

УДК 007; 681.3

А. В. Клименко

УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»
ул. Советская, 104, 246019 Гомель, Республика Беларусь
andrejklimenko@tut.by

Технология имитационного моделирования процессов производства с последовательной организацией

Рассмотрен способ формализации процессов производства с последовательной организацией при наличии вероятностных характеристик технологических операций и возможности возникновения аварий оборудования. Описан подход к исследованию процессов производства на основе применения метода Монте-Карло, полумарковских процессов и процедур анализа операционной обстановки. Приведены состав и технология использования средств автоматизации имитационного моделирования для исследуемых объектов.

Ключевые слова: технологические процессы производства, полумарковская модель, программно-технологический комплекс имитации.

Введение

В последнее время исследованию технологических процессов производства постоянно уделяется значительное внимание. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что реально функционирующие технологические процессы характеризуются нарушениями выполнения технологического цикла, случайными отклонениями времени выполнения технологических операций от заданных параметров, а также возникновением аварий в ходе реализации производственного процесса. Как известно [1], использование в аналогичных случаях аналитических моделей не всегда является достаточно эффективным, поскольку для исследуемого технологического процесса нередко бывает трудно выделить отдельные технологические операции и определить порядок их следования.

Данная ситуация имеет место либо из-за недостаточной изученности объекта моделирования (что обычно встречается при проектном моделировании производственной системы), либо в силу сложной конфигурации микротехнологических операций ($МТХО_{ij}$, $i, j = \overline{1, N}$), входящих в состав технологического процесса производства. При этом может оказаться, что интегральные состояния технологического процесса, как результат многочисленных взаимодействий $МТХО_{ij}$, пре-

доставляют собой последовательную цепь событий. Подобные технологические процессы производства обычно называются последовательными. На практике последовательные процессы часто удается представить в виде полумарковских моделей (ПММ). При этом переход производственной системы из состояния i в состояние j определяется матрицей вероятностей перехода $\|p_{ij}\|$, а время нахождения производственной системы в каждом из состояний определяются функцией условного распределения $F_{ij}(\tau)$ времени нахождения системы в состоянии j при переходе в него из состояния i . Вектор вероятностей начальных состояний v_0 и вектор вероятностей завершающего состояния v_k задается до начала исследования. В тех случаях, когда заранее известны функции распределения вероятностных характеристик расхода ресурсов производственной системы, в качестве средства для построения имитационной модели объекта исследования можно использовать систему автоматизации имитационного моделирования, реализующую агрегатный способ имитации вероятностных технологических процессов производства [2]. Неадекватность реальным производственным системам, получаемым с использованием обычного математического аппарата моделей функционирования вероятностных технологических процессов производства [3], обусловила необходимость разработки новых подходов, средств автоматизации и технологий при исследовании технологических процессов с последовательной организацией технологического цикла.

В настоящей работе рассматриваются особенности формализации процессов производства с последовательной организацией технологического цикла, приводятся описание и состав компонентов имитационной модели. На основе анализа особенностей вероятностных технологических процессов производства (ТПП) с последовательной организацией излагается метод исследования, представляющий собой комбинацию метода Монте-Карло, полумарковских процессов и процедур анализа операционной обстановки технологического цикла. Предложена технология использования системы автоматизации имитационного моделирования и перспективы ее применения при проектном моделировании технологических процессов с последовательной организацией.

Формализация процессов производства с последовательной организацией технологического цикла

Формализация последовательных технологических процессов производства с помощью полумарковских моделей 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 [4]. 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 возмож-

ных 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}, π_{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 $\|p_{ij}\|$.

Для отображения процесса переходов производственной системы из состояния в состояние при нестандартных состояниях (наличии сбоев, отказов и аварий оборудования) задаются следующие переменные и параметры моделирования:

$\|Q_{nrkj}\|$ — матрица граничных значений времени наработки оборудования r -го типа с номером k в j -м состоянии ТПП для h -й реализации варианта ПММ;

$\|F_{1ij}(\tau)\|$ — матрица функции условного распределения времени нахождения в j -м состоянии после i -го состояния ТПП;

$\|F_{2ij}(C)\|$ — матрица функции условного распределения стоимости выполнения ТПП в j -м состоянии следующим за i -м;

$\|p_{avkj}\|$ — матрица вероятности возникновения аварий при использовании оборудования номера k в j -м состоянии ТПП;

$\|F_{3kj}(\tau_{BO})\|$ — матрица функции распределения длительности безотказной работы k -го устройства оборудования в j -м состоянии;

$\|F_{4kj}(\tau_{VO})\|$ — матрица функции распределения интервала восстановления работоспособности k -го устройства в j -м состоянии;

$\|F_{5kj}(\tau_{AV})\|$ — матрица функции распределения интервала ликвидации аварийной ситуации k -го устройства в j -м состоянии.

Откликами имитации ПММ, согласно процедуре Монте-Карло, являются усредненные по всем реализациям имитационной модели (ИМ) время и стоимость нахождения последовательного технологического процесса в j -х состояниях

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

общие значения времени и стоимости реализации технологического цикла

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

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

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

Целью имитации последовательного технологического процесса производства является минимизация значений компонентов вектора (T, C, T_{VO}, T_{AV}) . При этом лучшим признается вариант организации технологического цикла, доставляющий минимум Ψ_0 значению целевого функционала $\Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV})$:

$$\Psi_0 = \min \Psi(T, C, T_{VO}, T_{AV}) = \beta_1 T^* + \beta_2 C^* + \beta_3 T_{VO}^* + \beta_4 T_{AV}^* , \quad (4)$$

где $0 \leq \beta_i \leq 1$ — весовые коэффициенты важности компонентов целевой функции ($\sum_{i=1}^4 \beta_i = 1$); $T^*, C^*, T_{VO}^*, T_{AV}^*$ — нормированные значения времени, стоимости выполнения технологического процесса, а также времени восстановления функционирования оборудования и ликвидации аварийных ситуаций.

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

Принципы разработки имитационных моделей последовательных технологических процессов производства

Имитация переходов последовательного технологического процесса производства из состояния в состояние осуществляется с помощью агрегата-процесса *PR.UZEL_i* [5] следующим образом. В момент модельного времени t_0 происходит запуск процесса процедурой Монте-Карло текущей реализации имитационной модели с одновременным определением множества возможных состояний полумарковской модели технологического процесса производства. При начальном запуске 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 ве-

роятностей конечного состояния модели, с помощью которого определяется номер i_k этого состояния; функция распределения $F_0(v)$ числа v_l 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 $v_l > 0$. По матрице $\|p_{ij}\|$ для существующего номера текущего состояния i формируется номер следующего состояния j , который запоминается в справочнике модели $SPRM$. С помощью процедуры выбора осуществляется стандартный запуск агрегатов-процессов согласно матрице $\|p_{ij}\|$ (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 ($PR.SOSTA_i$); перехода на общую профилактику ($PR.SOSTP_i$); одиночного резервирования ($PR.SOSTR_i$); общего резервирования оборудования ($PR.SOSTOR_i$). Далее следует проверка условия завершения l -й реализации имитационной модели $l \leq N_M$, где N_M — количество реализаций имитационной модели (ИМ) ПММ. Если условия завершения l -й реализации имитации согласно процедуре Монте-Карло не выполняются, то процесс $PR.UZEL_j$ останавливается и переходит в состояние ожидания повторного запуска процессом $PR.SOST_{ij}$. В ходе имитации выполнения процесса $PR.UZEL_j$ в TBD накапливается следующая статистика «жизни» этого процесса: суммарное время выполнения процесса (T_{sumjk}) и число переходов ПММ в состояние $PR.SOST_{ij}$ (n_{sum}) в l -й реализации имитационной модели. В базе данных TBD процесса $PR.UZEL_i$ хранится также информация о структуре полумарковского процесса: по адресу α_4 находится матрица $\|p_{ij}\|$ вероятностей перехода ПММ из состояния в состояние; по адресу α_2 содержится функция распределения $F_0(v)$ числа смен состояний; по адресу α_3 хранится вектор вероятностей переходов в конечное состояние ($v_k = \{p_{k1}, \dots, p_{km}\}$); по адресу α_1 находится вектор вероятностей начального состояния ($v_{0H} = \{p_{01}, \dots, p_{0m}\}$).

На следующем шаге имитации иницируются процессы-имитаторы оборудования индивидуального пользования, а 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 своей работы процессы-имитаторы оборудования ($PR.OBIN$ и $PR.KAN$) через управляющую программу моделирования (УПМ) возобновляют работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$. Как только имитация устройствами-имитаторами оборудования завершена полностью, выбирается функция распределения $F_{ij}(\tau)$ длительностей нахождения модели в состоянии ij и определяется момент ее сле-

дующей активизации по времени t_s нахождения в состоянии ij ($t_{akt\ ij} = t_s + \tau_{ij}$), после чего управляющей программой моделирования активизируется агрегат-процесс $PR.SOST_{ij}$, затем фиксируется статистика τ_{ij} нахождения технологического процесса в состоянии ij и осуществляется учет использования ресурсов оборудования.

Для тех случаев, когда после перехода ij необходим нестандартный переход на экстремальные состояния, формируется указатель данной ситуации в виде переменной связи ($Ukaz = 1$) с $PR.UZEL_i$. В состояниях, во время имитации которых имела место авария на оборудовании, формируется другой указатель возникшей ситуации в виде переменной связи ($\pi_{AV} = 1$) с $PR.UZEL_i$. Во всех остальных случаях эти указатели обнуляются ($\pi_{AV} = 0$ и $Ukaz = 0$). Для розыгрыша следующего номера состояния процесса стандартным способом используется матрица $\|P_{ij}\|$ вероятностей переходов модели из состояния в состояние с учетом значений указателей. При этом процесс $PR.UZEL_i$ возобновляет работу алгоритма $PR.SOST_{ij}$ и переходит в режим ожидания повторного запуска, а выполнение алгоритма имитации повторяется согласно описанной выше последовательности процедур.

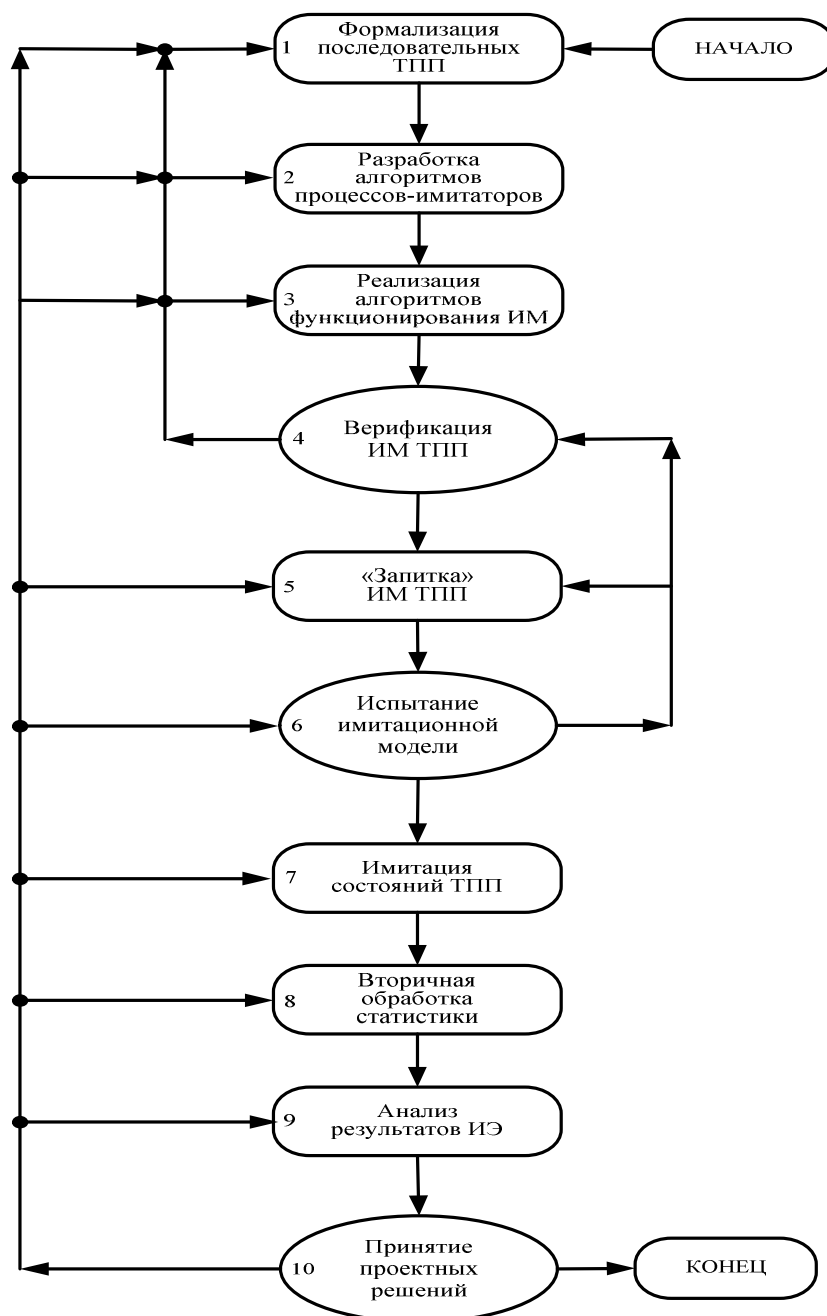
Блок-схема разработки имитационных моделей последовательных технологических процессов производства приведенная на рисунке, реализуется последовательностью из десяти этапов.

В ходе первых шести этапов на основе аппарата полумарковских процессов разрабатывается ИМ технологического процесса производства. Последние четыре этапа представляют собой эксплуатацию готовой имитационной модели.

Программные средства автоматизации имитационного технологических процессов с последовательной организацией

Для автоматизации этапов построения имитационных моделей технологических процессов последовательного типа и постановки серий имитационных экспериментов (ИЭ) согласно процедуре Монте-Карло разработан программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) на основе процессного способа организации квазипараллелизма. ПТКИ состоит из управляющей программы моделирования, библиотеки процессов-имитаторов ($LIB.PROC$), подсистемы реализации ИЭ согласно процедуре Монте-Карло ($PS.MONTEK$), подсистемы обработки результатов имитации ПММ ($PS.OBRABOT$), процедуры визуализации результатов ИЭ ($PR.VIZUAL$). Управление взаимодействием процессов $PR.SOST_{ij}$ и $PR.UZEL_i$ обеспечивается УПМ с помощью операторов организации квазипараллелизма на основе процессного способа имитации [5]. 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 $PR.UZEL_i$ и $PR.SOST_{ij}$ 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 две программы являются реентерабельными, чем обеспечивается выполнение всех компонентов имитационной модели.



Блок-схема этапов разработки имитационных моделей последовательных технологических процессов производства

После запуска операторов взаимодействия процессов алгоритм их выполнения прерывается, что означает окончание соответствующей активности процесса и возврат из программы процесса на управляющую программу моделирования. Каждый оператор взаимодействия процессов становится в очередь на активизацию, которую УПМ обслуживает в соответствии с установленными приоритетами. Выбор из очереди запроса осуществляется при одном и том же модельном времени t_0 для всех процессов. По информации в запросе формируется адрес передачи управления на соответствующую активность процесса. В результате просмотра всех очередей и реализации запусков алгоритма процессов инициируется процедура возврата ресурсов, выделенных процессам $PR.SOST_{ij}$. Проверяется выполнение условий ожидания процессов и запуска тех активностей, у которых завершились условия выполнения запросов на активизацию. Проверяется условие окончания моделирования в двух случаях: при выполнении условий окончания (процедура «Option») и по достижении запланированного интервала T_{mod} времени моделирования. В основу изменения модельного времени положен способ организации квазипараллелизма «до ближайшего события».

Алгоритмическая часть процессов-имитаторов реализована в системе визуального проектирования интегрированной среды *Delphi 5.0*, поэтому язык моделирования ПТКИ представляет собой расширение объектно-ориентированного языка программирования *Object Pascal* за счет добавления операторов организации квазипараллелизма между компонентами имитационной модели и управляющей программой типа ожидания, повторного запуска, продолжения и останова.

Технология использования средств автоматизации имитационного моделирования

Технология использования ПТКИ реализуется рядом этапов создания, испытания и реализации имитационной модели технологических процессов производства с последовательной организацией.

На **этапе 1** задается структура ТПП. 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 условного распределения времени пребывания ТПП в текущих состояниях $\|F_{1ij}(\tau)\|$; функций $F_{2ij}(C)$ условного распределения стоимости выполнения технологических операций; вероятностей возникновения аварий на оборудовании номера k в j -м состоянии $\|P_{avkj}\|$; времени безотказной работы k -го устройства оборудования $\|F_{3ij}(\tau_{BO})\|$; длины интервала восстановления работоспособности оборудования с номером k $\|F_{4ij}(\tau_{VO})\|$; интервалов ликвидации аварийной ситуации на устройстве в j -м состоянии ТПП $\|F_{5ij}(\tau_{AV})\|$.

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 ТПП. Взаимодействие с ПТКИ осуществляется путем использования программы «меню» 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 выдается структура таблиц коммутации, в которой отсутствуют синтаксические ошибки описания модели.

На **этапе 5** происходит инициализация и верификация базового варианта ИМ. Задается начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и оборудования ТПП. Указываются условия окончания имитации, число реализаций процедуры Монте-Карло, условия хранения и обработки информации. Проводится начальный запуск имитации базового варианта имитационной модели. При этом имеется возможность в режиме «пошагового» выполнения рассмотреть переходы процессов из состояния в состояние с автоматической документацией просмотра. Несмотря на то, что на практике не существует формальных процедур верификации ИМ, в составе ПТКИ имеются средства автоматизации наиболее трудоемких процедур этого процесса.

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 (ε %), представляющая собой максимальный процент ошибок откликов модели; определяются длина переходного периода имитации (T_s), означающая максимальное время стабилизации того отклика модели, который позже всех остальных переходит в установившееся состояние. Важной процедурой испытания является проверка «устойчивости» режима имитации. 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 ΔY_n % и проверяется их чувствительность к вариациям вектора параметров. Если приращение откликов меньше

ε % , то считают что ИМ не «чувствительна» к вариациям вектора параметров. Те параметры X_r , которые оказались не «чувствительными», можно в дальнейшем исследовании исключить. Последним шагом этапа испытания является проверка адекватности модели. Сравниваются средние значения откликов ИМ и реального ТПП. 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 ПТКИ формируются данные для выдачи графиков использования материалов и комплектующих изделий, а также диаграмм использования ресурсов и оборудования ТПП.

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 ТПП. 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 изложен подход к имитации технологических процессов производства с последовательной организацией с помощью программно-технологического комплекса имитации на основе анализа особенностей функционирования последовательных вероятностных технологических процессов производства методом исследования, который представляет собой комбинацию процедур Монте-Карло, полумарковских моделей и процедур анализа операционной обстановки технологического процесса.

Использование полумарковских моделей несколько сужает область применения программно-технологического комплекса имитации. Однако наличие у ПТКИ средств пополнения состава библиотек имитационных подмоделей, унифицированных процедур и функциональных подсистем, а также простота технологии использования данной системы автоматизации имитационного моделирования обеспечивают перспективы ее применения при решении следующих задач про-

ектного моделирования технологических процессов с последовательной организацией технологического цикла:

1) оценки времени реализации процесса производства и определения его проектной стоимости при наличии резервирования оборудования для повышения надежности производственной системы [6];

2) анализа влияния надежностных характеристик оборудования технологического процесса на время и стоимости реализации технологического цикла при заданном составе его ресурсов;

3) определения вероятностных характеристик реализации технологического процесса при известной структуре и надежности оборудования.

В заключении отметим, что гибкость структуры ПТКИ позволяет также организовать оперативное исследование динамики реализации технологического процесса при решении вопросов определения надежности и безопасности функционирования производственных систем.

1. *Зайченко Ю.П.* Исследование операций: Учебное пособие / Ю.П. Зайченко. — К.: Издат. дом. «Слово», 2002. — 688 с.

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

3. *Гончаров А.Н.* Об одной методике имитационного моделирования вероятностных технологических процессов производства / А.Н. Гончаров, И.В. Максимей, В.С. Смородин [и др.] // Математичні машини і системи. — 2008. — № 1. — С. 133–138.

4. *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.

5. *Сморозин В.С., Максимей И.В.* Методы и средства имитационного моделирования технологических процессов производства: монография / В.С. Смородин, И.В. Максимей // М-во образования РБ, Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. — Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2007. — 369 с.

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

Поступила в редакцию 22.04.2008