

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Предлагается методика организации управления производственной системой, работающей в режиме реального времени, с помощью специализированного программно-технического комплекса имитации потенциально опасных технологических процессов производства. Рассматривается организация управления технологическими процессами с помощью комплекса имитации, содержащего в своем составе индикаторы состояния оборудования и функционирования технологического процесса, систему принятия решений, имитационную модель вероятностного сетевого графика и блок сопряжения с экспертом-технологом. Излагаются технология управления производственным процессом и методика контроля состояния индикаторов системы, которые обеспечивают дополнительные возможности прогнозирования возникновения и предотвращения аварий и катастроф техногенного характера для экспертов, работающих в области оценки безопасности функционирования промышленных предприятий и экспертов-технологов, обслуживающих схемы слежения за безопасностью функционирования управляемых производственных систем.

Введение

В качестве объекта управления в настоящей работе рассматривается технологический процесс опасного производства (ТПОП), который имеет малую скорость выполнения технологических операций, взаимосвязанных друг с другом в ходе его реализации. Структура ТПОП определяется с помощью вероятностного сетевого графика (ВСГР) [1].

Известны аналитические модели технологических процессов производства, представленные в виде сетевых графиков (СГР), которые используются только в тех случаях, когда связи между технологическими операциями и время реализации этих операций являются детерминированными [2, 3]. При этом сетевой график компонуется из двух типов элементов: событий SOB_i и SOB_j , где $i, j = \overline{1, N}$ и технологических операций $(TXO_{ij}, i, j = \overline{1, N})$, связывающих данные события. В некоторых случаях для анализа реализации технологических процессов применяются стохастические сети управления или теория расписаний [4], но при этом налагаются множество ограничений на их использование. В обоих случаях состав параметров TXO_{ij} ограничивается только запросами времени выполнения операций (τ_{ij}) ,

которое является детерминированной величиной и обычно представляет собой среднюю или нормативную характеристику времени их выполнения. Как только состав параметров расширяется, а сами параметры становятся случайными величинами, задаваемыми соответствующими функциями распределения $(F_{ij}(\tau))$, задача анализа динамики реализации ТПОП существенно усложняется. В таких случаях СГР неприменимы как из-за вероятностного характера параллельно-последовательного следования технологических операций TXO_{ij} , так и из-за вероятностных значений запросов ресурсов времени и стоимости выполнения технологических операций в составе ТПОП. В работе [5] для исследования динамики развития технологического процесса опасного производства использовалась имитационная модель (ИМ) ВСГР, которая создавалась с помощью системы автоматизации имитационного моделирования, основанной на агрегатном способе имитации [6].

В последние годы во многих приложениях оптимизационных моделей, позволяющих исследовать реальные процессы для принятия решений в условиях неопределенности и риска, растет интерес к динамическим постановкам задач. Подобный интерес наблюдается как при исследовании сложных технических систем, так

и при анализе функционирования производственных систем, в особенности, когда реализация их производственной деятельности может представлять реальную угрозу или нести в себе потенциальную техногенную опасность. Особый интерес при этом, как правило, привлекают случаи, когда существующий математический аппарат перестает быть достаточно эффективным. Такая ситуация имела место при исследовании сложных технических систем, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом (ДУЗА) [7, 8].

Этот класс уравнений, как известно, является достаточно универсальным инструментом моделирования управляемых технологических процессов, с помощью которого хорошо отражаются эффекты «транспортного» запаздывания сигналов и силовых воздействий. При этом теоретическое исследование таких уравнений и, в частности, оптимального управления моделируемыми с их помощью процессами, отставало от назревших потребностей в практических задачах управления и того уровня научных результатов, какой был достигнут в теории управления с моделями в классе обыкновенных дифференциальных уравнений. Последнее объясняется прежде всего сложностями разработки функционального аппарата представления и анализа решений ДУЗА. В данном вопросе нами для исследования особых управлений в динамических системах разработан конструктивный аппарат исследования таких экстремалей в нормальных системах дифференциальных уравнений с непрерывно и равномерно (во времени) распределенным запаздыванием по аргументу переменной состояния и предложен метод спуска по так называемым «внутренним» вариациям для задачи поиска экстремалей [9], который явился новым конструктивным средством в указанном классе задач.

Необходимо, однако, иметь в виду, что реальные динамические системы функционируют в условиях воздействия на них неизвестных возмущений, а их аналитическое представление не всегда позволяет получить нужное решение в замкнутой

форме. Описанное относится к динамике функционирования технологических процессов опасного производства, в силу чего в сфере производственной деятельности нередко случаются чрезвычайные ситуации (аварии), которые носят, так называемый, техногенный характер. По данной причине, вместе с задачами исследования динамики и анализа результатов реализации технологического процесса опасного производства, возникает проблема управления ТПОП с целью обеспечения заданного уровня безопасности его функционирования [10], что связано с разработкой систем управления надежностью функционирования технологическим процессом опасного производства. Отметим, что вопросы имитационного моделирования технологии управления производством и методики оперативного управления технологическими процессами опасного производства, связанные с проблемой обеспечения заданного уровня безопасности функционирования ТПОП, были рассмотрены нами в [11, 12]. С использованием системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного типа [13], подробно изложена также методика контроля и принятия решений при имитационном моделировании потенциально техногенно опасных производственных систем [14], а методика, лежащая в основе имитационного моделирования систем управления таким производством, рассмотрена в [15].

Таким образом, с целью повышения надежности потенциально техногенно опасных производственных систем и обеспечения требуемого уровня безопасности производства, возникла необходимость расширения класса решаемых задач для дискретных и непрерывных управляемых динамических систем на задачи управления технологическим процессом производства с изменяющейся структурой в процессе его функционирования, в условиях вероятностного характера параметров производственных технологических процессов опасного производства. Отсутствие эффективных средств исследования потенциально техногенно опасных технологических процессов производства, а также средств разработки систем управления на-

дежностью ТПОП, обусловили новизну предлагаемого подхода и определили актуальность выполнения данной разработки и написания настоящей работы.

Цель данной работы – реализация управления технологическим процессом опасного производства для снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в процессе его функционирования с помощью программно-технологического комплекса управления. В работе предлагается реализация методики управления работающим в режиме реального времени потенциально техногенно опасным производственным процессом на основе системы автоматизации моделирования агрегатного типа [13] с помощью специализированного человеко-машинного комплекса имитации, состоящего из четырех асинхронно работающих компонентов (рисунок):

- человека-эксперта (*EXPERT*) с низкой скоростью реакции на события, происходящие в ТПОП в процессе его функционирования;

- относительно медленно (по сравнению со скоростью человеческой реакции) функционирующей в режиме реального времени производственной системы (ТПОП);

- программной системы (*SPRESH*) управления, контроля функционирования оборудования и принятия решений, которая должна упреждать возможные «нештатные» ситуации на основе реализованных алгоритмов, указаний эксперта, результатов предыдущей имитации и анализа операционной обстановки в ТПОП;

- имитационной модели (ИМ ВСГР), которая позволяет прогнозировать будущую ситуацию в ТПОП.

В основу решения задачи повышения надежности функционирования потенциально техногенно опасных производственных систем и обеспечения требуемого уровня безопасности производства, в данной работе положено сочетание идей метода имитационного моделирования [16], методики сетевого планирования [17] и процедур метода Монте-Карло [18] на базе создания программно-технологического

комплекса управления надежностью функционирования оборудования.

1. Состав параметров управления, статистик и откликов имитации технологического процесса опасного производства

Неадекватность реальным ТПОП получаемых при этом математических моделей обусловила необходимость разработки нового метода, программных средств автоматизации его реализации и технологии их применения в соответствующих предметных областях исследования производства, а также при проектном моделировании вероятностных технологических процессов производства. При этом часто возникает задача стабилизации уровня надежности проектируемой производственной системы в соответствии с некоторым заданным критерием качества ее функционирования.

Решение данной задачи на современном этапе развития производства имеет серьезную техническую поддержку в образе сложных технических систем, которые включают в свой состав измерительные комплексы, технологическое оборудование и обслуживающий персонал, и является актуальным для специалистов, работающих в области оценки безопасности функционирования промышленных предприятий и проектирования высоконадежных производственных систем. Рассматриваемая управляемая производственная система имеет в своем составе оборудование, у которого могут возникать приводящие к авариям отказы функционирования и является составной частью программно-технологического комплекса управления надежностью функционирования оборудования.

Функциональное взаимодействие компонентов комплекса имитации и работающего в режиме реального времени технологического процесса осуществляется на основе непрерывного мониторинга оборудования и параметров его состояния с помощью регистров-индикаторов и технических средств сопряжения. Комплекс имитации для осуществления оперативного

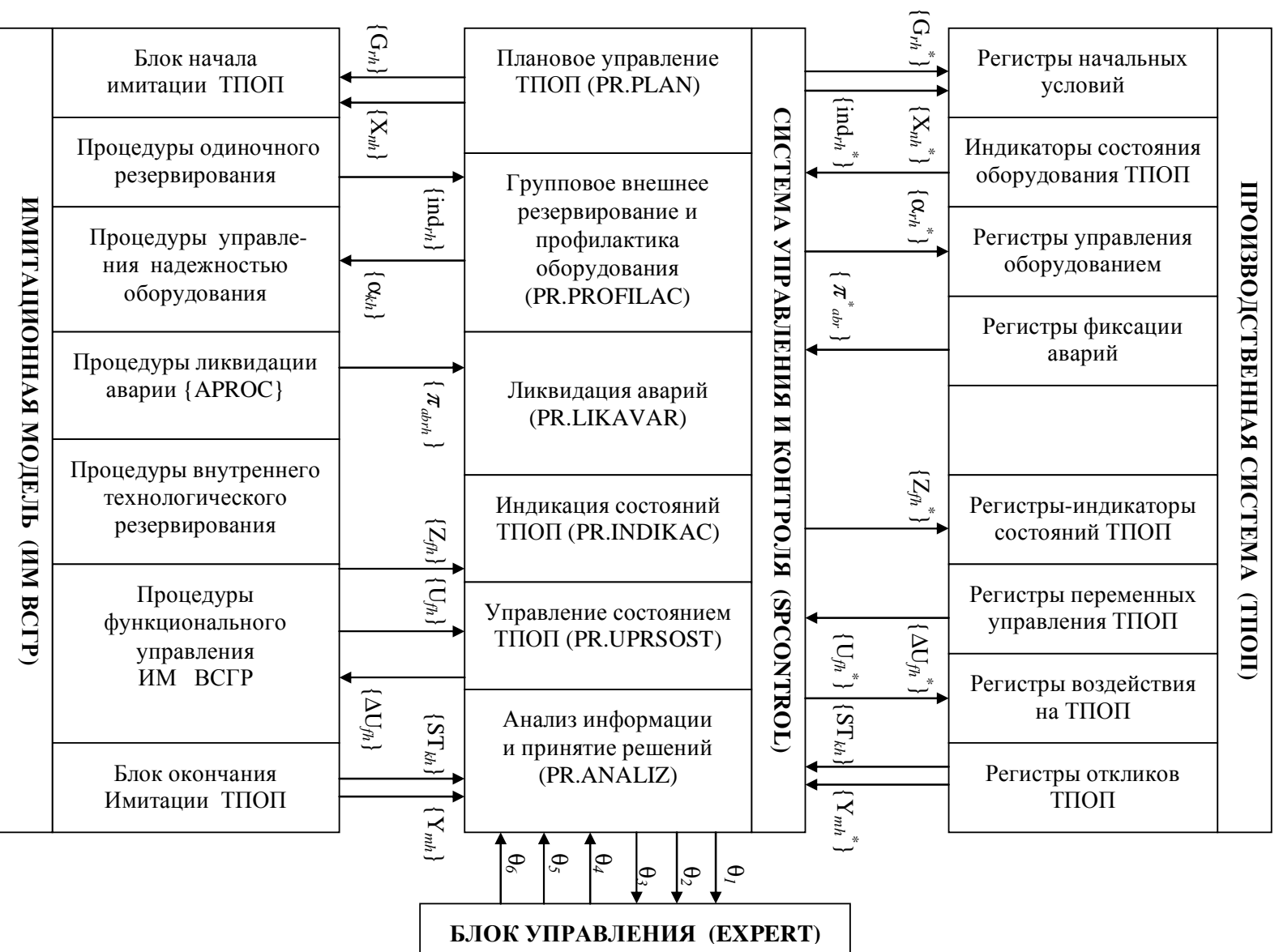


Рисунок. Структура комплекса имитации и управления ТПОП

управления технологическим процессом производства, концептуальная схема которого показана на рисунке, состоит из следующих компонентов:

– имитационной модели технологического процесса опасного производства, структура которого определяется с помощью вероятностного сетевого графика;

– специализированной системы принятия решений *SPRESH*, осуществляющей анализ и контроль планового и «нештатного» развития операционной обстановки в имитационной модели и технологическом процессе производства;

– блока управления *EXPERT*, выполняющего функции посредника между системой принятия решений и экспертом, физически представляющим собой эксперта-технолога или группу экспертов высокой квалификации соответствующей предметной области.

Оперативное управление основными компонентами данной системы реализуется с помощью следующих глобальных переменных комплекса управления:

– надежностных характеристик G_{rh}^* функционирования оборудования r -го номера в h -м варианте реализации технологического процесса производства;

– индикаторов ind_{rh}^* текущего состояния r -го устройства оборудования и h -го варианта реализации, в которых накапливается суммарное время наработки устройств на отказ соответствующих устройств технологического процесса;

– указателей π_{abrh}^* появления аварий на r -х устройствах оборудования, влияющих на конфигурацию соответствующего варианта моделируемого технологического процесса производства;

– текущих значений U_{fh}^* переменных управления технологическим процессом;

– значений корректирующих воздействий ΔU_{fh}^* на переменные управления;

– параметров функционального состояния Z_{fh}^* технологического процесса, зависящих от значений применяемых управляющих воздействий ΔU_{fh}^* ;

– значений статистик ST_{kh}^* , $k = \overline{1, N}$, характеризующих динамику развития h -го варианта контролируемого технологического процесса производства;

– значений Y_{mh}^* m -го отклика h -го варианта управляемого технологического процесса.

При этом специализированная система принятия решений *SPRESH* посылает на оборудование и регистры управления технологическим процессом три типа воздействий:

– корректирующие воздействия ΔU_{fh}^* на переменные управления технологическим процессом производства;

– сигналы α_{rh}^* переключения на резервное устройство r -го устройства оборудования или сигналы перевода соответствующих устройств на общую профилактику;

– модифицированные значения X_{nh}^* , где $n = \overline{1, N_h}$, n -го параметра описания процесса в h -м варианте его реализации.

С имитационной моделью вероятностного сетевого графика, который является аналогом реального технологического процесса производства, система принятия решений *SPRESH* связана аналогичным набором переменных, параметров управления и индикаторов. На входы и выходы системы *SPRESH* через соответствующие средства сопряжения от имитационной модели поступают множества индикаторов, глобальных переменных и параметров моделирования $\{G_{rh}\}$, $\{ind_{rh}\}$, $\{\pi_{abrh}\}$, $\{Z_{fh}\}$, $\{U_{fh}\}$, $\{ST_{kh}\}$, $\{Y_{mh}\}$, которые имеют тот же смысл, что и вышерассмотренные.

От системы *SPRESH* на имитационную модель вероятностного сетевого графика поступают корректирующие воздействия ΔU_{fh} на переменные управления технологическим процессом, сигналы α_{rh} переключения оборудования на резервное или перевода соответствующих устройств на общую профилактику, а также значения X_{nh} , где $n = \overline{1, N_h}$, n -го параметра описания процесса в h -м варианте его реализации.

Для связи системы *SPRESH* с блоком управления *EXPERT* используется множество воздействий $\{\theta_{qi}\}$, где $q_i = \overline{1, l}$, с одной стороны понятных человеку-эксперту, а с другой стороны преобразующихся системой *SPRESH* во внутрен-

нее представление для использования в имитационной модели вероятностного сетевого графика. Для обеспечения этой функции в составе *SPRESH* имеется системный модуль связи с блоком управления *EXPERT*, который является переводчиком информации между системой *SPRESH*, блоком управления *EXPERT*, имитационной моделью ВСГР и реальным технологическим процессом производства.

Вышеперечисленные глобальные переменные комплекса имитации, управляющие воздействия и индикаторы формируются специальными схемами контроля за функционированием оборудования и фиксируются в базе данных имитационной модели.

2. Состав и структура комплекса управления технологических процессов опасного производства

Рассмотрим более детально состав и структуру каждого компонента человеко-машинного комплекса имитации, представленного на рисунке. Система *SPRESH* состоит из следующего набора процедур: планового управления технологическим процессом производства (*PR.PLAN*); внешнего резервирования оборудования технологического процесса и его профилактики (*PR.PROFILAC*); ликвидации аварий (*PR.LIKAVAR*); индикации текущих состояний процесса (*PR.INDIKAC*); управления состоянием технологического процесса (*PR.UPRSOST*); анализа информации и принятия решений (*PR.ANALIZ*). При этом система *SPRESH* функционирует в двух режимах: оперативного управления медленно развивающимся в режиме реального времени технологическим процессом (режим 1), имитационного моделирования развития процесса с помощью имитационной модели ВСГР (режим 2). Рассмотрим динамику управления объектом моделирования в каждом из режимов функционирования системы *SPRESH*.

В режиме 1 с помощью процедуры *PR.PLAN* на регистры начальных условий процесса посылаются значения начальных объёмов ресурсов (X_{mh}), которые затем

используются в ходе реализации $MTXO_{ij}$ в составе технологического процесса, а также значения характеристик состава резервного оборудования (G_{rh}^*), включаемого в нужные моменты времени в процессе реализации производственного цикла для обеспечения надёжности функционирования оборудования. В процессе наблюдения за состоянием оборудования, с помощью процедуры *PR.PROFILAC* по значениям индикаторов состояния оборудования $\{ind_{rh}^*\}$, поступающим с постоянным интервалом τ_{iz} с регистров-индикаторов оборудования в систему *SPRESH*, организуется внешнее резервирование и перевод оборудования на профилактику. Для тех случаев, когда аварии на оборудовании избежать не удалось, с регистра фиксации аварий в систему *SPRESH* поступает признак $\pi_{abr} = 1$ аварии r -го устройства оборудования, который инициирует работу процедуры ликвидации аварий *PR.LIKAVAR*. Данная процедура организует внешнюю ликвидацию аварии с помощью последовательности процедур $\{APROC_k, k = \overline{1, l}\}$ ликвидации поставарийной обстановки в технологическом цикле производства. Кроме технологического регулирования работы оборудования, в системе *SPRESH* организовано постоянное наблюдение за функционированием $MTXO_{ij}$ реального производственного цикла. С помощью процедуры *PR.INDIKAC* через интервалы времени τ_{iz} с регистров-индикаторов состояний технологического процесса производства в систему *SPRESH* поступают значения множества состояний $\{Z_f^*\}$. Осуществляется проверка выхода этих значений за допустимые границы их изменения (Z_f^-, Z_f^+), которые ранее были определены в ходе имитационного эксперимента (ИЭ) с помощью комплекса имитации. При выходе $z_f^* \in \{Z_f^*\}$ за пределы допустимого диапазона значений инициируется процедура *PR.UPRSOST* управления состоянием процесса производства. Данная процедура формирует значения управляющих переменных $\{U_{fh}^*\}$ и набор кор-

ректирующих воздействий (ΔU_{fh}^*), поступающих на соответствующие регистры управления процессом. По завершению производственного цикла с регистров откликов реального технологического процесса в систему *SPRESH* посылается множество статистик реализации $\{ST_{kh}^*\}$ и откликов $\{Y_{mh}^*\}$ реального объекта управления. Значения данных статистик и откликов процедура *PR.ANALIZ* оперативно анализирует по информации об использовании ресурсов и функционировании оборудования. Процедура *PR.ANALIZ* корректирует таблицы *SPRESH*, используемые остальными процедурами при управлении реальным объектом в следующем цикле контроля за его реализацией.

В режиме 2 система *SPRESH* взаимодействует с имитационной моделью ВСГР. Процедура *PR.PLAN* посылает на блок начала имитации значения $\{X_{nh}\}$ и $\{G_{rh}\}$. С тем же интервалом наблюдения τ_{iz} в систему *SPRESH* от модели поступают множества значений индикаторов состояния оборудования $\{ind_{rh}\}$. В этом режиме *SPRESH* организует операции внешнего резервирования оборудования и перевод устройств на профилактику с помощью процедуры *PR.PROFILAK*. При появлении в имитационной модели ВСГР аварийной ситуации в систему *SPRESH* с помощью указателя π_{abrh} поступает соответствующий признак аварии. Для управления функционированием имитационной моделью ВСГР через интервалы τ_{iz} на *SPRESH* поступает множество индикаторов состояний $\{Z_{fh}\}$ и переменных управления $\{U_{fh}\}$. При выходе компонентов $\{Z_{fh}\}$ за допустимые границы их изменения (Z_f^-, Z_f^+) инициируется процедура *PR.UPRSOST*. Данная процедура формирует значения управляющих переменных $\{U_{fh}\}$ и набор корректирующих воздействий $\{\Delta U_{fh}\}$, поступающих на имитационную модель ВСГР. При завершении технологического процесса от блока окончания имитации модели в *SPRESH* поступают

множества статистик $\{ST_{kh}\}$ и откликов $\{Y_{mh}\}$ реализации имитационной модели. После поступления в *SPRESH* множеств значений $\{ST_{kh}\}$ и $\{Y_{mh}\}$, процедура *PR.ANALIZ* анализирует их содержимое, используя для принятия решения соответствующий критерий качества, и выбирает номер оптимального варианта h_0 организации имитационной модели ВСГР, изменяя при этом содержимое таблиц системы *SPRESH* и активизируя работу процедуры *PR.PLAN*. Более подробное описание механизма управления технологическим процессом в случае возникновения «нештатной» ситуации с помощью системы *SPRESH* приводится в [9].

Имитационная модель ВСГР представляет собой совокупность следующих агрегатов-имитаторов: выполнения микро-технологических операций $MTXO_{ij}$ ($ATOP_{ij}$), свершения событий в ВСГР ($ASOB_j$), функционирования r -го устройства оборудования индивидуального и общего пользования ($AOBIN_r$ и $AOBOP_r$), выполнения процедур ликвидации аварий ($APROC_k$). Агрегаты $ATOP_{ij}$ имитируют технологию выполнения $MTXO_{ij}$ в составе технологического процесса производства, а агрегаты-имитаторы $AOBIN_r$, $AOBOP_r$ и множества агрегатов $\{APROC_k\}$ используются для отображения его реализации. Агрегаты $ASOB_j$ являются многополюсниками с различным числом входов и выходов и используются для имитации свершения событий в ВСГР и запуска соответствующих агрегатов $ATOP_{ij}$. Рассмотрим особенности построения агрегатов имитационной модели ВСГР.

Агрегат $ATOP_{ij}$ представляет собой четырёхполюсник, имитирующий выполнение $MTXO_{ij}$ в ВСГР и функционирует в двух режимах: прямой и инверсной имитации. В режиме прямой имитации модельное время t_0 возрастает от нуля до момента окончания имитации T_{sim} , а в режиме инверсной имитации t_0 уменьшается от

T_{sim} до нуля. Оба режима имитации используются следующим образом.

В режиме прямой имитации определяются ранние сроки t_{pil} свершения событий в l -ой реализации ВСГР, а в режиме инверсной имитации определяются поздние сроки t_{nil} свершения событий. При поступлении действительных управляющих сигналов (Sgd) от агрегата $ASOB_i$ на агрегат $ATOP_{ij}$, используя соответствующие функции распределения и алгоритмы реализации единичных жребиев [10], разыгрываются значения запросов агрегатом $ATOP_{ij}$ требуемых им ресурсов в l -ой реализации ВСГР: $F_{1ij}(\tau_{ijl})$, $F_{2ij}(c_{ijl})$, $F_{3ij}(V_{rijl})$, $F_{4ij}(mt_{rij})$, $F_{5ij}(ko_{rij})$, где τ_{ijl} – время имитации агрегатом $ATOP_{ij}$ микро-технологической операции с индексом ij в l -й реализации ВСГР; c_{ijl} – стоимость выполнения технологической операции; V_{rijl} – размер ресурса общего пользования r -го номера; а mt_{rij} и ko_{rij} – количество материалов и комплектующих деталей номера r соответственно.

Кроме того, каждый агрегат-имитатор $ATOP_{ij}$ для своей реализации требует выделения в его распоряжение списков индивидуальных ресурсов, оборудования и исполнителей ($SP.INR_{ij}$, $SP.OBR_{ij}$, $SP.ISP_{ij}$). Все перечисленные ресурсы выделяются агрегату $ATOP_{ij}$ системой распределения ресурсов на время имитации $MTXO_{ij}$. Если при имитации $ATOP_{ij}$ на выделенном ему оборудовании возникают опасные отказы, приводящие к возникновению аварии, то интервал времени выполнения агрегата $ATOP_{ij}$ увеличивается до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы на данном оборудовании. При этом, с помощью алгоритма реализации единичных жребиев второго типа [10], по вероятности p_{avr} моделируется ситуация «Произошла авария». Для ликвидации обычной аварии в систему $SPRESH$ посылается признак $\pi_{abr1}=1$, а для ликвидации сложной аварии

используется последовательность процедур $\{APROC_k\}$ в составе $SPRESH$ (внешнее технологическое управление с помощью $SPRESH$).

При обычной аварии в имитационной модели ВСГР организовано внутреннее технологическое управление ликвидацией аварии следующим образом. Каждый из агрегатов $APROC_k$ обладает своим оборудованием, составом исполнителей и действует по утверждённой («штатной») инструкции ликвидации аварии. Длительность реализации $APROC_k$ – случайная величина, и для l -й реализации его значение формируется по функции распределения $\Phi_k(\tau_{pr})$. После завершения имитации выполнения последовательности $\{APROC_k\}$ моделирование выполнения операции на оборудовании продолжается с прерванного места. При этом формируется признак того, что во времени выполнения агрегата $ATOP_{ij}$ произошла авария ($\pi_{ak}=1$), а время выполнения агрегата $ATOP_{ij}$ увеличивается на величину интервала времени, равную времени выполнения всей последовательности агрегатов $\{APROC_k\}$ ликвидации аварии. Далее $ATOP_{ij}$ формирует действительный сигнал Sgd , поступающий на r -й вход $ASOB_j$, после чего агрегат $ATOP_{ij}$ переходит в режим ожидания сигнала в инверсном режиме от агрегата $ASOB_j$. В инверсном режиме имитации $ATOP_{ij}$ моделирует выполнение $MTXO_{ij}$ длительностью τ_{vijl} . По окончании инверсной имитации на выходе $ATOP_{ij}$ появляется новый Sgd , который поступает на соответствующий выход агрегата $ASOB_i$, и агрегат $ATOP_{ij}$ ожидает прихода действительного сигнала в режиме прямой имитации с k -го выхода $ASOB_i$, но уже в $(l+1)$ -й реализации ВСГР.

Агрегат $ASOB_j$ может иметь четыре типа выходов, которые являются «кустовыми» с различным числом разветвлений посылки Sgd . С выходов первого типа формируются только действительные сигналы Sgd , образуя таким образом «штат-

ную» связь между $MTXO_{ij}$ в ВСГР. С выходов второго типа, называемых вероятностными, только по одному из разветвлений посылается действительный сигнал Sgd , и по остальным выходам формируются фиктивные сигналы (Sgf), которые обходят алгоритм выполнения $ATOP_{js}$, поступая непосредственно на вход $ASOB_s$. Для каждого разветвления задаётся вероятность p_{js} формирования сигнала Sgd . Поэтому кустовой выход второго типа с k -м номером дополнительно описывается с помощью вектора P_{kjs} размерности, равной числу разветвлений на выходе агрегата $ASOB_j$ с номером k .

Остановимся на третьем типе кустовых выходов, который называется резервным. С помощью этого типа реализуется технологическое резервирование в имитационной модели ВСГР. Действительные сигналы Sgd формируются на этих выходах только в случае, когда на одном из входов агрегата $ASOB_j$ появляется признак «была авария» ($\pi_{ab} = 1$). Если на всех входах $ASOB_j$ $\pi_{ab} = 0$, то это означает, что аварии во время выполнения предшествующих $ATOP_{ij}$ не было, поэтому с выходов первого типа активизируются только «штатные» $ATOP_{js}$, которые были предусмотрены для реализации данного технологического процесса в «штатном» режиме.

Если на один из входов $ASOB_j$ приходят сигналы от $ATOP_{ij}$, во время выполнения которых была авария, то это означает необходимость активизации кустового выхода третьего типа. Механизм формирования Sgd с этих выходов основан на использовании булевой матрицы $\|\gamma_m\|$, составленной экспертной группой для блока управления *EXPERT* до начала имитации. Наличие единицы на пересечении r -й строки (входа) с n -м столбцом (разветвлением выхода третьего типа) в этой матрице означает необходимость включения резервных $ATOP_{jn}$ (на n -х разветвлениях выходов в том случае, когда $\pi_{ab} = 1$). С по-

мощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся регуляторами подключения резервных $ATOP_{js}$, если на входы $ASOB_j$ поступают сигналы от предшествующих $ATOP_{ij}$, во время выполнения которых на используемом ими оборудовании происходили аварии.

Третья составляющая комплекс имитации – блок управления *EXPERT*, который взаимодействует только с системой *SPRESH* (см. рисунок) в двух режимах: получения информации от системы *SPRESH* и записи управляющей информации для *SPRESH*, которая формируется только в тех случаях, когда необходимо экстренное вмешательство эксперта-технолога в режим имитации ТПП. С помощью управляющих воздействий $\theta_1 \div \theta_3$ система *SPRESH* информирует блок управления *EXPERT* о ситуации в имитационной модели ВСГР. На основе анализа таблиц, графиков и временных диаграмм использования оборудования блок управления *EXPERT* формирует управляющие воздействия $\theta_4 \div \theta_6$ для системы *SPRESH*, которые необходимы для оперативной корректировки процессов в имитационной модели ВСГР.

При переходе порога наработки хотя бы одного из устройств оборудования ИМ ИТПП посылает в *SPRESH* множество индикаторов $\{ind_r\}$. Это служит сигналом для анализа РР.ОРЕХ операционной обстановки ИМ. Проверяется близость к пороговому значению наработки всех устройств оборудования, формируются следующие типы воздействий: α_1 – групповой переход на резервирование устройств, у которых наработка близка к критической; α_2 – переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств; α_3 – формируется в том числе, если прервать имитацию ИТПП нельзя, но возможно допустить аварию в ИТПП; α_4 – формируется в случае, когда состояние оборудования настолько плохое, что всеобщая профилактика неэффективна, и принимается решение о досрочном завершении имитации h -го варианта ИМ,

поскольку появление аварии для данного ИТПП недопустимо.

PP.ANALEX использует статистику имитации $\{ST_k\}$ и множество откликов ИЭ $\{Y_{0j}\}$. Откликами Y_{0j} являются усредненные по числу реализаций N их интегральные значения для h -го варианта ИТПП: $T_{kp\sum h}$ – критическое время выполнения; $C_{0\sum h}$ – стоимость; $mt_{0r\sum h}$ – интегральный расход материалов и комплектующих изделий; $V_{\sum rh}$ – количество использований ресурсов r -го номера; $C_{\sum ABh}$ – суммарная стоимость ликвидации аварий; $T_{0Пph}$ – общие потери на профилактику.

Все перечисленные интегральные отклики составляют многомерный вектор откликов V_{0Th} варианта h ИТПП. Для дальнейшего анализа ИТПП осуществляется нормировка компонентов этого вектора максимальным его значением во всех h вариантах исследования ИТПП. После нормировки проводится «свертка» вектора к скалярному показателю W_h с помощью способа весовых коэффициентов важности откликов номера j для эксперта-технолога. В качестве h -х вариантов организации ИТПП используется множество начальных значений вектора ресурсов $\{X_{0ih}\}$.

Каждая из составляющих данная вектора может меняться на различных уровнях. Поэтому количество вариантов постановки имитационного эксперимента с ИМ определяется стратегией изменения каждого уровня компонента этого вектора. Эксперт с помощью воздействия θ_5 инициирует работу PP.ANALEX и последующий запуск ИМ для каждого h -го варианта ИТПП. Минимальное значение обобщенного показателя $W_{h\min}$ по всему множеству вариантов и номер h_0 , соответствующий этому минимуму, и будет решением задачи исследования.

Важная статистика реализации ИМ – граф критических путей ($GRKRP_h$), который получен после наложения друг на друга критических путей KRP_{lh} . PP.ANALEX в виде сообщения θ_4 выдает

следующие графики расходов: ресурс r -го типа $Z_{1rh}(t_0)$, финансовые затраты $Z_{2rh}(t_0)$. Кроме того, формируются временные диаграммы использования оборудования и исполнителей ($DIAG_{rh}$). Оперативная статистика реализации ИТПП в виде сообщения θ_4 предоставляется эксперту, который принимает решение обычно на основе классических критериев принятия решений. При этом он формирует управляющие воздействия ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и θ_5), которые через SPRESH обеспечивают следующие возможности: досрочный останов l -й реализации ВСР на ИМ; перевод всех устройств оборудования на профилактику; оперативное изменение характеристик надежности функционирования оборудования.

3. Особенности технологического и функционального взаимодействия компонентов комплекса управления надежностью функционирования оборудования

В предыдущем разделе подробно описан алгоритм функционирования кустовых выходов третьего типа в качестве регуляторов подключения резервных агрегатов технологических операций $ATOP_{js}$, если на входы агрегатов событий $ASOB_j$ поступают сигналы от $ATOP_{ij}$, во время выполнения которых на используемом ими оборудовании происходили аварии. Применяя таким образом механизм формирования действительных сигналов с выходов поставарийных агрегатов событий с помощью булевой матрицы $\|\gamma_m\|$, заложенной в систему принятия решений, на основе управляющих воздействий блока управления $EXPERT$ в комплексе имитации реализуется возможность технологического регулирования выполнения резервных агрегатов $ATOP_{ij}$, тем самым обеспечивая технологическое управление надёжностью закреплённого оборудования, что гарантирует заданный уровень безопасности функционирования моделируемого технологического процесса производства.

В имитационной модели ВСГР предусмотрено также автоматическое индивидуальное резервирование оборудования, которое включается при достижении фактической наработки имитатора оборудования критического значения наработки на отказ. До начала имитации эксперт-технолог устанавливает для каждого устройства порог $Q_{0,r}$ этой наработки. Фактическая наработка Q_{fr} накапливается на индикаторе ind_{rh} путем добавления к накопленной сумме некоторого приращения ΔQ_{fr} при каждом использовании r -го устройства. С интервалом τ_{ic} значения $\{ind_{rh}\}$ посылаются в систему принятия решений *SPRESH* для обеспечения внешнего управления имитационной моделью ВСГР.

Следует отметить, что полученная с помощью системы автоматизации имитационного моделирования [11] имитационная модель вероятностного сетевого графика для исследования динамики развития технологического процесса производства, позволяет дополнительно организовать не только технологическое, но и функциональное управление медленно развивающимся технологическим процессом с помощью предложенного комплекса имитации.

Остановимся на вопросах технологического и функционального управления имитационной моделью вероятностного сетевого график. Рассмотрим особенности организации каждого вида управления.

Технологическое управление надёжностью функционирования оборудования с помощью комплекса имитации организовано несколькими способами: во-первых, системой *SPRESH* организуется внешнее управление оборудованием с помощью группового резервирования оборудования или путём перевода на профилактику всего оборудования ТПП; во-вторых, с помощью имитационной модели ВСГР обеспечивается внутреннее управление оборудованием путем организации одностороннего резервирования устройств или путём переключения отдельных имитаторов устройств оборудования на режим профилактики с приостановкой имитации на

время τ_{pr} выполнения профилактических работ.

Одним из способов имитации внутреннего управления оборудованием в имитационной модели ВСГР является розыгрыш жребия появления аварии r -го оборудования и имитации ее ликвидации множеством агрегатов $\{APROC_k\}$. Для данной цели агрегаты-имитаторы устройств модели имитируют два состояния: работоспособное (S_1) и восстановления работоспособности (S_2). Имеет место циклический переход этих агрегатов из состояния S_1 в состояние S_2 и обратно. Длительности нахождения агрегата номера r в этих состояниях являются случайными величинами, определяемыми по функциям их распределения $\Phi_{1r}(\tau_{BOrl})$ и $\Phi_{2r}(\tau_{VOrl})$, где τ_{BOrl} и τ_{VOrl} – длительности имитации использования оборудования, находящегося в состояниях S_1 и S_2 , в l -й реализации ВСГР. Процесс имитации этих агрегатов продолжается только в режиме прямой имитации до достижения номера реализации (согласно процедуре Монте-Карло) равного N . При срабатывании с вероятностью p_{abir} жребия [11] «Произошла авария», проверяется тип этой аварии. Если авария оказалась сложной, то в систему *SPRESH* посылается признак $\pi_{abr}=1$, по которому инициируется режим ликвидации аварии с помощью внешней цепочки агрегатов $\{APROC_k\}$. Когда происходит обычная авария, то внутреннюю ликвидацию аварии с помощью другой цепочки процедур $\{APROC_k\}$ организует уже имитационная модель ВСГР аналогичным образом.

Особенностью организации в имитационной модели функций контроля взаимосвязанных $MTXO_{ij}$ является использование второй части алгоритма имитации самих $ATOP_{ij}$. Для каждого $ATOP_{ij}$ она представляет собой некоторую процедуру его информационного взаимодействия с другими агрегатами-имитаторами. Процедуры информационного взаимодействия агрегатов $ATOP_{ij}$ связаны через вектор переменных функциональной связи

$B_{ij} = (b_{1j}, \dots, b_{kj})$. Алгоритмы агрегатов $ATOP_{ij}$ читают и модифицируют значения компонентов этого вектора, имитируя функции информационной связи компонентов имитационной модели ВСГР. Второй группой переменных, обеспечивающих информационное взаимодействие агрегатов, является вектор переменных управления имитационной модели $U_{ij} = (U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{kj})$, который модифицируется с помощью специально выделенных для этой цели агрегатов $ATOP_{ij}$, обеспечивая частичную корректировку компонентов вектора состояний Z_{fn} путём увеличения или уменьшения текущих значений U_{fn} соответственно на величины ΔU_{fn}^+ или ΔU_{fn}^- . Третьей группой переменных взаимодействия является вектор параметров функционального состояния технологического процесса $Z_{ij} = (Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{fj})$. Алгоритмы $ATOP_{ij}$ в режиме контроля за функционированием $MTXO_{ij}$ формируют значения $\{Z_{fn}\}$ компонентов этого вектора, которые используются для контроля состояний и имеют допустимые пределы изменения, задаваемые в таблице $TGZ = (Z_{fn}^-, Z_{fn}^+)$, где Z_{fn}^-, Z_{fn}^+ – соответственно верхние и нижние границы диапазона изменения. Допустимые границы диапазона изменения в таблице TGZ указывает эксперт-технолог. В процессе анализа выхода значений контролируемых параметров за допустимые границы диапазона агрегат $ATOP_{ij}$ циклически вырабатывает значения компонентов вектора модификации состояний, которые равны $\pi_f = +1$, когда $Z_{fn} < Z_{fn}^-$ и $\pi_f = -1$, когда $Z_{fn} > Z_{fn}^+$. После формирования компонентов вектора значений корректирующих воздействий ΔU_{fn} , последний запоминается в «теле» сигнала Sgd и затем поступает на агрегат $ASOB_j$. Функциональная часть алгоритма агрегата $ATOP_{ij}$ при этом завершает свою работу, и далее выполняется алгоритм тех-

нологической части $ATOP_{ij}$, который был рассмотрен ранее.

В агрегате $ASOB_j$ содержимое «тела» Sgd используется при обслуживании выходов четвертого типа следующим образом. Перед началом имитации эксперт-технолог для каждого агрегата $ASOB_j$ формирует булеву матрицу $D_j = \|d_{jrk}\|$, компонентами которой являются указатели d_{jrk} запуска действительных сигналов Sgd по разветвлениям номера k . Строками r этой матрицы являются номера входов $ASOB_j$. Результат умножения d_{jrk} и π_f определяет, на каком из разветвлений выхода четвертого типа необходимо выработать Sgd , активизирующий в дальнейшем агрегат $ATOP_{js}$, который корректирует значения компонентов вектора U_{fn} переменных управления технологическим процессом с помощью вектора корректирующих воздействий ΔU_{fn} . После отправки множества $\{Sgd\}$ действительных сигналов для корректировки функционирования и активизации соответствующих $ATOP_{js}$, агрегат $ASOB_j$ переходит в состояние ожидания прихода инверсных сигналов от $ATOP_{js}$.

4. Организация оперативного управления технологическим процессом опасного производства с помощью комплекса управления оборудованием

Блок управления $EXPERT$ осуществляет непосредственное взаимодействие с системой принятия решений $SPRESH$. Это обусловлено такими причинами: во-первых, скорость реакции человека значительно ниже скорости обработки управляющей информации системой $SPRESH$. Поэтому в качестве буфера обмена между ними используется база данных модели; во-вторых, информация о состояниях технологического процесса должна передаваться в блок управления $EXPERT$ в виде, удобном для ее восприятия специалистом-предметником. В качестве входной ин-

формации через блок управления эксперт-технолог получает отображение индикаторов состояния оборудования (θ_1), график использования ресурсов и диаграммы работы оборудования (θ_2), а также таблицы интегральных откликов и статистик моделирования (θ_3). Отметим, что на динамику имитации ВСГР влияют управляющие воздействия эксперта-технолога: немедленный останов имитации (θ_4), переход на профилактику или групповое резервирование оборудования (θ_5), установка новых начальных значений (θ_6) компонентов вектора параметров $\{X_{nh}\}$ или модификация диапазонов изменения индикаторов состояния ТПП $TGZ = (Z_{fh}^-, Z_{fh}^+)$, а также модификация содержимого таблицы корректировки вектора U_{fh} переменных управления технологическим процессом.

Перед каждой реализацией ВСГР эксперт-технолог может изменять значения множества $\{X_{hs}\}$ и характеристики G_{rh} надежности устройств $MTXO_{ij}$. Такой подход к заданию исходных данных превращает комплекс имитации в инструмент управления динамикой реализации технологических процессов производства. Это важно, когда имитация на модели происходит с упреждением τ_{upr} функционирования реального технологического процесса, и результаты имитационного моделирования можно учесть при модификации переменных управления технологическим процессом производства для контроля за состоянием оборудования.

Особенно эффективно использование комплекса имитации в тех случаях, когда интервалы времени τ_{SOB_j} между чрезвычайными событиями в медленно развивающемся технологическом процессе достаточны для оперативного управления ($\tau_{SOB_j} > T_{kph}$, где T_{kph} – критическое время реализации процесса, ранее полученное на имитационной модели).

Кроме того, важной задачей использования имитационной модели ВСГР является постановка серий имитационных экспериментов по методике Монте-Карло

с помощью модели для нахождения графиков изменения в модельном времени значений глобальных переменных $Z_{fh}(t_0)$ и $U_{fh}(t_0)$. В дальнейшем данные зависимости используются для сравнения полученных модельных значений с реальными значениями этих характеристик: $Z_{fh}(t_0)$ с $Z_{fh}^*(t)$ и $U_{fh}(t_0)$ с $U_{fh}^*(t)$, где t_0 и t – соответственно моменты времени в имитационной модели ВСГР и реальном ТПП. Если для всех компонентов этих векторов абсолютное значение разности соответствующих координат находится в пределах ошибки имитации ($|Z_{fh}(t_0) - Z_{fh}^*(t)| < \delta$; $|U_{fh}(t_0) - U_{fh}^*(t)| < \delta$), то это означает, что достигнута адекватность имитационной модели в динамике реализации управления технологическим процессом производства с помощью комплекса имитационного моделирования. Пример, содержащий описание подобных технологических процессов, и соответствующие схемы управления опубликованы нами в [19–20].

Используя возможности технологического резервирования и обеспечения выполнения ремонтно-профилактических работ требуется при текущих, определяемых на основании обработанных данных показаний монитора [21], надежность характеристик функционирования оборудования обеспечить максимально возможную производительность системы в единицу времени:

$$\Psi(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) = \delta_i \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{\tau_i} \int_0^{\tau_i - t_{ni}} \rho(t) dt \right] \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $0 \leq \delta_i \leq 1$ – коэффициенты удельного веса i -го оборудования в целевой функции производительности системы; t_{ni} – время, необходимое по регламенту для проведения ремонтно-профилактических работ на i -м оборудовании; τ_i – оптимальное в смысле критерия (1) время между двумя последовательными операциями восста-

новлення работоспособности i -го оборудования;

Таким образом, требуется найти оптимальное критерия (1) интервалы времени восстановления работоспособности i -го оборудования производственной системы ($i = \overline{1, n}$) между двумя последовательными операциями его восстановления, доставляющих максимум целевой функции $\Psi(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$ производительности системы.

Заклучение

Производственные системы на современном этапе развития технологических процессов характеризуются широким внедрением и использованием сложных технических комплексов, которые базируются на средствах вычислительной техники, включают в свой состав измерительные и управляющие устройства, технологическое оборудование и обслуживающий персонал. Исследование таких систем традиционными математическими методами стало невозможным, поскольку их поведение описывается настолько большим количеством математических соотношений, что найти решения возникающих задач практически невозможно в приемлемое время даже с помощью мощных ЭВМ. Кроме того, аналитические соотношения, описывающие законы функционирования подобных систем, не всегда известны и могут иметь вероятностную природу. Их поведение во многом определяется человеческим фактором, создающим дополнительную неопределенность при попытке его учета, а качество работы оценивается по многим составляющим.

В настоящее время, при исследовании функционирования технологических процессов производства больше внимания уделяется, «нормальному» режиму работы производственной системы. При этом решается основная задача – всеми доступными средствами обеспечить нормальный режим работы, попутно решая задачу повышения экономической эффективности функционирования рассматриваемой производственной системы. Необходимо подчеркнуть, что нормальный режим работы

ТПОП имеет смысл имитировать как во время его проектирования при проектном моделировании безопасных производственных систем [14], так и для использования параметров функционирования таких систем в качестве «эталонных» при оперативном управлении функционированием оборудования технологических процессов опасного производства с целью предотвращения возникновения аварийной ситуации на производстве, как это предложено в настоящей работе, поскольку пренебрежение задачами анализа «нештатных» ситуаций в процессе функционирования производства и недооценка важности комплекса работ в данном направлении, в особенности при исследовании вопросов надежности и безопасности, часто приводят либо к трагическим последствиям (Чернобыльская техногенная авария), либо к неоправданным расходам (убытки от недавней техногенной аварии на московских электросетях, по данным средств массовой информации России, составили около одного миллиарда долларов США).

Опубликованные в данной работе результаты относятся к вопросам, связанным с разработкой систем управления надежностью функционирования технологических процессов опасного производства, включающих в свой состав системы управления надежностью функционирования оборудования и системы управления надежностью реализации технологических операций.

Следует отметить, что реализация управления технологическими процессами опасного производства с целью снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций сталкивается с двумя основными их особенностями – скоростью протекания и многомерностью. Многомерность технологических процессов обусловлена такими факторами:

- иерархическим характером уровней организации ТПОП и вероятностным характером управления каждым из этих уровней;

- наличием оборудования, надежные характеристики функционирования которого должны быть достаточно высокими и каждый компонент которого об-

ладаєт некоторым граничным значением наработки (или «порогом», превышение которого неминуемо приводит к отказу функционирования оборудования);

- различной скоростью протекания во времени вероятностных технологических процессов опасного производства и реактивностью самого процесса в смысле управления его реализацией;

- наличием резервного оборудования, которое включается при превышении порогового значения наработки на отказ используемого технологическим процессом оборудования.

При высокой скорости протекания процесса проблему многомерности обычно преодолевают путем декомпозиции задачи управления с последующим решением отдельных подзадач теми или иными методами теории автоматического регулирования. При средних и низких скоростях протекания технологических процессов возможно применение для управления многомерных математических моделей. Однако с помощью известных аналитических методов не всегда удается получить желаемый результат прежде всего из-за стохастичности моделируемых процессов.

Вместе с тем, существующие проблемы повышения уровня надежности и безопасности функционирования технологических процессов и требования повышения эффективности различных качественных составляющих в экономике и производстве потребовали развития новых методов и средств их исследования, учитывающих указанные особенности, в связи с чем использование имитационного моделирования стало по сути одной из немногочисленных возможностей для решения подобного рода задач. В данной работе излагается развитие идей имитационного моделирования для вероятностных технологических процессов опасного производства, принадлежащих к одному из основных направлений в области имитационного моделирования (развитие методологии, методов и технологий моделирования).

Отметим, что, как показали наши исследования, при использовании предложенного программно-технологического комплекса управления надежностью, ско-

рость выполнения технологических операций не является определяющим фактором для возможности организации управления ТПОП: она определяет лишь внутреннюю структуру системы управления и контроля имитации [22] и не влияет на состав решаемых задач анализа состояний технологического процесса опасного производства, о которых сказано далее. Существенно здесь то, что комплекс управления дает возможность предугадать на имитационной модели с помощью системы управления и контроля вероятностную картину состояния технологического процесса опасного производства либо на основе его предыдущей имитации, либо на основе анализа операционной обстановки в имитационной модели, а основное его назначение – не допустить возникновения аварийной ситуации в ходе функционирования ТПОП.

На практике технологические процессы опасного производства представляют собой множество взаимосвязанных входящих в состав технологических операций $(TXO_{ij}, \text{ где } i, j = \overline{1, N})$ микротехнологических операций $(\{MTXO_{ij}\}, \text{ где } i, j = \overline{1, n})$, характеристики выполнения и порядок следования которых являются вероятностными. Некоторые из связей между $MTXO_{ij}$ также могут быть случайными. По этой причине в качестве аппарата описания ТПОП нами предложено использовать вероятностные сетевые графики и сочетать их с имитационным моделированием с использованием процедур метода Монте-Карло, заменяя ВСГР последовательностью $\{СГР_l\}$, где $l = \overline{1, N}$, обычных сетевых графиков с постоянными параметрами микротехнологических операций $MTXO_{ij}$, где N – количество реализаций ВСГР по методу Монте-Карло.

Следует отметить, что каждое предприятие имеет свою специфику функционирования, без учета которой трудно представить структуру организации управления технологическим процессом производства, в связи с чем вопрос об использовании результатов имитации зависит пре-

жде всего от конкретного объекта моделирования и цели имитации.

Использование результатов управления ТПОП на практике осуществляется в рамках таких основных направлений анализа состояний технологического процесса опасного производства:

определение оптимальной пропускной способности оборудования и его надежностных характеристик для повышения безопасности функционирования производства при заданных составе рабочих мест и наборе ресурсов;

выбор рационального варианта структуры технического обеспечения производства по обобщенному критерию качества, обеспечивающего заданный уровень его безопасности на основе мониторинга и диагностики функционирования оборудования;

расчет оценок диапазона расхода ресурсов, материалов и технического резерва надежности оборудования для повышения безопасности функционирования производства;

Данная работа представляет собой реализацию универсальной методики управления вероятностным технологическим процессом опасного производства и описание средств управления функционированием оборудования. Практическая значимость полученных результатов состоит в обеспечении возможности непрерывного контроля за ходом развития ТПОП, своевременном переключении оборудования на резервное, переводе оборудования на профилактику с остановкой производства в целях предупреждения отказов и недопущения аварии в процессе реализации замкнутого технологического цикла. Возможность внедрения данной методики и программного обеспечения в производство и учебный процесс для подготовки специалистов, работающих в области прикладной математики и системе министерства по чрезвычайным ситуациям.

1. *Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И.* Методика исследования вероятностных технологических процессов производства с помощью агрегатного способа имитации //

Управляющие системы и машины. – 2006. – № 2. – С. 35 – 42.

2. *Михалевич В.С., Кукса А.И.* Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. – М.: Наука, 1983. – 208 с.
3. *Максимей И.В., Жогаль С.П.* Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 110 с.
4. *Сотсков Ю.Н., Сотскова Н.Ю.* Теория расписаний. Системы с неопределенными числовыми параметрами. – Мн.: ОИПИ НАН Беларуси, 2004. – 290 с.
5. *Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И.* Способ моделирования агрегатами технологических процессов опасного производства // Электронное моделирование. – 2005. – Т. 27, № 6. – С. 101 – 109.
6. *Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И.* Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов // Информатика. – 2005. – № 1. – С. 25 – 31.
7. *Забелло Л.Е., Смородин В.С.* О связи принципа максимума с динамическим программированием в системах с запаздыванием // Дифференциальные уравнения. – 1989. – Т. 25, № 11. – С. 2001 – 2007.
8. *Смородин В.С.* Связь векторного импульса с функционалом Беллмана для систем с распределенным запаздыванием // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1: Физ., матем. и мех. – 1989. – № 3. – С. 61 – 72.
9. *Смородин В.С.* Исследование оптимальных управлений с особыми участками в системах с распределенным запаздыванием по состоянию // Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. – Минск, 1989. – 17 с.
10. *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.
11. *Смородин В.С.* Имитационное моделирование технологии управления процессом производства // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 74 – 88.
12. *Смородин В.С.* Методика оперативного управления технологическими процессами опасного производства // Известия Гомельского государственного ун-та имени Ф. Скорины. – 2006. – № 4 (37). – С. 87–91.

13. *Смородин В.С.* Агрегатно-процесний стенд імітації для контролю реалізацій технології небезпечного виробництва // Проблеми програмування. – 2006. – № 4. – С. 73 – 83.
14. *Смородин В.С.* Методика контролю і прийняття рішень при імітаційному моделюванні технологічних процесів небезпечного виробництва // Проблеми управління і інформатики. – 2006. – № 5. – С. 79 – 91.
15. *Максимей І.В., Смородин В.С.* Методика імітаційного моделювання систем управління небезпечного виробництва // Проблеми управління і інформатики. – 2005. – № 4. – С. 53 – 62.
16. *Максимей І.В.* Імітаційне моделювання на ЕВМ. – М.: Радио і зв'язь, 1988. – 222 с.
17. *Зайченко Ю.П.* Исследование операций: учебное пособие. – К.: Изд. дом. «Слово», 2002. – 688 с.
18. *Максимей І.В., Серегина В.С.* Задачі і моделі дослідження операцій. Ч. 2. Методи нелінійного і стохастического програмування: Учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.
19. *Гончаров А.Н., Максимей І.В., Смородин В.С.* Система прийняття рішень при імітаційному моделюванні технологічних процесів небезпечного виробництва. – VI Міжнародна конференція «Інтелектуальний аналіз інформації ІАІ-2006»: Київ, 16-19 травня 2006. Сб. тр. / Рос. асоц. искусств. интеллекта и др.; Под ред. Т.А. Таран. – К.: Просвіта, 2006. – С. 74 – 83.
20. *Максимей І.В., Гончаров А.Н., Смородин В.С.* Управление резервированием и восстановительными операциями с помощью имитационного моделирования при возникновении отказов в технологических процессах небезпечного производства // Проблеми управління і інформатики. – 2007. – № 1. – С. 48 – 60.
21. *Смородин В.С.* Организация контроля и сбора статистики имитационного моделирования технологических процессов небезпечного производства // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 38 – 52.
22. *Гончаров А.Н., Клименко А.В., Максимей І.В., Смородин В.С.* Система контролю за ходом імітації технологічних процесів небезпечного виробництва. – Моделювання-2006 (Simulation-2006): – Київ, 16-18 травня 2006. Сб. тр. конференції «Моделювання-2006». – С. 183 – 188.

Получено 02.02.2007

Об авторе:

Смородин Виктор Сергеевич,
кандидат фізико-математических наук,
доцент кафедри математических проблем
управління.

Место работы:

Гомельський державний університет
ім. Ф. Скорини,
246019, Гомель, Беларусь,
ул. Советская, 104,
тел. (8-0232) 56 4237.
e-mail: smorodin@gsu.unibel.by