

ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Abstract: *Technological processes of manufacture, described by means of the probabilistic network graphs, are considered. Particularities of imitation and way of formalization of technological process are given. Strategy of verification of simulation models of technological processes of manufacture with the variable structure is offered.*

Key words: *technological processes of manufacture, strategy of verification, simulation models with the variable structure.*

Анотація: *Розглядаються технологічні процеси виробництва, які описуються імовірносними сітковими графіками, особливості імітації і засоби формалізації технологічного процесу. Запропонована методика верифікації імітаційних моделей технологічних процесів виробництва із змінною структурою.*

Ключові слова: *технологічні процеси виробництва, методика верифікації, імітаційні моделі змінної структури.*

Аннотация: *Рассматриваются технологические процессы производства, описываемые с помощью вероятностных сетевых графиков, особенности имитации и способы формализации технологического процесса. Предложена методика верификации имитационных моделей технологических процессов производства с переменной структурой.*

Ключевые слова: *технологические процессы производства, методика верификации, имитационные модели переменной структуры.*

1. Введение

Проблема верификации имитационной модели (ИМ) объекта исследования особенно актуальна при разработке ИМ вероятностных технологических процессов производства (ВТПП) из-за непредсказуемого характера взаимодействий агрегатов $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_i$ [1]. В тех случаях, когда ВТПП реализуется на оборудовании, при работе которого могут происходить отказы и аварии, актуальна задача определения с помощью имитационной модели степени влияния надежностных характеристик оборудования и состава ресурсов предприятия на реализацию ВТПП.

Для решения данной задачи требуется верификация имитационной модели производственной системы с переменной структурой. Вероятностный технологический процесс обладает следующими особенностями: наличием возможности отказов оборудования, приводящих к авариям и конкуренции $MTXO_{ij}$ за ресурсы, что в результате ухудшает временные характеристики реализации ВТПП; наличием графовой структуры связей микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$, где $i, j = \overline{1, n}$, n – количество узлов графа), реализующих ВТПП, которая изменяется вследствие возникновения отказов и аварий оборудования в процессе его функционирования; необходимостью исследования во времени реализации технологического процесса динамики использования ресурсов предприятия; необходимостью оценки возникновения предаварийной ситуации для досрочного перевода оборудования ВТПП на резервирование или профилактику.

Эти особенности определяют актуальность решения следующих задач:

– верификация имитационной модели вероятностного сетевого графика (ВСГР), отображающего параллельно-последовательный процесс выполнения технологических операций, для получения доверия к модели;

– определение значения критического времени T_{kp} реализации ИМ ВСГР;

– оценка значений таких откликов имитационной модели, как суммарные затраты финансов ($\sum_{i,j} C_{ij}$), общее количество используемых комплектующих изделий ($\sum_{i,j} ko_{ij}$) и материалов ($\sum_{i,j} mt_{ij}$). Важно при этом анализировать также результат влияния состава и размеров ресурсов ВТПП при h -м варианте его организации ($h = \overline{1, N}$) на значения перечисленных откликов модели. Решение поставленных задач осуществляется в рамках технологических процессов производства, описываемых с помощью вероятностного сетевого графика. В работе приводятся особенности имитации, способы формализации подобных технологических процессов и предложена методика верификации их имитационных моделей.

2. Формализация вероятностного технологического процесса производства

Во время функционирования вероятностного технологического процесса производства каждая микротехнологическая операция из множества $\{MTXO_{ij}, i, j = \overline{1, n}\}$ требует для выполнения предоставления на время её реализации десяти типов ресурсов: ресурса времени реализации τ_{ij} ($R = 10$); стоимости C_{ij} (затрат) на выполнение операции ($R = 9$); комплектующих изделий ko_{ij} ($R = 8$); материалов mt_{ij} ($R = 7$); количества бригад n_{6ij} ($R = 6$) и исполнителей n_{5ij} ($R = 5$); количества общих ресурсов n_{4ij} ($R = 4$) и места на общих ресурсах V_{4ij} предприятия; количества ресурсов индивидуального использования n_{3ij} ($R = 3$); количества устройств оборудования общего пользования n_{2ij} ($R = 2$) и места на этом оборудовании V_{2ij} ; количества устройств оборудования индивидуального пользования n_{1ij} ($R = 1$).

Запросы ресурсов ($\tau_{ij}, C_{ij}, ko_{ij}, mt_{ij}, V_{4ij}, V_{2ij}$) являются случайными величинами. Запросы количества ресурсов ($ZP_{ij} (n_{1ij} \div n_{6ij})$) – постоянными и индивидуальными величинами для каждой $MTXO_{ij}$. Случайные величины задаются с помощью соответствующих функций распределения ($F_{Rij}(z)$). Таким образом, структура запросов h -го варианта реализации ВСГР множеством $\{MTXO_{ij}\}$ описывается множеством G_h . В качестве параметров ИМ ВСГР используются множество $\{n_{OR}\}$ общего количества ресурсов R -го типа и множество $\{V_{OR}\}$ начального размера ресурсов общего пользования.

В вектор откликов Y_h для h -го варианта имитационной модели ВСГР входят следующие компоненты: критическое время его реализации (T_{Kph}), суммарная стоимость $\sum_{i,j} C_{ijh}$ выполнения множества $\{MTXO_{ij}\}$, суммарные запросы комплектующих изделий $\sum_{i,j} ko_{ijh}$, суммарный расход материалов $\sum_{i,j} mt_{ijh}$. Статистиками имитации в l -й реализации ИМ ВСГР являются множество

ранних и поздних сроков свершения событий, а также резервов выполнения $SOB_i (\{t_{pil}, t_{Til}, R_{il}\})$; множество характеристик времени выполнения $MTXO_{ij} (\{t_{p\ ij}, t_{n\ ij}, t_{po\ ij}, t_{no\ ij}\})$ [2]. Таким образом, на входе имитационной модели имеются множества $\{G_h\}$, $\{n_{OR}\}$, $\{V_{OR}\}$, а на выходе модели определяются значения компонентов вектора Y_n .

Критерием качества при анализе результатов моделирования ВСГР является функция

$$\min \bar{Y}_h = \varphi (\{n_{OR}\}, \{G_h\}). \quad (1)$$

Оценка h -го варианта организации ВТПП получается путем усреднения векторов откликов, полученных из всех l -х реализаций структуры ВСГР согласно процедуре Монте-Карло ($l = \overline{1, N}$).

3. Особенности реализации имитационной модели вероятностного сетевого графика

Анализ функционирования ВТПП осуществляется с помощью имитационной модели агрегатного типа, которая реализуется благодаря системе автоматизации имитационного моделирования (САИМ) [2].

САИМ реализует агрегатный способ имитации, когда $MTXO_{ij}$ и SOB_i , используемые при формализации ВТПП, заменяются соответствующими агрегатами-имитаторами $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_i$ в ИМ ВСГР. Первой особенностью имитации с помощью САИМ является использование процедуры Монте-Карло [3]. Для l -ой реализации в режиме прямой имитации (модельное время растёт от 0 до $T_{кpl}$) каждому агрегату $AMTXO_{ij}$ выделяются ресурсы предприятия на время выполнения $MTXO_{ij}$, что имитируется соответствующими операторами ожидания $WAIT (\tau_{ij})$. Перед выполнением операции в моменты свершения события SOB_i фиксируется статистика расхода ресурсов ($\sum_{i,j} C_{ijh}$, $\sum_{i,j} ko_{ijh}$, $\sum_{i,j} mt_{ijh}$) множеством $\{MTXO_{ij}\}$ и статистика свершения событий завершения выполнения операций $\{AMTXO_{ij}\}$. Второй особенностью имитации является то, что множества $\{AMTXO_{ij}\}$ и $\{ASOB_i\}$ реализуются только двумя универсальными реентерабельными программами-имитаторами. Поэтому алгоритмы программ-имитаторов агрегатов $AMTXO_{ij}$ с помощью множества параметров $\{G_h\}$ формируют запросы на ресурсы ВТПП и взаимодействуют посредством сигналов с агрегатами $ASOB_i$. Для каждого агрегата $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_i$ в базе данных САИМ отводится место для хранения запросов ресурсов предприятия и статистик имитации. Имеет место подобие ВТПП с имитационной моделью ВСГР за счет замены $MTXO_{ij}$ и SOB_i на соответствующие агрегаты-имитаторы [4].

4. Методика верификации имитационной модели

Верификация ИМ, построенной с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) агрегатного типа, реализуется следующей последовательностью этапов.

На **первом этапе** исследования формируется структура имитационной модели ТПОП путем замены $MTXO_{ij}$ на $AMTXO_{ij}$, SOB_i на $ASOB_i$, подготовки таблиц коммутации агрегатов согласно ВСГР и последующей актуализации таблиц запросов ресурсов агрегатами в базе данных САИМ.

На **втором этапе** осуществляется подготовка параметров имитации на основе натуральных экспериментов с прототипами ТПОП либо экспертным заданием их значений в тех случаях, когда ТПОП проектируется. Результаты измерений значений запросов ресурсов используются для построения функций распределения. Количество n_R ресурсов R -го типа ($R = \overline{1, 10}$), используемых каждой $MTXO_{ij}$, задается технологом, исходя из априорной информации (чаще всего нормативных расходов ресурсов каждой $MTXO_{ij}$) с помощью соответствующей функции распределения ($F_{ijR}(z)$). Функции распределения формируются с помощью гистограмм с последующей их аппроксимацией стандартными распределениями.

На **третьем этапе** осуществляется «запитка» имитационной модели наборами параметров средствами САИМ, в результате которой вводятся исходные значения параметров в базу данных для h -го варианта реализации имитационной модели ТПОП. Компоновка элементов имитационной модели при этом осуществляется из универсальных «заготовок» программ-агрегатов, находящихся в библиотеке моделей *LIBCOMP* системы автоматизации имитационного моделирования. В итоге формируется программа имитационной модели ВСГР с параметрами пространства начальных значений, которые отображаются в виде трех множеств: $\{n_{OR}\}$, $\{\bar{V}_{OR}\}$, $\{\bar{G}_h\}$.

На **четвертом этапе** осуществляется верификация ИМ ВСГР реальному ТПОП. Проводится испытание очередной версии ИМ ВСГР, которое состоит из двух фаз. На первой фазе испытания проводится верификация имитационной модели, представляющая собой завершение этапа создания программы ИМ ВСГР.

Верификация программы имитационной модели ВСГР обычно осуществляется в серединной точке пространства параметров. Основная трудность верификации состоит в том, что запросы ресурсов $MTXO_{ij}$ формируются с помощью функций распределения $F_{ijR}(z)$ с использованием жребиев 2-го типа [3]. Верификация реализуется следующей последовательностью шагов **этапа 4**. На **шаге 1 этапа 4** проверяется правильность отображения динамики взаимодействия управляющей программы моделирования с программами агрегатов $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_i$ согласно технологии «проектирования единичной нити» [5]. С этой целью формируется пять вариантов одной реализации ИМ ВСГР для случая, когда функции распределения представляют собой нормальное распределение с параметрами $N(a_{ij}, S_{ij})$, где a_{ij} и S_{ij} – соответственно среднее значение и средне-квадратичное отклонение запроса ресурсов ТПОП ($\tau_{ij}, C_{ij}, ko_{ij}, mt_{ij}$). В варианте 1 для всех запросов $AMTXO_{ij}$ по функциям распределения формируются конкретные значения запросов, равные $a_{ij} - S_{ij}/2$. В варианте 2 значения запросов ресурсов от $AMTXO_{ij}$ равны $a_{ij} - S_{ij}/4$. Для вариантов 3, 4 и 5 устанавливаются значения запросов

ресурсов $AMTXO_{ij}$, соответственно равные a_{ij} , $a_{ij} + S_{ij}/4$ и $a_{ij} + S_{ij}/2$. Таким образом, в текущей реализации ИМ ВСГР значения вероятностных запросов ресурсов предприятия для реализации $\{AMTXO_{ij}\}$ заменяются детерминированными величинами на всем диапазоне нормального распределения $N(a_{ij}, S_{ij})$ их значений. На *шаге 2 этапа 4* каждый из пяти вариантов ВСГР представляет собой сетевой график с постоянными значениями запросов ресурсов $(\tau_{ijk}, C_{ijk}, ko_{ijk}, mt_{ijk})$, где k – номер варианта. Поэтому на основании методики анализа параметров сетевого графика рассчитываются отклики $Y_l = (T_{kpl}, \sum_{i,j} C_{ijl}, \sum_{i,j} ko_{ijl}, \sum_{i,j} mt_{ijl})$ отладочного варианта имитационной модели. На *шаге 3 этапа 4* проводится имитационный эксперимент с помощью программы ИМ ВСГР для тестового примера. Проверяется близость (с точностью до заданной ошибки имитации ε) расчетных значений вектора откликов $Y_l^* = (T_{kpl}^*, C_l^*, ko_l^*, mt_l^*)$ со значениями вектора откликов Y_l , полученными с помощью программы имитационной модели ВСГР. При выполнении неравенств

$$\begin{aligned} |T_{kpl}^* - T_{kpl}| \leq \varepsilon; & \quad \left| C_l^* - \sum_{i,j} C_{ijl} \right| \leq \varepsilon, \\ \left| ko_l^* - \sum_{i,j} ko_{ijl} \right| \leq \varepsilon; & \quad \left| mt_l^* - \sum_{i,j} mt_{ijl} \right| \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

считаем, что ИМ ВСГР для l -го варианта ($l = \overline{1,5}$) верифицирована. Проверка близости расчетных значений вектора откликов с откликами ИМ ВСГР для всех пяти вариантов позволяет убедиться, что «единичная нить» ИМ ВСГР верифицирована.

На *шаге 4 этапа 4* проверяется поведение ИМ ВСГР при «большой нагрузке», которая в данном случае представляет собой имитацию на тестовом варианте с использованием жребиев 3-го типа [3], обеспечивающих розыгрыш вероятностных характеристик l -й реализации ВСГР $(\tau_{ijl}, C_{ijl}, ko_{ijl}, mt_{ijl})$. В итоге имитации тестового варианта программы ИМ ВСГР определяется вектор откликов $Y_l = (T_{kpl}, \sum_{i,j} C_{ijl}, \sum_{i,j} ko_{ijl}, \sum_{i,j} mt_{ijl})$ при $l = \overline{1, N}$ имитационной модели согласно процедуре Монте-Карло. Ожидаемое значение компонентов вектора отклика $Y_l^* = (T_{kpl}^*, C_l^*, ko_l^*, mt_l^*)$ ИМ ВСГР вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} T_{kpl}^* &= 0,05T_{kpl}^* + 0,2T_{kpl}^* + 0,5T_{kpl}^* + 0,2T_{kpl}^* + 0,05T_{kpl}^*, \\ C_l^* &= 0,05 \sum_{i,j} C_{1ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} C_{2ijl}^* + 0,5 \sum_{i,j} C_{3ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} C_{4ijl}^* + 0,05 \sum_{i,j} C_{5ijl}^*, \\ ko_l^* &= 0,05 \sum_{i,j} ko_{1ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} ko_{2ijl}^* + 0,5 \sum_{i,j} ko_{3ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} ko_{4ijl}^* + 0,05 \sum_{i,j} ko_{5ijl}^*, \\ mt_l^* &= 0,05 \sum_{i,j} mt_{1ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} mt_{2ijl}^* + 0,5 \sum_{i,j} mt_{3ijl}^* + 0,2 \sum_{i,j} mt_{4ijl}^* + 0,05 \sum_{i,j} mt_{5ijl}^* \end{aligned} \quad (3)$$

и проверяется близость расчетных значений вектора откликов $Y_l^* = (T_{kp1}^*, C_l^*, ko_l^*, mt_l^*)$ со значениями вектора $Y_l = (T_{kp1}, \sum_{i,j} C_{ijl}, \sum_{i,j} ko_{ijl}, \sum_{i,j} mt_{ijl})$, полученными в ходе имитации.

Таким образом, выполнение неравенств (2) для всех откликов имитационной модели позволяет убедиться в том, что тестовый вариант ИМ ВСГР верифицирован в случае розыгрыша запросов ресурсов «большая загрузка» по функциям распределения $F_{ijR}(z)$.

Вторая фаза **этапа 4** представляет собой испытание верифицированной версии программы ИМ ВСГР с параметрами, значения которых соответствуют серединной точке пространства параметров, согласно методикам, изложенным в работе [5]. Испытание включает в себя оценку точности имитации, проверку длины переходного периода имитации, анализ устойчивости имитационной модели, оценку чувствительности откликов модели к изменениям параметров и оптимизацию состава параметров откликов модели.

Проверка близости средних значений откликов имитационной модели соответствующим характеристикам реального ВТПП осуществляется с помощью САИМ автоматически. По завершении данного этапа делается вывод, что тестовый вариант ИМ верифицирован и прошел все процедуры испытания модели, поэтому имитационной модели ВСГР можно доверять.

5. Выводы

Предложенная методика верификации имитационной модели технологического процесса производства с переменной структурой в процессе функционирования технологического цикла позволяет решать задачу анализа степени влияния надежностных характеристик оборудования и состава ресурсов предприятия для тех случаев, когда технологический процесс реализуется на оборудовании, при работе которого могут происходить отказы и аварии и тем самым может являться потенциальным источником техногенной опасности. Подобная методика имеет перспективу использования, поскольку обеспечивает возможность автоматизации проведения расчетов при оценке надежности и анализе безопасности функционирования производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смородин В.С. Методика контроля и принятия решений при имитационном моделировании технологических процессов опасного производства // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 5. – С. 79–91.
2. Смородин В.С. Агрегатно-процессный стенд имитации для контроля реализаций технологии опасного производства // Проблеми програмування. – 2006. – № 4. – С. 73–83.
3. Максимей И.В., Серегина В.С. Задачи и модели исследования операций: Учебное пособие. – Гомель: БелГУТ, 1999. – Ч. 2: Методы нелинейного и стохастического программирования. – 103 с.
4. Максимей И.В. Технология имитации и обработки результатов в системе автоматизации моделирования вероятностных технологических процессов производства / И.В. Максимей, А.Н. Гончаров, В.С. Смородин // Реєстрація, зберігання і обробка даних (Data Recording, Storage & Processing). – 2005. – Т. 7, № 3. – С. 71–87.
5. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 222 с.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2007