

УДК 001; 681.3

**В. С. Смородин**

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины  
ул. Советская, 104, 246019 Гомель, Республика Беларусь

## **Имитационное моделирование технологии управления процессом производства**

*Предложено использование комплекса имитационного моделирования для получения информации при контроле функционирования и управлении технологическим процессом производства.*

**Ключевые слова:** технологические процессы производства, имитационная модель, контроль функционирования.

### **Введение**

Технологические процессы производства характеризуются следующими особенностями: скоростью протекания процессов и реактивностью при управлении их реализацией; иерархическим характером уровней организации управления и вероятностным характером выполнения микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, M}$ ); наличием оборудования, которое может отказывать в процессе функционирования с известной вероятностью отказа; наличием резервного оборудования и высокой ценой отказа оборудования. Эти особенности определяют тот факт, что исследование технологических процессов производства (ТПП) с помощью известных аналитических математических моделей (АММ) не представляется возможным даже с помощью современных ЭВМ. Вероятностный характер запросов  $MTXO_{ij}$  ресурсов предприятия, а также наличие человеческого фактора при управлении ТПП создают дополнительные трудности для анализа и управления динамикой его развития. Натурные эксперименты с реальными ТПП зачастую очень дороги, либо сопряжены с большими трудностями их реализации. Выходом из создавшегося положения является использование имитационного моделирования. В работе [1] рассматривалась технология создания и использования имитационной модели (ИМ), построенной с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного способа имитации [2]. ИМ ТПП и САИМ разработаны при участии автора. Ниже рассматривается развитие технологии имитации вероятностных ТПП и модификация компонентов САИМ на случай, когда ИМ используется для контроля и управления выполнением ТПП.

© В. С. Смородин

## Имитационные модели технологии реализации производственных процессов

ТПП состоит из множества  $\{MTXO_{ij}\}$  взаимосвязанных микротехнологических операций, которые выполняются параллельно-последовательным способом таким образом, что одна группа  $MTXO_{ij}$  может быть инициирована только по окончании функционирования другой группы операций. В тех случаях, когда времена выполнения  $MTXO_{ij}$  и состав требуемых ресурсов постоянен, анализ реализации ТПП осуществляется с помощью АММ, известных как сетевые графики (СГР). Технология их построения и использования приводится, например, в работе [3]. Однако когда параметры  $MTXO_{ij}$  и времена  $\tau_{ij}$  их выполнения являются случайными величинами, использовать СГР нельзя из-за его неадекватности реальному ТПП. В работе [1] для исследования вероятностных ТПП предлагается использовать вероятностные сетевые графики (ВСГР). При этом ВСГР заменяется последовательностью  $SGR_l$  ( $l = \overline{1, N}$ ) реализаций сетевого графика, используется процедура Монте-Карло и создается имитационная модель (ИМ) ВСГР. В этой имитационной модели ВСГР представляется с помощью  $N$  реализаций  $SGR_l$ , в ходе которых каждая  $l$ -я реализация ( $l = \overline{1, N}$ ) является детерминированной ИМ  $SGR_l$  (времена  $\tau_{ijl}$  выполнения  $MTXO_{ij}$  представляют собой результат розыгрыша этой случайной величины по функции распределения  $F_{ijl}(\tau)$ ). Далее в  $l$ -й реализации ВСГР все параметры  $MTXO_{ij}$  представляют собой постоянные величины, и расчет параметров  $SGR_l$  осуществляется по известным методикам [3]. Расчет и анализ параметров ВСГР осуществляется в среде САИМ, реализующей агрегатный способ имитации [2]. Основными компонентами библиотеки САИМ являются следующие типы агрегатов: имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  ( $ATOP_{ij}$ ), имитации свершения событий в  $SGR_l$  ( $ASOB_j$ ), имитации функционирования  $r_2$ -го номера оборудования общего пользования ( $AOBOP_{r_2}$ ), имитации функционирования  $r_1$ -го номера индивидуального оборудования ( $AOBIN_{r_1}$ ), имитации использования  $ATOP_{ij}$  каналов оборудования общего пользования ( $AKAN_{r_3}$ ), имитации выполнения  $k$ -й процедуры ликвидации аварии ( $APROC_k$ ). Агрегаты  $ATOP_{ij}$  отражают две стороны выполнения  $MTXO_{ij}$  в ИМ ТПП: технологию выполнения ТПП и выполнение самих функций  $MTXO_{ij}$  в составе имитационной модели. Агрегаты-имитаторы оборудования ( $AOBOP_{r_2}$ ,  $AOBIN_{r_1}$ ,  $AKAN_{r_3}$ ) и выполнения процедур ликвидации аварий ( $APROC_k$ ) используются в САИМ только для отображения технологии выполнения ТПП. Агрегаты-имитаторы  $MTXO_{ij}$  состоят из двух частей. Одна часть имитирует технологию выполнения ТПП, а другая часть имитирует выполнение функций компонентов производственной системы. Рассмотрим динамику отображения всеми агрегатами технологии выполнения ТПП в среде моделирования САИМ.

Агрегат  $АТОР_{ij}$  представляет собой четырехполюсник, имитирующий выполнение  $МТХО_{ij}$  в ВСГР. Вначале в режиме прямой имитации приходит сигнал инициализации от  $АSOB_j$ , который инициирует работу  $АТОР_{ij}$ , формирующий по соответствующим функциям распределения значения параметров агрегата в  $l$ -й реализации:

$$\tau_{ijl}, c_{ijl}, \{V_{rijl}\}, \{mt_{rijl}\}, \{ko_{rijl}\},$$

где  $c_{ijl}$  — стоимость выполнения  $МТХО_{ij}$ ;  $V_{rijl}$  — размер ресурса на оборудовании общего пользования номера  $r_1$ ;  $mt_{rijl}$  — количество требуемых материалов  $r$ -го номера;  $ko_{rijl}$  — количество комплектующих деталей номера  $r$ .

Затем каждый  $АТОР_{ij}$  определяет индивидуальные запросы на ресурсы оборудования и исполнителей в виде списков ( $SP.INR_{ijl}, SP.OBR_{ijl}, SP.ISP_{ijl}$ ). Эти ресурсы выделяются системой распределения ресурсов ( $SRR$ ) ИМ на время имитации выполнения  $МТХО_{ij}$ . Если каких-либо ресурсов нет, то  $АТОР_{ij}$  ожидает их освобождения и последующего выделения в его распоряжение. Когда при имитации  $АТОР_{ij}$  на выделенном ему оборудовании возникают опасные отказы, то интервал времени выполнения  $АТОР_{ij}$  увеличивается до тех пор, пока не будут завершены восстановительные работы на этом оборудовании. При этом с помощью жребия по вероятности  $p_{av}$  моделируется ситуация «произошла авария». В этом случае для ее ликвидации используется «штатная» последовательность процедур ликвидации  $\{APROC_k\}$ . Каждый из этих агрегатов действует по утвержденному алгоритму ликвидации последствий аварийной ситуации. Длительность  $\tau_{prkl}$  реализации  $APROC_k$  также является случайной величиной и формируется по функции распределения  $\Phi_k(\tau_{pr})$ . В этой последовательности  $\{APROC_k\}$  порядок следования агрегатов фиксированный. По окончании реализации  $\{APROC_k\}$  выполнение операции на отказавшем оборудовании продолжается с прерванного места, формируется признак  $\pi_{ak} = 1$  «была авария», а время выполнения  $АТОР_{ij}$  увеличивается на величину, равную сумме времен выполнения каждой процедуры  $APROC_k$ . Далее формируется сигнал, поступающий на  $r$ -й вход  $АSOB_j$ , а агрегат  $АТОР_{ij}$  переходит в режим ожидания инверсного сигнала от  $АSOB_j$ . В этом режиме  $АТОР_{ij}$  имитирует выполнение  $МТХО_{ij}$  длительностью  $\tau_{vijl}$ . По окончании имитации на выходе  $АТОР_{ij}$  появляется сигнал, который затем поступает на выход номера  $k$  агрегата  $АSOB_j$ , и агрегат  $АТОР_{ij}$  ожидает прихода сигнала в режиме прямой имитации от  $АSOB_i$ , но уже в  $(l + 1)$ -й реализации ВСГР.

Агрегаты  $АSOB_i$  являются многополюсниками с различным числом входов и выходов. Выходов у  $АSOB_i$  может быть несколько типов, причем каждый выход

номера  $k$  может быть либо одиночным, либо кустовым с разным числом разветвлений ( $L_{k1}$  — число разветвлений  $k$ -го выхода  $ASOB_i$ ). Выходы первого типа  $ASOB_i$  нумеруются, поэтому при адресации сигнала указывается номер события  $i$  и номер входа  $r$  в  $ASOB_j$ . Только с выходов первого типа выдаются действительные сигналы  $Sgd$ , поступающие в режиме прямой имитации на вход  $ATOP_{ij}$ , которые инициируют его работу. Фиктивные сигналы  $Sgf$  обходят алгоритм выполнения  $ATOP_{ij}$ . Выходы второго типа также являются кустовыми, состоят из  $L_{k2}$  разветвлений и являются вероятностными. Необходимо у этих выходов задать вектор  $p_{jk2n}$  вероятностей формирования действительного сигнала, указывающий значения вероятностей формирования действительного сигнала на одном из разветвлений (на остальных  $(n-1)$  разветвлениях формируются только фиктивные сигналы  $Sgf$ ).

Кустовые выходы третьего типа называются резервными. С их помощью реализуется технологическое резервирование в ИМ ТПП. Действительные сигналы  $Sgd$  формируются на выходах только в том случае, когда на один из входов  $ASOB_j$  поступает признак «была авария» ( $\pi_{av} = 1$ ). Если на всех входах  $\pi_{av} = 0$ , то это означает, что во время выполнения  $ATOP_{ij}$  аварий не было, и поэтому активизируются только «штатные»  $ATOP_{js}$  с действительных выходов первого типа, которые предусмотрены технологическим процессом производства. Если хотя бы на один из входов  $ASOB_j$  приходят сигналы от  $ATOP_{ij}$ , во время выполнения которых была авария, то это означает активизацию резервного кустового выхода третьего типа. Механизм формирования действительных сигналов у кустовых выходов третьего типа основан на использовании булевой матрицы  $\|\gamma_m\|$ , которую составляет технолог-эксперт до начала имитации. Наличие единицы на пересечении  $r$ -й строки с  $n$ -м столбцом в этой матрице означает необходимость включения резервных  $ATOP_{jh}$  на  $L_3$  разветвлениях кустового выхода третьего типа у  $ASOB_j$  при наличии на его входах признаков  $\pi_{av} = 1$ . С помощью данного механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных  $ATOP_{jh}$ , если на входы  $ASOB_j$  поступают сигналы от  $ATOP_{ij}$ , во время выполнения которых на используемом ими оборудовании происходили аварии. Таким образом, совокупность комбинаций различных типов кустовых выходов и задание количества разветвлений каждого кустового выхода предоставляет эксперту возможность технологического резервирования выполнения множества  $\{ATOP_{ij}\}$  в зависимости от сложившейся операционной обстановки в ТПП.

В режиме прямой имитации многополюсник  $ASOB_j$  ожидает прихода на его входы последнего сигнала с  $ATOP_{ij}$ . При этом срабатывает «спусковая» функция агрегата, фиксируется ранний срок свершения событий  $t_{pil}$ , и формируется серия выходных сигналов со всех выходов. С выходов  $ASOB_j$   $Sgd$  поступают на входы

$АТОР_{js}$  согласно таблице коммутаций агрегатов, которая создается экспертом до начала имитации ВСГР. Фиктивные сигналы  $Sgf$  обходят выполнение  $АТОР_{js}$ , поступая непосредственно на  $АSOB_s$ . После посылки всех действительных и фиктивных сигналов  $АSOB_j$  ожидает приходов от  $АТОР_{js}$  сигналов в режиме инверсной имитации, формируемых на  $r$ -х входах  $АSOB_s$ . С приходом самого последнего  $Sgd$  в режиме инверсной имитации на один из выходов  $АSOB_j$  формируется поздний срок свершения события  $t_{nil}$  и определяется резерв свершения события  $R_{il} = t_{nil} - t_{pil}$ . Далее  $АSOB_j$  ожидает появления сигналов на его входах в режиме прямой имитации, но уже следующей  $(l + 1)$ -й реализации ВСГР согласно процедуре Монте-Карло.

Функционирование оборудования ТПП имитируется множеством агрегатов-имитаторов: индивидуального оборудования  $АОВIN_{r1}$ , оборудования общего пользования  $АОВОР_{r2}$ , использования  $АТОР_{ij}$  каналов  $АKAN_{r3}$  на оборудовании общего пользования. Эти агрегаты выделяются системой распределения ресурсов модели  $SRR$  в распоряжение  $АТОР_{ij}$  на время выполнения  $МТХО_{ij}$ . Агрегат  $АОВОР_{r2}$  функционирует непрерывно, последовательно переходя из состояния работоспособности  $S_1$  в состояние восстановления функций  $S_2$  после отказа или аварии, а затем, снова возвращаясь в состояние  $S_1$ . Длительности нахождения  $АОВОР_{r2}$  в этих состояниях определяются при смене состояний соответственно по функциям их распределения  $\Phi_{1r}(\tau_{bo})$  и  $\Phi_{2r}(\tau_{vo})$ , где  $\tau_{bo}$  и  $\tau_{vo}$  — длительности нахождения агрегата в состояниях  $S_1$  и  $S_2$ . Это чередование состояний агрегата продолжается до окончания  $l$ -й реализации ВСГР. Далее весь процесс имитации продолжается аналогичным образом, но уже в  $(l + 1)$ -й реализации ВСГР. Поскольку  $АТОР_{ij}$  и  $АОВОР_{r2}$  функционируют независимо по своим алгоритмам, то для синхронизации совместного использования несколькими  $АТОР_{ij}$  одного и того же  $АОВОР_{r2}$ , находящегося в состоянии  $S_1$ , введен агрегат-имитатор  $АKAN_{r3}$ , имитирующий использование общего ресурса  $V_{rjl}$ . Количество таких  $АKAN_{r3}$  определяется числом одновременных использований  $АОВОР_{r2}$  всеми агрегатами  $АТОР_{ij}$ .

Агрегат  $АОВIN_{r1}$  функционирует в старт-стопном режиме следующим образом. В момент запуска  $АОВIN_{r1}$  на выполнение длительностью  $\tau_{vrkl}$  по сигналу, поступающему от  $АТОР_{ij}$ , вначале по функции распределения  $\Phi_{3r}(\tau_{bo})$  определяется длительность  $\tau_{borkl}$  нахождения агрегата в состоянии  $S_1$ . Проверяется ситуация, когда не будет отказа устройства оборудования во время выполнения заказа  $АТОР_{ij}$  ( $\tau_{borkl} \geq \tau_{vrkl}$ ). Отказ оборудования индивидуального пользования возникает в том случае, когда  $\tau_{borkl} < \tau_{vrkl}$ . Далее определяются последствия отказа: простой отказ (состояние  $S_2$ ); возникновение аварии с вероятностью  $p_{ar1}$  (состояние

$S_3$ ). При простом отказе оборудования длительность  $\tau_{borkl}$  нахождения агрегата в состоянии  $S_2$  определяется по функции распределения  $\Phi_{Ar}(\tau_{vo})$ , а время использования  $AOBIN_{r1}$  равно  $\tau_{borkl} + 2\tau_{vrkl}$ . При возникновении аварии запускается на выполнение последовательность агрегатов  $\{APROC_k\}$ , а  $AOBIN_{r1}$  переходит в состояние ожидания завершения выполнения этой последовательности агрегатов, состоящей из  $n_{avr}$  последовательно сменяющих друг друга процедур  $APROC_k$ . По завершении имитации ликвидации аварии этой последовательностью процедур  $AOBIN_{r1}$  завершает имитацию выполнения запроса  $ATOP_{ij}$ . Общее время использования  $AOBIN_{r1}$  равно суммарному времени выполнения  $\{APROC_k\}$  и двойному интервалу времени  $\tau_{vrkl}$ . В состояниях  $S_2$  и  $S_3$   $AOBIN_{r1}$  формирует признак  $\pi_{ar} = 1$ , значение которого сообщается агрегату  $ATOP_{ij}$ .

В ИМ ТПП предусмотрено автоматическое индивидуальное резервирование оборудования, которое включается при достижении фактической наработки оборудования ее критического значения. До начала имитации эксперт-технолог устанавливает для каждого устройства порог  $Q_{0r}$  этой наработки. Фактическая наработка  $Q_{fr}$  накапливается на индикаторе  $Ind_r$  путем добавления к значению этого индикатора приращения времени наработки  $\Delta Q_{fr}$  при каждом использовании устройства. С интервалом времени  $\Delta\tau_{iz}$  значения этих индикаторов посылаются системе принятия решений *SPRESH* для обеспечения внешнего оперативного управления процессом имитации.

### Имитационные модели функций множества микротехнологических операций технологических процессов производства

Исследуемый технологический процесс производства представляется ВСГР, отображающим последовательность выполнения агрегатов  $ATOP_{ij}$ . Вторая часть агрегатов  $ATOP_{ij}$  представляет собой подмодель их совместного информационного взаимодействия, которое осуществляется через первую группу переменных функциональной связи, составляющих в совокупности вектор  $B = (b_1, b_2, \dots, b_{k_1})$  размерности  $k_1$ . Алгоритмы подмоделей  $ATOP_{ij}$  могут в режиме чтения и записи использовать любое число компонентов вектора  $B$ . Состав компонентов этого вектора указывается технологом с помощью таблицы *TB* использований  $ATOP_{ij}$  информационных переменных  $b_j$ ,  $j = \overline{1, k_1}$ . Каждой строке таблицы *TB* соответствует своя комбинация компонентов вектора  $B$  ( $l$ -му столбцу таблицы соответствует координата  $b_l$  вектора  $B$ , означающая, что  $ATOP_{ij}$  использует эту функциональную переменную для связи с другими агрегатами). Отметим, что  $ATOP_{ij}$  могут читать и изменять значения всех переменных  $b_j$ ,  $j = \overline{1, k_1}$ .

Второй группой информационного воздействия на алгоритм  $АТОР_{ij}$  является вектор  $U = (u_1, u_2, \dots, u_{k_2})$  переменных управления ТПП размерности  $k_2$ . Алгоритмы подмоделей  $АТОР_{ij}$  в режиме имитации функций  $МТХО_{ij}$  не изменяют значений переменных управления, и только в режиме коррекции функций  $МТХО_{ij}$  они могут модифицировать компоненты  $u_j$ ,  $j = \overline{1, k_2}$ , этого вектора. Состав компонентов вектора  $U$ , используемых и корректируемых алгоритмами  $АТОР_{ij}$ , указан в таблице  $TU$ , которая позволяет агрегатам  $АТОР_{ij}$  определить названия тех управляющих переменных  $u_j$ , которые используются для корректировки выполнения  $МТХО_{ij}$ . Каждой строке  $TU$  соответствует своя комбинация переменных управления ТПП, составляющих в совокупности вектор управления  $U$ .

Третьей группой переменных контроля за ИМ ТПП является вектор  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_m)$  переменной размерности  $m$ , где  $m = \overline{1, k_3}$ . Алгоритм подмоделей  $АТОР_{ij}$  в режиме контроля за функционированием  $МТХО_{ij}$  формирует значения  $z_j$  компонентов этого вектора. Компоненты вектора  $Z$ , используемые для контроля за ИМ, имеют пределы допустимых изменений  $(Z_m^-, Z_m^+)$ , где  $Z_m^-$  и  $Z_m^+$  соответственно нижняя и верхняя границы индикатора изменений. Компоненты вектора  $Z$ , используемые при коррекции функционирования ТПП с помощью реализации алгоритмов  $АТОР_{ij}$ , технолог до имитации указывает в таблице  $TZ$ , которая позволяет агрегатам  $АТОР_{ij}$  определить названия  $z_k$  тех индикаторов ТПП, которые используются для контроля выхода параметров ТПП за нижнюю или верхнюю границу диапазона допустимых изменений. Указателями выхода  $z_k$ , где  $k = \overline{1, m}$ , за нижнюю или верхнюю границы  $(Z_k^-, Z_k^+)$  являются значения компонентов вектора модификаций  $\pi_{Mij} = (\pi_{1ij}, \pi_{2ij}, \dots, \pi_{mij})$ . При выходе за нижнюю границу  $Z_k^-$  устанавливается признак  $\pi_{kij} = -1$ , где  $k = \overline{1, m}$ . Если  $z_k$  находится внутри интервала  $(Z_k^-, Z_k^+)$ , то признак модификации равен нулю ( $\pi_{kij} = 0$ ). При выходе  $z_k$  за верхнюю границу признак  $\pi_{kij} = 1$ . Таким образом, вектор  $\pi_{Mij}$  представляет собой набор признаков, принадлежащих множеству  $\{-1, 0, 1\}$ . Результатом анализа отклонений индикатора алгоритмом функциональной составляющей агрегата  $АТОР_{ij}$  является формирование множества признаков  $\{\pi_{kij}\}$  для каждого агрегата ТПП, которое наряду с признаком «была авария» на оборудовании ( $\pi_{aij} = 1$ ) передается с выхода  $АТОР_{ij}$  на вход  $ASOB_j$  в «теле» действительного сигнала  $Sgd_{ij}$ .

Рассмотрим алгоритм выполнения функциональной части агрегата  $АТОР_{ij}$ . После имитации выполнения  $АТОР_{ij}$  на оборудовании длительностью  $\tau_{vij}$  (с учетом отказов оборудования) в момент времени  $t_0^1 = t_0 + \tau_{vij}$  активизируется функциональная часть агрегата.

Функциональная часть агрегата  $АТОР_{ij}$  корректирует значения компонентов вектора управления  $U$ . Далее происходит просмотр всех значений компонентов вектора  $\pi_{Mij}$ . Если  $\pi_{kij} = -1$ , то в таблице  $TKU_{ij}$  определяется положительная величина  $\Delta u_{kij}^+$  корректировки этого компонента в  $АТОР_{ij}$ , что означает приращение переменной управления  $u_k$ . При  $\pi_{kij} = 1$  по таблице  $TKU_{ij}$  определяется величина  $\Delta u_{kij}^-$  отрицательной корректировки этого компонента в  $АТОР_{ij}$ , что означает уменьшение значение переменной  $u_k$  (т.е.  $u_{kij} = u_{kij} - \Delta u_{kij}^-$ ). Если же  $\pi_{kij} = 0$ , то это означает, что переменная  $u_k$  либо находится в допустимых пределах, либо технолог не предусмотрел ее корректировку в алгоритме  $АТОР_{ij}$ . После просмотра всех компонентов вектора  $U$  процесс корректировки с помощью  $АТОР_{ij}$  завершается, и начинается выполнение второй части функционального моделирования в этом агрегате.

Вторая часть алгоритма функционального моделирования (АФМ) агрегата  $АТОР_{ij}$  активизирует состояние индикаторов ТПП и формирует вектор модификаций  $\pi_{Mij}$  следующим образом.

По идентификатору  $ij$  агрегата из таблицы  $TZ$  выбирается строка анализа индикаторов в  $АТОР_{ij}$  ( $z_{1ij}, z_{2ij}, \dots, z_{mij}$ ). Далее все  $m$  переменных  $z_{kij}$ ,  $k = \overline{1, m}$ , этой строки проверяются на возможность выхода их за допустимые границы для формирования компонентов вектора  $\pi_{Mij}$ . Если  $z_{kij} < Z_k^-$ , то  $\pi_{kij} = 1$ . В остальных случаях ( $z_{kij} \leq Z_k^+$  либо  $z_{kij} > Z_k^+$ )  $\pi_{kij}$  равен соответственно 0, либо  $-1$ . После просмотра всех компонентов  $m$  вектора  $Z$  вектор  $\pi_{Mij}$  объединяется с признаком  $\pi_{aij}$ , сформированном ранее при имитации технологической части  $АТОР_{ij}$ , и в «теле» сигнала  $Sgd$  передается на  $r$ -й вход  $ASOB_j$ . На этом функциональная часть  $АТОР_{ij}$  завершает свою работу, и далее выполняется алгоритм технологической части  $АТОР_{ij}$ .

Алгоритм выполнения агрегата  $ASOB_j$  при функциональном моделировании ТПП по сравнению с имитацией ВСГР усложняется следующим образом. Усложняется алгоритм обслуживания самих сигналов из-за того, что их структура становится более сложной по сравнению со структурой сигнала  $Sgd$  при имитации только одной технологии выполнения ВСГР. Теперь  $Sgd$  состоит из двух частей, первая из которых содержит признак наличия аварии ( $\pi_{aij} = 1$ ), а вторая — вектор модификации  $\pi_{Mij}$ . На признак  $\pi_{aij}$  реагирует  $Sgd$  на выходах третьего типа в  $ASOB_j$ , что означает организацию технологического резервирования при появлении аварий на  $АТОР_{ij}$ . На значения компонентов вектора модификаций  $\pi_{Mij}$  реагирует алгоритм формирования  $Sgd$  на выходах четвертого типа в  $ASOB_j$ , что означает необходимость корректировки содержимого вектора  $U$  управляющих переменных путем функциональной корректировки развития ТПП при выходе



компонентов  $z_{kij}$  вектора индикаторов ТПП за допустимые границы. В этом случае организуется запуск тех  $ATOP_{ij}$ , которые в режиме корректировки ТПП обеспечат возврат в допустимые диапазоны значений с помощью соответствующих модификаций компонентов вектора  $U$ , который предусмотрен технологом до имитации ТПП. Включение  $ATOP_{js}$  на разветвлении выхода  $ASOB_j$  четвертого типа осуществляется с помощью булевой матрицы включения  $D_j = \|d_{jrs}\|$ , которая задается технологом для каждого  $ASOB_j$ . Количество строк  $R_j$  этой матрицы равно числу входов  $ASOB_j$ . Номеру  $r$  входа  $ASOB_j$  соответствует строка элементов матрицы  $D_j$ . Столбцами номера  $s$  являются разветвления выходов четвертого типа. Алгоритм формирует действительные сигналы на выходах четвертого типа у  $ASOB_j$  следующим образом. Если все компоненты вектора  $\pi_{Mij}$  равны нулю, то ни на одном из разветвлений не формируется  $Sgd$ . Во всех остальных случаях  $Sgd$  формируется, когда  $\pi_{rij} \wedge d_{jrs} \neq 0$ . По  $s$ -му разветвлению выхода четвертого типа пересылаются значения координат вектора корректировки  $\pi_{Mij}$  в качестве входной информации для алгоритма корректировки  $ATOP_{js}$ . После запуска всех  $ATOP_{js}$  агрегат  $ASOB_j$  переходит в состояние ожидания прихода инверсных сигналов на его выходы четвертого типа (по каждому разветвлению). С приходом самого последнего из инверсных сигналов на выходы всех четырех типов в режиме инверсной имитации фиксируется поздний срок  $t_{pij}$  свершения события в  $l$ -й реализации ВСГР, и определяется резерв времени свершения события ( $R_{jl} = t_{pjl} - t_{rjl}$ ). Далее  $ASOB_j$  переходит к ожиданию сигналов в режиме прямой имитации, но уже в  $(l+1)$ -й реализации ВСГР.

### Состав и структура имитационной модели при технологической и функциональной имитации

Для автоматизации процессов построения и эксплуатации ИМ ТПП используется система автоматизации моделирования (САИМ) агрегатного типа [2]. Она содержит библиотеку типовых агрегатов  $LIB.AGREG$ , в которую входят следующие агрегаты:  $ATOP_{ij}$ ,  $ASOB_j$ ,  $AOBIN_{r1}$ ,  $AOBOP_{r2}$ ,  $AKAN_{r3}$ ,  $APROC_k$ . Кроме  $ATOP_{ij}$  эти агрегаты представляют собой реентерабельные программы, которые в базе данных модели (БДМ) хранят свой набор переменных и статистик моделирования соответственно номерам версий этих агрегатов. Количество версий реентерабельных программ равно числу агрегатов каждого типа в ИМ ВСГР. Динамика реализации алгоритмов агрегатов одинаковая для каждого типа агрегатов. При этом каждая версия агрегатов может находиться в различных состояниях согласно временной диаграмме реализации агрегатов в модельном времени  $t_0$ .

Агрегат  $ATOP_{ij}$  состоит из двух частей: технологической и функциональной. Технологическая часть  $ATOP_{ij}$  представляет собой реентерабельную программу,

обслуживающую все версии  $АТОР_{ij}$  в ИМ ВСГР. Количество версий агрегата равно числу  $МТХО_{ij}$  в ВСГР. В работе [1] рассмотрена динамика использования  $АТОР_{ij}$  при исследовании технологических аспектов организации ТПП с помощью ИМ ВСГР. Функциональная часть  $АТОР_{ij}$  уникальна для каждой  $МТХО_{ij}$ . Реализуется она с помощью множества специальных процедур. Состав этих процедур и алгоритмы их выполнения могут меняться в зависимости от структуры и состава ИМ ВСГР, поэтому при описании  $АТОР_{ij}$  вместе с параметрами его версий указывается адрес процедуры, реализующей функциональную часть алгоритма  $АТОР_{ij}$ . Эта процедура в качестве входной информации использует вектор глобальных переменных  $B$ , соответствующие строки таблиц структуры использований переменных управления  $U$  и индикаторов состояний  $Z$ , а также таблиц организации функциональной части агрегатов ТПП ( $TU, TZ, TGZ, TKU$ ). Все алгоритмы этих процедур взаимодействуют через вектор глобальных переменных  $B$ , который они читают и модифицируют согласно алгоритмам информационного взаимодействия агрегатов  $АТОР_{ij}$  между собой. В качестве входной информации  $АТОР_{ij}$  использует вектор индикаторов состояний  $Z$ , определяющий реальную ситуацию в ТПП и указывающий на структуру и характер управляющих воздействий  $U$  для корректировки состояний ТПП.

На рис. 1 приведен пример ИМ ВСГР, на котором отображены основные способы исследования технологии ТПП и регулирования динамики выполнения функций  $МТХО_{ij}$  в соответствии с заданной в ВСГР технологией реализации множества  $МТХО_{ij}$  имеющимся составом ресурсов, оборудования и исполнителей. Вместо  $МТХО_{ij}$  и  $SOB_j$ , используемых при описании ТПП с помощью ВСГР, в структуре ИМ ТПП применяются агрегаты  $АТОР_{ij}$ ,  $ASOB_j$ , а также агрегаты-имитаторы оборудования и процедур ликвидации аварий.

Важной статистикой  $l$ -й реализации ВСГР является критический путь  $KRP_{lh}$  длительностью  $T_{krlh}$ , которая представляет собой набор статистик последовательного выполнения троек агрегатов ( $ASOB_i, АТОР_{ij}, ASOB_j$ ). Статистиками выполнения  $ASOB_i$  являются четверки значений ( $i, t_{pil}, t_{nil}, R_{il} = 0$ ), а статистиками  $АТОР_{ij}$  служат тройки использования ресурса времени и стоимости выполнения агрегата  $МТХО_{ij}$ . После  $N$  реализаций ( $l = \overline{1, N}$ ) в  $h$ -м варианте организации ТПП в БДМ сформированы выборки этих статистик имитации  $ASOB_i$  и  $АТОР_{ij}$  объема  $N$ . В результате усреднения по  $N$  реализациям согласно процедуре Монте-Карло по выборкам определяются статистики  $h$ -го варианта организации ТПП ( $\bar{T}_{kph}, S^2_{Tkph}$ ), множества статистик реализации  $ASOB_j$  ( $i, \bar{t}_{pi}, \bar{t}_{ni}, R_{il}$ ) и статистик реализации  $АТОР_{ij}$  ( $ij, \bar{\tau}_{vijh}, \bar{c}_{ijh}$ ). Используя исходную структуру ВСГР, последовательности критических путей накладываются друг на друга, и в итоге  $N$  реализа-

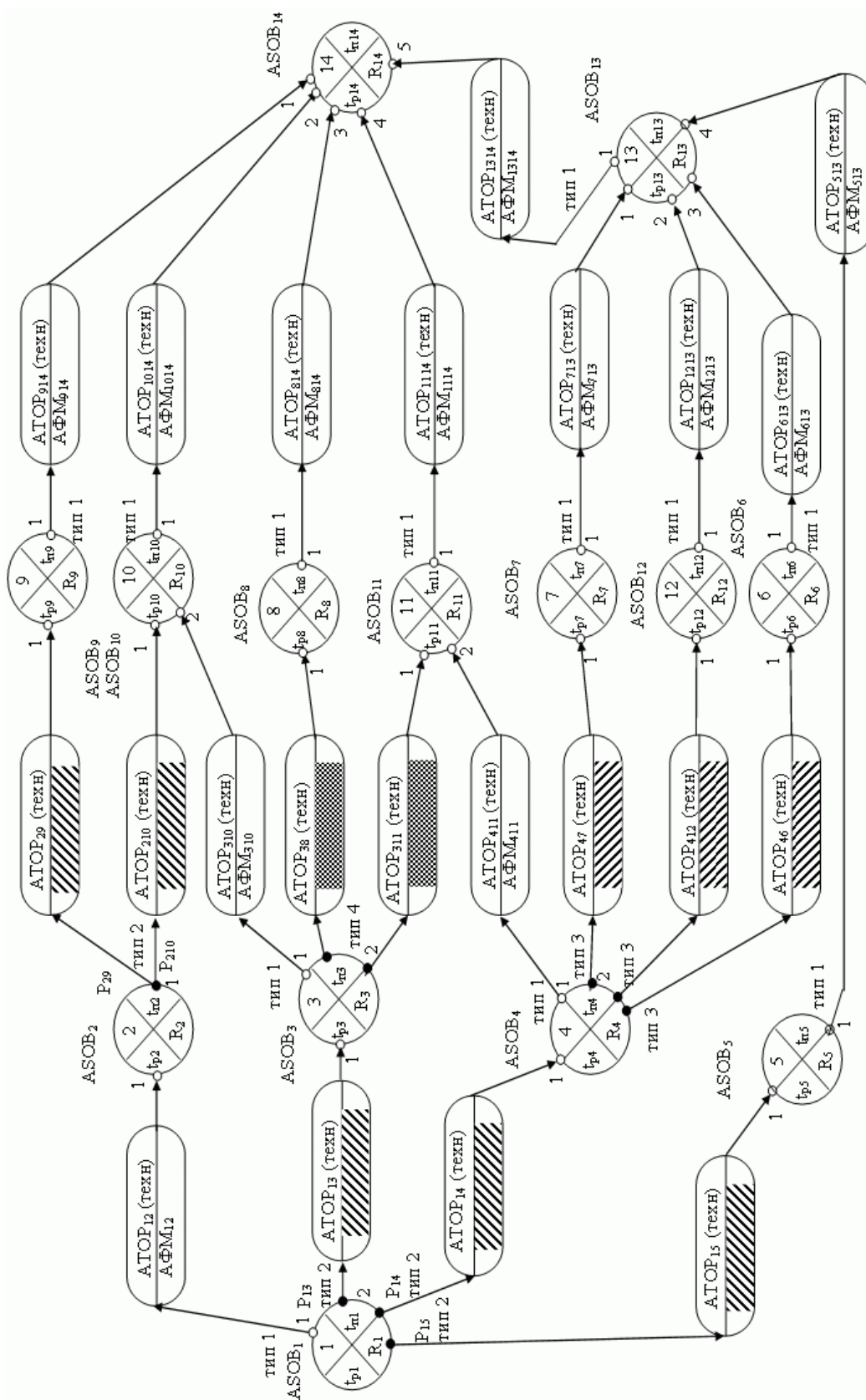


Рис. 1 Структура имитационной модели вероятностного сетевого графика

ций формируется граф критических путей  $GRKRP_h$ . На выходах каждого агрегата  $ASOB_i$  подсчитывается количество  $v_{ij}$  запусков  $ATOP_{ij}$  во всех  $N$  реализациях исходного ВСГР. Затем формируются вероятности  $p_{iks}$  запусков агрегатов с  $k$ -го выхода  $ASOB_i$  ( $s$  — номера компонентов вектора вероятностей на  $k$ -м выходе агрегата).

Другой группой технологических статистик  $\{ST_h\}$  являются графики расхода ресурсов в модельном времени  $t_0$  при  $l$ -й реализации ИМ ВСГР: ресурсов номера  $r$  ( $GR_{1rl}$ ), материалов и комплектующих изделий номера  $r$  ( $GR_{2rl}$ ), суммарного расхода финансовых средств ( $GR_{3rl}$ ). Фиксируются также временные диаграммы загрузки оборудования ( $DIAG_{1l}$ ), исполнителей ( $DIAG_{2l}$ ) и бригад исполнителей ( $DIAG_{3l}$ ) в  $l$ -й реализации. Все эти диаграммы в конце каждой  $l$ -й реализации записываются в БДМ. По желанию технолога они выдаются для принятия решения после  $l$ -й реализации  $h$ -го варианта ТПП. По окончании  $N$  реализаций эти графики и диаграммы накладываются друг на друга, позволяя таким образом получить усредненные графики расхода ресурсов и временные диаграммы использования оборудования и исполнителей в  $h$ -м варианте организации ТПП.

Статистиками контроля функционирования ТПП в  $l$ -й реализации ВСГР служат следующие количественные характеристики: увеличений ( $n_{dk}$ ) и уменьшений ( $n_{nk}$ ) значений  $k$ -й переменной управления, выходов индикаторов за верхнюю ( $m_{vk}$ ) и нижнюю ( $m_{nk}$ ) границы, превышений границ допустимых значений в  $ATOP_{ij}$  ( $\mu_{vkij}$  и  $\mu_{nkij}$ ), число ( $\mu_{uvij}$  и  $\mu_{nvij}$ ) корректировок  $\Delta u^+$  и  $\Delta u^-$  соответственно.

В качестве параметров технологии моделирования ИМ ВСГР используются следующие: множество  $\{X_{hs}\}$  начальных значений ресурсов  $h$ -го варианта ТПП; количества устройств индивидуального и общего пользования ( $m_1$  и  $m_2$ ) и количества ( $m_1^1$  и  $m_2^1$ ) резервных устройств при замене оборудования, выработавшего свой ресурс; количества ресурсов индивидуального и общего пользования ( $m_3$  и  $m_4$ ); количества исполнителей и бригад исполнителей ( $m_5$  и  $m_6$ ). Число вариантов ТПП определяется стратегией изменения каждого уровня компонентов параметров модели.

В качестве параметров функционирования  $h$ -го варианта ТПП для каждого из агрегатов  $ATOP_{ij}$  и  $ASOB_j$  вводятся следующие начальные значения:

- таблица границ изменений управляющих воздействий ( $TGU$ ) и таблица диапазонов изменений индикаторов ( $TGZ$ );
- таблица использований управляющих воздействий ( $TU$ ) и таблица корректировок ( $TZ$ ) индикаторов в  $ATOP_{ij}$ .

Все перечисленные параметры не меняются в течении  $N$  реализаций ВСГР. Переменными информационной связи являются таблица  $TB$  и множества переменных управляющих воздействий  $U$ ,  $Z$  и  $B$ . Они задаются технологом в начале имитации  $h$ -го варианта ТПП и не меняются в течении всех  $N$  реализаций ВСГР.

Во фрагменте ИМ ВСГР исследуемого ТПП, представленном на рис. 1, вероя-

тностные выходы имеются у агрегатов  $ASOB_1$  (выход 2) с вектором вероятностей  $(p_{13}, p_{14}, p_{15})$  и  $ASOB_2$  (выход 1) с вектором вероятностей  $(p_{29}, p_{210})$ . Выход 2 у  $ASOB_4$  является резервным (типа 3) и обеспечивает технологическое резервирование по трем направлениям: он срабатывает, когда при выполнении  $АТОР_{14}$  на оборудовании ТПП случается авария ( $\pi_{14} = 1$ ). В соответствии с матрицей  $\|\gamma_{rk}\|$  активизируется группа агрегатов, корректирующих послеаварийную ситуацию ( $АТОР_{47}, АТОР_{412}, АТОР_{46}$ ). Выход 2 у  $ASOB_3$  обеспечивает функциональную корректировку превышения параметров ТПП границ допустимых диапазонов изменения вектором управляющих переменных  $U$ . В соответствии с матрицей  $D_2$ , в зависимости от значений вектора отклонений  $(\Delta u^+, \Delta u^-)$ , включается группа агрегатов функциональной корректировки значений вектора  $Z$  ( $АТОР_{38}, АТОР_{311}$ ) путем модификации вектора  $U$  при выполнении агрегатов функционального регулирования состояния индикаторов ТПП. Выходы остальных событий являются выходами типа 1. Поэтому в штатном режиме функционирования ИМ ВСГР реализуются агрегаты  $АТОР_{12}, АТОР_{310}, АТОР_{411}, АТОР_{914}, АТОР_{1014}, АТОР_{814}, АТОР_{1114}, АТОР_{713}, АТОР_{1213}, АТОР_{613}, АТОР_{513}, АТОР_{1314}$ .

### Управление процессом имитации с помощью имитационной модели вероятностного сетевого графика

В ИМ ВСГР имеется два вида внутреннего управления процессом имитации ТПП: технологическое и функциональное. При внутреннем технологическом управлении в ИМ ВСГР реализовано:

- одиночное резервирование устройств оборудования при превышении величины наработки  $Q_{fr}$  ее критического значения  $Q_{0r}$ ;
- ликвидация аварий оборудования с помощью последовательности агрегатов-имитаторов процедур ликвидации аварий  $\{APROC_k\}$  при возникновении аварии с вероятностью  $p_{ar}$ ;
- технологическое резервирование с помощью выходов  $ASOB_j$  третьего типа, включающее те  $АТОР_{ij}$ , которые корректируют функционирование ТПП после возникновения аварии на оборудовании.

При внутреннем функциональном управлении с помощью выходов четвертого типа подключаются те  $АТОР_{ij}$ , которые путем коррекции  $(\Delta u^+, \Delta u^-)$  значений компонентов вектора  $U$  обеспечивают нахождение компонентов вектора  $Z$  в заданных интервалах. После корректировки компонентов вектора параметров  $U$  с помощью  $АТОР_{ij}$  проверяется выход индикаторов за допустимые пределы изменений  $(Z_k^+, Z_k^-)$ . В этом случае по методике, изложенной ранее, формируется вектор модификаций  $\pi_{Mij}$ , координаты которого вместе с признаком  $\pi_{aij}$  передаются на соответствующий вход  $ASOB_j$ . При поступлении на  $ASOB_j$  последнего

сигнала типа  $Sgd$  определяется ранний срок свершения события  $t_{pil}$  и путем анализа произведения  $\pi_{Mij}$  с соответствующей строкой матрицы  $D_j$  определяется номер направления выхода четвертого типа агрегата  $ASOB_j$ , по которому посылается сигнал инициализации соответствующего  $ATOP_{ij}$ , где и происходит корректировка компонентов вектора индикатора  $Z$ .

Кроме внутреннего управления имитацией ТПП в ИМ ВСГР организовано внешнее технологическое управление с помощью системы  $SPRESH$ . На  $SPRESH$  поступает множество индикаторов  $\{Ind_r\}$  через постоянные интервалы времени  $\Delta T_{iz}$ . Внутри этого интервала срабатывает одиночный переход на резервирование при достижении критического уровня наработки оборудования на отказ. Таким образом организуется экстренный переход на резервирование в ИМ ВСГР. При поступлении  $\{Ind_r\}$  в  $SPRESH$  происходит распознавание критической ситуации у оборудования ТПП при более низком уровне доверия. После покомпонентного сравнения всех  $r$ -х значений  $\{Ind_r\}$  и критического значения  $v_{kpr}$  формируется счетчик числа устройств оборудования, находящихся в ситуации, близкой к критической. Анализ значений этого счетчика и возможности останова имитации ТПП, наличие нужного количества резервных устройств оборудования позволяет принять одно из возможных управляющих воздействий на оборудование со стороны  $SPRESH$ : переход на групповое резервирование индивидуального оборудования ( $\alpha_1 = 1$ ) и оборудования общего пользования ( $\alpha_2 = 1$ ), общая профилактика оборудования ( $\alpha_3 = 1$ ), продолжение имитации из-за невозможности останова ТПП ( $\alpha_4 = 1$ ). С помощью  $SPRESH$  в ИМ ВСГР можно организовать с некоторым упреждением  $\tau_{zap}$  моделирование будущего развития ТПП и оперативно воздействовать на ТПП с целью недопущения конфликтных ситуаций на оборудовании ТПП. Отметим, что функциональное управление ТПП является внутренним для ИМ ВСГР. На рис. 2 приведена блок-схема управления ИМ ТПП с помощью  $SPRESH$ . В начале имитации  $l$ -й реализации ВСГР  $SPRESH$  посылает значения вектора состава ресурсов ТПП и запросов  $G_{zh}$   $ATOP_{ij}$  этих ресурсов и параметров  $X_h$   $h$ -го варианта ИМ ВСГР. По окончании  $l$ -й реализации ВСГР через БДМ от ИМ ВСГР на  $SPRESH$  поступает множество статистик  $\{ST_{lh}\}$  и откликов  $\{Y_{lh}\}$ , формируемых моделью. По окончании  $N$  реализаций множество выборок этих статистик и откликов ИМ ВСГР поступает от ИМ ВСГР на  $SPRESH$ , где они усредняются, формируя множество статистик и откликов  $\{ST_h\}$  и  $\{Y_h\}$   $h$ -го варианта имитации. В ходе имитации через равные интервалы времени  $\tau_{iz}$  от ИМ ВСГР на  $SPRESH$  поступает множество индикаторов  $\{ind_r\}$ , на основе которых  $SPRESH$  организует внешнее резервирование оборудования ТПП с помощью вектора  $\alpha_k$ . Ликвидация аварий и технологическое резервирование обеспечивается самой ИМ ВСГР, поэтому корректировками использования оборудования ТПП система  $SPRESH$  не занимается. Организация внешней коррекции и управления ТПП реализуется  $SPRESH$  следующим образом. Вначале в моменты  $t_{pil}$  срабаты-

вания спусковых функций  $ASOB_j$  в  $SPRESH$  поступает вектор индикаторов  $Z$ . После анализа содержимого  $Z$  система  $SPRESH$  вырабатывает значения  $\Delta U$  вектора модификации всех переменных управления  $U$  функционированием ТПП.

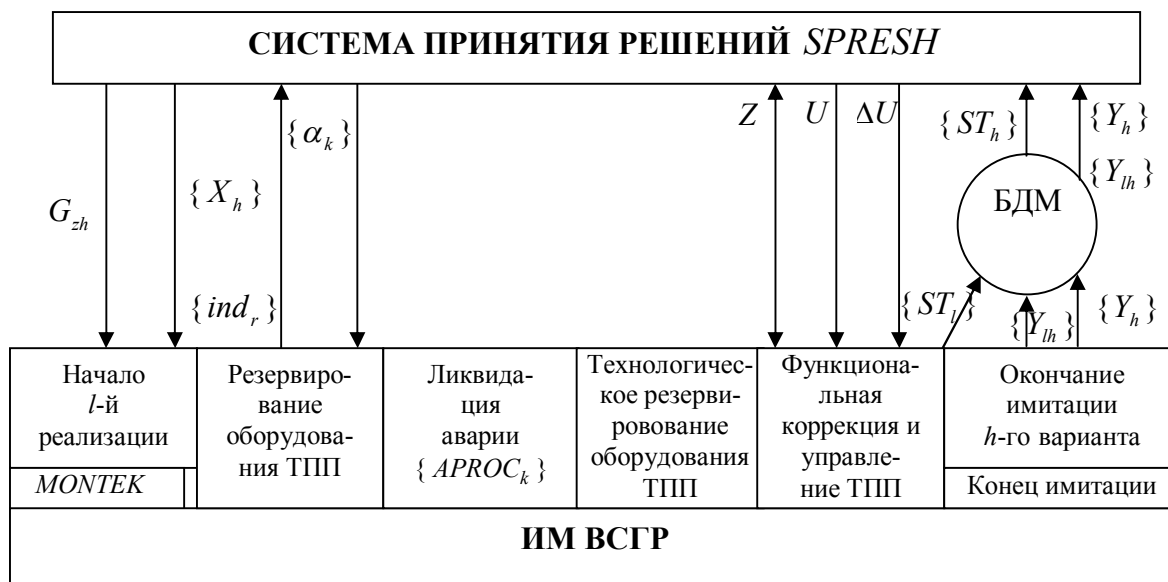


Рис. 2. Блок-схема управления имитационной моделью ТПП с помощью  $SPRESH$

## Заключение

Предложенная система оперативного технологического и функционального управления ТПП позволяет на комплексе ИМ ВСГР и  $SPRESH$  изучить варианты реализации технологических процессов производства и решить при этом ряд типовых задач проектного моделирования: определения пропускной способности ТПП, поиска «узких» мест в ТПП, выбора рационального варианта организации ТПП, определения состава и допустимых диапазонов изменения индикаторов, выбора состава вектора управляющих параметров  $U$  и определения величины корректировки компонентов вектора  $\pi_M$ , обеспечивающего контроль за изменением вектора  $Z$  индикаторов ТПП в заданных диапазонах. Это обстоятельство определяет высокую практическую ценность комплекса ИМ ВСГР и системы  $SPRESH$ .

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

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

3. Жогаль С.П., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие. — Гомель: БелГУТ, 1999. — 110 с.

Поступила в редакцию 27.06.2006