

УДК 007; 681.3

В. Д. Левчук

Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины
ул. Советская, 104, 246699 Гомель, Республика Беларусь

Имитационное моделирование технологического процесса производства с иерархической структурой

Предложен подход к формализации технологических процессов производства с иерархической структурой на основе инструментальных средств симулятора MICIS4. В процессе постановки имитационных экспериментов было показано, что разработанный инструментарий является эффективным средством изучения данных объектов.

***Ключевые слова:** технологический процесс производства с иерархической структурой, программно-технологический инструментарий MICIS4, имитационная модель, сборочно-разборочное производство, имитационный эксперимент, апробация.*

Введение

Имитационное моделирование является эффективнейшим методом изучения технологических процессов (ТП) как внутренней, так и внешней логистики предприятия. К внутренней логистике относится перемещение объектов внутри всей территории предприятия или в отдельных его подразделениях. Для решения задач внутренней логистики традиционно создаются следующие виды моделей:

- сборочно-разборочных конвейеров на производственных линиях;
- перемещения материалов и продукции по территории предприятия с помощью транспортных средств (автокаров, грузовых машин, погрузчиков и т.п.);
- управления складскими запасами: прием грузов, перемещение грузов в зоны хранения и обратно, комплектация, упаковка, отправка грузов, списание ненужных запасов.

К внешней логистике относится перевозка грузов и товаров между различными географическими пунктами с применением обычных средств транспорта (например, автомобильного или железнодорожного). Чаще всего модели процессов внутренней и внешней логистики создаются и исследуются отдельно друг от друга, но в некоторых случаях создаются и комплексные модели. Например, коммерческое торговое предприятие можно рассматривать как центр управления запасами и розничную сеть. Возобновление запасов центра и перемещение товаров в розничную сеть связано с внешней логистикой. Процессы обработки товаров внутри

© В. Д. Левчук

сети и операции с клиентами относятся к внутренней логистике предприятия.

Одним из наиболее сложных типов логистических систем является конвейерное производство со сборочно-разборочными операциями. Для данного класса систем разработаны как отдельные модели, так и предметно-ориентированные пакеты имитационного моделирования [1, 2]. Характерной особенностью известного инструментария, используемого на постсоветском пространстве, является то, что объект моделирования рассматривается в виде одноуровневой сети. Рассмотрение конвейерного производства на нескольких иерархических уровнях позволяет построить имитационные модели (ИМ) достаточно широкого класса данных систем.

На кафедре математических проблем управления Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины был разработан программно-технологический инструментарий (ПТИ) имитационного моделирования технологических процессов производства (ТПП) с иерархической структурой. Основные компоненты данного инструментария рассматриваются в настоящей статье.

Краткая характеристика схемы реализации проекта на имитационное моделирование

В любом исследовании, связанном с применением имитационного моделирования, можно выделить три этапа:

- 1) разработка концептуальной модели;
- 2) создание программы модели с помощью инструментальных средств автоматизации имитационного моделирования (симулятора);
- 3) планирование и проведение экспериментов с работающей моделью.

Построение концептуальной сетевой модели является наиболее сложным этапом исследования, связанного с применением имитационного моделирования при анализе ТПП. Разработка концептуальной модели включает в себя определение взаимодействия объектов на трех уровнях:

а) операционном, где рассматриваются возможные (типовые) последовательности выполнения операций с различными типами продукции, сырья и материалов вплоть до получения выходного продукта;

б) обрабатывающем, на котором приводится структура всех обрабатывающих участков и обрабатываемых на них изделий, преобразования изделий (разборка, сборка);

в) обеспечивающем, где рассматривается структура ресурсов, т.е. всех стационарных и мобильных технических средств выполнения операций производства, транспортировки, складирования и перевалки продукции.

Конкретный способ описания взаимодействия этих типов структур, в первую очередь, определяется тем симулятором, который использует исполнитель проекта на этапе 2. *Наш коллектив применяет универсальную блочно-сетевую концепцию формализации объекта моделирования, принятую в разработанном нами симуляторе MICIC4 [3].* Он представляет собой программный интерфейс для определения структуры ИМ, описания информационного взаимодействия между ее элементами, обработки результатов моделирования в процессе реализации ими-

тационных экспериментов (ИЭ). После завершения ИЭ осуществляется передача результатов моделирования во внешнюю программную среду, позволяющую наилучшим для заказчика образом презентовать достигнутый эффект исследований.

Главные положения концептуальной модели технологического процесса производства с иерархической структурой

Изучение объекта моделирования начинается на верхнем операционном уровне. Он представляет собой множество иерархических ТП, характеризующихся технологической картой. Под нею понимается совокупность микротехнологических операций (*МТХО*), которые следуют в определенном порядке. *МТХО* выполняются на фиксированных производственных участках (ПУ).

Объекты обработки назовем заданиями. Они отображают отдельные единицы потока деталей, агрегатов, изделий, заготовок, товаров, которые прибывают на вход в объект моделирования для обработки. Поток заданий может иметь как детерминированную, так и вероятностную природу произвольного типа. Внутри ПУ находится приемник ограниченного объема для ожидания заданий. Из-за ограниченности объема в ТП возможно возникновение нежелательного эффекта блокировки. При освобождении блокирующей *МТХО* простаивание ТП прекращается, и ожидавшие задания перемещаются на очередной ПУ.

Графическим отображением операционного уровня ТПП служит сетевой граф (см. пример на рис. 1), в котором вершины соответствуют паре (ПУ; *МТХО*), а дуги определяют последовательность *МТХО* по обработке заданий. Среди всех *МТХО* выделены две специальные операции: *Разборка* и *Сборка*. Первой из них на графе соответствует вершина, из которой исходят две или более дуг. Каждая дуга является началом нового подчиненного ТП. Вторая операция завершает выполнение подчиненных ТП. Очевидно, на графе дуги сходятся в одну вершину. Нужно подчеркнуть, что выше не вводится ограничение о том, чтобы ТПП начинался из единственной вершины, т.е. чтобы некоторый ТП являлся родительским (например, на рис. 1 для производства продукции требуется объединить два исходных ТП). Аналогично отсутствует требование завершения в единственной вершине, т.е. на выходе возможно появление нескольких видов конечного продукта.

Операция транспортировки между ПУ (точнее выходом одного ПУ и приемником другого ПУ) реализуется на обрабатывающем уровне по той же схеме, как и другая *МТХО*. Поэтому в данной формализации, в отличие от известных подходов [1, 2], операция транспортировки не специализируется.

Обрабатывающий уровень ТПП представлен ПУ и является промежуточным между операционным и обеспечивающим уровнями (см. рис. 2). Множество разделяемых между *МТХО* ресурсов (людских и материальных) может быть как локальным для ПУ, так и глобальным для всего ТПП. Очевидно, что взаимосвязь между уровнями должна осуществляться через атрибуты задания, появившегося в очередной вершине технологической карты. В задании сохраняются текущие номера *МТХО* и ПУ. Задание из *МТХО* переходит на ПУ по его номеру. Множество необходимых ресурсов есть функция *МТХО*. Поэтому в ПУ, зная номер *МТХО*, можно определить необходимые ресурсы.

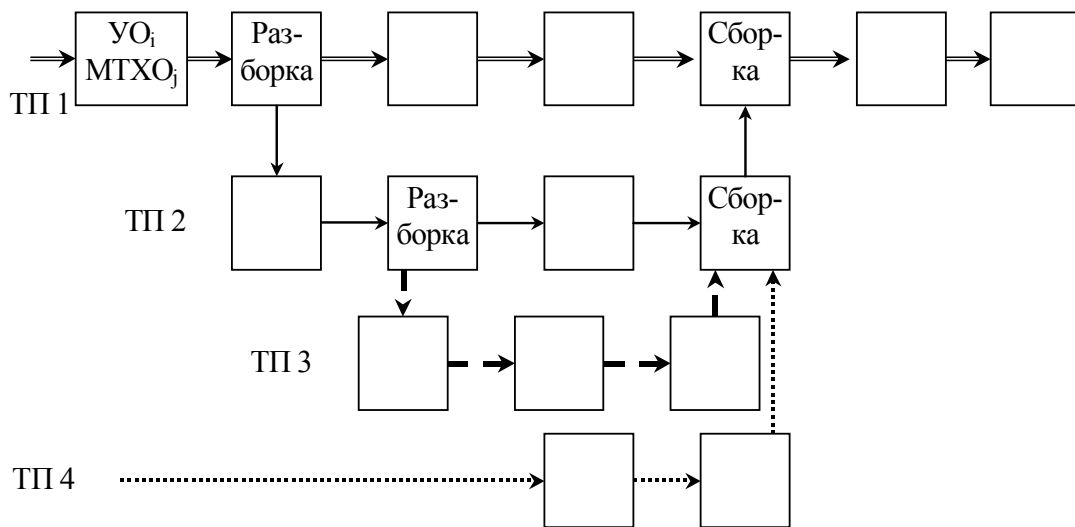


Рис. 1. Пример ТПП с иерархической структурой

На ПУ допускается параллельное выполнение нескольких заданий. Время выполнения *МТХО* на ПУ определяется согласно уникальных вероятностных законов распределения. Время, через которое ресурс станет доступным, зависит, в первую очередь, от его наличия. При необходимости данное время можно увеличить на некоторый стохастический интервал.

Взаимодействие подсистем и элементов имитационной модели технологического процесса производства

Формальная модель ТПП составлена на основе базовой схемы формализации симулятора МІСІС4 [3]. На первом этапе были выделены компоненты ИМ и их параметры:

- информационные транзакты с именами *Задание_1*, *Задание_2*, ..., поступающие в ИМ согласно заданного вероятностного закона;
- генератор транзактов типа *Задание*;
- источник обработки (ИО) — это узел, соответствующий операционному уровню ИМ и включающий два устройства: *Приемник* — очередь для ожидания обслуживания и *Операция* — обслуживающий прибор (если на приборе имеется неограниченное количество каналов или объем приемника равен нулю, то очередь отсутствует);
- ПУ — узел, включающий в себя выполнение и управление ресурсами *МТХО*;
- выполнение *МТХО* на соответствующем ПУ представлена устройствами *ЗахватРесурсов* и *ВыполнениеМТХО*;
- управление ресурсами *МТХО* обеспечивается множеством пар устройств (*ОчередьКРесурсу*; *Ресурс*);
- управляющий транзакт *Заявка*, связанный с парой (ИО; *МТХО*), содержащий объемы 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 представлен на рис. 2. Генератор вводит транзакты типа *Задание* в ИМ по заданному закону распределения. Задание по присвоенному номеру ТП направляется на первый узел ИО, который определяется из технологической карты. 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 ПУ, соответствующий *МТХО*. Сам транзакт *Задание* переходит в состояние «задержан».

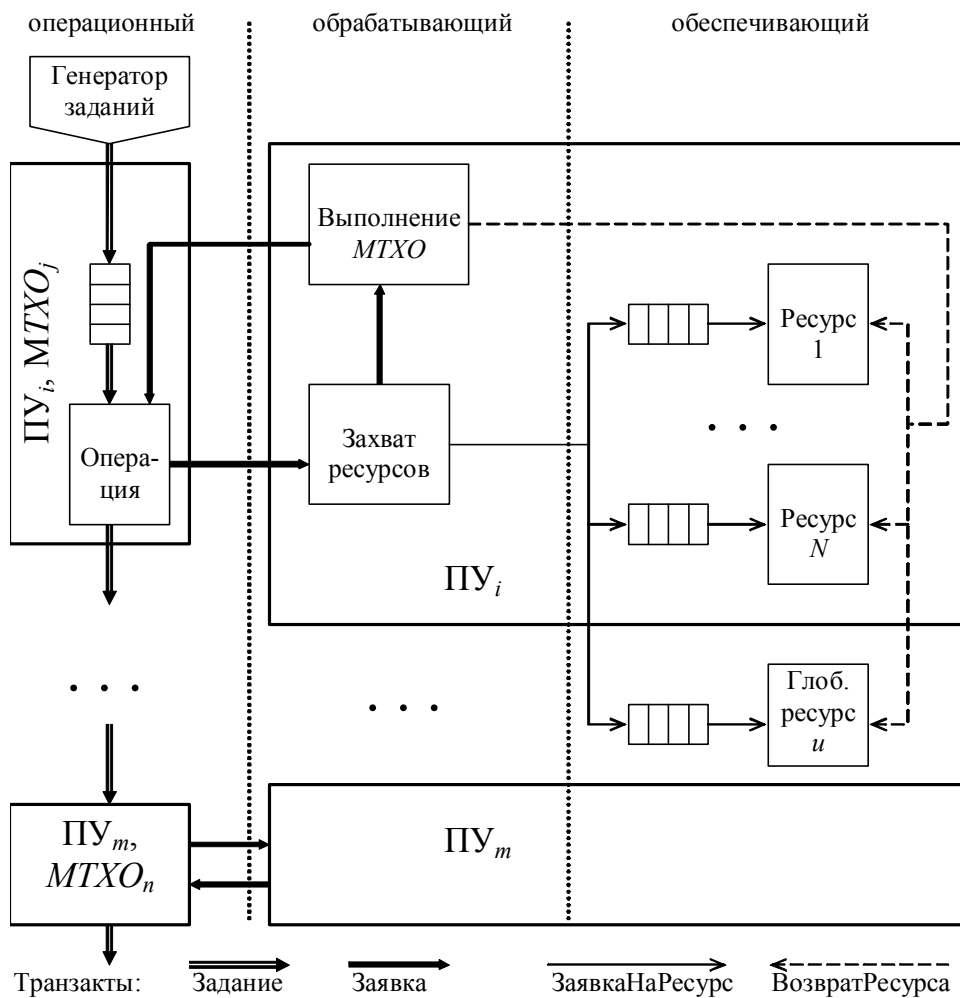


Рис. 2. Схема процесса обслуживания

Транзакт *Заявка* на устройстве *ЗахватРесурсов* с неограниченным количеством каналов также переходит в состояние «задержан», а перед этим согласно номера *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 технологической карте на следующий узел *ИО*, 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 этот транзакт 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 устройством собраны не все транзакты, то *Задание* задерживается на нем, а иначе двигается по технологической карте.

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

Реализация экспериментов с имитационной моделью

В современных экономических реалиях наметился ряд потенциальных заказчиков, которые имеют потребность в постановке экспериментов с моделью, но симулятор покупать не намерены. С другой стороны, пользователи, а особенно на производстве, вообще не хотят знакомиться с симулятором, даже если они его уже и купили: у них на это просто нет ни людей, ни времени, ни желания «опять учиться». Они хотят оставаться в среде офисного, пусть не постоянно используемого, то хотя бы от случая к случаю загружаемого приложения, и выполнять в этой среде все три фазы работы с готовыми моделями: подготовка данных, эксперимент с моделью, анализ и презентация результатов. *В качестве подходящей*

для инженерного персонала среды может использоваться табличный процессор Excel.

Именно под такую категорию заказчиков настроена реализованная инструментами MICIC4 модель ТПП с иерархической структурой. Исходные данные задаются либо в простейшем текстовом редакторе, либо в Excel, затем запускается загрузочный модуль ИМ, представляющий собой консольное приложение, которое создает текстовый файл с результатами моделирования, как показано на рис. 3. Данный файл уже адаптирован под обработку в Excel. По результатам моделирования инженер, знакомый с концептуальной моделью ТПП, может получить различные варианты их графического отображения, а затем соответствующим образом интерпретировать.

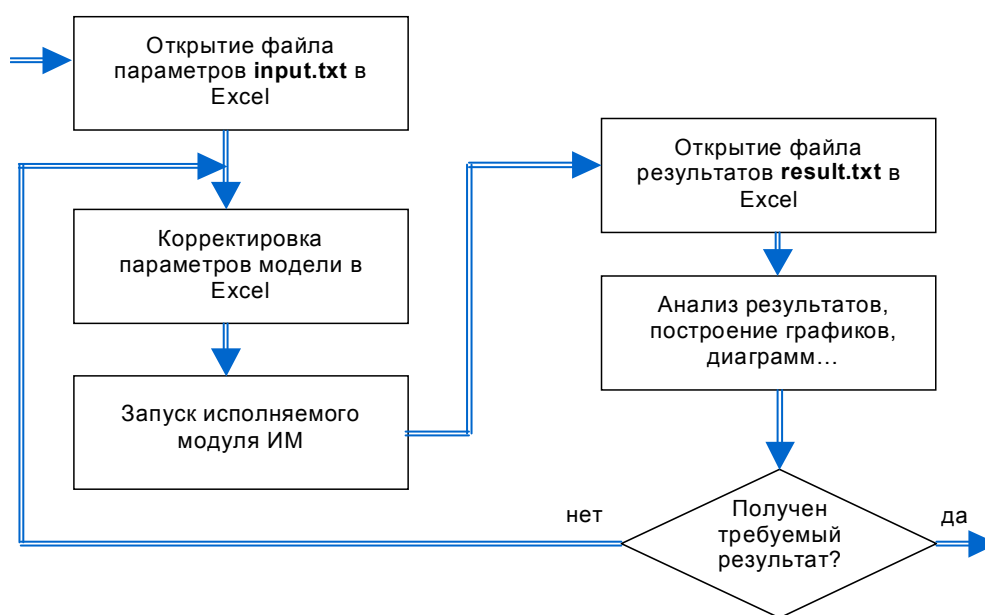


Рис. 3. Схема работы с ИМ

Структурная схема тестового объекта моделирования

Для апробации технологии создания и испытания ИМ ТПП с иерархической структурой с помощью разработанного ПТИ было выбрано тестовое изделие (ТИ) сложной структуры. ТИ состоит из 108 деталей, сложным образом соединенных в три блока: основа изделия (блок № 1), блок № 2, в который входят 3 элемента (ЭЛ № 3, ЭЛ № 4 и ЭЛ № 6), блок № 3, в который входят элементы с номерами 2, 5, 7–10. До начала ремонта всех элементов необходимо отсоединить от основы и отремонтировать шесть деталей (Д1–Д6). На рис. 4 приведены состав и структура ТИ.

Поэтому технология ремонта ТИ начинается выполнением шести МТХО₁₁–МТХО₁₆, в ходе которых осуществляется ремонт деталей Д1–Д6. После этого с помощью операции РАЗБОРКА₁ от основы изделия (БЛ1) отделяется блок БЛ2, который состоит из трех элементов (ЭЛ3, ЭЛ4, ЭЛ6). После отделения БЛ2 на-

правляется для ремонта в цех № 4. В цехе № 4 над элементом ЭЛ4 осуществляется шесть операций $МТХО_{4\ 1}–МТХО_{4\ 6}$. С помощью операции РАЗБОРКА₈ от блока БЛ2 отделяется элемент ЭЛ6, поступающий для ремонта в цех № 6. В цехе № 6 выполняется последовательно 16 операций ремонта деталей элемента ($МТХО_{6\ 1}–МТХО_{6\ 16}$). После этого на блоке БЛ2 выполняются операции ремонта двух деталей $Д_{47}–Д_{48}$ элемента ЭЛ4 в цехе № 4. С помощью операции РАЗБОРКА₉ от блока БЛ2 отделяется элемент ЭЛ3, который направляется для ремонта в цех № 3. В этом цехе над изделиями, входящими в элемент ЭЛ3, последовательно осуществляется 15 операций ремонта ($МТХО_{3\ 1}–МТХО_{3\ 14}$). После ремонта элемента ЭЛ3 в цехе № 3 осуществляется операция СБОРКА₉ элементов ЭЛ3 и ЭЛ4 в один блок БЛ2. С помощью двух операций $МТХО_{4\ 11}$ и $МТХО_{4\ 12}$ завершается ремонт деталей $Д_{4\ 11}$ и $Д_{4\ 12}$ элемента ЭЛ4. Эти операции позволяют присоединить к обоим элементам отремонтированный в цехе № 6 элемент ЭЛ6 с помощью операции СБОРКА₈. Далее завершается ремонт остальных деталей ЭЛ4 с помощью операций $МТХО_{4\ 13}$, $МТХО_{4\ 14}$ и $МТХО_{4\ 15}$, что означает окончание ремонта блока № 1 и его готовности присоединения к основе изделия во время операции СБОРКА₁.

БЛ1		БЛ2			БЛ3			БЛ4			
ЭЛ1		ЭЛ6		ЭЛ4	ЭЛ3	ЭЛ7	ЭЛ5	ЭЛ2	ЭЛ1		
Д8	Д21	Д6.1		Д4.1	Д3.0	Д7.1	Д5.1	Д2.16	Д24	Д7	
		Д6.2			Д3.1			Д2.15			
	Д20	Д6.10	Д6.3		Д3.2			Д5.2			Д2.14
				Д4.2	Д3.3	ЭЛ8	Д2.13				
	Д19	Д6.11	Д6.4		Д3.4	Д8.1	Д2.12	Д22			
				Д3.5	Д2.11						
	Д17	Д6.12	Д6.5	Д4.3	Д3.6	Д5.3	Д2.10	Д18			
					Д3.7		ЭЛ9		Д2.9		
	Д15	Д6.13	Д6.6	Д4.4	Д3.8	Д9.1	Д5.4	Д2.8	Д16		
					Д3.9			Д2.7			
Д13	Д6.14	Д6.7	Д4.5	Д3.10	Д10.1	Д5.5	Д2.6	Д14			
				Д3.11			ЭЛ10		Д2.5		
Д11	Д6.15	Д6.8	Д4.6	Д3.12	Д5.6	Д5.6	Д2.4	Д12			
				Д3.13			Д2.3				
Д9	Д6.16	Д6.9	Д4.6	Д3.14	Д5.7	Д5.7	Д2.2	Д10			
Д6	Д6.17						Д2.1	Д3			
Д5	ЭЛ1							Д2			
Д4	Д26	Д27	Д28	Д29	Д30	Д31	Д32	Д33	Д34	Д25	Д1

Рис. 4. Состав и структура ТИ

С помощью операции РАЗБОРКА₂ от блока БЛ2 отделяется элемент ЭЛ6, который поступает в цех № 3, образуя при этом ветвь ремонта № 3 (деталей $Д_{3\ 1}–Д_{3\ 18}$). Выполнив операцию $МТХО_{1\ 9}$ над деталью $Д_{1\ 9}$, входящей в состав блока БЛ1, появляется возможность выполнения операции РАЗБОРКА₃, в ходе которой от основы изделия отделяется деталь $Д_{10\ 1}$, направляя ее в цех № 11 для ремонта, образуя таким образом ветвь ремонта № 10. Появляется возможность осуществить ремонт детали $Д_{1\ 10}$. Затем от основы изделия с помощью операции

РАЗБОРКА₄ отделяется блок БЛ5, который в составе деталей (D_{51} – D_{57}) поступает в цех № 5, образуя при этом ветвь ремонта № 5.

Далее следует ремонт двух деталей D_{111} и D_{112} основы изделия с помощью операций $MTXO_{111}$ и $MTXO_{112}$. Потом следует операция СБОРКА₃ детали D_{101} , отремонтированной в цехе № 10 путем подсоединения ее к основе детали. Затем с помощью двух операций $MTXO_{113}$ и $MTXO_{114}$ осуществляется ремонт деталей соответственно D_{113} и D_{114} . После этого к основе изделия уже можно подсоединить элемент ЭЛ5, отремонтированный в цехе № 5 с помощью операции СБОРКА₄. Далее следуют друг за другом операции $MTXO_{115}$ и $MTXO_{116}$ ремонта деталей D_{115} и D_{116} основы изделия, по окончании которых приступают к операции РАЗБОРКА₅, в ходе которой от основы отделяется деталь D_{81} , которая поступает для ремонта в цех № 8. А затем над основой проводятся две операции $MTXO_{117}$ и $MTXO_{118}$ ремонта изделий D_{117} и D_{118} . Потом от основы изделия отделяется элемент № 9 с помощью операции РАЗБОРКА₆, который затем поступает в цех № 9 для последующего ремонта детали D_{91} . По окончании ремонта этот элемент с помощью операции СБОРКА₆ вновь подсоединяется к основе изделия. Далее осуществляется три операции ремонта основы изделия $MTXO_{119}$ – $MTXO_{121}$. После этого осуществляется операция РАЗБОРКА₇, в ходе которой от основы отделяется деталь D_{71} , которая поступает в цех № 7, образуя при этом ветвь ремонта № 7 (с помощью операции $MTXO_{72}$). Далее с помощью операции $MTXO_{122}$ осуществляется ремонт детали D_{122} основы изделия. После этого с помощью операции СБОРКА₅ к основе подсоединяется, отремонтированная в цехе № 8, деталь D_{81} . Это подсоединение позволяет совершить ремонт детали D_{123} основы изделия с помощью операции $MTXO_{123}$. К этому моменту к основе подсоединяется элемент ЭЛ2, отремонтированный в цехе № 2, с помощью операции СБОРКА₂. Деталь D_{124} основы изделия с помощью операции СБОРКА₇ к основе подсоединяется элемент ЭЛ7, отремонтированный в цехе № 7. Далее осуществляется ремонт деталей D_{125} и D_{126} основы с помощью соответствующих $MTXO_{125}$ и $MTXO_{126}$. В итоге основа изделия уже подготовлена для последней операции СБОРКА₁, в ходе которой к ней подсоединяется отремонтированный в цехе № 4 блок 2, состоящий из четырех отремонтированных элементов (ЭЛ2, ЭЛ3, ЭЛ6 и ЭЛ4) соответственно в цехах 2, 3, 6 и 4. Завершается технология ремонта ТИ ремонтом 8 деталей основы (D_{127} – D_{134}) с помощью соответствующих $MTXO_{127}$ – $MTXO_{134}$.

Матрица вероятностей неисправностей деталей в ТИ была определена экспертным путем. Все производство ремонта ТИ реализуется в 10-ти цехах предприятия на 16-ти ПУ.

Результаты апробации имитационного моделирования производства тестового изделия

В качестве исходной информации в ИМ ремонта ТИ, являющейся конкретной реализацией описанной выше ИМ ТПП с иерархической структурой, задавали:

- матрицы вероятностей неисправностей деталей ТИ;
- список запросов ресурсов, необходимых для выполнения $MTXO_{ij}$ при ремонте ТИ;

— список интенсивности поступлений ТИ в ИМ, у которых технология ремонта совпадает: $\lambda_1 = 0,4$ изделий/сутки; $\lambda_2 = 1,5$ изделий/сутки; $\lambda_3 = 7,2$ изделий/сутки;

Целью апробации ИМ ремонта ТИ явилась проверка результатов имитации при решении следующих задач.

1. «Оценка пропускной способности ТП (ν)» при различных интенсивностях ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$). При этом необходимо было проверить наличие зависимости пропускной способности ν от различных стратегий (St_1, St_2, St_3) анализа результатов имитации.

2. «Поиск узких мест в технологии ремонта ТИ».

3. «Поиск узких мест в составе ресурсов предприятия», используемых в ходе ИЭ с моделью ремонта ТИ.

При решении первой задачи параметр «Интенсивность поступления ТИ на предприятие» изменялся на трех уровнях ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$).

Первая стратегия ремонта ТИ (St_1) состояла в том, что обрабатывается шесть изделий по одной и той же технологии, но при этом каждое изделие ремонтируется друг за другом. Только после завершения ремонта всех шести изделий начинается ремонт следующей партии из шести изделий строго последовательно. Результаты среднего значения времени ремонта каждого изделия в партии приведены в таблице. Следовательно, общее время выполнения партии из шести изделий равно сумме этих времен (см. таблицу). Пропускная способность ν представляет собой обратную величину от общего времени и ее статистические оценки также приведены в таблице.

Оценки откликов ИМ ремонта ТИ

Интенсивность λ	№ стратегии St	Время ремонта группы изделий в партии (номера партий)						Общее время		Пропускная способность, ν^{-1}	
		1	2	3	4	5	6	Среднее	Дисперсия	Среднее	Дисперсия
λ_1	1	1695	1690	1695	1678	1680	1691	10129	2532	0,987	0,25
	2	3145			3142			6287	1571	1,590	0,40
	3	6145						6145	1536	1,627	0,41
λ_2	1	2349	2342	2333	2344	2335	2351	14053	2532	0,711	0,18
	2	4354			4371			8726	1571	1,146	0,29
	3	8488						8488	1536	1,178	0,29
λ_3	1	19320	19453	19494	19359	19264	19455	116346	2532	0,085	0,02
	2	36206			50139			86344	1571	0,115	0,03
	3	70390						70389	1536	0,142	0,04

Вторая стратегия ремонта ТИ (St_2) состояла в том, что ремонтировалось параллельно по три изделия по одной и той же технологии. Только по завершении ремонта двух троек изделий снова начинается ремонт следующей пары троек из-

делий. Время выполнения каждой тройки изделий стратегии St_2 и пропускная способность также приведены в таблице.

Третья стратегия ремонта ТИ (St_3) состояла в том, что образовывались шесть параллельных ветвей ремонта каждого изделия. По окончании ремонта каждого изделия начинался параллельный ремонт следующих шести изделий. Время ремонта всей группы из шести изделий равно максимальному времени ремонта одного изделия (см. таблицу).

Итак, в таблице приведены результаты ИЭ для трех интенсивностей ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) и трех стратегий ремонта (St_1, St_2, St_3). По данным таблицы построены зависимости $v(\lambda)$ при различных стратегиях ремонта St_j ($j = \overline{1,3}$), которые изображены на рис. 5. Из этого рисунка следует, что стратегии 2 и 3 практически не отличаются друг от друга. Это означает, что для предприятия при имеющемся составе ресурсов эти стратегии неразличимы.

Более существенно отличие от них стратегии St_1 (строго последовательный характер ремонта ТИ). При этом, если взять за единицу интенсивность поступления изделий (λ_1) при стратегии St_1 , то из рис. 6 видно, что рост производительности за счет распараллеливания работ увеличивается в 1,6 раза. По-видимому, это обстоятельство имеет место из-за существенной конкуренции $MTXO_{ij}$ за ресурсы предприятия при ремонте деталей ТИ.

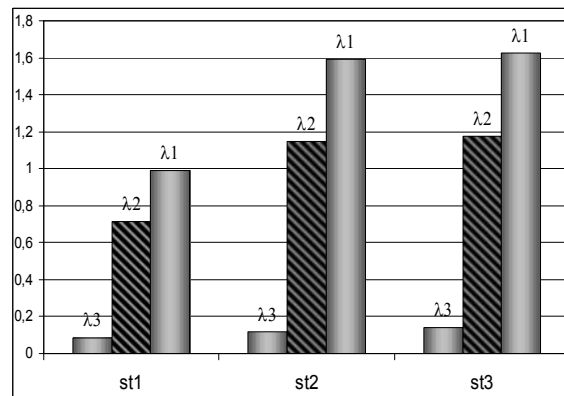
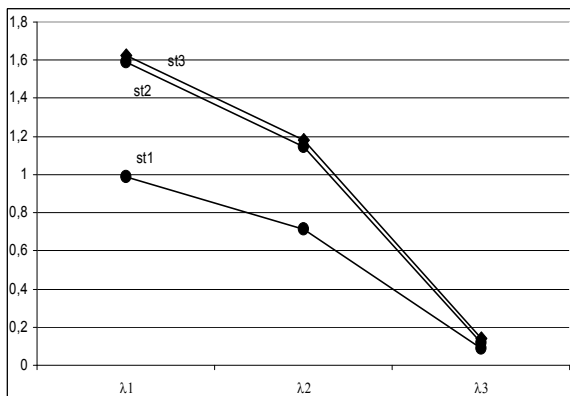


Рис. 5. Зависимость пропускной способности от интенсивности при различных стратегиях (St_j)

Рис. 6. Зависимость пропускной способности от стратегий при различных уровнях интенсивности

При увеличении интенсивности поступления ТИ с λ_1 до λ_2 имеет место падение производительности предприятия соответственно для стратегии St_1 на 30 %, а для стратегий St_2 и St_3 падение больше (соответственно с 1,6 до 1,2 раза). Если интенсивность поступления ТИ на предприятие возрастает до λ_3 , то из рис. 5 можно сделать очевидные выводы:

- пропускная способность падает до 10 % от начального значения;
- пропадает разница от изменения стратегий, поскольку отсутствие необходимых ресурсов и их распыление по $MTXO_{ij}$ приводит к тому, что каждая $MTXO_{ij}$ тормозит выполнение остальных операций ремонта ТИ.

На рис. 6 приведена зависимость пропускной способности при различных стратегиях. Эти столбчатые диаграммы изменения пропускных способностей при различных стратегиях (St_i) и интенсивностях (λ_j) только подтверждают в более наглядной форме изложенное выше. Из рис. 5 видно, что рациональными следует считать интенсивность λ_2 и стратегию St_2 при имеющемся составе ресурсов у предприятия. В этом случае достигается баланс между стратегией ремонта деталей (St_i) и интенсивностью их поступления в систему (λ_j).

Анализ графиков и диаграмм, приведенных соответственно на рис. 5 и 6, позволяет сделать вывод о необходимости поиска узких мест в существующей технологии выполнения $MTXO_{ij}$ и существующем составе ресурсов у предприятия, т.е. найти те из ресурсов предприятия, которые не позволяют повысить пропускную способность, особенно если интенсивность поступления ТИ возрастает.

На рис. 7 приведена диаграмма ранжирования $\{MTXO_{ij}\}$ в системе координат (η, LT) (где η — коэффициент использования $MTXO$, LT — коэффициент Литла) при различных уровнях интенсивности ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) поступления изделий и стратегиях ремонта изделий (St_1, St_2, St_3). Как видно из рис. 7, при стратегии St_1 (строго последовательный ремонт ТИ) все $MTXO_{ij}$ находятся в режиме недогрузки и практического простоя. Только одна $MTXO_{11}$ является узким местом 2-го типа (несбалансированная загрузка $MTXO_{ij}$) и то при весьма высоком уровне интенсивности поступления деталей (λ_3). При переходе на вторую стратегию ремонта изделий (St_2) ряд $MTXO_{ij}$ становится узким местом, но уже при существенном увеличении интенсивности поступления деталей (λ_2 и λ_3).

На рис. 7 показаны номера $MTXO_{ij}$, у которых повышается коэффициент использования с ростом интенсивности поступления ТИ. На эти $MTXO_{ij}$ технологам нужно обратить внимание в первую очередь. При переходе на стратегию St_3 ремонта ТИ отметим рост коэффициента использования $MTXO_{ij}$. При малой же интенсивности поступления изделий очередей к $MTXO_{ij}$ практически нет. Поэтому, с точки зрения технологии организации ремонтных работ, у исследуемого ТП нет существенных замечаний. Это обстоятельство подтверждает тот факт, что сдерживающим фактором у исследуемого ТПП ремонта ТИ является отсутствие ресурсов предприятия в необходимом количестве.

На рис. 8 приведена диаграмма ранжирования ресурсов в той же системе координат (η, LT) при различных значениях интенсивности поступления на предприятие ТИ и разных стратегиях обслуживания St_j . Анализ этих диаграмм показал, что при стратегии St_1 только два ресурса (Res_2 и Res_7) являются тормозом в пропускной способности ремонта изделий, причем ресурс Res_7 с увеличением интенсивности поступления деталей (с λ_1 до λ_3) постепенно превращается из узкого места № 2 (несбалансированность загрузки ресурса) в узкое место № 1 (не справляется с потребностями в этом ресурсе всех $MTXO_{ij}$).

При второй и третьей стратегиях (St_1 и St_2) ресурсы Res_2 и Res_7 продолжают лимитировать пропускную способность ТПП, но узким местом они становятся только при высокой интенсивности изделий λ_3 . Все остальные ресурсы практически мало используются. Итогом анализа рис. 8 является необходимость увеличения ресурсов Res_2 и Res_7 , что обеспечит возможность увеличения пропускной способности ремонта изделия.

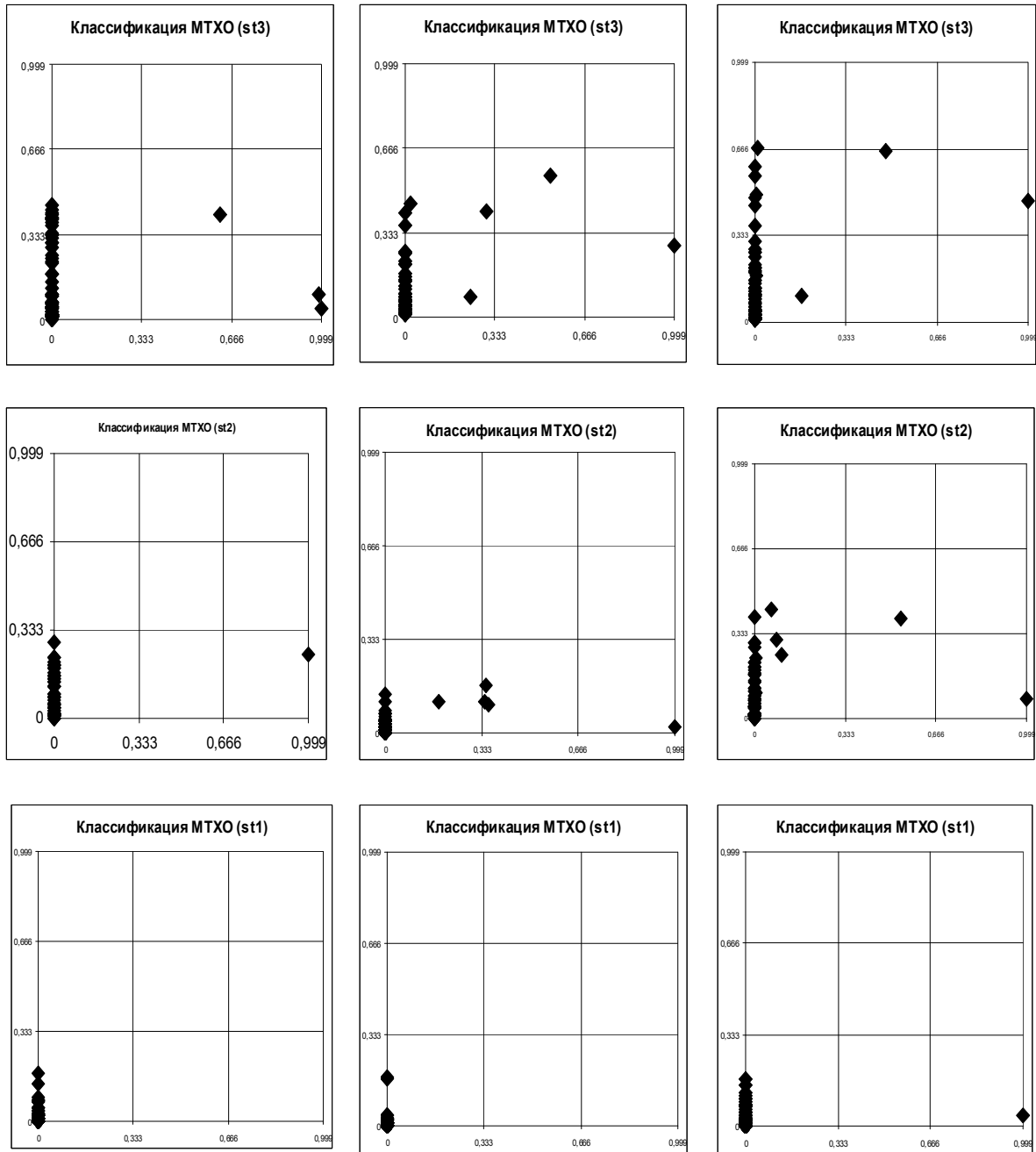


Рис.7. Диаграммы ранжирования $\{MTXO_{ij}\}$ в системе координат (η, LT) при различных значениях интенсивности λ и стратегиях обслуживания St

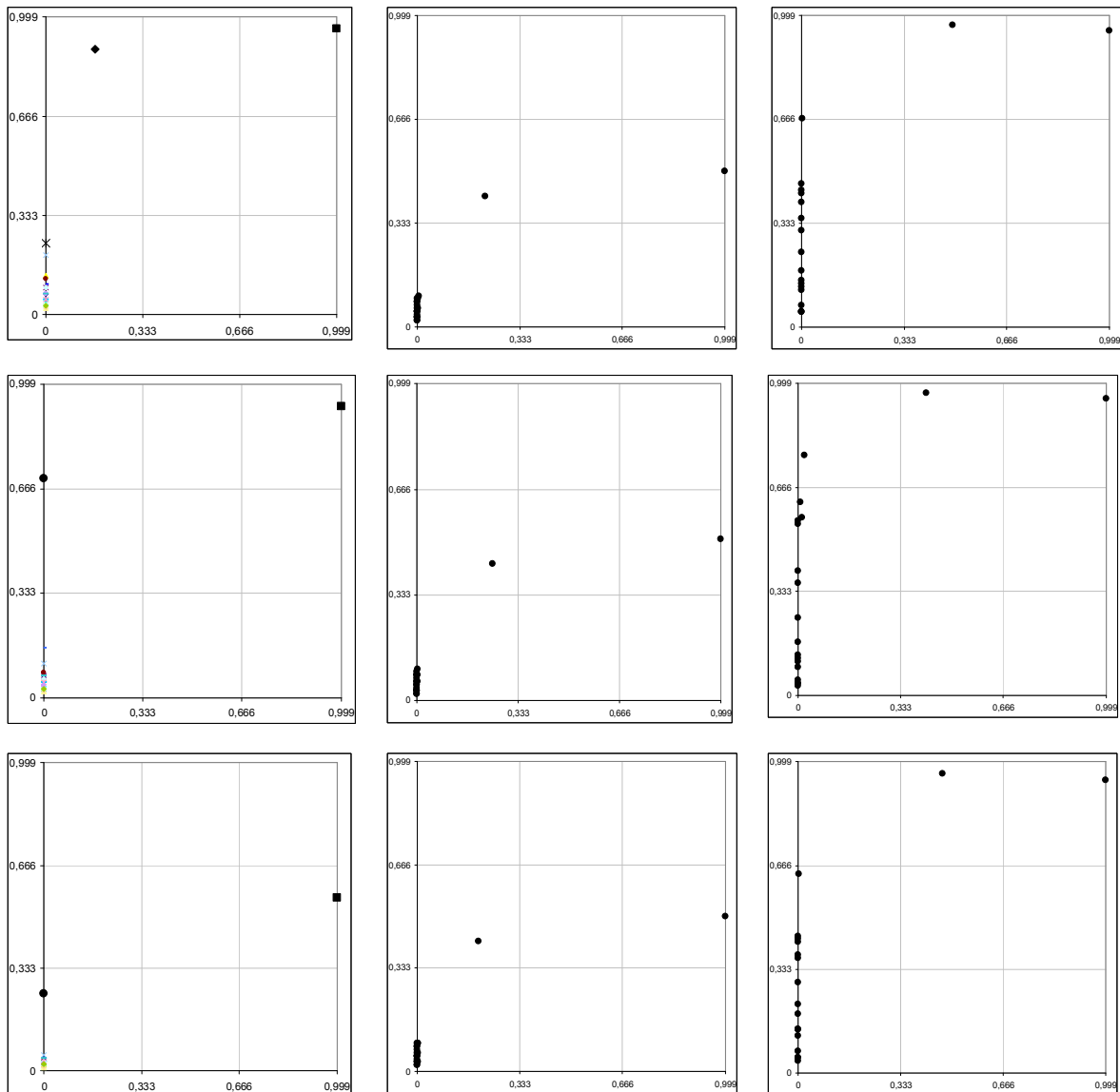


Рис. 8. Диаграммы ранжирования ресурсов в системе координат (η, LT) при различных значениях интенсивности λ и стратегиях обслуживания St

Приведенный выше анализ рис. 5–8 показывает, что программа ИМ ремонта ТИ дает предсказуемые результаты. На этом можно считать завершенной апробацию ПТИ ТПП с иерархической структурой.

Заключение

В процессе постановки ИЭ было показано, что разработанный ПТИ имитационного моделирования ТПП с иерархической структурой является эффективным средством изучения данных объектов. Инструментарий симулятора MICIC4

позволяет внести всевозможные изменения в базовую ИМ ПТИ и настроить ее на конкретную производственную ситуацию.

1. Технология системного моделирования / Под общ. ред. С.В. Емельянова, В.В. Калашникова и др. — М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. — 520 с.
2. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. — СПб.: Питер; К.: ВНУ, 2004. — 847 с.
3. Левчук В.Д. Базовая схема формализации системы моделирования MIC4 // Проблемы програмування. — 2005. — № 1. — С. 85–96.

Поступила в редакцию 27.06.2006