

**В.С. СМОРОДИН**

## **МЕТОД ПОШАГОВОЙ РЕСТРУКТУРИЗАЦИИ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Abstract:** *New approach is examined to the construction of models of simulations of probabilistic technological processes of variable structure. The method of the incremental restructuring of simulation model of the probabilistic network graph is expounded in the real-time (invariant immersion of the proper model of probabilistic technological process in the great number of probabilistic models of the network planning with a variable structure) mode for the decision of task of research and control of probabilistic technological processes. On the basis of method of the incremental restructuring and the update version of the system of automation of imitation design of aggregate type it is offered the method of imitation of probabilistic technological processes, which is development of methods of decision of classic problem of synthesis of the optimum systems for probabilistic technological processes with changing structure of technological cycle.*

**Key words:** *invariant immersion, probabilistic network graph, method of the incremental restructuring of simulation model, method of imitation of probabilistic technological processes with a variable structure.*

**Аннотація:** *Розглядається новий підхід до побудови імітаційних моделей імовірнісних технологічних процесів змінної структури. Висловлюється метод покрокової реструктуризації імітаційної моделі імовірнісного мережевого графіка в режимі реального часу (інваріантне занурення відповідної моделі імовірнісного технологічного процесу в безліч імовірнісних моделей мережевого планування зі змінною структурою) для вирішення завдання дослідження і управління імовірнісними технологічними процесами. На основі методу покрокової реструктуризації і нової версії системи автоматизації імітаційного моделювання агрегатного типу пропонується спосіб імітації імовірнісних технологічних процесів, який є розвитком методів вирішення класичної проблеми синтезу оптимальних систем для імовірнісних технологічних процесів із структурою технологічного циклу, що змінюється.*

**Ключові слова:** *інваріантне занурення, імовірнісний мережевий графік, метод покрокової реструктуризації імітаційної моделі, спосіб імітації імовірнісних технологічних процесів із змінною структурою.*

**Аннотация:** *Рассматривается новый подход к построению имитационных моделей вероятностных технологических процессов переменной структуры. Излагается метод пошаговой реструктуризации имитационной модели вероятностного сетевого графика в режиме реального времени (инвариантное погружение соответствующей модели вероятностного технологического процесса во множество вероятностных моделей сетевого планирования с переменной структурой) для решения задачи исследования и управления вероятностными технологическими процессами. На основе метода пошаговой реструктуризации и новой версии системы автоматизации имитационного моделирования агрегатного типа предлагается способ имитации вероятностных технологических процессов, который является развитием методов решения классической проблемы синтеза оптимальных систем для вероятностных технологических процессов с изменяющейся структурой технологического цикла.*

**Ключевые слова:** *инвариантное погружение, вероятностный сетевой график, метод пошаговой реструктуризации имитационной модели, способ имитации вероятностных технологических процессов с переменной структурой.*

### **1. Введение**

Вероятностные технологические процессы (ВТП) как объект имитации обладают рядом особенностей, отличающих их от других объектов, исследуемых обычно с помощью имитационного моделирования: вероятностный характер взаимодействия компонентов технологического процесса с системой управления технологическим циклом; наличие ограничений на использование ресурсов технологического процесса и их качество, влияющее на надежность выполнения технологической операции; надежность характеристики использованного оборудования и необходимость оперативной синхронизации функционирования элементов системы управления при появлении случайных возмущений (сбоев и отказов оборудования).

Перечисленные особенности ВТП, наряду с возможными отклонениями параметров технологического цикла от нормы в процессе его реализации, могут изменить конечную цель технологического процесса в ходе осуществления производственной деятельности. Поэтому для реально функционирующих технологических процессов, характеризующихся нарушениями

выполнения технологического цикла, случайными отклонениями от графика во времени, возникновением аварийных ситуаций, задача анализа функционирования и управления вероятностными технологическими процессами еще более усложняется. В связи с вышеизложенным является актуальной разработка специальных методов их исследования и способов применения данных методов с помощью технических средств сопряжения элементов управления и имитационной модели с вероятностным технологическим процессом.

Перспективным средством для обоснования решений по сложным проблемам, возникающим при анализе функционирования вероятностных технологических процессов, стал системный подход к объекту имитации при анализе имеющих место в процессе реализации технологического цикла критических ситуаций: выбор стратегии реагирования на возникновение отказов функционирования оборудования при реализации технологических процессов опасного производства [1]; управление быстротекущими технологическими процессами, представляющими потенциальную угрозу, в режиме реального времени; выбор оптимальной стратегии при снятии с эксплуатации объектов с ядерными технологиями [2]. В настоящей работе для решения задачи исследования ВТП предлагается использовать метод инвариантного погружения соответствующего объекту моделирования вероятностного сетевого графика во множество вероятностных моделей сетевого планирования с переменной структурой.

В основу предлагаемого метода пошаговой реструктуризации имитационной модели вероятностного сетевого графика положен способ восстановления текущего состояния системы в режиме реального времени (инвариантное погружение) через случайные временные интервалы с использованием принципа организации квазипараллелизма «до следующего события» [3] при применении процедур Монте-Карло. Формальное представление технологического цикла при этом осуществляется с помощью вероятностного сетевого графика переменной структуры.

## **2. Формализация процесса реализации технологического цикла при пошаговой реструктуризации имитационной модели**

Одним из наиболее показательных примеров реализации метода инвариантного погружения, в смысле эффективности данного подхода, в теории оптимальных процессов является принцип оптимальности Беллмана, лежащий в основе динамического программирования. Для решения проблемы синтеза линейных непрерывных оптимальных систем метод инвариантного погружения в динамической постановке впервые применил Р. Габасов [4]. В настоящей работе для решения задачи качественного анализа и управления вероятностными технологическими процессами предлагается использовать метод инвариантного погружения соответствующего вероятностного сетевого графика (ВСГР) во множество вероятностных моделей сетевого планирования.

Описание процесса реализации технологического цикла основано на использовании в структуре соответствующей имитационной модели вероятностного сетевого графика агрегатов-имитаторов со стандартными элементами и сигналами, которые формируют управляющие воздействия на структуру модели в режиме реального времени путем их логической комбинации в зависимости от особенностей реализации вероятностного технологического процесса. Типы

элементов различаются между собой степенью сложности алгоритма их выполнения в зависимости от составов используемого оборудования, ресурсов и надежности технологических операций.

Связь между элементами осуществляется с помощью управляющих сигналов двух типов: действительных ( $Sgd$ ), инициирующих алгоритм выполнения исполнительных элементов, и фиктивных ( $Sgf$ ), которые минуя основной алгоритм функционирования элемента без его исполнения. Сигналы также имеют сложную структуру и состоят из трёх частей: типа сигнала ( $\pi_s$ ), адресной части ( $ad$ ) и информационной части ( $in$ ). У действительного сигнала  $Sgd_{ij}$  значение  $\pi_s = 1$ , а у фиктивного сигнала  $Sgf_{ij}$  значение индикатора  $\pi_s = 0$ . В адресной части  $ad = (i, k, l, j, r)$ , где  $i$  – номер элемента синхронизации на  $l$ -м разветвлении кустового выхода номера  $k$ , содержится информация, откуда и куда направляется сигнал. Формируется поступающий через исполнительный элемент на  $r$ -й вход  $j$ -го элемента сигнал в момент срабатывания спусковой функции  $i$ -го элемента синхронизации. Информационная часть  $Sgd_{ij}$  имеет вид  $in = (ps, so)$ , где  $ps$  – последствие выполнения элемента,  $so$  – состояние системы управления после выполнения исполнительного элемента в момент срабатывания «спусковой» функции. Если при выполнении исполнительного элемента произошла авария оборудования, то формируется признак аварии  $ps = '1'$ , а при отсутствии аварийной обстановки этот признак равен нулю ( $ps = '0'$ ).

Каждый исполнительный элемент системы управления является двухполюсным и инициируется только действительными сигналами  $Sgd_{ij}$ . В случае прихода фиктивного сигнала  $Sgf_{ij}$  на вход исполнительного элемента его алгоритм не выполняется, а сигнал поступает непосредственно на один из входов  $j$ -го элемента синхронизации.

В общем случае параметры выполнения алгоритма агрегатов-имитаторов ( $\tau_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $\{ko_{r8ij}\}$ ,  $\{mt_{r7ij}\}$ ,  $V_{r4}''$ ,  $V_{r2}'$ ) являются случайными величинами. Списки номеров оборудования, ресурсов, индивидуальных исполнителей и бригад исполнителей являются детерминированными характеристиками для исполнительного элемента с индексом  $ij$ . Параметры функционирования оборудования ( $\tau_{VOr}$ ,  $\tau_{BOr}$ ,  $\tau_{AVr}$ ) также являются случайными величинами. Все перечисленные ранее случайные величины перед имитацией должны быть заданы в виде соответствующих функций распределения, которые имеют следующие целевые назначения:

– определяют расход ресурсов ВТП исполнительным элементом с индексом  $ij$ :

$$F_{1ij}(\tau), F_{2ij}(C), F_{3rij}(ko), F_{4rij}(mt), F_{5rij}(V'); \quad (1)$$

– задают надёжностные характеристики устройств ВТПП номера  $r$ :

$$F_{7r}(\tau_{BO}), F_{8r}(\tau_{VO}), F_{9r}(\tau_{AV}), F_{10r}(\Delta C_1), F_{11r}(\Delta C_2), P_{avr}. \quad (2)$$

Таким образом, с помощью функций распределений (1) и (2) описываются вероятностные характеристики поведения соответственно исполнительных элементов при изменении технологического цикла ВТП. Детерминированные запросы ресурсов каждым исполнителем задаются перед имитацией с помощью множества списков

$$\{r_{1ij}\}, \{r_{2ij}\}, \{r_{3ij}\}, \{r_{4ij}\}, \{r_{5ij}\}, \{r_{6ij}\} \quad (3)$$

и определяют индивидуальность каждого исполнительного элемента системы управления.

### 3. Порядок взаимодействия агрегатов-имитаторов технологических операций при реализации метода пошаговой реструктуризации

Ключевым элементом системного анализа в данном случае является задача разработки подходящей имитационной модели вероятностного технологического процесса и выбора совокупности критериев, определяющих качественные характеристики исследуемого объекта, в качестве цели имитации. Недостаток достоверных данных при наличии неполной информации для анализа вероятностных технологических процессов приводит к необходимости пошаговой реструктуризации соответствующей имитационной модели в режиме реального времени, что связано, в первую очередь, с уровнем их сложности и организованности.

Поэтому, принимая во внимание особенности взаимодействия агрегатов-имитаторов, планируется работа исполнительных элементов синхронизации во время реализации алгоритма имитации в зависимости от операционной обстановки (наличия отказов оборудования, выхода значений контролируемых параметров технологических операций  $\{U_k\}$  за пределы допустимых диапазонов их изменения). Первый тип синхронизатора  $SLAST_i$  функционирует по алгоритму логической схемы «и». Вначале  $SLAST_i$  ожидает прихода сигналов на один из его входов. Допускается любое число входов  $(a_i)$ , которые нумеруются  $(r \leq a_i)$ . После прихода самого позднего сигнала на один из входов элемента  $SLAST_i$  срабатывает «спусковая» функция. В этот момент одновременно формируются все сигналы на разветвлениях выходов элемента. Второй тип синхронизатора  $SFIRST_i$  функционирует по алгоритму логической схемы «или». Этот элемент также ожидает прихода сигналов на его входы, и число его входов  $r \leq b_i$ . С приходом самого раннего сигнала  $Sgd_{ij}$  на любой из входов элемента срабатывает «спусковая» функция синхронизатора  $SFIRST_i$  и формируются сигналы на выходах элемента. С этого момента остальные сигналы  $Sgd_{ij}$  на  $SFIRST_i$  игнорируются алгоритмом элемента формирования выходных сигналов. Обработка сигналов элементами  $SLAST_i$  и  $SFIRST_i$  осуществляется одинаковым образом в момент срабатывания «спусковой» функции элемента.

У элементов синхронизации  $SLAST_i$  и  $SFIRST_i$  структура выходов одинакова. В общем случае все 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  $ij$ . Действительные сигналы  $Sgd_{ij}$  на  $l_k$ -х разветвлениях формируются 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 посылки  $Sgd_{ij}$  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 вектора  $\{U_k\}$  при их выходе за границы допустимых диапазонов значений. Для этого используется матрица  $\|\alpha_{rh}\|$ , в которой также имеется  $r$  строк и  $h$  столбцов ( $r < h$ ).

В заключение отметим, что по аналогии данный способ имитации также применим для графовых структур с произвольной организацией, циклических и ациклических сетей.

#### **4. Реализация имитационных моделей вероятностных сетевых графиков с переменной структурой с использованием метода реструктуризации**

Построение и использование имитационной модели вероятностного сетевого графика с изменяющейся структурой реализуется следующей последовательностью этапов.

На *этапе 1* задаётся структура исходной имитационной модели вероятностного технологического процесса с помощью операторов подсистемы *PS.FORMSG*.

На *этапе 2* реализуется натурный эксперимент с целью получения исходной информации для последующей проверки адекватности имитационной модели реальному объекту имитации. В случаях, когда не удаётся найти аналитический вид аппроксимирующих функций распределения, используется табличная форма их представления (стандартная для всех типов параметров агрегатов).

На *этапе 3* осуществляется верификация базового варианта имитационной модели. Задаётся начальный состав ресурсов, материалов, исполнителей и имитаторов оборудования. Далее формируются управляющие таблицы-справочники и таблицы базы данных для хранения статистики имитации, используемые в дальнейшем при организации имитационного эксперимента.

На *этапе 4* реализуются процедуры испытания и анализа свойств имитационной модели, которая представляет собой многошаговую процедуру использования стандартных методик

испытания сложных систем, в процессе которой реализуются типовые этапы испытания имитационных моделей [4].

Начиная с *этапа 5*, осуществляется контроль реализации имитационной модели в пошаговом режиме через случайные интервалы времени (до следующего события) с одновременной проверкой текущего состояния вероятностного технологического процесса на соответствие базовому варианту имитационной модели. В случае наличия полного соответствия объекту имитации часы модельного времени переводятся на следующее событие и функционирование имитационной модели продолжается. При изменении текущей структуры ВСГР производится запись реализовавшейся части вероятностного сетевого графика в базу данных модели. Последнее свершившееся событие фиксируется в качестве начального для дальнейшего продолжения имитации, после чего выполняется возврат на *этап 1*.

По окончании процесса имитации в базе данных имитационной модели завершается формирование оптимального сетевого графика, построенного в режиме реального времени и соответствующего заданным целям имитации с учетом реализовавшейся оперативной обстановки.

## 5. Выводы

1. Для решения задачи исследования и управления вероятностными технологическими процессами разработан метод пошаговой реструктуризации имитационной модели вероятностного сетевого графика в режиме реального времени, что составляет суть инвариантного погружения вероятностного сетевого графика, соответствующего моделируемому вероятностному технологическому процессу, во множество вероятностных моделей сетевого планирования с переменной структурой.

2. На основе метода пошаговой реструктуризации и новой версии системы автоматизации имитационного моделирования агрегатного типа [5] предложен способ имитации вероятностных технологических процессов для построения оптимальной структуры технологического процесса, который является развитием методов решения классической проблемы синтеза оптимальных систем для вероятностных технологических процессов с изменяющейся структурой технологического цикла.

3. В данной статье предложенный способ имитации вероятностных технологических процессов на основе метода пошаговой реструктуризации ориентирован на случаи, когда динамику функционирования исследуемого технологического процесса можно описать с помощью вероятностного сетевого графика переменной структуры на уровне элементов управления со сложной логикой при использовании технических средств сопряжения имитационной модели с вероятностным технологическим процессом.

Однако он также применим для графовых структур с произвольной организацией циклических и ациклических сетей, в том числе и при отсутствии технических средств сопряжения имитационной модели с вероятностным технологическим процессом.

4. Новый способ имитации вероятностных технологических процессов дает возможность рассчитывать на перспективу его дальнейшего применения при проектном моделировании производственных систем [1], выполнении научных исследований на объектах повышенной

опасности, включая объекты с ядерными технологиями [2], и проектировании высоконадежных технологических процессов для различных областей производственной деятельности.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. 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.
2. Горбачева Н.В. Информационное обеспечение прогноза последствий радиационных аварий на хранилищах отработанного ядерного топлива АЭС / Н.В. Горбачева, В.Г. Молодых, Г.А. Шароваров. – Минск, 2007. – 28 с. – (Препринт / НАН Беларуси. Объед. ин-т энергет. и ядер. исследований; Сосны; ОИЭЯИ – 26).
3. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 232 с.
4. Габасов Р. Построение оптимальных управлений типа обратной связи в линейной задаче / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова, О.И. Костюкова // ДАН СССР. – 1991. – Т. 320, № 6. – С. 1294 – 1299.
5. Смородин В.С. Агрегатная система автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства // Математичні машини і системи. – 2007. – № 1. – С. 105 – 110.

*Стаття надійшла до редакції 09.07.2008*