

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 τ_{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 (τ_{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:

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

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

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