

УДК 007.003; 007.008; 65.0

В. С. Смородин

УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
ул. Советская, 104, 246019 Гомель, Республика Беларусь
e-mail: smorodin@gsu.unibel.by

Имитационное моделирование систем управления вероятностными технологическими процессами производства

Рассмотрены особенности систем управления вероятностных процессов производства, определена актуальность имитационного моделирования таких объектов исследования. Предложена формальная модель управления вероятностными технологическими процессами производства. На основе учета особенностей взаимодействий компонентов таких систем управления предложена библиотека имитационных моделей элементов управления процессами. Излагается технология использования системы автоматизации моделирования технологических процессов производства.

Ключевые слова: системы управления, вероятностные технологические процессы, система автоматизации моделирования.

Введение

Перспективным подходом для обоснования решений по сложным проблемам, возникающим при анализе функционирования потенциально техногенно опасных вероятностных технологических процессов [1], в настоящее время стал системный анализ имеющих место в процессе реализации технологического цикла критических ситуаций (выбор оптимальной стратегии при снятии с эксплуатации объектов с ядерными технологиями; выбор стратегии реагирования на возникновение отказов функционирования оборудования при реализации технологических процессов опасного производства и др.). Следует отметить, что недостаток данных, а также отсутствие достоверной информации при анализе сложных систем и процессов, приводит к необходимости использования математических методов принятия решения в условиях неопределенности и риска.

Ключевым звеном системного анализа в данном случае является задача разработки подходящей имитационной модели и выбора на основе «взвешивания» и «свертки» совокупности критериев, определяющих качественные характеристики

© В. С. Смородин

анализируемого объекта [2]. Как известно, имитационное моделирование является широко признанным методом, используемым при решении сложных задач системного анализа, оптимизации, проектирования и проектного моделирования технологических систем. При осуществлении анализа дискретных технологических процессов, в зависимости от уровня их сложности и организованности, а также от качественных характеристик отдельных операций (детерминированного или вероятностного типа), применяется достаточно много математических методов (теория массового обслуживания, аппарат сетевого планирования, теория расписаний и др.). Для реальных технологических процессов, характеризующихся нарушениями выполнения технологического цикла, случайными отклонениями во времени от графика, возникновением аварийных ситуаций [3], задача анализа и управления вероятностными технологическими процессами еще более усложняется.

Необходимо также подчеркнуть, что системы управления вероятностными технологическими процессами обладают рядом особенностей, отличающих их от других объектов моделирования, обычно исследуемых с помощью имитации: непредсказуемый характер активизации элементов систем управления; вероятностный характер взаимодействия компонентов технологического процесса с системой управления; наличие ограничений на использование ресурсов технологического процесса и надежность характеристики задействованного оборудования; необходимость оперативной синхронизации функционирования элементов системы управления.

Эти обстоятельства потребовали разработки новых методов их имитационного моделирования и соответствующего программного обеспечения, реализующего данные методы, что обусловило актуальность и определило новизну настоящей работы.

Формализация процесса управления вероятностным технологическим процессом производства

Формализация управления вероятностным технологическим процессом производства (ВТПП) основана на использовании в структуре управления стандартных элементов и сигналов, которые формируют регулирующие воздействия на оборудование путем их логической комбинации [4]. Для исследования структуры системы управления и динамики взаимодействия ее компонентов необходимо совмещение временного моделирования с отображением функций основных компонентов системы. Такое совмещение обычно называют *технологическим* моделированием. Для регулирования поведения ВТПП используется эмуляция некоторых функций компонентов системы, которая представляет собой суть *функционального* моделирования. Регулирование достигается путем реализации функций контроля выхода компонентов $\{U_{jn}\}$ переменных управления $\{U_h\}$ за допустимые границы диапазона их изменений. Возврат значений этих переменных в разрешенные диапазоны изменения осуществляется с помощью специальных элементов корректировки состояний (последовательности агрегатов-процедур управления $\{UPROC_{hl}\}$). На рис. 1 приведена структура взаимосвязей системы управления с компонентами имитационной модели (ИМ) вероятностного технологического

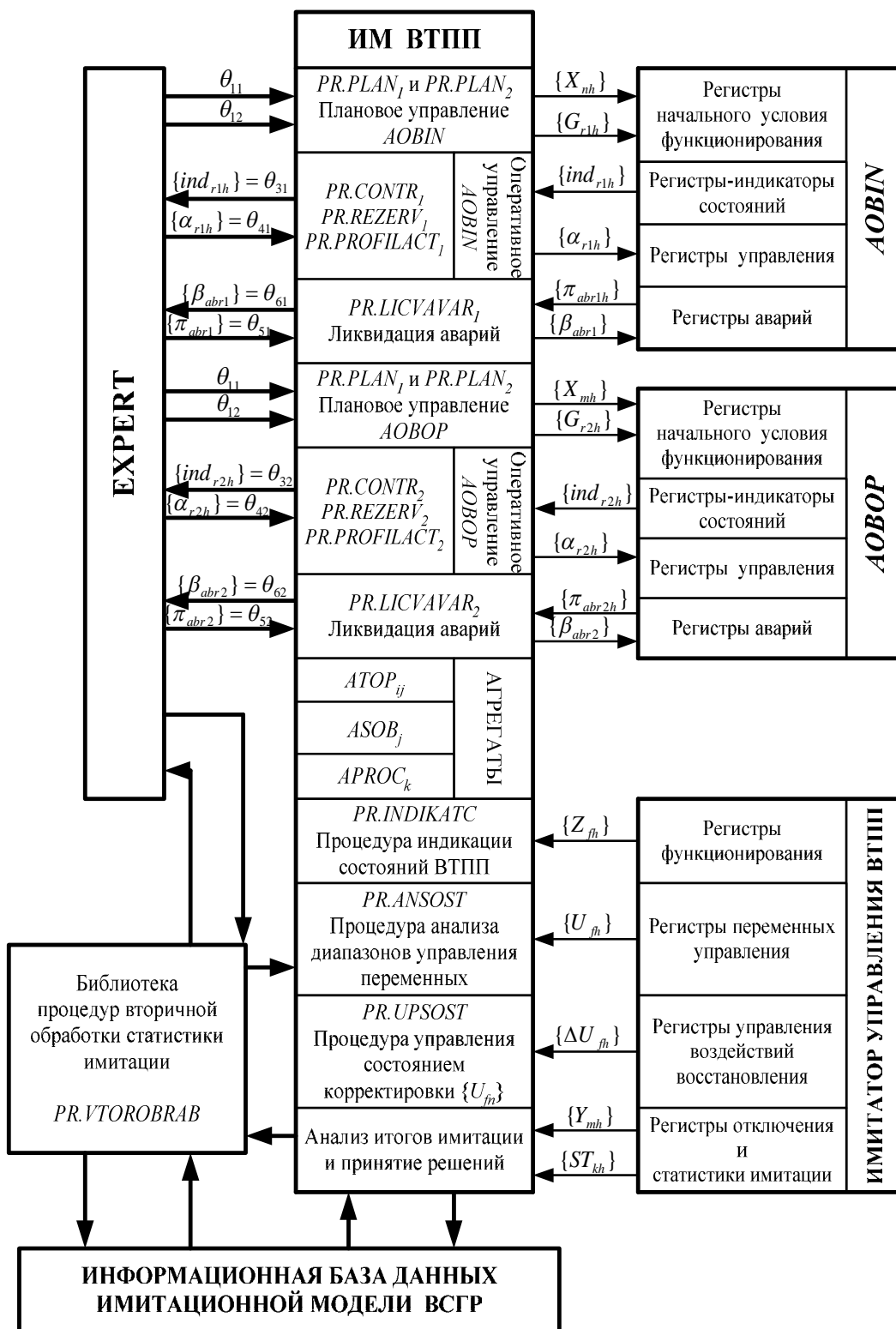


Рис. 1. Структура взаимосвязей системы управления с компонентами имитационной модели вероятностного технологического процесса производства

процесса производства. Система управления (СУ) на данном рисунке представлена имитатором управления ВТПП, содержащим регистры функционирования (регистры состояний системы управления $\{Z_{fn}\}$), регистры переменных управления $\{U_h\}$, осуществляющие взаимодействие с имитационной моделью ВТПП через компоненты $\{U_{fn}\}$, регистры управляющих воздействий $\{\Delta U_{fn}\}$, отвечающих за восстановление значений $\{U_{fn}\}$ в допустимых границах их изменений с помощью последовательности агрегатов-процедур управления $\{UPROC_{hi}\}$, регистры отключения управления и обработки статистики имитации. В общем случае система управления состоит из двух типов элементов синхронизации. Первый тип элементов представляет собой сложным образом организованную схему совпадения сигналов типа «И», второй тип является логической схемой слежения «ИЛИ». Она вырабатывает выходные сигналы после прихода на любой из ее входов самого раннего сигнала.

Поскольку все сигналы связи между элементами СУ являются сложными, то в них хранится информация о ситуациях, возникающих в системе при выполнении любого ее элемента: нормальное исполнение функций элементом, отказ оборудования, выход $\{U_h\}$ за допустимые пределы, совмещение отказов оборудования с выходом $\{U_h\}$ за допустимые диапазоны их изменения. Это означает, что сигналы, поступающие от системы управления к оборудованию, имеют соответствующие признаки, указывая тем самым на возникшую ситуацию в ходе выполнения любого элемента системы управления.

Таким образом, в системах управления ВТПП должны присутствовать несколько типов исполнительных устройств: исполнители функций; устройства оперативной ликвидации последствий аварий на оборудовании; универсальные элементы, которые одновременно ликвидируют последствия аварий и выходов компонентов $\{U_h\}$ за допустимые границы. Поэтому имитационная модель системы управления конструируется из следующих типов исполнительных элементов:

— исполнитель функции по корректировке значений компонентов вектора глобальных переменных управления U_k при выходе за допустимые границы ($CORF_{ij}$);

— исполнитель, ликвидирующий последствия аварий на оборудовании ($LICV_{ij}$);

— универсальный элемент, который одновременно корректирует значения компонентов вектора U_k и ликвидирует последствия аварий на оборудовании ($UNIV_{ij}$);

— индикатор состояния ВТПП ($INDS_{ij}$).

Типы элементов различаются между собой степенью сложности алгоритма их выполнения, составом используемых ресурсов и оборудования. Связь между элементами осуществляется с помощью управляющих сигналов двух типов: действительных (Sgd), инициирующих алгоритм выполнения исполнительных элемен-

тов, и фиктивных (Sgf), которые, минуя основной алгоритм функционирования элемента, поступают с выхода исполнительного элемента непосредственно на один из входов элемента синхронизации СУ ВТПП. Сигналы также имеют сложную структуру и состоят из трех частей: типа сигнала (π_s), адресной части (ad) и информационной части (in). У действительного сигнала Sgd_{ij} значение $\pi_s = 1$, а у фиктивного сигнала Sgf_{ij} значение индикатора $\pi_s = 0$. В адресной части ($ad = (i, k, l, j, r)$), где i — номер элемента синхронизации на l -м разветвлении кустового выхода номера k) содержится информация откуда и куда направляется сигнал. Формируется поступающий через исполнительный элемент на r -й вход j -го элемента сигнал в момент срабатывания спусковой функции i -го элемента синхронизации. Информационная часть Sgd_{ij} имеет вид: $in = (ps, so)$, где ps — последствие выполнения элемента, so — состояние системы управления после выполнения исполнительного элемента в момент срабатывания «спусковой» функции. Если при выполнении исполнительного элемента произошла авария оборудования, то формируется признак аварии $ps = '1'$, а при отсутствии аварийной обстановки этот признак равен нулю ($ps = '0'$).

Различают четыре варианта последствий выполнения элемента: нормальное выполнение исполнителя ($ps = '00'$), «произошла авария» ($ps = '01'$), «имел место выход компонентов $\{U_k\}$ за допустимые пределы их изменения» ($ps = '10'$), «имели место одновременно выход компонентов за допустимые границы и авария на оборудовании» ($ps = '11'$). При этом до прихода сигнала на вход исполнителя значение $so = '0'$, а в момент его прихода значение $so = '1'$. Признаки $ps = '10'$ формируются только в том случае, когда $|U_k - U_{gk}| > \Delta Ind_k$, где U_{gk} — граничное значение k -го компонента контролируемой переменной, ΔInd_k — величина диапазона изменения компонентов вектора $\{U_k\}$.

Каждый исполнительный элемент системы управления является двухполюсным и иницируется только действительными сигналами Sgd_{ij} . В случае прихода фиктивного сигнала Sgf_{ij} на вход исполнительного элемента, его алгоритм не выполняется, а сигнал поступает непосредственно на один из входов j -го элемента синхронизации. Параметрами этих исполнительных элементов в общем случае являются:

ij — индекс элемента;

$\{r_1\}$ — список номеров оборудования индивидуального пользования;

$\{r_2\}$ — список номеров оборудования общего пользования, на которых для элемента выделено место размером $\{V'_{r_2}\}$;

$\{r_3\}$ — список номеров ресурсов индивидуального использования;

$\{r_4\}$ — список номеров ресурсов общего использования, на которых для элемента выделено место размером $\{V''_{r_4}\}$;

$\{r_5\}$ — список номеров индивидуальных исполнителей, используемых элементом системы управления;

$\{r_6\}$ — список номеров бригад исполнителей;

$\{mt_{r_7}\}$ — количество материалов с номером r_7 , используемого элементом;

$\{ko_{r_8}\}$ — количество комплектующих изделий с номером r_8 ;

C_{ij} — стоимость нормального выполнения текущего исполнительного элемента;

τ_{ij} — интервал времени нормального выполнения элемента.

Под нормальным выполнением исполнительного элемента понимается случай, когда во время выполнения операции управления не происходит отказов оборудования индивидуального и общего пользования. Каждое устройство оборудования с номером r , в свою очередь, может находиться в следующих состояниях: безотказного функционирования длительностью τ_{BOR} , восстановления его работоспособности длительностью τ_{VOR} и ликвидации аварии длительностью τ_{AVr} , которая возникает на оборудовании r -го номера с вероятностью P_{avr} после возникновения отказа его функционирования. При восстановлении функционирования оборудования номера r и ликвидации аварии оборудования стоимость выполнения технологического цикла, предусмотренного алгоритмом исполнителя, увеличивается соответственно на значения ΔC_{1r} и ΔC_{2r} .

В общем случае параметры выполнения алгоритма элементов-исполнителей (τ_{ij} , C_{ij} , $\{ko_{r_8ij}\}$, $\{mt_{r_7ij}\}$, V_{r_4}'' , V_{r_2}') являются случайными величинами. Списки номеров оборудования, ресурсов, индивидуальных исполнителей и бригад исполнителей являются детерминированными характеристиками для исполнительного элемента с индексом ij . Параметры функционирования оборудования (τ_{VOR} , τ_{BOR} , τ_{AVr}) также являются случайными величинами.

Исполнительные элементы функционируют одинаковым образом. После активизации сигналами, поступающими от элементов синхронизации ($SLAST_j$ и $SFIRST_j$), формируется заказ ресурсов ВТПП согласно списку параметров. Если параметры являются вероятностными, то их значения определяются по соответствующим функциям распределения. Остальные параметры должны быть выделены в распоряжение элемента на время его выполнения τ_{ij} . Далее активизируются устройства оборудования индивидуального и общего пользования, выделенные в распоряжение элемента. В случае, когда во время выполнения исполнительного элемента происходит отказ функционирования оборудования, то фактическое время выполнения элемента увеличивается на длину интервала восстановления работоспособности и время ликвидации аварии на оборудовании. Только после завершения использования оборудования исполнительный элемент с индексом ij формирует выходной сигнал, направляя его на j -й элемент синхронизации системы управления. При возникновении отказа оборудования или выхода компонентов вектора U_h за допустимые пределы эта ситуация запоминается в информаци-

онной части выходного сигнала, который затем посылается на соответствующий вход элемента синхронизации согласно матрице коммутации сигналов.

Синхронизация взаимодействия компонентов в системе управления вероятностным производственным процессом

Первый тип синхронизатора $SLAST_i$ функционирует по алгоритму логической схемы «И». Вначале синхронизатор $SLAST_i$ ожидает прихода сигналов на один из его входов. После прихода самого позднего сигнала на один из входов элемента $SLAST_i$ срабатывает «спусковая» функция. В этот момент одновременно формируются все сигналы на разветвлениях выходов элемента. Второй тип синхронизатора $SFIRST_i$ функционируют по алгоритму логической схемы «ИЛИ». Этот элемент также ожидает прихода сигналов на его входы, и число его входов $a_i \leq r \leq b_i$. С приходом самого раннего сигнала Sgd_{ij} на любой из входов элемента срабатывает «спусковая» функция синхронизатора $SFIRST_i$, и формируются сигналы на выходах элемента. С этого момента остальные сигналы Sgd_{ij} на $SFIRST_i$ игнорируются алгоритмом элемента формирования выходных сигналов. Обработка сигналов элементами $SLAST_i$ и $SFIRST_i$ осуществляется одинаковым образом в момент срабатывания «спусковой» функции элемента.

У элементов синхронизации $SLAST_i$ и $SFIRST_i$ структура выходов одинакова. В общем случае все выходы элементов синхронизации могут быть кустовыми с различным числом разветвлений L_k , где k — порядковый номер выхода ($k \leq L_k$), номер разветвления $l_k = \overline{1, L_k}$. Если $L_k = 1$, то выход номера k называют одиночным. На каждом l_k -м разветвлении выхода номера k в момент срабатывания спусковой функции формируются действительные или фиктивные сигналы (Sgd_{ij} и Sgf_{ij}) от i -го элемента синхронизации на вход исполнителя с индексом ij .

На разветвлениях выходов сигналов первого типа одновременно формируются только действительные сигналы Sgd_{ij} , которые направляются согласно своей адресной части на исполнительные элементы с индексом ij . Выходы второго типа имеют вероятностную природу, поэтому до начала имитации задается вектор вероятностей $\{p_{kij}\}$, у которого $\sum_k p_{kij} = 1$. Выходы третьего типа используются для активизации тех исполнительных элементов $LICV_{ij}$, которые ликвидируют последствия аварии на оборудовании ВТПП. Для этой цели используется матрица $\|\gamma_{rh}\|$, имеющая m строк, число которых равно числу входов ($r \leq m$), и S_1 столбцов ($l_k \leq S_1$). Действительные сигналы Sgd_{ij} на l_k -х разветвлениях формируются только в том случае, когда истиной становится булева функция $Z = ps \wedge \gamma_{rs}$. Поэтому в случае поставарийной обстановки во входном сигнале в состоянии $ps = '1'$ активизируется h -е разветвление k -го выхода третьего типа путем послышки Sgd_{ij}

на элемент $LICV_{ij}$, ликвидирующий последствия аварии на оборудовании. На остальных разветвлениях этого выхода элемента синхронизации формируются фиктивные сигналы Sgf_{ij} . Изменяя содержимое r -х строк в матрице $\|\gamma_{rh}\|$, регулируется либо активизация элементов $LICV_{ih}$ для ликвидации последствий аварии на оборудовании, либо активизация $UNIV_{ih}$ для ликвидации аварийной ситуации и корректировки значений компонентов вектора U_k . Выходы четвертого типа используются для активизации исполнительных элементов $CORF_{ih}$, которые корректируют значения компонентов $\{U_k\}$ при их выходе за границы допустимых диапазонов значений. Для этого используется матрица $\|\beta_{rh}\|$, в которой также имеется r строк и S_2 столбцов ($l_k < S_2$). Аналогично предыдущему случаю, действительные сигналы Sgd_j на l_k -х разветвлениях формируются только в том случае, когда истиной станет булева функция $W = so \wedge \beta_{rs}$. С помощью этой матрицы при выходе хотя бы одного компонента $\{U_k\}$ за допустимые пределы в состоянии $so = '1'$ активизируется s -е разветвление k -го выхода четвертого типа путем посылки Sgd_{ij} на элемент $CORF_{ih}$, корректирующий значения компонентов $\{U_k\}$. На остальных разветвлениях этого выхода элемента синхронизации формируются фиктивные сигналы Sgf_{ij} . Поэтому, изменяя содержимое r -х строк в матрице $\|\beta_{rh}\|$, активизируются элементы $CORF_{ih}$ для корректировки значений $\{U_k\}$ глобальной переменной управления. Отметим, что на k -х выходах формируется множество действительных и фиктивных сигналов, при этом действительные сигналы Sgd_{ij} , в свою очередь, активизируют следующие элементы:

- с выходов первого типа все элементы $ISPF_{ij}$ на каждом разветвлении;
- с выходов второго типа только один элемент $ISPF_{ij}$;
- с выходов третьего типа комбинацию элементов $LICV_{ij}$ или $UNIV_{ij}$;
- с выходов четвертого типа комбинацию элементов $CORF_{ij}$ или $UNIV_{ij}$.

Таким образом, учитывая особенности взаимодействия компонентов системы управления, имеется возможность планировать работу исполнительных элементов по времени реализации алгоритма и в зависимости от операционной обстановки (наличия отказов оборудования и выхода контролируемой переменной U_h за пределы допустимых диапазонов изменения ее компонентов).

Библиотека имитационных моделей элементов системы управления ВТПП

Изложенный выше алгоритм выполнения исполнительных элементов и элементов синхронизации СУ ВТПП позволяет применить агрегатный способ их имитации [5]. Агрегаты взаимодействуют с помощью сигналов активизации и операторов пуска, продолжения или останова. Одиночные алгоритмы выполнения

агрегатов системы управления определили возможность представления множества элементов каждого типа множеством версий следующих агрегатов:

$AGISPO_{ij}$ — имитатор исполнительных элементов управления $ISPF_{ij}$, $CORF_{ij}$, $LICV_{ij}$, $UNIV_{ij}$, $INDS_{ij}$;

$AGSINCH_i$ — имитатор элементов синхронизации $SLAST_i$ и $SFIRST_i$;

$AGINSU_i$ — имитатор элементов $INSU_{0i}$, инициирующих входные воздействия на систему управления;

$AGFISU_j$ — имитатор элементов $FISU_{j0}$, имитирующий завершение цикла функционирования системы управления.

Данные агрегаты представляют собой реентерабельные программы имитационных моделей элементов системы управления ВТПП. Каждой версии агрегатов в базе данных имитационной модели ($BDIM$) отведено место для хранения параметров элементов системы управления, сбора статистики имитации и определения откликов моделирования. Доступ к элементам базы данных $BDIM$ осуществляется по индексам соответствующих агрегатов имитационной модели. В базе данных $BDIM$ хранится информация следующих типов:

— запросы ресурсов ВТПП OVZ_{ij} (имеющие вероятностную природу и представляющие собой функции распределения) агрегатами-имитаторами функций исполнительных элементов;

— детерминированные запросы ресурсов ODZ_{ij} (представляющие собой множество списков) агрегатами имитационной модели системы управления;

— надежностные характеристики функционирования оборудования ONZ_{ij} , обеспечивающего реализацию технологического процесса производства;

— оперативная информация OZR_{ij} текущего заказа ресурсов ВТПП агрегатом с индексом ij в l -й реализации процедуры Монте–Карло, формируемого на основе соответствующих функций распределения;

— статистика OST_{ij} использования агрегатом с индексом ij ресурсов и оборудования;

— отклики OTL_{ij} имитационного моделирования динамики управления ВТПП.

Выделение места в $BDIM$ под копии агрегатов с индексом ij позволило использовать по одной реентерабельной программе для агрегатов каждого типа. Таким образом, для имитации динамики управления ВТПП достаточно библиотеки, состоящей из пяти реентерабельных программ агрегатов и управляющей программы моделирования (УПМ). Имитационная модель системы управления ВТПП представляет собой подмножество реентерабельных программ-имитаторов функций агрегатов $\{AGISPO_{ij}, AGSINCH_i, AGINSU_i, AGFISU_j\}$, работающих в совокупности с соответствующей базой данных модели. Данные агрегаты представляют собой ядро имитационной модели и являются уникальной частью системы управления ВТПП. Кроме того, в состав имитационной модели входят управляющая подсистема моделирования, программа сбора и накопления стати-

стики имитации (*PS.STATIST*), блок начального запуска агрегатной имитационной модели (*BZAPS*), блок завершения имитации (*BZAVR*), процедура Монте–Карло (*PR.MONTEK*), блок анализа статистики имитации (*BANAZ*), блок визуализации результатов имитации (*BVIZUAL*) и блок принятия решений (*BRESH*).

В качестве входной информации для блока *BZAPS* используются таблицы, характеризующие состав и структуру имитационной модели системы управления ВТПП:

— таблица *TZAPR* запросов ресурсов каждой версией элементов системы управления;

— таблица *TCOMM* коммутации агрегатов, которая формируется согласно блок-схеме СУ ВТПП;

— таблица *TSOST* структуры имитационной модели и состава элементов системы управления, имитационную модель которой необходимо формировать.

Объединение уникальной *PS.FORMUNIC* и универсальной *PS.FORMUNIV* частей в имитационной модели системы управления осуществляет одна из версий системы автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства, реализующая агрегатный способ имитации. Система автоматизации моделирования (САМ) состоит из следующих компонентов:

— библиотеки агрегатов-имитаторов функционирования перечисленных ранее агрегатов (*LIB.AGREG*);

— подсистемы, реализующей формирование уникальной части имитационной модели (*PS.FORMUNIC*);

— подсистемы реализации имитационных экспериментов согласно процедуре Монте–Карло (*PR.MONTEK*);

— подсистемы формирования универсальной части имитационной модели системы управления (*PS.FORMUNIV*), осуществляющей взаимодействие с блоками *BZAPS*, *BZAVR*, *PR.MONTEK*;

— информационной базы системы моделирования (*IBDSM*), в которую входят все библиотеки *BDIM*;

— подсистемы обработки файлов статистик имитации (*PS.OFST*), в которую входят блок визуализации результатов имитации (*BVIZUAL*), блок принятия решений (*BRESH*) и блок анализа статистики имитации (*BANAZ*).

Функциональное назначение подсистем и библиотеки САМ ВТПП состоит в следующем. Для построения вариантов имитационной модели системы управления достаточно использовать четыре универсальные подпрограммы реализации алгоритмов агрегатов, которые одновременно обслуживают все элементы имитационной модели. За время одной реализации динамики управления ВТПП процедура *PR.MONTEK* инициирует управляющую программу моделирования, которая поочередно активизирует в режиме квазипараллельной работы универсальные подпрограммы агрегатов четырех типов, согласно алгоритмам их выполнения и таблице коммутации агрегатов. Состав и структура варианта имитационной модели системы управления приведены на рис. 2. Программы агрегатов-имитаторов состоят из активностей. Подпрограмма каждой активности, реализованной на языке Object Pascal в среде системы программирования Delphi 5.0, завершается операторами сбора статистики и взаимодействия агрегатов, которые реализуются УПМ. Сбор статистики стандартизован с помощью операторов сбора статистики.

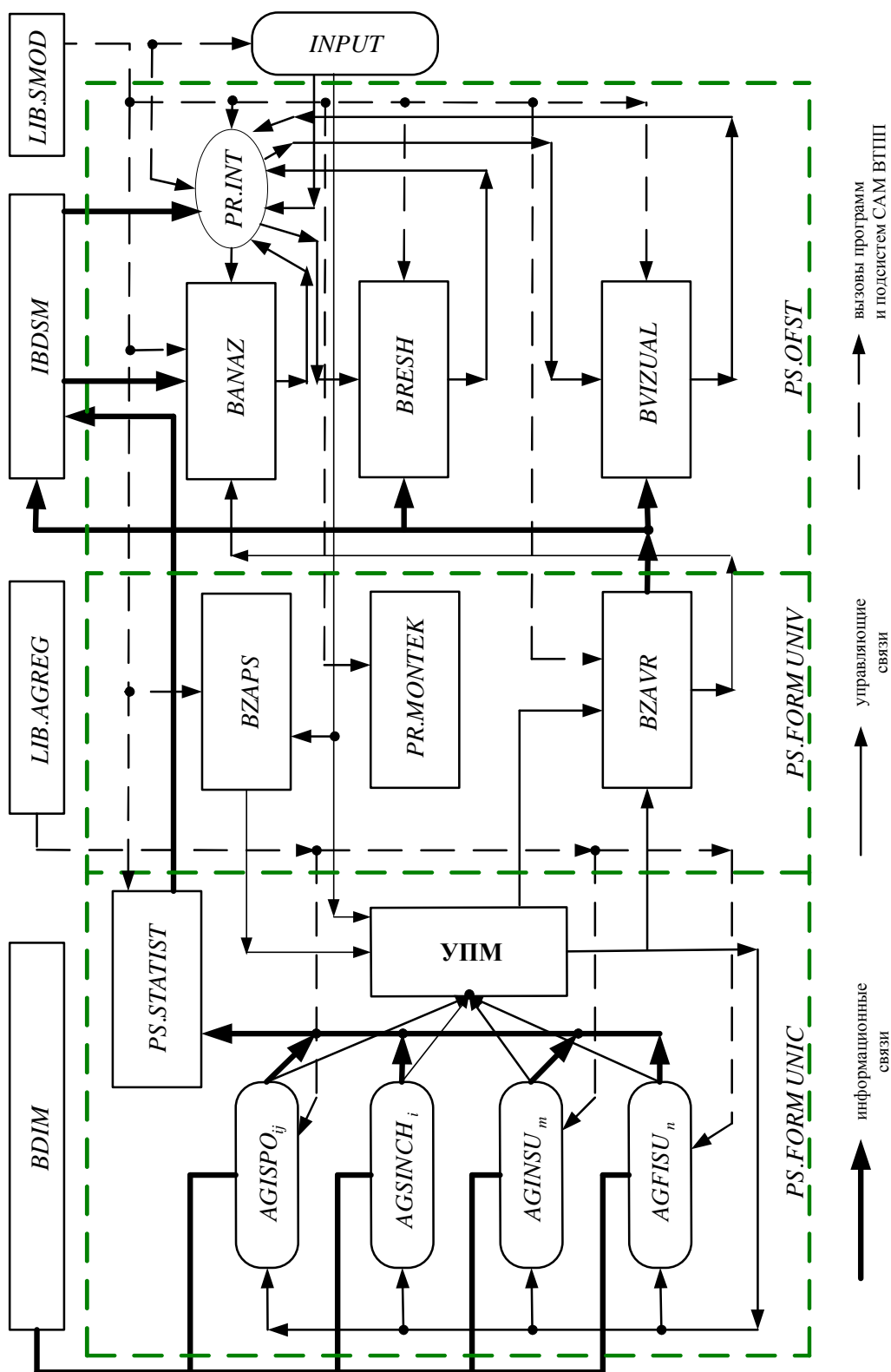


Рис. 2. Состав и структура варианта имитационной модели системы управления

По каждому оператору сбора статистики в момент модельного времени t_0 собирается информация о состояниях агрегатов и текущем состоянии *BDIM*. После фиксации статистики формируются соответствующие записи в файл статистики, который представляет собой протокол взаимодействия агрегатов в ходе имитации СУ ВТПП. Блок *BZAPS* организует ввод исходной информации о структуре имитационной модели системы управления, проверку правильности описания структуры системы, определяет ошибки коммутации агрегатов, проводит заполнение *BDIM* исходной информацией, верификацию функционирования вновь составленных имитационных моделей, организацию доступа и их хранение в библиотеках *LIB.AGREG* и *LIB.SMOD*.

Ввод исходной информации о системе управления осуществляется операторами описания исходной информации в следующей последовательности шагов. На *первом шаге* указывается количество агрегатов синхронизации, задается состав и структура агрегатов синхронизации *AGSINCH_i*. Для каждого агрегата указывается число входов (a_i) и выходов (b_i). Структура каждого кустового выхода определяется оператором структуры, в котором указывается номер выхода (k_i), тип кустового выхода ($type_i$), количество разветвлений (d_{ki}), информация для формирования сигналов на l -х разветвлениях выхода k_i . Ориентируясь на непрофессионального в области программирования пользователя, операторы структуры агрегатов синхронизации задаются в диалоговом режиме с использованием оконной технологии системы визуального проектирования графического пользовательского интерфейса Delphi 5.0. База данных агрегатов синхронизации формируется до тех пор, пока не будут идентифицированы параметры всех агрегатов *AGSINCH_i*. На *втором шаге* формируется база данных агрегатов-исполнителей в произвольном порядке описания этих агрегатов. Вначале указывается состав ресурсов каждого типа и принадлежность к агрегатам-исполнителям оборудования индивидуального ($OBIN_{r1}$) и общего ($OBOP_{r2}$) пользования. Затем для каждого агрегата-исполнителя указывается состав заказываемых ресурсов. Для функций распределения стандартным образом описываются тип распределения и значения его параметров. Детерминированные запросы ресурсов определяются в виде соответствующих списков, элементами которых являются номера устройств, исполнителей, бригад исполнителей и номера индивидуальных ресурсов ВТПП. Операция ввода в *BDIM* продолжается до тех пор, пока не будет занесена информация обо всех агрегатах-исполнителях системы управления. На *третьем шаге* в базу данных *BDIM* вводится информация о начальных размерах общих ресурсов или размерах места на устройствах оборудования общего пользования. Указываются также значения надежностных характеристик устройств оборудования общего и индивидуального пользования. При этом задаются функции распределения длительностей нахождения оборудования ВТПП в состояниях безотказной работы, восстановления функционирования или ликвидации аварий. Указываются также вероятности p_{avr} появления аварий при отказах функционирования оборудования. На *четвертом шаге* вводится начальный интегральный состав остальных ресурсов системы управления. С помощью оператора *SINRES* задаются количество

индивидуальных ресурсов (n_3), исполнителей (n_5), бригад (n_6), состав начальных размеров общих ресурсов (n_4, V_{04}), материалов (n_7, mt_{07}) и комплектующих изделий (n_8, ko_{08}).

Процедура *PR.MONTEK* включает в себя библиотеку процедур формирования случайных величин по функциям распределения; программу, реализующую алгоритм организации статистических испытаний и вычисления оценок математических ожиданий и выборочных дисперсий; библиотеку подпрограмм реализации единичных жребиев. Подсистема *PS.STATIST* автоматизирует этап обработки статистики имитации ИМ СУ ВТПП. Блок визуализации *BVIZUAL* формирует временные диаграммы использования ресурсов ВТПП, графики расхода материалов, комплектующих изделий и финансовых средств предприятия за время имитации. Блок принятия решений *BRESH* включает в себя набор подпрограмм, реализующих алгоритмы принятия решений в условиях неопределенности и риска, а также принятие решений в многокритериальных задачах производства. Перечисленные блоки представляют собой подсистему *PS.OFST* обработки файлов статистики имитации. Ядро имитационной модели *PS.FORMUNIC* состоит из четырех типов агрегатов ($AGISPO_{ij}, AGSINH_i, AGINSU_i, AGFISU_j$), управляющей программы моделирования, базы данных *BDIM* имитационной модели и подсистемы *PS.STATIST* сбора и накопления статистики имитации.

Технология использования системы автоматизации моделирования ВТПП

Технология использования версии системы автоматизации моделирования ориентирована на специалиста, не являющегося профессионалом по программированию и имитации. Поэтому не предполагаются изменения состава и структуры агрегатов пользователем системы. Построение и использование имитационной модели системы управления реализуется в следующей последовательности этапов.

На **этапе 1** задается структура имитационной модели системы управления с помощью операторов подсистемы *PS.FORMSG*.

На **этапе 2** осуществляется подготовка исходной информации моделирования. Основную сложность в подготовке исходной информации составляет определение вероятностных характеристик исполнительных элементов. Если аналитический вид аппроксимирующих функций распределения найти не удастся, используется табличная форма их представления (стандартная для всех типов параметров агрегатов). В тех случаях, когда это возможно, с целью получения исходной информации для последующей проверки адекватности имитационной модели реальной системе управления, реализуется натуральный эксперимент. Для параметров СУ ВТПП, измерение значений которых трудно организовать, используются экспертные оценки.

На **этапе 3** осуществляется верификация базового варианта имитационной модели. Задается начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и имитаторов оборудования. После задания числа реализаций имитационных эксперимен-

тов (N), формулирования условий фиксации и обработки статистики имитации формируются управляющие справочники и массивы хранения статистики имитации, используемые в дальнейшем при организации имитационного эксперимента (ИЭ). Пользователю предоставляется возможность в режиме «пошагового» выполнения просмотреть переходы агрегатов из состояния в состояние с автоматическим документированием этого просмотра. В результате автоматизируется процесс верификации имитационной модели, хотя и не существует формальных способов верификации сложных систем.

На **этапе 4** реализуются процедуры испытания и исследования свойств имитационной модели. Обычно это многошаговая процедура использования стандартных методик испытания сложных систем, в процессе которой реализуются следующие этапы испытания.

Вначале оценивается ошибка откликов имитации $\{Y_k\}$. Определяется длина переходного периода имитации (T_{pp}), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех переходит в установившееся состояние. Далее имитационная модель проверяется на «устойчивость», т.е. на отсутствие такой ситуации, когда у любого из откликов Y_k возможен рост амплитуды его изменения с ростом модельного времени t_0 из-за появления редких ситуаций, имеющих место в реальной системе. Затем проверяется «чувствительность» откликов к изменениям параметров имитации. Каждая составляющая векторов параметров модели $\{X_k\}$ изменяется в диапазоне от минимального (X_k^-) до максимального (X_k^+), остальные X_r ($r \neq k$) устанавливаются в середине интервалов значений их изменения. Вычисляются приращения компонентов векторов откликов ΔY_h в процентах. Если $\Delta Y_h < \varepsilon$, то считают, что отклик имитационной модели не чувствителен к вариациям параметра Y_k . Те параметры X_k , изменения которых не влияют ни на один из откликов модели, можно в дальнейшем из рассмотрения исключить. Последним шагом этапа является проверка адекватности модели реальной системе управления. Исследователь должен определить отклик, который в реальной системе выбирается в качестве контролируемого. При этом реализуется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений h -го отклика ИМ и реальной СУ ВТПП по критерию Стьюдента.

На **этапе 5** организуется серия имитационных экспериментов согласно процедуре Монте–Карло, в которой каждый ИЭ представляет l -ю реализацию ИМ системы управления. По окончании N экспериментов осуществляется усреднение откликов $\overline{Y_h}$ и расчет дисперсий откликов S_h по выборке откликов $\{Y_{hl}\}$ каждой реализации, где $l = \overline{1, N}$.

На **этапе 6** подсистема *PS.OFST* анализирует статистику реализации ИЭ, хранящуюся в базе данных *IBDSM*. Вторичная обработка статистики имитации подсистемой *PS.STATIST* позволяет построить интегральные диаграммы и графики использования ресурсов и оборудования, по которым определяются диапазоны расхода ресурсов в каждом варианте организации управления ВТПП. Вывод графиков изменения статистик и откликов имитации стандартизован и осуществ-

ляется с помощью блока *BVISUAL*. На следующем шаге с помощью блока *BRESH* осуществляются анализ результатов имитации вариантов организации системы управления и принятие проектных решений. Для этой цели реализуются известные методики анализа данных на основе классических критериев принятия решений в условиях неопределенности и риска.

Отметим, что технология имитации системы управления ВТПП определяет то обстоятельство, что в файле статистики базы данных *IBDSM* хранятся два вида статистики имитации: статистика исследования с помощью имитационной модели каждого варианта системы управления и интегральная статистика функционирования всех вариантов организации СУ ВТПП. Эта статистика формируется в ходе реализации серии из N экспериментов с ИМ путем N -кратного записывания в файл статистики результатов имитации. Очевидно, что в файле содержится необозримый объем информации, которую необходимо представить в удобном виде для анализа динамики моделирования компонентов системы управления. При организации вторичной обработки файла статистики имитации решаются следующие проблемы. Во-первых, это технология обработки выборок большого объема N статистик реализации событий. По этим выборкам формируются функции распределения моментов срабатывания «спусковых» функций элементов синхронизации и времен ожидания активизации этих элементов ($F_{1i}(t_0)$ и $F_{2i}(\tau_{ijl})$). В результате все множество выборок статистик имитации заменяется соответствующими функциями распределения. Во-вторых, решается проблема анализа множества графиков суммарного расхода ресурсов, поскольку количество замеров времени активизации элементов и интервалов времени ожидания их выполнения в каждой реализации различно, значения статистик имитации могут существенно отличаться, и в каждой реализации модели индивидуальны; при наложении графиков возникает ситуация, когда в каждой точке измерения формируется выборка из N значений суммарного расхода ресурсов, и снова приходим к проблеме замены этих выборок функциями распределения и вычисления оценок математических ожиданий и выборочных дисперсий. В итоге графики суммарного расхода соответствующих ресурсов представляют собой функции, построенные по средним значениям с указанием диапазонов их изменения. Аналогично решаются вопросы анализа множества временных диаграмм использования ресурсов и оборудования ВТПП.

Заключение

В работе рассматриваются новый подход к исследованию систем управления для вероятностных технологических процессов с дискретным характером производства, в котором временные интервалы выполнения отдельных операций являются случайными величинами, а нарушение ритма производственного процесса может стать причиной серьезной аварийной ситуации. Изложенный способ формализации систем управления вероятностными технологическими процессами производства и имитация процессов управления технологическим циклом на основе новой версии агрегатной системы автоматизации имитационного моделирования [5] ориентирован на случаи, когда динамику функционирования систем

управления можно описать на уровне элементов управления со сложной логикой с использованием процедур метода Монте–Карло [6].

Исследование систем управления с помощью агрегатной системы автоматизации имитационного моделирования обеспечивает простоту их формального описания и универсальную структуру получаемых имитационных моделей, а наличие методики верификации имитационных моделей технологических процессов производства [7] дает возможность рассчитывать на перспективу дальнейшего развития и применения данного подхода при проектном моделировании соответствующих объектов для различных предметных областей.

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

2. Гончаров А.Н., Максимей И.В., Смородин В.С., Клименко А.В., Езерский Д.Н. Об одной методике имитационного моделирования вероятностных технологических процессов производства // Математичні машини і системи. — 2008. — № 1. — С. 133–138.

3. Гончаров А.Н., Смородин В.С. Формализация технологических процессов опасного производства на основе теории принятия решений // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. — 2005. — № 5 (32). — С. 23–26.

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

5. Смородин В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства // Математичні машини і системи. — 2007. — № 1. — С. 105–110.

6. Гончаров А.Н. Особенности имитационного моделирования управляемых технологических процессов опасного производства // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. — 2007. — № 5 (44). — С. 101–105.

7. Смородин В.С. Верификация имитационных моделей технологических процессов производства с переменной структурой // Математичні машини і системи. — 2007. — № 3, 4. — С. 162–167.

Поступила в редакцию 17.07.2007