

ВОЗМОЖНОСТИ АГРЕГАТНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗ- ВОДСТВА

Сообщается о расширении возможностей агрегатной системы имитационного моделирования вероятностных технологических процессов производства (ВТПП). Предлагается формализовать ВТПП с помощью использования двух типов моделей: вероятностных сетевых графиков (ВСГ) и полумарковских моделей (ПММ). Состав агрегатов-имитаторов технологических операций расширен множеством агрегатов-имитаторов работы оборудования и процедур ликвидации аварий. Расширены возможности планирования и динамического управления резервными микротехнологическими операциями. Излагается технология использования системы моделирования при проектном моделировании ВТПП.

Введение

Объектом моделирования являются вероятностные технологические процессы производства, которые могут быть представлены двумя способами: с помощью вероятностных сетевых графиков либо полумарковских моделей.

Существуют известные методы и средства компьютерного моделирования объектов графовой структуры [1]. Однако для их применения необходимо, чтобы исследуемые объекты имели детерминированную структуру и постоянные характеристики. В большинстве случаев такая ситуация крайне редка. Вероятностными являются не только параметры этих объектов, но даже сама последовательность выполнения микротехнологических операций (МТХО) в составе графовых структур, в связи с чем исследователи вынуждены обращаться к имитации их функционирования либо в виде вероятностных сетевых графиков (ВСГР), либо с помощью полумарковских моделей. Поскольку имитация представляет собой весьма ресурсоемкую процедуру, то для ее реализации необходимы специальные средства автоматизации. Так, например, в [2, 3] даны исчерпывающие примеры проведения имитационных экспериментов на конкретных имитационных моделях, однако для имитационных экспериментов при моделировании ВТПП в [4] были впервые использованы процедуры метода Монте-Карло для обеспечения возможности превращения ВСГ в последовательность детерминированных имитационных моделей с

использованием методик прямой и инверсной имитации при определении соответственно ранних и поздних сроков свершения событий для детерминированных имитационных моделей в каждой l -й реализации ВСГ, поэтому в качестве средства автоматизации имитации графовых структур аппаратом сетевого планирования в данном случае можно использовать систему автоматизации моделирования вероятностных сетевых графиков (САМ ВСГР) [4]. В тех случаях, когда МТХО следуют друг за другом строго последовательно и состав их параметров имеет вероятностную природу, графовые структуры удобно представлять как реализации полумарковского процесса с использованием процедур Монте-Карло [5]. Анализ технологических и описательных возможностей известных систем автоматизации моделирования, приведенный в [6], позволяет установить наличие больших трудностей при реализации с их помощью имитационных моделей (ИМ) графовых структур. В ряде случаев, когда графовая структура представима аппаратом вероятностных сетевых графиков, САМ ВСГР [4] позволяет автоматизировать имитационные эксперименты с ИМ ВСГР. Но зачастую объекты, имеющие графовую структуру, удобнее представлять в виде комбинации ВСГР и ПММ. Этими обстоятельствами определена актуальность расширения состава и возможностей САМ ВСГР вследствие увеличения количества типов агрегатов-имитаторов функционирования элементов графовой структуры и реализации алгорит-

мов агрегатов-имитаторов функционирования таких компонентов полумарковской модели, как агрегат-состояние и агрегат-узел ПММ. В данной статье излагаются технологические и описательные возможности новой модификации САМ ВСГР [4], позволяющие исследовать динамику развития вероятностных технологических процессов производства графовой структуры аппаратом вероятностных сетевых графиков и полумарковских моделей. Кроме того, приведены расширенный состав агрегатов-имитаторов компонентов ВСГР и ПММ, список операторов взаимодействия агрегатов друг с другом, используемых в составе стандартных компонентов системы моделирования, и технология их совместного использования.

1. Формализация вероятностных графовых структур

В качестве объекта графовой структуры рассматриваются ВТПП, представляющие собой выполнение последовательностей МТХО. При параллельно-последовательном характере их исполнения ВТПП удобно представлять аппаратом сетевого планирования с использованием процедуры Монте-Карло [5]. Если же все МТХО выполняются строго последовательно друг за другом, то в качестве аналога МТХО предлагается рассматривать такие понятия, как состояния (SOST) процессов в ВТПП. При представлении объектов графовой структуры аппаратом формализации типа ВСГР узлами являются агрегаты-события (ASOB), а дугами служат агрегаты-имитаторы микротехнологических операций (АМТХО). Если же объекты графовой структуры представляются аппаратом ПММ, то узлами являются агрегаты переходов $AUZL_i$, а дугами служат агрегаты-имитаторы состояний $ASOST_{ij}$. Таким образом, агрегаты $ASOB_i$ и $AUZL_i$ для графовых структур осуществляют функцию активизации выполнения соответствующих событий и переходов. Сами же дуги представляются соответственно агрегатами $AMTXO_{ij}$ и $ASOST_{ij}$. В обоих случаях алгоритмы $ASOB_i$ и $AUZL_i$ выполняются мгновенно в модельном времени t_0 , тогда как $AMTXO_{ij}$ и $ASOST_{ij}$ реализуются за интервал времени τ_{ijl} , который является

случайной величиной. Эти агрегаты обладают наборами параметров, которые задаются до имитации с помощью функций распределения. Существенное расширение аппарата формализации ВТПП - добавление в описаниях $AMTXO_{ij}$ и $ASOST_{ij}$ следующих характеристик: времени (τ_{ijl}), объема использования ресурсов r -го типа (v_{rijl}), стоимости их выполнения (c_{ijl}), количества материалов r -го типа (mt_{rijl}), количества комплектов r -го типа (ko_{rijl}). Здесь индекс l означает номер реализации параметра согласно процедуре Монте-Карло. Перед выполнением $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ осуществляется розыгрыш по заданным функциям распределений $F_{1ij}(\tau)$, $F_{2ij}(c)$, $F_{3rij}(v)$, $F_{4rij}(mt)$, ..., $F_{5rij}(ko)$ конкретных значений запросов ресурсов в l -й реализации агрегатов ВТПП (τ_{ijl} , c_{ijl} , v_{rijl} , mt_{rijl} , ko_{rijl}). Перед имитацией выполнения $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ длительностью τ_{ijl} осуществляется запрос на выделение предприятием этих ресурсов на время имитации их выполнения.

Для реализации некоторых $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ необходимо выделить ресурсы, оборудование и исполнителей. Вторую часть параметров этих агрегатов составляют списковые структуры запросов: оборудования индивидуального использования $\{SP.OBIN_k\}$, оборудования общего пользования $\{SP.OBOP_k\}$, ресурсов индивидуального использования $\{SP.RESIN_k\}$, индивидуальных исполнителей $\{SP.ISP_k\}$, бригад исполнителей $\{SP.BRIGAD_k\}$. Перед имитацией выполнения $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ длительностью τ_{ijl} агрегаты формируют запросы этих ресурсов предприятия на время их исполнения. При имитации ВТПП аппаратом ВСГР возможна конкуренция $AMTXO_i$ за эти ресурсы и оборудование. При отсутствии необходимых ресурсов в моменты их запроса имитируется дополнительное ожидание момента выделения ресурсов и оборудования. Только после полного выделения заказанных ресурсов системой распределения ресурсов осуществляется запуск агрегатов-имитаторов использования оборудования на время τ_{ijl} . При каждом выделении и использовании ресурсов предприятия фиксируется соответствующая статистика имитации, по которой после

окончания имитации l -й реализации ВСГР формируются диаграммы и графики расхода и возврата ресурсов. При имитации $ASOST_{ij}$ конкуренция за ресурсы значительно ниже, чем в ИМ ВСГР, из-за последовательного характера перехода объекта имитации из одного состояния в другое.

Для каждого $ASOB_j$, связанного через $AMTXO_{ij}$ и $AMTXO_{jh}$ соответственно с $ASOB_i$ и $ASOB_h$ (рисунок), в l -й реализации процедуры Монте-Карло, по известной методике [6], определяются ранние (t_{pjl}) и поздние (t_{njl}) сроки свершения событий. При этом расчет t_{pjl} начинается от исходного события $ASOB_j$ и заканчивается завершающим событием $ASOB_n$. Расчет t_{njl} начинается в обратном порядке в инверсном модельном времени: от $ASOB_n$ до $ASOB_j$ и сопровождается вычислением резервов свершения событий $R_{jl} = t_{njl} - t_{pjl}$. Агрегаты $ASOB_j$ являются многополюсниками с различным количеством входов ($r = \overline{1, a_i}$) и выходов ($k = \overline{1, b_i}$), r и k – соответственно номера входов и выходов агрегата. Выходы $ASOB_j$ могут быть трех типов (см. рис.). Кустовые выходы первого типа имеют d_k разветвлений, на которых агрегат $ASOB_j$ формирует только действительные сигналы Sgd_l , поступающие на входы $AMTXO_{ij}$ и инициирующие выполнение $AMTXO_{ij}$. Если $d_k = 1$, то кустовой выход вырождается до одиночного выхода. Отметим, что сигналы на всех разветвлениях кустового выхода формируются одновременно. Кустовые выходы второго типа также могут иметь d_k разветвлений, но только из одного разветвления формируется действительный сигнал Sgd , а на остальных разветвлениях выхода второго типа агрегат $ASOB_j$ формирует фиктивные сигналы, которые проходят с входа на выход агрегата $AMTXO_{ij}$, не инициируя его выполнение. Выбор номера l разветвления кустового выхода второго типа, на котором формируется Sgd , определяется путем розыгрыша жребия второго типа [6] по вектору вероятностей $\{P_{kl}\}$

($0 \leq P_{kl} \leq 1; \sum_{l=1}^{d_k} P_{kl} = 1$). Кустовые выходы

третьего типа могут формировать на разветвлениях любую запланированную комбинацию действительных и фиктивных сиг-

налов, обеспечивающую активизацию резервных $AMTXO_{ij}$ в зависимости от того, имели ли место аварийные ситуации при выполнении $AMTXO_{ij}$, формирующих входные сигналы на входе $ASOB_j$.

Связи между $ASOB_i$, $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_j$ осуществляются с помощью сигналов сложной структуры:

$$Sgd = (ts, i, tv, k, l, j, r), \quad (1)$$

где (i, tv, k, l) – адрес отправителя сигнала (i – номер $ASOB_i$, tv – тип кустового выхода, k – номер выхода, l – номер разветвления на кустовом выходе);

(j, r) – адрес получателя сигнала (j – номер $ASOB_j$, r – номер входа);

ts – тип сигнала по отношению к агрегату $AMTXO_{ij}$ (IP – входной прямой, OP – выходной прямой, II – входной инверсный, OI – выходной инверсный).

Агрегаты $AMTXO_{ij}$ являются четырехполюсниками, функционирующими вначале в режиме прямой имитации, а затем переходящими в режим инверсной имитации. Поведение агрегата-многополюсника $ASOB_i$ программируется до начала имитации. Для этой цели на кустовых выходах второго и третьего типов необходимо указать значения компонентов соответственно вектора вероятностей $\{P_{kl}\}$ формирования сигнала Sgd и булевой матрицы $\|\gamma_{klr}\|$ включения резервных $AMTXO_{ij}$. При необходимости формирования действительного сигнала Sgd на l -м разветвлении k -го выхода $ASOB_j$ в случае появления на r -м входе агрегата признака $\pi_{ar} = 1$, означающего факт возникновения аварии до инициализации агрегата $ASOB_j$, необходимо установить в единицу значение γ_{klr} элемента указанной матрицы. Формирование выходных сигналов агрегатов $ASOB_j$ происходит при срабатывании его «спусковой функции» в момент прихода в режиме прямой имитации самого позднего входного сигнала.

Рассылка сигналов типа IP от $ASOB_i$ с выходов третьего типа осуществляется согласно таблице коммутации агрегатов, которая составляется исследователем до постановки имитационных экспериментов (ИЭ) с ИМ ВСГР. После выдачи множества выходных сигналов в момент времени t_0 аг-

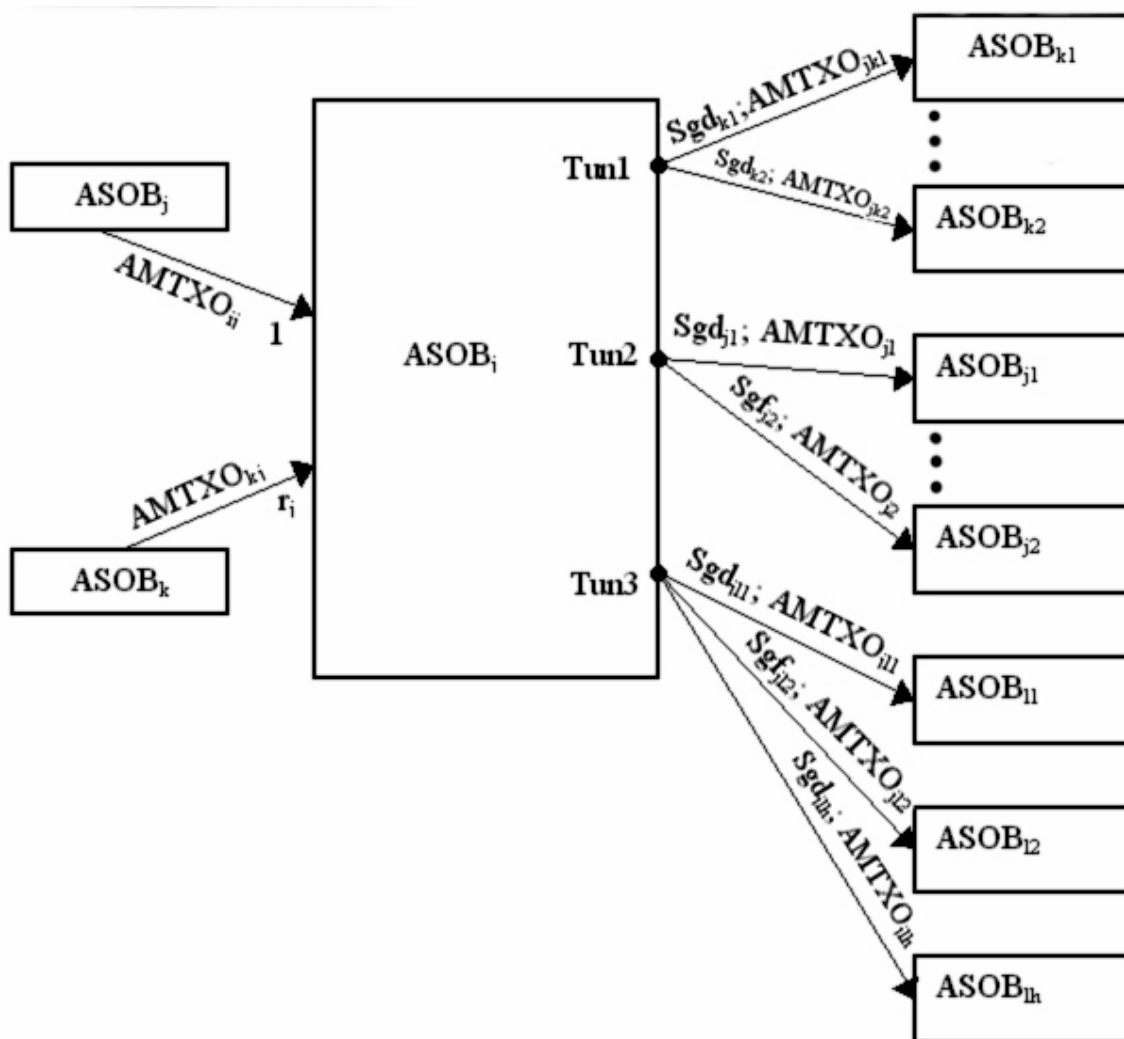


Рисунок. Пример адресации действительных (Sgd_k) и фиктивных (Sgf_{jk}) сигналов с выходов агрегата $ASOB_j$

агрегат $ASOB_i$ ожидает прихода первого выходного сигнала от $AMTXO_{ij}$ в режиме инверсной имитации. В этот момент инверсного времени t_0^l фиксируется поздний срок свершения события (t_{nij}) и со всех входов $ASOB_i$ формируются сигналы типа II, поступающие на инверсные входы агрегатов $AMTXO_{ij}$, связанные с входами $ASOB_i$. Далее агрегат $ASOB_i$ ожидает прихода прямого входного сигнала от $AMTXO_{ki}$ в режиме прямой имитации следующей реализации ВСГР согласно процедуре Монте-Карло.

Агрегаты $AUZL_i$ также являются многополюсниками с различным количеством входов ($r = \overline{1, R_1}$) и другим числом выходов ($l = \overline{1, R_2}$), что обусловлено структурой матрицы перехода ПММ из состояния в состояние (r – предыдущее, l – последующее). До начала имитации ВТПП в качестве

параметров $AUZL_i$ необходимо задать: матрицу вероятностей перехода ПММ в различные состояния $\|P_{rl}\|$; вектор вероятностей выбора номера (rl) в качестве начального состояния $\{P_{nr1}\}$; вектор вероятностей выбора номера (rl) в качестве конечного состояния ПММ $\{P_{kr1}\}$. В тех случаях, когда условия окончания имитации таковы, что момент завершения l -й реализации ПММ трудно достижим, задается функция распределения максимально допустимого количества переходов $F(v)$. В начале l -й реализации ПММ по $F(v)$ формируется граничное количество переходов ПММ (v_1). При имитации переходов ПММ агрегатом $AUZL_i$ подсчитывается фактическое количество переходов v_ϕ . Момент завершения l -й реализации ПММ соответствует выполнению условия $v_\phi \geq v_1$. Начало имитации ВТПП полумарковской моделью формиру-

ется агрегатом $AUSL_i$ по вектору вероятностей $\{P_{nrl}\}$, а конец имитации контролируется либо по вектору вероятностей $\{P_{krl}\}$, либо по счетчику количества переходов ПММ ($v_\Phi \geq v_1$).

Агрегаты $AOBIN_k$ имитируют применение агрегатами $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ оборудования индивидуального использования в старт-стопном режиме. Параметрами $AOBIN_k$ являются:

- функция распределения $F_{1k}(\tau_{BO})$ интервала безотказной работы агрегата $AOBIN_k$;

- функция распределения $F_{2k}(\tau_{BO})$ интервала восстановления работоспособности агрегата;

- вероятность (P_{Ak}) того, что во время отказов произойдет авария;

- функция распределения интервала ликвидации аварии $F_{3k}(\tau_{AB})$ на $AOBIN_k$;

- функция распределения дополнительной стоимости выполнения $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ на $AOBIN_k$ при восстановительных работах $F_{sk}(\Delta c_{BO})$ и при ликвидации аварий $F_{sk}(\Delta c_{AB})$.

В момент запуска $AOBIN_k$ задается длительность (τ_{ijl}) его использования агрегатами $AMTXO_{ij}$ и $ASOST_{ij}$ в l -й реализации ВСГР или ПММ. Проверяется выполнение неравенства

$$\tau_{ijl} \geq \tau_{BOkl}, \quad (2)$$

где τ_{BOkl} - интервал безотказной работы $AOBIN_k$ в l -й реализации, формируемой по функции распределения $F_{1k}(\tau_{BO})$.

Выполнение (2) означает, что при функционировании $AOBIN_k$ длительностью τ_{ijl} произойдет отказ. В этом случае по функции распределения $F_{1k}(\tau_{BO})$ разыгрывается значение интервала восстановления τ_{BOl} и время имитации увеличивается до значения $\tau'_{ijl} = \tau_{ijl} + \tau_{BOl}$. Затем по вероятности (P_{Ak}) разыгрывается жребий «произошла авария» и в случае положительного результата осуществляется вторая модификация времени имитации агрегатом $AOBIN_k$:

$$\tau''_{ijl} = \tau'_{ijl} + \tau_{ABl}, \quad (3)$$

где τ_{ABl} - длительность интервала ликвидации аварии, разыгрываемой по функции распределения $F_{3k}(\tau_{AB})$. Одновременно с этими коррекциями длительности выполнения времени имитации агрегатом $AOBIN_k$ по функциям распределения $F_{4k}(\Delta c_{BO})$ и $F_{5k}(\Delta c_A)$ формируются значения дополнительных стоимостей восстановительных (Δc_{ol}) и ликвидационных (Δc_{Al}) работ на $AOBIN_k$. В итоге τ_{Aijl} равно либо τ_{ijl} , либо τ'_{ijl} , либо τ''_{ijl} . После всех этих корректировок времени выполнения имитируется функционирование агрегата $AOBIN_k$ длительностью τ_{Aijl} .

Агрегат $AOBOR_k$ имитирует функционирование оборудования общего пользования в режиме непрерывного функционирования. В качестве параметров $AOBOR_k$ задаются функции распределения $F_{1k}(\tau_{BO})$, $F_{2k}(\tau_{BO})$, $F_{3k}(\tau_{AB})$, $F_{4k}(\Delta c_{BO})$ и $F_{5k}(\Delta c_A)$. С момента первого запуска $AOBOR_k$ в l -й реализации ИМ ВТПП формируются значения τ_{BOkl} , τ_{BOkl} , τ_{ABkl} , Δc_{BOkl} , Δc_{Akl} . Как только при работе $AOBOR_k$ возникает состояние «Произошел отказ», то с этого момента времени агрегат переходит в нерабочее состояние длительностью ($\tau_{BOkl} + \tau_{ABkl}$) и включается индикатор его неработоспособности $\pi_{MP_k} = 1$. По окончании этого интервала времени π_{MP_k} становится равным нулю.

Агрегат $AKAN_k$ имитирует использование оборудования общего пользования объемом V_{rijl} агрегатами $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ в тех случаях, когда этот ресурс общего оборудования закреплен за этими агрегатами. В момент запроса агрегатами $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$ оборудования общего пользования происходит обращение к $AKAN_k$, являющегося имитатором использования этого объема на оборудовании общего пользования. Если в процессе использования $AKAN_k$ в течение интервала времени длительностью τ_{ijl} оказывается, что на этом интервале времени возникает отказ в работе $AOBOR_k$, то имитируется задержка выполнения заказа на $AKAN_k$ до момента восстановления работоспособности агрегата $AOBOR_k$ с последующим повторением ис-

пользования $AKAN_k$ длительностью τ_{ijl} .

Агрегат $APROC_k$ имитирует выполнение процедур ликвидации аварий при выполнении агрегатов $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$. Предполагается, что оборудование, материалы, комплектующие изделия и бригады исполнителей заранее зарезервированы за каждым $APROC_k$, и поэтому конкуренции за ресурсы ВТПП у агрегатов $APROC_k$ нет. В качестве параметров $APROC_k$ задаются только функции распределения времени и стоимости ликвидации аварий $F_{1k}(\tau_{ЛА})$ и $F_{2k}(c_{ЛА})$. При инициализации $APROC_k$ по этим функциям распределения разыгрывает значения времени и стоимости ($\tau_{ЛАi}$ и $c_{ЛАi}$) выполнения агрегатом его функций в l -й реализации ИМ ВТПП. Затем имитируется выполнение агрегатом $APROC_k$ его функций длительностью $\tau_{ЛАi}$ оператором ожидания, после чего фиксируется статистика: загрузки агрегата; стоимости ликвидационных мероприятий; расхода материалов и комплектующих изделий; использования оборудования и бригад исполнителей.

У каждого $APROC_k$ имеется свой преемник, поскольку все агрегаты объединены в виде списковых структур. Завершается имитация функций $APROC_k$ инициализацией следующего агрегата по списку агрегатов ликвидации аварии, возникшей при выполнении $MTXO_{ij}$.

2. Агрегатная система моделирования вероятностных технологических процессов производства

Для автоматизации этапов построения ИМ ВТПП и постановки серий ИЭ согласно процедуре Монте-Карло система автоматизации моделирования САМ ТПП [4] была существенно модифицирована благодаря расширению состава библиотеки агрегатов-имитаторов (LIB.AGREG) и двух версий управляющей программы моделирования агрегатов (UPMASGR и UPMAPMM), разработки двух версий подсистем формирования графовой структуры объекта исследования (PS.FORMSG и PS.FORPMM), созданию двух версий информационных баз данных (IBDSGR и IBDPMM).

Подсистемы реализации ИЭ согласно процедуре Монте-Карло (PS.MONTEK), об-

работке результатов имитации ВСГР (PS.OBRABOT), визуализации результатов ИЭ (PS.VIZUAL) модифицированы незначительно. Управление взаимодействием агрегатов друг с другом в составе ИМ ВТПП обеспечивается набором операторов организации квазипараллелизма САМ ВТПП. Каждый агрегат представляет собой объединение нескольких программ активностей, заканчивающихся одним из операторов квазипараллелизма и возвращающих управление имитацией управляющей программе моделирования.

В связи с различным характером имитации ВСГР и ПММ в данной версии реализации САМ ВТПП не допускается совместное использование ИМ, построенных на принципах сетевого планирования и на моделирования полумарковских процессов. Поэтому если исследователь использует в качестве основы формализации вероятностные сетевые графики, то ИМ ВТПП функционирует под управлением UPMASGR. Для случая формализации ИМ ВТПП с помощью полумарковских моделей управление имитацией осуществляет UPMAPMM. Общими для обоих типов ИМ ВТПП являются агрегаты $AOBIN_k$, $AOBOP_k$, $AKAN_k$, $APROC_k$. В состав ИМ ВТПП первого типа добавляются агрегаты $ASOB_j$ и $AMTXO_{ij}$, а также версия ИБД СГР (IBDSGR). В состав ИМ ВТПП второго типа добавляются агрегаты $AUZL_j$ и $ASOST_{ij}$ вместе с соответствующей версией ИБД ПММ (IBDPMM). Подсистемы PS.MONTEK, PS.OBRABOT, PS.VIZUAL обеспечивают динамику имитации в обоих типах ИМ ВТПП. Для компоновки агрегатов в ИМ ПММ исследователю достаточно указать только исходную информацию для имитации ВТПП полумарковской моделью. Последовательный характер следования $AUZL_j$ и $ASOST_{ij}$ позволяет ограничиться только двумя программами этих агрегатов, обеспечив при этом необходимое количество узлов и переходов ПММ из состояния в состояние за счет дублирования информации в базе данных ПММ, необходимой для имитации ВТПП в каждом состоянии. Аналогичным образом при моделировании ВТПП аппаратом ВСГР используют только две реентерабельные программы агрегатов $ASOB_j$ и $AMTXO_{ij}$, обес-

печивая необходимое количество одновременно выполняющихся агрегатов $ASOB_j$ и $AMTXO_{ij}$ за счет дублирования информации в базе данных ВСГ.

Алгоритмическая часть агрегатов реализована в среде системы программирования Delphi 5.0 [7]. Поэтому язык моделирования САМ ВТПП представляет собой расширение объектно-ориентированного языка программирования Object Pascal благодаря добавлению типовых операторов организации квазипараллелизма между компонентами ИМ: «ждать», «пустить», «продолжить», «остановить». Организация взаимодействия агрегатов с управляющими программами моделирования основана на следующих принципах:

1. Активизация активностей агрегатов обеспечивается управляющими программами моделирования на основании следующих операторов: пуска агрегатов; продолжения выполнения агрегатов; останова алгоритма выполнения агрегатов; ожидания выполнения условий активизации агрегатов; ожидания времени выполнения агрегатов; формирования одиночных или групповых сигналов на выходах и входах $ASOB_j$.

2. После установки оператора взаимодействия агрегатов алгоритм выполнения агрегата прерывается, что означает окончание соответствующей активности агрегата и возврат из программы агрегата на управляющую программу моделирования.

3. Каждый оператор взаимодействия агрегатов становится в собственную очередь на активизацию агрегатов, которую управляющая программа моделирования обслуживает в соответствии с установленными приоритетами.

4. Выбор запросов из очереди на активизацию осуществляется при одном и том же модельном времени. По информации, хранящейся в запросе, формируется адрес передачи управления на соответствующую активность агрегата. По завершении выполнения алгоритма этой активности происходит возврат на UPMASGR и UPMAPMM.

5. По окончании просмотра всех очередей реализации всех запусков и продолжений алгоритма агрегатов инициируется процедура возврата ресурсов ВТПП, выде-

ленных агрегатам $ASOST_{ij}$ и $AMTXO_{ij}$. Затем проверяется выполнение всех условий ожидания агрегатов и возможность составления очереди запросов на запуск соответствующих активностей, у которых завершились условия их ожидания. Осуществляется повторный выбор запросов из очередей на активизацию агрегатов.

6. Только после завершения всех запусков агрегатов, которые должны быть реализованы в модельное время t_{0l} , включается процедура его изменения. В основу изменения модельного времени положен способ организации квазипараллелизма «до ближайшего события» в модели.

7. Формируется список активностей агрегатов (SAA), алгоритмы которых необходимо начать выполнять в новое модельное время t_0 .

8. Проверяется условие окончания моделирования. Допускаются два способа окончания имитации: по достижении запланированного интервала времени моделирования (T_{mod}) и выполнении условия окончания имитации. В случае исследования ИМ ВТПП, построенных на основе вероятностных сетевых графиков, таким условием будет завершающее событие, имитируемое $ASOB_n$. В момент срабатывания спусковой функции $ASOB_n$ осуществляется фиксация статистики l -й реализации ВСГР, модельного времени (T_{kl}) и переход ВСГР в режим инверсной имитации.

9. Отметим, что в режиме прямой имитации модельное время t_0 растет от нуля до T_{kl} , поэтому момент будущей активизации агрегатов определяется по формуле

$$t_{Aij} = t_0 + \tau_{Bijl}. \quad (4)$$

В режиме инверсной имитации момент будущей активизации агрегатов определяется по формуле

$$t_{Aij} = t_0 - \tilde{\tau}_{Bijl}. \quad (5)$$

Поэтому в режиме прямой имитации все запросы на активизацию агрегатов в массиве активизации (MAGPI) упорядочены по возрастанию t_{Aij} , а выбор самой ранней активности осуществляется с первого элемента MAGPI. В режиме инверсной имитации все запросы на активизацию в массиве активизации (MAGIN) упорядочены по

убыванию t_{Aij} и выбор самой ранней активности означает выбор максимального значения из всех моментов активизации в массиве MAGIN (см. (4),(5)).

10. В режиме инверсной имитации операторы запуска агрегатов оборудования и $APROC_k$ не выполняются. Поэтому основным оператором организации квазипараллелизма является оператор ожидания агрегата в инверсном режиме.

11. Условием завершения инверсного режима имитации и перехода на режим прямой имитации будет срабатывание спусковой функции исходного события $ASOB_l$. При этом подсчитывается количество (N_R) реализаций имитации ВСГР и проверяется выполнимость условия окончания моделирования ВТПП ($N_R \geq N$, где N – запланированное количество реализаций согласно процедуре Монте-Карло). Отметим, что реализацией этого принципа организации имитации в ВС ГР занимается подсистема MONTEK. Это означает, что по окончании моделирования UPMASGR передает управление на MONTEK.

В заключение рассмотрения алгоритмов управления имитацией отметим, что при исследовании ИМ ВТПП на основе аппарата полумарковских процессов используется UPMAPMI. Принципы реализации этой программы аналогичны первым семи принципам функционирования UPMASGR. Условия окончания имитации могут быть другими: либо по достижении t_0 значения T_{mod} , либо по достижении агрегатом $ASOST_{ij}$ завершающего состояния. В этот момент осуществляется передача управления на PS.MONTEK для организации новой реализации ПММ согласно процедуре Монте-Карло.

3. Технология использования САМ ВТПП

Эта технология реализуется последовательностью этапов создания, испытания и использования ИМ ВТПП.

На *этапе 1* задается структура ВСГР. Вначале формируется таблица параметров $AMTXO_{ij}$ или $ASOST_{ij}$. Для отображения ИМ ВСГР создается таблица коммутации агрегатов $AMTXO_{ij}$ с $ASOB_i$ и $ASOB_j$, в которой все элементы упорядочены по возрастанию

номеров агрегатов. Структура Sgd формируется в режиме диалога, и они записываются группами по $ASOB_j$ в порядке возрастания их номеров, размер группы определяется количеством выходов $ASOB_j$. Таблица выходов коммутации хранит выходные сигналы в порядке возрастания номеров событий. В случае имитации ВТПП с помощью ПММ формируется таблица параметров $ASOST_{ij}$, похожая по структуре на таблицу параметров $AMTXO_{ij}$. Для отображения специфики переходов ПММ из состояния в состояние задаются: матрица вероятностей перехода $\|P_{ij}\|$; векторы вероятностей начального и конечного состояний ПММ $\{P_{ki}\}$ и $\{P_{kj}\}$; функция распределения количества переходов из состояния в состояние $F_i(v)$.

На *этапе 2* организуется натурный эксперимент на ВТПП для получения исходной информации, последующей проверки адекватности ИМ реальному ВТПП. Для тех параметров ВСГР или ПММ, определение значений которых трудно измерить их, используются экспертные оценки. Основная сложность в подготовке исходной информации заключается в установлении вероятностных характеристик $AMTXO_{ij}$ и $ASOST_{ij}$. В тех случаях, когда не удается найти аналитический вид для аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления, которая стандартизирована для всех типов параметров.

На *этапе 3* осуществляется запись параметров $AMTXO_{ij}$ в IBDSGR или $ASOST_{ij}$ в IBDPMM. При каждой записи значений параметров происходит их преобразование во внутреннее представление, контроль корректности этих описаний и вывод результатов контроля на дисплей для устранения ошибок в описании ВСГР и ПММ. Взаимодействие исследователя с САМ ВТПП осуществляется путем использования набора «меню» в режиме «вопрос-ответ». В итоге синтаксического анализа ошибки описания ВСГР и ПММ будут исправлены.

На *этапе 4* таблицы коммутации агрегатов $ASOB_i$ и $ASOB_j$ $AMTXO_{ij}$ проверяются на соответствие входов и выходов четырехполюсников $ASOB_j$. Любое дублиро-

вание входов в $AMTXO_{ij}$ или $ASOB_i$ немедленно фиксируется и формируется соответствующее сообщение исследователю на дисплей. Далее осуществляется автоматическая проверка входов в $ASOB_i$ как при прямой (слева направо), так и при инверсной имитации (справа налево). Все выявленные несоответствия сообщаются исследователю и затем в режиме диалога исправляются ошибки коммутации агрегатов, а по окончании этапа выдается структура таблиц коммутации, в которых отсутствуют синтаксические ошибки.

На *этапе 5* происходит инициализация и верификация базового варианта ИМ ВТПП. Задается начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей, агрегатов-имитаторов оборудования и множества $\{APROC_k\}$. САМ ВТПП по указанию типа модели (ВСГР или ПММ), режима моделирования, количества реализаций, условий хранения и обработки статистики имитации формирует управляющие справочники и массивы хранения информации, используемые системой моделирования для организации реализаций имитационных экспериментов с ИМ ВТПП. Осуществляется начальный запуск имитации базового варианта ИМ ВТПП первой версии его реализации. Далее САМ ВТПП позволяет исследователю в режиме «пошагового выполнения» просмотреть переходы всех агрегатов из состояния в состояние с автоматической документацией этого просмотра. В результате достигается автоматизация процедуры верификации ИМ ВТПП в обоих режимах его имитации. В общем случае не существует формальных процедур проведения верификации ИМ ВТПП. Поэтому этот этап не автоматизирован в среде САМ ВТПП.

На *этапе 6* осуществляется испытание и исследование свойств ИМ ВТПП. Все шаги этого этапа стандартизированы на основе реализации известных методик испытания ИМ сложных систем [8]. Вначале оценивается ошибка имитации (ϵ %), означающая максимальный процент ошибок откликов модели. Определяется длина переходного периода имитации ($T_{пп}$), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех переходит в установившееся состояние. Важным

шагом испытания ИМ ВТПП является проверка «устойчивости» режима имитации. Проверяется отсутствие переходов ИМ ВТПП в такой режим, когда у любого из откликов ИМ возможен рост амплитуды его изменения с ростом модельного времени t_0 . Следующим шагом испытания ИМ ВТПП является проверка «чувствительности откликов» к изменениям параметров моделирования. Каждая составляющая вектора параметров модели (X_r) изменяется в диапазоне от минимального (X_r^-) до максимального (X_r^+), а остальные компоненты вектора параметров X_r устанавливаются в середине интервалов их изменения. Вычисляется приращение компонентов вектора откликов ΔY_h % и проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов ΔY_h % $< \epsilon$ %, то считают, что ИМ ВТПП нечувствительна к вариациям вектора параметров. Те параметры X_r , которые оказались нечувствительными, можно в дальнейшем исследовании исключить. Последним шагом этапа испытания ИМ ВТПП является проверка адекватности ИМ реальному ВТПП. Сравниваются средние значения откликов ИМ ВТПП в модели и указывается, какой из откликов реального ВТПП можно выбрать в качестве контролируемого. При этом используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений j -го отклика ИМ и реального ВТПП, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента [9].

На *этапе 7* организуется серия многократных ИЭ согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый ИЭ представляет l -ю реализацию ИМ ВТПП. Одна реализация ВСГР представляет определение ранних сроков свершения событий с отображением конкуренции $AMTXO_{ij}$ за ресурсы ВТПП, фиксацией их расхода в режиме прямой имитации и переход в режим инверсной имитации с определением поздних сроков и резервов свершения событий. По окончании l -й реализации ВСГР находится критический путь (КРП $_l$). Все статистики имитации ВСГР запоминаются в IBDSGR.

По завершении N реализаций ИМ ВТПП в IBDSGR уже сформированы вы-

борки откликов реализации событий в ВСГР ($\{t_{pil}\}, \{t_{nil}\}, \{R_{il}\}, \{КРП_l\}, l = \overline{1, N}$). В IBDSGR хранятся также выборки откликов использования ресурсов ВТПП: коэффициентов использования ресурсов k -го типа $\{K_{kl}\}$; стоимость реализации ВТПП $\{C_{tnl}\}$; суммарных размеров r -го типа ресурсов ВТПП $\{V_{erl}\}$. Одна реализация ПММ представляет собой определение откликов ВТПП, статистик использования ресурсов ВТПП. Откликами являются время реализации ВТПП (T_{pmn}) и коэффициенты использования ресурсов ВТПП k -го типа (η_{kl}), стоимость реализации ВТПП (C_{tnl}). После завершения N реализаций ИМ ВТПП в IBDSGR сформированы выборки откликов ПММ ($\{T_{pnl}\}, \{\eta_{kl}\}, \{C_{tnl}\}$). Кроме того, к концу этапа 7 в базе данных САМ ВТПП для каждой реализации ВТПП хранятся диаграммы: использования оборудования, изменения суммарной стоимости реализации АМТХО_{ij} или ASOST_{ij}, суммарного расхода материалов и комплектующих деталей, использования общих ресурсов. Отметим, что эти диаграммы имеют одинаковую форму для обоих типов ИМ ВТПП.

На *этапе 8* с помощью PS.OBRABOT из выборок, хранящихся в IBDSGR, формируются функции распределения перечисленных откликов, математических ожиданий и дисперсий этих откликов. Все ASOB_i ранжируются по значениям R_i, являющимся оценками соответствующих математических ожиданий. Агрегаты ASOB_i, у которых R_i максимальны, позволяют установить множество АМТХО_{ij}, являющихся кандидатами на изъятие у них ресурсов с целью их перераспределения на АМТХО_{ij}, находящихся на наиболее вероятном критическом пути ВКРП исследуемого ВСГР. Определение ВКРП осуществляется по множеству критических путей $\{КРП_l\}$. Все КРП_l налагаются друг на друга, в итоге формируется граф критических путей GRKRP с помощью соответствующей подпрограммы анализа в составе САМ ВТПП (ПАНКРП_l). Фактически ПАНКРП_l реализует технологию анализа ВСГР, но вместо АМТХО_{ij} и ASOB_i выступают не все агрегаты ИМ ВТПП, а только те АМТХО_{ij} и ASOB_i, которые входят в состав $\{КРП_l\}$. В итоге нескольких итераций анализа GRKRP

удается определить ВКРП.

На *этапе 9* все диаграммы использования ресурсов ВТПП сопоставляются друг с другом в едином масштабе изменения модельного времени t_0 , а затем по ним определяются диапазоны расхода ресурсов ВТПП. Вывод графиков изменения перечисленных статистик имитации стандартизирован и осуществляется с помощью PS.VIZUAL по запросам пользователя, при этом автоматизируется весь процесс получения на ИМ информации о динамике использования и расходе ресурсов ВТПП. Вновь сформированные функции распределения значений откликов можно использовать при переходе от имитации на нижнем уровне представления (ВСГР₂ или ПММ₂) компонентов ВТПП к верхним уровням представления ВТПП (ВСГР₁ или ПММ₁).

На *этапе 10* с помощью PS.RESHEN осуществляется анализ результатов моделирования ВТПП и принятие проектных решений. В этой подсистеме реализуются известные методики анализа данных на основе классических критериев принятия решений в условиях неопределенности и риска [9].

Заключение

Изложенная технология исследования производственных систем ориентирована на случаи, когда динамику функционирования ВТПП можно формализовать на основе сочетания аппаратов сетевого планирования и полумарковских процессов. Это обстоятельство несколько сужает область применения САМ ВТПП и технологии ее использования, однако высокий уровень предлагаемой автоматизации исследований, универсальный характер структуры ИМ ВТПП и простота их описания с помощью ВСГР и ПММ обеспечивают перспективу ее развития и широкого использования при проектном моделировании вариантов организации ВТПП, а наличие у САМ ВТПП средств пополнения состава библиотек и подсистем дают возможность ее применения при проектировании технологических процессов производства в самых разных предметных областях. Подтверждением такой возможности служит создание новой версии САМ ТПП, расширяющей состав

методов анализа ВТПП путем добавления средств их формализации на основе сочетания имитационных моделей сетевого планирования с полумарковскими моделями.

Отметим, что гибкость структуры САМ ВТПП позволяет организовать оперативное исследование динамики использования и расхода ресурсов сложных ВТПП, текущий анализ надежности функционирования оборудования, прогностический анализ возможностей резервирования производственных ресурсов и оборудования для разработки комплекса мер повышения надежности и аварийной безопасности производственных систем, а также позволяет осуществлять управление резервированием и восстановительными операциями при возникновении техногенных аварий и катастроф в промышленности и других сферах производственной деятельности.

1. Михалевич В.С., Кукса А.И. Методы последовательной оптимизации в дискретных сетевых задачах оптимального распределения ресурсов. – М.: Наука, 1983. – 208 с.
2. Исследование операций. Математические основы и математические методы: Пер. с англ. / Х. Майзер, Н. Эйджин, Р. Тролл и др., под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – Т.1. – 712 с.
3. Исследование операций. Модели и применения: Пер. с англ. / Р. Браун, Р. Мэзон, Э. Фламгольц и др., под ред. Дж. Моудера и С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – Т.2. – 677 с.
4. Система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов, реализующая агрегатный способ имитации / И.В. Максимей, В.С. Смородин, Е.И. Сукач, И.В. Соболев // Проблемы программирования. – 2004. – № 4. – С. 25 – 31.
5. Жогаль С. П., Максимей И. В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
6. Максимей И. В., Серегина В. С. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: учебное посо-

бие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.

7. Фаронов П.В., Шумаков В.В. Delphi 5. Руководство разработчика баз данных. – М.: Нолидж, 2000. – 640 с.

8. Максимей И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 222 с.

9. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: учебное пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П. огаль и др. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.

Получено 18.05.05

Об авторах

Максимей Иван Васильевич
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой

Гончаров Александр Николаевич
соискатель ученой степени канд. техн. наук

Гируц Павел Леонидович
аспирант

Смородин Виктор Сергеевич
канд. физ.-мат. наук, доцент

Место работы авторов

Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины
ул. Советская, 104
246020 Гомель, Республика Беларусь
Тел. 56 4237
E-mail: mpu@gsu.unibel.by,
smorodin@gsu.unibel.by

Гомельский инженерный институт МЧС
ул. Речицкое шоссе, 35
246000 Гомель, Республика Беларусь
Тел. 41 4898