

УДК 007; 681.3

Об одной методике верификации имитационных моделей технологических процессов производства

А. Н. Гончаров, Д. Н. Езерский, А. В. Клименко, В. С. Смородин

1. Введение

Объектом исследования являются вероятностные технологические процессы производства (ВТПП), обладающие следующими особенностями: графовая структура связей микротехнологических операций ($MTXO_{ij}$, где $i, j = \overline{1, n}$, n – количество узлов графа), реализующих ВТПП; наличие отказов оборудования, приводящих к авариям и конкуренции $MTXO_{ij}$ за ресурсы и ухудшающих в итоге временные характеристики его реализации; необходимость исследования во времени реализации технологического процесса динамики использования ресурсов предприятия; оценка наличия предаварийной ситуации, досрочный перевод оборудования ВТПП на резервирование или же переход на профилактику всего состава оборудования. Эти особенности определяют актуальность ряда задач исследования: верификации имитационной модели (ИМ) вероятностного сетевого графика (ВСГР) для получения доверия к модели; определения значения T_{kp} критического времени реализации ВСГР; оценки значений таких откликов ИМ ВСГР, как суммарные затраты финансов $\sum_{i,j} C_{ij}$, общее количество используемых комплектующих изделий $\sum_{i,j} ko_{ij}$ и материалов $\sum_{i,j} mt_{ij}$. Весьма важно анализировать также результат влияния состава и размеров ресурсов ВТПП при h -м варианте его организации ($h = \overline{1, N}$) на значения перечисленных откликов ИМ ВСГР.

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 (R) ресурсов: ресурса времени реализации τ_{ij} ($R=10$); стоимости (затрат) на выполнение операции C_{ij} ($R=9$); комплектующих деталей 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 общего пользования n_{2ij} ($R=2$) и места на этом оборудовании V_{2ij} ; количества устройств оборудования индивидуального пользования n_{1ij} ($R=1$). При этом запросы ресурсов ($\tau_{ij}, C_{ij}, ko_{ij}, mt_{ij}, V_{4ij}, V_{2ij}$) являются случайными величинами. Запросы количества ресурсов $ZP_{ij} = n_{1ij} \div n_{6ij}$ являются 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 реализа-

ции 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 $SOB_i \{(t_{pil}, t_{pil}, R_{il})\}$; множество времени выполнения $MTXO_{ij} \{t_{p ijl}, t_{n ijl}, t_{po ijl}, t_{no ijl}\}$ [1]. Таким образом, на входе «черного ящика» имеется множество $\{G_h\}$, $\{n_{OR}\}$, $\{V_{OR}\}$, а на выходе имитационной модели определяются значения компонентов вектора Y_n . В качестве целевой функции для анализа результатов моделирования ВСГР используется следующая 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. Реализация имитационной модели вероятностного сетевого графика

Анализ функционирования ВТПП осуществляется с помощью имитационной модели агрегатного типа, которая реализуется с помощью системы автоматизации имитационного моделирования (САИМ) [1]. 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 в САИМ является использование процедуры Монте-Карло [2]. Для l -ой реализации в режиме прямой имитации (модельное время растет от 0 до $T_{кpl}$) каждому агрегату $AMTXO_{ij}$ выделяются ресурсы предприятия на время выполнения $MTXO_{ij}$, которые имитируются 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 $\{AMTXO_{ij}\}$.

Второй особенностью САИМ 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 [1].

4. Методика верификации имитационной модели

Проблема верификации ИМ ВСГР объекту исследования особенно актуальна при разработке ИМ ВТПП из-за непредсказуемого характера взаимодействий агрегатов $AMTXO_{ij}$ и $ASOB_i$. Как следует из работы [1], связь между агрегатами в ИМ ВСГР осуществляется с помощью сигналов. Поэтому комплексная отладка программ агрегатов и управляющей программы моделирования (УПМ) с помощью САИМ реализуется следующей последовательностью этапов.

На *этапе 1* исследования формируется структура имитационной модели ВСГР путем замены $MTXO_{ij}$ на $AMTXO_{ij}$, SOB_i на $ASOB_i$, подготовки таблиц коммутации агрегатов согласно ВСГР и последующего формирования таблиц запросов ресурсов агрегатами в базе данных САИМ. На *этапе 2* осуществляется подготовка параметров имитации либо на основе натуральных экспериментов с прототипами ВТПП, либо экспертным заданием их значений в тех случаях, когда ВТПП проектируется. Результаты измерений значений запросов ресурсов используются для построения соответствующих функций распределения ($F_{ijR}(z)$). Количество n_R ресурсов R -го типа, используемых каждой $MTXO_{ij}$, задается технологом ВТПП, исходя из априорной информации (чаще всего исходя из нормативных расходов ресурсов каждой $MTXO_{ij}$). Функции распределения формируются с помощью гистограмм с последующей их аппроксимацией стандартными распределениями. На *этапе 3* проводится «запитка» ИМ ВСГР наборами параметров, используя для этой цели средства САИМ, с дальнейшим вводом исходных значений параметров в базу данных h -го варианта имитационной модели. При этом осуществляется компоновка ИМ ВСГР из универсальных «заготовок» программ агрегатов, находящихся в библиотеке моделей САИМ (*LIBCOMP*). В итоге формируется программа имитационной модели с параметрами в серединной точке пространства их значений, которое отображается в виде трех множеств: $\{n_{OR}\}$, $\{\bar{V}_{OR}\}$, $\{\bar{G}_h\}$. На *этапе 4* осуществляется верификация программы ИМ ВСГР в серединной точке пространства параметров. Основная трудность верификации программы имитационной модели состоит в том, что запросы ресурсов $MTXO_{ij}$ формируются с помощью функций распределения $F_{ijR}(z)$ с помощью жребиев 2-го типа. Верификация реализуется 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 «проектирование единичной нити». С этой целью формируются пять вариантов 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 средние значения и средне-квадратичные отклонения запросов ресурсов ВТПП ($\tau_{ij}, C_{ij}, ko_{ij}, mt_{ij}$). В варианте 1 для всех запросов $AMTXO_{ij}$ по функциям распределения формируются конкретные значения запросов, равные $a_{ij} - \frac{S_{ij}}{2}$. В варианте 2 значения запросов ресурсов от $AMTXO_{ij}$ равны $a_{ij} - \frac{S_{ij}}{4}$. Для вариантов 3, 4 и 5 устанавливаются значения запросов ресурсов $AMTXO_{ij}$ соответственно a_{ij} , $a_{ij} + \frac{S_{ij}}{4}$ и $a_{ij} + \frac{S_{ij}}{2}$. Таким образом, значения вероятностных запросов ресурсов заменяются детерминированными величинами на всем диапазоне нормального распределения $N(a_{ij}, S_{ij})$ значений запросов ресурсов предприятия для реализации $\{AMTXO_{ij}\}$. На *шаге 2 этапа 4* каждый из пяти вариантов ВСГР представляет собой се-

тевой график с постоянными значениями запросов ресурсов $(\tau_{ijl}, C_{ijl}, ko_{ijl}, mt_{ijl})$, где l – номер варианта, поэтому на основании методики анализа параметров сетевого графика [4] рассчитываются вручную ожидаемые значения откликов $Y_l^* = (T_{kpl}^*, \sum C_l^*, \sum ko_l^*, \sum mt_l^*)$ для 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 ошибки имитации ε) расчетных значений откликов вектора Y_l^* значениям вектора откликов Y_l , полученных с помощью программы имитационной модели ВСГР. Только при выполнении неравенств

$$\begin{aligned} |T_{kpl}^* - T_{kpl}| \leq \varepsilon; & \quad \left| \sum C_l^* - \sum C_l \right| \leq \varepsilon; \\ \left| \sum ko_l^* - \sum ko_l \right| \leq \varepsilon; & \quad \left| \sum mt_l^* - \sum mt_l \right| \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (2)$$

считаем, что ИМ ВСГР для l -го варианта организации ВТПП верифицирована. Эта проверка близости расчетных значений вектора откликов с откликами ИМ ВСГР для всех пяти вариантов имитации позволяет убедиться, что «единичная нить» имитационной модели 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, 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 модели при $l = \overline{1, N}$ согласно процедуре Монте-Карло: $Y_N = (T_{kpN}, \sum C_N, \sum ko_N, \sum mt_N)$. Вычисляется ожидаемое значение компонентов отклика Y_N^* ВСГР по формулам:

$$\begin{aligned} T_{kpN}^* &= 0,05T_{kp1}^* + 0,2T_{kp2}^* + 0,5T_{kp3}^* + 0,2T_{kp4}^* + 0,05T_{kp5}^*; \\ \sum C_N^* &= 0,05\sum C_1^* + 0,2\sum C_2^* + 0,5\sum C_3^* + 0,2\sum C_4^* + 0,05\sum C_5^*; \\ \sum ko_N^* &= 0,05\sum ko_1^* + 0,2\sum ko_2^* + 0,5\sum ko_3^* + 0,2\sum ko_4^* + 0,05\sum ko_5^*; \\ \sum mt_N^* &= 0,05\sum mt_1^* + 0,2\sum mt_2^* + 0,5\sum mt_3^* + 0,2\sum mt_4^* + 0,05\sum mt_5^* \end{aligned} \quad (3)$$

При выполнении для всех откликов следующих неравенств:

$$\begin{aligned} |T_{kpN}^* - T_{kpN}| \leq \varepsilon; & \quad \left| \sum C_N^* - \sum C_N \right| \leq \varepsilon; \\ \left| \sum ko_N^* - \sum ko_N \right| \leq \varepsilon; & \quad \left| \sum mt_N^* - \sum mt_N \right| \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

можно считать, что тестовый вариант ИМ ВСГР верифицирован для случая розыгрыша запросов ресурсов («большая загрузка») по функциям распределения $F_{ijR}(z)$.

На *этапе 5* проводится испытание версии имитационной модели ВСГР с параметрами в серединной точке пространства параметров согласно методикам, изложенным в работе [4]. 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.

Для случая исследования реального вероятностного технологического процесса на *этапе 5* осуществляется проверка адекватности имитационной модели реальному ВТПП. С помощью САИМ автоматически осуществляется проверка близости средних значений откликов имитационной модели соответствующим характеристикам реального ВТПП [1]. К

завершению *этапа 5* можно считать, что тестовый вариант ИМ верифицирован и прошел все процедуры испытания модели, поэтому имитационной модели ВСГР можно доверять.

5. Заключение

Предложенная методика верификации имитационной модели ВСГР путем замены распределений $F_{ijR}(z)$ нормальными и расчета откликов ИМ в пяти областях значений параметров этих распределений имеет перспективу использования, поскольку существенно сокращает объем рутинных вычислений, выполняемых в процессе отладки имитационной модели ВСГР.

Abstract. Technological processes of manufacture described by means of the probabilistic network graphs are considered in the paper. It also presents the description of structure of simulation model and the way of formalizing technological processes and offers the strategy of verification of simulation model of probabilistic technological processes of manufacture.

Литература

1. Максимей, И.В. Система автоматизации экспериментов, реализующая агрегатный способ имитации технологических процессов / И. В. Максимей, В. С. Смородин, Е. И. Сукач // Информатика, 2005. – № 1. – С. 25–31.

2. Максимей И.В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 2. Методы нелинейного и стохастического программирования: Учебное пособие / И. В. Максимей, В. С. Серегина // – Гомель: БелГУТ, 1999. – 103 с.

3. Максимей, И. В. Задачи и модели исследования операций. Ч. 1. Аналитические модели исследования операций: Учебное пособие / И. В. Максимей, С. П. Жогаль // – Гомель: БелГУТ, 1999. – 110 с.

4. Максимей, И. В. Имитационное моделирование на ЭВМ / И. В. Максимей // Москва: Радио и связь, 1988. – 222 с.: ил.

Гомельский инженерный институт МЧС РБ

Поступило 2.05.07

Гомельский государственный
университет имени Ф. Скорины