

УДК 681.3

В.Д. Левчук, П.Л. Чечет, Е.О. Попова, В.В. Старченко, А.С. Помаз

## ВЕРИФИКАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА С ИЕРАРХИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

*Рассмотрена декомпозиция предмета исследований на составляющие элементы, описывается их взаимодействие, приводится структурная схема тестового объекта моделирования. В результате постановки и анализа имитационных экспериментов по верификации разработанной имитационной модели делается вывод о том, что модель технологического процесса производства с иерархической структурой согласуется с опытом эксплуатации реального объекта моделирования.*

### Введение

Технологические процессы производства (ТПП) традиционно исследуются методами имитационного моделирования [1, 2]. При этом разработаны как отдельные модели, так и предметно-ориентированные пакеты имитационного моделирования ТПП. Характерной особенностью традиционно используемого инструментария является то, что объект моделирования рассматривается в виде одноуровневой сети. Рассмотрение ТПП на нескольких иерархических уровнях позволяет построить имитационные модели достаточно широкого класса данных систем. Авторами была реализована обобщенная имитационная модель ТПП с иерархической структурой. Данная статья посвящена результатам ее верификации.

### 1. Декомпозиция объекта моделирования

Исследуемый объект моделирования (рис. 1) представляет собой совокупность следующих компонентов:

- заданий, отображающих отдельные единицы потока деталей, агрегатов, изделий, заготовок, которые прибывают на вход объекта моделирования для обработки;
- множества независимых многоканальных (в общем случае) источников обработки (ИО) заданий;
- множества микротехнологических операций (МТХО), выполняемых на определенных ИО;
- множества разделяемых между МТХО ресурсов (как людских, так и материальных);
- приемника ограниченного объема для ожидания выполнения МТХО, который может находиться внутри ИО;
- множества иерархических технологических процессов (ТП), характеризующихся технологической картой (ТК) – графом, в котором вершины соответствуют паре ИО, МТХО, а дуги определяют последовательность МТХО по обработке заданий.

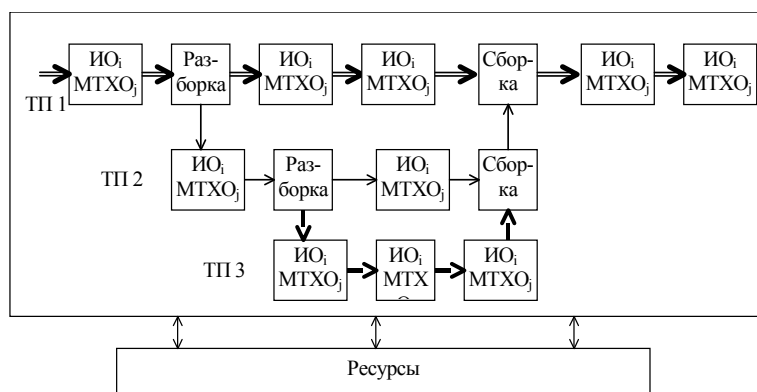


Рис. 1. Пример объекта моделирования

Компоненты объекта моделирования обладают следующими свойствами:

- поток заданий имеет вероятностную природу произвольного вида;
- любое задание характеризуется только номером ТП, находящегося на верхнем уровне иерархии, который будем называть начальным ТП;
- ИО включает в себя неразделяемые ресурсы, т.е. выходные характеристики ИО и его ресурсов – одни и те же величины;
- между ИО (точнее, ИО и приемником другого ИО) может быть операция транспортировки, которая реализуется по той же схеме, что и другая МТХО;
- задания (или их составные части) перемещаются между ИО согласно ТК и удаляются из объекта моделирования после обработки на последнем ИО;
- время выполнения МТХО определяется согласно уникальным вероятностным законам распределения;
- задание может быть подвергнуто специальной МТХО *Разборка*, которая на графе отображается в виде двух или более дуг, исходящих из одной вершины (каждой отделяемой части соответствует одна дуга и подчиненный ТП);
- два или более задания могут быть подвергнуты обратной специальной МТХО *Сборка*, при этом множество дуг собирается в одну вершину, а соответствующие ТП завершаются.

## 2. Взаимодействие подсистем и элементов имитационной модели ТПП

Формальная модель ТПП составлена на основе принципов, изложенных в работе [1], и базовой схемы формализации СМ МІСІС4 [3]. На первом этапе были выделены компоненты имитационной модели (ИМ) и их параметры (рис. 2):

- информационные транзакты с именами *Задание\_1*, *Задание\_2*, ..., поступающие в ИМ согласно заданному вероятностному закону;
- генератор транзактов типа *Задание*;
- узел *ИО*, соответствующий технологическому уровню ИМ и включающий два устройства: *Приемник* – очередь для ожидания обслуживания и *Операцию* – обслуживающий прибор (если на приборе имеется неограниченное количество каналов или объем *Приемника* равен нулю, то очередь отсутствует);
- узел обработки (*УО*), включающий в себя обработку и управление ресурсами МТХО;
- обработка МТХО представлена устройствами *Захват Ресурсов* и *Обработка МТХО*;
- управление ресурсами МТХО обеспечивается множеством пар устройств (*Очередь К Ресурсу*; *Ресурс*);
- управляющий транзакт *Заявка*, связанный с парой (*ИО*, *МТХО*) и содержащий объем всех необходимых ресурсов для выполнения МТХО;
- управляющий транзакт *ЗаявкаНаРесурс*, имеющий объем в необходимом количестве одного ресурса и хранящий номер родительского транзакта;
- управляющий транзакт *ВозвратРесурса*, имеющий объем 0.

Схематически процесс обслуживания показан на рис. 2. *Генератор* вводит транзакты типа *Задание* в ИМ по заданному закону распределения. Задание по присвоенному номеру ТП направляется на первый *ИО*, который определяется из ТК. Далее этот транзакт из узла *ИО* попадает в очередь и находится там до освобождения обслуживающего прибора. На нем *Задание* по номеру МТХО генерирует транзакт типа *Заявка* и отправляет его в *УО*, соответствующий МТХО. Сам транзакт *Задание* переходит в состояние «задержан».

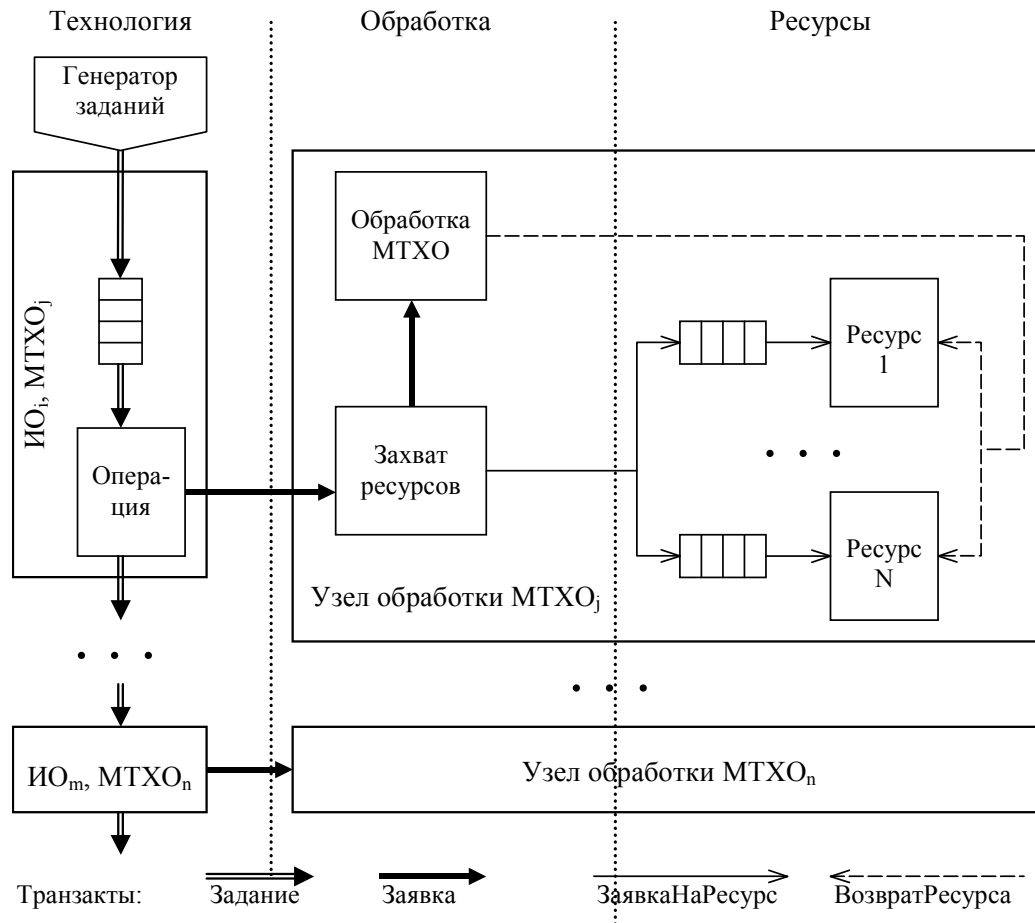


Рис. 2. Схема процесса обслуживания

Транзакт *Заявка* на устройстве *ЗахватРесурсов* с неограниченным количеством каналов также переходит в состояние «задержан», а перед этим согласно номеру МТХО отправляет совокупность транзактов типа *ЗаявкаНаРесурс* на свой узел *Ресурс*. Каждый транзакт *ЗаявкаНаРесурс* поступает в очередь и ожидает там освобождения устройства управления ресурсом. Когда устройство *Ресурс* освободится, транзакт *ЗаявкаНаРесурс* выходит из очереди, задерживается на время захвата ресурса, устанавливает на родительский транзакт *Заявка* признак захвата ресурса и проверяет, выделены ли все ресурсы. При положительном ответе транзакт *Заявка* возвращается в состояние обслуживания. Независимо от ответа *ЗаявкаНаРесурс* переходит в состояние «задержан».

Транзакт *Заявка* направляется на устройство обработки МТХО, где задерживается на интервал модельного времени, определяемый по случайному закону распределения, соответствующему данной МТХО. По окончании обработки *Заявка* переводит родительский транзакт *Задание* в состояние обслуживания. *Задание*, если ТП еще не завершен, перемещается по ТК на следующий узел *ИО* в том случае, если в его очереди имеются свободные каналы. Иначе *Задание* остается на том же *ИО* до освобождения очереди, а в случае завершения ТП транзакт удаляется из модели.

Транзакт *Заявка* отправляет совокупность транзактов типа *ВозвратРесурса* на свое устройство *Ресурс* и удаляется из модели. Каждый транзакт *ВозвратРесурса*, имеющий нулевой объем занимаемых каналов, минуя очередь к ресурсу, сразу поступает на устройство управления ресурсом. Этот транзакт задерживается на время возврата ресурса, а затем находит парный транзакт *ЗаявкаНаРесурс*, переводит его в состояние обслуживания, а сам удаляется из модели. Транзакт *ЗаявкаНаРесурс* также удаляется из модели, автоматически возвращая захваченный ранее объем ресурса.

МТХО *Разборка* порождает дополнительный транзакт *Задание*, которому присваивается номер ТП. Если порожденный транзакт *Задание* приходит на МТХО *Сборка* раньше родительского, то он просто переходит в состояние «задержан», иначе сообщает родительскому транзакту *Задание* о завершении ТП и удаляется из модели. Родительский транзакт *Задание*, приходя на МТХО *Сборка*, проверяет наличие порожденных транзактов, фиксирует факт их прибытия и удаляет из модели. Если собраны не все транзакты, то родительский транзакт задерживается, а иначе двигается дальше.

Приведенная схема обслуживания не зависит от количества ТП, ИО, МТХО и ресурсов. Она позволяет с помощью СМ МІСІС4 реализовать ИМ довольно большого класса ТПП.

### 3. Структурная схема тестового объекта моделирования

В качестве тестового объекта для проверки сделанных на этапе формализации решений и предположений было выбрано вагонное депо – реальный ТПП с иерархической структурой. Вагонное депо предназначено для выполнения планового ремонта вагонов, вагонных узлов и деталей. В его состав входят цеха трех типов:

- эксплуатационные;
- ремонтные;
- вспомогательные и обслуживающие.

Технологический процесс реализуется в ремонтных цехах (рис. 3), которые имеют следующую структуру:

1. Вагоносборочный цех (34 обычных МТХО, 7 сборочных, 7 разборочных).

2. Подсобно-заготовительный цех (57 обычных МТХО, 2 сборочных, 2 разборочных) со следующими отделениями:

- контрольный пункт автосцепки (КПА);
- отделение по ремонту бортов платформ, дверей и люков полувагонов (ОРБП);
- отделение по ремонту триангелей (ОРТ);
- механическое отделение (ОМЕХ);
- кузнечный участок (КУЗН);
- тележечный участок (ТЕЛУ);
- деревообрабатывающий участок (ДЕРУ);
- автоконтрольный пункт (АКП).

3. Колесно-роликовый цех (КРЦ) (17 обычных МТХО), включающий:

- колесный участок (КУЧ);
- роликовый участок (РУЧ).

В узлах обработки МТХО реализуется захват следующих видов ресурсов: тепловоз, кран, дефектоскоп; подсобный рабочий, старший мастер, мастер, бригадир, слесарь, столяр, электро-сварщик, маляр, токарь, оператор, станочник.

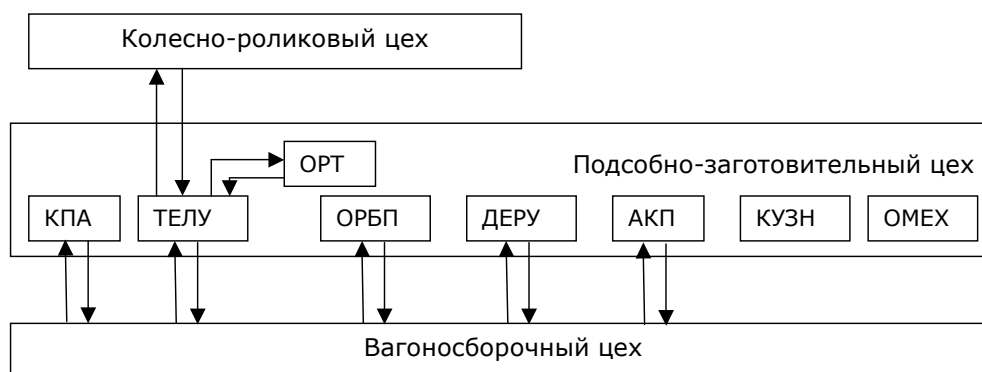


Рис. 3. Схема перемещения вагонов, их узлов и деталей между ремонтными цехами

#### 4. Параметры, переменные, статистики и отклики ИМ вагонного депо

Исходя из содержательного описания ТП в ремонтных цехах можно составить ТК ремонтных работ в отделениях и на участках депо. Данная ТК, представляющая собой граф-схему связей МТХО<sub>ij</sub>, позволяет представить основные операции по ремонту вагонов, выполняемые обслуживающим персоналом. Выделим следующие группы характеристик участков и отделений депо, участвующих в формировании ТП из последовательностей МТХО<sub>ij</sub>:

1. Задаваемые характеристики  $i$ -го участка депо  $ZH_i$ , которые определяются на начальном этапе исследований либо в ходе натуральных экспериментов, либо экспертным путем.

2. Управляемые параметры имитационного эксперимента  $UP_i$ , представляющие собой те характеристики внешнего потока, которые могут меняться в ходе имитационных экспериментов (ИЭ).

3. Статистики имитации  $ST_{ij}$ , определяемые в ходе очередного ИЭ для каждого  $\rho$ -го варианта моделирования ТП депо. В состав множества  $ST_{ij}$  входят измеряемые на входе ИЭ следующие статистики:

- для поиска узких мест в ТП отделений и участков (длины очередей  $l_{очij}$ , среднего времени ожидания деталей или узлов вагонов в этих очередях  $t_{ожij}$ );

- для оценки эффективности использования оборудования  $n$ -го типа  $\eta_{Обнi}$  и исполнителей  $k$ -го типа  $\eta_{Искi}$  в реализации ТП  $i$ -го участка депо;

- для оценки удельного веса каждой МТХО<sub>ij</sub> как в составе ТХО<sub>i</sub>, так и при реализации ТП в депо ( $\eta_{ТХОij}$ );

- средней длительности обслуживания параллельно выполняемых МТХО<sub>ij</sub> ( $T_{орi}$ ), где  $\rho$  – номер параллельно выполняемой ветви в  $i$ -м отделении депо;

- для верификации алгоритмов имитации ТП в моделях  $i$ -х отделений и участков депо ( $VR_i$ );

- для проверки адекватности ТП имитационной модели реальному технологическому процессу  $i$ -го отделения или участка депо ( $AD_i$ ) при конкретных значениях рабочей нагрузки на депо и заданном составе матрицы вероятностей неисправностей вагонов  $\|O_{ij}\|$ .

4. Отклики ИМ ТП в депо определяются по расчетным формулам из статистик моделирования и задаваемым параметрам ИМ депо. Отклик  $O_i$  представляет собой вектор характеристик  $i$ -го отделения или участка депо, компонентами которого являются характеристики:

– пропускной способности ( $O_{mi}$ );

– стоимости организации ТП<sub>i</sub> ( $O_{эi}$ );

– структурной организации операций ( $O_{si}$ );

– надежности технологического оборудования ( $O_{ни}$ );

– использования ресурсов ( $O_{pi}$ ).

Целью имитационного моделирования ТП в депо является поиск вида и параметров регрессионной зависимости откликов  $O_i$  от параметров модели  $UP_i$  при заданных значениях  $ZH_i$ :

$$O_i = \psi(UP_i, ZH_i) \quad (1)$$

Использование зависимостей вида (1) в практической работе оправдано, поскольку ИЭ – достаточно дорогой процесс, требующий больших ресурсов времени и средств. Поэтому наличие табулированных значений зависимостей (1) для разных  $ZH_i$  и структур ТП в участках и отделениях депо позволит оперативно оценивать их пропускную способность, а также вычислять ряд экономических и структурных показателей организации работы депо, представленных векторами откликов  $O_i$ .

#### 5. Постановка и анализ имитационных экспериментов по верификации ИМ

При имитационном моделировании сложных систем аналитику необходимо верифицировать запрограммированную модель, прежде чем переходить к решению поставленных задач. Под верификацией понимается процесс постановки ИЭ, позволяющий определить, правильно

ли концептуальная модель (модельные допущения) преобразована в компьютерную программу [2]. Наиболее эффективные методы, используемые при верификации, основаны на постановке серии ИЭ.

Авторами статьи реализованы два различных режима функционирования разработанной ИМ вагонного депо. В первом режиме указывается общее количество вагонов, требующих ремонта. При запуске модели начинается одновременное обслуживание «пакета» вагонов на нескольких технологических линиях, и моделирование продолжается либо до окончания обслуживания всех вагонов, либо до превышения модельным временем некоторой задаваемой величины. Во втором режиме задается время моделирования, и на вход модели поступают вагоны для обслуживания через интервалы времени, являющиеся реализацией случайной величины с произвольным законом распределения.

При постановке ИЭ были взяты реальные значения рассмотренных выше параметров и переменных модели. Для определения точности (доверительного интервала) откликов был проведен эксперимент с шестью вагонами, и результаты по двум критичным откликам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты ИЭ для оценки точности

Номер прогона	Отклики	
	Среднее время реализации МТХО <sub>11</sub> (идентификация неисправности), мин.	Средняя длина очереди к ресурсу «кран», шт.
1	125,2	6,45
2	124,54	6,46
3	125,06	6,55
4	128,06	6,53
5	125,9	6,53

Рассчитанные значения точечных и интервальных оценок [4] для данных откликов приведены в табл. 2, из которой следует, что полученный размах доверительного интервала не превышает 3% от среднего значения. Это согласуется с результатами натурального эксперимента.

Таблица 2

Точечные и интервальные оценки откликов

Оценка	Отклики	
	Среднее время реализации МТХО <sub>11</sub> (идентификация неисправности), мин.	Средняя длина очереди к ресурсу «кран», шт.
Среднее	125,75	6,5
Дисперсия	1,9	0,002
Доверительный интервал	[123,85; 127.66]	[6,50; 6,51]

Анализ чувствительности позволяет проверить согласие экспериментальных данных с опытом эксплуатации объекта моделирования. В частности, время выполнения МТХО<sub>16</sub> (выкатка тележек) весьма чувствительно к переменной  $t_{16}$  – среднему интервалу времени между поступлением двух вагонов. В поставленном ИЭ переменная  $t_{16}$  (рис. 4) принимала значения из множества [4000; 4500; 5000; 5500; 6000].

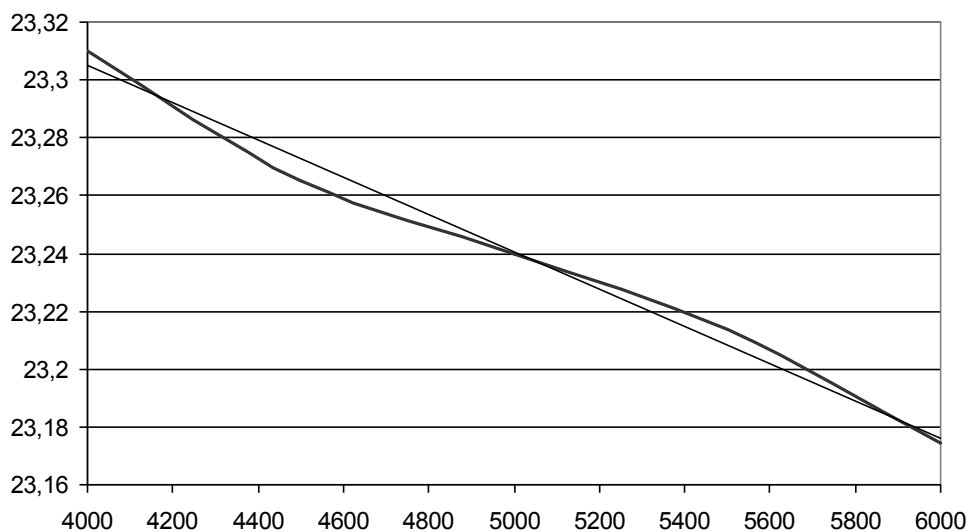


Рис. 4. Зависимость времени выполнения МТХО<sub>16</sub> от переменной  $t_{16}$

Коэффициент корреляции между значениями составил  $-0,93$ , т. е. угловой коэффициент регрессионной прямой не является малым. Поэтому можно сделать вывод о чувствительности отклика к изменениям переменной на интервале ее варьирования [5], что и требовалось доказать.

Изучение динамики поведения откликов в модельном времени позволяет установить наличие стационарного режима в функционировании сложной системы. На рис. 5, 6 показаны результаты изменения двух откликов (длины очереди к подсобному рабочему и времени выполнения МТХО<sub>17</sub>, т. е. подготовительных работ для снятия автосцепки), полученные по трем различным прогонам ИМ. Из рис. 5, 6 видно, что в ИМ имеется стационарный режим, наступающий при разных значениях модельного времени.

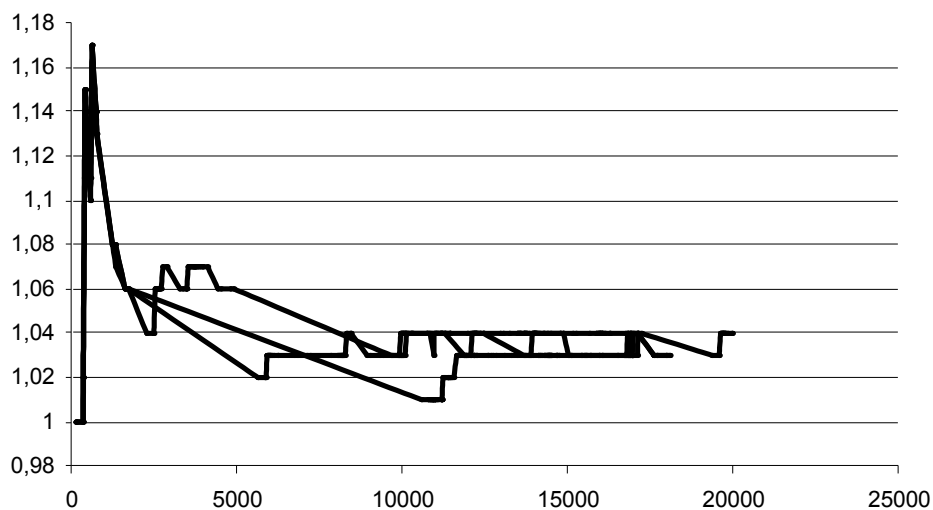


Рис. 5. Зависимость длины очереди к подсобному рабочему от модельного времени

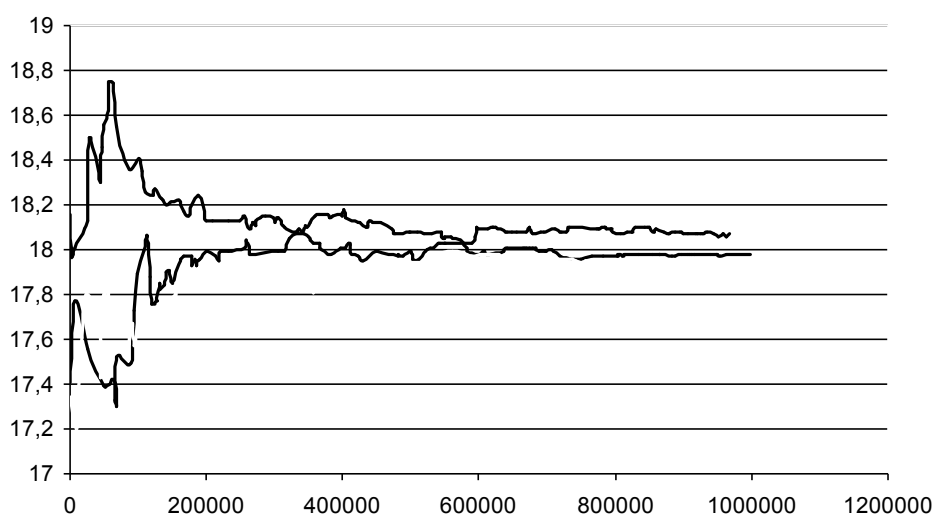


Рис. 6. Зависимость времени выполнения МТХО<sub>17</sub> от модельного времени

Для дополнительной верификации модели была проанализирована зависимость между интенсивностью поступления вагонов и временем, затрачиваемым на ремонт одного вагона. Результаты расчетов представлены в табл. 3, из которой видно, что время ремонта уменьшается при уменьшении частоты поступления вагонов. Это хорошо согласуется с функционированием реальной системы. Уменьшение времени ремонта объясняется тем, что при уменьшении частоты поступления вагонов уменьшается загрузка ресурсов. Это приводит к сокращению очередей к ресурсам, а следовательно, и к сокращению времени на их захват, что, в конечном счете, ускоряет ремонт вагона.

Таблица 3

Зависимость между интенсивностью поступления вагонов и временем, затрачиваемым для ремонта одного вагона

Среднее время между поступлением двух вагонов, мин.	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000
Среднее время ремонта одного вагона, мин.	2424,2	2282,3	2256,8	2168,6	2142,8	2123,5	2104,3

При функционировании вагонного депо, выбранного в качестве тестового объекта моделирования, в «пакетном» режиме ремонт вагонов на технологических линиях начинается одновременно. Вследствие этого от каждого вагона практически одновременно поступают заявки на одинаковые ресурсы (по крайней мере, на начальном этапе ремонта). Поэтому наличие достаточного количества ресурсов существенно сказывается на скорости выполнения ремонта. В подтверждение этому был проведен ряд ИЭ с различным количеством ресурса «кран», который всегда требуется на начальной стадии ремонта. Результаты моделирования представлены в табл. 4, из которой следует, что вначале, при увеличении количества кранов, происходит значительное сокращение времени (в два раза), требуемого для ремонта шести вагонов, затем сокращение времени прекращается. Это означает, что теперь критичным ресурсом является какой-то другой. Аналогично можно проанализировать влияние любого ресурса на время выполнения ремонта.

Таблица 4

Зависимость между количеством кранов и временем, затрачиваемым на ремонт шести вагонов

Количество кранов, шт.	1	2	3	4	5	6	7
Время ремонта шести вагонов, мин.	7008,6	4190,8	3722,3	3540,3	3493,1	3493,1	3493,1



### Заключение

Результаты постановки ИЭ позволяют сделать вывод о том, что разработанная имитационная модель ТПП с иерархической структурой является достоверной. На дальнейших этапах исследования планируется получить оценки адекватности имитационной модели ТПП реальному объекту – Гомельскому вагонному депо. При наличии удовлетворительных результатов можно переходить к решению различных задач функционирования и управления ТПП с иерархической структурой.

### Список литературы

1. Попова Е.О. Имитационная модель технологического процесса дискретного производства // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – № 3(18). – 2003. – С. 59–63.
2. Структура программы имитационной модели на языке моделирования MICIS4 / В.Д. Левчук, В.В. Старченко и др. // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – № 3(18). – 2003. – С. 23–27.
3. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: ВНУ, 2004. – 847 с.
4. Задачи и модели ИСО. Ч. 3. Технология имитации на ЭВМ и принятие решений: уч. пособие / И.В. Максимей, В.Д. Левчук и др. – Гомель: БелГУТ, 1999. – 150 с.
5. Левчук В.Д. Справочное пособие по дисциплине «Машинное моделирование сложных систем». – Гомель: ГГУ, 1999. – 48 с.

Поступила 14.10.04

*Гомельский государственный  
университет им. Ф. Скорины,  
Советская, 104  
e-mail: lv@gsu.unibel.by*

**V.D. Liauchuk, P.L. Chechat, E.O. Popova, U.U. Starchanka, A.S. Pomaz**

### **VERIFICATION OF A SIMULATION MODEL OF A PRODUCTION TECHNOLOGICAL PROCESS WITH HIERARCHICAL STRUCTURE**

A decomposition of the subject of studies on internal elements is considered. The interaction of elements and structure scheme of the test object of modeling is described. As the result of setting and analysis of simulation experiments on verification of the performed simulation model. The conclusion is made that a model of a technological process of production with the hierarchical structure is coordinated with the experience of real modeling object using.