

УДК 007.003; 007.008; 65.0

В.С. Смородин

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предлагается методика организации управления технологическим процессом производства в режиме реального времени с помощью специализированного человеко-машинного комплекса имитации. Рассматривается организация управления потенциально опасным технологическим процессом производства, в составе которого имеются индикаторы состояния оборудования и функционирования технологического процесса, система принятия решения, имитационная модель вероятностного сетевого графика и блок сопряжения с экспертом-технологом. Излагаются технология управления производственным процессом и методика контроля состояния индикаторов системы.

Введение

В последние годы в прикладных областях знаний растет интерес к исследованию реальных процессов для принятия решений в условиях неопределенности и риска. Подобный интерес наблюдается как при исследовании сложных технических систем, так и при анализе функционирования производственных систем, в особенности когда осуществление их производственной деятельности может представлять реальную угрозу или нести в себе потенциальную техногенную опасность. При этом особое внимание, 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) [1, 2]. 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. В то же время 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, который 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 рамках этого вопроса в работе [3] был развит подход минской школы математиков для исследования особых оптимальных управлений в динамических системах, разработан конструктивный аппарат исследования этих управлений 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 Л.С. Понтрягина, который явился новым конструктивным средством в указанном классе задач.

Реальные динамические системы функционируют в условиях воздействия на них неизвестных возмущений, а их аналитическое представление не всегда позволяет получить нужное решение в замкнутой форме. В полной мере сказанное относится к динамике функционирования технологических процессов опасного производства, в силу чего в сфере производственной деятельности нередко случаются чрезвычайные ситуации, которые носят техногенный характер. Поэтому возникла необходимость включения в класс решаемых задач для дискретных и непрерывных управляемых динамических систем задач управления технологическим процессом производства (ТПП) с изменяющейся структурой в процессе его функционирования в условиях вероятностного характера параметров производственных технологических процессов с целью повышения надежности потенциально опасных производственных систем и обеспечения требуемого уровня безопасности производства [4–6], что обусловило новизну предлагаемого подхода ввиду отсутствия

эффективного инструмента исследования потенциально опасных ТПП и определило актуальность данной разработки.

В настоящей статье в основу решения одной из задач оперативного управления технологическим процессом положено сочетание идей метода имитационного моделирования, методики сетевого планирования и процедур метода Монте-Карло на базе создания программно-технологического комплекса управления надежностью функционирования оборудования. В качестве объекта управления рассматривается ТПП, который имеет малую скорость выполнения микротехнологических операций, взаимосвязанных друг с другом в ходе реализации. При этом структура и способ формализации ТПП [7] определяются с помощью вероятностного сетевого графика (ВСГ). В 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), предложена методика управления реальным технологическим процессом с помощью специализированного человеко-машинного комплекса имитации ТПП, приводятся состав человеко-машинной системы и структура управления реальным ТПП.

Необходимо подчеркнуть, что программное обеспечение средств автоматизации имитационного моделирования по основным способам имитации в своем развитии прошло через ряд существенных этапов, среди которых можно отметить следующие:

- 1) использование языков программирования высокого уровня (FORTRAN, ALGOL, COBOL) для программирования имитационных моделей без какой-либо специальной поддержки;
- 2) специальную поддержку имитационного моделирования (GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT, ASIM и др.) в виде соответствующих выражений языка, генераторов случайных чисел, средств представления результатов;
- 3) возможность комбинированного непрерывно-дискретного моделирования (ACSL, PLSIM и др.);
- 4) ориентацию систем автоматизации имитационного моделирования на конкретные области приложения, возможность анимации (SIMFACTORY, XCELL и их аналоги);
- 5) графический пользовательский интерфейс, интегрированную среду для создания и редактирования моделей, планирования экспериментов, управления моделированием и анализа результатов (SIMPLEX II, SIMPLE++ и их аналоги).

В основу разработки данной системы положены принципы модульности структуры приложения, масштабируемости, открытой архитектуры, иерархии моделей и развитого графического интерфейса пользователя. Система имеет в своем составе оборудование, у которого могут возникать приводящие к авариям отказы функционирования. Ниже излагается методика управления ТПП с помощью комплекса имитации, в основе которого лежит система автоматизации имитационного моделирования агрегатного типа [8], обеспечивающая выполнение перечисленных выше принципов разработки программного обеспечения.

1. Состав параметров, статистик и откликов управления ТПП

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 управления ТПП, концептуальная схема которого приведена на рисунке, состоит из следующих компонентов:

- имитационной модели ТПП, структура которого определяется с помощью ВСГ;
- специализированной системы принятия решений SPRESH, осуществляющей анализ и контроль планового и «нештатного» развития операционной обстановки в имитационной модели и ТПП;
- блока управления EXPERT, выполняющего функции посредника между системой принятия решений и экспертом.

Оперативное взаимодействие основных компонентов данной системы реализуется с помощью следующих глобальных переменных комплекса имитации:

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

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

π_{abr}^* – указателей появления аварий на r -х устройствах оборудования, влияющих на конфигурацию соответствующего варианта моделируемого ТПП;

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

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

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

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

Y_{mh}^* – значений 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:

ΔU_{fh}^* – корректирующие воздействия на переменные управления ТПП;

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

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

С имитационной моделью ВСГ, который является аналогом реального ТПП, 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 $\{G_{rh}\}$, $\{ind_{rh}\}$, $\{\pi_{abr}\}$, $\{Z_{fh}\}$, $\{U_{fh}\}$, $\{ST_{kh}\}$, $\{Y_{mh}\}$, которые имеют тот же смысл, что и рассмотренные выше. От системы SPRESH на имитационную модель ВСГ поступают корректирующие воздействия ΔU_{fh}^* на переменные управления технологическим процессом, сигналы α_{rh}^* переключения на резервное оборудование или перевода соответствующих устройств на общую профилактику, а также значения X_{nh}^* , $n = \overline{1, N_h}$, n -го параметра описания процесса в h -м варианте его реализации. Для связи системы SPRESH с блоком управления EXPERT используется множество воздействий $\{\theta_{q_i}\}$, $q_i = \overline{1, l}$, с одной стороны, понятных человеку-эксперту, а с другой – преобразующихся системой SPRESH во внутреннее представление для использования в имитационной модели ВСГ. 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 ВСГ и реальным ТПП.

Перечисленные выше 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 имитации ТПП

Рассмотрим более детально состав и структуру каждого компонента человеко-машинного комплекса имитации, показанного на рисунке.

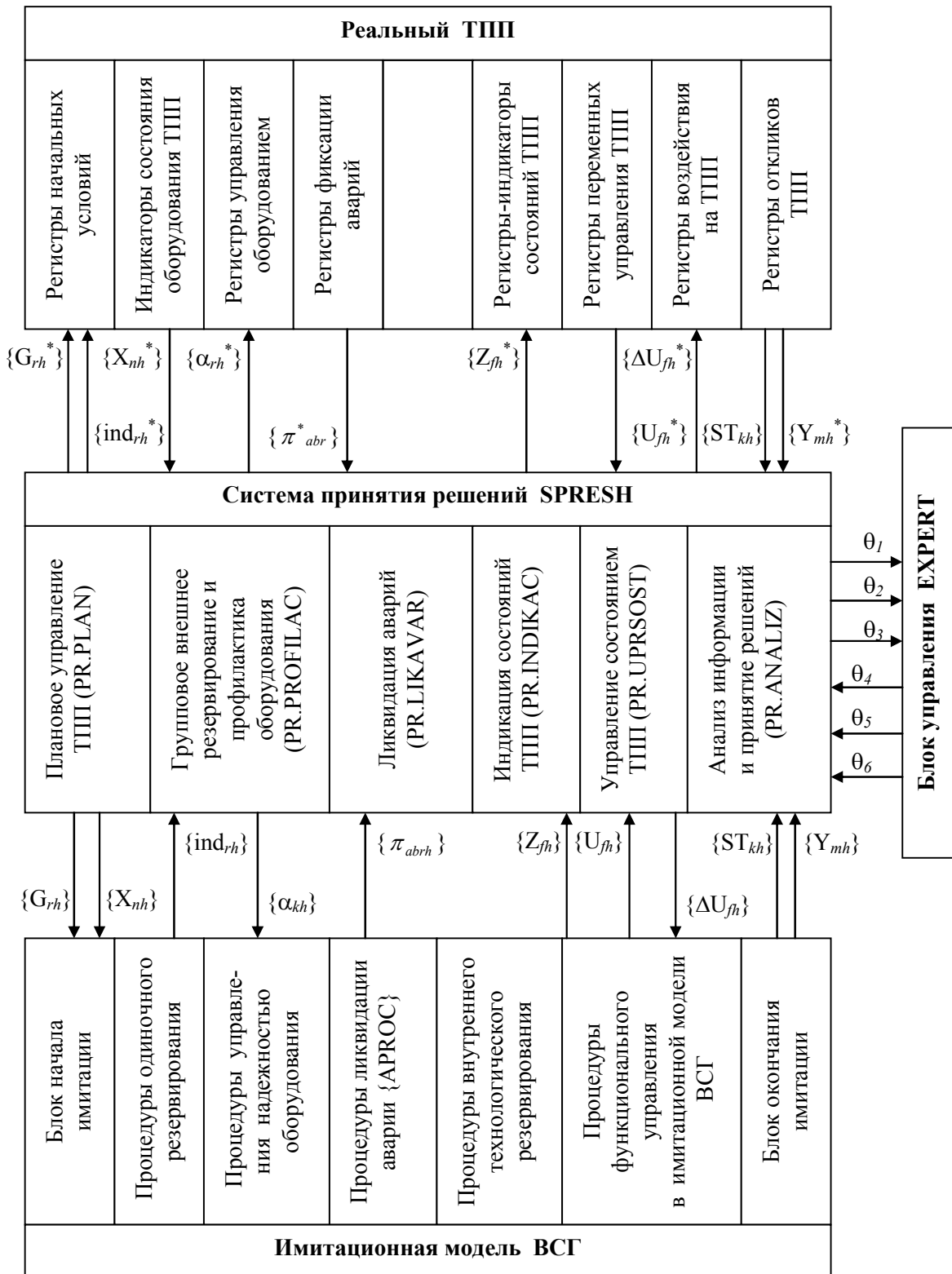


Рис. Структура управления ТПП с помощью комплекса имитации

Система SPRESH состоит из следующего набора процедур: планового управления ТПП (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: 1) оперативного управления медленно развивающимся в режиме реального времени технологическим процессом; 2) имитационного моделирования развития процесса с помощью имитационной модели ВСГ. 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 объемов 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 надежности 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. Эта 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 ТПП 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. Эта процедура формирует значения управляющих переменных $\{U_{fh}^*\}$ и набор корректирующих воздействий (ΔU_{fh}^*), поступающих на соответствующие регистры управления процессом. По завершении производственного цикла с регистров откликов реального технологического процесса в систему SPRESH посылаются множество статистик реализации $\{ST_{kh}^*\}$ и откликов $\{Y_{mh}^*\}$ реального объекта управления. Значения этих статистик и откликов процедура PR.ANALIZ оперативно анализирует на основании 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 ВСГ. 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 ВСГ аварийной ситуации в систему SPRESH с помощью указателя π_{abr} поступает соответствующий признак аварии. Для управления функционированием имитационной моделью ВСГ 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 процеду-

ра PR.UPRSOST, которая формирует значения управляющих переменных $\{U_{fh}\}$ и набор корректирующих воздействий $\{\Delta U_{fh}\}$, поступающих на имитационную модель ВСГ. 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 ВСГ, 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 работе [9].

Имитационная модель ВСГ представляет собой совокупность следующих агрегатов-имитаторов: выполнения микротехнологических операций $MTXO_{ij}$ (АТОР_{ij}), свершения событий в ВСГР (ASOB_j), функционирования r -го устройства оборудования индивидуального и общего пользования (АОBIN_r и АОВОР_r), выполнения процедур ликвидации аварий (APROC_k). Агрегаты АТОР_{ij} имитируют технологию выполнения $MTXO_{ij}$ в составе технологического процесса производства, а агрегаты-имитаторы АОBIN_r, АОВОР_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 ВСГ и запуска соответствующих агрегатов АТОР_{ij}. Рассмотрим особенности построения агрегатов имитационной модели ВСГ.

Агрегат АТОР_{ij} представляет собой четырехполюсник, имитирующий выполнение $MTXO_{ij}$ в ВСГ, 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 -й реализации ВСГ, а в режиме инверсной имитации – поздние сроки t_{nil} свершения событий. При поступлении действительных управляющих сигналов (Sgd) от агрегата ASOB_i на агрегат АТОР_{ij} с помощью соответствующих функций распределения и алгоритмов реализации единичных жребиев [10] разыгрываются значения запросов агрегатом АТОР_{ij} требуемых им ресурсов в l -й реализации ВСГ: $F_{1ij}(\tau_{ijl})$, $F_{2ij}(c_{ijl})$, $F_{3rij}(V_{rijl})$, $F_{4rij}(mt_{rij})$, $F_{5rij}(ko_{rij})$, где τ_{ijl} – время имитации агрегатом АТОР_{ij} микротехнологической операции с индексом ij в l -й реализации ВСГ; c_{ijl} – стоимость выполнения технологической операции; V_{rijl} – размер ресурса общего пользования r -го номера; mt_{rij} и ko_{rij} – количество материалов и комплектующих деталей номера r соответственно. Кроме того, каждый агрегат-имитатор АТОР_{ij} для своей реализации требует выделения в его распоряжение списков индивидуальных ресурсов, оборудования и исполнителей (SP.INR_{ijl}, SP.OBR_{ijl}, SP.ISP_{ijl}). Все перечисленные ресурсы выделяются агрегату АТОР_{ij} системой распределения ресурсов на время имитации $MTXO_{ij}$. Если при имитации АТОР_{ij} на выделенном ему оборудовании возникают опасные отказы, приводящие к возникновению аварии, то интервал времени выполнения данного агрегата увеличивается до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы на этом 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 $\pi_{abr} = 1$, 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 ВСГ внутреннее технологическое управление ликвидацией аварии организовано следующим образом. Каждый из агрегатов APROC_k обладает своим оборудованием, составом исполнителей и действует по утвержденной («штат-

ной») инструкции ликвидации аварии. Длительность реализации процедур $APROC_k$ является случайной величиной, и для l -й реализации их значения формируются 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 время выполнения агрегата $АТОР_{ij}$ произошла авария ($\pi_{ak} = 1$), а время выполнения агрегата $АТОР_{ij}$ увеличивается на величину интервала времени, равную времени выполнения всей последовательности агрегатов $\{APROC_k\}$ ликвидации аварии. Далее $АТОР_{ij}$ формирует действительный сигнал Sgd , поступающий на r -й вход $ASOB_j$, после чего агрегат $АТОР_{ij}$ переходит в режим ожидания сигнала в инверсном режиме от агрегата $ASOB_j$. В инверсном режиме имитации $АТОР_{ij}$ моделирует выполнение $MTXO_{ij}$ длительностью τ_{vipijl} . По окончании инверсной имитации на выходе $АТОР_{ij}$ появляется новый Sgd , который поступает на соответствующий выход агрегата $ASOB_j$, и агрегат $АТОР_{ij}$ ожидает прихода действительного сигнала в режиме прямой имитации с k -го выхода $ASOB_j$, но уже в $(l+1)$ -й реализации ВСГ.

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 «штатную» связь между $MTXO_{ij}$ в ВСГ. С выходов второго типа, называемых вероятностными, только по одному из разветвлений посылается действительный сигнал Sgd , а по остальным выходам формируются фиктивные сигналы (Sgf), которые обходят алгоритм выполнения $АТОР_{is}$, поступая непосредственно на вход $ASOB_s$. Для каждого разветвления задается 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 .

Следует отдельно остановиться на третьем типе кустовых выходов, который называется резервным. С помощью этого типа реализуется технологическое резервирование в имитационной модели ВСГ. Действительные сигналы Sgd формируются на этих выходах только тогда, когда на одном из входов агрегата $ASOB_j$ появляется признак «была авария» ($\pi_{ab} = 1$). Если же на всех входах $ASOB_j$ $\pi_{ab} = 0$, то это означает, что аварии во время выполнения предшествующих $АТОР_{ij}$ не было, поэтому с выходов первого типа активизируются только «штатные» $АТОР_{ij}$, которые были предусмотрены для реализации данного технологического процесса в «штатном» режиме. Если хотя бы на один из входов $ASOB_j$ приходят сигналы от $АТОР_{ij}$, 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 $АТОР_{jn}$ (на n -х разветвлениях выходов в том случае, когда $\pi_{ab} = 1$). С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся регуляторами подключения резервных $АТОР_{js}$, если на входы $ASOB_j$ поступают сигналы от предшествующих $АТОР_{ij}$, во время выполнения которых на используемом ими оборудовании происходили аварии.

Третьей составляющей комплекса имитации является 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 EXPERT информирует блок управления EXPERT о ситуации в имитационной модели ВСГ. 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 ВСГ.

3. Особенности технологического и функционального управления имитационной моделью ВСГ с помощью комплекса имитации

В предыдущем разделе подробно описан алгоритм функционирования кустовых выходов третьего типа в качестве регуляторов подключения резервных агрегатов технологических операций АТОР_{js}, если на входы агрегатов событий АСОБ_j поступают сигналы от АТОР_{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 $\|\gamma_{rm}\|$, заложенной в систему принятия решений, на основе управляющих воздействий блока управления EXPERT в комплексе имитации реализуется возможность технологического регулирования выполнения резервных агрегатов АТОР_{ij}. Этим обеспечивается технологическое управление надежностью закрепленного оборудования, что гарантирует заданный уровень безопасности функционирования моделируемого ТПП. В имитационной модели ВСГ 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_{0r} 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_{iz} значения $\{ind_{rh}\}$ посылаются в систему принятия решений SPRESH для обеспечения внешнего управления имитационной моделью ВСГ. Следует отметить, что полученная с помощью системы автоматизации имитационного моделирования [11] имитационная модель вероятностного сетевого графика для исследования динамики развития ТПП 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 графика более подробно и рассмотрим особенности организации каждого вида управления. Технологическое управление надежностью функционирования оборудования с помощью комплекса имитации организовано несколькими способами: во-первых, система SPRESH организует внешнее управление оборудованием с помощью группового резервирования оборудования или путем перевода на профилактику всего оборудования ТПП, во-вторых, имитационная модель ВСГ обеспечивает внутреннее управление оборудованием путем организации одиночного резервирования устройств или путем переключения отдельных имитаторов устройств оборудования на режим профилактики с приостановкой имитации на время выполнения профилактических работ τ_{pr} . Одним из способов имитации внутреннего управления оборудованием в имитационной модели ВСГ является розыгрыш жребия появления аварии r -го оборудования и имитации ее ликвидации множеством агрегатов $\{APROC_k\}$. Для этой 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 с номером 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 ВСГ. 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_{abr} жребия «Произошла авария» [11] 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 ликвида-

цию аварии с помощью другой цепочки процедур $\{APROC_k\}$ организует уже имитационная модель ВСГ аналогичным образом.

Особенностью организации в имитационной модели функций контроля взаимосвязанных МТХО_{ij} является использование второй части алгоритма имитации самих АТОР_{ij}. Для каждого АТОР_{ij} она представляет собой некоторую процедуру его информационного взаимодействия с другими агрегатами-имитаторами. Процедуры информационного взаимодействия агрегатов АТОР_{ij} связаны через вектор переменных функциональной связи $B_{ij} = (b_{1_{ij}}, \dots, b_{k_{ij}})$. Алгоритмы агрегатов АТОР_{ij} читают и модифицируют значения компонентов этого вектора, имитируя функции информационной связи компонентов имитационной модели ВСГ. Второй группой переменных, обеспечивающих информационное взаимодействие агрегатов, является вектор переменных управления имитационной модели $U_{ij} = (U_{1_{ij}}, U_{2_{ij}}, \dots, U_{k_{ij}})$, который модифицируется с помощью специально выделенных для этой цели агрегатов АТОР_{ij}, обеспечивая частичную корректировку компонентов вектора состояний Z_{fn} путем 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 $Z_{ij} = (Z_{1_{ij}}, Z_{2_{ij}}, \dots, Z_{f_{ij}})$. Алгоритмы АТОР_{ij} в режиме контроля за функционированием МТХО_{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 АТОР_{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 АСОБ_j. Функциональная часть алгоритма агрегата АТОР_{ij} при этом завершает свою работу, и далее выполняется алгоритм технологической части АТОР_{ij}, который был рассмотрен ранее.

В агрегате АСОБ_j содержимое «тела» Sgd используется при обслуживании выходов четвертого типа следующим образом. Перед началом имитации эксперт-технолог для каждого агрегата АСОБ_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 АСОБ_j. Результат умножения d_{jrk} и π_f определяет, на каком из разветвлений выхода четвертого типа необходимо выработать Sgd , активизирующий в дальнейшем агрегат АТОР_{ij}, который корректирует значения компонентов вектора U_{fn} переменных управления технологическим процессом с помощью вектора корректирующих воздействий ΔU_{fn} . После посылки множества $\{Sgd\}$ действительных сигналов для корректировки функционирования и активизации соответствующих АТОР_{ij} агрегат АСОБ_j переходит в состояние ожидания прихода инверсных сигналов от АТОР_{ij}.

4. Организация оперативного управления ТПП с помощью комплекса имитационного моделирования

Блок управления EXPERT осуществляет непосредственное взаимодействие с системой принятия решений SPRESH. Это обусловлено следующими причинами. Во-первых, скорость реакции человека значительно ниже скорости обработки управляющей информацией 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 информации 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 ВСГ влияют следующие 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 $TGZ = (Z_{jh}^-, Z_{jh}^+)$, а также модификация содержимого таблицы корректировки вектора U_{jh} переменных управления технологическим процессом.

Перед каждой реализацией ВСГ эксперт-технолог может изменять значения множества $\{X_{hs}\}$ и характеристики G_{rh} надежности устройств МТХО_{ij}. Такой подход к заданию исходных данных превращает комплекс имитации в инструмент управления динамикой реализации ТПП. Это тем более важно тогда, когда имитация на модели происходит с упреждением τ_{upr} функционирования реального технологического процесса и результаты имитационного моделирования можно учесть при модификации переменных управления ТПП 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.

Во время выполнения l -го прогона имитационной модели совмещены розыгрыши значений запросов ресурсов по соответствующим функциям распределений с использованием жребия третьего типа [10] и моделирование ТПП, структура которого определяется с помощью вероятностного сетевого графика, что на данном отрезке модельного времени позволяет считать ВСГ детерминированным. Поэтому расчеты ранних и поздних сроков свершения событий (t_{plj} и t_{nlj}), а также их резервов (R_{lj}) осуществляются по известным формулам. По завершении прогона статистики l -й реализации имитационной модели в базе данных модели представляют собой один элемент выборки ($\{t_{plj}\}, \{t_{nlj}\}, \{R_{lj}\}$), где $l = \overline{1, N}$. По окончании N реализаций осуществляется обработка этих выборок, которая заключается в вычислении средних значений статистик свершения событий ($\bar{t}_{plj}, \bar{t}_{nlj}, \bar{R}_{lj}$) и их дисперсий ($D_{t_{plj}}, D_{t_{nlj}}, D_{R_{lj}}$). Вычисляя оценки математического ожидания и дисперсии по известным формулам, находим точность определения статистик имитации. Этот прием позволяет решить важную задачу использования имитационной модели ВСГ при постановке серий ИЭ по методике Монте-Карло для нахождения графиков изменения значений глобальных переменных $Z_{jh}(t_0)$ и $U_{jh}(t_0)$ в модельном времени.

В дальнейшем такие графики используются для сравнения полученных модельных значений с реальными значениями этих характеристик: $Z_{jh}(t_0)$ с $Z_{jh}^*(t)$ и $U_{jh}(t_0)$ с $U_{jh}^*(t)$, где t_0 и t – моменты времени в имитационной модели ВСГ и реальном ТПП соответственно. Если для всех компонентов этих векторов абсолютное значение разности соответствующих координат находится в пределах ошибки имитации ($|Z_{jh}(t_0) - Z_{jh}^*(t)| < \delta$; $|U_{jh}(t_0) - U_{jh}^*(t)| < \delta$), то это означает, что достигнута адекватность имитационной модели в динамике реализации управления ТПП с помощью комплекса имитационного моделирования.

Динамика функционирования компьютерной программы имитационной модели ТПП, структура которого определяется с помощью вероятностного сетевого графика, отражает орга-

низацию процесса имитации в агрегатной системе моделирования – взаимодействие программ агрегатов с управляющей программой моделирования и взаимодействие информационной части агрегатов с базой данных модели, поскольку каждый агрегат состоит из универсальной рендерябельной программы, параметры которой хранятся в базе данных. При получении управления от управляющей программы моделирования программа агрегата в базе данных модели осуществляет поиск информации, соответствующей конкретному агрегату ($ASOB_i$ или $АТОР_{ij}$). Управляющие связи программы моделирования с агрегатами и информационные связи агрегатов с базой данных модели реализованы в виде Windows-приложения на языке *Object Pascal* в интегрированной среде DELPHI 5.0.

Приложение имеет графический многооконный интерфейс, облегчающий пользователю работу с имитационной моделью. Квазипараллельное функционирование агрегатов осуществляется в программном модуле Unit SimulGraf, в процессе работы которого последовательно обслуживаются все агрегаты, требующие активизации в конкретный момент модельного времени t_0 . После обслуживания всех активизируемых агрегатов $ASOB_i$ и $АТОР_{ij}$ управляющая программа UPMSGR с помощью процедур WaitTime(tt1, OutTime) и ModelTime(tt2) меняет модельное время способом «до ближайшего события». Для генерирования случайных чисел используется пользовательская процедура StartRandom().

Отладочный вариант локальной базы данных модели реализован средствами встроенной СУБД системы DELPHI 5.0 в формате Paradox. Пример, содержащий описание подобных технологических процессов, и соответствующие схемы управления опубликованы в работе [12].

Заключение

Следует отметить, что каждое предприятие имеет свою специфику функционирования, без учета которой трудно представить структуру организации управления ТПП, в связи с чем вопрос об использовании результатов имитации зависит, прежде всего, от конкретного объекта моделирования и цели имитации.

В настоящее время при исследовании функционирования ТПП больше внимания уделяется нормальному режиму работы производственной системы. При этом решается основная задача: всеми доступными средствами организовать нормальный режим работы, попутно обеспечивая решение задачи повышения экономической эффективности функционирования рассматриваемой производственной системы.

В то же время пренебрежение задачами анализа «нештатных» ситуаций в процессе функционирования производства и недооценка важности проведения комплекса работ в данном направлении, в особенности при исследовании вопросов надежности, 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).

Данная работа содержит универсальную методику управления вероятностным технологическим процессом производства и описание средств управления оборудованием. Эта методика может применяться для обеспечения возможности непрерывного контроля за ходом развития технологического процесса, своевременного переключения на резервное оборудование, перевода оборудования на профилактику с остановкой производства в целях предупреждения отказа и, в конечном счете, недопущения аварии в процессе реализации замкнутого технологического цикла.

Практическое использование результатов этого контроля осуществляется в рамках следующих основных направлений анализа состояний ТПП:

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

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

3. Расчет оценок диапазона расхода ресурсов, материалов и технического резерва надежности оборудования для повышения безопасности функционирования производства.

Следует также подчеркнуть, что нормальный режим работы ТПП имеет смысл имитировать как для его проектирования при проектном моделировании безопасных производственных систем [13], так и для использования параметров функционирования таких систем в качестве «эталонных» при оперативном управлении функционированием оборудования ТПП с целью предотвращения возникновения аварийной ситуации на производстве, как это предложено в настоящей работе.

Список литературы

1. Забелло, Л.Е. О связи принципа максимума с динамическим программированием в системах с запаздыванием / Л.Е. Забелло, В.С. Смородин // Дифференциальные уравнения. – 1989. – Т. 25, № 11. – С. 2001–2007.

2. Смородин, В.С. Связь векторного импульса с функционалом Беллмана для систем с распределенным запаздыванием / В.С. Смородин // Вестн. Белорус. ун-та. Сер. 1. Физ., матем. и мех. – 1989, № 3. – С. 61–72.

3. Смородин, В.С. Исследование оптимальных управлений с особыми участками в системах с распределенным запаздыванием по состоянию: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.С. Смородин. – Минск, 1989. – 17 с.

4. Максимей, И.В. Методика имитационного моделирования систем управления опасного производства / В.С. Смородин, И.В. Максимей // Проблемы управления и информатики. – 2005. – № 4. – С. 53–62.

5. Смородин, В.С. Имитационное моделирование технологии управления процессом производства / В.С. Смородин // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2006. – Т. 8, № 3. – С. 74–88.

6. Смородин, В.С. Методика оперативного управления технологическими процессами опасного производства / В.С. Смородин // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2006. – № 4 (37). – С. 87–91.

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

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

9. Гончаров, А.Н. Система принятия решений при имитационном моделировании технологических процессов опасного производства / А.Н. Гончаров, И.В. Максимей, В.С. Смородин // Тр. VI Междунар. конф. «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2006», Киев, 16–19 мая 2006 г. / Рос. ассоц. искусств. интеллекта и др.; под ред. Т.А. Таран. – Киев: Просвіта, 2006. – С. 74–83.

10. Максимей, И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: учеб. пособие / И.В. Максимей, В.С. Серегина. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.

11. Смородин, В.С. Агрегатно-процессный стенд имитации для контроля реализаций технологии опасного производства / В.С. Смородин // Проблемы програмування (Problems in Programming). – 2006. – № 4. – С. 73–83.

12. Максимей, И.В. Управление резервированием и восстановительными операциями с помощью имитационного моделирования при возникновении отказов в технологических процессах опасного производства / И.В. Максимей, А.Н. Гончаров, В.С. Смородин // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 1. – С. 48–60.

13. Смородин, В.С. Методика контроля и принятия решений при имитационном моделировании технологических процессов опасного производства / В.С. Смородин // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 5. – С. 79–91.

Поступила 03.08.06

*Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины,
Гомель, Советская, 104
e-mail: smorodin@gsu.unibel.by*

V.S. Smorodin

**ON-LINE TECHNOLOGICAL PROCESSES CONTROL
BY USE OF IMITATING SYSTEM**

The method to organize the control of technological processes of production in real time with use of man-machine imitating system is offered. The paper considers the control of potentially dangerous process of production which contains: the indicator of the state of equipment and technological processes functioning, the system of decision making, imitating model of probabilistic activity network and the interface with expert-technologist on the basis of imitating system. The technology of the production control and the method of indicators status control are described.