ , поступающие для анализа к эксперту в каждой реализации ИМ ВСГР; интегральные графики и диаграммы  $i_6$ , усредненные по  $N$  реализациям ВСГР. В состав воздействия  $i_6$  входят также таблицы интегральных откликов ИМ  $\{\bar{Y}_n\}$ , где  $n \in \{1, 2, \dots, M\}$ , и усредненные статистики имитации  $\{ST_k\}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, M\}$ , по всему множеству реализаций ИМ ВСГР. После серий ИЭ эксперту выдается матрица решений  $i_7$ , элементами которой являются обобщенные показатели качества  $\|W_{hz}\|$  вариантов ИМ ТПОП. Строками этой матрицы являются номера  $h$  вариантов ТПОП, а столбцами  $z$  являются множества состояний внешней среды ТПОП ( $G_z$ ). Используя матрицу решений  $\|W_{hz}\|$  и классические критерии принятия решений, исследователь определяет ту комбинацию  $h_0$  параметров ИМ ТПОП, которая означает тот состав ресурсов предприятия, который обеспечивает экстремум  $W_{hz}$  согласно одному из классических критериев принятия решений для всех значений  $z$  характеристик  $MTXO_{ij}$ . Управляющими воздействиями эксперта на ИМ ТПОП являются воздействия  $i_{3r}$ : немедленный останов экспертом-технологом имитации  $l$ -й реализации ВСГР ( $i_{31}$ ); по команде эксперта немедленный переход на профилактику индивидуального и общего оборудования ( $i_{32}$  и  $i_{33}$ ); включение группового резервирования индивидуального и общего оборудования ( $i_{34}$  и  $i_{35}$ ). В начале каждой реализации ВСГР с помощью воздействий  $i_{51}$  и  $i_{52}$  эксперт может оперативно менять состав вектора параметров  $\{X_n\}$  и характеристики внешней среды ИМ ТПОП  $G_z$ . Остальные воздействия  $SPRESH$  и эксперта ( $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_4$ ,  $i_6$ ), которые были определены ранее, служат для оперативного принятия решений ЛПР в динамике имитации ВСГР. В результате  $EXPERT$  и  $SPRESH$  становятся управляющими элементами динамики имитации, что особенно важно для случая имитации с упреждением реального ТПОП.

### Особенности имитации технологических процессов опасного производства с помощью вероятностных сетевых графиков

Аппарат сетевого планирования [4] позволяет отображать во времени параллельно-последовательное функционирование  $MTXO_{ij}$ , которые по своей природе являются вероятностными. Связи в ИМ ТПОП представляются с помощью ВСГР двумя типами агрегатов: агрегатов-имитаторов операций  $MTXO_{ij}$  ( $ATOP_{ij}$ ) и агрегатов-имитаторов  $SOB_i$  ( $ASOB_i$ ),  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ , являющихся узлами ВСГР. С помощью процедуры Монте-Карло  $h$ -й вариант ИМ ВСГР заменяется последовательностью реализаций сетевых графиков детерминированной структуры  $\{CGP_{lh}\}$ ,  $l = \overline{1, N}$ , где  $N$  — число реализаций согласно процедуре Монте-Карло [5]. Для  $ASOB_i$  в  $l$ -й реализации ВСГР фиксируется следующий состав характеристик: ранний срок свершения  $t_{pilh}$ , поздний срок свершения  $t_{nilh}$ , резерв свершения

события  $R_{ilh}$ . Расчет этих характеристик в  $l$ -й реализации осуществляется по формулам [4], в направлении от исходного события ( $i = 1$ ) до завершающего события ( $i = m$ ). В ходе  $l$ -й реализации ИМ ВСГР определяется критический путь  $KRP_{lh}$ , состоящий из последовательности  $\{(ASOB_i, ATOP_{ij}, ASOB_i)\}$ , в котором имеются резервы равные нулю. По окончании  $N$  реализаций ( $l = N$ ) все  $KRP_{lh}$ , хранящиеся в БДМ, объединяются, образуя граф критических путей  $GRKRP$ . Для каждого агрегата  $ASOB_i$  в БДМ после  $l$ -й реализации формируется множество статистик имитации агрегата  $\{(t_{pilh}, t_{nilh}, R_{ilh})\}$ .

Таким образом, по завершении  $N$  реализаций в БД имеется  $m$  групп этих множеств, и при вторичной обработке по этим множествам подпрограммой обработки статистики  $PPOBRST$  подсистемой  $SPRESH$  формируются усредненные оценки математических ожиданий и выборочных дисперсий:

$$\{(\bar{t}_{pilh}, \overline{S^2_{pilh}}, \bar{t}_{nilh}, \overline{S^2_{nmi}}, \bar{R}_{ih}, S^2_{Rih})\}.$$

Путем наложения друг на друга  $\{KRP_{lh}\}$  формируется граф критических путей  $h$ -го варианта ТПОП ( $GRKRP_h$ ).

Особенностью реализации ИМ ВСГР является то, что вычисление статистик  $t_{pilh}$  осуществляется в режиме прямой имитации (от  $ASOB_1$  до  $ASOB_m$ ) при росте модельного времени  $t_0$  от 0 до критического времени  $T_{kplh}$  реализации ВСГР, а определение  $t_{nilh}$  проводится в режиме инверсной имитации (от  $ASOB_m$  до  $ASOB_1$ ) при уменьшении  $t_0$  от  $T_{kplh}$  до нуля. Это обстоятельство определяет первую особенность имитации  $l$ -й реализации ВСГР, которая определяет специфику хранения и обработки информации в ИМ ВСГР.

Агрегат  $ATOP_{ij}$  обладает универсальным алгоритмом имитации выполнения  $MTXO_{ij}$ . Поскольку используется аппарат сетевого планирования, то основной характеристикой агрегата является время его выполнения  $\tau_{ijlh}$ , которое по своей сути является случайной величиной и задается с помощью функции распределения  $F_{1ij}(\tau)$ . Помимо времени его выполнения, каждый агрегат  $ATOP_{ij}$  для имитации  $MTXO_{ij}$  требует от системы распределения ресурсов  $SPR$  выделения на время имитации операции других запросов на ресурсы, являющихся случайными величинами и описываемых с помощью соответствующих функций распределения:  $F_{2ij}(c)$  — финансовых средств для выполнения  $MTXO_{ij}$ ,  $F_{3rij}(V)$  — объема используемого ресурса  $r$ -го номера,  $F_{4rij}(mt)$  — количества материалов  $r$ -го типа и  $F_{5rij}(ko)$  — комплектующих изделий  $r$ -го типа. Кроме вероятностных параметров перед выполнением  $MTXO_{ij}$  необходимо закрепить за  $ATOP_{ij}$  множество детерминированных ресурсов ТПОП, имеющих списковую структуру: ресурсов инди-

видуального  $SP.INR_{ij}$  и общего пользования  $SP.OR_{ij}$ , оборудования индивидуального  $SP.INO_{ij}$  и общего пользования  $SP.OO_{ij}$ , бригад исполнителей  $SP.ISP_{ij}$ . Все перечисленные потребности  $MTXO_{ij}$  закрепляются за  $ATOP_{ij}$  на время имитации его выполнения, а затем по окончании имитации операции они возвращаются системе  $SPR$ .

Второй особенностью ИМ ВСГР является имитация выполнения  $MTXO_{ij}$  на выделенном индивидуальном и общем оборудовании, которое определяет возможность возникновения отказов функционирования. Отказы оборудования  $r$ -го номера могут быть трех типов: простые, требующие имитации только времени восстановления  $\tau_{BOKl}$  оборудования; средней тяжести, которые приводят к возникновению аварии и требуют большего времени  $\tau_{ABkl}$  для их ликвидации; опасные отказы, которые приводят к авариям и требуют для их ликвидации выполнения последовательности процедур  $\{APROC_k\}$ , где  $k = \overline{1, N_1}$ , агрегатов-имитаторов ликвидации аварий. Интервалы времени между соседними отказами  $\tau_{COkl}$  также являются случайными величинами, поэтому функционирование оборудования номера  $r$  описывается с помощью функций распределения этих времен:  $\Phi_{1k}(\tau_{CO})$ ,  $\Phi_{2k}(\tau_{BO})$ ,  $\Phi_{3k}(\tau_{AB})$ . Выбор типа отказа оборудования определяется матрицей вероятностей отказа  $\|P_{kr}\|$  оборудования  $r$ -го типа.

Третьей особенностью ИМ ВСГР является конкуренция  $ATOP_{ij}$  за ресурсы предприятия. До выделения всех требуемых ресурсов агрегат  $ATOP_{ij}$  ожидает полного удовлетворения своего заказа  $SRR$ . Только получив в свое распоряжение ресурсы предприятия,  $ATOP_{ij}$  включает режим имитации у имеющегося у него оборудования. Из-за конкуренции  $ATOP_{ij}$  за общие ресурсы предприятия и появления отказов функционирования оборудования фактическое время  $\tau_{IMijlh}$  имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  в  $l$ -й реализации ВСГР может быть больше времени  $\tau_{ijlh}$ , разыгранного ранее по соответствующей функции распределения. В ходе имитации  $СГР_l$  фиксируется статистика наличного состава ресурсов предприятия с постоянным шагом  $\Delta T_{ИЗ}$ , которая запоминается в БДМ. По окончании  $N$  реализаций ВСГР согласно процедуре Монте-Карло эта статистика, находящаяся в БДМ, усредняется, после чего в виде интегральных графиков изменения множества статистик  $\{ST\}$  в модельном времени  $t_0$  (с тем же постоянным шагом его изменения) формируется  $SPRESH$  и выдается эксперту в виде воздействий, описанных ранее.

### Динамика формирования статистик имитации

В качестве средства реализации ЧМСОУ использовалась система автоматизации имитационного моделирования [2], реализующая агрегатный способ имитации сложных систем. Используется шесть типов агрегатов-имитаторов: выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $ATOP_{ij}$ ), свершения событий ( $ASOB_i$ ), функционирования индиви-

дуального оборудования номера  $r_1$  ( $AOBIN_{r_1}$ ), использования общего оборудования номера  $r_2$  ( $AOBOP_{r_2}$ ), процедур ликвидации аварий  $k$ -го номера ( $APROC_k$ ). Все эти агрегаты представляют собой реентерабельные программы моделей компонентов системы, которые в БДМ имеют свой набор переменных и статистик моделирования соответственно номерам версий этих подмоделей. Количество версий равно числу агрегатов данного типа в ИМ ВСГР. Динамика выполнения алгоритмов этих агрегатов одинакова для каждого типа агрегатов, хотя каждая из версий имеет свою область данных в БДМ. Динамика функционирования этих реентерабельных программ такова, что каждый из агрегатов реализует свой алгоритм от одного оператора синхронизации САИМ до другого оператора синхронизации или оператора сбора статистики. Как видим, в ходе выполнения алгоритма агрегата кроме имитации функции агрегата фиксируется локальная и интегральная статистика имитации.

Агрегат  $ATOP_{ij}$  представляет собой четырехполюсник, на вход которого приходят либо действительные ( $Sg_d$ ), либо фиктивные сигналы ( $Sg_f$ ). Фиктивные сигналы  $Sg_f$  обходят алгоритм выполнения  $ATOP_{ij}$ , и только действительные сигналы  $Sg_d$  формируют запросы ресурсов в  $l$ -й реализации ВСГР в режиме прямой имитации, запрашивают у  $SRR$  эти ресурсы и после выполнения их заказа запускают имитацию функционирования требуемого оборудования  $r_1$  и  $r_2$  номеров длительностью  $\tau_{ijl}$ . Когда при имитации выполнения  $ATOP_{ij}$  на выделенном ему оборудовании  $AOBIN_{r_1}$  или  $AOBOP_{r_2}$  возникают опасные отказы, то интервал времени выполнения  $ATOP_{ij}$  увеличивается до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы или не будет завершена ликвидация возникшей аварии. В случае появления опасного отказа агрегат  $AOBIN_{r_1}$  или  $AOBOP_{r_2}$  активизирует последовательность процедур ликвидации аварии  $\{APROC_k\}$ , а время выполнения  $MTXO_{ij}$  снова увеличивается на время выполнения этих агрегатов-процедур. По окончании имитации  $\{APROC_k\}$  моделируется возврат управления на агрегат  $AOBIN_{r_1}$  или  $AOBOP_{r_2}$ . Далее по завершении использования всех агрегатов-имитаторов оборудования моделируется возврат на агрегат  $ATOP_{ij}$ , использующий данное оборудование. Если при выполнении  $MTXO_{ij}$  на оборудовании номера  $r_1$  или  $Sg_d$  произошла авария, то  $ATOP_{ij}$  указывается признак «была авария» ( $\pi_{ABij} = 1$ ). В результате имитация выполнения  $MTXO_{ij}$  агрегатом  $ATOP_{ij}$  завершается, и данный агрегат формирует выходной сигнал  $ASOB_j$  в режиме прямой имитации, который поступает на соответствующий вход номера  $r$  (согласно матрице коммутации агрегатов) агрегата  $ASOB_j$ . При этом запоминается время поступления этого сигнала на вход агрегата  $ASOB_j$ . Отметим, что одновременно с этим запоминается фактическое время работы  $\tau_{ввипijkl}$  агрегата  $ATOP_{ij}$  в режиме прямой имитации в соответствующей области БДМ. Затем  $ATOP_{ij}$  пе-

реходит в режим ожидания прихода сигнала от  $ASOB_j$  в режиме инверсной имитации. С приходом  $Sg_d$  или  $Sg_f$  в режиме инверсной имитации возобновляет свою работу алгоритм выполнения  $ATOP_{ij}$ . Сигнал  $Sg_f$  обходит выполнение алгоритма  $ATOP_{ij}$  и поступает на соответствующий выход  $ASOB_i$ . Действительный сигнал  $Sg_d$  начинает имитацию  $ATOP_{ij}$  в инверсном режиме длительностью  $\tau_{вып_{ijl}}$ . По окончании этого интервала времени на выходе  $ATOP_{ij}$  появятся  $Sg_d$ , которые также поступят на соответствующие выходы  $ASOB_i$ . Далее агрегат  $ATOP_{ij}$  ожидает прихода сигналов на его входы, но уже в  $l+1$  реализации ВСГР в режиме прямой имитации.

Агрегаты  $ASOB_i$  являются многополюсниками с различным числом входов и выходов. При адресации сигнала указывается номер предыдущего события  $i$  и номер входа  $r$  агрегата  $ASOB_j$ . Выходы  $ASOB_j$  бывают трех типов: действительные, вероятностные и резервные. При срабатывании спусковой функции (с приходом последнего входного сигнала по всем входам  $ASOB_j$ ) одновременно формируются выходные сигналы. Действительные выходы формируют  $Sg_d$  в соответствии с коммутацией ВСГР. На вероятностных выходах по вектору вероятностей формируется один  $Sg_d$ , а на остальных разветвлениях кустового выхода формируются  $Sg_f$ . Выходы третьего типа (резервные) используются для реализации «технологического резервирования» в ИМ ТПОП. При появлении отказов оборудования во время выполнения  $ATOP_{ij}$  на  $ASOB_j$  приходит сигнал, имеющий признак  $\pi_{ABij} = 1$ , что инициирует алгоритм выбора «резервных»  $ATOP_{js}$ . Когда  $\pi_{ABij} = 0$ , то это означает отсутствие аварии на входе  $ASOB_j$ , поэтому «резервные»  $ATOP_{js}$  не инициируются. С помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа разветвлений каждого кустового выхода технологическому предоставляется возможность динамического регулирования выполнением множества  $\{ATOP_{ij}\}$  в зависимости от операционной обстановки внутри ТПОП. Таким образом, многополюсник  $ASOB_j$  в режиме прямой имитации ожидает прихода на его входы последнего сигнала с  $ATOP_{ij}$ . При этом срабатывает «спусковая функция» агрегата, фиксируется ранний срок свершения события  $t_{plh}$  и формируется серия выходных сигналов со всех трех типов выходов агрегата. После посылки всех выходных сигналов  $ASOB_j$  ожидает прихода сигналов на его выходы в режиме инверсной имитации ВСГР. С приходом самого последнего сигнала в инверсной имитации на выходы  $ASOB_j$  формируется поздний срок свершения событий  $t_{nlh}$ , и определяется резерв свершения события  $R_{jlh}$ . Далее  $ASOB_j$  ожидает появления сигналов на его входах в режиме прямой имитации, но уже следующей  $l+1$  реализации ВСГР.

Имитация функций оборудования инициируется соответствующими запусками, выполненными агрегатами  $АТОР_{ij}$ . На агрегатах  $АОВОР_r$  отображается «захват» агрегатом  $АТОР_{ij}$  некоторого объема ресурса  $V_{rlij}$  на время  $\tau_{rlij}$ . Агрегат  $АОВИН_{r1}$  функционирует в старт-стопном режиме имитации следующим образом.

В момент запуска  $АОВИН_{r1}$  по функциям распределения формируется время  $\tau_{Coklh}$  его нахождения в рабочем состоянии (до первого отказа), которое сравнивается с требуемым временем использования его агрегатом  $АТОР_{ij}$ . Проверяется ситуация: будет ли отказ оборудования на интервале его использования ( $\tau_{rlij} > \tau_{Coklh}$ ). При выполнении этого неравенства отказ оборудования не имитируется. В случае появления отказа определяется тип отказа по вектору вероятностей отказа. При простом отказе формируется  $\tau_{Boklh}$  и устанавливается признак отсутствия аварии ( $\pi_{ABij} = 0$ ). При отказе средней сложности определяется  $\tau_{ABklh}$  и устанавливается признак наличия аварии ( $n_{prk}$ ). В обоих случаях длительность имитации равна сумме одного из этих интервалов и двойной длительности выполнения  $MTXO_{ij}$ .

При сложном отказе определяется длина последовательности процедур ( $n_{prk}$ ) и инициируется последовательный запуск цепочки агрегатов ликвидации аварии  $\{APROC_k\}$ , где  $k = \overline{1, n_{prk}}$ . Каждый из этих агрегатов обладает своим запасом ресурсов, поскольку во время аварии нельзя ожидать наличия требуемого ресурса на предприятии. По окончании выполнения всей цепочки агрегатов  $\{APROC_k\}$  завершается имитация ликвидации аварии, устанавливается признак  $\pi_{ABij} = 1$  и осуществляется возврат на выполнение алгоритма  $АТОР_{ij}$ . Далее по множеству  $\{\pi_{ABij}\}$  агрегат  $АSOB_j$  организует в дальнейшем технологическое резервирование. Кроме технологического резервирования в ИМ ТПОП предусмотрено индивидуальное резервирование оборудования, которое включается при достижении фактической наработки на отказ оборудования ИМ критического значения. До начала имитации технолог устанавливает для каждого устройства номера  $r$  порог этой наработки  $Q_{0r}$ . Фактическая наработка оборудования накапливается на индикаторе  $Ind_r$  путем добавления к накопленной сумме некоторого приращения  $\Delta Q_{0r}$ , которое зависит от времени использования устройства. С интервалом времени  $\Delta T_{из}$  значения этих индикаторов посылаются на вход  $SPRESH$ .

В ходе каждой  $l$ -й реализации в БДМ записывается вектор откликов  $\{Y_{nl}\}$  и множество статистик имитации  $\{ST_l\}$ . По окончании  $N$  реализаций блок окончания имитации (БОКИМ) также записывает остаточную информацию о содержании таблиц и справочников имитации в БДМ.

## Особенности сбора статистики имитации в имитационной модели технологических процессов опасного производства

Во время  $l$ -й реализации ВСГР с постоянным шагом  $\Delta T_{ИЗ}$  осуществляется опрос таблиц и справочников ИМ ТПОП. При этом фиксируются остаточные значения интегральных ресурсов  $r$ -го типа  $V_{0rs}$ , ( $s = \overline{1, m}$ ), которые  $SRR$  выделяет в распоряжение  $АТОР_{ij}$ , количество  $n_{rs}$  свободных исполнителей  $r$ -го типа и количество  $n_{Обrs}$  свободных устройств оборудования  $r$ -го типа, где  $s$  — номер опроса таблиц и справочников. Одновременно с этим фиксируется суммарный расход материалов ( $\Sigma(mt_r)$ ) и комплектующих изделий ( $\Sigma(ko_r)$ )  $r$ -го типа, а также расход финансовых ресурсов ( $\Sigma(c_{ij})$ ). Вся эта информация представляет собой  $s$ -ю запись статистики ( $V_{0rs}, n_{rs}, n_{Обrs}, \Sigma(mt_r), \Sigma(ko_r), \Sigma(c_{ij})$ ), которая накапливается в БДМ. По окончании  $l$ -й реализации ВСГР в файле статистики находится две группы выборок объема  $m$ : ( $\{n_{lrs}\}, \{n_{Обlrs}\}$ ) и ( $\{V_{0lrs}\}, \{\Sigma(mt_{lr})\}, \{\Sigma(ko_{lr})\}, \{\Sigma(c_{lij})\}$ ). По этим выборкам первой группы для эксперта формируются диаграммы загрузки исполнителей ( $DIAG_{r1l}$ ) и диаграммы использования оборудования ( $DIAG_{r2l}$ ). С помощью выборок второй группы эксперту формируются следующие графики изменения в модельном времени: остатков ресурсов номера  $r$  ( $GR_{1rl}$ ), расхода материалов ( $GR_{2rl}$ ) и комплектующих изделий ( $GR_{3rl}$ ) номера  $r$ , расхода финансовых средств ( $GR_{4rl}$ ). Построение этих диаграмм и графиков производится  $SPRESH$  по сигналу  $\beta_1$  (см. рисунок), поступающему от ИМ ТПОП в моменты перехода на следующую реализацию, и выдается затем эксперту в виде воздействия  $и_4$ . Анализ этих диаграмм и графиков позволяет определить ситуацию, когда в выборе количества ресурсов и состава оборудования в  $h$ -м варианте эксперт ошибся, и он может оперативным образом с помощью воздействий  $и_{51}$  и  $и_{52}$  скорректировать их состав и количество.

По окончании  $N$  реализаций по сигналу  $\beta_2$   $SPRESH$  начинает обработку статистики  $h$ -го варианта организации ИМ ТПОП следующим образом. Подпрограмма анализа информации и принятия решений (АИПР) выбирает из БДМ информацию, содержащую статистику всех  $m$  записей обеих групп. Таких записей в БДМ содержится ( $N * m$ ) групп. Подпрограммы вторичной обработки статистики ( $PP.BVST$ ) формируют для каждой  $s$ -й точки временных диаграмм и графиков соответственно выборку объема  $N$ , по которой согласно процедуре Монте-Карло определяются оценки математического ожидания и дисперсии. В итоге формируются множества средних значений для  $s$ -х точек: ( $\{\bar{n}_{lrs}\}, \{\bar{n}_{Обlrs}\}$ ) и ( $\{\bar{V}_{0lrs}\}, \{\Sigma(\bar{m}t_{lr})\}, \{\Sigma(\bar{k}o_{lr})\}, \{\Sigma(\bar{c}_{lij})\}$ ). По этим группам выборок формируются в модельном времени  $t_0$  соответственно диаграммы изменения средней загрузки исполнителей и оборудования в  $h$ -м варианте организации ТПОП. Кроме того, формируются также графики средних значений статистик использования ресурсов предприятия в  $h$ -м варианте организации ТПОП: остатка ресурсов ( $GRS_{1r}$ ), расхо-

да материалов ( $GRS_{2r}$ ), расхода комплектующих изделий ( $GRS_{3r}$ ), расхода финансовых средств ( $GRS_{4r}$ ). С помощью этих графиков и диаграмм эксперт анализирует динамику расхода ресурсов, оборудования, исполнителей и финансовых средств в модельном времени  $t_0$  и может оценить степень достаточности ресурсов для организации  $h$ -го варианта ИМ ТПОП.

Другой особенностью сбора статистики имитации в ЧМСОУ является формирование графа критических путей ( $GRKRP_h$ ) в  $h$ -м варианте ТПОП. В  $l$ -й реализации ВСГР каждый элемент критического пути  $KRP_{ih}$  представляет собой последовательность чередования статистик выполнения агрегатов ( $ASOB_i, ATOP_{ij}, ASOB_j$ ). Статистиками выполнения  $ASOB_i$  является четверка статистик ( $i, t_{pilh}, t_{nih}, R_{ilh}$ ), а статистиками  $ATOP_{ij}$  служат тройки значений ( $ij, \tau_{Bijh}, c_{ijlh}$ ). Множество перечисленных статистик в составе единой записи  $KRP_{ih}$  по окончании  $l$ -й реализации записывается в БДМ. По сигналу  $\beta_1$ , поступающему от ИМ ВСГР в  $SPRESH$ , инициируется вывод статистики  $SPRESH$  в виде воздействия  $i_8$  и предоставляется на рассмотрение эксперта. По сигналу  $\beta_2$  (см. рисунок)  $SPRESH$ , используя исходную структуру ВСГР, накладывает друг на друга значения  $KRP_{ih}$ , вызывая их из БДМ, в результате чего формируется вероятностный граф критических путей ( $GR.KRP_h$ ). При этом на выходах  $ASOB_i$  подсчитывается количество  $v_{ij}$  запусков  $ATOP_{ij}$  во всех  $N$  реализациях исходного ВСГР. Далее формируются вероятности запусков  $ATOP_{ij}$  с выходов  $ASOB_i$  графа  $GR.KRP_h$ . Таким образом, кроме четверки статистик  $ASOB_i$  ( $i, \bar{t}_{pilh}, \bar{t}_{nih}, R_{ilh} = 0$ ), на каждом выходе агрегатов формируется вектор вероятностей  $\{P_{ks}\}$  запусков  $ATOP_{ij}$ , где  $s$  — номера разветвлений выхода  $k$ . Сформированный таким способом граф  $GR.KRP_h$  в виде воздействия  $i_9$  выдается эксперту для принятия решения о наиболее вероятном критическом пути.

Третьей особенностью сбора статистики имитации ЧМСОУ является усреднение согласно процедуре Монте-Карло значений откликов модели  $\{Y_{nl}\}$  ВСГР, найденных в ходе  $l$ -й реализации ВСГР и хранящихся в БДМ. По сигналу  $\beta_2$  блок АИПР системы  $SPRESH$  определяет множество средних значений и выборочных дисперсий  $\{\bar{Y}_n, S^2 y_n\}$  по выборкам  $\{Y_{nl}\}$  объема  $N$  для каждого компонента этого вектора откликов ИМ. Важным откликом ИМ ВСГР  $\bar{Y}_{1n}$  является время реализации критического пути ( $\bar{T}_{крп} = \bar{Y}_{11}$ ). Значения этого вектора в виде воздействия  $i_6$  выдаются эксперту для анализа и принятия решений.

Четвертой особенностью сбора статистики имитации ЧМСОУ является формирование матрицы решений  $\|W_{hz}\|$ , в которой элементами являются значения обобщенного показателя  $W_{hz}$   $h$ -го варианта ИМ ТПОП при  $z$ -м варианте парамет-

ров  $MTXO_{ij}$  и характеристик надежности оборудования ТПОП. По сигналу  $\beta_2$  *SPRESH* осуществляет «свертку» вектора откликов  $\{\bar{Y}_n\}$  к скаляру  $W_{hz}$  по способу весовых коэффициентов вектора  $\{0 \leq \delta_n \leq 1\}$ . После вычисления всех элементов этой матрицы *SPRESH* в виде воздействия  $i_7$  выдает эксперту значение этой матрицы  $\|W_{hz}\|$  для принятия решений с использованием классических критериев теории принятия решений и поиска рационального варианта номера организации параметров  $\{X_{ih0}\}$  при существующем множестве характеристик запросов ресурсов и надежности оборудования предприятия  $\{v_{kpr}\}$ . Любое из решений эксперта в виде воздействий  $i_{51}$  и  $i_{52}$  передается *SPRESH*, а затем все изменения параметров и переменных модели ( $\{X_{ih0}\}$  и  $\{G_z\}$ ) используются при моделировании очередного варианта ИМ ТПОП.

### Управление процессом имитации технологических процессов опасного производства

Ранее рассматривались способы внутреннего управления имитацией ТПОП. Но в данной системе имеется внешнее управление ИМ ТПОП. Как было указано ранее, любой из индикаторов  $\{Ind_r\}$  сравнивался на близость к фактической наработке к критическому значению. Для *SPRESH* множество  $\{Ind_r\}$  становится доступным для анализа через постоянные интервалы времени  $\Delta T_{из}$ . Внутри этого интервала срабатывает одиночный переход на резервирование при достижении нижнего критического уровня наработки оборудования ТПОП на отказ. Таким способом организуется экстренный переход на одиночное резервирование (см. рисунок). При поступлении  $\{Ind_r\}$  в *SPRESH* происходит распознавание критической ситуации у оборудования ТПОП. Для более низкого уровня доверия ( $\beta = 0,8$ ) заранее рассчитаны пороговые значения наработки оборудования номера  $r$  в виде  $t$ -статистики  $\{v_{kpr}\}$ . Далее происходит покомпонентное сравнение всех  $r$ -х номеров  $\{Ind_r\}$  и  $\{v_{kpr}\}$ . Как только для некоторого номера  $r$  выполняется неравенство  $Ind_r > v_{kpr}$ , в счетчик числа устройств, находящихся в ситуации близкой к критической, добавляется единица ( $CЧКР := CЧКР + 1$ ). После проверки на близость к критическим значениям всех компонентов  $\{Ind_r\}$  анализируется значение этого счетчика. В зависимости от результата анализа, количества резервных устройств оборудования и возможности останова имитации ТПОП, принимается одно из возможных управляющих воздействий со стороны *SPRESH* на ИМ ВСГР: переход на групповое резервирование индивидуального оборудования ( $\alpha_1 = 1$ ); групповое резервирование оборудования общего пользования ( $\alpha_2 = 1$ ); общая профилактика ( $\alpha_3 = 1$ ), когда резервирование неэффективно, или невозможно; продолжение имитации из-за невозможности ее останова ( $\alpha_4 = 1$ ).

Из рисунка видно, что ИМ ВСГР, *SPRESH* и *EXPERT* непрерывно взаимодействуют друг с другом. При этом необходимо иметь в виду, что скорость реак-

ции человека значительно ниже скорости обработки управляющей информации программой *SPRESH*. Поэтому *SPRESH* совместно с БДМ выступает в роли буфера. Кроме того, эксперту информация поступает в виде, удобном для ее восприятия специалистом-технологом той предметной области, к которой относится ТПОП. В качестве входной информации он использует воздействия *SPRESH*: отображения индикаторов состояния оборудования ( $i_1$ ); отображение действий управляющей программы моделирования ( $i_2$ ); немедленный останов имитации технологом ( $i_{31}$ ); переход на групповую профилактику по командам эксперта ( $i_{32}$  и  $i_{33}$ ); включение группового резервирования ( $i_{34}$  и  $i_{35}$ ). От *SPRESH* эксперту выдается следующая информация: таблицы откликов и статистик, диаграммы и графики изменения интегральных статистик ( $i_6$ ); матрица решений  $\|W_{hz}\|$  ( $i_7$ ); критический путь  $l$ -й реализации ВСГР ( $i_8$ ); граф критических путей *GR.KRP* ( $i_9$ ). Таким образом, технология контроля за ходом ТПОП с помощью ИМ ТПОП позволяет с некоторым упреждением  $\tau_{3АП}$  моделировать будущее развитие ТПОП и, в случае необходимости, оперативно воздействовать на сам ТПОП с целью недопущения конфликтных ситуаций по ресурсам предприятия или появления аварийных ситуаций в ТПОП при опасных отказах оборудования. При этом эксперт может включить резервное оборудование на наиболее опасных участках ТПОП или же досрочно перевести оборудование на профилактику.

## Заключение

Предложенная человеко-машинная система оперативного управления ТПОП позволяет изучить на ИМ варианты реализации технологического процесса опасного производства и при этом решить ряд типовых задач проектного моделирования ТПОП: определение пропускной способности вариантов ТПОП, поиск «узких» мест в ТПОП, выделение опасных вариантов реализации ТПОП, оценка вероятности появления аварий в ТПОП, выбор рационального варианта ТПОП. Включение в цикл слежения реализаций ТПОП эксперта-технолога позволяет использовать интеллект и опыт специалиста при контроле работающего ТПОП или при проектировании вариантов ТПОП для поиска обоснованных решений. Это обстоятельство определяет высокую практическую ценность ЧМСОУ реализацией ТПОП.

1. Аронов И.З., Адлер Ю.П., Агеев А.В. и др. Обзор современных подходов к обеспечению качества и безопасности сложных систем на основе анализа видов, последствий и критичности отказов // Надежность и контроль качества. — 1996. — № 11. — С. 3–15.

2. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов // Информатика. — 2005. — № 1. — С. 25–31.

3. *Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И.* Способ моделирования агрегатами технологических процессов опасного производства // *Электрон. моделирование*. — 2005. — Т. 27. — № 6. — С. 101–109.

4. *Жогаль С.П., Максимей И.В.* Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 109 с.

5. *Максимей И.В., Серегина В.С.* Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: Учебное пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 103 с.

Поступила в редакцию 18.05.2006