

УДК 681.3:007

*В. С. СМОРОДИН, кандидат физико-математических наук, Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь*

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Предложены принципы организации восстановительных операций на основе анализа операционной обстановки при моделировании процесса функционирования управляемой производственной системы. Исследуемый технологический процесс опасного производства представляется на трех уровнях его описания конечным множеством состояний. На первом и втором уровнях для описания замкнутого технологического цикла используются соответствующие вероятностные сетевые графики. В качестве работ рассматриваются технологические операции производственной системы. Динамика реализации последовательности операций может изменяться при возникновении аварий оборудования за счет выполнения последовательности процедур ликвидации аварий и операций резервирования. Отображение динамики развития функционирования производственной системы осуществляется с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов для узлов сетевого графика и задания количества разветвлений каждого из них. Применение подобного аппарата дает возможность пользователю модели реализовать динамическое регулирование выполнением технологических операций в зависимости от наблюдаемой операционной обстановки при реализации процесса.

**В** настоящее время на промышленных предприятиях республики активно развивается процесс переоснащения производственных мощностей, замена исчерпавшего ресурс оборудования новым высокоточным, позволяющим изготавливать оснастку для производства как импортозамещающей продукции, так и продукции для стратегически важных отраслей народного хозяйства. Данный этап развития производства характеризуется широким внедрением и использованием сложных технических систем, которые базируются на средствах вычислительной техники, включают в свой состав измерительные и управляющие комплексы, технологическое оборудование и обслуживающий персонал.

Исследовать последние традиционными математическими методами часто не представляется возможным ввиду того, что их поведение описывается таким большим количеством математических соотношений, что найти приемлемое решение возникающих оперативных задач в режиме реального времени сложно даже с помощью современной вычислительной техники. Ситуация усугубляется и тем, что законы функционирования подобных систем не всегда известны, в ряде случаев имеют вероятностную природу, а их поведение во многом определяется человеческим фактором, создающим дополнительную неопределенность при попытке его учета. К разряду таких систем относятся и потенциально техногенноопасные производственные системы, являющиеся во многом уникальными, что не позволяет использовать для их анализа данные и информацию, полученные на других аналогичных системах. Проблемы повышения эффективности функционирования различных звеньев в технике, экономике и производстве потребовали развития новых методов исследований, учитывающих указанные особенности.

С упомянутой выше проблемой тесно связаны вопросы повышения надежности и безопасности

осуществления производственной деятельности и, в частности, вопросы резервирования производственных мощностей, поскольку, как известно, недооценка важности комплекса работ в данном направлении приводит либо к трагическим последствиям (Чернобыльская техногенная авария), либо к неоправданным расходам (убытки от техногенной аварии на московских электросетях в 2005 году, по данным средств массовой информации России, составили около одного миллиарда долларов США).

*Особенности объекта исследования.* В последние годы во многих приложениях оптимизационных моделей, позволяющих исследовать реальные процессы для принятия решений в условиях неопределенности и риска, растет интерес к динамическим постановкам задач [1]. Подобные исследования проводились нами [2] для сложных технических систем, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздывающим аргументом (ДУЗА).

Этот класс уравнений, как известно, является достаточно универсальным инструментом моделирования управляемых технологических процессов, с помощью которого хорошо отражаются эффекты «транспортного» запаздывания сигналов и силовых воздействий. Теоретическое исследование таких уравнений и, в частности, оптимального управления моделируемыми с их помощью процессами отстает от назревших потребностей в практических задачах управления и того уровня научных результатов, который достигнут в теории управления с моделями в классе обыкновенных дифференциальных уравнений. Это объясняется прежде всего сложностями разработки функционального аппарата представления и анализа решений ДУЗА. В данном вопросе нами разработан конструктивный аппарат [3] для исследования экстремалей в нормальных системах дифференци-

альных уравнений с непрерывно и равномерно (во времени) распределенным запаздыванием по аргументу переменной состояния.

Следует отметить, что реальные динамические системы функционируют в условиях воздействия на них неизвестных возмущений [4]. В связи с этим возникает необходимость расширения класса решаемых задач для дискретных и непрерывных управляемых динамических систем на задачи управления производственными системами, изменяющими свою структуру в процессе функционирования [5].

*Формализация управляемых производственных систем.* Исследуемый технологический процесс опасного производства (ТПОП) представляется на трех уровнях описания конечным множеством его состояний: на верхнем уровне ТПОП описывается с помощью имитационной модели (ИМ) вероятностного сетевого графика  $BCGP_1$ , в которой в качестве работ выступают технологические операции производственной системы  $TXO_{kl}$ , где  $k, l \in \{1, 2, \dots, M\}$ ; на втором уровне каждая  $TXO_{kl}$  представляется вероятностным сетевым графиком  $BCGP_2$ , в котором в качестве работ выступают микротехнологические операции (далее – «операции»)  $\{MTXO_{klij}\}$ , где  $i, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ; на третьем уровне динамика развития каждой такой операции может видоизменяться при возникновении аварий оборудования за счет выполнения последовательности процедур ликвидации аварий  $\{PROCLA_r\}$ , где  $r = \overline{1, n}$ , которые по своей структуре являются детерминированными, а по динамике расходования ресурсов – вероятностными. В процессе реализации  $BCGP_1$  определяет граф  $GR_1$ , в котором узлами являются состояния  $SOS_k$  и  $SOS_l$ , соединяющиеся с помощью  $TXO_{kl}$ , где  $k, l \in \{1, 2, \dots, M\}$ . Аналогичным образом  $BCGP_2$  определяет граф  $GR_2$ , в котором узлами являются множество состояний  $\{SOS_{kli}, SOS_{klj}\}$ , соединенных операциями  $MTXO_{klij}$ , где  $i, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ .

Отметим следующую специфику использования элементов последовательности процедур ликвидации аварии  $\{PROCLA_r\}$ ,  $r = \overline{1, n}$ . Вначале по соответствующим функциям распределения разыгрываются значения параметров  $MTXO_{klij}$  в  $BCGP_2$ , затем – жребий «Произошел отказ оборудования»  $k$ -го типа при выполнении операции  $MTXO_{klij}$ ,  $i, l \in \{1, 2, \dots, M\}$ . Далее, после анализа степени серьезности отказа, по вероятности  $p_{ав}$  разыгрывается другой жребий «Произошла авария» на оборудовании  $k$ -го типа, после чего используется последовательность  $\{PROCLA_r\}$ .

В условиях конкуренции за ресурсы, при имитации их использования в ходе реализации технологических операций, перед началом моделирования необходимо установить требуемые и выделенные величины расходуемых ресурсов ТПОП. Функции распределения и контроля за использованием и возвратом ресурсов осуществляются системой распределения ресурсов, автономно входящей в состав ИМ ТПОП.

Для выполнения каждой  $MTXO_{klij}$  в общем случае требуются следующие ресурсы: время  $\tau_{ij}$  выполнения операции; стоимость  $c_{ij}$  ее реализации; списки: материалов  $r_1$ -го типа  $\{mr_{1ij}\}$ , состава комплектующих  $r_2$ -го типа изделий  $\{ko_{r2ij}\}$ , коллективно используемых ресурсов  $r_3$ -го типа объема  $\{V_{r3ij}\}$ , индивидуально используемого оборудования  $\{SP.OBOP_{ij}\}$ , индивидуально используемых ресурсов  $\{SP.RESIN_{ij}\}$ , исполнителей  $\{SP.ISPOL_{ij}\}$ , бригад специалистов  $\{SP.BRIG_{ij}\}$ , совместно используемого оборудования  $r_4$ -го типа при требуемой доле от общего объема ( $V_{r4ij}$ ). Конкретные значения этих ресурсов в общем случае являются случайными величинами, для которых до начала имитации ТПОП необходимо задание соответствующих функций распределения. Каждая  $MTXO_{klij}$  может также запрашивать ресурсы, которые являются детерминированными индивидуальными величинами, определяемыми особенностями ее реализации.

ИМ ТПОП для моделирования надежностных характеристик функционирования оборудования при реализации  $MTXO_{klij}$  и  $PROCLA_r$  требует дополнительного задания следующих функций распределения: интервалов времени между соседними отказами (времени безотказной работы) оборудования  $k$ -го типа  $F_{1k}(t)$  и интервалов времени его восстановления  $F_{2k}(t)$ ; дополнительных: стоимости восстановления оборудования  $F_{3k}(\Delta c)$ , времени ликвидации аварии  $F_{4k}(\Delta t)$ , стоимости ликвидации аварии  $F_5(\Delta c)$ . Поскольку на всех уровнях формализации производственной системы описание является вероятностным, моделирование осуществляется с помощью системы автоматизации имитационного моделирования, реализующей агрегатный способ имитации [6].

*Отображение динамики функционирования производства.* Основными компонентами имитационной модели являются два типа элементов –  $MTXO_{ij}$  и  $SOS_i$ , представляемых типовыми имитационными подмоделями [7]. Первый тип подмоделей представляется агрегатом-четырёхполосником  $AMTXO_{ij}$ , на входы которого поступают

входные сигналы, а с выходов формируются выходные. Второй тип подмодели представляет собой агрегат-многополюсник  $ASOB_i$  с различным числом входов и выходов (одиночных и кустовых), имеющих следующую структуру:

- кустовые действительные, формирующие на выходе только действительные сигналы;

- кустовые вероятностные, формирующие на выходе один действительный и  $d-1$  фиктивных сигналов;

- кустовые резервирования, формирующие на разветвлениях выходов смесь действительных и фиктивных сигналов.

Информация об адресации сигналов сосредоточена в его «теле», имеющем списковую структуру:

$$Sg(\text{type}, i, k_i, d_k, \{P_k\}, j, r_j),$$

где  $\text{type}$  – тип сигнала по отношению к  $AMTXO_{ij}$  (IP – входной прямой имитации, OP – выходной прямой имитации, П – входной инверсной имитации, ОI – выходной инверсной имитации);  $(i, k_i, d_k, \{P_k\})$  – адрес агрегата-события отправителя сигнала;  $(j, r_j)$  – адрес агрегата-события получателя сигнала;  $(i, j)$  – номера агрегатов  $ASOB_i$  и  $ASOB_j$ , находящихся на концах  $AMTXO_{ij}$ ;  $\{P_k\}$  – вектор вероятностей разветвления сигнала с кустового выхода (при  $d_k > 1$ );  $d_k$  – номер разветвления кустового выхода.

При моделировании выполнения  $AMTXO_{ij}$  имитационная модель по функциям распределения формирует значения параметров операции в  $l$ -й реализации  $(\tau_{ij}, c_{ij}, \{mt_{r1ij}\}, \{ko_{r2ij}\}, \{V_{r3ij}\}, V_{r4ij})$ , а по спискам запросов индивидуальных ресурсов, оборудования и исполнителей ТПОП ( $\{SP.OBOP_{ij}\}, \{SP.RESIN_{ij}\}, \{SP.ISPOL_{ij}\}, \{SP.BRIG_{ij}\}$ ) формируется заказ для закрепления их за  $AMTXO_{ij}$  на время выполнения операции. По этому заказу в распоряжение  $AMTXO_{ij}$  система распределения ресурсов  $SYS.RESURS$  немедленно выделяет ресурсы либо устанавливает заказы в очередь на выполнение при освобождении требуемого ресурса.

Агрегат  $ASOB_j$  в режиме прямой имитации ожидает прихода последнего сигнала типа OP от  $AMTXO_{ij}$  на один из его входов. В этот момент модельного времени  $t^*$  срабатывает «спусковая функция» агрегата, которая инициирует выполнение последующих операций. Рассылка сигналов на  $AMTXO_{ij}$  осуществляется согласно таблице коммутации агрегатов, которая формируется до имитации при задании состава и структуры производственной системы.

Для отображения динамики реализации ТПОП кроме  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  используются еще четыре типа подмоделей – агрегаты-имитаторы: оборудования индивидуального  $AOBIN_k$  и общего  $AOBOP_k$  пользования, расхода общих ресурсов на оборудовании  $AKAN_k$ , выполнения процедур ликвидации аварийной ситуации  $APROC_k$ , где  $k$  – номера устройств оборудования, закрепленных за  $MTXO_{ij}$  на время ее выполнения. Если во время имитации выполнения  $MTXO_{ij}$  срабатывает жребий «Произошел отказ оборудования», то по функции распределения формируется очередное значение интервала времени восстановления работоспособности оборудования  $k$ -го типа. Далее по вероятности  $p_{ав}$  определяется ситуация «Произошла авария», формируется признак  $\pi_{ak} = 1$  и по функции распределения определяется очередное значение интервала времени ликвидации аварии  $\tau_{ABij}$ .

Алгоритмы имитаторов процедур ликвидации аварии  $APROC_k$  эквивалентны первой части алгоритмов  $AMTXO_{ij}$ . После активизации  $AMTXO_{ij}$  агрегат  $APROC_k$  реализует алгоритм имитации процедуры ликвидации аварийной ситуации с учетом использования ресурсов, аварийных бригад, стоимости и времени использования, расхода материалов и комплектующих изделий. Само выполнение  $APROC_k$  имитируется операцией ожидания интервала времени длительностью  $\tau_{kl}$ , по окончании которого осуществляется выбор следующего элемента из последовательности  $\{APROC_k\}$ ,  $k = \overline{1, n}$ . Когда все элементы этой последовательности завершают имитацию расхода ресурсов, резервируемых на случай ликвидации аварии в ТПОП, алгоритм  $AMTXO_{ij}$  продолжает свою работу.

*Принципы организации резервирования оборудования.* Возникновение в процессе функционирования ТПОП отказов оборудования при выполнении  $AMTXO_{ij}$  может оказывать существенное влияние на динамику реализации последующих технологических операций [8]. Для ТПОП в ряде случаев организуются резервные последовательности  $\{AMTXO_{js}\}$ , где  $s \in \{1, 2, \dots, N\}$ , которые необходимо активизировать только при появлении аварий в ходе выполнения производственного цикла на предыдущих  $AMTXO_{ij}$ . Если же аварии не происходят, то необходимо организовать вызов другой последовательности  $AMTXO_{jk}$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, M\}$ . Переключение ветвей  $AMTXO_{ij}$  должно осуществляться оперативным образом и зависеть от наличия отказов оборудования для предыдущих техно-

логических операций. Такую функцию выполняют агрегаты  $ASOB_i$  с помощью формирования комбинации фиктивных и действительных сигналов на кустовых выходах третьего типа. Фиктивные сигналы не активизируют  $AMTXO_{ij}$ , и только действительные сигналы активизируют резервные  $AMTXO_{ij}$ .

Механизм переключения действительных сигналов у кустовых выходов третьего типа основан на использовании булевой матрицы коммутации  $\|\gamma_{nr}\|$ . Наличие единицы на пересечении  $n$ -й строки с  $r$ -м столбцом означает необходимость включения резервной  $AMTXO_{ih}$  в ТПОП в случае, когда на  $r$ -м входе приходит сигнал от  $AMTXO_{ij}$  с признаком  $\pi_{ar}$ , свидетельствующим об аварии при ее выполнении. Таким образом, на  $n$ -м разветвлении  $k$ -го кустового выхода третьего типа формируется действительный сигнал в том случае, если станет истинной булева функция  $z$ , которая вычисляется из выражения  $z = (\gamma_{rh} \wedge \pi_{ar})$ , где  $r$  – номера входов  $ASOB_j$ . С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных  $AMTXO_{jh}$ , если на входы  $ASOB_j$  поступают сигналы с  $AMTXO_{ij}$ , во время выполнения которых происходили аварии.

Кустовые выходы  $ASOB_i$  второго типа играют иную роль. До момента начала имитации задается вектор вероятности формирования на одном из разветвлений действительного сигнала  $\{P_{ih}\}$ , где  $h$  – номер компонента этого вектора. В  $h$ -й реализации ИМ по жребию второго типа разыгрывается номер разветвления  $h_0$ , на котором следует сформировать действительный сигнал, а на остальных разветвлениях этого выхода  $ASOB_i$  формируются фиктивные сигналы, вследствие чего в динамике имитации вероятностным образом активизируется только один из агрегатов  $AMTXO_{ih}$ , а

все остальные агрегаты в  $l$ -й реализации не выполняются. Наконец, кустовые выходы  $AMTXO_{ih}$  первого типа играют роль безусловного одновременного запуска целого комплекса  $AMTXO_{ih}$  в полном составе.

Таким образом, с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа разветвлений каждого кустового выхода пользователь модели получает возможность динамического регулирования выполнения  $\{AMTXO_{ij}\}$ , где  $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$ , в зависимости от наблюдаемой операционной обстановки при реализации ТПОП.

#### Список литературы

- 1 **Габасов, Р.** Построение оптимальных управлений типа обратной связи в линейной задаче / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова, О. Н. Костюкова // ДАН СССР. – 1991. – № 6. – С. 320–329.
- 2 **Сморodin, В. С.** О связи принципа максимума с динамическим программированием в системах с запаздыванием / В. С. Смородин // Дифференциальные уравнения. – 1989. – Т. 25, № 11. – С. 2000–2001.
- 3 **Сморodin, В. С.** Исследование оптимальных управлений с особыми участками в системах с распределенным запаздыванием по состоянию : автореф. дис... физ.-мат. наук / В. С. Смородин. – Минск, 1989. – 17 с.
- 4 **Гончаров, А. Н.** Об одной методике выбора стратегии реагирования на возникновение аварий в технологических процессах опасного производства / А. Н. Гончаров, А. С. Смородин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : сб. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. / ред. кол.: Э. Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2005. – С. 70–77.
- 5 **Сморodin, В. С.** Моделирование опасных технологических процессов производства с изменяющейся структурой / В. С. Смородин // Вузовская наука, промышленность, международное сотрудничество : сб. науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 13–15 окт. 2004 г. / редкол.: В. В. Понарядов (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2004. – С. 333–342.
- 6 **Максимей, И. В.** Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов / И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. П. Сукач // Информатика. – 2005. – № 1. – С. 25–31.
- 7 **Максимей, И. В.** Методика имитационного моделирования систем управления опасного производства / И. В. Максимей, В. С. Смородин // Проблемы управления и информатики. – 2005. – № 4. – С. 53–62.
- 8 **Максимей, И. В.** Способ моделирования агрегатами технологических процессов опасного производства / И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. И. Сукач // Электронное моделирование. – 2005. – Т. 27, № 6. – С. 101–109.

Получено 02.07.2007

**V. S. Smorodin.** Particularities of the development of simulation model for deciding of the problem of equipment standby for operated production systems.

Principles of organization of reconstruction operations on the base of analysis of operation situation at modeling of process of operation for controlling manufacture system are offered. Under investigation technological process of dangerous manufacture is submitted for three its description levels by the end ensemble of conditions. On first and second levels for the description of the closed technological cycle are used a corresponding probabilistic network graphs. As work are considered the technological operations of manufacture system. Track record of realization of operational procedure can change when arising the equipment damages to the account of performing a sequence of procedures for liquidations of damages and operations of standby. Scene of operation development of manufacture system is realized by means of combinations of different types of outputs for nodes of network graphs and appointments of numbers of branchings of each of them. Using a similar device enables an user models to realize a dynamic regulation for performing the technological operations depending on observed operating situations at realization of process.