

УДК 681.3;007.003;007.008;65.0

**СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ИМИТАЦИИ  
УПРАВЛЯЕМЫХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ****В. С. СМОРОДИН***Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь***Введение**

Возникновение понятия сложной системы как многопараметрического образа объекта исследования, представимого конечным множеством математических моделей, каждая из которых отражает конкретную группу свойств исходной системы, связано с многочисленными попытками унификации системного подхода [1] в процессе решения конкретных задач науки и практики. При этом появилась возможность выделить классы сложных систем со специфическими свойствами, что обеспечило возможность разработки методологических принципов построения математических моделей, которые характеризуются единой математической терминологией и могут быть доступны специалистам различных предметных областей.

В данной работе системный анализ сложных систем положен в основу исследований управляемых технологических процессов с вероятностными характеристиками их функционирования (управляемых вероятностных технологических процессов) как класса сложных систем. В контексте настоящей статьи под вероятностными характеристиками функционирования могут пониматься характеристики надежности функционирования оборудования, задействованного в ходе реализации технологического цикла производства, характеристики выполнения технологических операций, качественные характеристики используемых в процессе производства материалов и комплектующих изделий и др.

Предлагается новый подход к унификации методов системных исследований в области проектного моделирования сложных систем с вероятностными параметрами их функционирования на основе конечного множества математических моделей. В качестве инструмента реализации предлагаемого подхода используется динамическое имитационное моделирование, базирующееся на разработке динамических имитационных моделей управляемых вероятностных технологических процессов.

Для построения компонентов динамических имитационных моделей объектов исследований используется агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов, реализующая агрегатный способ имитации сложных систем, а также способ формализации вероятностных производственных систем на основе вероятностных сетевых графиков [2]. Система контроля имитации при этом обеспечивает возможность принятия управляющих воздействий на основе текущей операционной обстановки в процессе функционирования технологического цикла.

**Структура системы контроля имитации и управления**

Под управлением понимается упреждение конфликтных ситуаций в функционировании вероятностного технологического процесса (ВТП), которое достигается с помощью аппаратно-программного комплекса, состоящего из средств аппаратного сопряжения ВТП с параллельно действующей ЭВМ.

Система оперативного контроля имитации управляемых вероятностных технологических процессов (ВТП) состоит из следующих компонентов: имитационной модели (ИМ) управляемого ВТП; подсистемы планирования имитационных экспериментов (*PS.PLANEX*); подсистемы оперативного контроля имитации (*PS.CONTROL*); подсистемы анализа результатов (*PS.ANALIS*); подсистемы-эксперта (*PS.EXPERT*), контролирующей ход имитации и управляющей изменением параметров модели.

Функционирование компонентов системы оперативного контроля осуществляется с помощью управляющих воздействий:

- взаимодействия подсистем с «экспертом»  $\theta_k$  ( $k = \overline{1,5}$ ): чтения информации о состоянии технологического цикла  $(\theta_1, \theta_2, \theta_4)$ ; оперативного воздействия «эксперта»  $(\theta_3)$  по текущему варианту реализации структуры ВТП в имитационной модели; установки начальных значений состава ресурсов в  $h$ -м варианте организации структуры ВТП  $(\theta_5)$ ;

- взаимодействия подсистем с ИМ (выдача оперативной информации о ходе имитации ВТП с помощью множества индикаторов состояния оборудования  $\{ind_r\}$ ; формирование множества статистик  $\{ST_{kl}\}$  и откликов  $\{Y_{0,jl}\}$  в  $l$ -й реализации ИМ ВТП по методу Монте-Карло);

- множество постоянных характеристик модели  $\{G_h\}$  и параметров  $\{X_{0,jh}\}$  моделирования ВТП, задаваемых для «запитки» модели при запуске на имитацию  $h$ -го варианта состава ресурсов и структуры ВТП.

Основным компонентом системы является агрегатная имитационная модель, реализующая имитацию объекта исследования с помощью вероятного сетевого графика (ВСГР) и построенная на основе системы автоматизации имитационного моделирования [2].

В процессе реализации прогона имитационной модели осуществляются следующие виды внутреннего управления динамикой имитации:

- автоматическое одиночное резервирование оборудования в тех случаях, когда нагрузка на отказ  $r$ -го устройства оборудования ( $Q_r$ ) достигает критической величины;

- ликвидация последствий аварий при опасных отказах функционирования  $r$ -го устройства последовательностью процедур  $\{PROC_k\}$ ;

- технологическое резервирование, означающее изменение состава и последовательности выполнения технологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$  после возникновения аварии.

В имитационной модели предусмотрено также множество управляющих воздействий ( $\{\alpha_k\}$ ,  $k = \overline{1,4}$ ) подсистемы *PS.CONTROL*, включающее в себя: переключение на режим профилактики оборудования ( $\alpha_1$ ), изменение шага наблюдения и формирования информации для построения графиков расхода ресурсов ВТП ( $\alpha_2$ ), выдача диаграмм перехода компонентов имитационной модели из состояния в состояние ( $\alpha_3$ ); досрочная остановка имитации использования  $h$ -го варианта состава ресурсов ВТП ( $\alpha_4$ ).

### Функциональное назначение компонентов ИМ ВТП

Для постановки серий имитационных экспериментов (ИЭ), отображающих взаимодействие имитационной модели с компонентами системы контроля, используется агрегатная система автоматизации моделирования [2], которая реализует агрегатный способ имитации ВТП и состоит из следующих подсистем, библиотек и компонентов:

- библиотеки типовых агрегатов *LB.AGREG*;
- подсистемы формирования имитационных моделей из множества агрегатов-компонентов ВСГР (*PS.FORMSG*);
- управляющей программы моделирования (*UPMA*);
- подсистем обработки статистики имитации ВСГР (*PS.OBRAB*), визуализации результатов ИЭ (*PS.VISIAL*), первичного анализа результатов экспериментов (*PS.ANALIZ*).

Рассмотрим структуру и функциональное назначение перечисленных компонентов. Библиотека *LB.AGREG* содержит несколько типов реентерабельных программ, используемых для имитации функций агрегатов  $AMTXO_{ij}$ ,  $ASOB_i$ ,  $AOBIN_k$ ,  $APROC_k$ . За время постановки ИЭ для каждой  $l$ -й реализации имитационной модели программы  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$  циклически переходят в различные состояния под управлением *UPMA*.

При построении ИМ ВТП компоненты этой библиотеки используются в качестве «заготовок» для построения подпрограмм агрегатов, которые совместно с *UPMA* образуют ее основную часть. Подсистема *PS.FOMSG* организует ввод исходной информации, который инициируется *PS.PLANEX*, проверяет правильность написания состава и структуры ИМ, сообщает эксперту о наличии ошибок коммутации, организует верификацию функционирования скомпонованных агрегатов в виде единой имитационной модели.

Подсистема *PS.MONTEK* содержит библиотеку процедур формирования случайных величин, программу реализации статистических испытаний и вычисления оценок математических ожиданий и дисперсий откликов ИЭ. Подсистема *PS.OBRAB* автоматизирует операции обработки первичной статистики моделирования, являясь при этом адаптацией известного пакета *STATISTIKA* [3].

Подсистема *PS.VIZUAL* формирует временные диаграммы использования устройств и ресурсов ( $DIAG_{rhl}$ ), а также графики  $Z_{1rhl}(t_0)$  и  $Z_{2rhl}(t_0)$  для  $l$ -й реализации ВСГР. Управляющая программа моделирования *UPMA* организует переход агрегатов из состояния в состояние и обеспечивает сочетание прямого и инверсного способа изменения модельного времени  $t_0$  с реализацией процедур Монте-Карло, а также контролирует моменты вычисления  $t_{pil}$  и  $t_{pjl}$  агрегатов  $ASOB_i$ .

Таким образом, структура имитационной модели формируется с помощью библиотек агрегатной системы имитации [2] с помощью таблиц коммутации агрегатов  $AMTXO_{ij}$  и  $ASOB_i$ . Эту работу выполняет *PS.PLANEX*, воздействуя через управление  $\alpha_5$  на *UPMA*. На следующем этапе исследования проводится серия экспериментов на реальном ВТП. Если же проектируется новая структура ВТП, то используются экспертные данные о параметрах и надежности функционирования  $AMTXO_{ij}$ . Результатом этапа является формирование базы данных модели, содержащей информацию о параметрах  $MTXO_{ij}$ . На следующих этапах исследования организуется серия ИЭ для испытания ИМ ВТП согласно известным методикам [4].

### **Контроль хода имитации управляемого ВТП**

Возможность возникновения аварии оборудования ВТП при выполнении  $AMTXO_{ij}$  требует предусмотреть выход из ситуации, возникшей после аварии, хотя она уже ликвидирована последовательностью  $\{APROC_k\}$ . На этот случай в ИМ ВТП предусмотрены «резервные» цепочки  $AMTXO_{ij}$ , которые активизируются только при

появлении аварий. Переключение на «резервную» ветвь  $AMTXO_{ij}$  реализуется за счет использования булевой матрицы коммутации  $\|\gamma_{ns}\|$ , формируемой экспертом-технологом до начала имитации. Строками матрицы являются номера  $AMTXO_{ij}$  на входе  $ASOB_i$ , а столбцами являются номера резервных  $AMTXO_{ij}$  на выходе  $ASOB_j$ , которые необходимо инициировать после аварии. Таким образом, подобное «технологическое» резервирование является динамическим регулятором поставарийной ситуации в ВТП.

Еще одним способом недопущения аварий оборудования ВТП является автоматический переход на резервное устройство, когда хотя бы для одного из устройств оборудования фактическая наработка на отказ превышает пороговые значения в  $ind_r$ . В этом случае множество  $\{ind_r\}$  поступает в  $PS.OPEREX$ , которая проверяет близость к пороговому значению наработки всех устройств оборудования. При достижении близости к пороговым значениям у нескольких устройств формируются следующие воздействия на ИМ ВТП: групповой переход на резервирование тех устройств, у которых наработка близка к критической ( $\alpha_1$ ); переход на общую профилактику оборудования из-за неэффективности группового резервирования или нехватки резервных устройств ( $\alpha_2$ ); допускается возможность аварии в тех случаях, когда останавливать ВТП нельзя, и состояния индикаторов игнорируются ( $\alpha_3$ ); если оборудование изношено, а общая профилактика неэффективна, принимается решение о досрочном завершении имитации  $h$ -го варианта ИМ, поскольку появление аварии для данного ВТП недопустимо ( $\alpha_4$ ).

$PS.ANALEX$  использует статистику имитации  $\{ST_k\}$  и множество откликов модели  $\{Y_{0j}\}$ . Откликами  $Y_{0j}$  являются усредненные по числу реализаций их интегральные значения для  $h$ -го варианта ВТП: критическое время выполнения технологического цикла ( $T_{крh}$ ), стоимость реализации ВТП ( $C_{0h}$ ), интегральный расход материалов и комплектующих изделий ( $mt_{0h}$ ), количество использований ресурсов  $r$ -го номера ( $v_{\sum rh}$ ), суммарная стоимость ликвидации аварий ( $C_{\sum ABh}$ ), общие потери на профилактику ( $T_{опrh}$ ). Эти интегральные отклики модели составляют многомерный вектор откликов  $VO_h$  варианта ВТП, у которого все компоненты требуют минимизации, но имеют различную размерность и свои диапазоны изменения. Поэтому необходима нормировка компонентов этого вектора их максимальными значениями для всех возможных вариантов структуры ВТП.

Важной статикой реализации ИМ ВТП является граф критических путей ( $GRKRP_k$ ), который получен после наложения всех критических путей. С помощью сообщения  $\theta_4$   $PS.ANALEX$  выдает эксперту графики расхода ресурсов  $r$ -го типа  $Z_{1rh}(t_0)$ , финансовых средств  $Z_{2rh}(t_0)$ , а также временные диаграммы использования оборудования и исполнителей ( $DIAG_{rh}$ ). Оперативная статистика реализации ВТП в виде сообщения  $\theta_4$  предоставляется эксперту-технологу для принятия решений на основе классической теории принятия решений. В результате эксперт формирует набор управляющих воздействий ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  и  $\theta_5$ ), которые затем через подсистему  $SPRESH$  обеспечивают возможность досрочной остановки  $l$ -й реализации ИМ, пе-

ревод всех устройств оборудования на профилактику, оперативное изменение характеристик надежности функционирования оборудования.

Для сравнения вариантов структуры ВТП осуществляется «свертка» этого вектора к скалярному показателю  $W_h$  способом весовых коэффициентов важности ( $\sum_j \delta_j = 1; 0 \leq \delta_j \leq 1$ ) откликов с номером  $j$ . Вариантам организации ВТП соответствуют значения вектора  $\{X_{0ih}\}$  параметров ВТП и постоянных параметров имитации  $\{G_h\}$ . Каждая из составляющих векторов параметров может изменяться на различных уровнях. Поэтому количество вариантов  $K_0$  ( $h = \overline{1, K_0}$ ) определяется стратегией изменения каждого уровня параметров. Выбор оптимальной стратегии осуществляется на основе классических методов планирования экспериментов. Эксперт с помощью воздействия  $\theta_3$  инициирует *PS.ANALEX* и последующий запуск  $h$ -го варианта ИМ. Минимальное значение  $W_h$  по всему множеству вариантов с номером  $h_0$  и будет решением задачи определения рационального варианта организации структуры ВТП.

### Заключение

Таким образом, разработанный подход имитационного моделирования для нового класса объектов (управляемых производственных систем с вероятностными параметрами их функционирования) обеспечивает возможность корректировки последствий отказов оборудования и возврата переменных управления в заданные диапазоны значений с использованием зарезервированных технологических операций.

Программное обеспечение, которое реализует данный способ имитационного моделирования, обеспечивает решение задачи проектного моделирования рациональной структуры технологического цикла при наличии сбоев и отказов оборудования. Как следует из вышеизложенного, предложенный подход и программное обеспечение для исследования управляемых вероятностных технологических процессов как класса сложных систем позволяют:

а) повысить надежность и безопасность производства существующих технологических систем за счет резервирования цепочек технологических операций при возникновении аварийных ситуаций;

б) снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций на производстве, на основе построения рациональной структуры технологического цикла на стадии проектирования;

в) обеспечить резервирование потенциально опасных технологических операций при проведении пуско-наладочных работ и монтаж технологических линий, имеющих определенный срок предварительной эксплуатации;

г) повысить производительность технологических линий;

д) снизить себестоимость проектного моделирования высоконадежных производственных систем;

е) обеспечить конкурентоспособность выпускаемой продукции, как на внешнем, так и на внутреннем рынках Республики Беларусь.

### Литература

1. Клир, Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1990. – 544 с.

2. Смородин, В. С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / В. С. Смородин // Математичні машини і системи (Mathematical Machines and Systems). – 2007. – № 1. – С. 105–110.
3. Боровиков, В. П. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. П. Боровиков. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2003. – 688 с. : ил.
4. Смородин, В. С. Методика контроля и принятия решений при имитационном моделировании технологических процессов опасного производства / В. С. Смородин // Проблемы упр. и информатики. – 2006. – № 5. – С. 79–91.

*Получено 07.03.2012 г.*