

УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

## Проектное моделирование управляемых производственных систем с резервированием схем управления

В.С. СМОРОДИН, А.В. КЛИМЕНКО

Предлагается способ резервирования схем управления производственной системы на основе обработки конечного множества действительных, фиктивных и кустовых сигналов, поступающих от агрегатов-имитаторов, с различным числом разветвлений. В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используются динамические имитационные модели. Приводится теоретическое обоснование и технология применения динамической имитации как способа системного анализа сложных систем для класса управляемых производственных систем с вероятностными характеристиками их функционирования.

**Ключевые слова:** класс сложных систем, управляемые производственные системы, динамические имитационные модели, резервирование схем управления.

In the paper a method of redundancy of control circuits production system based on the processing of a finite set of real, fictional and carnations signals from aggregators imitators with a different number of branches is proposed. As a tool for implementing the proposed approach dynamic simulations are used/ The theoretical study and application of dynamic simulations technology as a means of systematic analysis of complex systems for class-driven production systems with probabilistic characteristics of their functioning is given.

**Keywords:** class of complex systems, controlled production systems, dynamic simulation models, redundancy management schemes.

**Введение.** Анализ современного состояния разработок в области проектного моделирования управляемых производственных систем показал, что проблема моделирования таких объектов состоит в недостаточной результативности методов их исследования при увеличении количества учитываемых параметров, в особенности для тех случаев, когда структура технологического цикла изменяется в процессе функционирования объекта исследования в связи с использованием операций резервирования. Это связано, в первую очередь, с многообразием сложных технических систем, в ходе реализации которых могут изменяться параметры их функционирования, со сложностью практических задач при оценке уровня надежности и безопасности промышленных объектов, а также с необходимостью учета человеческого фактора при выполнении работ на потенциально опасных объектах.

Поэтому разработка новых методов, программных средств анализа и синтеза оптимальной структуры наиболее сложных процессов, использующихся при организации работ на ответственных объектах при наличии оборудования, которое может отказывать и служить источником возникновения аварий техногенного характера, являются весьма актуальными с научной и практической точек зрения.

Одним из подходов на пути решения данной проблемы является проектное моделирование рациональной структуры вероятностных производственных систем как на стадии проектирования новых, так и при эксплуатации существующих технологических линий. Проектное моделирование оптимальной структуры технологического цикла управляемых производственных систем [1] в настоящее время применяется для разработки и модификации высоконадежных технологических линий, в том числе и при наличии элементов потенциальной опасности [2].

Практическую значимость в этой связи все более приобретает резервирование схем управления при проектировании высоконадежных производственных систем. Такие модели, при наличии обратной связи по управлению, например, используются для реализации методов конструктивной теории оптимизации, позволяющих стабилизировать параметры системы при случайных возмущениях по управлению или воздействиях на состояния системы, когда

плоскость фазовых состояний исследуемого объекта описывается системой дифференциальных уравнений. Однако на практике зачастую бывает сложно обосновать адекватность построенной модели реальному объекту исследований. В подобных случаях имеет место применение динамических имитационных моделей [3] для решения оптимизации структуры технологического цикла на стадии проектного моделирования объекта исследования.

Следует также отметить, что существующие программные средства автоматизации имитационного моделирования (например, модификации системы моделирования на основе языка моделирования GPSS) не позволяют отобразить динамику взаимодействия компонентов управления вероятностных технологических процессов в совокупности с различными способами формализации объекта исследования на высоком уровне их детализации. Это обстоятельство затрудняет эффективное использование для этих целей аналитические модели.

**Формализация процесса управления.** Для исследования структуры управляемой производственной системы (УПС) и динамики взаимодействия её компонентов требуется совмещение времени моделирования с отображением функций основных компонентов системы (технологическое моделирование). Регулирование поведения УПС осуществляется эмуляцией функций компонентов системы, которая составляет суть функционального моделирования. Последнее достигается реализацией функций контроля выхода значений управляемых переменных  $\{U_k\}$  за допустимые границы диапазонов их изменения. При каждом выходе  $\{U_k\}$  за пределы области допустимых значений необходима корректировка, что достигается с помощью специальных элементов корректировки состояний. Процесс управления реализуется программно-технологическим комплексом, состоящим из имитационной модели (ИМ), информационной базы данных имитационной модели, блока-имитатора системы управления, агрегатов-имитаторов оборудования общего пользования (АОБОП), агрегатов-имитаторов оборудования индивидуального пользования (АОБИП), программной системы принятия решений (EXPERT) и библиотеки процедур обработки статистики имитации.

Система управления в общем случае состоит из двух типов элементов синхронизации. Первый тип элементов представляет собой сложным образом организованную схему сигналов типа «И», второй тип является логической схемой сложения сигналов типа «Или». Она вырабатывает выходные сигналы после прихода на любой из её входов первого сигнала, при этом в «теле» сигнала хранится информация о ситуациях, возникающих в системе при выполнении любого её из её элементов. Различают следующие исходы событий: нормальное исполнение функций элементом, отказ оборудования, выход  $\{U_k\}$  за допустимые пределы, совмещение отказов оборудования с выходом  $\{U_j\}$  за допустимые диапазоны их изменения. Данное обстоятельство означает, что сигналы, поступающие от системы управления к оборудованию, имеют соответствующие признаки, указывая тем самым на возникновение нештатной ситуации в ходе выполнения соответствующего элемента УПС.

Основой динамической имитационной модели систем с резервированием при наличии условий потенциальной опасности [4] являются следующие типы исполнительных устройств:

устройства-исполнители функций элемента; устройства оперативной ликвидации последствий аварий на оборудовании; корректировщики значений  $\{U_j\}$ ; универсальные элементы, которые одновременно ликвидируют последствия аварий и выходы компонентов  $\{U_k\}$  за допустимые границы изменения.

В соответствии с этим динамическая имитационная модель УПС формируется из исполнительных элементов следующих пяти типов:

- а) исполнитель  $ISPF_{ij}$  нормального выполнения технологических операций, инициируемый синхронизатором с номером  $i$  и посылающий сигналы на синхронизатор с номером  $j$ ;
- б) исполнитель  $CORF_{ij}$  функции по корректировке значений компонентов вектора глобальных переменных управления  $U_k$  при выходе за допустимые границы;
- в) исполнитель  $LICV_{ij}$ , ликвидирующий последствия аварий на оборудовании;

- d) универсальный элемент  $UNIV_{ij}$ , который одновременно корректирует значения компонентов вектора  $U_k$  и ликвидирует последствия аварий на оборудовании;
- e) индикатор  $INDS_{ij}$  состояний УПС.

В основу моделирования управляемой производственной системы и построения динамической имитационной модели положено сочетание идей метода Монте-Карло и методики сетевого планирования на базе использования вероятностной модели сетевого графика с изменяющейся топологией.

Динамическая имитационная модель представляет собой множество агрегатов-имитаторов выполнения технологических операций ( $ATOP_{ij}$ ), свершения событий  $ASOB_j$ , функционирования оборудования индивидуального и общего пользования ( $AOBIN_r$  и  $AOBOP_r$ ), выполнения процедур ликвидации аварий ( $APROC_k$ ). Агрегаты-имитаторы выполнения операций  $ATOP_{ij}$  имитируют порядок выполнения  $MTXO_{ij}$  в составе технологического процесса производства, а агрегаты-имитаторы  $AOBIN_r$ ,  $AOBOP_r$  и множества агрегатов  $\{APROC_k\}$  используются для отображения технологии его реализации.

Представленные типы исполнительных элементов могут различаться между собой степенью сложности их алгоритма и составом используемых ресурсов. Связь между этими элементами регулируется управляющими сигналами различных типов.

Обработка и координирование поступающих сигналов реализуется через исполнительные элементы в момент срабатывания спусковой функции  $i$ -го элемента на основе синхронизации алгоритма взаимодействия компонентов управляемой производственной системы.

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

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

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

Таким образом, учитывая особенности взаимодействия компонентов управляемой производственной системы, имеется возможность планировать работу исполнительных элементов по времени реализации алгоритма в зависимости от операционной обстановки (наличия отказов оборудования и выхода контролируемой переменной  $U_k$  за пределы допустимых диапазонов изменения её компонентов) с учетом резервирования схем управления.

**Особенности формализации и организации резервирования технологических операций.** Применение динамической имитации обеспечивается сочетанием процедуры Монте-Карло и агрегатной системы автоматизации моделирования [5]. При этом множество  $l$ -х реализаций имитационной модели (ИМ) дает возможность представить исходную производственную систему в виде конечного множества детерминированных сетевых графиков. Каждый детерминированный сетевой график, в свою очередь, состоит из множества технологических операций, имитируемых соответствующими агрегатами-имитаторами операций, соединение между которыми осуществляется с помощью агрегатов-имитаторов событий. Они представляют собой реентерабельные программы-подмодели, которые имеют свой набор переменных моделирования и статистик имитации, соответствующий номеру компонента-подмодели в базе данных имитационной модели.

В процессе функционирования динамической имитационной модели наличие отказов оборудования при выполнении агрегатов-имитаторов может оказывать существенное влияние на динамику имитации последующих технологических операций. Особенностью динамической имитационной модели является наличие в ней механизма переключения сигналов, поступающих от агрегатов-имитаторов технологических операций в процессе имитации, а также механизма реагирования на эти сигналы агрегатов-имитаторов событий, происходящих в ходе имитации динамики функционирования вероятностного технологического процесса. Действие механизма переключения сигналов основано на применении в динамической имитационной модели многополюсных агрегатов-имитаторов, имеющих многокомпонентную систему выходов, обеспечивающих оперативное реагирование имитационной модели на возникновение «нештатных» ситуаций. Для этой цели используются специальные выходные сигналы агрегатов, которые являются «кустовыми» и называются резервными выходами.

С их помощью реализуется так называемое «технологическое резервирование». Наличие множественных отказов оборудования при выполнении различных приводит к необходимости использования на выходах нескольких цепочек резервных операций, которые активизируются только при возникновении аварий во время имитации выполнения технологических операций на агрегате-имитаторе оборудования. Если аварии не происходит, то активизируются

«штатные» агрегаты выполнения операций. При этом переключение ветвей должно быть оперативным и зависеть от наличия отказов оборудования, используемого агрегатами-имитаторами, которые являются входными для текущего события. Функция переключения сигналов на агрегате осуществляется с помощью формирования динамической моделью комбинации фиктивных и действительных сигналов на «кустовых» выходах третьего типа.

Механизм формирования действительных сигналов у «кустовых» выходов третьего типа основан на применении булевой матрицы. Наличие единицы на пересечении строки и столбца в этой матрице означает необходимость включения резервных технологических операций с признаком, свидетельствующим о наличии ранее случившейся аварии. С помощью этого механизма кустовые выходы третьего типа становятся динамическими регуляторами подключения резервных схем управления, если на входы поступают сигналы, во время выполнения которых на оборудовании, находящемся в их распоряжении, происходила аварии. Таким же образом с помощью комбинаций различных типов кустовых выходов и задания числа их разветвлений для каждого кустового выхода обеспечивается возможность динамического регулирования реализовавшейся структуры схем управления в зависимости от сложившейся операционной обстановки в ходе реализации проектного моделирования технологического процесса.

**Управление динамической имитацией на стадии проектирования структуры технологического цикла.** Управляющая программа моделирования организует взаимодействие агрегатов-исполнителей с агрегатами синхронизации с помощью сигналов на основе агрегатного способа имитации в процессе динамической имитации. Каждый агрегат-исполнитель представляет собой объединение нескольких активностей и заканчивается одним из операторов синхронизации или оператором посылки сигнала на агрегаты-синхронизаторы. При запуске этих операторов выполнение алгоритма агрегата прерывается, что означает окончание соответствующей активности агрегата и возврат из программы агрегата на управляющую программу. Регулярно проверяется выполнение всех условий ожидания агрегатов и запуска тех активностей агрегатов, для которых завершается условие выполнения запросов на их активизацию. В составе средств автоматизации динамической имитации используются универсальные подсистемы визуализации результатов моделирования, управления оборудованием технологического цикла, обработки результатов имитационных прогонов, а также состоящая из нескольких подсистем, которые реализуют методику использования классических методов принятия решений, система принятия решений.

**Выводы.** В работе рассматривается способ резервирования схем управления производственной системы на основе обработки конечного множества действительных, фиктивных и кустовых сигналов, поступающих от агрегатов-имитаторов, с различным числом разветвлений. В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используются динамические имитационные модели, реализующие агрегатный способ имитации. Приводится теоретическое обоснование и технология применения динамической имитации как способа системного анализа сложных систем для класса управляемых производственных систем с вероятностными характеристиками их функционирования.

Новизна предложенного класса формализуемых систем производственных систем состоит в том, что в процессе функционирования технологического цикла может произойти изменение его структуры в результате управляющих воздействий аппаратуры управления или оператора технологического цикла вследствие сбоев или отказов функционирования схем управления. При этом предложенный подход позволяет решать следующие задачи:

- а) проектного моделирования надежных и безопасных производственных систем с учетом операций резервирования и ликвидации последствий сбоев и аварий оборудования,
- б) синтеза оптимальной структуры технологического цикла с учетом надежности характеристик используемого оборудования на стадии проектирования;
- в) обеспечения динамической имитации класса производственных систем с вероятностными параметрами их функционирования на стадии проектного моделирования с использованием конечного множества математических моделей.

### Литература

1. Смородин, В.С. Синтез структуры технологического цикла управляемых производственных систем / В.С. Смородин // Проблемы физики, математики и техники. – № 2(11). – 2012. – С. 108–111.
2. Смородин, В.С. Анализ функционирования технологических процессов при наличии элементов потенциальной опасности / В.С. Смородин // Проблемы физики, математики и техники. – 2012. – № 3(12). – С. 96–100.
3. Смородин, В.С. Метод динамической имитации вероятностных производственных систем / В.С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2012. – № 2. – С. 96–101.
4. Смородин, В.С. Система управления надежностью оборудования вероятностных технологических процессов опасного производства / В.С. Смородин // Проблеми програмування (Problems in Programming). — 2007. — № 3. — С. 107 – 123.
5. Смородин, В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В.С. Смородин // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 105–110.

Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины

Поступила в редакцию 03.03.2014