

## Метод и программные средства для исследования производственных систем с последовательной организацией

А. В. КЛИМЕНКО

### Введение

Вероятностные технологические процессы производства (ВТПП) с последовательной организацией являются широко распространенными в сфере производственной деятельности промышленных предприятий, что обусловило актуальность дальнейшей разработки эффективных методов их исследований. Это связано, в первую очередь, с тем, что реально функционирующие технологические процессы характеризуются случайными отклонениями параметров технологических операций от заданных значений. Последнее, вообще говоря, может изменить конечную цель технологического цикла в ходе реализации процесса производства. Как известно [1], использование в таких случаях аналитических моделей не является достаточно эффективным средством при решении подобной проблемы, поскольку для исследуемого технологического процесса трудно заранее определить реальный порядок следования технологических операций. Данная ситуация определяется как степенью сложности конфигурации микротехнологических операций ( $МТХО_{ij}$ ,  $i, j = 1, \bar{N}$ ), входящих в состав выполняемой технологической операции, так и степенью ее надежности. В настоящей работе рассматриваются особенности формализации производственных систем с последовательной организацией технологического цикла, излагается метод их исследования, представляющий собой комбинацию полумарковских процессов и процедур Монте-Карло.

Приводятся также описание и состав компонентов имитационной модели с учетом особенностей вероятностных технологических процессов производства с последовательной организацией выполнения операций и предлагается технология использования системы автоматизации имитационного моделирования для данных объектов.

### 1 Особенности формализация ВТПП с последовательной организацией

Рассматриваются вероятностные технологические процессы производства для случая, когда переход производственной системы из состояния  $i$  в состояние  $j$  определяется матрицей вероятностей перехода  $\|p_{ij}\|$ , а время ее нахождения в каждом из состояний определяется функцией условного распределения  $F_{ij}(\tau)$  (времени нахождения системы в состоянии  $j$  при условии перехода в него из состояния  $i$ ). Вектор вероятностей возможных начальных состояний  $v_0$  и вектор вероятностей завершающего состояния  $v_k$  считается известным до начала моделирования.

Формализация последовательных технологических процессов производства в данном случае осуществляется на основе использования полумарковских моделей (ПММ) и имеет ряд особенностей, обусловленных спецификой объекта исследования. Возможные состояния производственной системы ( $i_k$ ) описываются векторами  $v_k$ , где  $k = \overline{1, N}$ . При этом начальное состояние ( $i_0$ ) разыгрывается по жребию 1-го типа с помощью вектора  $v_0$  вероятности нахождения системы в состоянии  $i_0$  [2]. Аналогичным образом описывается конечное состояние ( $p_N$ ) с помощью вектора  $v_N$ . При малой вероятности достижения конечного состояния

$p_N$  возникает необходимость задания функции  $F_0(v)$  распределения количества смен состояний, по которой разыгрывается число возможных смен состояний  $v_i$  в текущей реализации модели. При достижении значения  $v_i$  определяется момент окончания работы ПММ.

Стандартными переходами в полумарковской модели будем называть возможность выбора состояния  $j$  после состояния  $i$  по матрице вероятностей перехода  $\|p_{ij}\|$ . На практике, в процессе функционирования технологического цикла, часто возникают так называемые «нестандартные» ситуации, когда появляется необходимость резервирования устройств оборудования, перевода оборудования на общую профилактику или ликвидации поставарийной ситуации, что является другой особенностью моделирования рассматриваемых объектов. Для решения данной проблемы при имитации состояний технологического процесса непрерывно анализируются суммарные значения времени наработки  $Q_{nr}$  устройств оборудования и ситуации возникновения аварий ( $\pi_{av}=1$ ). При известных значениях пары показателей ( $Q_{nr}, \pi_{av}$ ) определяется необходимость принятия «нестандартного» решения с указанием детерминированного перехода в соответствующие состояния. Подобная ситуация изменяет структуру графа переходов ПММ из состояния  $i$  в состояние  $j$ , которая присуща для обычных вариантов переходов по матрице  $\|p_{ij}\|$ .

Откликами имитационной модели (ИМ) являются усредненные по всем реализациям ИМ время и стоимость нахождения последовательного технологического процесса в  $j$ -х состояниях:

$$T_j^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{lj}; \quad C_j^0 = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N C_{lj}, \quad (1)$$

общие значения времени и стоимости реализации технологического цикла

$$T^0 = \sum_{j=1}^N T_j^0; \quad C^0 = \sum_{j=1}^N C_j^0, \quad (2)$$

а также общие значения времени восстановления и ликвидации аварий в процессе его реализации

$$T_{VO} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{VOlj}; \quad T_{AV} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N T_{AVlj}. \quad (3)$$

Цель имитации состоит в минимизации значений компонентов вектора  $(T, C, T_{VO}, T_{AV})$ , при которой лучшим признается вариант организации технологического цикла, доставляющий минимум  $\Psi_0$  значению целевого функционала  $\Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV})$ :

$$\Psi_0 = \min \Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV}), \quad (4)$$

После усреднения результатов имитации в соответствии с процедурой метода Монте-Карло в виде графиков и диаграмм формируются интегральные статистики имитации.

## 2. Принципы организации имитации последовательных ВТПП

Имитация последовательных переходов ВТПП из состояния в состояние осуществляется с помощью агрегата-процесса  $PR.UZEL_t$ . При начальном запуске имитационной модели в справочнике  $TSOST$  таблицы базы данных ( $TBD$ ) актуализируется следующая информация: вектор  $v_0$  вероятностей начального состояния модели, с помощью которого вычисляется номер  $i_0$  данного состояния ПММ; вектор  $v_k$  вероятностей конечного состояния модели, с помощью которого определяется номер  $i_k$  этого состояния; функция распределения  $F_0(v)$  числа  $v_i$  смен состояний. При последующем использовании модели восстанавливается

начальное состояние ПММ в текущей реализации. Далее, по матрице  $\| p_{ij} \|$  повторяется цикл розыгрыша номера следующего состояния, который затем многократно выполняется для случая, когда число смен состояний  $\nu_i > 0$ . По матрице  $\| p_{ij} \|$  для существующего номера текущего состояния  $i$  формируется также номер следующего состояния  $j$ , который запоминается в справочнике модели *SPRM*, а затем с помощью процедуры выбора осуществляется стандартный запуск агрегатов-процессов (либо нестандартный запуск процессов при наличии аварий). Такими процессами, включаемыми по значениям характеристик предыдущего состояния (*UKAZ*) и указателя на наличие аварийной ситуации ( $\pi_{AV} = 1$ ), являются имитаторы состояний: ликвидации аварий (*PR.SOSTA<sub>i</sub>*); перехода на общую профилактику (*PR.SOSTP<sub>i</sub>*); одиночного резервирования (*PR.SOSTR<sub>i</sub>*); общего резервирования оборудования (*PR.SOSTOR<sub>i</sub>*).

На следующем шаге имитации иницируются процессы-имитаторы оборудования индивидуального пользования, затем иницируются процессы-имитаторы ресурсов общего пользования в состоянии  $ij$ . Процесс имитации при этом переходит в состояние ожидания окончания работы оборудования. При каждом завершении имитации процессы-имитаторы оборудования (*PR.OBIN* и *PR.KAN*) через управляющую программу моделирования (УПМ) возобновляют работу алгоритма *PR.SOST<sub>ij</sub>*. Как только имитация устройствами-имитаторами оборудования завершена полностью, выбирается функция распределения  $F_{ij}(\tau)$  длительностей нахождения модели в состоянии  $ij$  и определяется момент ее следующей активизации по времени  $t_s$  нахождения в состоянии  $ij$  ( $t_{aktij} = t_s + \tau_{ijl}$ ), после чего управляющей программой моделирования активизируется агрегат-процесс *PR.SOST<sub>ij</sub>*. По завершении процесса фиксируется статистика  $\tau_{ij}$  нахождения технологического процесса в состоянии  $ij$  и осуществляется учет использования ресурсов оборудования.

### 3 Средства автоматизации имитационного моделирования и технология их использования

В состав средств автоматизации имитационного моделирования входят управляющая программа моделирования (УПМ), библиотека *LIB.PROC* процессов-имитаторов, подсистема *PS.MONTEK* реализации имитационных экспериментов (ИЭ), подсистема *PS.OBRABOT* обработки результатов имитации и процедура *PR.VIZUAL* визуализации результатов ИЭ. Управление взаимодействием процессов *PR.SOST<sub>ij</sub>* и *PR.UZEL<sub>i</sub>* обеспечивается УПМ с помощью операторов организации квазипараллелизма на основе процессного способа имитации [1]. Каждый процесс представляет собой объединение нескольких программ-активностей, заканчивающихся одним из операторов синхронизации и возвращающим управление УПМ. Для компоновки процессов в имитационной модели достаточно указать исходную информацию для имитации технологического цикла полумарковской моделью. Последовательный характер следования процессов *PR.UZEL<sub>i</sub>* и *PR.SOST<sub>ij</sub>* позволил ограничиться только двумя программами этих процессов, обеспечив при этом нужное количество компонентов модели (узлов и переходов ПММ из состояния в состояние) за счет дублирования в базе данных ПММ информации, необходимой для имитации технологического процесса в каждом из состояний. Эти программы являются реентерабельными, чем обеспечивается выполнение всех компонентов имитационной модели. Алгоритмическая часть процессов-имитаторов реализована на языке программирования *Object Pascal* в среде визуального проектирования интегрированной среды *Delphi 5.0*.

Технология использования программных средств автоматизации имитационного моделирования реализуется рядом этапов создания, испытания и реализации имитационной модели технологических процессов производства с последовательной организацией. На *этапе 1* задается структура ВТПП. Вначале формируется таблица параметров  $PR.SOST_{ij}$  и создается таблица коммутации процессов, в которой все элементы упорядочены по возрастанию номеров. Для отображения надежностных характеристик оборудования задаются следующие матрицы: времени  $\|Q_{lr_{ij}}\|$  наработки оборудования; функций  $\|F_{1ij}(\tau)\|$  условного распределения времени пребывания ВТПП в текущих состояниях; функций  $F_{2ij}(C)$  условного распределения стоимости выполнения технологических операций; вероятностей  $\|P_{avkj}\|$  возникновения аварий на оборудовании номера  $k$  в  $j$ -м состоянии; времени  $\|F_{3ij}(\tau_{BO})\|$  безотказной работы  $k$ -го устройства оборудования; длины интервала  $\|F_{4ij}(\tau_{VO})\|$  восстановления работоспособности оборудования с номером  $k$ ; интервалов времени  $\|F_{5ij}(\tau_{AV})\|$  ликвидации аварийной ситуации на устройстве в  $j$ -м состоянии ВТПП. На *этапе 2* организуется натурный эксперимент для получения исходной информации и последующей проверки адекватности имитационной модели реальному технологическому процессу производства. Для тех параметров, которые сложно получить в натурном эксперименте, используются экспертные оценки их значений. Основную трудность в подготовке исходной информации представляет определение вероятностных характеристик  $PR.SOST_{ij}$ . В случаях, когда не удается найти аналитический вид для аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления, которая стандартизована для всех типов параметров. На *этапе 3* осуществляется запись параметров  $PR.SOST_{ij}$  в базу данных модели  $BDM$ . При каждой записи значений параметров происходит их преобразование во внутреннее представление, контроль корректности вводимых значений и вывод результатов контроля для устранения ошибок в описании ВТПП. Взаимодействие с пользователем осуществляется путём реализации диалога в режиме «вопрос–ответ». На *этапе 4* таблицы коммутации  $PR.SOST_{ij}$  с  $PR.UZEL_j$  проверяются на соответствие входов и выходов процессов. Любое дублирование информации фиксируется, и формируется соответствующее сообщение на экран монитора. По окончании этапа 4 выдаётся структура таблиц коммутации, в которой отсутствуют синтаксические ошибки описания модели. На *этапе 5* происходит инициализация и верификация базового варианта ИМ. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и оборудования ВТПП. Указываются условия окончания имитации, число реализаций процедуры Монте-Карло, условия хранения и обработки информации. Проводится начальный запуск имитации базового варианта имитационной модели. На *этапе 6* осуществляется испытание и исследование имитационной модели. Шаги данного этапа стандартизованы на основе известных методик испытания ИМ сложных систем: вначале оценивается ошибка имитации ( $\varepsilon\%$ ), представляющая собой максимальный процент ошибок откликов модели; определяется длина переходного периода имитации ( $T_s$ ), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех остальных переходит в установившееся состояние. Следующим шагом испытаний ИМ является проверка «чувствительности» откликов к изменениям параметров моделирования. Каждая составляющая вектора параметров модели ( $X_k$ ) изменяется в диапазоне от минимального ( $X_k^-$ ) до максимального ( $X_k^+$ ) значений, а остальные компоненты вектора параметров  $X_r$  устанавливаются в середине интервала ( $X_r^0$ ). Определяется приращение компонентов вектора откликов  $\Delta Y_h\%$  и проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов меньше  $\varepsilon\%$ , то считают, что ИМ не «чувствительна» к вариациям вектора параметров. Те параметры  $X_r$ , которые оказались не «чувстви-

тельными», можно в дальнейшем исследовании исключить. Последним шагом этапа испытания является проверка адекватности модели. Сравниваются средние значения откликов ИМ и реального ВТПП. При этом используется методика проверки адекватности, основанная на гипотезе о близости средних значений  $h$ -го отклика имитационной модели и реального технологического процесса производства, которая проверяется с помощью критерия Стьюдента. На *этапе 7* организуется серия многопрогонных имитационных экспериментов согласно процедуре Монте-Карло, в которой каждый ИЭ представляет  $l$ -ю реализацию ИМ. При завершении  $N$  прогонов имитационной модели в базе данных будут сформированы выборки статистик  $l$ -х реализаций. После проведения  $N$  опытов на имитационной модели из статистик имитации вычисляются отклики модели. Кроме того, к концу этапа 7 в базе данных имитационной модели формируются данные для выдачи графиков использования материалов и комплектующих изделий, а также диаграмм использования ресурсов и оборудования ВТПП. На *этапе 8* с помощью подсистемы *PS.OBRABOT* из выборок, хранящихся в базе данных, формируются графики и диаграммы, определяются математические ожидания и дисперсии откликов имитации. С помощью подсистемы *PS.VIZUAL* графики и диаграммы выдаются на печать. На *этапе 9* диаграммы использования ресурсов сопоставляются в едином масштабе изменения модельного времени. По этим графикам и временным диаграммам определяются диапазоны расхода ресурсов ВТПП с последовательной организацией. Результатом сопоставления является отбраковка тех режимов, которые требуют много ресурсов для своей реализации. Наконец, на *этапе 10* с помощью подсистемы *PS.RESHEN* анализируются варианты организации технологического цикла для осуществления последующего решения соответствующих задач проектного моделирования.

### Заключение

В работе излагаются способ имитации ВТПП с последовательной организацией технологического цикла, на основе анализа особенностей их функционирования, и принципы организации имитации. Рассмотрены средства автоматизации имитационного моделирования производственных систем с последовательной организацией. Существенными факторами при дальнейшем их использовании являются наличие средств пополнения состава библиотек имитационных подмоделей, унифицированных процедур и функциональных подсистем, а также простота технологии использования данной системы автоматизации моделирования.

**Abstract.** The paper considers the simulation of technological production processes with successive organization with the help of program-technological complex of simulation on the basis of the analysis of the functioning of successive probabilistic technological production processes.

### Литература

1. Максимей, И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И.В. Максимей; М.: Радио и связь, 1988. – 222 с.: ил.
2. Максимей, И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: учебное пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук, С.П. Жогаль; Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.