

**А.Н. ГОНЧАРОВ, И.В. МАКСИМЕЙ, В.С. СМОРОДИН, А.В. КЛИМЕНКО, Д.Н. ЕЗЕРСКИЙ**  
**ОБ ОДНОЙ МЕТОДИКЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**  
**ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА**

---

**Abstract:** Particularities of formalization of probabilistic technological processes of manufacture are considered. The strategy of using of system of automation of simulation modeling realizing a modular way of imitation is offered.

**Key words:** probabilistic processes of manufacture, modeling system, technology of imitation.

**Анотація:** Розглядаються особливості формалізації імовірнісних технологічних процесів виробництва. Запропонована методика використання системи автоматизації імітаційного моделювання агрегатного засобу імітації.

**Ключові слова:** імовірнісні процеси виробництва, система моделювання, технологія імітації.

**Аннотация:** Рассматриваются особенности формализации вероятностных технологических процессов производства. Предложена методика использования системы автоматизации имитационного моделирования агрегатного способа имитации.

**Ключевые слова:** вероятностные процессы производства, система моделирования, технология имитации.

## 1. Введение

Известны аналитические модели технологических процессов производства (ТПП), представляемые в виде сетевых графиков, которые используются только в тех случаях, когда связи между технологическими операциями и время их реализации можно описать в явном виде [1]. При этом сетевой график компонуется из двух типов элементов: событий  $SOB_i$  и  $SOB_j$ , где  $i, j = \overline{1, N}$ , и технологических операций ( $TXO_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ ), связывающих эти события. В некоторых случаях для анализа реализации технологических процессов применяются сети управления, но при этом налагается множество ограничений на их использование. Однако, как только состав параметров для описания процессов функционирования и управления производственной системы расширяется, а сами параметры становятся случайными величинами, задаваемыми при помощи соответствующих функций распределения, задача анализа динамики реализации технологического процесса существенно усложняется. Когда структура ТПП оказывается вероятностной, а запросы ресурсов предприятия на реализацию микротехнологических операций ( $MTXO_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ) имеют вероятностную природу, аналитические модели использовать нельзя в силу их неадекватности реальным ТПП. Поэтому для исследования вероятностных технологических процессов производства (ВТПП) используются имитационные модели (ИМ) вероятностных сетевых графиков (ВСГР), построенные с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) [2] агрегатного типа.

На основе учета особенностей ВСГР для данного случая в настоящей работе предлагаются: формализация ВТПП с помощью ВСГР для отображения динамики их функционирования; технология использования САИМ для построения имитационных моделей ВСГР; использование комплекса имитационного моделирования ВСГР для решения задач исследования вероятностных ТПП.

## 2. Описание объекта исследования

Особенностью рассматриваемого ВСГР являются: графовая структура взаимосвязей  $MTXO_{ij}$  при реализации ВТПП; наличие отказов оборудования, приводящих к аварии; ограниченный состав ресурсов предприятия, который приводит к конкуренции  $MTXO_{ij}$  за эти ресурсы; необходимость оценки предаварийной и поставарийной ситуаций и перевода оборудования на резервирование или переход на профилактику всего состава оборудования ВТПП.

В случае ненадежного функционирования оборудования необходимы также оценка влияния характеристик надежности на интегральные отклики имитационной модели и определение вероятности безотказного выполнения технологического процесса за интервал экспертно определенного времени его реализации. Используя кибернетический подход к исследованию сложных систем, представим концептуальную модель объекта исследования следующим образом. Имеется ВТПП графовой структуры, который мы представим в виде вероятностного сетевого графика (ВСГР), состоящего из множества  $\{MTXO_{ij}\}$ , связанных между собой с помощью множества событий  $\{SOB_i\}$ . Для реализации каждой  $MTXO_{ij}$  необходим набор определенных ресурсов  $\{R_i\}$ , где  $i = \overline{1,10}$  – номера этих ресурсов. В нашем случае для выполнения  $MTXO_{ij}$  при свершении  $SOB_i$  требуются следующие ресурсы: время реализации  $\tau_{ij}$ , стоимость выполнения технологической операции  $c_{ij}$ , комплектующие детали  $KO_{ij}$ , материалы  $mt_{ij}$ , бригады исполнителей номера  $n_{6ij}$ , группы исполнителей-универсалов в количестве  $n_{5ij}$ , количество  $n_{4ij}$  места на общем ресурсе предприятия  $V_{4ij}$ , количество  $n_{3ij}$  ресурсов индивидуального пользования, количество  $n_{2ij}$  места на устройствах общего пользования  $V_{2ij}$ , количество устройств оборудования  $n_{1ij}$  индивидуального пользования. В общем случае часть запросов на ресурсы ( $\tau_{ij}$ ,  $c_{ij}$ ,  $KO_{ij}$ ,  $mt_{ij}$ ,  $V_{4ij}$ ,  $V_{2ij}$ ) определяется случайными величинами, в то время как другие запросы ресурсов ( $n_1 \div n_{6ij}$ ) являются детерминированными, характерными для каждой  $MTXO_{ij}$ . Случайные величины заданы с помощью соответствующих функций распределения  $F_{1R_i}(z_1)$ , где  $z_1$  – количество ресурсов  $R_i$ -го типа. Множество запросов ресурсов  $\{(F_{1R_i}(z_h), z_h)\}$  образуют структуру требований  $\{G_h\}$  ресурсов предприятия  $h$ -го варианта ВСГР.

## 3. Особенности формализации вероятностного технологического процесса

Важной составляющей концептуальной модели являются надежность характеристики оборудования ВТПП. Динамика поведения каждого  $k$ -го устройства ресурсов типа  $R_1$  и  $R_2$  определяется набором следующих длительностей функционирования: безотказной работы ( $\tau_{БОК}$ ), восстановления отказа ( $\tau_{ВОК}$ ), ликвидации простой аварии ( $\tau_{АВК}$ ), ликвидации сложной аварии ( $\tau_{САВК}$ ). В общем случае эти характеристики являются случайными величинами, задаваемыми для

каждого  $k$ -го устройства в виде функций распределения  $F_{2R_k}(z_k)$ , где  $z_k$  – номер устройства ресурса  $R_k$ -го типа. Кроме того, для каждого  $k$ -го устройства определяется вектор вероятностей нахождения устройства в состоянии работоспособности ( $P_{БОТК}$ ), простого отказа ( $P_{ОТК}$ ), простой аварии ( $P_{АВК}$ ), сложной аварии ( $P_{САВК}$ ). Таким образом,  $k$ -е устройство характеризуется множеством  $\{F_{2R_k}(z_k)\}$  и множеством  $\{P_{БОТК}, P_{ОТК}, P_{АВК}, P_{САВК}\}$ , которое называется надежностными характеристиками второго типа. Конкретные  $l$ -е реализации характеристик надежности  $k$ -х устройств ( $\tau_{БОКl}, \tau_{ВОКl}, \tau_{АВКl}, \tau_{САВКl}$ ) при использовании процедуры Монте-Карло в ходе имитации ВСГР формируются по функциям распределения времени, а надежностные характеристики второго типа являются детерминированными для каждого  $k$ -го устройства. Поэтому в ходе имитации ВСГР при каждом использовании  $k$ -го устройства оборудования  $MTXO_{ij}$  по жребию второго типа разыгрываются (для указанных вероятностей) состояния устройства  $S_K$ , а длительности нахождения устройства в этих состояниях разыгрываются по жребию третьего типа [3].

Характеристики надежности функционирования оборудования представляют собой множество параметров имитации первого типа:

$$\{X_{1k}\} = \{(F_{2R_k}(z_k), P_{БОТК}, P_{ОТК}, P_{АВК}, P_{САВК})\}.$$

Второй группой параметров ВСГР является состав ресурсов предприятия, предоставляемый на условиях конкуренции  $\{MTXO_{ij}\}$  на время их выполнения:

$$\{X_{2R}\} = \{(n_{0R}, V_{0R})\}; k = \overline{1, 6},$$

где  $n_{0R}$  – общее количество ресурсов  $R$ -го типа у предприятия,  $V_{0R}$  – начальный размер места на  $R$ -м ресурсе, выделяемом на время выполнения  $MTXO_{ij}$ .

Откликами  $h$ -го варианта ИМ ВСГР являются компоненты вектора  $Y_h$ :  $T_{КРh}$  – критическое время реализации  $h$ -го варианта ВСГР;  $\sum c_h$  – суммарная стоимость выполнения множества  $\{MTXO_{ij}\}$ ;  $\sum KO_h$  – суммарные запросы комплектующих при выполнении  $h$ -го варианта ВТПП;  $\sum mt_h$  – суммарный расход материалов при реализации  $h$ -го варианта ВТПП.

Статистиками имитации в  $l$ -й реализации ИМ ВСГР являются множество  $\{t_{Pil}, t_{Пil}, R_{il}\}$  ранних, поздних сроков и резервов времени свершения  $SOB_i$ ; множество  $\{t_{PHil}, t_{ПHil}, t_{POil}, t_{ПОil}\}$  сроков выполнения  $MTXO_{ij}$ .

Определение указанных статистик приведено в работе [4]. Таким образом, на входе «черного ящика» имеются множества  $\{X_{1kh}\}, \{X_{2Rh}\}, \{G_h\}$ , а на выходе определяются значения компонентов вектора  $Y_h$ . В ходе имитации фиксируется множество усредненных по всем  $l$ -м реализациям статистик реализации  $h$ -го варианта ВСГР:

$$ST_{1h} = \{\bar{t}_{Pih}, \bar{t}_{Пih}, \bar{R}_{Пih}\},$$

$$ST_{2h} = \{\bar{t}_{PHNi}, \bar{t}_{PNijh}, \bar{t}_{POih}, \bar{t}_{POij}\}.$$

Для определения вероятности  $P_{БОТКh}$  безотказного выполнения  $h$ -го варианта реализации ТПП необходимо задать в качестве дополнительного параметра имитации экспертный период времени его выполнения ( $T_{exp}$ ).

Целевой функцией имитационного моделирования ВТПП является

$$\min \bar{Y}_h = \varphi(\{X_{1kh}\}, \{X_{2kh}\}, \{X_{3h}\}, \{G_h\}). \quad (1)$$

Оценка  $h$ -х вариантов ВТПП проводится по усредненному вектору откликов из всех  $l = \overline{1, N}$  реализаций ВСГР (согласно процедуре Монте-Карло).

#### 4. Методика использования системы автоматизации имитационного моделирования

Исследование вероятностного технологического процесса производства реализуется в 9 этапов. На *этапе 1* формируется структура имитационной модели ВСГР путем простой замены  $MTXO_{ij}$  на  $AMTXO_{ij}$  и  $SOB_i$  на  $ASOB_i$ . На этапе 2 необходимо подготовить параметры имитации ( $\{X_{1kh}\}, \{X_{2kh}\}, \{X_{3h}\}, \{G_h\}; T_{exp}$ ) на основе натуральных экспериментов с прототипами ВТПП или методом экспертных оценок. На этапе 3 осуществляется процедура «запитки» ИМ ВСГР значениями параметров имитации. Для этой цели имеются соответствующие средства ввода информации в базу данных САИМ. Далее осуществляется компоновка ИМ ВСГР из универсальных программ, находящихся в библиотеке компонентов моделей САИМ ( $LIBCOMP$ ). На этапе 4 проводится испытание очередной версии ИМ ВСГР согласно методикам, изложенным в работе [4] и включающим в себя оценку точности имитации, проверку длины переходного периода имитации, анализ устойчивости модели, оценку чувствительности откликов к изменениям параметров и оптимизацию состава параметров и откликов моделирования.

Для случая исследования реального ВТПП на этапе 5 осуществляется проверка адекватности ИМ ВСГР реальному ВТПП. В САИМ автоматически осуществляется проверка близости средних значений откликов ИМ ВСГР соответствующим характеристикам реального ВТПП. По завершении испытания ИМ ВСГР на этапах 4 и 5 исследователь может приступить к эксплуатации модели на этапах 6–9. На этапе 6 определяется значение отклика  $T_{KPh}$  с помощью двойной имитации ВСГР, осуществляемой в три шага. На первом шаге находится критическое значение  $l$ -й реализации ВСГР ( $T_{KPlh}$ ), а на втором шаге формируется граф критических путей реализации ВСГР путем наложения результатов имитации всех  $N$  реализаций ВСГР ( $l = \overline{1, N}$ ). На третьем шаге по графу критических путей ( $GRKRP_h$ )  $h$ -го варианта определяется  $T_{KPh}$  путем расчета ранних и поздних сроков свершения событий аналогично реализации этапа 5. На этапе 7 определяется влияние состава и размеров ресурсов на компоненты вектора откликов имитации, путем нахождения зависимости  $Y = \varphi_1(X_{3h})$  при одних и тех же значениях остальных характеристик  $\{X_{1kh}\}, \{X_{2kh}\}, \{G_h\}$ .

На этапе 8 определяется влияние характеристик надежности на значение компонентов вектора откликов  $Y = \varphi_2(X_{1h}; X_{2h})$  при фиксированных значениях  $\{X_{3h}\}, \{G_h\}$ . Для этой цели значения каждого компонента множеств  $\{X_{1h}\}, \{X_{2h}\}$  изменяются соответственно на  $r_1$  и  $r_2$  уровнях. Число уровней комбинаций компонентов этих множеств определяется ресурсами постановки серии экспериментов, каждая из которых, согласно процедуре Монте-Карло, реализуется  $N$  раз. В результате формируется матрица пар значений  $M = \|X_{1n}, X_{2n}\|$  размерности  $(r_1 \times r_2)$ . На пересечении строки и столбца этой матрицы определяется пара значений параметров для имитации  $h$ -го варианта ВСГР. Проводится имитационный эксперимент, в ходе которого измеряется количество отказов устройств ( $v_1$ ), количество простых аварий ( $v_2$ ), число сложных аварий ( $v_3$ ) и общее число использований всех устройств ( $v_0$ ). С помощью этих статистик имитации для  $z$ -комбинации ( $z=1, (r_1 \times r_2)$ )  $h$ -го варианта ВТПП определим вероятность отказа за время выполнения  $T_{КРh}$ :

$$P_{OTzh} = \frac{v_1}{v_0}; P_{ABzh} = \frac{v_2}{v_0}; P_{CABzh} = \frac{v_3}{v_0}.$$

В результате этого определяется вектор вероятностей отказов и возникновения аварий ( $P_{OTzh}, P_{ABzh}, P_{CABzh}$ ). Далее по этим статистикам формируются зависимости компонентов откликов имитации от параметров надежности функционирования устройств:

$$T_{КРh} = \varphi_{3h}(X_{1h}, X_{2h}), \quad \sum c_h = \varphi_4(X_{1h}, X_{2h}), \\ \sum KO = \varphi_5(X_{1h}, X_{2h}), \quad \sum mt = \varphi_6(X_{1h}, X_{2h}).$$

Кроме того, формируется еще одна группа зависимостей вероятности отказа за время выполнения  $T_{КРh}$ :  $P_{OTzh} = \varphi_{7h}(X_{1h}, X_{2h}); P_{AB} = \varphi_8(X_{1h}, X_{2h}); P_{CAB} = \varphi_9(X_{1h}, X_{2h})$ .

На этапе 9 определяется вероятность появления отказа за период  $T_{exp}$ . С этой целью для  $h$ -го варианта организации ТПП вводится булева переменная, которая при  $l$ -й реализации ВСГР принимает значения

$$\omega_{lh} = \begin{cases} 1, & \text{если } P_{OTzh} > 0 \text{ при } T_{КРlh} \leq T_{exp}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

После проведения серии из  $N$  экспериментов определяется вероятность отказа за период  $T_{exp}$  в  $h$ -м варианте ВСГР по формуле  $P_{exp} = \omega_{lh} / N$ , где  $N$  – число реализаций ВСГР согласно процедуре Монте-Карло.

## 5. Выводы

Согласно предлагаемой методике имитационного моделирования, на основе сочетания процедуры Монте-Карло и агрегатного способа имитации, реализуемого с помощью САИМ, имеется реальная возможность исследования технологических процессов производства для случая вероятностной природы запросов ресурсов на выполнение микротехнологических операций  $\{MTXO_{ij}\}$  и решения

ряда практических задач: оценки критического времени выполнения ВТПП; определения состава и размеров ресурсов, необходимых для реализации ВСГР; расчета оценок диапазона расхода ресурсов, материалов и комплектующих изделий при заданном составе рабочих мест и оборудования предприятия; расчета технического резерва надежности оборудования для повышения безопасности функционирования производства и конкурентоспособности предприятий на внешнем рынке.

Неадекватность реальным ТПП получаемых с использованием обычного математического аппарата математических моделей обусловила необходимость разработки новых подходов, программных средств автоматизации и технологий их применения в соответствующих областях исследования и проектном моделировании вероятностных технологических процессов производства. При этом на первый план выдвигается задача стабилизации уровня надежности проектируемой производственной системы в соответствии с заданным критерием качества ее функционирования. Решение этой задачи на современном этапе развития производства имеет серьезную техническую поддержку в образе сложных технических систем, которые включают в свой состав измерительные комплексы, технологическое оборудование и обслуживающий персонал, и является актуальным для специалистов, работающих в области оценки безопасности функционирования промышленных предприятий и проектирования высоконадежных производственных систем.

Подобного рода результатов исследований нельзя достичь аналитическими методами из-за невыполнимости ряда ограничений при использовании таких моделей ВТПП. За счет имитации агрегатным способом с помощью САИМ достигается автоматизация исследований. Отсутствие ограничений на использование данной методики и простота перехода от ВСГР к имитационной модели ВТПП является дополнительным преимуществом использования имитации. Поэтому предложенная методика использования САИМ имеет перспективу использования для широкого класса вероятностных технологических процессов производства.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Жогаль С.И., Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. – Ч. 1: Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 109 с.
2. Максимей И.В., Смородин В.С., Сукач Е.И. Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов // Информатика. – 2005. – № 1. – С. 25–31.
3. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследования операций. – Ч. 2: Методы нелинейного и стохастического программирования: Учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.
4. Гончаров А.Н., Максимей И.В., Смородин В.С. Технология имитации и обработки результатов в системе автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2005. – Т. 7, № 3. – С. 71–87.

*Стаття надійшла до редакції 20.09.2007*