

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ НА БАЗЕ СЛОЖНОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ СИСТЕМЫ

Ю.И. Толуев (ИТС), Т.П. Змановская (РТУ)

Описываются этапы создания и применения имитационной модели производственной линии для контроля и испытаний коробок перемены передач. В центре внимания находится задача оценки алгоритмов переналадки испытательных стендов, работающих в автоматическом режиме. Необходимость переналадки стендов связана с изменением типов изделий, поступающих на обработку. Модель реализована с использованием пакета имитационного моделирования Plant Simulation.

Ключевые слова: имитационное моделирование, конвейерная система, задача о переналадке оборудования.

### Объект и цели моделирования

Объектом моделирования является производственная линия, на которой выполняются контроль и испытание коробок перемены передач (в дальнейшем — изделий) для дизельных двигателей большой мощности. Основой конфигурации линии является замкнутая конвейерная система, с помощью которой осуществляется транспортировка изделий, установленных на специальных носителях. В форме чертежа общего вида линия показана на рис. 1, а в форме эквивалентной замкнутой системы массового обслуживания — на рис. 2. Обработка изделия начинается с его установки на носитель на рабочей станции 1, далее оно перемещается еще через 10 рабочих станций, на последней из которых производится снятие изделия с носителя, что является завершением цикла его обработки. Носитель не покидает конвейерную систему, и после разгрузки на станции 11 он опять поступает на станцию 1, где на него устанавливается новое изделие. На станциях 1-4 и 7-11 операции выполняются рабочими, а на параллельно работающих станциях 5.1-5.8 и 6.1-6.7, где проводятся основные операции по испытанию изделий, режим работы является полностью автоматическим.

После завершения основных работ по проектированию данной производственной линии проектировщики сосредоточили свои усилия на разработке алгоритмов управления потоками изделий в конвейерной системе. Основная сложность организации работы данной производственной линии связана с тем, что на ее вход поступают партии изделий различного типа. Этот факт непосредственным образом влияет на реальную производительность автоматических станций 5.1-5.8 и 6.1-6.7, так как возникает необходимость производить их переналадку, связанную с изменением типа обрабатываемых изделий. При повышении частоты выполнения операций по переналадке сокращается возможное полезное время работы станций и, как следствие, их

реальная производительность (пропускная способность). Рассчитывать на обработку только больших партий однородных изделий разработчики проекта не могли в силу особенностей структуры производственной программы предприятия. Таким образом, в производственной системе возникла «классическая» задача о переналадке оборудования, решать которую методами математического программирования [1] было нецелесообразно из-за необходимости учета динамических свойств реального производственного процесса и влияющих на него «второстепенных» факторов. Поставленная задача о переналадке автоматических станций 5.1-5.8 и 6.1-6.7 имела следующую формулировку: если на вход системы поступает новая партия изделий, то в какие моменты времени и для каких станций должна быть начата их переналадка? Ясно, что решение этой задачи должно быть подчинено стремлению достичь максимальной пропускной способности системы в целом. Ясно также, что поиск «удачных» алгоритмов переналадки автоматических станций при различных последовательностях партий изделий проще всего осуществить путем составления соответствующих эмпирических правил, эффективность которых может быть проверена путем прямого имитационного моделирования.

### Дополнительные сведения о производственной линии

Конвейерная система составлена из секций роликового транспортера. Скорость транспортировки носителей с изделиями составляет 12 м/мин (20 см/с).

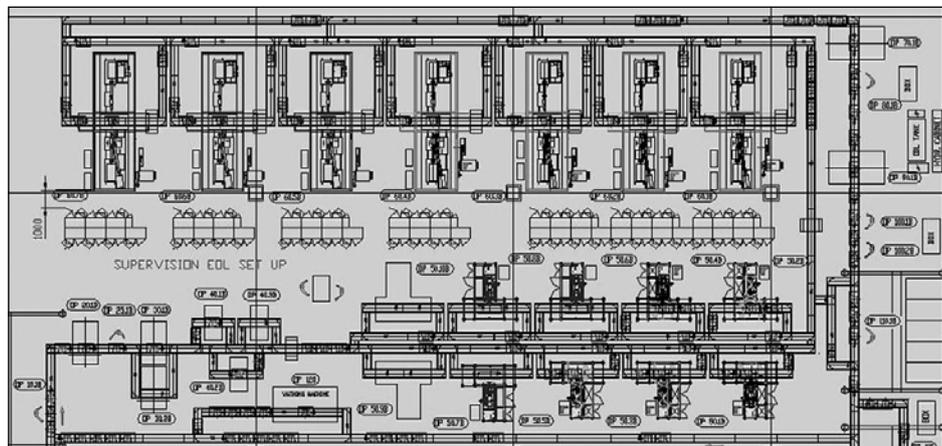


Рис. 1. Общий вид производственной линии

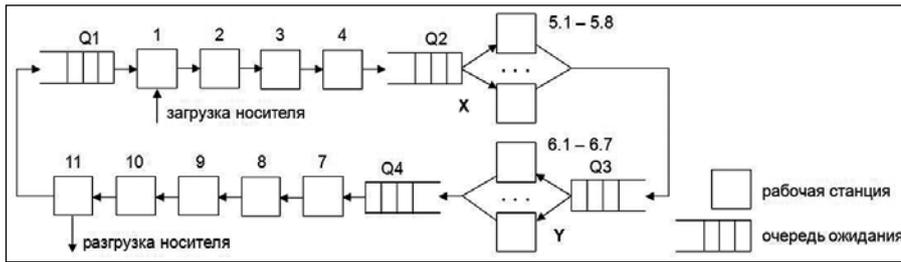


Рис. 2. Представление производственной линии в виде замкнутой системы массового обслуживания

На участке между станциями 11 и 1 пустые носители перемещаются со скоростью 18 м/мин (30 см/с). В качестве носителей используются специальные металлические поддоны длиной 0,7 м. На станциях 1-4 рабочие проводят первичный контроль качества изделий и осуществляют их электрическое и гидравлическое соединение с носителями. На станциях 5.1-5.8 и 6.1-6.7 носитель автоматически соединяется с магистралями соответствующего испытательного стенда. На станциях 7-11 рабочие выполняют завершающие операции над изделиями. Длительность всех ручных операций лежит в пределах  $45 \pm 5$  с. На станциях 5.1-5.8 весь цикл обработки изделия выполняется за 380 с, а на станциях 6.1-6.7 — за 330 с. Время переналадки станции составляет ровно 300 с. В пределах каждой автоматической станции одновременно могут находиться до пяти носителей (изделий): три носителя во входном буфере, один носитель в выходном буфере и один носитель с изделием в состоянии испытания. Общая протяженность конвейеров в исследуемой части системы составляет 462 м. Каждое изделие во время своего цикла обработки проходит путь порядка 250 м.

Носитель может задерживаться на любой станции, обслуживаемой рабочим, если отсутствует возможность эту станцию покинуть. Точно так, в пределах

автоматических станций процессы ожидания могут наблюдаться на всех описанных выше пяти позициях, если соответствующие последующие позиции оказываются занятыми. В системе организованы также четыре специальные зоны ожидания, обозначенные на рис. 2 как очереди Q1-Q4. Очередь Q1 располагается между станциями 11 и 1, и в ней находятся ожидающие загрузки пустые носители. В точке X на выходе из очереди Q2 изделие может быть задержано, если отсутствует свободное место в буфере хотя бы одной из станций 5.1-5.8, которая уже была настроена (настраивается сейчас или может быть настроена) на обработку изделий данного типа. Для очереди Q2 принят «гистерезисный» алгоритм управления ее содержимым: если число ожидающих в ней носителей достигает 10, то блокируются секции транспортера на станциях 1-4 до того момента, пока число ожидающих носителей в очереди Q2 не достигнет значения 5. Очередь Q3 образуется в том случае, когда в точке Y на выходе этой очереди задерживается изделие, которому еще не может быть предоставлено место в одной из станций 6.1-6.7. Очереди Q4 соответствует длинный участок конвейера (в нижней части чертежа на рис. 1), соединяющий выход станций 6.1-6.7 со станцией 7.

Предполагается, что на вход производственной линии могут поступать изделия четырех типов А, В, С и D партиями 1...200 ед. Конкретные последовательности, соответствующие структуре производственной программы, кодируются в виде сколь угодно длинных цепочек вида «10A20B10A30C10A20D ... и т.д.». Если последовательность, содержащая, например, только

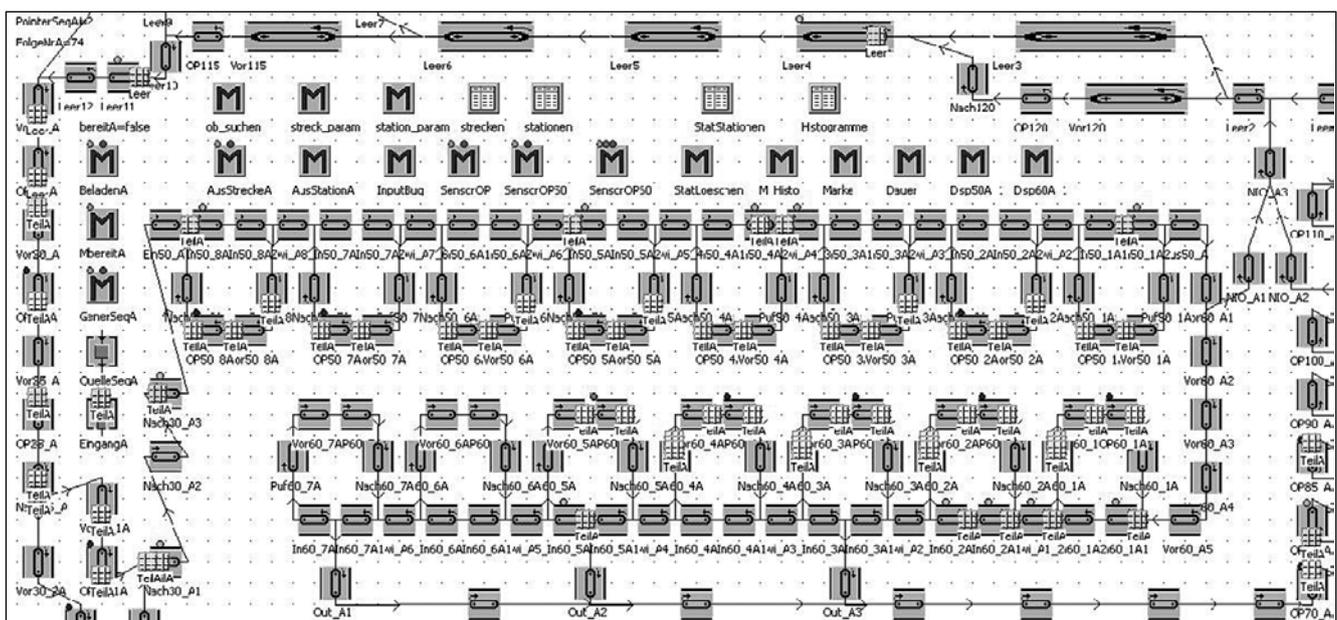


Рис. 3. Представление производственной линии в среде Plant Simulation

по 50 изделий типа А и В, повторяется, то она может быть записана в виде «50А50В». Некоторые изделия после окончания соответствующей операции контроля или испытания объявляются бракованными. После получения такого статуса изделие не направляется к автоматическим станциям, а с помощью имеющихся в наличии транспортных путей направляется прямо к станции разгрузки 11. Вероятность выявления брака на каждой рабочей станции задается в составе исходных данных модели.

#### Реализация имитационной модели

Имитационная модель производственной линии была разработана с использованием коммерческого пакета имитационного моделирования Plant Simulation (до 2005 г. пакет имел название eM-Plant) ([http://www.plm.automation.siemens.com/ru\\_ru/products/tecnomatix/plant\\_design/plant\\_simulation.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/ru_ru/products/tecnomatix/plant_design/plant_simulation.shtml)). Основу структуры модели составляют 163 блока типа line, с помощью которых представляются отдельные секции роликового транспортера, отображающие в совокупности полную конфигурацию моделируемой конвейерной системы (рис. 3). Подвижные объекты модели отображают носители, при этом применяется принцип моделирования «с ориентацией на длину», при котором положение каждого носителя точно отображается на одной или одновременно двух смежных секциях транспортера с учетом длины как носителя (0,7 м), так и соответствующих секций транспортера. С целью обеспечения компактности структуры модели почти все секции транспортера на рис. 3 графически показаны с равной длиной, хотя в пакете Plant Simulation имеется возможность автоматически показывать их длину, которая будет пропорциональна реальной длине, заданной в метрах.

Поведение подвижных объектов модели (состояния задержки, процессы образования очередей и т. п.) можно наблюдать с помощью автоматически создаваемой анимации. На рис. 4 показан фрагмент модели с блоками, соответствующими станциям 6.1 и 6.2. В каждой из станций по одному носителю находится на позиции, где проводится испытание изделия (она отмечена точкой в верхней части блока), и по три носителя ожидают во входном буфере.

В модели отображены все свойства и параметры реальной линии, которые были описаны выше. Особое место в ней занимают упомянутые эмпирические правила распределения изделий между автоматическими станциями. Собственно заявка на переналадку генерируется в момент, когда на испытательной позиции появляется изделие, тип которого не совпадает с типом изделия, которое уже покинуло эту позицию. При наличии свобод-

*Шутка не сходит с конвейера, она клеится индивидуально.*

П. Шарп

ных рабочих-наладчиков выполнение заявки на переналадку начинается немедленно, а в противном случае возникает процесс ожидания начала переналадки. Предварительная настройка алгоритмов переналадки заключается в создании так называемых «масок», с помощью которых указывается, какие именно автоматические станции предназначаются для обработки изделий типов А, В, С и D. В результате каждая станция может быть настроена на обработку одного, двух, трех или всех четырех типов изделий. Совокупность данных, внесенных в «маски», определяют так называемые правила доступности станций. Второй группой правил являются правила выбора станций, которые реализуются в моменты, когда в точке X или Y (рис. 2) для очередного изделия должна быть определена станция, к которой оно будет направлено. Совокупность правил доступности и выбора станций называется стратегией переналадки.

При реализации правил выбора станций в точках X и Y для изделия типа T решение о движении к конкретной станции принимается в одной из следующих ситуаций:

- обработка изделий типа T уже выполняется на одной или нескольких станциях и имеется свободное место во входном буфере хотя бы одной из таких станций; выбирается станция с максимальным (или минимальным) числом занятых мест;

- по крайней мере одна из станций, на которой можно начать обработку изделий типа T, является свободной; выбирается первая из станций, для которых выполняется это условие;

- обработка изделий типа T может быть начата на одной или нескольких станциях и имеется свободное место во входном буфере хотя бы одной из таких станций; выбирается станция с максимальным (или минимальным) числом занятых мест.

Термин «вариант 1» будет относиться в дальнейшем к использованию правил, при которых выбирается станция с максимальным числом занятых мест, а термин «вариант 2» — с минимальным числом занятых мест.

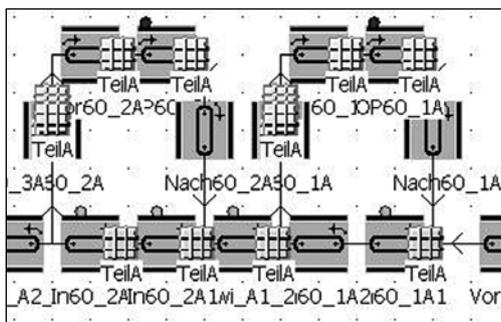


Рис. 4. Фрагмент модели, отображающий автоматические станции 6.1 и 6.2

#### Результаты имитационных экспериментов

Каждый прогон модели начинается с того, что в течение 1,5 ч разыгрывается «переходной процесс», в ходе которого рабочие станции модели заполняются изделиями и процесс функционирования производственной линии начинает демонстрировать признаки стационарного процесса. После этого

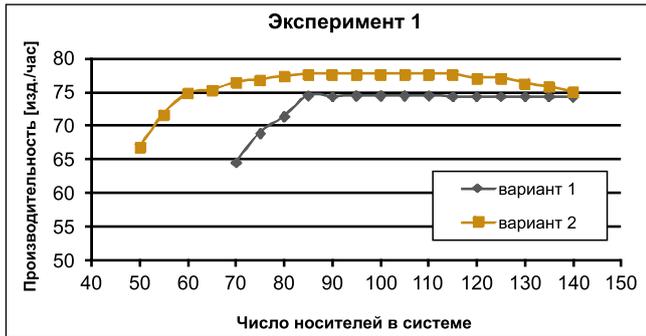


Рис. 5. Результаты эксперимента 1

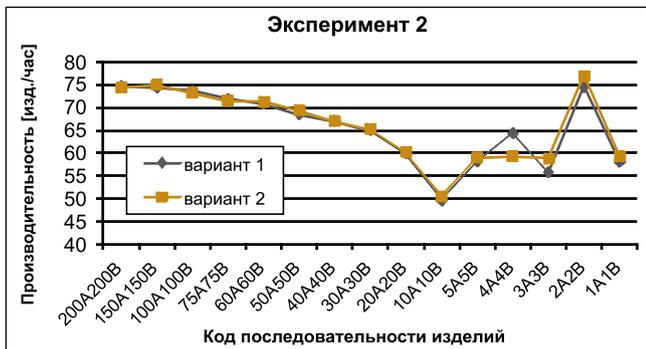


Рис. 6. Результаты эксперимента 2

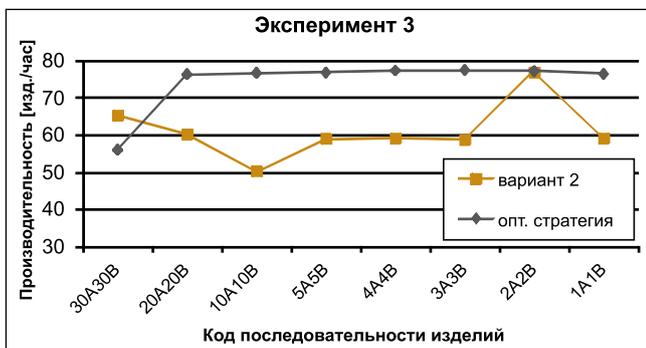


Рис. 7. Результаты эксперимента 3

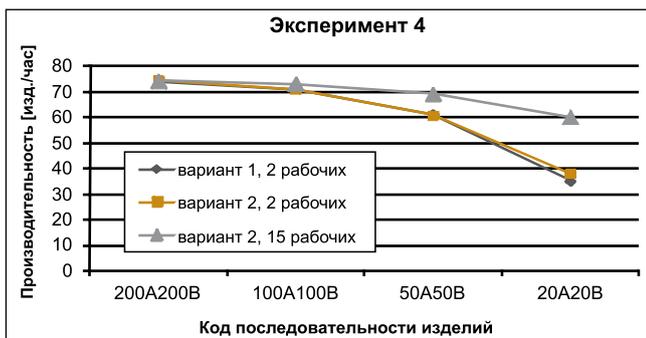


Рис. 8. Результаты эксперимента 4

наблюдение за процессом можно проводить на протяжении любого числа 8-часовых рабочих смен. Число таких смен выбиралось таким образом, что при любом составе и размере партий изделий в рамках заданной производственной программы обеспечивалось достаточное число наблюдений за ситуациями, в которых происходила смена типа изделий и решался вопрос

о переналадке станций. Основным показателем эффективности функционирования производственной линии является ее производительность (пропускная способность), измеряемая как среднее число изделий в час, снимаемых с носителей на станции 11. Именно этот показатель отображается на всех показанных ниже диаграммах, иллюстрирующих результаты имитационных экспериментов. Хотя вариант 2 почти во всех экспериментах демонстрирует лучшие результаты по сравнению с результатами, полученными при использовании варианта 1, последние также показаны на диаграммах с целью дополнительного подтверждения устойчивости модели и надежности результатов.

#### Эксперимент 1: варьирование числа носителей в системе

Понятие «отказаться от переналадки» означает, что часть автоматических станций используется, например, только для обработки изделий типа А, а другая — изделий типа В, что в принципе может приводить к простоям таких станций в период обработки партий «чужого» типа изделий. Однако при малых размерах партий это время простоя может быть небольшим, так как через относительно малый промежуток времени к станциям опять направляются изделия соответствующего им типа. Для данного эксперимента была выбрана повторяющаяся последовательность партий изделий «2A2B», при которой вообще не было необходимости выполнять переналадку станков. Были проведены прогоны модели с числом носителей, постоянно циркулирующих в системе, которое изменялось в пределах 50...140 ед. Результаты (рис. 5) указывают на недостаток варианта 1, при котором приемлемый уровень производительности достигается лишь при 85 носителях, так как при этом варианте проявляется тенденция к образованию максимально длинных очередей, вследствие чего большое число носителей «замораживаются» во входных буферах автоматических станций. При числе носителей в интервале 85...115 ед. система демонстрирует устойчивый режим работы с максимально возможной производительностью (в случае варианта 2), равной 77,6 изделий в час.

#### Эксперимент 2: варьирование размера партий изделий

Только два типа изделий (А и В) поступают на вход системы в виде одинаковых по размеру партий, причем этот размер изменяется в пределах от 200 до 1. На рис. 6 показаны результаты моделирования, полученные при использовании стандартных вариантов 1 и 2, когда все автоматические станции были доступны для обработки изделий обоих типов, и переналадка начиналась каждый раз, когда изделие нового типа появлялось на испытательной позиции. При размере партий <30 эффективность данных стратегий резко падает, так как уже больше 25% времени работы станций уходит на переналадку. При больших размерах партий экспериментальные попытки «освободить» какие-то станции от переналадки всегда приводили

к уменьшению производительности линии. Для размера партий  $\geq 30$  на рис. 6 показаны значения производительности, которые не могут быть улучшены за счет изменения стратегии переналадки.

### **Эксперимент 3: поиск оптимальных стратегий переналадки**

При среднем размере партий время простоя станций может равняться нулю, если в момент поступления новой партии во входных буферах станций будет находиться достаточное число изделий «своего» типа. С учетом данного предположения для каждого заданного размера партий, относящегося к диапазону  $< 30$ , проводилась серия прогонов модели, при которых испытывались различные схемы закрепления типа изделий за конкретными станциями. Например, для параллельно работающих станций 5.1-5.8 проверялись варианты, когда одна, две, три или четыре станции из восьми использовались для обработки изделий только типа А, то есть они были исключены из процесса переналадки, а на остальных станциях переналадка производилась. Для последовательностей равновеликих партий типа «20 А20 В», «10 А10 В» и т.д. таким путем удалось найти простую схему закрепления типа изделий за конкретными станциями, которая в совокупности с вариантом 2, означающим выбор входных буферов с минимальным числом занятых мест, была названа «оптимальной стратегией» и которая обеспечивала максимально возможную производительность линии при почти полном отказе от операций по переналадке (рис. 7). Суть данной схемы заключается в следующем: на станциях 5.1-5.4 и 6.1-6.3 обрабатываются изделия только типа А, на станциях 5.5-5.8 и 6.4-6.6 — изделия только типа В, а на станции 6.7 может производиться переналадка, если для конкретного изделия не находится места на одной из постоянно закрепленных за его типом станций. Аналогичным образом были найдены оптимальные стратегии переналадки для других последовательностей (в том числе разновеликих) партий изделий типов А, В, С и D.

### **Эксперимент 4: ограничение числа рабочих-наладчиков**

Все предыдущие эксперименты проводились при условии, что число рабочих-наладчиков было неограниченным. Так как общее число автоматических станций равно 15, предполагалось, что и рабочих-наладчиков имеется столько же, то есть в системе в принципе не могут возникнуть ситуации ожидания начала

заявленной переналадки станции. На рис. 8 для случая обоих стандартных вариантов показан эффект снижения производительности системы, когда число доступных рабочих-наладчиков уменьшилось до двух человек. При малых размерах партий, когда число операций по переналадке может быть относительно большим, такое снижение может составлять  $> 50\%$ .

### **Заключительные замечания**

Представленная модель производственной линии относится к категории «стандартных продуктов» в области современного имитационного моделирования производственных и логистических систем [2, 3]. У нее нет никакого «академического фона», то есть разработана она была по заказу промышленного предприятия и применялась только для решения задач, поставленных специалистами этого предприятия. «Стандартной» модель можно называть потому, что основана она на обычной дискретно-событийной парадигме имитационного моделирования, а для ее программной реализации был использован пакет Plant Simulation, который де-факто является стандартным инструментом, применяемым сегодня во всех автомобилестроительных концернах Германии.

При описании данной модели авторы не ставили перед собой цели дать читателю полное представление об ее устройстве, возможностях и решенных с ее помощью задачах. Важнее было показать, какими категориями и в какой последовательности мыслит разработчик модели, профессионально владеющий одним из самых современных инструментов прикладного имитационного моделирования, и в какой форме результаты моделирования предоставляются заказчику, достаточно хорошо понимающему возможности этого метода анализа процессов в производственных и логистических системах.

### **Список литературы**

1. *Дегтярев Ю.И.* Исследование операций: учебник для вузов по специальности АСУ. М.: Высшая школа, 1986.
2. *Толуев Ю.И.* Имитационное моделирование логистических сетей // Логистика и управление цепями поставок. 2008. 2/25. С. 53-63.
3. *Толуев Ю.И., Иванов Д.А.* Инженерные традиции в имитационном моделировании производственных и логистических систем // Имитационное моделирование. Теория и практика: Сб. трудов V всероссийской научно-практической конференции. СПб.: ФГУП ЦНИИ ТС, 2011, с. 75-82.

*Толуев Юрий Иванович — д-р техн. наук, проф. Института транспорта и связи (Рига, Латвия),  
Змановская Татьяна Петровна — магистр инж. наук, научный сотрудник Рижского технического университета.  
Контактный телефон +49 391 4090310.  
E-mail: juri.tolujew@iff.fraunhofer.de*

**Оформить подписку на журнал "Автоматизация в промышленности" вы можете:**

через каталоги "Роспечать" **81874** и "Пресса России" **39206** • сайт журнала <http://www.avtprom.ru> • Редакцию

**Адрес редакции:** 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, офис 360 Тел.: (495) 334-91-30, (926)212-60-97 E-mail: info@avtprom.ru